



МОДУЛЬ "ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА"

Квантовая теория

рабочая программа дисциплины (модуля)

Закреплена за кафедрой **Экспериментальной физики**

Учебный план b030302-ЦифрТех-19-1.plx
03.03.02 ФИЗИКА
Направленность (профиль): Цифровые технологии в геофизике

Квалификация **Бакалавр**

Форма обучения **очная**

Общая трудоемкость **6 ЗЕТ**

Часов по учебному плану	216	Виды контроля в семестрах: экзамены 7 зачеты 6
в том числе:		
аудиторные занятия	112	
самостоятельная работа	77	
часов на контроль	27	

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	6 (3.2)		7 (4.1)		Итого	
	Неделя		Неделя			
Вид занятий	УП	РПД	УП	РПД	УП	РПД
Лекции	32	32	32	32	64	64
Практические	16	16	32	32	48	48
Итого ауд.	48	48	64	64	112	112
Контактная работа	48	48	64	64	112	112
Сам. работа	24	24	53	53	77	77
Часы на контроль			27	27	27	27
Итого	72	72	144	144	216	216

Программу составил(и):
к.ф.-м.н., доцент, С.Л. Лебедев



Рабочая программа дисциплины
Квантовая теория

разработана в соответствии с ФГОС:
Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 07.08.2014г. №937)

составлена на основании учебного плана:
03.03.02 ФИЗИКА
Направленность (профиль): Цифровые технологии в геофизике
утвержденного учёным советом вуза от 20 июня 2019 г., протокол УС №6

Рабочая программа одобрена на заседании кафедры
Экспериментальной физики

Протокол от 17 05 2019 г. № 03/70
Срок действия программы: - уч.г.
Зав. кафедрой д.ф.-м.н., с.н.с. Ельников А.В.



Председатель УМС к.т.н., доцент Тараканов Д.В.
07 06 2019 г. № 06/19



1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1	Основной целью курса Квантовая теория является формирование у будущего бакалавра современной научной картины мира, ядром которой служит квантовая физика. Главные задачи курса: формирование представлений о корпускулярно-волновом дуализме, проблеме измерения в микромире; знакомство с математическим аппаратом и наиболее важными приложениями квантовой механики
-----	--

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ООП:	Б1.Б.08
2.1	Требования к предварительной подготовке обучающегося:
2.1.1	Теоретическая механика
2.1.2	Электроника
2.1.3	Линейная алгебра
2.1.4	Атомная физика
2.1.5	Линейные и нелинейные уравнения физики
2.1.6	Модуль "Методы математической физики"
2.1.7	Модуль "Общая физика"
2.2	Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:
2.2.1	Статистическая физика
2.2.2	Физика конденсированного состояния
2.2.3	Государственная итоговая аттестация

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

ОК-6: способностью работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия

ОК-7: способностью к самоорганизации и самообразованию

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

В результате освоения дисциплины обучающийся должен

3.1	Знать:
3.1.1	- основные понятия квантовой механики: состояние, наблюдаемая, принцип суперпозиции, соотношение неопределённости;
3.1.2	- особенности квантового описания процедуры измерения и постулаты квантово-механической теории измерений;
3.1.3	- основные теоремы, связанные с сомосопряжёнными операторами в гильбертовых пространствах и примеры гильбертовых пространств;
3.1.4	- физическую интерпретацию волновой функции с учётом спина, свойства симметрии волновых функций в многоэлектронных атомах, экспериментальные свидетельства существования оболочечной структуры атомов и т.д.
3.1.5	- примеры использования фундаментальных законов микромира для решения профессиональных задач геофизики
3.2	Уметь:
3.2.1	- применять теорию Бора к простейшим атомным системам, производить оценки значений физических величин на основе соотношения неопределённости;
3.2.2	- находить собственные функции, собственные значения линейных операторов, а также матричные элементы вероятностей квантовых переходов;
3.2.3	- выполнять информационный и эвристический поиск в сетях физико-математического профиля;
3.2.4	- вести библиографическую работу с привлечением современных информационных технологий;
3.2.5	- вести дискуссию, толерантно воспринимая этнические, личностные и другие особенности окружающих.

3.3	Владеть:
3.3.1	- ключевыми понятиями (состояние, наблюдаемая, дисперсия значений физической величины, стационарное состояние, плотность потока вероятности, спектры наблюдаемых и их виды и др.);
3.3.2	- методологией постановки задач в квантовой теории, в особенности, при использовании квантово-механической теории измерений;
3.3.3	- методами решения матричных и линейных ОДУ.
3.3.4	- элементами самоанализа, способами нахождения ошибок в собственных рассуждениях;

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Компетен-ции	Литература	Инте ракт.	Примечание
	Раздел 1. Экспериментальные основания квантовой механики.						
1.1	Экспериментальные основания квантовой механики. /Лек/	6	6	ОПК-3	Л1.3 Л1.4 Э2	0	Опрос
1.2	Закрепление знаний по теме лекции. /Пр/	6	0	ОК-6 ОПК-3	Л1.2Л2.2 Л2.3 Э2	0	Решение задач
1.3	Изучение литературы с использованием информационного и эвристического поиска в сетях физико-математического профиля. Подготовка к контрольной работе /Ср/	6	4	ОК-7 ОПК-3	Э2	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 2. Математический аппарат квантовой механики.						
2.1	Математический аппарат квантовой механики. /Лек/	6	8	ОПК-3	Л1.1 Л1.3 Л1.4Л2.1 Э2	0	Опрос
2.2	Закрепление знаний по теме "Математический аппарат квантовой механики" /Пр/	6	4	ОК-6 ОПК-3	Л1.2 Л1.4Л2.2 Л2.3 Э2	0	Решение задач
2.3	Библиографическая работа с привлечением средств современных информационных технологий /Ср/	6	6	ОК-7 ОПК-3	Л1.1 Э2	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 3. Общие свойства уравнения Шредингера						
3.1	Общие свойства уравнения Шредингера /Лек/	6	8	ОПК-3	Л1.3 Л1.4 Э2	0	
3.2	Закрепление знаний по теме "Общие свойства уравнения Шредингера" /Пр/	6	6	ОК-6 ОПК-3	Л1.2 Л1.4Л2.2 Л2.3 Э2	0	Решение задач
3.3	Изучение литературы, информационный поиск материалов по теме "Общие свойства уравнения Шредингера" /Ср/	6	6	ОК-7 ОПК-3	Л1.4 Э2	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 4. Одномерные квантово-механические задачи						
4.1	Одномерные квантово-механические задачи /Лек/	6	10	ОПК-3	Л1.3 Л1.4 Э2	0	Опрос

4.2	Контрольная работа по теме "Одномерные квантово-механические задачи" /Пр/	6	6	ОК-6 ОПК-3	Л1.2 Л1.4Л2.2 Э2	0	Контрольная работа
4.3	Подготовка к контрольной работе по теме "Одномерные квантово-механические задачи" /Ср/	6	8	ОК-7 ОПК-3	Э2	0	Подготовка к практическим занятиям
4.4	/Зачёт/	6	0	ОК-6 ОК-7 ОПК-3		0	
	Раздел 5. Движение в центрально-симметричном поле.						
5.1	Движение в центрально-симметричном поле. /Лек/	7	12	ОПК-3	Л1.3Л2.4 Э2	0	Опрос
5.2	Закрепление материала по теме "Движение в центрально-симметричном поле". /Пр/	7	8	ОК-6 ОПК-3	Л1.2Л2.2 Э2	0	Решение задач
5.3	Изучение литературы по теме "Движение в центрально-симметричном поле", проведение информационного и эвристического поиска в сетях физико-математического профиля. /Ср/	7	10	ОК-7 ОПК-3	Э2	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 6. Теория возмущений. Элементы теории излучения.						
6.1	Теория возмущений. Элементы теории излучения. /Лек/	7	8	ОПК-3	Л1.1 Л1.3Л2.1 Э2 Э3	0	Опрос
6.2	Закрепление знаний по теме "Теория возмущений. Элементы теории излучения". /Пр/	7	8	ОК-6 ОПК-3	Л1.1 Л1.2Л2.2 Э2 Э3	0	Решение задач
6.3	Теория возмущений. Элементы теории излучения. Подготовка к контрольной работе /Ср/	7	12	ОК-7 ОПК-3	Л1.2 Э2 Э3	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 7. Спин электрона.						
7.1	Спин электрона. /Лек/	7	3	ОПК-3	Л1.3Л2.1 Л2.4 Э2 Э3	0	Опрос
7.2	Закрепление знаний по теме "Спин электрона". /Пр/	7	7	ОК-6 ОПК-3	Л1.2Л2.2 Л2.4 Э2 Э3	0	Решение задач
7.3	Изучение литературы по теме "Спин электрона". /Ср/	7	10	ОК-7 ОПК-3	Л2.4 Э2 Э3	0	Подготовка к практическим занятиям

	Раздел 8. Квантовая механика систем, состоящих из одинаковых частиц.						
8.1	Квантовая механика систем, состоящих из одинаковых частиц. /Лек/	7	6	ОПК-3	Л1.1 Л1.3 Л1.4Л2.1 Л2.4 Л2.5 Э2 Э3	0	Опрос
8.2	Подготовка к контрольной работе по теме "Квантовая механика систем, состоящих из одинаковых частиц". /Пр/	7	5	ОК-6 ОПК-3	Л1.1 Л1.2 Л1.4Л2.2 Л2.4 Э2 Э3	0	Контрольная работа
8.3	Изучение литературы по теме, проведение информационного поиска. /Ср/	7	10	ОК-7 ОПК-3	Э2 Э3	0	Подготовка к практическим занятиям
	Раздел 9. Приближённые методы квантовой механики в приложении к задачам атомной спектроскопии						
9.1	Приближённые методы квантовой механики в приложении к задачам атомной спектроскопии /Лек/	7	3	ОК-6 ОПК-3	Л1.3Л2.1 Л2.5 Э2 Э3	0	Опрос
9.2	Закрепление знаний по теме "Приближённые методы квантовой механики в приложении к задачам атомной спектроскопии" /Пр/	7	4	ОК-6 ОПК-3	Л1.2Л2.1 Л2.2 Л2.5	0	Анализ ошибок контрольной работы
9.3	Изучение литературы по теме "Приближённые методы квантовой механики в приложении к задачам атомной спектроскопии" /Ср/	7	11	ОК-7 ОПК-3	Э1 Э2	0	Подготовка к экзамену
	Раздел 10. Квантовая теория						
10.1	/Экзамен/	7	27	ОК-6 ОК-7 ОПК-3		0	

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

5.1. Контрольные вопросы и задания

Приложение № 1

5.2. Темы письменных работ

Курсовые работы учебным планом не предусмотрены

5.3. Фонд оценочных средств

Приложение № 1

5.4. Перечень видов оценочных средств

Опрос; контрольная работа. Зачет. Экзамен

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л1.1	Савельев И. В.	Квантовая механика	СПб. [и др.]: Лань, 2005	20
Л1.2	Иродов И. Е.	Задачи по квантовой физике	Москва: Лаборатория знаний"" (ранее ""БИНОМ. Лаборатория знаний", 2015, http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_id=84093	1

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л1.3	Медведев Б. В.	Начала теоретической физики. Механика, теория поля. Элементы квантовой механики: Учебное пособие	Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007, http://www.iprbookshop.ru/12952	1
Л1.4	Блохинцев Д. И.	Основы квантовой механики	Санкт-Петербург: Лань, 2004, https://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=619	1

6.1.2. Дополнительная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Издательство, год	Колич-во
Л2.1	Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.	Квантовая механика. Нерелятивистская теория: Учеб. пособие для ун-тов	М.: Наука, 1974	7
Л2.2	Гинзбург И. Ф.	Введение в физику твердого тела: основы квантовой механики и статистической физики с отдельными задачами физики твердого тела	СПб. [и др.]: Лань, 2007	3
Л2.3	Парфенов П. С.	Квантовая механика: Методическое пособие к практикуму по квантовой физике	Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2012, http://www.iprbookshop.ru/66502.html	1
Л2.4	Овсюк Е. М., Веко О. В., Войнова Я. А., Кисель В. В., Редьков В. М.	Квантовая механика частиц со спином в магнитном поле	Минск: Белорусская наука, 2017, http://www.iprbookshop.ru/74074.html	1
Л2.5	Трясучёв В. А.	Квантовая механика для студентов технических вузов: Учебное пособие	Томск: Томский политехнический университет, 2017, http://www.iprbookshop.ru/84014.html	1

6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет"

Э1	Государственная публичная научно-техническая библиотека России (ГПНТБ России)
Э2	А.Л. Барабанов, Конспект лекций по квантовой механике, ч.1. М: МФТИ, 2005
Э3	А.Л. Барабанов, Конспект лекций по квантовой механике, ч.2. М: МФТИ, 2005

6.3.1 Перечень программного обеспечения

6.3.1.1	Microsoft Office
---------	------------------

6.3.2 Перечень информационных справочных систем

6.3.2.1	http://www.garant.ru/ Информационно-правовой портал Гарант.ру
6.3.2.2	http://www.consultant.ru/ Справочно-правовая система Консультант Плюс

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

7.1	Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа (практических занятий), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации оснащены: типовой учебной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации.
-----	---

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

--	--

ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА
Приложение к рабочей программе по дисциплине

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

Квалификация выпускника	бакалавр
Направление подготовки	03.03.02 Физика
Направленность (профиль)	Цифровые технологии в геофизике
Форма обучения	очная
Кафедра-разработчик	Кафедра экспериментальной физики
Выпускающая кафедра	Кафедра экспериментальной физики

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

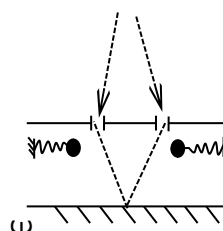
Этап: проведение текущего контроля успеваемости по дисциплине (6 семестр)
Примерные задания для контрольных работ

РАЗДЕЛЫ I – IV

Экспериментальные основания квантовой механики.

1. Рассмотрите мысленный эксперимент по дифракции электронов на двух щелях, за которыми разместили (по разные стороны) две отрицательно заряженные тонкие проволочки и упруго их закрепили (см. рисунок, на котором представлена в разрезе принципиальная схема опыта). По отклонению проволочек можно узнать, через какую щель пролетает электрон. Дать качественное описание того, что будет происходить с дифракционной картиной на экране, если опыт проводить для разных расстояний между проволочками, симметрично их раздвигая.
2. Применяя правила квантования Бора, найти уровни энергии связанных состояний частицы в центрально-симметричном поле, для которого потенциальная энергия U частицы имеет вид $U(r) = -\alpha/r^N$ ($N, \alpha > 0$). При каких значениях N задача теряет смысл? Попробуйте дать физическое толкование того, почему это происходит.
3. Применяя правила квантования Бора, найти уровни энергии связанных состояний частицы в центрально-симметричном поле, для которого потенциальная энергия U частицы имеет вид $U(r) = (\alpha/6) r^3$ ($\alpha > 0$ - постоянная).
4. Найти, с учетом движения ядра, выражение для энергии связи электрона атома водорода в основном состоянии и зависимость постоянной Ридберга от массы ядра.
5. Анализ мысленных экспериментов по дифракции электронов на одной и двух щелях. Понятие о соотношении неопределённостей. Волновая функция и «макрообстановка». Принцип суперпозиции. Как проявляет себя корпускулярно-волновой дуализм в случае дифракции электронов на двух щелях?
6. Применяя правила квантования Бора, найти уровни энергии связанных состояний частицы в центрально-симметричном поле, для которого потенциальная энергия U частицы имеет вид $U(r) = \alpha \ln(r/r_0)$ (α и r_0 - постоянные). При каких значениях α связанные состояния невозможны?
7. Используя правило квантования Бора найти уровни энергии частицы, движущейся в центрально симметричном поле

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r} - \frac{\beta}{r^2} \quad (\alpha, \beta > 0).$$
 При каких значениях β задача теряет смысл?
8. Найти импульс фотона, налетевшего на покоившийся свободный электрон, если импульс последнего оказался направленным под углом 90° к импульсу рассеянного фотона, а кинетическая энергия электрона отдачи совпала с энергией рассеянного фотона.
9. Используя соотношение неопределенностей оценить энергию основного



$$U(r) = -\frac{\alpha}{r} + \frac{\beta}{r^2}$$

состояния электрона в центрально симметричном поле

10. При облучении графита рентгеновским излучением с длиной волны λ было обнаружено, что максимальная кинетическая энергия электронов равна $0,5 \text{ МэВ}$. Найти длину волны рентгеновского излучения. Под каким углом φ к направлению падающего рентгеновского излучения могут отлетать электроны отдачи, если их импульс равен q ?
11. Атом водорода двигался со скоростью $v = 3,5 \text{ м/с}$, находясь в первом возбуждённом состоянии. В результате перехода в основное состояние атом испускает фотон. Определить угол, под которым вылетает фотон, по отношению к направлению первоначального движения атома, если кинетическая энергия последнего не изменилась.

Математический аппарат квантовой механики.

12. Рассмотрите оператор $\hat{A} = a\hat{p} + b\hat{x}$. Какому ограничению следует подчинить числа a и b для того, чтобы оператор \hat{A} был эрмитовым? Найти собственные функции и собственные значения наблюдаемой \hat{A} .
13. Дать общее определение квантово-механических средних значений, а также квадратичных дисперсий физических величин (наблюдаемых).
14. Доказать, что если дисперсия наблюдаемой в некотором состоянии равна нулю, то это состояние является собственным вектором оператора этой физической величины.
15. Найти оператор, эрмитово сопряженный оператору $\hat{A}\hat{B}\hat{C} + \hat{D}$, если среди этих линейных операторов только оператор \hat{B} является самосопряженным.
16. Используя определение операторов трансляции и инверсии для 3 – мерного случая ($\hat{T}_a\psi(\vec{r}) = \psi(\vec{r} + \vec{a}); \hat{I}\psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r})$), покажите, что $\hat{T}_a^{-1} = \hat{T}_{-a}\hat{I}$.
17. Найти оператор, эрмитово сопряженный оператору масштабного преобразования $\hat{M}_c\psi(x) = \sqrt{c}\psi(cx)$.
18. Используя процедуру Грама – Шмидта, построить ортонормированную систему из трёх линейно независимых и не ортогональных векторов ψ_1, ψ_2 и ψ_3 (привести явные формулы).
19. Доказать обобщённое соотношение неопределённостей для двух некоммутирующих наблюдаемых: $\Delta A^2 \Delta B^2 \geq \frac{1}{4} \Delta D^2$. Здесь: $[\hat{A}, \hat{B}] = i\hat{D}$.
20. Представить разложение функции, заданной на интервале $(0, 2\pi)$, в ряд Фурье как разложение по ортонормированному базису в гильбертовом пространстве. Собственными функциями какого самосопряженного оператора являются синусы и косинусы в этом разложении?
21. Для волновой функции частицы вида $\psi(x,0) = Ne^{-\frac{x^2}{b^2}} e^{ik_0 x}$ определить $\overline{(\Delta x)^2}$ и $\overline{(\Delta p)^2}$. Проверить справедливость соотношения неопределенностей.
22. Проверить соответствие между классическими и квантовыми скобками Пуассона

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{kx^2}{2} + \lambda \frac{x^4}{4}$$

для наблюдаемых x , p , H в системе с гамильтонианом (ангармонический осциллятор).

23. Найти собственные функции и собственные значения оператора $\hat{x} + \frac{\hat{a}}{dx}$ в пространстве функций $L_2(-\infty, \infty)$. Является ли этот оператор эрмитовым?
24. Доказать, что следующая сумма скалярных произведений вещественна и неотрицательна: $(\psi, \hat{A}\hat{A}^+\psi) + c(\psi, \hat{B}\hat{A}^+\psi) + c^*(\psi, \hat{A}\hat{B}^+\psi) + |c|^2(\psi, \hat{B}\hat{B}^+\psi) \geq 0$. Здесь \hat{A}, \hat{B} - линейные операторы, а c - комплексное число.

Общие свойства уравнения Шредингера

25. Показать, что плотность потока вероятности \vec{j} для одной частицы отлична от нуля, только если комплексная волновая функция $\psi(\vec{r})$ имеет фазу, зависящую от координат.
26. Найти для позитрония (система из электрона и позитрона, вращающихся вокруг общего центра инерции) расстояние между частицами в основном состоянии.
27. Доказать, что в процессе эволюции норма вектора состояния остаётся неизменной. Какое свойство оператора Гамильтона оказывается при этом решающим?
28. Записать нестационарное уравнение Шредингера для свободной частицы. Показать, что волновая функция вида (рассмотрите одномерный случай):
$$\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dk C(k) e^{ikx - iE(k)t/\hbar}, \text{ где } E(k) = \hbar^2 k^2 / 2m$$
, удовлетворяет этому уравнению (предполагается, что амплитуда Фурье $C(k)$ - гладкая функция, обеспечивающая сходимость интеграла по k на $\pm\infty$, а в остальном - произвольная).

Одномерные квантово-механические задачи

29. Волновая функция частицы имеет вид $\psi(x) = N e^{-\frac{x^2}{\sigma^2} + ikx}$ (N - нормировочный множитель). Определить плотность потока вероятности и найти функцию распределения вероятностей для координаты частицы.
30. Частица находится в бесконечно глубокой «потенциальной яме» в состоянии $\psi(x) = N(a^2 - x^2)$ ($|x| \leq a$). Разложите это состояние по собственным функциям оператора Гамильтона и определите таким образом вероятности различных значений энергии в этом состоянии.

$$\psi(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dk C(k) e^{ikx - iE(k)t/\hbar},$$

31. Найти коэффициент Фурье $C(k)$ для волновой функции

где $E(k) = \hbar^2 k^2 / 2m$, если в начальный момент времени $t=0$ $\psi(x, 0) = N e^{-\frac{x^2}{b^2}} e^{ik_0 x}$.

[Указание: использовать значение интеграла $\int_{-\infty}^{\infty} dy e^{i\lambda y} e^{-\frac{y^2}{a^2}} = a\sqrt{\pi} e^{-\frac{\lambda^2 a^2}{4}}$]

32. Пусть состояние гармонического осциллятора описывается волновой функцией $\exp(\alpha \hat{a}^+) \psi_0(x)$, где \hat{a}^+ – оператор рождения, α – комплексное число, а $\psi_0(x)$ – волновая функция основного состояния осциллятора. Показать, что это состояние является собственным для оператора уничтожения \hat{a} и определить соответствующее ему собственное значение [указание: разложить в ряд экспоненту и воспользоваться коммутационным соотношением $\hat{a}(\hat{a}^+)^n - (\hat{a}^+)^n \hat{a} = n(\hat{a}^+)^{n-1}$].

33. Вычислить среднее значение координаты частицы, находящейся в потенциальной яме с непроницаемыми стенками в состоянии, являющемся суммой основного и первого возбужденного состояний.

34. Постройте полный набор операторов для частицы, удерживаемой вблизи начала координат силами с потенциалом $U(r) = \frac{1}{2}(k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 z^2)$ (анизотропный осциллятор). Найдите спектр собственных значений гамильтониана этой частицы.

35. Пусть состояние линейного гармонического осциллятора описывается суперпозицией $\psi(x) = N(e^{-iE_0 t/\hbar} \psi_0(x) + e^{-iE_1 t/\hbar} \psi_1(x))$. Вычислить среднее значение координаты осциллятора в этом состоянии и определить характер ее зависимости от времени.

Компетенции, формируемые в процессе выполнения заданий

(знаком «*» отмечены задания повышенной сложности из приведённого выше списка)

<p>ОК-6: способность работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия; (Компетенция формируется в процессе коллективного обсуждения и анализа решения задач)</p>	<p>ОК-7: способностью к самоорганизации и самообразованию (здесь использованы задачи, решения которых подробно описаны в рекомендованных учебных пособиях)</p>	<p>ОПК-3: способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>
<p>№ 1, № 2, № 5; № 13, № 14;</p>	<p>№ 3, № 4; №6 - №11; №19</p>	<p>№ 12*- №18*; №20* - № 35*</p>

Этап: проведение промежуточного контроля

Вопросы к зачёту (6 семестр)

Экспериментальные основы квантовой механики

1. *Строение атома. Комбинационный принцип Ритца. Опыты Резерфорда. Проблема дискретности спектра частот и проблема устойчивости атома. Постулаты Бора и их применение.*
2. *Проблема излучения абсолютно чёрного тела. Гипотеза М. Планка. Формула Планка.*

3. *Фотоэффект и эффект Комптона – демонстрация двойственной природы света. Корпускулярно-волновой дуализм и гипотеза де-Бройля. Связь с постулатами Бора. Опыты Дэвиссона и Джермера, Тартаковского, Вавилова, Бибермана – Сушкина – Фабриканта.*

Математический аппарат квантовой механики.

4. *Линейные (векторные) пространства. Линейная зависимость векторов. Базисы. Бесконечномерные векторные пространства. Пространство Гильберта. Норма вектора. Примеры.*
5. *Понятие линейного оператора. Примеры. Лемма Рисса – Фреше и определение сопряжённого оператора по Эрмиту. Самосопряжённые операторы. Примеры. Матричные самосопряжённые операторы. Свойства операции эрмитового сопряжения.*
6. *Собственные функции и собственные значения линейных операторов. Основные свойства самосопряжённых операторов с дискретным спектром. Понятие вырождения. Кратность вырождения. Ортогонализация Грама – Шмидта.*
7. *Теорема Теплица – фон Неймана. Полные наборы наблюдаемых квантовых систем и соответствующие им базисы. Примеры.*

Квантово-механическая теория измерений.

8. *Состояния и наблюдаемые (физические величины) в классической и квантовой механике. Принцип соответствия и квантование. Примеры применения процедуры квантования.*
9. *Постулаты квантово-механической теории измерений. Постулат вероятности. Средние значения физических величин. Дисперсия – количественная мера неопределённости физической величины. Постулат редукции.*
10. *Обобщённое соотношение неопределённостей и одновременная измеримость физических величин. Примеры. Понятие о когерентных состояниях.*
11. *Стационарные состояния и оператор Гамильтона. Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера.*

Этап: проведение текущего контроля успеваемости по дисциплине (7 семестр)

РАЗДЕЛЫ V – IX

Движение в центрально-симметричном поле.

1. Проверить соответствие классических и квантовых скобок Пуассона для компонент момента количества движения $\vec{l} = \vec{r} \times \vec{p}$. Что можно сказать об одновременной измеримости наблюдаемых l_x и l_y , а также \vec{l}^2 и \hat{l}_z ?
2. Покажите, что в состоянии с определенным значением одной из трех компонент МКД, например, \hat{l}_z , средние значения \hat{l}_x и \hat{l}_y равны нулю. Как это можно было бы интерпретировать с точки зрения векторной модели для МКД?

3. Разложить по собственным функциям оператора $\hat{\ell}_3 = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi}$ функцию $\psi(\phi) = N(\cos \phi + \sin \phi)$ (N – нормировочный множитель). Проверить равенство $\sum_m |C_m|^2 = 1$ (C_m – коэффициенты Фурье).
4. Рассмотрите стационарные состояния симметричного 3-мерного гармонического осциллятора (потенциальная энергия $U(r) = \frac{1}{2}kr^2$). Применяя метод разделения переменных, найдите уровни энергии осциллятора. В чем заключается различие между уровнями энергии, находимыми из уравнения Шредингера и уровнями, находимыми на основе полуклассического условия квантования Бора (т.е. с использованием условия $|\vec{l}| = n\hbar$ для круговых орбит)?
5. Разложить по собственным функциям оператора $\hat{\ell}_3 = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \phi}$ функцию $\psi(\phi) = N(e^{i\phi} + \sin \phi)$. Проверить равенство $\sum_m |C_m|^2 = 1$ (C_m – коэффициенты Фурье).
6. Доказать, что для электрона в атоме водорода существует сохраняющаяся величина – вектор Рунге – Ленца: $\hat{A} = \hat{p} \times \hat{l} - \frac{e^2}{r} m \vec{r}$. Подсказка: рассмотрите коммутатор этой величины с гамильтонианом $\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} - \frac{e^2}{r}$. Здесь \hat{p}, \hat{l} – операторы импульса и момента импульса электрона соответственно.

Теория возмущений. Элементы теории излучения.

7. Рассмотрите в общем виде амплитуду вероятности перехода из одного стационарного состояния в другое в первом порядке теории возмущений и покажите, что вероятности прямого и обратного переходов (из ψ_n в ψ_k и из ψ_k в ψ_n) совпадают.
8. Определите в первом порядке теории возмущений амплитуду вероятности перехода линейного гармонического осциллятора из основного состояния в возбуждённое (т.е. в состояние с $n \geq 1$), если оператор возмущения

$$\hat{V}(t) = \begin{cases} -\lambda \hat{x} \sin \omega t, & |t| \leq T \\ 0, & |t| > T \end{cases}$$

(λ, ω – вещественные параметры).

9. Считая стационарные состояния некоторой квантовой системы известными, определить зависимость амплитуды перехода первого порядка теории возмущений

$$\hat{V}(t) = \begin{cases} -\lambda \hat{x} (T - |t|), & |t| \leq T \\ 0, & |t| > T \end{cases}$$

от T , где $2T$ – это время действия возмущения

10. Рассмотрите переходы между стационарными состояниями линейного гармонического осциллятора под действием возмущения $\hat{V}(t) = -\lambda \hat{x} \cos \omega t, (|t| \leq T)$ в первом порядке теории возмущений. Покажите, что эти переходы осуществляются либо с поглощением, либо с излучением одного кванта $\hbar \omega_0$ (ω_0 – собственная

частота осциллятора). Считая, что ω близка к ω_0 , вычислите вероятность вынужденного испускания кванта.

11. Рассмотрите в первом порядке теории возмущений амплитуду вероятности перехода для частицы, находящейся в глубокой потенциальной яме ($|x| \leq a$). Оператор возмущения $\hat{V}(t) = -\lambda \bar{x} \sin \omega t$, ($|t| \leq T$). Почему, если частица находилась вначале в основном состоянии, переходы возможны только в нечетные стационарные состояния?
12. Используя коммутационные соотношения операторов координаты и момента импульса, выведите правила отбора по квантовым числам l и m .

Спин электрона.

13. Найдите (нормированные) собственные векторы операторов спина электрона $\hat{s}_1 = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_1$, $\hat{s}_2 = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_2$, $\hat{s}_3 = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_3$, $\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3$ - матрицы Паули. Разложите произвольный (нормированный) вектор (спинор) $\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{pmatrix}$ по собственным векторам матрицы \hat{s}_2 . Каков физический смысл коэффициентов разложения?
14. Используя гейзенберговы уравнения движения для спина электрона, покажите, что они совпадают с классическими уравнениями, определяющими прецессию магнитного момента в магнитном поле с индукцией \vec{B} . Указание: гамильтониан взаимодействия магнитного момента с магнитным полем $H = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$, $\vec{\mu} = g_s \vec{s}$. Частным случаем какого общего утверждения является полученное соответствие?
15. Покажите, что синглетная волновая функция двух электронов соответствует нулевому значению полного спина.

Квантовая механика систем, состоящих из одинаковых частиц.

16. Вычислить квантовые дефекты S, P, D - термов атома лития, если известно, что энергия связи валентного электрона в основном состоянии равна $5,39 \text{ эВ}$, первый потенциал возбуждения равен $1,85 \text{ эВ}$, а длина волны головной линии диффузной серии равна 610 нм .
17. Опишите структуру спиновой волновой функции двух электронов в синглетном и триплетном состояниях.
18. Почему в синглетном спиновом состоянии двух электронов пространственная волновая функция допускает в среднем более близкое их расположение, чем в триплетном?
19. Опишите процедуру получения распределения электронной плотности в многоэлектронном атоме в приближении Томаса – Ферми.

Основы зонной теории (при недостатке часов изучение этого раздела может быть перенесено в курс «Физика конденсированных сред»)

20. С помощью соотношения неопределённостей найти число свободных электронов с кинетическими энергиями, попадающими в интервал $(\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon)$, если металл находится при температуре 0°K . Считать, что образец имеет форму прямоугольного параллелепипеда объёмом V . Указание: физически различимы только такие электронные состояния, для которых x^-, y^-, z^- проекции импульсов

$$\Delta p_1 = \frac{2\pi\hbar}{l_1}, \Delta p_2 = \frac{2\pi\hbar}{l_2}, \Delta p_3 = \frac{2\pi\hbar}{l_3},$$

отличаются на величину, превосходящую соответственно. Объём образца $V = l_1 l_2 l_3$.

21. Определив концентрацию свободных электронов и дырок, показать, что при достаточно низких температурах уровень Ферми в чистом беспримесном полупроводнике находится посередине запрещённой зоны.
22. Докажите теорему о том, что число пространственных состояний электрона в кристалле с N атомами равно N (используйте или граничные условия Борна – Кармана или нулевые условия).
23. Почему сопротивление чистых полупроводников падает с ростом температуры, а у проводников растёт?

Компетенции, формируемые в процессе выполнения заданий

(знаком «*» отмечены задания повышенной сложности из приведённого выше списка)

<p>ОК-6: способность работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия; (Компетенция формируется в процессе коллективного обсуждения и анализа решения задач)</p>	<p>ОК-7: способностью к самоорганизации и самообразованию (здесь использованы задачи, решения которых подробно описаны в рекомендованных учебных пособиях)</p>	<p>ОПК-3: способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>
<p>№ 12*, № 18*, № 21*;</p>	<p>№ 19*-20*; № 22*, № 23</p>	<p>№1* - №11*; № 13* - № 17*</p>

Примеры решений.

Задача. Используя правило квантования Бора найти уровни энергии частицы,

$$U(r) = -\frac{\alpha}{r} - \frac{\beta}{r^2} \quad (\alpha, \beta > 0).$$

движущейся в центрально симметричном поле значения β задача теряет смысл?

Решение. Наиболее простыми для анализа являются круговые орбиты. Сила, удерживающая частицу на орбите

$$\vec{F} = -\nabla U(r) = -\frac{\alpha}{r^3} \vec{r} - \frac{2\beta}{r^4} \vec{r}$$

есть центробежная сила, так что

$$\frac{p^2}{mr} = |\vec{F}| = \frac{\alpha}{r^2} + \frac{2\beta}{r^3}.$$

Условие квантования Бора имеет вид:

$$|\vec{l}| = |\vec{r} \times \vec{p}| = rp = n\hbar, n = 1, 2, \dots$$

Исключая импульс, из двух последних уравнений находим уравнение для определения радиуса орбиты:

$$\frac{n^2 \hbar^2}{mr^3} = \frac{\alpha}{r^2} + \frac{2\beta}{r^3}.$$

Таким образом, $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m\alpha} - \frac{2\beta}{\alpha}$, так что $\beta < \frac{\hbar^2}{2m}$. Задача теряет смысл, если это неравенство не выполняется. Уровни энергии

$$E_n = \frac{p^2}{2m} - \frac{\alpha}{r} - \frac{\beta}{r^2} = \frac{-\alpha}{2r} = \frac{-m\alpha^2}{2(n^2 \hbar^2 - 2m\beta)}.$$

Задача. Доказать, что следующая сумма скалярных произведений вещественна и неотрицательна: $\dot{}$.

Здесь \hat{A}, \hat{B} - линейные операторы, а c - комплексное число.

Решение. Пользуясь линейностью скалярного произведения, соберём все операторы при втором сомножителе в скалярном произведении:

$\dot{}$.

В двух скобках стоят взаимно сопряжённые операторы. В итоге получаем:

$\dot{}$.

Последнее неравенство имеет вид $(\Phi, \Phi) \geq 0$ и выполняется всегда, согласно определению пространства Гильберта. Произведённая «переброска» левого операторного сомножителя к левому элементу скалярного произведения возможна, так как эрмитово сопряжение оператора, стоящего в скобках, определено. ■

Задача. Доказать, что в процессе эволюции норма вектора состояния остаётся неизменной. Какое свойство оператора Гамильтона оказывается при этом решающим?

Доказательство. Норма вектора $\|\Psi\|$ в пространстве Гильберта задаётся корнем квадратным из скалярного произведения

$$(\Psi, \Psi) = \int_D \Psi^{\dot{}}(X, t) \Psi(X, t) dX,$$

где D - область определения волновой функции (ВФ), а X обозначает всю совокупность пространственных переменных, от которых зависит ВФ. Как видно из определения, норма вектора, вообще говоря, зависит от времени. Эволюция вектора состояния подчиняется уравнению Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(X, t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi(X, t), -$$

в котором \hat{H} представляет оператор Гамильтона данной квантовой системы. Имеем:

$$\frac{d}{dt}(\Psi, \Psi) = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t}, \Psi \right) + \left(\Psi, \frac{\partial \Psi}{\partial t} \right).$$

Здесь мы использовали возможность дифференцирования интеграла по параметру t .

Подставляя вместо производных ВФ вектор $\frac{1}{i\hbar} \hat{H} \Psi$, получаем:

$$\frac{d}{dt}(\Psi, \Psi) = \left(\frac{1}{i\hbar} \hat{H} \Psi, \Psi \right) + \left(\Psi, \frac{1}{i\hbar} \hat{H} \Psi \right) = \frac{-1}{i\hbar} (\hat{H} \Psi, \Psi) + \frac{1}{i\hbar} (\hat{H} \Psi, \Psi) = 0.$$

В последнем равенстве мы использовали свойства скалярного произведения $((c\Psi, a\Phi) = c^{\dot{}} a(\Psi, \Phi))$ и эрмитовость оператора Гамильтона. ■

Задача. Пусть состояние линейного гармонического осциллятора описывается суперпозицией $\psi(x) = N \left[e^{\frac{-iE_0 t}{\hbar}} \psi_0(x) + 2e^{\frac{-iE_1 t}{\hbar}} \psi_1(x) \right]$. Вычислить среднее значение координаты осциллятора в этом состоянии и определить характер ее зависимости от времени.

Решение. Найдём нормировочный множитель N из условия:

$$(\psi, \psi) = N^2 \left(e^{-iE_0 t/\hbar} \psi_0 + 2e^{-iE_1 t/\hbar} \psi_1, e^{-iE_0 t/\hbar} \psi_0 + 2e^{-iE_1 t/\hbar} \psi_1 \right) = 1.$$

Так как стационарные состояния попарно ортогональны и нормированы, мы получим:

$$N^2(1+4) = 1, N = \frac{1}{\sqrt{5}}.$$

Выразим оператор координаты через операторы рождения и уничтожения:

$$\hat{x} = \gamma \hat{i}.$$

Здесь мы использовали определения операторов:

$$\hat{a}^+ \hat{i} = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\hat{p} + im\omega \hat{x}), \hat{a} \hat{i} = \frac{1}{\sqrt{2\hbar m\omega}} (\hat{p} - im\omega \hat{x}).$$

Среднее значение координаты

$$\dot{x} = (\psi, \hat{x} \psi).$$

При вычислении скалярного произведения следует учесть повышающий и понижающий характер операторов $\hat{a}^+ \hat{i}$ и $\hat{a} \hat{i}$: $\hat{a}^+ \hat{i} \psi_n = \sqrt{n+1} \psi_{n+1} \hat{i}$, $\hat{a} \hat{i} \psi_n = \sqrt{n} \psi_{n-1} \hat{i}$, причём, оператор уничтожения аннулирует основное состояние ψ_0 . В итоге находим:

$$\dot{x} = \frac{1}{5} \gamma \hat{i}.$$

В последнем равенстве использовано явное выражение для спектра осциллятора:

$$E_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2} \right), n = 0, 1, 2, \dots$$

Задача. Рассмотрите в общем виде амплитуду вероятности перехода из одного стационарного состояния в другое в первом порядке теории возмущений и покажите, что вероятности прямого и обратного переходов (из ψ_n в ψ_k и из ψ_k в ψ_n) совпадают.

Решение. В первом порядке теории возмущений амплитуда $C_k^{(1)}$ перехода из стационарного состояния $e^{\frac{-iE_n t}{\hbar}} \psi_n$ в стационарное состояние $e^{\frac{-iE_k t}{\hbar}} \psi_k$ равна

$$C_k^{(1)} = \frac{1}{i\hbar} \int_{-T}^T e^{-i\omega_{nk} t} (\psi_k, \hat{V}(t) \psi_n) dt.$$

Здесь: $\hbar \omega_{nk} = E_n - E_k$, и мы учли, что оператор возмущения отличен от нуля на конечном интервале $-T \leq t \leq T$. Если начальное и конечное состояния поменять местами, то мы, очевидно, будем иметь

$$C_n^{(1)} = \frac{1}{i\hbar} \int_{-T}^T e^{-i\omega_{kn} t} (\psi_n, \hat{V}(t) \psi_k) dt.$$

Вероятности этих переходов в указанном порядке теории возмущений выражаются квадратами величин $C_k^{(1)}$ и $C_n^{(1)}$:

$$|C_n^{(1)}|^2 = \frac{1}{\hbar^2} \int_{-T}^T e^{-i\omega_{kn} t} (\psi_n, \hat{V}(t) \psi_k) dt \cdot \int_{-T}^T e^{i\omega_{kn} t} (\psi_k, \hat{V}(t) \psi_n) dt = |C_k^{(1)}|^2.$$

Равенство имеет место благодаря тому, что

$$\omega_{kn} = -\omega_{nk}, (\psi_n, \hat{V}(t) \psi_k) \hat{i} = (\hat{V}(t) \psi_k, \psi_n) \hat{i}$$

(использованы: эрмитовость оператора возмущения и свойства скалярного произведения).

Задача. Вычислить квантовые дефекты S, P, D – термов атома лития, если известно, что энергия связи валентного электрона в основном состоянии равна $5,39 \text{ эВ}$, первый потенциал возбуждения равен $1,85 \text{ эВ}$, а длина волны головной линии диффузной серии равна 610 нм .

Решение. Уровни энергии атома с одним валентным электроном, находящимся в основном состоянии на подуровне nS , описываются моделью валентного электрона. Значения энергии имеют вид:

$$E_{nl} = \frac{-m_e e^4}{2\hbar^2(n+\sigma_l)^2},$$

где $n=1,2,\dots$, σ_l – квантовый дефект, соответствующий подуровню с орбитальным квантовым числом $l=0,1,\dots,n-1$. У лития электрон в основном состоянии находится на втором уровне ($n=2$), так как в силу принципа Паули он не может опуститься на нижний (первый) уровень, где пара электронов «оккупировала» все квантовые числа. Так как энергия связи с точностью до знака совпадает с энергией основного состояния, для σ_0 находим ($n=2; l=0, S$ – подуровень):

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{m_e e^4 / \hbar^2}{10,78 \text{ эВ}}} - 2 \approx -0,41.$$

Для быстрой оценки удобно использовать значения известных констант:

$$\frac{m_e e^4}{\hbar^2} = \frac{e^2}{\hbar c} \cdot \frac{\hbar}{m_e c} \cdot \frac{m_e e^2}{\hbar^2} m_e c^2 = \frac{1}{137,036} \cdot 3,9 \cdot 10^{-11} \text{ см} \cdot \frac{1}{0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см}} 0,51 \text{ MeV}$$

$\approx 27,16 \text{ эВ}$.

Первый потенциал возбуждения определяется по разности энергий

$$E_{2P} - E_{2S} = \frac{-m_e e^4}{2\hbar^2(2+\sigma_1)^2} + 5,39 \text{ эВ} = 1,85 \text{ эВ}.$$

Тогда для σ_1 получаем ($n=2; l=1, p$ – подуровень):

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{27,16}{7,1}} - 2 = 1,96 - 2 = -0,04.$$

Головная линия диффузной серии образована переходами с уровня $3D$ ($n=3; l=2$) на уровень $2P$. Имеем:

$$\frac{-m_e e^4}{2\hbar^2(3+\sigma_2)^2} + \frac{m_e e^4}{2\hbar^2(2+\sigma_1)^2} = \hbar \frac{2\pi c}{\lambda_{610}} = 2,032 \text{ эВ}.$$

Так как выше получено, что $\frac{m_e e^4}{2\hbar^2(2+\sigma_1)^2} = 3,54 \text{ эВ}$, для σ_2 находим значение $+0,0009$, что равносильно нулевому значению с принятой точностью. Сближение уровней E_{nl} с боровскими уровнями должно наблюдаться с ростом орбитального квантового числа, так как $\sigma_l \sim 1/l$.

Этап: проведение промежуточного контроля

Вопросы к экзамену (7 семестр)

Повторение

1. Основные математические средства описания атомных систем (наблюдаемые, состояния). Постулаты квантово-механической теории измерений.
2. Квантово-механический принцип соответствия. Примеры.
3. Нестационарное уравнение Шредингера. Задача Коши для нестационарного УШ.
4. Общие свойства одномерного движения. Связь характера спектра оператора Гамильтона с характером движения частицы.

Одномерные квантово-механические системы

5. Частица в потенциальной яме конечной глубины. Стандартные условия. Дискретный спектр и собственные функции гамильтониана. Характерные особенности пространственного поведения волновых функций. Предел бесконечно глубокой потенциальной ямы.
6. Линейный гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения и их свойства. Собственные значения оператора Гамильтона.
7. Стационарные состояния осциллятора. Чётность. Характерные особенности пространственного поведения волновых функций стационарных состояний.
8. Движение частицы в поле потенциального барьера. Непрерывность спектра и проблема нормировки волновых функций непрерывного спектра.
9. Коэффициенты отражения и прохождения сквозь потенциальный барьер. Сохранение числа частиц. Туннельный эффект.

Пространственные задачи квантовой механики

10. Операторы момента импульса. Их выражение в декартовых и сферических координатах. Собственные функции и собственные значения. Одновременная измеримость.
11. Движение частицы в центрально-симметричном поле. Разделение переменных. Общие свойства движения в зависимости от вида потенциала.
12. Квантовая механика водородоподобного атома. Уровни энергии и кратность их вырождения (без учёта и с учётом спина электрона). Спектроскопические обозначения уровней.
13. Свойства волновых функций стационарных состояний водородоподобного атома: пространственное поведение, зависимость от квантовых чисел, чётность.
14. Модель валентного электрона. Гамильтониан и уровни энергии. Частичное снятие вырождения. Спектральные серии для атомов щелочных металлов.

Квантовая механика систем тождественных частиц

15. Опыт Штерна и Герлаха. Понятие о спине электрона.
16. Математическое описание спина. Операторы спина и их свойства. Волновая функция электрона с учётом спина, спиноры. Вероятностная интерпретация.

17. Принцип неразличимости и его математическая формулировка. Теорема о связи спина и свойств симметрии волновых функций тождественных фермионов и бозонов. Детерминант Слэтера. Принцип Паули.
18. Генезис периодической системы элементов Менделеева. Атомные оболочки. Экспериментальные свидетельства существования оболочек.
19. Квантовая механика молекулы водорода. Поправки первого порядка к уровням энергии. Орто- и пара-водород. Природа химической связи.

Приближённые методы квантовой механики

20. Стационарная теория возмущений. Поправки первого порядка к уровням энергии и к волновым функциям (случай невырожденных уровней).
21. Теория квантовых переходов. Постановка задачи. Амплитуда вероятности перехода.
22. Нестационарная теория возмущений. Амплитуда перехода в первом порядке теории возмущений.
23. Взаимодействие атома с монохроматической электромагнитной волной в дипольном приближении. Резонансный характер вынужденных квантовых переходов.

Элементы зонной теории твёрдого тела

24. Адиабатическое приближение для электронных состояний в кристалле. Периодический потенциал Теорема Блоха и квазиимпульс.
25. Зонный характер спектра электронных состояний в кристалле. Понятие обратной решётки.
26. Граничные условия Борна – Кармана. Зона Бриллюэна и заполнение квазинепрерывного спектра состояний в зоне Бриллюэна. Классификация кристаллических твёрдых тел по типу проводимости.

Ансамбль атомов в равновесии с излучением

27. Вынужденные электродипольные переходы и коэффициенты Эйнштейна.
28. Вывод формулы М. Планка по Эйнштейну.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций

Этап: проведение текущего контроля успеваемости по дисциплине

Текущий контроль предназначен для проверки качества формирования компетенций, уровня овладения теоретическими и практическими знаниями, умениями и навыками. Оценивание знаний теоретического материала по каждому разделу проводится на практических занятиях. Умение решать задачи проверяется контрольной работой.

Критерии оценивания контрольных работ

Проверяемые компетенции	Критерии оценивания	Оценка
ОК-6,	Все задачи решаются полностью: приводится	Отлично

ОК-7, ОПК-3	верное аналитическое решение, делается правильный расчет.	
	Приведены решения задач контрольной работы, но есть небольшие недочеты при использовании законов, формул, в целом не влияющих на ход решения, допущены ошибки при вычислении численных результатов. Общая доля невыполненных заданий не превышает 5–7 % от общего объема контрольной работы.	Хорошо
	Приведены решения не всех заданий контрольной работы, есть существенные недостатки при выводе аналитических выражений, не проведены численные расчеты. Общая доля невыполненных заданий составляет не более 50 % от общего объема контрольной работы.	Удовлетворительно
	Решения заданий приведены неверно или вовсе отсутствуют. Общая доля невыполненных заданий составляет более 50 % от общего объема контрольной работы.	Неудовлетворительно

Этап: проведение промежуточной аттестации по дисциплине

Критерии оценивания к экзамену: оценка «неудовлетворительно» на экзамене ставится в случае получения студентом низшего значения критерия оценивания по любому из показателей оценивания. В остальных случаях она вычисляется как среднее по дескрипторам «знает» и «умеет».

Методические рекомендации по подготовке к зачету (экзамену).

Зачет или экзамен являются итогом работы студента в течение семестра или учебного года.

Подготовка к зачету (экзамену) требует определенного алгоритма действий. Прежде всего, необходимо ознакомиться с вопросами, которые выносятся на зачет. На этой основе следует составить план повторения и систематизации учебного материала. Нельзя ограничиваться только конспектами лекций, следует проработать рекомендованные учебные пособия и литературу. В отдельной тетради на каждый вопрос зачета (экзамена) следует составить краткий план ответа в логической последовательности и с фиксацией необходимого иллюстративного материала (примеры, рисунки, схемы, цифры).

Если отдельные вопросы программы остаются неясными, их необходимо написать на полях конспекта, чтобы выяснить на консультации. Важнейшую информацию следует обозначать другим цветом, это помогает лучше ее запомнить.

Следует постепенно переходить от повторения материала одной темы к другой. Когда повторен и систематизирован весь учебный материал, необходимо пересмотреть его еще раз уже со своими записями, проверяя мысленно, как усвоен материал.

Условия допуска студента к зачету

Для того, чтобы быть допущенным к сдаче зачета, студенту необходимо выполнить следующие требования:

- 1) регулярно посещать аудиторные занятия по дисциплине (пропуск занятий не допускается без уважительной причины); в случае пропуска занятия студент должен быть готов ответить на вопросы преподавателя, относящиеся к пропущенной теме;
- 2) выполнить контрольные работы на оценку «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно», провести анализ ошибок контрольной работы.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

Этап: Проведение текущего контроля успеваемости

Результаты текущего контроля знаний оцениваются по двухбалльной шкале с оценками:

- «аттестован»;
- «не аттестован».

Оценка	Критерий оценивания
Аттестован	Студент аттестован, если он выполнил не менее 70% заданий по дисциплине (самостоятельная работа, домашние задания, контрольная работа), демонстрирует достаточный уровень усвоения знаний
Не аттестован	Студент не аттестован, если он выполнил менее 70% заданий по дисциплине (самостоятельная работа, домашние задания, контрольная работа), демонстрирует низкий уровень усвоения знаний, имеет пропуски без уважительной причины более 5%.

Этап: Проведение промежуточной аттестации - зачет (6 семестр)

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются по двухбалльной шкале с оценками:

- «зачтено»;
- «не зачтено»;

Дескриптор компетенции	Показатель оценивания	Оценка	Критерий оценивания
Знает	<ul style="list-style-type: none"> - экспериментальные основания квантовой механики; экспериментальные основы и средства описания дуализма волн и частиц; - особенности квантового описания микросистем и используемый для этого математический аппарат, а также интерпретацию процедуры измерения; - основные квантово-механические характеристики свободных частиц, соотношения де Бройля и 	зачтено	<ul style="list-style-type: none"> - на 100% проведён анализ ошибок контрольной работы; - отвечает на вопрос при видоизменении заданий; - теоретическое содержание усвоено не менее, чем на 60%;
		Не зачтено	<ul style="list-style-type: none"> теоретическое содержание усвоено менее, чем на 60%; анализ ошибок контрольной работы проведен не полностью (<75%);

	<p>Эйнштейна, принцип неопределённостей, постулаты Бора и их интерпретацию в старой квантовой теории;</p> <ul style="list-style-type: none"> - основы математического аппарата квантовой механики (понятие и свойства самосопряжённых операторов, 		
Умеет	<ul style="list-style-type: none"> - умение использовать соотношения корпускулярно-волнового дуализма и квантовые постулаты в сочетании с законами сохранения; - умение использовать и интерпретировать постулаты квантово-механической теории измерений в анализе простейших моделей квантовых систем; - применять общие положения квантовой теории к анализу конкретных квантовых систем; - использовать законы сохранения для объяснения простейших квантовых процессов в рамках «старой» квантовой теории; - проводить вычисления с использованием некоммутативной алгебры наблюдаемых и общих свойств гильбертовых пространств. - проводить информационный и эвристический поиск в сетях физико-математического профиля <p>Вести библиографическую работу с привлечением современных информационных технологий</p>	зачтено	- наличие перечисленных умений в объёме не ниже, чем 60%.
		не зачтено	- отсутствие перечисленных умений или их наличие в объёме ниже, чем 60%.
Владеет	- ключевыми понятиями (состояние, наблюдаемая,	зачтено	навыками решения элементарных дифференциальных уравнений;

	дисперсия значений физической величины, стационарное состояние, плотность потока вероятности, спектры наблюдаемых и их виды и др.);		техники матричных вычислений и методами анализа.
	- техникой расчётов в некоммутативной алгебре (Гейзенберга), понятием сопряжённого оператора и его использованием в конкретных задачах;	не зачтено	студент не владеет техникой вычислений и методами анализа.

Этап: Проведение промежуточной аттестации - экзамен (7 семестр)

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются по четырёхбалльной шкале с оценками:

- «отлично»;
- «хорошо»;
- «удовлетворительно»;
- «неудовлетворительно»;

Дескриптор компетенции	Показатель оценивания	Оценка	Критерий оценивания
Знает	- имеет чёткое представление о средствах квантово-механического описания атомных систем (т.е. о волновой функции, уравнении Шрёдингера, принципе соответствия, наблюдаемых и измеряемых характеристиках состояний); - знает основные квантово-механические характеристики свободных электронов в беспримесных кристаллах, понятие энергии Ферми, и имеет представление о функции распределения Ферми - Дирака; - знает основы математического аппарата квантовой механики (понятие и свойства самосопряжённых операторов, конкретные примеры самосопряжённых и несамосопряжённых	отлично	- теоретическое содержание усвоено не менее, чем на 90%; - на 100% проведён анализ ошибок контрольной работы; - отвечает на вопрос при видоизменении заданий;
		хорошо	теоретическое содержание усвоено не менее, чем на 75%; анализ ошибок контрольной работы проведён > чем на 60%;
		удовлетворительно	теоретическое содержание усвоено не менее, чем на 60%; анализ ошибок контрольной работы проведён не менее, чем на 50%;
		неудовлетворительно	теоретическое содержание усвоено в объёме менее, чем на 50%; анализ ошибок контрольной

	<p>операторов, понятие квантово-механического среднего и дисперсии);</p> <ul style="list-style-type: none"> - знает классификацию спектральных серий водородоподобных атомов, и методы теории возмущений, используемые для нахождения спектров; - теорию атома водорода, 		<p>работы проведён менее, чем на 50%;</p>
Умеет	<ul style="list-style-type: none"> - использовать точные и приближённые методы решения уравнения Шредингера, находить средние значения физических величин и вероятности квантовых переходов; - определять квантовые числа стационарных состояний лёгких атомов, а также спектральные серии по диаграммам Гротриана; - использовать общие критерии симметрии и сохранения физических величин, принцип неразличимости и принцип Паули и др. - находить полные наборы операторов для простых квантовых систем и строить соответствующие базисные наборы волновых функций. - проводить информационный и эвристический поиск в сетях физико-математического профиля - вести библиографическую работу с привлечением современных информационных технологий 	отлично	- наличие практических умений в объёме не ниже 90%
		хорошо	- наличие перечисленных умений в объёме не ниже, чем 75%.
		удовлетворительно	- наличие перечисленных умений в объёме не ниже, чем 60%.
		неудовлетворительно	- наличие перечисленных умений в объёме ниже, чем 60%.
Владеет	- ключевыми понятиями	зачтено	навыками решения элементарных

	<p>(состояние, наблюдаемая, дисперсия значений физической величины, стационарное состояние, плотность потока вероятности, спектры наблюдаемых и их виды и др.);</p> <ul style="list-style-type: none"> - техникой расчётов в некоммутативной алгебре (Гейзенберга), понятием сопряжённого оператора и его использованием в конкретных задачах; - методом разделения переменных (при решении ДУЧП второго порядка); 		<p>дифференциальных уравнений; техникой матричных вычислений и методами анализа.</p>
		не зачтено	студент не владеет техникой вычислений и методами математического анализа;

Критерии оценивания к экзамену: оценка «неудовлетворительно» на экзамене ставится в случае получения студентом низшего значения критерия оценивания по любому из показателей оценивания. В остальных случаях она вычисляется как среднее по дескрипторам «знает» и «умеет». Получение положительной оценки свидетельствует о достаточной сформированности компетенций ОК-6, ОК-7, ПК-3.