

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Б1.О.16.03 КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Направление подготовки (специальность) 03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Профиль подготовки (специализация)

Форма обучения очная

Год набора 2024

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Программу составили
профессор, д.ф.-м.н. Федоров А.С.
доцент, к.ф.-м.н. Николаев С.В.

1 Цели и задачи изучения дисциплины

1.1 Цель преподавания дисциплины:

- сформировать правильное понимание явлений атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц.
- обучить студентов основному математическому аппарату квантовой теории;
- сформировать умения и навыки решения квантово-механических задач из различных областей физики;
- подготовить студентов к дальнейшему самообразованию и применению полученных знаний в научно-исследовательской деятельности.

1.2 Задачи изучения дисциплины:

В результате изучения дисциплины студент должен приобрести знания, умения и навыки, необходимые для его профессиональной деятельности, в частности:

- сформировать представление о теоретических и практических проблемах решения квантово-механических задач;
- овладеть основными понятиями и математическими методами квантовой теории;
- сформировать навык и умение выбора оптимальной методики решения поставленной квантово-механической задачи;
- использовать полученные знания при проведении научных исследований.

1.3 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы высшего образования:

Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения по дисциплине
ОПК-1 Способен применять современные теоретические модели физических явлений, процессов и систем, а также результаты экспериментальных исследований в фундаментальных и прикладных разработках;	
ОПК-1.1 Демонстрирует владение фундаментальными законами общей и теоретической физики	знать математические основы квантовой механики, основы релятивистской квантовой механики; уметь использовать математический аппарат квантовой механики при решении задач; уметь решать задачи квантовой механики в рамках теории возмущений; владеть математическим аппаратом квантовой механики, методами решения задач для сложных потенциалов
ОПК-1.2 Использует экспериментальные и теоретические методы исследований	знать базовые модели в квантовой механике, волновое уравнение Шредингера уметь проводить анализ результатов; уметь решать задачи для центрально-симметричного потенциала; владеть навыками решения базовых квантово-механических задач; владеть приближёнными методами решения задач квантовой механики.

Дисциплина реализуется без применения ЭО и ДОТ

2 Объем дисциплины (модуля)

Вид учебной работы	Всего, зачетных единиц (акад.час)	Семестр	
		6	7
Общая трудоемкость дисциплины	7 (108)	3 (108)	4 (144)
Контактная работа с преподавателем:	4 (144)	2 (72)	2 (72)
занятия лекционного типа	2 (72)	1 (36)	1 (36)
практические занятия	2 (72)	1 (36)	1 (36)
Самостоятельная работа обучающихся	2 (72)	1 (36)	1 (36)
Вид промежуточной аттестации (Зачет)	36	Зачёт	Экзаме н

3 Содержание дисциплины (модуля)

№ п/п	Вид работ	Темы занятия	Объем часов	Семестр /курс	Часы в эл. формате
Раздел 1. Экспериментальные предпосылки квантовой механики					
1.	Лек	Ключевые эксперименты, необъяснимые с позиций классической физики. Линейчатый характер атомных спектров. Внешний фотоэффект. Опыт Франка и Герца. Опыты по дифракции Томсона, Дэвиссона и Джермера. Эффект Комптона. Опыт Штерна и Герлаха.	4	6	
2.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 2. Математические основы квантовой механики					
1.	Лек	Гильбертово пространство	1	6	
2.	Лек	Теория линейных операторов	1	6	
3.	Лек	Собственные векторы и собственные значения оператора	1	6	
4.	Лек	Теория представлений. Изменение представления	1	6	
5.	Пр	Математический аппарат квантовой механики	4	6	
6.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 3. Постулаты квантовой механики					
1.	Лек	Правила квантования	1	6	
2.	Лек	Соотношение неопределенностей для физических величин	1	6	
3.	Лек	Координатное, импульсное и энергетическое представления	2	6	
4.	Пр	Теория представлений (координатное, импульсное, энергетическое)	2	6	
5.	Пр	Принцип неопределенности Гейзенберга	2	6	
6.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 4. Квантовая динамика					
1.	Лек	Изменение квантовых состояний во времени	1	6	
2.	Лек	Представление Гейзенберга	1	6	
3.	Пр	Представление Гейзенберга	2	6	
4.	Ср	Самостоятельная работа	2	6	
Раздел 5. Уравнение Шрёдингера					
1.	Лек	Стационарное уравнение Шрёдингера	1	6	
2.	Лек	Решение уравнения Шрёдингера для простых одномерных задач (свободное движение, одномерная потенциальная яма)	1	6	
3.	Лек	Общие свойства одномерного движения. Дискретный и непрерывный спектр	1	6	
4.	Лек	Линейный гармонический осциллятор	1	6	
5.	Пр	Одномерное уравнение Шрёдингера	6	6	

6.	Пр	Гармонический осциллятор	4	6	
7.	Пр	Гармонический осциллятор. Представление Фока	2	6	
8.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 6. Квазиклассическое приближение					
1.	Лек	Квазиклассическое приближение	3	6	
2.	Пр	Квазиклассическое приближение	4	7	
3.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 7. Угловой момент					
1.	Лек	Изотропия пространства и сохранение углового момента	1	6	
2.	Лек	Свойства операторов углового момента	1	6	
3.	Лек	Спиновый момент	1	6	
4.	Пр	Оператор момента количества движения	4	6	
5.	Пр	Квантовый ротатор	2	6	
6.	Ср	Самостоятельная работа	2	6	
Раздел 8. Частица в центральном поле					
1.	Лек	Факторизация уравнения Шрёдингера в центральном поле	1	6	
2.	Лек	Решение для угловой части уравнения Шрёдингера в водородоподобном атоме	2	6	
3.	Лек	Сферические гармоники	1	6	
4.	Пр	Движение в центральном поле	4	6	
5.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
Раздел 9. Водородоподобный атом					
1.	Лек	Решение для радиальной части уравнения Шрёдингера в водородоподобном атоме	1	6	
2.	Лек	Спектр водородоподобного атома	1	6	
3.	Пр	Атом водорода	4	6	
4.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
5.	Зачёт	Зачет		6	
Раздел 10. Теория возмущений					
1.	Лек	Общие основы теории возмущений, стационарная теория возмущений	2	6	
2.	Лек	Нестационарная теория возмущений	2	7	
3.	Лек	Теория возмущений для периодических возмущений. Золотое правило Ферми	2	7	
4.	Пр	Стационарная теория возмущений. Невырожденный спектр энергий	4	7	
5.	Пр	Стационарная теория возмущений. Вырожденный спектр энергий	4	7	
6.	Пр	Нестационарная теория возмущений	4	7	
7.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 11. Квантование свободного электромагнитного поля					

1.	Лек	Квантование свободного электромагнитного поля	4	6	
2.	Ср	Самостоятельная работа	4	6	
3.	Зачёт	Зачет		6	
Раздел 12. Основы релятивистской квантовой механики					
1.	Лек	Уравнение Клебша-Гордона	1	7	
2.	Лек	Уравнение Дирака. Решение уравнение Дирака для свободной частицы. Спинорное представление атомных функций	2	7	
3.	Лек	Уравнение Дирака для частицы во внешнем поле	1	7	
4.	Лек	Уравнение Паули. Введение спина	2	7	
5.	Пр	Спин частицы	2	7	
6.	Ср	Самостоятельная работа	6	7	
Раздел 13. Релятивистские поправки второго порядка по v/c					
1.	Лек	Спин-орбитальное взаимодействие. Теория тонкой структуры уровней	4	7	
2.	Пр	Спин частицы	2	7	
3.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 14. Проблема сложения угловых моментов					
1.	Лек	Коэффициенты Клебша-Гордона	1	7	
2.	Лек	Вычисление коэффициентов Клебша-Гордона на примере двух спинов $1/2$	1	7	
3.	Пр	Спин частицы	2	7	
4.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 15. Квантовая механика многочастичных систем					
1.	Лек	Вариационный метод Ритца для решения уравнения Шрёдингера	1	7	
2.	Лек	Вариационный метод на примере атома гелия. Основное состояние гелия в первом порядке теории возмущений. Синглетные и триплетные состояния гелия. Обменная энергия	1	7	
3.	Лек	Метод Хартри	1	7	
4.	Лек	Система тождественных частиц. Бозоны и фермионы	1	7	
5.	Лек	Детерминант Слэтера. Принцип Паули	1	7	
6.	Лек	Метод Хартри-Фока	1	7	
7.	Лек	Атомные оболочки. Термы атома	1	7	
8.	Пр	Вариационный метод Ритца	4	7	
9.	Пр	Системы многих частиц. Фермионы и бозоны	4	7	
10.	Ср	Самостоятельная работа	6	7	
Раздел 16. Атом во внешнем магнитном поле					
1.	Лек	Слабое поле (эффект Зеемана). Фактор Ланде	1	7	
2.	Лек	Сильное поле (эффект Пашена-Бака)	1	7	
3.	Лек	Диамагнетизм инертных газов	1	7	

4.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 17. Элементы квантовой электродинамики					
1.	Лек	Основы квантовой теории излучения	1	7	
2.	Лек	Квантовое описание свободного электромагнитного поля	1	7	
3.	Лек	Атом в электромагнитном поле	1	7	
4.	Лек	Квантовое описание взаимодействия атома и поля	1	7	
5.	Лек	Спонтанное излучение атома	1	7	
6.	Лек	Вероятность излучения фотона в дипольном приближении	1	7	
7.	Пр	Нестационарная теория возмущений	2	7	
8.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 18. Интегральное уравнение теории рассеяния					
1.	Лек	Дифференциальное сечение упругого рассеяния	1	7	
2.	Лек	Функция Грина задачи рассеяния	1	7	
3.	Лек	Интегральное уравнение рассеяния	1	7	
4.	Лек	Борновское приближение	1	7	
5.	Пр	Борновское приближение	4	7	
6.	Ср	Самостоятельная работа	4	7	
Раздел 19. Экзамен					
1.	Экзам ен	Экзамен	36	7	

4 Учебно-методическое обеспечение дисциплины

4.1 Печатные и электронные издания:

1. Давыдов А. С. Квантовая механика: Учебное пособие для университетов. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973. - 703 с..
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория [Электронный ресурс]: в 10 томах : учебное пособие для физических специальностей университетов : допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР?. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. - 768 с. – Режим доступа: <http://lib3.sfu-kras.ru/ft/lib2/elib/b22/0073330.pdf> .
3. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики: учебное пособие. - Санкт-Петербург: Лань, 2004. - 664 с..
4. Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Коган В. И. Задачи по квантовой механике: учебное пособие для физических специальностей высших учебных заведений. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 648 с..
5. Мессиа А., Фаддеев Л. Д. Квантовая механика: Т. 1: перевод с французского. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. - 478 с..
6. Мессиа А., Фаддеев Л. Д. Квантовая механика: Т. 2: перевод с французского. - Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. - 583 с..
7. Фейнман Р. Ф., Лейтон Р. Б., Сэндс М., Смородинский Я. А. Фейнмановские лекции по физике: Т. 8. Квантовая механика (I): перевод с английского. - Москва: Мир, 1966. - 271 с..
8. Фейнман Р. Ф., Лейтон Р. Б., Сэндс М., Смородинский Я. А. Фейнмановские лекции по физике: Т. 9. Квантовая механика (II): перевод с английского. - Москва: Мир, 1967. - 260 с..
9. Флюгге З., Соколов А. А. Задачи по квантовой механике: Т. 1: перевод с английского. - Москва: Мир, 1974. - 341 с..
10. Флюгге З., Соколов А. А. Задачи по квантовой механике: Т. 2: перевод с английского. - Москва: Мир, 1974. - 315 с..
11. Фок В. А. Начала квантовой механики: . - Москва: УРСС (URSS), 2007. - 374 с..
12. Кронин Дж., Гринберг Д., Телегди В. Сборник задач по физике с решениями: [сборник]. - Москва: Атомиздат, 1975. - 336 с..
13. Займан Д. М., Бонч-Бруевич В. Л. Современная квантовая теория: перевод с английского. - Москва: Мир, 1971. - 288 с..
14. Дирак П.А.М. Собрание научных трудов: Квантовая теория (монографии, лекции) [Электронный ресурс]:. - Москва: Физматлит, 2002. - 704 с. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2137 .
15. Николаев С. В., Орлов Ю. С., Федоров А. С. Квантовая механика [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие. - Красноярск: СФУ, 2020. - 128 с. – Режим доступа: <http://Lib3.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b22/i-602674.pdf> .

4.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства (программное обеспечение, на которое университет имеет лицензию, а также свободно распространяемое программное обеспечение):

1. Adobe Acrobat Reader DC . Программное обеспечение для просмотра и печати файлов PDF.
2. Microsoft Office Professional Plus 2007 Russian Academic. Офисный пакет Microsoft Office.

4.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

1. Поисковая машина электронных книг <http://www.poiskknig.ru>
2. Файловый архив для студентов <http://www.studfiles.ru>
3. Электронно-библиотечная система СФУ <http://bik.sfu-kras.ru/>

5 Фонд оценочных средств

Фонд оценочных средств является приложением к рабочей программе дисциплины (модуля), хранится на кафедре, обеспечивающей преподавание данной дисциплины (модуля).

6 Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория для проведения лекционных, семинарских и практических занятий: Специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

помещение для самостоятельной работы обучающихся: специализированная мебель, демонстрационное оборудование, АРМ преподавателя, АРМ обучающихся, подключение к сети «Интернет» и индивидуальный неограниченный доступ в ЭИОС университета

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

По дисциплине (модулю)/ практике Б1.О.16.03 Квантовая механика

Направление подготовки/специальность 03.05.02 Фундаментальная и прикладная физика

Образовательная программа 03.05.02.30 Фундаментальная и прикладная физика

Красноярск 2025

1. Перечень компетенций с указанием индикаторов их достижения, соотнесенных с результатами обучения по дисциплине (модулю), практики и оценочными средствами

Семестр ¹	Код и содержание индикатора компетенции	Результаты обучения ²	Оценочные средства ³
ОПК-1: Способен применять современные теоретические модели физических явлений, процессов и систем, а также результаты экспериментальных исследований в фундаментальных и прикладных разработках			
6,7	ОПК-1.1: Демонстрирует владение фундаментальными законами общей и теоретической физики	знать математические основы квантовой механики, основы релятивистской квантовой механики; уметь использовать математический аппарат квантовой механики при решении задач; уметь решать задачи квантовой механики в рамках теории возмущений; владеть математическим аппаратом квантовой механики, методами решения задач для сложных потенциалов	Контрольная работа 1,2,3,4; Контрольные вопросы к зачету; Контрольные вопросы к экзамену
6,7	ОПК-1.2: Использует экспериментальные и теоретические методы исследований	Знать базовые модели в квантовой механике; волновое уравнение Шредингера уметь проводить анализ результатов; уметь решать задачи для центрально-симметричного потенциала; владеть навыками решения базовых квантово-механических задач; владеть приближёнными методами решения задач квантовой механики.	Контрольная работа 1,2,3,4; Контрольные вопросы к зачету; Контрольные вопросы к экзамену

¹ Семестры указываются по порядку, для каждого индикатора

² Указываются результаты обучения по дисциплине (модулю), практике, соотнесенные с индикатором достижения компетенции.

³ Указываются оценочные средства для каждого индикатора.

2. Типовые оценочные средства или иные материалы, с описанием шкал оценивания и методическими материалами, определяющими процедуру проведения и оценивания достижения результатов обучения

Тема: Математические основы квантовой механики, Квантовая динамика, Уравнение Шрёдингера

Контрольная работа №1

Вариант 1

1. Найти вид оператора

$$\left(x + \frac{d}{dx}\right)^3.$$

2. Определите коэффициент отражения частицы от прямоугольной потенциальной ступеньки высотой U_0 для случая, когда энергия частицы $E = 2U_0$.

$$U(x) = \begin{cases} 0, & -\infty < x < 0 \\ U_0, & 0 \leq x < +\infty \end{cases}$$

3. Найти дисперсию координаты $\langle(\Delta x)^2\rangle$ линейного гармонического осциллятора.

Вариант 2

1. Найти коммутатор $[x^2, p_x]$.

2. Для частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме, найти среднее значение $\langle x \rangle$ и среднеквадратичное отклонение $\langle(\Delta x)^2\rangle$ координаты частицы.

3. На линейный гармонический осциллятор массы m и заряда e действует вдоль линии колебаний постоянное однородное электрическое поле напряженности ε . Найти энергии стационарных состояний гармонического осциллятора и соответствующие им волновые функции.

Вариант 3

1. Найти вид оператора

$$\left(\frac{1}{x} + \frac{d}{dx}\right)^3.$$

2. Найдите волновые функции стационарных состояний для свободной частицы, движение которой ограничено непроницаемой стенкой, т.е. потенциальная энергия имеет вид.

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ 0, & x \geq 0 \end{cases}$$

3. Линейный гармонический осциллятор находится во втором возбужденном состоянии. Найти среднее значение потенциальной энергии осциллятора $\langle U \rangle$.

Вариант 4

1. Найти коммутатор $[x, p_x^2]$.
2. Определите коэффициент отражения частицы (электрона) от прямоугольного потенциального барьера высотой $U_0 = 2.5\text{эВ}$ и шириной $l = 2\text{нм}$, если энергия налетающей частицы равна $E = 1.5\text{эВ}$.

$$U(x) = \begin{cases} 0, & -\infty < x < 0, \quad l < x < +\infty \\ U_0, & 0 \leq x \leq l \end{cases}$$

3. Линейный гармонический осциллятор находится в первом возбужденном состоянии. Найти средние значения потенциальной $\langle U \rangle$ и кинетической $\langle T \rangle$ энергий осциллятора.

Методические рекомендации по проведению контрольной работы №1:

В течение всего периода обучения запланировано проведение четырех контрольных работ (по 2 в каждом семестре). На контрольном занятии каждый студент получает соответствующий вариант задания и самостоятельно решает его в течение 2 часов. По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к зачету или экзамену. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Критерии оценки контрольной работы № 1:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если решены не менее 90% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены несущественные ошибки.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если решены не менее 75% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускаются существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если решены не менее 50% задач контрольного задания, при этом может быть нарушена логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если решены менее 50% задач контрольного задания, допущены существенные ошибки.

Тема: Угловой момент, Частица в центральном поле, Водородоподобный атом

Контрольная работа №2

Вариант 1

1. Найти коммутатор $[l_x, x]$.
2. Частица находится в сферически-симметричном потенциальном поле в стационарном состоянии

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} e^{-\frac{r}{a}},$$

где r – расстояние от центра поля. Найти среднее значение $\langle r \rangle$.

3. Непосредственным расчетом показать ортогональность волновых функций для 1s- и 2s-состояний водородоподобного атома.

Вариант 2

1. Найти коммутатор $[l_y, x]$.
2. Найти $\langle \cos \theta \rangle$ и $\langle \cos^2 \theta \rangle$ в s -состоянии пространственного ротатора.
3. Найти среднее значение $\langle p_r^2 \rangle$ в 1s-состоянии водородоподобного атома.

Вариант 3

1. Найти коммутатор $[l_x, z]$.
2. Найти возможные значения энергии и волновые функции частицы массы m , находящейся в сферически симметричной потенциальной яме

$$U(r) = \begin{cases} 0, & r < a \\ \infty, & r \geq a \end{cases}$$

в s -состоянии.

3. Показать, что волновые функции состояний водородоподобного атома со значением главного квантового числа $n=2$ нормированы на единицу.

Вариант 4

1. Найти коммутатор $[l_y, p_x]$.
2. Найти $\langle \cos^2 \theta \rangle$ в p -состоянии пространственного ротатора.
3. Найти среднее значение $\langle r^2 \rangle$ в 2s-состоянии водородоподобного атома.

Методические рекомендации по проведению контрольной работы № 2:

В течение всего периода обучения запланировано проведение четырех контрольных работ (по 2 в каждом семестре). На контрольном занятии каждый студент получает соответствующий вариант задания и самостоятельно решает его в течение 2 часов. По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к зачету или экзамену. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Критерии оценки контрольной работы № 2:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если решены не менее 90% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены несущественные ошибки.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если решены не менее 75% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускается существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если решены не менее 50% задач контрольного задания, при этом может быть нарушена логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если решены менее 50% задач контрольного задания, допущены существенные ошибки.

Тема: Теория возмущений, Квазиклассическое приближение Контрольная работа №3

Вариант 1

1. Определить в квазиклассическом приближении выражение для уровней энергии частицы, находящейся в поле

$$U(x) = -U_0 ch^{-2} \left(\frac{x}{a} \right).$$

2. Используя стационарную теорию возмущений, найти энергетические уровни до второго порядка по α включительно для частицы в поле

$$U(x) = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 + \alpha x^3 (1 + \alpha x).$$

3. Волны де Бройля.

Вариант 2

1. Оценить в квазиклассическом приближении проницаемость барьера

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ U_0 \exp\left(-\frac{x}{a}\right), & x \geq 0 \end{cases}$$

2. Найти расщепление 1-го возбужденного уровня энергии трехмерного гармонического осциллятора под действием поля $H' = \alpha x z$ в первом порядке теории возмущений.
3. Принцип суперпозиции состояний.

Вариант 3

1. Определить в квазиклассическом приближении выражение для уровней энергии частицы, находящейся в поле

$$U(x) = U_0 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\pi x}{a}\right), \quad 0 < x < a.$$

2. На частицу массы m , находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме ширины a , наложено малое возмущение $H'(x) = V_0 \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right)$. Определить поправки к энергии с точностью до второго порядка включительно.
3. Соотношение неопределенности.

Вариант 4

1. Оценить в квазиклассическом приближении проницаемость барьера

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ U_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right), & x \geq 0 \end{cases}$$

2. Линейный осциллятор подвергается воздействию однородного электрического поля, изменяющегося во времени по закону $\vec{\varepsilon}(t) = \vec{\varepsilon}_0 \left(1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right)^{-1}$. Считая, что до включения поля (при $t \rightarrow -\infty$) осциллятор находился в n -м стационарном состоянии, найти вероятности возбуждения различных его состояний при $t \rightarrow +\infty$ в первом порядке теории возмущений.
3. Уравнение Шредингера.

Методические рекомендации по проведению контрольной работы № 3:

В течение всего периода обучения запланировано проведение четырех контрольных работ (по 2 в каждом семестре). На контрольном занятии каждый студент получает соответствующий вариант задания и самостоятельно решает его в течение 2 часов. По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к зачету или экзамену. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Критерии оценки контрольной работы № 3:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если решены не менее 90% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены несущественные ошибки.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если решены не менее 75% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускается существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если решены не менее 50% задач контрольного задания, при этом может быть нарушена

логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если решены менее 50% задач контрольного задания, допущены существенные ошибки.

Тема: Квантовая механика многочастичных систем

Контрольная работа №4

Вариант 1

1. Используя пробную функцию $\psi(x) = A \exp(-ax^2)$ (α – вариационный параметр, $A = \text{const}$), найдите энергию основного состояния линейного гармонического осциллятора вариационным методом Ритца. Сравнить с точным значением.
2. Могут ли квадраты проекций электронного спина на оси x, y, z (s_x^2, s_y^2, s_z^2) иметь одновременно определённые значения? Почему?

Вариант 2

1. Вычислить вариационным методом энергию основного состояния атома водорода. Пробную функцию выбрать в виде $\psi(r) = A \exp(-\beta r)$ (β – вариационный параметр, $A = \text{const}$).
2. Могут ли проекции электронного спина на оси x, y, z (s_x, s_y, s_z) иметь одновременно определённые значения? Почему?

Вариант 3

1. Одномерный линейный гармонический осциллятор находится в основном состоянии. Вариационным методом получить приближенное значение энергии осциллятора. Пробную функцию выбрать в следующем виде: $\psi(x) = \frac{A}{1 + x^2/\alpha^2}$ (α – вариационный параметр, $A = \text{const}$). Указание: Воспользоваться дифференцированием интеграла $\int_{-\infty}^{+\infty} (\beta + z^2)^{-1} dz = \pi/\sqrt{\beta}$ по параметру β .
2. Может ли квадрат электронного спина s^2 и его проекция на ось z s_z иметь одновременно определённые значения? Почему?

Вариант 4

1. Одномерный линейный гармонический осциллятор находится в основном состоянии. Вариационным методом получить приближенное значение энергии осциллятора. Пробную функцию выбрать в следующем виде: $\psi(x) = \frac{A}{(1 + x^2/\alpha^2)^2}$ (α – вариационный параметр,

$A=const$). Указание: Воспользоваться дифференцированием интеграла $\int_{-\infty}^{+\infty} (\beta + z^2)^{-1} dz = \pi/\sqrt{\beta}$ по параметру β .

2. Может ли электронный спин S и его проекция на ось z S_z иметь одновременно определённые значения? Почему?

Полный перечень заданий представлен в следующих учебно-методических пособиях:

1. Квантовая механика: учебно-методическое пособие для семинарских занятий и самостоятельной работы / сост. А.С. Федоров, С.В. Николаев, И.А. Макаров, С.Ф. Тегай. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 40 с.
2. Квантовая механика: учеб.-метод. пособие / С. В. Николаев, Ю. С. Орлов, А. С. Фёдоров. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2020. – 128 с.

Методические рекомендации по проведению контрольной работы № 4:

В течение всего периода обучения запланировано проведение четырех контрольных работ (по 2 в каждом семестре). На контрольном занятии каждый студент получает соответствующий вариант задания и самостоятельно решает его в течение 2 часов. По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к зачету или экзамену. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Критерии оценки контрольной работы № 4:

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, если решены не менее 90% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная и дополнена комментариями, но при этом могут быть допущены несущественные ошибки.

Оценка «**хорошо**» выставляется студенту, если решены не менее 75% задач контрольного задания, последовательность изложения решения логически стройная, не допускаются существенных неточностей, правильно применяются теоретические положения.

Оценка «**удовлетворительно**» выставляется студенту, если решены не менее 50% задач контрольного задания, при этом может быть нарушена логическая последовательность изложения решения, допускаются неточности и недостаточно правильные формулировки.

Оценка «**неудовлетворительно**» выставляется студенту, если решены менее 50% задач контрольного задания, допущены существенные ошибки.

Перечень контрольных вопросов к зачету

1. Недостаточность классической физики для объяснения атомных явлений. Основные опыты, показавшие необходимость введения квантовых представлений.
2. Основные постулаты квантовой механики.
3. Уравнения на собственные функции и собственные значения операторов.
4. Свойства собственных значений эрмитовых операторов с дискретным спектром.
5. Теория представлений.
6. Координатное и импульсное представления в квантовой механике.
7. Представление Шрёдингера. Оператор эволюции.
8. Представление Гейзенберга. Уравнения Гейзенберга.
9. Общие свойства одномерного уравнения Шрёдингера.
10. Туннелирование через барьер прямоугольной формы в одномерном случае.
11. Соотношения неопределенностей. Теорема вириала, теорема Геллмана-Фейнмана
12. Гармонический осциллятор. Формализм вторичного квантования.
13. Квазиклассическое приближение.
14. Теория водородоподобного атома.
15. Электрон в центральном поле. Разделение переменных. Классификация стационарных состояний в центральном поле. Квантовые числа.
16. Стационарная теория возмущений. Основные идеи теории возмущений. Теория возмущений для вырожденного и невырожденного случаев.
17. Нестационарная теория возмущений. Переходы под влиянием периодического по времени возмущения. Золотое правило Ферми.

Методические рекомендации по проведению зачета:

По результатам контрольных работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к зачету. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Аттестация в конце 6 семестра – зачет. Рекомендуется проведение зачёта в устной форме (один теоретический вопрос).

Критерии оценки зачёта

«**Зачтено**» выставляется обучающемуся, если в ответе верно изложено не менее 50% материала и не допущено существенных неточностей.

«**Не зачтено**» выставляется обучающемуся, который не знает значительной части (более 50 %) программного материала и допускает существенные ошибки.

Перечень контрольных вопросов к экзамену

1. Недостаточность классической физики для объяснения атомных явлений. Основные эксперименты.
2. Основные постулаты квантовой механики.
3. Теория представлений. Переход от одного базиса к другому. Конечные и бесконечномерные базисы.
4. Координатное и импульсное представления. Коммутаторы.
5. Представление Шрёдингера. Оператор эволюции.
6. Представление Гейзенберга. Уравнения Гейзенберга.
7. Общие свойства одномерного уравнения Шрёдингера.
8. Соотношения неопределенностей.
9. Гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения.
10. Квазиклассическое приближение.
11. Атом водорода. Уровни энергии и волновые функции.
12. Электрон в центральном поле. Разделение переменных. Классификация стационарных состояний в центральном поле. Квантовые числа. Полярные диаграммы плотности вероятности для водородных функций.
13. Стационарная теория возмущений для невырожденного уровня энергии.
14. Стационарная теория возмущений для вырожденного уровня энергии.
15. Эффект Штарка. Нахождение уровней энергии атома водорода в электрическом поле.
16. Нестационарная теория возмущений.
17. Переходы под влиянием периодического по времени возмущения. Золотое правило Ферми.
18. Уравнения Клейна-Гордона и Дирака.
19. Уравнения Дирака и Паули. Теория спина Паули. Теория Дирака об антиматерии.
20. Спин-орбитальное взаимодействие в атомах. Тонкая структура атомных уровней энергии.
21. Атом водорода во внешнем магнитном поле. Магнитный момент электрона в атоме. Собственный магнитный момент электрона.
22. Нормальный и аномальный эффект Зеемана. Фактор Ланде.
23. Теория момента импульса. Проблема сложения моментов в квантовой механике. Представление полного момента.
24. Принцип тождественности частиц. Оператор перестановки. Бозоны и фермионы. Принцип Паули.
25. Бозоны и фермионы. Детерминант Слэтера. Принцип Паули.
26. Понятие о методе вторичного квантования.
27. Атом гелия в основном состоянии.
28. Атом гелия в возбужденном состоянии. Кулоновский и обменный вклады в полную энергию атома.
29. Вариационный принцип в квантовой механике. Его применение для решения задач.

30. Квантовомеханическая теория периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Теория химической связи.
31. Методы Хартри и Хартри-Фока.
32. Квантование свободного электромагнитного поля. Полевые операторы.
33. Дипольное поглощение и излучение атомов. Спонтанное излучение. Время жизни квантового состояния.
34. Теория рассеивания. Метод парциальных волн.

Методические рекомендации по проведению экзамена:

Текущая работа включает контактную работу с преподавателями: посещение лекций, практических занятий, контрольной работы; самостоятельную работу студента (подготовка к практическим занятиям, изучение теоретического материала). Оценка текущей работы выполняется преподавателем по завершении изучения раздела дисциплины.

По результатам этих работ и процента посещаемости семинарских занятий в конце семестра студенты получают допуск к экзамену. В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить, путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

В случае отсутствия допуска существует дополнительная возможность его получить путем самостоятельного решения дополнительных контрольных заданий.

Аттестация в конце 7 семестра - экзамен. Рекомендуется проведение экзамена в устной форме (2 теоретических вопроса).

Критерии оценки экзамена

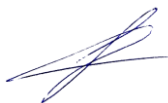
Оценка **«отлично»** выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал разнообразных литературных источников, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач.

Оценка **«хорошо»** выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы.

Разработчик



С.В. Николаев