

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра лазерных систем

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН ФТФ
к.ф-м.н. Корель И. И.
“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Основы квантовой механики

Образовательная программа: 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии, профиль:
Лазерные системы и квантовые технологии

Курс: 3, семестры : 5 6

Физико-технический факультет,

		Семестр	
№	Вид деятельности	5	6
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	4	4
2	Всего часов	144	144
3	Всего занятий в контактной форме, час.	80	80
4	Лекции, час.	36	36
5	Практические занятия, час.	36	36
6	Лабораторные занятия, час.	0	0
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	0	0
8	Аттестация, час.	2	2
9	Консультации, час.	6	6
10	Самостоятельная работа, час.	64	64
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)	РГЗ контр.	РГЗ контр.
12	Вид аттестации	Э	Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

ФГОС введен в действие приказом №953 от 03.09.2015 г. , дата утверждения: 07.10.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, вариативная

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

ЛС, протокол заседания кафедры №_____ от 20.06.2017

Утверждена на совете физико-технического факультета, протокол № 3 от 21.06.2017

Программу разработал:

доцент, к.ф-м.н. Басалаев М. Ю.

Заведующий кафедрой:

доцент, к.ф-м.н. Корель И. И.

Ответственный за образовательную программу:

декан Корель И. И.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ПК.1 способность к анализу поставленной задачи исследований в области приборостроения; в части следующих результатов обучения:
з11. владеть основными принципами квантовой теории, строгими и приближенными методами решения квантовомеханических задач, наиболее актуальных с точки зрения лазерной физики

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Основы квантовой механики</i>	
ПК.1.з11 владеть основными принципами квантовой теории, строгими и приближенными методами решения квантовомеханических задач, наиболее актуальных с точки зрения лазерной физики	
1. о законах квантовой механики, об уравнении Шредингера и методах его решения	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
2. о теории квантовых систем, включая гармонический осциллятор, атомы и молекулы	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
3. элементы теории углового момента	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
4. эффекты, связанные с взаимодействием квантовых систем с внешними электромагнитными полями	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
5. описывать состояние квантовых частиц, находящихся в потенциальных полях	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа
6. применять математический аппарат квантовой механики для решения задач	Лекции; Практические занятия; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения
Семестр: 5			
Дидактическая единица: Общие положения, математический формализм и одночастичные задачи квантовой механики			
1. Экспериментальные и идейные предпосылки квантовой механики. Корпускулярно-волновой дуализм микромира. Соотношения де Бройля.	0	2	1
2. Переход от соотношений де Бройля к волновому уравнению Шредингера. Вероятностная интерпретация волновой функции. Плотность и поток вероятности. Основные свойства волновой функции. Проблема измерений в квантовой механике.	0	3	1
3. Понятие линейного оператора. Алгебра операторов. Различные способы задания операторов. Самосопряженные (эрмитовы) операторы. Собственные функции и собственные значения эрмитовых операторов. Представление физических величин самосопряженными операторами. Разложение произвольной функции по собственным функциям эрмитовых операторов. Физический смысл разложения. Элементы теории представлений.	0	3	1, 6

4. Изменение квантовомеханических величин во времени. Дифференцирование операторов по времени. Уравнения движения в квантовой механике. Теорема Эренфеста. Условия перехода от квантовой механики к классической.	0	4	1, 6
5. Соотношение неопределенности. Его физический смысл. Обобщенное соотношение неопределенности для двух физических величин, представляемых некоммутирующими эрмитовыми операторами.	0	2	1
6. Одномерное движение квантовой частицы в потенциалах прямоугольной формы. Условия сшивки решений в точках разрыва потенциалов. Сшивка решений на потенциалах. Поведение функции в бесконечно удаленных точках. Прохождение частицы над прямоугольной потенциальной стенкой. Туннелирование частицы сквозь прямоугольный потенциальный барьер.	0	4	5
7. Финитное движение частицы в одномерных потенциальных ямах. Движение частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной глубины. Приближение потенциала. Общие свойства одномерного движения в потенциальных ямах.	0	4	5
8. Квантовая теория гармонического осциллятора. Уравнение Шредингера для осциллятора. Энергетический спектр и волновые функции стационарных состояний осциллятора. Операторы "рождения" и "уничтожения" в задаче об осцилляторе.	0	4	2
9. Частица в центрально-симметричном поле. Операторы момента импульса частицы. Коммутационные соотношения. Собственные значения и собственные функции проекции момента импульса. Собственные значения и собственные функции квадрата момента импульса. Разделение радиальной и угловых переменных. Общие свойства радиальных волновых функций.	0	4	3, 5
10. Стационарные состояния электрона в кулоновском поле. Радиальное уравнение Шредингера. Энергетический спектр. Волновые функции стационарных состояний.	0	2	5
11. Атом водорода. Атомная система единиц. Оптический спектр атома водорода. Волновые функции стационарных состояний. Стационарные состояния атома водорода с нецентрально-симметричным распределением плотности.	0	2	2
12. Орбитальный магнитный момент атома.	0	2	2, 3
Семестр: 6			
Дидактическая единица: Общие положения, математический формализм и одночастичные задачи квантовой механики			
13. Собственный механический момент электрона (спин). Экспериментальные доказательства существования спина и собственного магнитного момента электрона. Введение спина в формализм нерелятивистской квантовой механики. Спиновые операторы, матрицы Паули. Общее понятие о спинорных величинах. Уравнение Паули.	0	4	1
Дидактическая единица: Динамика квантовых систем			
14. Общие положения динамики квантовых систем. Основные приближения теории. Принцип неразличимости тождественных частиц, его математическая формулировка. Одноэлектронное приближение в динамике квантовых систем. Принцип Паули. Примеры его физической реализации.	0	2	1, 2

15. Обменное взаимодействие.	0	2	1, 2
16. Момент импульса квантовой системы. Момент импульса многоэлектронного атома как интеграл движения. Сложение моментов при образовании сложных квантовых систем. Понятие четности квантового состояния.	0	3	3
17. Стационарная теория возмущений. Теория возмущений для вырожденных состояний. Эффект Штарка для атома водорода.	0	2	1, 4
18. Двухэлектронные квантовые системы. Атом гелия и гелиеподобные ионы. Ортогелий и парагелий. Расчет молекулы водорода в приближении Гайтлера-Лондона. Происхождение химической связи.	0	3	2
19. Стационарные состояния многоэлектронных атомов. Электронная конфигурация. Атомные термы. Правила Хунда. Тонкая структура атомных термов.	0	2	2
20. Атом в слабом постоянном магнитном поле. Атомный g-фактор. Нормальный и аномальный эффекты Зеемана.	0	2	4
21. Квантовые переходы под действием возмущения, зависящего от времени. Первое приближение теории возмущений. Возмущения, гармонически зависящие от времени. Переходы из дискретного спектра в непрерывный. "Золотое правило" кинетики.	0	4	4
22. Квантовые переходы в резонансном приближении - двухуровневая модель. Осцилляции Раби.	0	2	4
23. Квантовые системы во внешнем электромагнитном поле. Гамильтониан возмущения. Дипольное приближение. Поляризуемость квантовой системы в дипольном приближении. Правила отбора для дипольных переходов.	0	3	4
24. Адиабатическое приближение в теории молекул. Разделение "быстрых" и "медленных" движений в молекулах. Оператор неадиабатичности. Сравнительная оценка вкладов электронного, колебательного и вращательного движений молекулы в молекулярные спектры.	0	2	2
25. Двухатомные молекулы. Классификация электронных термов двухатомных молекул. Квантовая трактовка понятия валентности. Общие свойства ковалентного взаимодействия атомов. Колебательные и вращательные спектры двухатомной молекулы.	0	3	2
26. Элементы квантовой теории рассеяния. Сечение рассеяния. Интегральная форма стационарного уравнения Шредингера. Борновское приближение. Рассеяние быстрых заряженных частиц атомами. Атомный форм-фактор. Формула Резерфорда.	0	2	1, 5

Таблица 3.2

Темы практических занятий	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 5				
Дидактическая единица: Общие положения, математический формализм и одночастичные задачи квантовой механики				

1. Изучение эволюции свободного пакета одномерных волн де Бройля с начальным условием в виде гауссовой экспоненты. Определение скорости движения и времени распыления пакета.	0	4	1, 6	Решение задач
2. Линейные операторы в квантовой механике. Способы задания операторов. Алгебра операторов. Класс самосопряженных операторов, его основные свойства. Собственные функции и собственные значения эрмитовых операторов с дискретным и непрерывным спектром.	0	8	1, 6	Решение задач
3. Одномерное движение микрочастицы в потенциалах прямоугольной формы. Решение задач, демонстрирующих основные квантовые эффекты.	0	12	5, 6	Решение задач
4. Общие свойства одномерного движения микрочастицы в потенциалах произвольной формы.	0	4	5, 6	Решение задач
5. Момент количества движения частицы. Вывод различных коммутационных соотношений для операторов и соотношений для усредненных величин.	0	4	3, 6	Решение задач
6. Основы спинного формализма	0	4	1, 3, 6	Решение задач
Семестр: 6				
Дидактическая единица: Динамика квантовых систем				
7. Момент количества движения многоэлектронных систем. Сложение моментов количества движений.	0	6	3, 6	Решение задач
8. Стационарная теория возмущений. Расчет расщепления вырожденных энергетических уровней плоского гармонического осциллятора и уровней атома водорода.	0	6	2, 4, 6	Решение задач
9. Атом гелия. Вычисление в первом порядке теории возмущений поправки к энергии основного состояния и энергии метастабильного ортосостояния атома гелия.	0	8	1, 2, 6	Решение задач

10. Многоэлектронные атомы. Определение электронной конфигурации и возможных атомных термов, а также основного состояния для различных элементов таблицы Менделеева.	0	8	2, 6	Решение задач
11. Определение молекулярных термов для двухатомных молекул различных типов.	0	8	2, 6	Решение задач

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 5				
1	Контрольные работы	6	4	0
Подготовка к контрольной работе: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
2	РГЗ	6	20	4
Решение задач по заданному варианту: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
3	Подготовка к занятиям	1, 2, 3, 4, 5, 6	30	0
Самостоятельное повторение лекций: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
4	Подготовка к аттестации	1, 2, 3, 4, 5, 6	10	2
Самостоятельное повторение изученного в материала: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
Семестр: 6				
1	Контрольные работы	6	4	0
Подготовка к контрольной работе: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
2	РГЗ	6	20	4
Решение задач по заданному варианту: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
3	Подготовка к занятиям	1, 2, 3, 4, 5, 6	30	0
Самостоятельное повторение лекций: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				
4	Подготовка к аттестации	1, 2, 3, 4, 5, 6	10	2
Самостоятельное повторение изученного в материала: Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627				

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	e-mail
Консультирование	e-mail
Контроль	e-mail
Размещение учебных материалов	ЭБС

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 5		
<i>Лекция:</i>	2	6
<i>Практические занятия:</i>	2	6
<i>Контрольные работы:</i>	6	18
Контролирующие материалы приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		
<i>РГЗ:</i>	10	25
Контролирующие материалы приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		
<i>Экзамен:</i>	0	45
Контролирующие материалы (список вопросов тесты) приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		
Семестр: 6		
<i>Лекция:</i>	2	6
<i>Практические занятия:</i>	2	6
<i>Контрольные работы:</i>	6	18
Контролирующие материалы приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		
<i>РГЗ:</i>	10	25
Контролирующие материалы приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		
<i>Экзамен:</i>	0	45
Контролирующие материалы (тесты) приводятся в "Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля		
		Контр. раб.	Защита РГЗ	Экзамен
ПК.1	311. владеть основными принципами квантовой теории, строгими и приближенными методами решения квантовомеханических задач, наиболее актуальных с точки зрения лазерной физики	+	+	+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Иродов И. Е. Квантовая физика. Основные законы : [учебное пособие для вузов] / И. Е. Иродов. - М., 2007. - 256 с. : ил.
2. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Т. 1 / З. Флюгге ; пер. с англ. Б. А. Лысова ; под ред. и с предисл. А. А. Соколова. - М., 2008. - 341 с. : ил., табл.
3. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Т. 2 / З. Флюгге ; пер. с англ. Б. А. Лысова ; под ред. А. А. Соколова. - М., 2008. - 315 с. : ил.
4. Фок В. А. Начала квантовой механики / В. А. Фок. - М., 2008. - 374 с. : табл.

Дополнительная литература

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. В 10 т.. Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория : учебное пособие для физических специальностей университетов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - М., 1989. - 767 с. : ил.
2. Саввиных С. К. Лекции по квантовой механике. Ч. 1 : учебное пособие для старших курсов физ.-техн. фак. / С. К. Саввиных ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 1997. - 140 с.
3. Саввиных С. К. Лекции по квантовой механике. Ч. 2 : учебное пособие для III-IV курсов ФТФ / С. К. Саввиных ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 1998. - 154 с.
4. Галицкий В. М. Задачи по квантовой механике : учебное пособие для физ. спец. вузов / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган. - М., 1992. - 880 с.
5. Бакланов Е. В. Основы лазерной физики : [учебник] / Е. В. Бакланов ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2011. - 130 с. : ил.. - Режим доступа: http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2011/11_baklanov.pdf

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znaniy.com" : <http://znaniy.com/>
5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Сарина М. П. Квантовая физика : учебное пособие / М. П. Сарина ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2016. - 129, [1] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000229627

8.2 Специализированное программное обеспечение

1 Microsoft Office

2 Microsoft Windows

9. Материально-техническое обеспечение

Компьютерный класс

№	Наименование	Назначение
1	Компьютерный класс (Компьютеры объединены в локальную сеть с выходом в Internet)	Оформление РГЗ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра лазерных систем

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН ФТФ
к.ф.-м.н., доцент И.И. Корель
“ ” _____ Г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Основы квантовой механики

Образовательная программа: 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии, профиль:
Лазерные системы и квантовые технологии

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине Основы квантовой механики приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ПК.1/НИ способность к анализу поставленной задачи разработки в области приборостроения	зб. владеть основными принципами квантовой теории, строгими и приближенными методами решения квантовомеханических задач, наиболее актуальных с точки зрения лазерной физики	Атом в слабом постоянном магнитном поле. Атомный g-фактор. Нормальный и аномальный эффекты Зеемана. Атом гелия. Вычисление в первом порядке теории возмущений поправки к энергии основного состояния и энергии метастабильного ортосостояния атома гелия. Двухэлектронные квантовые системы. Атом гелия и гелиеподобные ионы. Ортотелий и парателий. Расчет молекулы водорода в приближении Гайтлера-Лондона. Происхождение химической связи. Изменение квантовомеханических величин во времени. Дифференцирование операторов по времени. Уравнения движения в квантовой механике. Теорема Эренфеста. Условия перехода от квантовой механики к классической. Линейные операторы в квантовой механике. Способы задания операторов. Алгебра операторов. Класс самосопряженных операторов, его основные свойства. Собственные функции и собственные значения эрмитовых операторов с дискретным и непрерывным спектром. Многоэлектронные атомы. Определение электронной конфигурации и возможных атомных термов, а также основного состояния для различных элементов таблицы Менделеева. Момент импульса квантовой	Контрольная работа (семестр 5, 6); РГЗ (семестр 5, 6)	Экзамен (семестр 5, 6)

		системы. Момент импульса многоэлектронного атома как интеграл движения. Сложение моментов при образовании сложных квантовых систем. Понятие четности квантового состояния. Обменное взаимодействие. Общие положения динамики квантовых систем. Основные приближения теории. Принцип неразличимости тождественных частиц, его математическая формулировка. Одноэлектронное приближение в динамике квантовых систем. Принцип Паули. Примеры его физической реализации. Общие свойства одномерного движения микрочастицы в потенциалах произвольной формы. Одномерное движение квантовой частицы в потенциалах прямоугольной формы. Условия сшивки решений в точках разрыва потенциалов. Сшивка решений на потенциалах. Поведение функции в бесконечно удаленных точках. Прохождение частицы над прямоугольной потенциальной стенкой. Туннелирование частицы сквозь прямоугольный потенциальный барьер. Одномерное движение микрочастицы в потенциалах прямоугольной формы. Решение задач, демонстрирующих основные квантовые эффекты. Определение молекулярных термов для двухатомных молекул различных типов. Орбитальный магнитный момент атома. Основы спинового формализма. Понятие линейного оператора. Алгебра операторов. Различные способы задания операторов. Самосопряженные (эрмитовы) операторы. Собственные функции и собственные значения эрмитовых операторов.		
--	--	--	--	--

		Представление физических величин самосопряженными операторами. Разложение произвольной функции по собственным функциям эрмитовых операторов. Физический смысл разложения. Элементы теории представлений. Собственный механический момент электрона (спин). Экспериментальные доказательства существования спина и собственного магнитного момента электрона. Введение спина в формализм нерелятивистской квантовой механики. Спиновые операторы, матрицы Паули. Общее понятие о спинорных величинах. Уравнение Паули. Стационарная теория возмущений. Расчет расщепления вырожденных энергетических уровней плоского гармонического осциллятора и уровней атома водорода. Стационарная теория возмущений. Теория возмущений для вырожденных состояний. Эффект Штарка для атома водорода. Стационарные состояния многоэлектронных атомов. Электронная конфигурация. Атомные термы. Правила Хунда. Тонкая структура атомных термов. Фinitное движение частицы в одномерных потенциальных ямах. Движение частицы в прямоугольной потенциальной яме конечной глубины. Приближение потенциала. Общие свойства одномерного движения в потенциальных ямах. Частица в центрально-симметричном поле. Операторы момента импульса частицы. Коммутационные соотношения. Собственные значения и собственные функции проекции момента импульса. Собственные		
--	--	--	--	--

		значения и собственные функции квадрата момента импульса. Разделение радиальной и угловых переменных. Общие свойства радиальных волновых функций.		
--	--	---	--	--

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 5 семестре - в форме экзамена, в 6 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ПК.1/НИ. Экзамен проводится в письменной форме по тестам

Кроме того, сформированность компетенции проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 5 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)), контрольная работа. Требования к выполнению РГЗ(Р), контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р), контрольной работы.

В 6 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)), контрольная работа. Требования к выполнению РГЗ(Р), контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р), контрольной работы.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенции ПК.1/НИ, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится в письменной форме по теме «Операторы в квантовой механике», включает в себя 6 задач.

2. Критерии оценки

Каждая задача оценивается от 0 до 3 баллов. Контрольная работа оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если решено менее двух задач. Оценка составляет 0 – 5 баллов.

Работа выполнена **на пороговом** уровне, если решено от двух до трех задач. Оценка составляет 6 – 9 баллов.

Работа выполнена **на базовом** уровне, если решено от четырех до пяти задач. Оценка составляет 10 – 15 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все решены все шесть задач. Оценка составляет 16 – 18 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

Задача 1.

Рассмотреть следующие операторы ($-\infty < x < +\infty$):

а) отражения $\hat{I} : \hat{I}\Psi(x) \equiv \Psi(-x)$;

б) сдвига $\hat{T}_a : \hat{T}_a\Psi(x) \equiv \Psi(x+a)$;

в) изменения масштаба $\hat{M}_c : \hat{M}_c\Psi(x) \equiv \sqrt{c}\Psi(cx)$, $c > 0$;

г) комплексного сопряжения $\hat{K} : \hat{K}\Psi(x) \equiv \Psi^*(x)$;

д) перестановки координат двух частиц $\hat{P}_{12} : \hat{P}_{12}\Psi(x_1, x_2) \equiv \Psi(x_2, x_1)$.

Какие из этих операторов являются линейными? Найти вид операторов, которые по отношению к ним являются: 1) эрмитово сопряженными, 2) обратными.

Задача 2.

Выразить коммутаторы $[\hat{A}, \hat{B}\hat{C}]$ и $[\hat{A}\hat{B}, \hat{C}]$ через $[\hat{A}, \hat{B}]$, $[\hat{A}, \hat{C}]$ и $[\hat{B}, \hat{C}]$.

Задача 3.

Показать, что $(\hat{L}^+)^+ \equiv \hat{L}$.

Задача 4.

Доказать операторное равенство: $\left(\frac{1}{x} \frac{d}{dx} x\right)^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d}{dx}$.

Задача 5.

Найти собственные значения оператора $\hat{A}$, принадлежащие собственной функции ψ_A , если:

$$\hat{A} = -\frac{d^2}{dx^2} + x^2, \quad \psi_A = \exp(-x^2/2).$$

Задача 6.

Эрмитов оператор $\hat{f}$ удовлетворяет соотношению: $\hat{f}^2 = c \hat{f}$, где c – вещественный параметр. Каковы собственные значения такого оператора?

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны решить 10 задач, охватывающих следующие темы: «волны де Бройля; волновое уравнение Шредингера; соотношение неопределенностей Гейзенберга; квантово-механические операторы; изменение квантово-механических величин во времени; среднее значение оператора; одномерное движение частиц в потенциалах прямоугольной формы; квантовый гармонический осциллятор».

Пояснительная записка РГЗ включает в себя титульный лист и подробное изложение решений задач. Каждая задача должна начинаться с новой страницы. Условие задач следует привести полностью без сокращений. Пояснительная записка РГЗ может быть написана как чернилами от руки, так и оформлена с помощью текстового редактора (например, Microsoft word).

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если решено менее 40% предложенных задач, оценка составляет 0-9 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если решено не менее 40% и не более 60% задач, оценка составляет 10-14 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если решено не менее 60% и не более 85%, оценка составляет 15-22 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если решено более 85% задач, оценка составляет 23-25 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

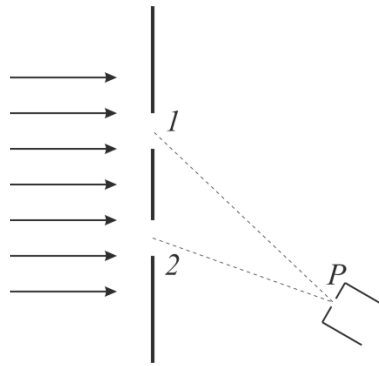
Типовое задание для РГЗ:

Задача 1.

При увеличении энергии электрона на $\Delta E = 200$ эВ его дебройлевская длина волны изменилась в $\eta = 2,0$ раза. Найти первоначальную длину волны электрона.

Задача 2.

Поток электронов падает на экран с двумя щелями 1 и 2 (см. рисунок ниже). В точке P расположено входное отверстие счетчика. Пусть ψ_1 – амплитуда волны, достигшей точки P , если открыта только щель 1, а ψ_2 – то же, но если открыта только щель 2. Отношение $\psi_2/\psi_1 = \eta = 3,0$. Если открыта только щель 1, счетчик регистрирует $N_1 = 100$ электронов в секунду. Сколько электронов будет регистрировать счетчик, если открыты обе щели и в точке P наблюдается интерференционный: а) максимум, б) минимум?



Задача 3.

Атом испустил фотон с длиной волны $\lambda = 0,58$ мкм за время $\tau \approx 10^{-8}$ с. Оценить неопределенность Δx , с которой можно установить координату фотона в направлении его движения, а также относительную неопределенность его длины волны.

Задача 4.

Частица находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Найти:

а) массу частицы, если ширина ямы l и разность энергий 3-го и 2-го энергетических уровней равна ΔE ;

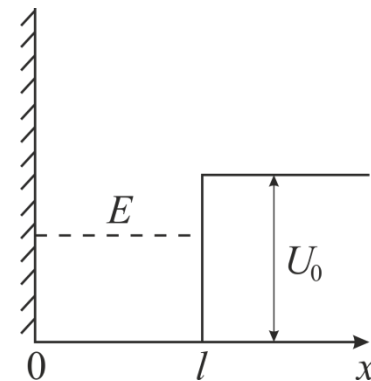
б) квантовое число n энергетического уровня частицы, если интервалы энергии до соседних с ним уровней (верхнего и нижнего) относятся как $\eta : 1$, где $\eta = 1,4$.

Задача 5.

Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с бесконечно высокими стенками. Найти вероятность пребывания частицы в области $l/3 < x < 2l/3$.

Задача 6.

Частица массы m находится в одномерном потенциальном поле $U(x)$, показанном на рисунке ниже, где $U(0) = \infty$. Найти сколько уровней содержит яма, у которой $l^2 U_0 = 75 \hbar^2 / m$.



Задача 7.

Вычислить средние значения кинетической и потенциальной энергии квантового осциллятора с частотой ω в основном состоянии $\psi(x) = A \exp(-\alpha^2 x^2)$, где $\alpha^2 = \kappa / 2\hbar\omega$, κ – постоянная ($U = \kappa x^2 / 2$).

Задача 8.

Доказать, что для частицы, движущейся в потенциальном поле $U(x)$, выполняется следующее

операторное равенство: $\frac{d}{dt}(x\hat{p}_x) = \frac{\hat{p}_x^2}{m} - x \frac{\partial U}{\partial x}$.

Задача 9.

Вычислить среднее значение квадрата момента импульса в состоянии $\psi(\theta, \varphi) = A \sin \theta \cos \varphi$.

Задача 10.

Доказать следующее операторное равенство: $\left[x^2, \left[x, \hat{p}_x^2 \right] \right] = -4\hbar^2 x$.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в письменной форме по тестам. Тест включает в себя 20 заданий, охватывающих ключевые темы курса. Только один из предложенных вариантов является верным.

Пример теста для экзамена

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является линейным, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

А. $\hat{A}\beta\Psi_1 = \beta\hat{A}\Psi_1$

Б. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \alpha\hat{A}\Psi_1 + \beta\hat{A}\Psi_2$

В. $\hat{A}\beta\Psi_2 = \alpha\hat{A}\Psi_1$

Г. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \beta\hat{A}\Psi_1 + \alpha\hat{A}\Psi_2$

(α и β – произвольные комплексные числа).

2. Собственные функции эрмитового оператора, отвечающие различным собственным значениям:

А. ортогональны;

Б. отличаются числовым множителем;

В. совпадают;

Г. комплексно сопряжены по отношению друг к другу;

.....

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный тест считается **неудовлетворительным**, если студент дал менее 8 правильных ответов, оценка составляет 0-17 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **пороговом** уровне, если студент дал от 8 до 13 правильных ответов, оценка составляет 18-29 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **базовом** уровне, если студент дал от 14 до 17 правильных ответов, оценка составляет 30-40 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент дал не менее 18 правильных ответов, оценка составляет 41-45 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Основы квантовой механики»

Вариант 1

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является линейным, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

A. $\hat{A}\beta\Psi_1 = \beta\hat{A}\Psi_2$

Б. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \alpha\hat{A}\Psi_1 + \beta\hat{A}\Psi_2$

В. $\hat{A}\beta\Psi_2 = \alpha\hat{A}\Psi_1$

Г. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \beta\hat{A}\Psi_1 + \alpha\hat{A}\Psi_2$

(α и β – произвольные комплексные числа).

2. Собственные функции эрмитового оператора, отвечающие различным собственным значениям:

A. ортогональны

Б. отличаются числовым множителем

В. совпадают

Г. комплексно сопряжены по отношению друг к другу

3. Частица находится в квантовом состоянии, описываемом нормированной волновой функцией $\Psi(\vec{r}, t)$. Какое из нижеследующих утверждений справедливо?

A. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ есть вероятность обнаружить частицу в момент времени t в объеме dV в окрестности точки $\vec{r}$

Б. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dt$ есть вероятность обнаружить частицу в точке $\vec{r}$ в интервале времени $(t, t + dt)$

В. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dVdt$ есть вероятность обнаружить частицу в интервале времени $(t, t + dt)$ в объеме dV в окрестности точки $\vec{r}$

Г. все утверждения неправильны

4. Собственными значениями оператора четности являются:

A. все четные целые числа

Б. все нечетные целые числа

В. +1 и -1

Г. 0 и 1

5. Коммутатор операторов координаты и проекции импульса $[\hat{x}, \hat{p}_x]$ равен:

A. $\hat{p}_x$

Б. $\hat{x}$

В. $i\hbar$

Г. 0

6. Собственная функция $f_p(x)$ оператора импульса $\hat{p}_x$, отвечающая собственному значению p , в координатном представлении равна:

A. $f_p(x) = \sin\{\frac{px}{\hbar}\}$

Б. $f_p(x) = \cos\{\frac{px}{\hbar}\}$

В. $f_p(x) = \exp\{\frac{ipx}{\hbar}\}$

Г. $f_p(x) = \exp\{-\frac{ipx}{\hbar}\}$

7. Частица находится во внешнем поле $U(\hat{r}, t)$. Какое из нижеследующих уравнений является временным уравнением Шредингера для волновой функции этой частицы?

А. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(\hat{r}, t) \right) \Psi$

Б. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = U(\hat{r}, t) \Psi$

В. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - U(\hat{r}, t) \right) \Psi$

Г. $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - U(\hat{r}, t) \right) \Psi = E \Psi$

8. Гамильтониан частицы не зависит от времени. Будут ли зависеть от времени волновые функции стационарных состояний частицы?

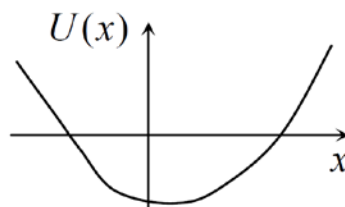
А. нет

Б. да

В. это зависит от начальных условий

Г. это зависит от гамильтониана

9. Потенциальная энергия стремится к $+\infty$ при $x \rightarrow \pm\infty$ («потенциальная яма», см. рисунок). Все уровни энергии частицы в такой яме:



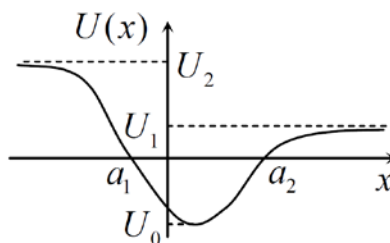
А. не вырождены

Б. двукратно вырождены

В. часть уровней не вырождена, часть двукратно вырождена

Г. вырождение уровней зависит от конкретного вида потенциала

10. Дан график зависимости потенциальной энергии $U(x)$ от координаты x (см. рисунок). При каких энергиях заведомо не существует стационарных состояний?



А. $E < U_0$

Б. $U_0 < E < U_1$

В. $E > U_2$

Г. $U_1 < E < U_2$

11. Какой формулой определяются энергии стационарных состояний частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной a (здесь $n = 1, 2, 3, \dots$)?

А. $\frac{\pi^2 \hbar^2 n}{2ma^2}$

Б. $\frac{\pi^2 \hbar^2 (n + 1/2)}{2ma^2}$

В. $\frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2}$

Г. $\frac{\pi^2 \hbar^2 (n^2 + 1/2)}{2ma^2}$

12. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x = 0$ и $x = a$?

А. $A \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$

Б. $A \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$

В. $A \exp\left(i \frac{\pi x}{a}\right)$

Г. $A \exp\left(-i \frac{\pi x}{a}\right)$

($n = 1, 2, 3, \dots$, A – постоянная)

13. Какой формулой определяются энергии собственных состояний одномерного гармонического осциллятора с частотой ω ?

А. $\hbar\omega(n^2 + 1/2)$

Б. $\hbar\omega(n + 1/2)$

В. $\hbar\omega n$

Г. $\hbar\omega n^2$

($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

14. Какая величина, составленная из параметров гармонического осциллятора с массой m и частотой ω , имеет размерность длины (то есть является параметром длины для осциллятора)?

А. $\sqrt{\frac{m}{\hbar\omega}}$

Б. $\sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$

В. $\sqrt{\frac{m\hbar}{\omega}}$

Г. $\sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}$

15. Функция e^{ikx} , где k – некоторое положительное число, описывает поток частиц, распространяющихся:

А. в положительном направлении оси x

Б. в отрицательном направлении оси x

В. в среднем покоящихся частиц, так как вероятность обнаружить их в разных точках пространства в таком состоянии одинакова

Г. информации для ответа недостаточно

16. Какова размерность коэффициентов отражения и прохождения?

А. энергия

Б. импульс

В. длина

Г. безразмерные

17. Размерность момента импульса совпадает:

А. с размерностью постоянной Планка

Б. с размерностью квадрата постоянной Планка

В. с размерностью квадратного корня из постоянной Планка

Г. с размерностью обратной постоянной Планка

18. Какие из нижеследующих функций являются собственными для оператора $\hat{L}_z$?

А. $\sin(m\varphi)$

Б. $\exp(m\varphi)$

В. $\exp(im\varphi)$

Г. $\cos(m\varphi)$

(где m – любое целое число)

19. Какой формулой определяется энергия стационарного состояния с квантовыми числами n_r , l и m электрона в атоме водорода?

А. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m + 1)^2}$

Б. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m)^2}$

В. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + 1)^2}$

Г. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l)^2}$

20. Какой из перечисленных коммутаторов равен нулю?

А. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_-]$

Б. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_+]$

В. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_z]$

Г. все перечисленные

(где $\hat{S}_\pm = \hat{S}_x \pm i\hat{S}_y$ – повышающий и понижающий проекцию спина частицы на оси Z операторы)

Вариант 2

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является эрмитовым, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

А. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2) = (\Psi_2, \hat{A}\Psi_1)$

Б. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2)^* = (\Psi_1, \hat{A}\Psi_2)$

В. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2) = (\Psi_1, \hat{A}\Psi_2)$

Г. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2)^* = (\Psi_2, \hat{A}\Psi_1)$,

где $(\dots, \dots)$ – скалярное произведение элементов пространства.

2. Собственные значения любого эрмитового оператора:

А. положительны

Б. отрицательны

В. вещественны

Г. чисто мнимы

3. Собственными функциями оператора четности являются:

А. все четные функции и только они

Б. все нечетные функции и только они

В. все четные функции (отвечают собственному значению +1) и все нечетные функции (отвечают собственному значению -1)

Г. все четные функции (отвечают собственному значению -1) и все нечетные функции (отвечают собственному значению +1)

4. Квантовая система описывается нормированной волновой функцией $\Psi(x, t)$. Физической величине A отвечает оператор $\hat{A}$. По какой формуле из нижеследующих формул можно вычислить среднее значение результатов многих измерений величины A над ансамблем таких квантовых систем?

А. $\int \Psi^*(x, t) \hat{A} \Psi(x, t) dx$

Б. $\int \hat{A} |\Psi(x, t)|^2 dx$

В. $\int |\Psi(x, t)|^2 \hat{A} dx$

Г. $\hat{A} \int |\Psi(x, t)|^2 dx$

5. Действие оператора проекции импульса $\hat{p}_x$ на произвольную функцию $\Psi(x)$ в координатном представлении определяется соотношением:

А. $\hat{p}_x \Psi = p_x \Psi$

Б. $\hat{p}_x \Psi = -\hbar^2 \frac{d^2 \Psi}{dx^2}$

В. $\hat{p}_x \Psi = -i\hbar \frac{d\Psi}{dx}$

Г. $\hat{p}_x \Psi = i\hbar \frac{d\Psi}{dp_x}$

6. Частица находится в состоянии с нормированной волновой функцией, $\Psi(x)$. Какой формулой определяется средняя координата частицы в этом состоянии?

A. $\bar{x} = \int x |\Psi(x)| dx$

Б. $\bar{x} = \int x |\Psi(x)|^2 dx$

В. $\bar{x} = \int |\Psi(x)| dx$

Г. $\bar{x} = \int |\Psi(x)|^2 dx$

7. Какое из нижеследующих уравнений является нестационарным уравнением Шредингера для волновой функции частицы?

A. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$

Б. $i\hbar \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \hat{H} \Psi$

В. $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$

Г. $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \hat{H} \Psi$

8. Какая формула есть математическое выражение закона сохранения вероятности?

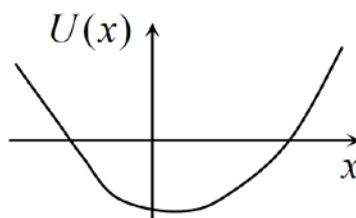
A. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(\vec{r}, t) \right) \Psi$

Б. $\frac{\partial}{\partial t} |\Psi(\vec{r}, t)|^2 + \text{div} \vec{J}(\vec{r}, t) = 0$

В. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi$

Г. $\hat{H} \Psi = E \Psi$

9. Частица движется в некотором потенциале $U(x)$. Известно, что $U(x) \rightarrow +\infty$ при $x \rightarrow \pm\infty$ (см. рисунок). Существуют ли среди стационарных состояний частицы состояния, относящиеся к непрерывному спектру?



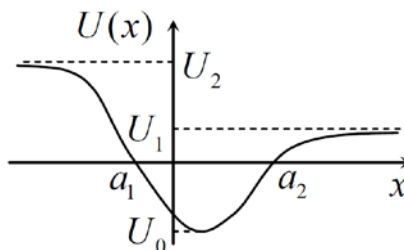
A. да

Б. нет

В. в некоторых случаях да, в некоторых случаях нет

Г. это зависит от потенциала

10. Дан график зависимости потенциальной энергии $U(x)$ от координаты x (см. рисунок). При каких энергиях существуют невырожденные стационарные состояния непрерывного спектра?



A. $E > U_2$

Б. $U_1 < E < U_2$

В. $U_0 < E < U_1$

Г. $E < U_0$

11. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x = -a/2$ и $x = a/2$?

A. $A \sin\left(\frac{\pi n x}{a} + \pi n\right)$

Б. $A \sin\left(\frac{\pi n x}{a} + \frac{\pi n}{2}\right)$

В. $A \cos\left(\frac{\pi n x}{a} + \pi n\right)$

Г. $A \cos\left(\frac{\pi n x}{a} + \frac{\pi n}{2}\right)$

($n = 1, 2, 3, \dots$, A – постоянная)

12. Частица находится в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x=0$ и $x=a$. Каким нужно выбрать множитель перед волновой функцией стационарного состояния частицы, $\Psi(x) \propto \sin(\pi x/a)$, чтобы эта функция была нормирована на единицу?

A. $\sqrt{\frac{a}{2}}$

Б. $\sqrt{\frac{na}{2}}$

В. $\sqrt{\frac{2}{a}}$

Г. $\sqrt{\frac{2}{na}}$

13. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана гармонического осциллятора ($x = x / \sqrt{\hbar / m\omega}$ – безразмерная координата осциллятора)?

A. $H_n(x) \exp(-x^2 / 2)$

Б. $H_n(x) \exp(-x^4 / 2)$

В. $H_n(x) \exp(-x / 2)$

Г. $H_n(x) \exp(-x^2)$

(H_n – полиномы Эрмита, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

14. Какая величина, составленная из параметров гармонического осциллятора с массой m и частотой ω , имеет размерность импульса (то есть является параметром импульса для осциллятора)?

A. $\frac{1}{\sqrt{\hbar m \omega}}$

Б. $\sqrt{\hbar m \omega}$

В. $\hbar m \omega$

Г. $\frac{1}{\hbar m \omega}$

15. При исследовании прохождения частиц через барьеры асимптотические формулы для волновых функций частиц с определенной энергией ($\Psi(x \rightarrow \pm\infty) \propto e^{\pm i k x}$) – выбираются, исходя из:

A. физических соображений

Б. решения нестационарного уравнения Шредингера

В. решения стационарного уравнения Шредингера

Г. корпускулярно-волнового дуализма де Бройля

16. Могут ли коэффициенты прохождения и отражения частиц от некоторого потенциала быть равными $R = 0.125$, $T = 0.885$?

A. да

Б. нет

В. зависит от потенциала

Г. зависит от энергии

17. Какой формулой определяется выражение для оператора проекции орбитального момента на ось x в декартовых координатах $\hat{L}_x$?

A. $i\hbar z \frac{\partial}{\partial y}$

Б. $-i\hbar y \frac{\partial}{\partial z}$

В. $i\hbar(z \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial z})$

Г. $i\hbar(y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y})$

18. Собственными значениями оператора квадрата орбитального момента импульса являются числа вида $\hbar^2 l(l+1)$, где l :

- А. полуцелое неотрицательное число (число вида $1/2, 3/2, \dots$)
- Б. целое неотрицательное число
- В. целое неположительное число
- Г. полуцелое неположительное число

19. Какой формулой определяется энергия стационарного состояния с квантовыми числами n_r, l и m электрона в атоме водорода (нумерация n_r начинается с единицы)?

- | | |
|--|--|
| А. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l)^2}$ | Б. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + 1)^2}$ |
| В. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m)^2}$ | Г. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m + 1)^2}$ |

20. Выбрать верное равенство:

- А. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_x$
- Б. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_y$
- В. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_z$
- Г. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}^2$

(где $\hat{S}_\pm = \hat{S}_x \pm i\hat{S}_y$ – повышающий и понижающий проекцию спина частицы на оси Z операторы)

Ответы к тестам

	Номера вопросов в тесте																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
№ вар.	Ответы																			
1	Б	А	А	В	В	В	А	Б	А	А	В	А	Б	Б	А	Г	А	В	В	Г
2	В	В	В	А	В	Б	А	Б	Б	Б	В	В	А	Б	В	Б	В	Б	А	В

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится в письменной форме по темам «Сложение моментов при образовании сложных квантовых систем, электронная конфигурация, атомные термы, правила Хунда, стационарная теория возмущений», включает в себя 6 задач.

2. Критерии оценки

Каждая задача оценивается от 0 до 3 баллов. Контрольная работа оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если решено менее двух задач. Оценка составляет 0 – 5 баллов.

Работа выполнена **на пороговом** уровне, если решено от двух до трех задач. Оценка составляет 6 – 9 баллов.

Работа выполнена **на базовом** уровне, если решено от четырех до пяти задач. Оценка составляет 10 – 15 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все решены все шесть задач. Оценка составляет 16 – 18 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

Задача 1.

Найти возможные значения полных механических моментов электронных оболочек атомов в состоянии 4P .

Задача 2.

Выписать возможные термы атомов, содержащих кроме заполненных оболочек два электрона (s и p).

Задача 3.

Для заряженного линейного осциллятора найти сдвиги энергетических уровней в однородном электрическом поле (направленном вдоль оси колебаний) в первых двух порядках теории возмущений. Для справки: матричный элемент координаты равен $q_{n,n-1} = q_{n-1,n} = \sqrt{n\hbar/(2m\omega)}$.

Задача 4.

Запишите электронную конфигурацию для атома $Z = 14$.

Задача 5.

С помощью правил Хунда найти основной терм атома азота ($Z = 7$).

Задача 6.

Какие переходы запрещены правилами отбора:

$$^2D_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}, \quad ^3P_1 \rightarrow ^2S_{1/2}, \quad ^3F_3 \rightarrow ^3P_2, \quad ^4F_{7/2} \rightarrow ^4D_{5/2}?$$

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны рассчитать расщепление энергетических уровней в постоянном электрическом поле (эффект Штарка) для второго возбужденного состояния атома водорода, а также записать выражения для волновых функций расщепленных состояний.

Пояснительная записка РГЗ может быть написана как чернилами от руки, так и оформлена с помощью текстового редактора (например, Microsoft word). Пояснительная записка включает в себя титульный лист, введение, подробное изложение всех расчетов, заключение и список использованных источников.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если решено менее 40% от общего объема задания, оценка составляет 0-9 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если решено не менее 40% и не более 60% от общего объема задания, студент испытывает трудности с объяснением хода решения и ответами на уточняющие вопросы, оценка составляет 10-14 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если решено не менее 60% и не более 85% от общего объема задания, студент может объяснить ход решения и ответить на уточняющие вопросы, оценка составляет 15-22 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если задание решено полностью, студент может четко и развернуто объяснить ход решения и ответить на уточняющие вопросы, оценка составляет 23-25 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

Используя метод стационарной теории возмущений, рассчитать расщепление энергетических уровней в постоянном электрическом поле (эффект Штарка) для второго возбужденного состояния атома водорода ($n = 3$). Ограничиться поправками первого порядка по возмущению. Волновые функции представить в виде суперпозиции собственных функций невозмущенного гамильтониана.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в письменной форме по тестам. Тест включает в себя 20 заданий, охватывающих ключевые темы курса. Только один из предложенных вариантов является верным.

Пример теста для экзамена

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

- А. релятивистская малость $((V_{\text{ат}}/c)^2 \ll 1)$
- Б. отношение массы электрона к массе ядра
- В. оба этих параметра**
- Г. ни один из них

2. Укажите правильную формулу оператора кинетической энергии электронов:

А. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$

Б. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$

В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,\tilde{N}}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$

Г. ни один из вариантов неверен

.....

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный тест считается **неудовлетворительным**, если студент дал менее 8 правильных ответов, оценка составляет 0-17 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **пороговом** уровне, если студента дал от 8 до 13 правильных ответов, оценка составляет 18-29 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **базовом** уровне, если студент дал от 14 до 17 правильных ответов, оценка составляет 30-40 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент дал не менее 18 правильных ответов, оценка составляет 41-45 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Основы квантовой механики»

Вариант 1

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

- А. релятивистская малость $((V_{\text{ат}} / c)^2 \ll 1)$
- Б. отношение массы электрона к массе ядра
- В. оба этих параметра
- Г. ни один из них

2. Укажите правильную формулу оператора кинетической энергии электронов:

- А. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$
- Б. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$
- В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,\tilde{N}}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$
- Г. ни один из вариантов неверен

3. Выберите правильное утверждение:

- А. фермионы – это частицы с целым спином
- Б. бозоны – это частицы с нечетным спином
- В. фермионы – это частицы с полуцелым спином
- Г. бозоны – это частицы с четным спином

4. Что значит, что волновая функция двух тождественных бозонов симметрична относительно перестановок?

- А. при перестановке значений, которые принимают пространственные и спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- Б. при перестановке значений, которые принимают только пространственные координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- В. при перестановке значений, которые принимают только спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- Г. является сферически симметричной

5. Волновая функция системы тождественных фермионов:

- А. симметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- Б. антисимметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- В. симметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$
- Г. антисимметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

6. Какая из формулировок соответствует принципу Паули:

- А. Состояние микрочастицы в квантовой механике не может одновременно характеризоваться точными значениями координаты и импульса
- Б. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, обладающих одинаковым спином
- В. Энергетический спектр электронов в квантово-механической системе дискретен
- Г. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, находящихся в состоянии с одинаковым набором квантовых чисел

7. Какая формула определяет распределение электронов по энергетическим уровням:

- А. $4n^3$
- Б. $5n$
- В. $2n^2$
- Г. n

(где n – главное квантовое число)

8. Теория возмущений позволяет вычислить:

- А. оператор возмущения, если известно классическое выражение для возмущающего систему потенциала
- Б. поправки к энергиям стационарных состояний непрерывного спектра
- В. поправки к волновым функциям и энергиям стационарных состояний дискретного спектра
- Г. ни один из вариантов неверен

9. Уровни энергии ε_i некоторой квантовой системы не вырождены. На систему накладывается возмущение $\hat{V}$, матричные элементы оператора которого с невозмущенными собственными функциями V_{ik} известны. Какой формулой определяется поправка второго порядка к энергии i -го стационарного состояния?

А. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\varepsilon_i - \varepsilon_k}$

Б. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\varepsilon_k - \varepsilon_i}$

В. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|}{(\varepsilon_i - \varepsilon_k)^2}$

Г. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ki}|}{\varepsilon_i - \varepsilon_k}$

10. Какую размерность имеют матричные элементы оператора возмущения?

- А. длина
- Б. импульс
- В. энергия
- Г. безразмерны

11. Некоторая квантовая система имеет N -кратно вырожденный уровень. На систему накладывают малое возмущение, которое частично снимает вырождение этого уровня. Что это значит?

- А. возмущенная система имеет группу из N невырожденных уровней с небольшими энергетическими интервалами
- Б. у невозмущенной системы после выключения возмущения частично пропадет вырождение
- В. возмущенная система имеет группу из K ($K < N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут вырожденными
- Г. возмущенная система имеет группу из K ($K > N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут вырожденными

12. Пятый возбужденный уровень (шестой по счету в порядке возрастания энергии) некоторой трехмерной квантовой системы является четырехкратно вырожденным. На систему накладывается малое возмущение $\hat{V}$. Какой размерности секулярное уравнение надо решать, чтобы определить расщепление этого уровня под действием возмущения $\hat{V}$?

- А. 3
- Б. 4
- В. 6
- Г. 9

13. Расщепление энергетических уровней атома в электрическом поле – это:

- А. эффект Штарка
- Б. фотоэффект
- В. эффект Комптона
- Г. эффект Зеемана

14. Ортосостояния атома гелия по значению проекции суммарного спина являются:

- А. четырёхкратно вырожденными
- Б. двукратно вырожденными
- В. трёхкратно вырожденными
- Г. не вырожденными

15. Как определяется частота перехода ω_{kn} между k -м и n -м стационарными состояниями?

A. $\omega_{kn} = \frac{\varphi_k - \varphi_n}{\hbar}$

Б. $\omega_{kn} = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_n}{\hbar}$

В. $\omega_{kn} = (\varphi_k - \varphi_n)\hbar$

Г. $\omega_{kn} = (\varepsilon_k - \varepsilon_n)\hbar$

(здесь φ_i и ε_i – собственные функции и собственные значения невозмущенного гамильтониана).

16. На квантовую систему накладывают зависящее от времени возмущение $\alpha \hat{V}(x, t)$, где α – некоторое число. Как вероятности переходов под действием этого возмущения, вычисленные в первом порядке теории возмущений, зависят от α ?

A. как α

Б. как α^2

В. как α^3

Г. как α^4

17. Каким будет основной терм атома кислорода (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^4$)?

A. 3S

Б. 6F_2

В. 5D

Г. 3P

18. Каким будет основное состояние атома азота (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^3$)?

A. $^4S_{\frac{3}{2}}$

Б. $^3S_{\frac{1}{2}}$

В. 2S_1

Г. $^1P_{\frac{3}{2}}$

19. Как полное сечение рассеяния выражается через амплитуду рассеяния $f(\theta)$?

A. $\sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta)|^2 d\theta$

Б. $\sigma = \int_0^\pi |f(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta$

В. $\sigma = \int_0^\pi |f(\theta)|^2 d\theta$

Г. $\sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta$

20. Какая из нижеперечисленных формул для модуля вектора столкновения в борновском приближении является правильной?

A. $q = 2k \sin(\theta/2)$

Б. $q = 2k \cos(\theta/2)$

В. $q = 2k \tan(\theta/2)$

Г. $q = 2k \cot(\theta/2)$

Вариант 2

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

A. отношение массы электрона к массе ядра

Б. релятивистская малость $((V_{\text{ат}}/c)^2 \ll 1)$

В. ни один из них

Г. оба этих параметра

2. Укажите правильную формулу оператора электрон-ядерного взаимодействия:

A. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$

Б. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$

В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,\tilde{N}}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$

Г. ни один из вариантов неверен

3. Выберите правильное утверждение:

A. фермионы – это частицы с четным спином

Б. бозоны имеют полуцелый спин

В. спин всех бозонов равен 2^1

Г. если частица имеет спин, равный $1/2$, то это фермион

4. Что значит, что волновая функция двух тождественных фермионов антисимметрична относительно перестановок?

A. при перестановке значений, которые принимают пространственные и спиновые координаты первой и второй частицы, функция меняет знак

Б. при перестановке значений, которые принимают только пространственные координаты первой и второй частицы, функция меняет знак

В. при перестановке значений, которые принимают только спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется

Г. является нечетной

5. Волновая функция системы тождественных бозонов:

A. симметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам

Б. антисимметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам

В. симметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

Г. антисимметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

6. Какая из формулировок соответствует принципу Паули:

A. В квантово-механической системе не может двух или более электронов, находящихся в состоянии с одинаковым набором квантовых чисел

Б. Энергетический спектр электронов в квантово-механической системе дискретен

В. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, обладающих одинаковым спином

Г. Состояние микрочастицы в квантовой механике не может одновременно характеризоваться точными значениями координаты и импульса

7. Какая формула определяет распределение электронов по энергетическим уровням:

A. $3n^7$

Б. $2n^2$

В. $6n^4$

Г. n^3

(где n – главное квантовое число)

8. На частицу с зарядом e накладывается однородное электрическое поле с напряженностью E , направленное вдоль оси z . Каким является оператор возмущения?

A. $\hat{V} = -eEr \sin(\varphi)$

Б. $\hat{V} = -eEr \sin(\theta)$

В. $\hat{V} = -eEr \cos(\varphi)$

Г. $\hat{V} = -eEr \cos(\theta)$

9. Какая из двух формул $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k}$ или $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ki}|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k}$ для поправки к

энергии i -го стационарного состояния правильна?

- А. первая
- Б. вторая
- В. обе, поскольку приводят к одинаковому результату
- Г. зависит от невозмущенной системы

10. Энергии $\mathcal{E}_i$, входящие в формулы теории возмущений – это:

- А. собственные значения возмущенного гамильтониана
- Б. собственные значения невозмущенного гамильтониана
- В. собственные значения свободного гамильтониана
- Г. те значения энергии, которые можно обнаружить при измерениях в возмущенной системе

11. Некоторая квантовая система имеет N -кратно вырожденный уровень. На систему накладывают малое возмущение, которое полностью снимает вырождение этого уровня. Что это значит?

- А. возмущенная система имеет группу из N невырожденных уровней с небольшими энергетическими интервалами
- Б. у невозмущенной системы после выключения возмущения пропадет вырождение
- В. возмущенная система имеет группу из K ($K < N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут невырожденными
- Г. возмущенная система имеет группу из K ($K > N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут невырожденными.

12. Шестой возбужденный уровень (седьмой по счету в порядке возрастания энергии) некоторой трехмерной квантовой системы является пятикратно вырожденным. На систему накладывается малое возмущение $\hat{V}$. На какое максимальное количество подуровней может расщепиться уровень?

- А. на 5
- Б. на 6
- В. на 7
- Г. на 3

13. Расщепление энергетических уровней атома в магнитном поле – это:

- А. эффект Комптона
- Б. эффект Штарка
- В. эффект Зеемана
- Г. фотоэффект

14. Парасостояния атома гелия по значению проекции суммарного спина являются:

- А. двукратно вырожденными
- Б. не вырожденными
- В. четырёхкратно вырожденными
- Г. трёхкратно вырожденными

15. Какова размерность частоты перехода между двумя стационарными состояниями?

- А. энергия
- Б. время
- В. обратная энергия
- Г. обратное время

16. Какой формулой определяется вероятность перехода из k -го в n -е стационарное состояние под действием возмущения $\hat{V}(t)$ в первом порядке теории возмущений?

A. $w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} V_{kn}(t) e^{i\omega_{kn}t} dt \right|^2$

Б. $w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} V_{kn}(t) dt \right|^2$

В. $w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} \hat{V}(x, t) e^{i\omega_{kn}t} dx dt \right|^2$

Г. $w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} \Psi_k^*(x) \hat{V}(x, t) \Psi_n(x) dx dt \right|^2$

(где t_1 и t_2 — моменты начала и окончания действия возмущения, V_{kn} — матричный элемент оператора возмущения, ω_{kn} — частота перехода).

17. Каким будет основное состояние атома кислорода (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^4$)?

A. 3P_2

Б. 1D_5

В. 3P_1

Г. 2F_2

18. Каким будет основной терм атома азота (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^3$)?

A. 2D

Б. 3P

В. 7F_4

Г. 4S

19. Как дифференциальное сечение рассеяния выражается через амплитуду рассеяния $f(\theta)$?

A. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|$

Б. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$

В. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = 1 - |f(\theta)|^2$

Г. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{|f(\theta)|^2}$

(где Ω — телесный угол).

20. Частицы рассеиваются на потенциале $U(\vec{r})$. Какая из нижеследующих формул определяет амплитуду рассеяния в борновском приближении?

A. $f(\theta) \propto \int U(r) d^3\vec{r}$

Б. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3\vec{r}$

В. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{k}'\vec{r}} d^3\vec{r}$

Г. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{q}\vec{r}} d^3\vec{r}$

(где $\vec{k}$ — волновой вектор падающих частиц, $\vec{k}'$ — волновой вектор рассеянных частиц, $\vec{q} = \vec{k} - \vec{k}'$ — вектор столкновения).

Ответы к тестам

	Номера вопросов в тесте																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
№ вар.	Ответы																			
1	В	Б	В	А	Б	Г	В	В	А	В	В	Б	А	В	Б	Б	Г	А	Г	А
2	Г	В	Г	А	А	А	Б	Г	В	Б	А	А	В	Б	Г	А	А	Г	Б	Г

Паспорт экзамена

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в письменной форме по тестам. Тест включает в себя 20 заданий, охватывающих ключевые темы курса. Только один из предложенных вариантов является верным.

Пример теста для экзамена

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является линейным, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

А. $\hat{A}\beta\Psi_1 = \beta\hat{A}\Psi_2$

Б. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \alpha\hat{A}\Psi_1 + \beta\hat{A}\Psi_2$

В. $\hat{A}\beta\Psi_2 = \alpha\hat{A}\Psi_1$

Г. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \beta\hat{A}\Psi_1 + \alpha\hat{A}\Psi_2$

(α и β – произвольные комплексные числа).

2. Собственные функции эрмитового оператора, отвечающие различным собственным значениям:

А. ортогональны;

Б. отличаются числовым множителем;

В. совпадают;

Г. комплексно сопряжены по отношению друг к другу;

.....

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный тест считается **неудовлетворительным**, если студент дал менее 8 правильных ответов, оценка составляет 0-17 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **пороговом** уровне, если студента дал от 8 до 13 правильных ответов, оценка составляет 18-29 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **базовом** уровне, если студент дал от 14 до 17 правильных ответов, оценка составляет 30-40 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент дал не менее 18 правильных ответов, оценка составляет 41-45 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Основы квантовой механики»

Вариант 1

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является линейным, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

А. $\hat{A}\beta\Psi_1 = \beta\hat{A}\Psi_2$

Б. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \alpha\hat{A}\Psi_1 + \beta\hat{A}\Psi_2$

В. $\hat{A}\beta\Psi_2 = \alpha\hat{A}\Psi_1$

Г. $\hat{A}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \beta\hat{A}\Psi_1 + \alpha\hat{A}\Psi_2$

(α и β – произвольные комплексные числа).

2. Собственные функции эрмитового оператора, отвечающие различным собственным значениям:

А. ортогональны

Б. отличаются числовым множителем

В. совпадают

Г. комплексно сопряжены по отношению друг к другу

3. Частица находится в квантовом состоянии, описываемом нормированной волновой функцией $\Psi(\vec{r}, t)$. Какое из нижеследующих утверждений справедливо?

А. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV$ есть вероятность обнаружить частицу в момент времени t в объеме dV в окрестности точки $\vec{r}$

Б. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dt$ есть вероятность обнаружить частицу в точке $\vec{r}$ в интервале времени $(t, t + dt)$

В. $|\Psi(\vec{r}, t)|^2 dVdt$ есть вероятность обнаружить частицу в интервале времени $(t, t + dt)$ в объеме dV в окрестности точки $\vec{r}$

Г. все утверждения неправильны

4. Собственными значениями оператора четности являются:

А. все четные целые числа

Б. все нечетные целые числа

В. +1 и -1

Г. 0 и 1

5. Коммутатор операторов координаты и проекции импульса $[\hat{x}, \hat{p}_x]$ равен:

А. $\hat{p}_x$

Б. $\hat{x}$

В. $i\hbar$

Г. 0

6. Собственная функция $f_p(x)$ оператора импульса $\hat{p}_x$, отвечающая собственному значению p , в координатном представлении равна:

А. $f_p(x) = \sin\{\frac{px}{\hbar}\}$

Б. $f_p(x) = \cos\{\frac{px}{\hbar}\}$

В. $f_p(x) = \exp\{\frac{ipx}{\hbar}\}$

Г. $f_p(x) = \exp\{-\frac{ipx}{\hbar}\}$

7. Частица находится во внешнем поле $U(\hat{r}, t)$. Какое из нижеследующих уравнений является временным уравнением Шредингера для волновой функции этой частицы?

А. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(\hat{r}, t) \right) \Psi$

Б. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = U(\hat{r}, t) \Psi$

В. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - U(\hat{r}, t) \right) \Psi$

Г. $\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - U(\hat{r}, t) \right) \Psi = E \Psi$

8. Гамильтониан частицы не зависит от времени. Будут ли зависеть от времени волновые функции стационарных состояний частицы?

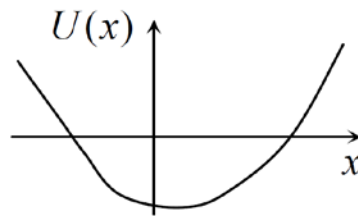
А. нет

Б. да

В. это зависит от начальных условий

Г. это зависит от гамильтониана

9. Потенциальная энергия стремится к $+\infty$ при $x \rightarrow \pm\infty$ («потенциальная яма», см. рисунок). Все уровни энергии частицы в такой яме:



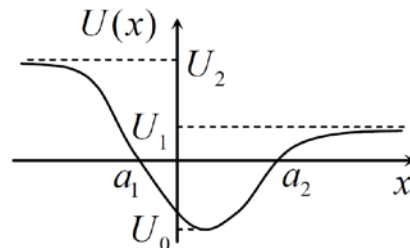
А. не вырождены

Б. двукратно вырождены

В. часть уровней не вырождена, часть двукратно вырождена

Г. вырождение уровней зависит от конкретного вида потенциала

10. Дан график зависимости потенциальной энергии $U(x)$ от координаты x (см. рисунок). При каких энергиях заведомо не существует стационарных состояний?



А. $E < U_0$

Б. $U_0 < E < U_1$

В. $E > U_2$

Г. $U_1 < E < U_2$

11. Какой формулой определяются энергии стационарных состояний частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной a (здесь $n = 1, 2, 3, \dots$)?

А. $\frac{\pi^2 \hbar^2 n}{2ma^2}$

Б. $\frac{\pi^2 \hbar^2 (n + 1/2)}{2ma^2}$

В. $\frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ma^2}$

Г. $\frac{\pi^2 \hbar^2 (n^2 + 1/2)}{2ma^2}$

12. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x = 0$ и $x = a$?

А. $A \sin(\frac{\pi n x}{a})$

Б. $A \cos(\frac{\pi n x}{a})$

В. $A \exp(i \frac{\pi n x}{a})$

Г. $A \exp(-i \frac{\pi n x}{a})$

($n = 1, 2, 3, \dots$, A – постоянная)

13. Какой формулой определяются энергии собственных состояний одномерного гармонического осциллятора с частотой ω ?

А. $\hbar \omega (n^2 + 1/2)$

Б. $\hbar \omega (n + 1/2)$

В. $\hbar \omega n$

Г. $\hbar \omega n^2$

($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

14. Какая величина, составленная из параметров гармонического осциллятора с массой m и частотой ω , имеет размерность длины (то есть является параметром длины для осциллятора)?

А. $\sqrt{\frac{m}{\hbar \omega}}$

Б. $\sqrt{\frac{\hbar}{m \omega}}$

В. $\sqrt{\frac{m \hbar}{\omega}}$

Г. $\sqrt{\frac{m \omega}{\hbar}}$

15. Функция e^{ikx} , где k – некоторое положительное число, описывает поток частиц, распространяющихся:

А. в положительном направлении оси x

Б. в отрицательном направлении оси x

В. в среднем покоящихся частиц, так как вероятность обнаружить их в разных точках пространства в таком состоянии одинакова

Г. информации для ответа недостаточно

16. Какова размерность коэффициентов отражения и прохождения?

А. энергия

Б. импульс

В. длина

Г. безразмерные

17. Размерность момента импульса совпадает:

А. с размерностью постоянной Планка

Б. с размерностью квадрата постоянной Планка

В. с размерностью квадратного корня из постоянной Планка

Г. с размерностью обратной постоянной Планка

18. Какие из нижеследующих функций являются собственными для оператора $\hat{L}_z$?

A. $\sin(m\varphi)$

Б. $\exp(m\varphi)$

В. $\exp(im\varphi)$

Г. $\cos(m\varphi)$

(где m – любое целое число)

19. Какой формулой определяется энергия стационарного состояния с квантовыми числами n_r , l и m электрона в атоме водорода?

A. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m + 1)^2}$

Б. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m)^2}$

В. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + 1)^2}$

Г. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l)^2}$

20. Какой из перечисленных коммутаторов равен нулю?

A. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_-]$

Б. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_+]$

В. только $[\hat{S}^2, \hat{S}_z]$

Г. все перечисленные

(где $\hat{S}_\pm = \hat{S}_x \pm i\hat{S}_y$ – повышающий и понижающий проекцию спина частицы на оси z операторы)

Вариант 2

1. Оператор $\hat{A}$, действующий в некотором линейном пространстве, является эрмитовым, если для любых элементов Ψ_1 и Ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

A. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2) = (\Psi_2, \hat{A}\Psi_1)$

Б. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2)^* = (\Psi_1, \hat{A}\Psi_2)$

В. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2) = (\Psi_1, \hat{A}\Psi_2)$

Г. $(\hat{A}\Psi_1, \Psi_2)^* = (\Psi_2, \hat{A}\Psi_1)$,

где $(\dots, \dots)$ – скалярное произведение элементов пространства.

2. Собственные значения любого эрмитового оператора:

A. положительны

Б. отрицательны

В. вещественны

Г. чисто мнимы

3. Собственными функциями оператора четности являются:

A. все четные функции и только они

Б. все нечетные функции и только они

В. все четные функции (отвечают собственному значению +1) и все нечетные функции (отвечают собственному значению -1)

Г. все четные функции (отвечают собственному значению -1) и все нечетные функции (отвечают собственному значению +1)

4. Квантовая система описывается нормированной волновой функцией $\Psi(x, t)$.

Физической величине A отвечает оператор $\hat{A}$. По какой формуле из нижеследующих формул можно вычислить среднее значение результатов многих измерений величины A над ансамблем таких квантовых систем?

A. $\int \Psi^*(x, t) \hat{A} \Psi(x, t) dx$

Б. $\int \hat{A} |\Psi(x, t)|^2 dx$

В. $\int |\Psi(x, t)|^2 \hat{A} dx$

Г. $\hat{A} \int |\Psi(x, t)|^2 dx$

5. Действие оператора проекции импульса $\hat{p}_x$ на произвольную функцию $\Psi(x)$ в координатном представлении определяется соотношением:

A. $\hat{p}_x \Psi = p_x \Psi$

Б. $\hat{p}_x \Psi = -\hbar^2 \frac{d^2 \Psi}{dx^2}$

В. $\hat{p}_x \Psi = -i\hbar \frac{d \Psi}{dx}$

Г. $\hat{p}_x \Psi = i\hbar \frac{d \Psi}{dp_x}$

6. Частица находится в состоянии с нормированной волновой функцией, $\Psi(x)$. Какой формулой определяется средняя координата частицы в этом состоянии?

A. $\bar{x} = \int x |\Psi(x)| dx$

Б. $\bar{x} = \int x |\Psi(x)|^2 dx$

В. $\bar{x} = \int |\Psi(x)| dx$

Г. $\bar{x} = \int |\Psi(x)|^2 dx$

7. Какое из нижеследующих уравнений является нестационарным уравнением Шредингера для волновой функции частицы?

A. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$

Б. $i\hbar \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \hat{H} \Psi$

В. $\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$

Г. $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \hat{H} \Psi$

8. Какая формула есть математическое выражение закона сохранения вероятности?

A. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U(\vec{r}, t) \right) \Psi$

Б. $\frac{\partial}{\partial t} |\Psi(\vec{r}, t)|^2 + \text{div} \vec{J}(\vec{r}, t) = 0$

В. $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi$

Г. $\hat{H} \Psi = E \Psi$

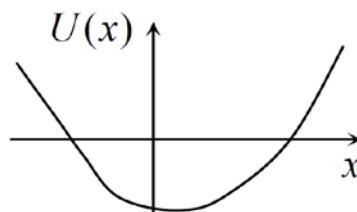
9. Частица движется в некотором потенциале $U(x)$. Известно, что $U(x) \rightarrow +\infty$ при $x \rightarrow \pm\infty$ (см. рисунок). Существуют ли среди стационарных состояний частицы состояния, относящиеся к непрерывному спектру?

A. да

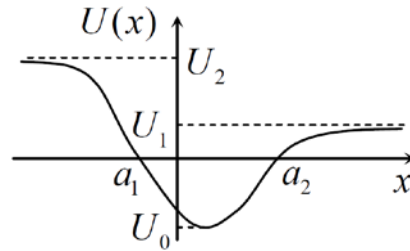
Б. нет

В. в некоторых случаях да, в некоторых случаях нет

Г. это зависит от потенциала



10. Дан график зависимости потенциальной энергии $U(x)$ от координаты x (см. рисунок). При каких энергиях существуют невырожденные стационарные состояния непрерывного спектра?



A. $E > U_2$

Б. $U_1 < E < U_2$

В. $U_0 < E < U_1$

Г. $E < U_0$

11. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана частицы массой m в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x = -a/2$ и $x = a/2$?

A. $A \sin(\frac{\pi n x}{a} + \pi n)$

Б. $A \sin(\frac{\pi n x}{a} + \frac{\pi n}{2})$

В. $A \cos(\frac{\pi n x}{a} + \pi n)$

Г. $A \cos(\frac{\pi n x}{a} + \frac{\pi n}{2})$

($n = 1, 2, 3, \dots$, A – постоянная)

12. Частица находится в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме, расположенной между точками $x = 0$ и $x = a$. Каким нужно выбрать множитель перед волновой функцией стационарного состояния частицы, $\Psi(x) \propto \sin(\pi n x / a)$, чтобы эта функция была нормирована на единицу?

A. $\sqrt{\frac{a}{2}}$

Б. $\sqrt{\frac{na}{2}}$

В. $\sqrt{\frac{2}{a}}$

Г. $\sqrt{\frac{2}{na}}$

13. Какой формулой определяются собственные функции гамильтониана гармонического осциллятора ($x = x / \sqrt{\hbar / m \omega}$ – безразмерная координата осциллятора)?

A. $H_n(x) \exp(-x^2 / 2)$

Б. $H_n(x) \exp(-x^4 / 2)$

В. $H_n(x) \exp(-x / 2)$

Г. $H_n(x) \exp(-x^2)$

(H_n – полиномы Эрмита, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$).

14. Какая величина, составленная из параметров гармонического осциллятора с массой m и частотой ω , имеет размерность импульса (то есть является параметром импульса для осциллятора)?

A. $\frac{1}{\sqrt{\hbar m \omega}}$

Б. $\sqrt{\hbar m \omega}$

В. $\hbar m \omega$

Г. $\frac{1}{\hbar m \omega}$

15. При исследовании прохождения частиц через барьеры асимптотические формулы для волновых функций частиц с определенной энергией ($\Psi(x \rightarrow \pm\infty) \propto e^{\pm ikx}$) – выбираются, исходя из:

- А. физических соображений
- Б. решения нестационарного уравнения Шредингера
- В. решения стационарного уравнения Шредингера
- Г. корпускулярно-волнового дуализма де Бройля

16. Могут ли коэффициенты прохождения и отражения частиц от некоторого потенциала быть равными $R = 0.125$, $T = 0.885$?

- А. да
- Б. нет
- В. зависит от потенциала
- Г. зависит от энергии

17. Какой формулой определяется выражение для оператора проекции орбитального момента на ось x в декартовых координатах $\hat{L}_x$?

- А. $i\hbar z \frac{\partial}{\partial y}$
- Б. $-i\hbar y \frac{\partial}{\partial z}$
- В. $i\hbar(z \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial z})$
- Г. $i\hbar(y \frac{\partial}{\partial z} - z \frac{\partial}{\partial y})$

18. Собственными значениями оператора квадрата орбитального момента импульса являются числа вида $\hbar^2 l(l+1)$, где l :

- А. полуцелое неотрицательное число (число вида $1/2, 3/2, \dots$)
- Б. целое неотрицательное число
- В. целое неположительное число
- Г. полуцелое неположительное число

19. Какой формулой определяется энергия стационарного состояния с квантовыми числами n_r , l и m электрона в атоме водорода (нумерация n_r начинается с единицы)?

- А. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l)^2}$
- Б. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + 1)^2}$
- В. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m)^2}$
- Г. $-\frac{me^4}{2\hbar^2(n_r + l + m + 1)^2}$

20. Выбрать верное равенство:

- А. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_x$
- Б. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_y$
- В. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}_z$
- Г. $[\hat{S}_+, \hat{S}_-] = 2\hat{S}^2$

(где $\hat{S}_{\pm} = \hat{S}_x \pm i\hat{S}_y$ – повышающий и понижающий проекцию спина частицы на оси z операторы)

Ответы к тестам

	Номера вопросов в тесте																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
№ вар.	Ответы																			
1	Б	А	А	В	В	В	А	Б	А	А	В	А	Б	Б	А	Г	А	В	В	Г
2	В	В	В	А	В	Б	А	Б	Б	Б	В	В	А	Б	В	Б	В	Б	А	В

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится в письменной форме по теме «Операторы в квантовой механике», включает в себя 6 задач.

2. Критерии оценки

Каждая задача оценивается от 0 до 3 баллов. Контрольная работа оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если решено менее двух задач. Оценка составляет 0 – 5 баллов.

Работа выполнена **на пороговом** уровне, если решено от двух до трех задач. Оценка составляет 6 – 9 баллов.

Работа выполнена **на базовом** уровне, если решено от четырех до пяти задач. Оценка составляет 10 – 15 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все решены все шесть задач. Оценка составляет 16 – 18 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

Задача 1.

Рассмотреть следующие операторы ($-\infty < x < +\infty$):

а) отражения $\hat{I} : \hat{I}\Psi(x) \equiv \Psi(-x)$;

б) сдвига $\hat{T}_a : \hat{T}_a\Psi(x) \equiv \Psi(x+a)$;

в) изменения масштаба $\hat{M}_c : \hat{M}_c\Psi(x) \equiv \sqrt{c}\Psi(cx)$, $c > 0$;

г) комплексного сопряжения $\hat{K} : \hat{K}\Psi(x) \equiv \Psi^*(x)$;

д) перестановки координат двух частиц $\hat{P}_{12} : \hat{P}_{12}\Psi(x_1, x_2) \equiv \Psi(x_2, x_1)$.

Какие из этих операторов являются линейными? Найти вид операторов, которые по отношению к ним являются: 1) эрмитово сопряженными, 2) обратными.

Задача 2.

Выразить коммутаторы $[\hat{A}, \hat{B}\hat{C}]$ и $[\hat{A}\hat{B}, \hat{C}]$ через $[\hat{A}, \hat{B}]$, $[\hat{A}, \hat{C}]$ и $[\hat{B}, \hat{C}]$.

Задача 3.

Показать, что $(\hat{L}^+)^+ \equiv \hat{L}$.

Задача 4.

Доказать операторное равенство: $\left(\frac{1}{x} \frac{d}{dx} x\right)^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d}{dx}$.

Задача 5.

Найти собственные значения оператора $\hat{A}$, принадлежащие собственной функции ψ_A ,

если: $\hat{A} = -\frac{d^2}{dx^2} + x^2$, $\psi_A = \exp(-x^2/2)$.

Задача 6.

Эрмитов оператор $\hat{f}$ удовлетворяет соотношению: $\hat{f}^2 = c \hat{f}$, где c – вещественный параметр. Каковы собственные значения такого оператора?

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Основы квантовой механики», 5 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны решить 10 задач, охватывающих следующие темы: «волны де Бройля; волновое уравнение Шредингера; соотношение неопределенностей Гейзенберга; квантово-механические операторы; изменение квантово-механических величин во времени; среднее значение оператора; одномерное движение частицы в потенциалах прямоугольной формы; квантовый гармонический осциллятор».

Пояснительная записка РГЗ включает в себя титульный лист и подробное изложение решений задач. Каждая задача должна начинаться с новой страницы. Условие задач следует привести полностью без сокращений. Пояснительная записка РГЗ может быть написана как чернилами от руки, так и оформлена с помощью текстового редактора (например, Microsoft word).

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если решено менее 40% предложенных задач, оценка составляет 0-9 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если решено не менее 40% и не более 60% задач, оценка составляет 10-14 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если решено не менее 60% и не более 85%, оценка составляет 15-22 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если решено более 85% задач, оценка составляет 23-25 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

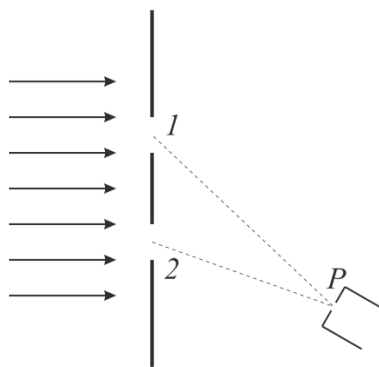
Типовое задание для РГЗ:

Задача 1.

При увеличении энергии электрона на $\Delta E = 200$ эВ его дебройлевская длина волны изменилась в $\eta = 2,0$ раза. Найти первоначальную длину волны электрона.

Задача 2.

Поток электронов падает на экран с двумя щелями 1 и 2 (см. рисунок ниже). В точке P расположено входное отверстие счетчика. Пусть ψ_1 – амплитуда волны, достигшей точки P , если открыта только щель 1, а ψ_2 – то же, но если открыта только щель 2. Отношение $\psi_2/\psi_1 = \eta = 3,0$. Если открыта только щель 1, счетчик регистрирует $N_1 = 100$ электронов в секунду. Сколько электронов будет регистрировать счетчик, если открыты обе щели и в точке P наблюдается интерференционный: **а)** максимум, **б)** минимум?



Задача 3.

Атом испустил фотон с длиной волны $\lambda = 0,58$ мкм за время $\tau \approx 10^{-8}$ с. Оценить неопределенность Δx , с которой можно установить координату фотона в направлении его движения, а также относительную неопределенность его длины волны.

Задача 4.

Частица находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Найти:

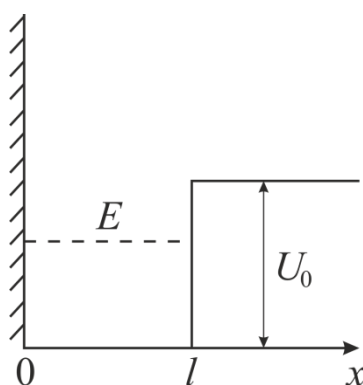
- массу частицы, если ширина ямы l и разность энергий 3-го и 2-го энергетических уровней равна ΔE ;
- квантовое число n энергетического уровня частицы, если интервалы энергии до соседних с ним уровней (верхнего и нижнего) относятся как $\eta : 1$, где $\eta = 1,4$.

Задача 5.

Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l с бесконечно высокими стенками. Найти вероятность пребывания частицы в области $l/3 < x < 2l/3$.

Задача 6.

Частица массы m находится в одномерном потенциальном поле $U(x)$, показанном на рисунке ниже, где $U(0) = \infty$. Найти сколько уровней содержит яма, у которой $l^2 U_0 = 75 \hbar^2 / m$.



Задача 7.

Вычислить средние значения кинетической и потенциальной энергии квантового осциллятора с частотой ω в основном состоянии $\psi(x) = A \exp(-\alpha^2 x^2)$, где $\alpha^2 = \kappa / 2\hbar\omega$, κ – постоянная ($U = \kappa x^2 / 2$).

Задача 8.

Доказать, что для частицы, движущейся в потенциальном поле $U(x)$, выполняется следующее операторное равенство: $\frac{d}{dt}(x\hat{p}_x) = \frac{\hat{p}_x^2}{m} - x\frac{\partial U}{\partial x}$.

Задача 9.

Вычислить среднее значение квадрата момента импульса в состоянии $\psi(\theta, \varphi) = A \sin \theta \cos \varphi$.

Задача 10.

Доказать следующее операторное равенство: $[x^2, [x, \hat{p}_x^2]] = -4\hbar^2 x$.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в письменной форме по тестам. Тест включает в себя 20 заданий, охватывающих ключевые темы курса. Только один из предложенных вариантов является верным.

Пример теста для экзамена

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

- А. релятивистская малость $((V_{\text{ат}}/c)^2 \ll 1)$
- Б. отношение массы электрона к массе ядра
- В. оба этих параметра
- Г. ни один из них

2. Укажите правильную формулу оператора кинетической энергии электронов:

А. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$

Б. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$

В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,\tilde{N}}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$

Г. ни один из вариантов неверен

.....

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный тест считается **неудовлетворительным**, если студент дал менее 8 правильных ответов, оценка составляет 0-17 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **пороговом** уровне, если студент дал от 8 до 13 правильных ответов, оценка составляет 18-29 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **базовом** уровне, если студент дал от 14 до 17 правильных ответов, оценка составляет 30-40 баллов.
- Ответ на экзаменационный тест засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент дал не менее 18 правильных ответов, оценка составляет 41-45 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Основы квантовой механики»

Вариант 1

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

- А. релятивистская малость $((V_{\text{ат}}/c)^2 \ll 1)$
- Б. отношение массы электрона к массе ядра
- В. оба этих параметра
- Г. ни один из них

2. Укажите правильную формулу оператора кинетической энергии электронов:

- А. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$
- Б. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$
- В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,N}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$
- Г. ни один из вариантов неверен

3. Выберите правильное утверждение:

- А. фермионы – это частицы с целым спином
- Б. бозоны – это частицы с нечетным спином
- В. фермионы – это частицы с полуцелым спином
- Г. бозоны – это частицы с четным спином

4. Что значит, что волновая функция двух тождественных бозонов симметрична относительно перестановок?

- А. при перестановке значений, которые принимают пространственные и спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- Б. при перестановке значений, которые принимают только пространственные координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- В. при перестановке значений, которые принимают только спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется
- Г. является сферически симметричной

5. Волновая функция системы тождественных фермионов:

- А. симметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- Б. антисимметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- В. симметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$
- Г. антисимметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

6. Какая из формулировок соответствует принципу Паули:

- А. Состояние микрочастицы в квантовой механике не может одновременно характеризоваться точными значениями координаты и импульса
- Б. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, обладающих одинаковым спином
- В. Энергетический спектр электронов в квантово-механической системе дискретен
- Г. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, находящихся в состоянии с одинаковым набором квантовых чисел

7. Какая формула определяет распределение электронов по энергетическим уровням:

А. $4n^3$ Б. $5n$

В. $2n^2$ Г. n

(где n — главное квантовое число)

8. Теория возмущений позволяет вычислить:

А. оператор возмущения, если известно классическое выражение для возмущающего систему потенциала

Б. поправки к энергиям стационарных состояний непрерывного спектра

В. поправки к волновым функциям и энергиям стационарных состояний дискретного спектра

Г. ни один из вариантов неверен

9. Уровни энергии ε_i некоторой квантовой системы не вырождены. На систему накладывается возмущение $\hat{V}$, матричные элементы оператора которого с невозмущенными собственными функциями V_{ik} известны. Какой формулой определяется поправка второго порядка к энергии i -го стационарного состояния?

А. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\varepsilon_i - \varepsilon_k}$

Б. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\varepsilon_k - \varepsilon_i}$

В. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|}{(\varepsilon_i - \varepsilon_k)^2}$

Г. $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ki}|}{\varepsilon_i - \varepsilon_k}$

10. Какую размерность имеют матричные элементы оператора возмущения?

А. длина

Б. импульс

В. энергия

Г. безразмерны

11. Некоторая квантовая система имеет N -кратно вырожденный уровень. На систему накладывают малое возмущение, которое частично снимает вырождение этого уровня. Что это значит?

А. возмущенная система имеет группу из N невырожденных уровней с небольшими энергетическими интервалами

Б. у невозмущенной системы после выключения возмущения частично пропадет вырождение

В. возмущенная система имеет группу из K ($K < N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут вырожденными

Г. возмущенная система имеет группу из K ($K > N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут вырожденными

12. Пятый возбужденный уровень (шестой по счету в порядке возрастания энергии) некоторой трехмерной квантовой системы является четырехкратно вырожденным.

На систему накладывается малое возмущение $\hat{V}$. Какой размерности секулярное уравнение надо решать, чтобы определить расщепление этого уровня под действием возмущения $\hat{V}$?

А. 3

Б. 4

В. 6

Г. 9

13. Расщепление энергетических уровней атома в электрическом поле – это:

А. эффект Штарка

Б. фотоэффект

В. эффект Комптона

Г. эффект Зеемана

14. Ортосостояния атома гелия по значению проекции суммарного спина являются:

А. четырехкратно вырожденными

Б. двукратно вырожденными

В. трёхкратно вырожденными

Г. не вырожденными

15. Как определяется частота перехода ω_{kn} между k -м и n -м стационарными состояниями?

А. $\omega_{kn} = \frac{\varphi_k - \varphi_n}{\hbar}$

Б. $\omega_{kn} = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_n}{\hbar}$

В. $\omega_{kn} = (\varphi_k - \varphi_n)\hbar$

Г. $\omega_{kn} = (\varepsilon_k - \varepsilon_n)\hbar$

(здесь φ_i и ε_i – собственные функции и собственные значения невозмущенного гамильтониана).

16. На квантовую систему накладывают зависящее от времени возмущение $\alpha\hat{V}(x,t)$, где α – некоторое число. Как вероятности переходов под действием этого возмущения, вычисленные в первом порядке теории возмущений, зависят от α ?

А. как α

Б. как α^2

В. как α^3

Г. как α^4

17. Каким будет основной терм атома кислорода (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^4$)?

А. 3S

Б. 6F_2

В. 5D

Г. 3P

18. Каким будет основное состояние атома азота (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^3$)?

А. $^4S_{\frac{3}{2}}$

Б. $^3S_{\frac{1}{2}}$

В. 2S_1

Г. $^1P_{\frac{3}{2}}$

19. Как полное сечение рассеяния выражается через амплитуду рассеяния $f(\theta)$?

А. $\sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta)|^2 d\theta$

Б. $\sigma = \int_0^\pi |f(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta$

В. $\sigma = \int_0^\pi |f(\theta)|^2 d\theta$

Г. $\sigma = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta)|^2 \sin(\theta) d\theta$

20. Какая из нижеперечисленных формул для модуля вектора столкновения в борновском приближении является правильной?

А. $q = 2k \sin(\theta/2)$

Б. $q = 2k \cos(\theta/2)$

В. $q = 2k \tan(\theta/2)$

Г. $q = 2k \cot(\theta/2)$

Вариант 2

1. Какие параметры считаются малыми в приближенных схемах расчета атомов и молекул:

А. отношение массы электрона к массе ядра

Б. релятивистская малость $((V_{\text{ат}}/c)^2 \ll 1)$

В. ни один из них

Г. оба этих параметра

2. Укажите правильную формулу оператора электрон-ядерного взаимодействия:

А. $\frac{1}{2m} \sum_{i=1}^N p_i^2$

Б. $\frac{1}{2} \sum_{\substack{i,n \\ (i \neq n)}}^N \frac{e^2}{|\vec{r}_i - \vec{r}_n|}$

В. $-\sum_{\substack{i=1,\dots,N \\ j=1,\dots,N}} \frac{e^2 Z_j}{|\vec{r}_i - \vec{R}_j|}$

Г. ни один из вариантов неверен

3. Выберите правильное утверждение:

А. фермионы – это частицы с четным спином

Б. бозоны имеют полуцелый спин

В. спин всех бозонов равен 2^1

Г. если частица имеет спин, равный $1/2$, то это фермион

4. Что значит, что волновая функция двух тождественных фермионов антисимметрична относительно перестановок?

А. при перестановке значений, которые принимают пространственные и спиновые координаты первой и второй частицы, функция меняет знак

Б. при перестановке значений, которые принимают только пространственные координаты первой и второй частицы, функция меняет знак

В. при перестановке значений, которые принимают только спиновые координаты первой и второй частицы, функция не меняется

Г. является нечетной

5. Волновая функция системы тождественных бозонов:

- А. симметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- Б. антисимметрична относительно перестановок аргументов, относящихся к разным частицам
- В. симметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$
- Г. антисимметрична относительно замены $\vec{r}_i \rightarrow -\vec{r}_i$

6. Какая из формулировок соответствует принципу Паули:

- А. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, находящихся в состоянии с одинаковым набором квантовых чисел
- Б. Энергетический спектр электронов в квантово-механической системе дискретен
- В. В квантово-механической системе не может быть двух или более электронов, обладающих одинаковым спином
- Г. Состояние микрочастицы в квантовой механике не может одновременно характеризоваться точными значениями координаты и импульса

7. Какая формула определяет распределение электронов по энергетическим уровням:

- А. $3n^7$
 - Б. $2n^2$
 - В. $6n^4$
 - Г. n^3
- (где n – главное квантовое число)

8. На частицу с зарядом e накладывается однородное электрическое поле с напряженностью E , направленное вдоль оси z . Каким является оператор возмущения?

- А. $\hat{V} = -eEr \sin(\varphi)$
- Б. $\hat{V} = -eEr \sin(\theta)$
- В. $\hat{V} = -eEr \cos(\varphi)$
- Г. $\hat{V} = -eEr \cos(\theta)$

9. Какая из двух формул $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ik}|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k}$ или $\Delta E_i^{(2)} = \sum_{k(k \neq i)} \frac{|V_{ki}|^2}{\mathcal{E}_i - \mathcal{E}_k}$ для поправки к энергии i -го стационарного состояния правильна?

- А. первая
- Б. вторая
- В. обе, поскольку приводят к одинаковому результату
- Г. зависит от невозмущенной системы

10. Энергии $\mathcal{E}_i$, входящие в формулы теории возмущений – это:

- А. собственные значения возмущенного гамильтониана
- Б. собственные значения невозмущенного гамильтониана
- В. собственные значения свободного гамильтониана
- Г. те значения энергии, которые можно обнаружить при измерениях в возмущенной системе

11. Некоторая квантовая система имеет N -кратно вырожденный уровень. На систему накладывают малое возмущение, которое полностью снимает вырождение этого уровня. Что это значит?

- А. возмущенная система имеет группу из N невырожденных уровней с небольшими энергетическими интервалами
- Б. у невозмущенной системы после выключения возмущения пропадет вырождение
- В. возмущенная система имеет группу из K ($K < N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут невырожденными
- Г. возмущенная система имеет группу из K ($K > N$) уровней с небольшими энергетическими интервалами, часть из которых будут невырожденными.

12. Шестой возбужденный уровень (седьмой по счету в порядке возрастания энергии) некоторой трехмерной квантовой системы является пятикратно вырожденным. На систему накладывается малое возмущение $\hat{V}$. На какое максимальное количество подуровней может расщепиться уровень?

- А. на 5
- Б. на 6
- В. на 7
- Г. на 3

13. Расщепление энергетических уровней атома в магнитном поле – это:

- А. эффект Комптона
- Б. эффект Штарка
- В. эффект Зеемана
- Г. фотоэффект

14. Парасостояния атома гелия по значению проекции суммарного спина являются:

- А. двукратно вырожденными
- Б. не вырожденными
- В. четырёхкратно вырожденными
- Г. трёхкратно вырожденными

15. Какова размерность частоты перехода между двумя стационарными состояниями?

- А. энергия
- Б. время
- В. обратная энергия
- Г. обратное время

16. Какой формулой определяется вероятность перехода из k -го в n -е стационарное состояние под действием возмущения $\hat{V}(t)$ в первом порядке теории возмущений?

$$\begin{array}{ll} \text{А. } w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} V_{kn}(t) e^{i\omega_{kn}t} dt \right|^2 & \text{Б. } w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} V_{kn}(t) dt \right|^2 \\ \text{В. } w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} \hat{V}(x, t) e^{i\omega_{kn}t} dx dt \right|^2 & \text{Г. } w_{k \rightarrow n(k \neq n)} = \left| \frac{i}{\hbar} \int_{t_1}^{t_2} \Psi_k^*(x) \hat{V}(x, t) \Psi_n(x) dx dt \right|^2 \end{array}$$

(где t_1 и t_2 – моменты начала и окончания действия возмущения, V_{kn} – матричный элемент оператора возмущения, ω_{kn} – частота перехода).

17. Каким будет основное состояние атома кислорода (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^4$)?

А. 3P_2

Б. 1D_5

В. 3P_1

Г. 2F_2

18. Каким будет основной терм атома азота (конфигурация $1s^2 2s^2 2p^3$)?

А. 2D

Б. 3P

В. 7F_4

Г. 4S

19. Как дифференциальное сечение рассеяния выражается через амплитуду рассеяния $f(\theta)$?

А. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|$

Б. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$

В. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = 1 - |f(\theta)|^2$

Г. $\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{|f(\theta)|^2}$

(где Ω – телесный угол).

20. Частицы рассеиваются на потенциале $U(\vec{r})$. Какая из нижеследующих формул определяет амплитуду рассеяния в борновском приближении?

А. $f(\theta) \propto \int U(r) d^3\vec{r}$

Б. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{k}\vec{r}} d^3\vec{r}$

В. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{k}'\vec{r}} d^3\vec{r}$

Г. $f(\theta) \propto \int U(r) e^{i\vec{q}\vec{r}} d^3\vec{r}$

(где $\vec{k}$ – волновой вектор падающих частиц, $\vec{k}'$ – волновой вектор рассеянных частиц, $\vec{q} = \vec{k} - \vec{k}'$ – вектор столкновения).

Ответы к тестам

Номера вопросов в тесте																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
№ вар.	Ответы																			
1	В	Б	В	А	Б	Г	В	В	А	В	В	Б	А	В	Б	Б	Г	А	Г	А
2	Г	В	Г	А	А	А	Б	Г	В	Б	А	А	В	Б	Г	А	А	Г	Б	Г

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится в письменной форме по темам «Сложение моментов при образовании сложных квантовых систем, электронная конфигурация, атомные термы, правила Хунда, стационарная теория возмущений», включает в себя 6 задач.

2. Критерии оценки

Каждая задача оценивается от 0 до 3 баллов. Контрольная работа оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если решено менее двух задач. Оценка составляет 0 – 5 баллов.

Работа выполнена **на пороговом** уровне, если решено от двух до трех задач. Оценка составляет 6 – 9 баллов.

Работа выполнена **на базовом** уровне, если решено от четырех до пяти задач. Оценка составляет 10 – 15 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если все решены все шесть задач. Оценка составляет 16 – 18 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

Задача 1.

Найти возможные значения полных механических моментов электронных оболочек атомов в состоянии 4P .

Задача 2.

Выписать возможные термы атомов, содержащих кроме заполненных оболочек два электрона (s и p).

Задача 3.

Для заряженного линейного осциллятора найти сдвиги энергетических уровней в однородном электрическом поле (направленном вдоль оси колебаний) в первых двух порядках теории возмущений. Для справки: матричный элемент координаты равен $q_{n,n-1} = q_{n-1,n} = \sqrt{n\hbar/(2m\omega)}$.

Задача 4.

Запишите электронную конфигурацию для атома $Z = 14$.

Задача 5.

С помощью правил Хунда найти основной терм атома азона ($Z = 7$).

Задача 6.

Какие переходы запрещены правилами отбора:

$$^2D_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}, \quad ^3P_1 \rightarrow ^2S_{1/2}, \quad ^3F_3 \rightarrow ^3P_2, \quad ^4F_{7/2} \rightarrow ^4D_{5/2}?$$

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Основы квантовой механики», 6 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны рассчитать расщепление энергетических уровней в постоянном электрическом поле (эффект Штарка) для второго возбужденного состояния атома водорода, а также записать выражения для волновых функций расщепленных состояний.

Пояснительная записка РГЗ может быть написана как чернилами от руки, так и оформлена с помощью текстового редактора (например, Microsoft word). Пояснительная записка включает в себя титульный лист, введение, подробное изложение всех расчетов, заключение и список использованных источников.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если решено менее 40% от общего объема задания, оценка составляет 0-9 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если решено не менее 40% и не более 60% от общего объема задания, студент испытывает трудности с объяснением хода решения и ответами на уточняющие вопросы, оценка составляет 10-14 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если решено не менее 60% и не более 85% от общего объема задания, студент может объяснить ход решения и ответить на уточняющие вопросы, оценка составляет 15-22 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если задание решено полностью, студент может четко и развернуто объяснить ход решения и ответить на уточняющие вопросы, оценка составляет 23-25 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

Используя метод стационарной теории возмущений, рассчитать расщепление энергетических уровней в постоянном электрическом поле (эффект Штарка) для второго возбужденного состояния атома водорода ($n = 3$). Ограничиться поправками первого порядка по возмущению. Волновые функции представить в виде суперпозиции собственных функций невозмущенного гамильтониана.