

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Проректор по учебной работе и  
довузовской подготовке**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Квантовая механика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Радиотехника и компьютерные технологии Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра теоретической физики
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

7 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Количество контрольных работ, заданий: 8

Программу составили:

А.В. Гец, канд. физ.-мат. наук, доцент

Ю.М. Белоусов, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

О.И. Толстихин, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

А.И. Тернов, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики 23.05.2020

## Аннотация

Годовой курс Квантовая механика составляет одну из частей основного курса теоретической физики и предназначен для студентов 3 и 4 курсов бакалавриата. Курс следует за курсом «Теория поля» и предшествует курсу «Статистическая физика».

В курсе рассматривается описание нерелятивистских микроскопических систем на основе построения векторной (дираковской) формулировки теории. В первой части сформулированы постулаты квантовой механики и математический аппарат, получены операторы основных физических величин на основе теории представлений и симметрий пространства. Изучаются основные свойства состояний квантовых систем и решений уравнения Шредингера. Иллюстрация основных свойств на первом этапе дается в рамках одномерной модели. Важное внимание уделяется точно решаемым моделям, в частности, подробно рассматривается квантовое описание гармонического осциллятора, включая когерентные состояния. Рассматривается описание состояний квантовой частицы в центральном поле, свойства момента импульса и спина частицы. Подробно рассмотрена одна из важнейших задач – задача о состояниях водородоподобного атома.

После изложения основ квантовой механики рассматриваются приближенные методы решения задач. В качестве первого приближенного метода рассматривается квазиклассическое приближение, которое позволяет лучше понять соответствие квантового и классического описания движения частицы. Основным приближенным методом – теория возмущений рассматривается для консервативных систем (стационарная теория возмущений) и для неконсервативных систем (нестационарная теория возмущений). Стационарная теория возмущений излагается на основе построения функции Грина стационарного уравнения Шредингера. Рассмотрено ее применение для связанных состояний (дискретный невырожденный и вырожденный энергетический спектр) и для инфинитного движения (непрерывного спектра). В непрерывном спектре рассмотрено борновское приближение описания рассеяния частиц. Нестационарная теория возмущений рассматривается как для дискретного, так и для непрерывного спектра энергий с позиций описания квантовой системы в представлении взаимодействия. Выводится вероятность перехода и вероятность перехода в единицу времени («золотое правило» Ферми). Рассматривается понятие квазистационарного состояния. Рассмотрены особенности теории возмущений в случае адиабатически медленного изменения возмущения.

Рассмотрен учет магнитных взаимодействий как учет релятивистских поправок в нерелятивистской квантовой механике. Рассмотрена задача о прецессии магнитного момента частицы и о движении заряженной частицы в однородном магнитном поле, получены уровни Ландау.

Во второй части рассматривается описание многочастичных квантовых систем. Вводится постулат о тождественности частиц. Рассматривается как построение волновой функции системы тождественных частиц, так и описание систем тождественных частиц в представлении чисел заполнения (метод вторичного квантования). В качестве примера рассматривается описание состояний атома гелия, вводятся уравнения Хартри-Фока, показывается природа обменного взаимодействия. Рассмотрены принципы и методы описания состояний сложного атома и их соответствие периодической таблице элементов. Рассмотрено описание состояния атомов во внешних полях, в частности рассмотрен эффект Зеемана в слабом и сильном магнитном поле.

В нерелятивистской теории излучения рассматривается квантование свободного электромагнитного поля и его взаимодействие с системами заряженных частиц. Рассмотрено излучение и поглощение электромагнитного поля атома, определяется время жизни возбужденных состояний атомов, получены правила отбора для электрического дипольного излучения атомов.

В заключение курса рассматривается описание открытых квантовых систем, вводится понятие матрицы плотности. Дается представление о запутанных состояниях квантовых систем.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам знания в области описания различных квантовых физических явлений и методы построения соответствующих математических моделей, показать соответствие и непротиворечивость системы постулатов, положенных в основу квантовой теории, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной. Дать навыки, позволяющие понять адекватность теоретической модели соответствующему физическому явлению.

### Задачи дисциплины

- Изучение свойств точно решаемых задач-моделей квантовомеханических систем;

- изучение приближенных методов решения задач квантовой механики;
- изучение методов описания сложных систем, в том числе систем тождественных частиц;
- овладение методами квантовой механики для описания свойств различных физических систем.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ Постулаты и принципы квантовой механики, методы описания квантовых систем, связь состояний и операторов с наблюдаемыми и измеряемыми величинами;
- ☐ основные свойства точно решаемых моделей квантовых систем;
- ☐ основные приближенные методы решения задач квантовой механики: квазиклассическое приближение; стационарную и нестационарную теорию возмущений;
- ☐ методы описания сложных и незамкнутых квантовых систем;
- ☐ методы и способы описания систем тождественных частиц в квантовой теории;
- ☐ методы описания рассеяния частиц; описание взаимодействия электромагнитного излучения с квантовыми системами зарядов.

уметь:

- ☐ Определять энергетические спектры и волновые функции в одномерных случаях;
- ☐ определять средние значения (физические величины) квантовых систем, если известны их волновые функции;
- ☐ определять состояния и классифицировать энергетические спектры частицы в симметричных потенциалах, в частности, обладающих аксиальной и центральной симметрией;
- ☐ применять квазиклассическое приближение для оценки уровней энергии и вероятностей прохождения в одномерных потенциалах;
- ☐ применять стационарную теорию возмущений для нахождения поправок к уровням энергии и волновым функциям;
- ☐ применять нестационарную теорию возмущений для нахождения вероятностей переходов между состояниями;
- ☐ решать задачи о нахождении состояний и энергетического спектра систем многих, в том числе тождественных, частиц;
- ☐ вычислять дифференциальные сечения рассеяния частиц различными потенциалами;
- ☐ определять возможные оптические переходы между состояниями систем зарядов и оценивать времена жизни возбужденных состояний.

владеть:

- ☐ Основными методами решения задач о нахождении состояний и энергетических спектров различных квантовых систем;
- ☐ навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Уравнение Шредингера и его свойства.	4	4		3
2	Временная эволюция физической системы	4	2		3
3	Симметрии в квантовой механике и законы сохранения.	4	4		3
4	Теория углового момента и спина электрона	4	4		4
5	Задача двух тел. Движение в поле центрально-симметричного потенциала.	4	6		3
6	Квазиклассическое приближение.	2	4		4
7	Атом водорода.	2	2		3
8	Теория линейного гармонического осциллятора.	4	2		4
9	Приём заданий.	2	2		3
10	Нестационарная теория возмущений. Представление взаимодействия.	4	4		5
11	Стационарная теория возмущений. Метод функции Грина.	4	4		5
12	Основы релятивистской теории.	4	2		5
13	Системы тождественных частиц. Сложный атом.	4	6		5
14	Система электрических зарядов во внешнем электромагнитном поле.	4	2		5
15	Теория электромагнитного излучения.	4	4		5
16	Теория рассеяния.	4	4		5
17	Сложение моментов.	2	2		5
18	Приём заданий.		2		5
Итого часов		60	60		75
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		225 час., 5 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 6 (Весенний)

###### 1. Уравнение Шредингера и его свойства.

Элементы теории представлений. Координатное и импульсное представление. Временное уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности. Плотность вероятности и плотность тока вероятности. Нормировка волновой функции в случае дискретного и непрерывного спектра. Стационарное уравнение Шредингера.

## 2. Временная эволюция физической системы

Представление Шредингера и представление Гейзенберга. Гейзенберговские уравнения движения. Квантовые скобки Пуассона.

Фундаментальные коммутационные соотношения. Интегралы движения в квантовой теории. Теоремы Эренфеста.

## 3. Симметрии в квантовой механике и законы сохранения.

Инвариантность квантово-механической системы относительно групп преобразований. Симметрии физической системы и законы сохранения.

Группа пространственных трансляций и закон сохранения импульса. Группа временных трансляций и закон сохранения энергии. Группа трехмерных вращений и закон сохранения орбитального момента. Неприводимые представления группы трехмерных вращений. Спин и полный момент. Группа пространственной инверсии и закон сохранения четности. Группа обращения времени.

## 4. Теория углового момента и спина электрона

Угловой момент в квантовой механике. Операторы момента количества движения и квадрата момента. Собственные значения и собственные функции. Оператор конечных вращений.

Оператор спина. Матрицы Паули и их свойства. Спиновая волновая функция. Методы измерения спина.

## 5. Задача двух тел. Движение в поле центрально-симметричного потенциала.

Задача двух тел в квантовой механике. Центральное поле, разделение переменных. Радиальное уравнение Шредингера. Пространственно-изотропный осциллятор. Водородоподобный атом. Энергетический спектр, волновая функция. Вырождение.

## 6. Квазиклассическое приближение.

Предельный переход к классической механике. Волновая функция в квазиклассическом приближении. Метод ВКБ. Правило квантования Бора–Зоммерфельда. Фазовый объем, приходящийся на одно состояние. Прохождение сквозь потенциальный барьер (туннельный эффект). Элементарная теория распада.

## 7. Атом водорода.

Атомная система единиц. Энергетический спектр. Радиальные волновые функции. Кратность вырождения уровней.

## 8. Теория линейного гармонического осциллятора.

Энергетический спектр. Собственные функции гармонического осциллятора в координатном представлении.

## 9. Прием заданий.

Семестр: 7 (Осенний)

## 10. Нестационарная теория возмущений. Представление взаимодействия.

Представление взаимодействия. Хронологизованная экспонента. Теория квантовых переходов. Соотношение неопределенностей для энергии и времени. Переходы в двухуровневой системе. Переходы в непрерывном спектре. «Золотое правило» Ферми. Внезапные и адиабатические возмущения.

#### 11. Стационарная теория возмущений. Метод функции Грина.

Теория возмущений для дискретного спектра. Критерий применимости. Метод функции Грина. Поправки к состояниям и уровням энергии. Случай вырожденных уровней энергии. Правильные волновые функции нулевого приближения. Теория возмущений для непрерывного спектра, борновское приближение в теории рассеяния.

#### 12. Основы релятивистской теории.

Релятивистские волновые уравнения. Уравнение Клейна–Гордона–Фока. Уравнение Дирака. Матрицы Дирака и их свойства. Релятивистская инвариантность уравнения Дирака. Орбитальный, собственный и полный момент в теории Дирака. Спин-орбитальное взаимодействие. Тонкая структура энергетических уровней атома водорода.

#### 13. Системы тождественных частиц. Сложный атом.

Описание сложных систем. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша–Гордана. Принцип тождественности (неразличимости) микрочастиц. Симметрия волновой функции относительно перестановки тождественных частиц. Фермионы и принцип Паули. Детерминант Слэтера. Бозоны. Представление чисел заполнения. Операторы рождения и уничтожения. Основные операторы в представлении чисел заполнения.

Атом гелия. Обменное взаимодействие. Основное и возбужденное состояния атома гелия. Пара- и ортогелий.

Приближение центрального поля в атоме. Вариационный метод. Электронные конфигурации. Термы. Правила Хунда. Тонкая структура.

#### 14. Система электрических зарядов во внешнем электромагнитном поле.

Уравнение Шредингера во внешнем электромагнитном поле. Уравнение Паули. Калибровочная инвариантность. Движение электрона в однородном магнитном поле. Уровни Ландау. Эффект Зеемана.

#### 15. Теория электромагнитного излучения.

Квантование свободного электромагнитного поля. Взаимодействие квантовой системы с электромагнитным излучением. Спонтанное и вынужденное излучение фотонов. Правила отбора.

#### 16. Теория рассеяния.

Сечение рассеяния. Амплитуда рассеяния. Упругое рассеяние. Метод парциальных волн в теории рассеяния, амплитуда и фазы рассеяния. Оптическая теорема. Рассеяние тождественных частиц.

#### 17. Сложение моментов.

Полный момент релятивистской частицы. Коэффициенты Клебша–Гордана.

#### 18. Приём заданий.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Стандартная учебная аудитория, желательно с мультимедийным оборудованием (проектор).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 3 : Квантовая механика. Нерелятивистская теория : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; отв. ред. Л. П. Питаевский .— 4-е изд., испр. — М. : Наука, 1989 .— 768 с.
2. Задачи по теоретической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Белоусов, С. Н. Бурмистров, А. И. Тернов .— Долгопрудный : Интеллект, 2013 .— 584 с.
3. Курс квантовой механики. Нерелятивистская теория [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Белоусов ; М-во образования Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т .— М. : Изд-во МФТИ, 2006 .— 408 с.

### **Дополнительная литература**

1. Задачи по квантовой механике [Текст] : в 2 ч. Ч.1 : учеб. пособие для вузов / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган .— 3-е изд., испр. и доп. — М. : Едиториал УРСС, 2001 .— 304 с.
2. Задачи по квантовой механике [Текст] : в 2 ч. Ч.2 : учеб. пособие для вузов / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган .— 3-е изд., испр. и доп. — М. : Едиториал УРСС, 2001 .— 304 с.
3. Катехизис. Руководство по математике для начинающих изучать теоретическую физику [Текст] / Ю. М. Белоусов, В. П. Кузнецов, В. П. Смилга ; М-во образования и науки РФ, МФТИ - М.Изд-во МФТИ,2005
4. Практическая математика. Руководство для начинающих изучать теоретическую физику [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Ю. М. Белоусов, В. П. Кузнецов, В. П. Смилга .— 2-е изд. — Долгопрудный : Интеллект, 2009 .— 176 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Ссылка страницы кафедры на официальном сайте университета  
[http://mipt.ru/education/chair/theoretical\\_physics//](http://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics//)

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Работа с учебной и научной литературой является главной формой самостоятельной работы и необходима при подготовке к экзамену. Она включает проработку лекционного материала – изучение литературы по тематике лекций. Типовые задачи разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Работа с литературой не только полезна как средство более глубокого изучения любой дисциплины, но и является неотъемлемой частью профессиональной деятельности будущего выпускника. Решение задач в контрольной работе представляет собой оценку навыков решения задач обычной сложности. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов. Показателем владения материалом на экзамене служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины. Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Радиотехника и компьютерные технологии Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

6 (весенний) - Дифференцированный зачет

7 (осенний) - Экзамен

**Разработчики:**

А.В. Гец, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Ю.М. Белоусов, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор  
О.И. Толстихин, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор  
А.И. Тернов, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор  
А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент



## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая механика» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ Постулаты и принципы квантовой механики, методы описания квантовых систем, связь состояний и операторов с наблюдаемыми и измеряемыми величинами;
- ☐ основные свойства точно решаемых моделей квантовых систем;
- ☐ основные приближенные методы решения задач квантовой механики: квазиклассическое приближение; стационарную и нестационарную теорию возмущений;
- ☐ методы описания сложных и незамкнутых квантовых систем;
- ☐ методы и способы описания систем тождественных частиц в квантовой теории;
- ☐ методы описания рассеяния частиц; описание взаимодействия электромагнитного излучения с квантовыми системами зарядов.

### уметь:

- ☐ Определять энергетические спектры и волновые функции в одномерных случаях;
- ☐ определять средние значения (физические величины) квантовых систем, если известны их волновые функции;
- ☐ определять состояния и классифицировать энергетические спектры частицы в симметричных потенциалах, в частности, обладающих аксиальной и центральной симметрией;
- ☐ применять квазиклассическое приближение для оценки уровней энергии и вероятностей прохождения в одномерных потенциалах;
- ☐ применять стационарную теорию возмущений для нахождения поправок к уровням энергии и волновым функциям;
- ☐ применять нестационарную теорию возмущений для нахождения вероятностей переходов между состояниями;
- ☐ решать задачи о нахождении состояний и энергетического спектра систем многих, в том числе тождественных, частиц;
- ☐ вычислять дифференциальные сечения рассеяния частиц различными потенциалами;
- ☐ определять возможные оптические переходы между состояниями систем зарядов и оценивать времена жизни возбужденных состояний.

### владеть:

- ☐ Основными методами решения задач о нахождении состояний и энергетических спектров различных квантовых систем;
- ☐ навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами микроскопических и наносистем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектрами.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Дифференцированный зачет проводится по итогам работы студента в семестре в случае успешного освоения дисциплины. В случае, если студент не усвоил дисциплину и результаты его работы в семестре оказались неудовлетворительными, проводится дополнительный письменный опрос, а при необходимости и устный, на предмет выявления знаний. Дополнительный письменный опрос проводится в виде тестов, содержание которых полностью соответствует содержанию тестовых опросов студентов в течение семестра.

Оценка дифференцированного зачета складывается из оценок трех позиций: знаний, умений и навыков.

Знания студентов оцениваются в результате проведения еженедельного опроса пройденного материала. Опрос проводится в письменной форме в виде тестовых вопросов. Пример тестовых вопросов приведен ниже.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи домашних заданий. Всего студентам предлагается два домашних задания в семестр. Задание содержит три типа задач и упражнений. Типовые задачи и упражнения разбираются на семинарских (практических) занятиях. Аналогичные задачи и упражнения студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Кроме того, студентам предлагаются специально помеченные задачи повышенной сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Навыки студентов проверяются в результате решения контрольных работ, которые проводятся во время аудиторных занятий. Задачи аналогичны типовым задачам, включенным в домашние задания, как рассмотренных на семинарских (практических) занятиях, так и предлагаемых для самостоятельного решения. Задания контрольных работ оценены в определенную сумму баллов, что позволяет оценить уровень умения и навыков студентов.

Вопросы, включенные в тестовые опросы, охватывают основные понятия, рассмотренные на предыдущей лекции.

Пример вопросов тестового задания первого семестра обучения:

1. Как связаны между собой  $\langle \psi | \varphi \rangle$  и  $\langle \varphi | \psi \rangle$ ?
2. Для вектора  $|\psi\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle$  записать  $\langle \psi |$ .
3. Для вектора в предыдущем пункте записать условие нормировки. Состояния суперпозиции не обязательно ортогональны.
4. Как определить наблюдаемую величину, которой соответствует оператор  $\hat{g}$ , в состоянии квантовой системы  $|\psi\rangle$ ?
5. Пусть  $\hat{f}$  – оператор физической величины. Как определяется значение физической величины  $\langle f \rangle$  в состоянии  $|\psi\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle$ ?
6. Пусть  $|\varphi\rangle = \hat{f}|\psi\rangle$ , как определить  $\langle \varphi |$ ?
7. Запишите уравнение, которому подчиняется вектор состояния  $|\Psi\rangle$ .
8. Чему равна постоянная Планка  $\hbar$  =?
9. Как определяется эрмитовское сопряжение для некоторого оператора  $\hat{g}$ ?
10. Как связаны между собой два числа  $f_{21} = \langle \psi_2 | \hat{f} | \psi_1 \rangle$  и  $f_{12} = \langle \psi_1 | \hat{f}^\dagger | \psi_2 \rangle$ ?

Примеры контрольных заданий:

Частица массы  $m$  находится в одномерном потенциале, описываемом  $\delta$ -функцией:

$$U(x) = -\frac{\hbar^2 \kappa_0}{m} \delta(x)$$

1. Запишите граничные условия для нахождения связанных состояний. (2)
2. Определите нормированную волновую функцию и энергию связанного состояния. (7)

В момент времени  $t = 0$  внезапно (мгновенно) появляется барьер и потенциал становится равным

$$U(x) = \begin{cases} 0 & x < 0, \\ U_0 - \frac{\hbar^2 \kappa_0}{m} \delta(x) & x \geq 0. \end{cases}$$

1. Какой вид имеет волновая функция связанного состояния. (3)
2. Определите нормированную ВФ связанного состояния и значение энергии. (6)
3. При каких условия существует связанное состояние? (5)
4. Запишите граничные условия для нахождения состояний инфинитного движения. (2)
5. Какова кратность вырождения энергетического спектра инфинитного движения? (2)
6. Определите волновые функции состояний инфинитного движения для случая  $E < U_0$ . (10)
7. Запишите общий вид волновой функции частицы при  $t > 0$ . (3)
8. Пусть при  $t \leq 0$  частица находилась в связанном состоянии в исходном потенциале  $\delta$ -функции. Какова вероятность того, что частица останется в связанном состоянии? Ответ выразить через мнимые волновые векторы, встречающиеся в задаче:  $\kappa = \sqrt{2m|E|}/\hbar$  и  $\kappa_1 = \sqrt{2m(U_0 + |E|)}/\hbar$  (10)

Каждый вопрос задания оценен в определенную сумму баллов в зависимости от сложности и уровня (знания, умения и навыки). Полная сумма баллов примера контрольной работы равна 50.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре могут зависеть от лекционного потока и определяются лектором. Общим остается следующее правило.

В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например, 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того, за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

Итоговая оценка дифференцированного зачета выставляется в соответствии со схемой, приведенной в следующем разделе.

#### 4а. Критерии оценивания (дифференцированный зачет)

Оценка	Набранные баллы
отлично (10)	более 90%
отлично (9)	от 80% до 90% включительно
хорошо (8)	от 70% до 80% включительно
хорошо (7)	от 60% до 70% включительно
хорошо (6)	от 50% до 60% включительно
удовлетворительно (5)	от 40% до 50% включительно
удовлетворительно (4)	от 30% до 40% включительно
удовлетворительно (3)	Требуется дополнительное тестирование по проблемным вопросам (темам)
неудовлетворительно (2)	Не получена удовлетворительная оценка в период зачетной сессии.

### 36. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков (осенний семестр)

Итоговая экзаменационная оценка выставляется студенту с учетом оценки его работы в семестре.

Работа в семестре оценивается по тем же критериям, что и в предыдущем семестре. За работу в семестре выставляется оценка по тем же критериям, что при определении оценки дифференцированного зачета.

Экзамен проводится в устной форме. Экзаменационные билеты могут содержать наряду с теоретическими вопросами, также и типовые задачи. Форма билета определяется лектором и зависит от лекционного потока.

Традиционная форма билета содержит 2 теоретических вопроса и одну типовую задачу. Пример традиционной формы билета.

Ответ студента оценивается по 10-балльной шкале.

Билеты также могут состоять из 3 – 5 относительно простых вопросов и вопроса (вопросов) повышенной сложности. Простые вопросы оценивают уровень знаний. Сложные вопросы оценивают уровень умений и навыков. Пример билета с 5 вопросами разного уровня:

1. Задан вектор состояния в виде суперпозиции двух состояний  $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$  и задан оператор физической величины  $\hat{f}$ . Как определяется наблюдаемая (физическая величина) квантовой системы, находящейся в состоянии  $|\psi\rangle$ ?
2. Запишите, чему равен матричный элемент  $\langle \mathbf{r}' | U(\hat{\mathbf{r}}) | \mathbf{r} \rangle =$ .
3. Определите полный набор физических величин бесспиновой частицы в центральном поле. Как разделяются переменные в волновой функции, описывающей состояние частицы в центральном поле  $\Psi(\mathbf{r}) = ?$  Запишите асимптотическое поведение радиальной функции связанного состояния  $R_{nl}(r)|_{r \rightarrow 0} \sim ?$
4. Уравнения Шредингера в представлении взаимодействия. Запишите его решение в виде итерационного ряда и представление в форме  $T$  – exp.
5. Пусть  $\Psi(x_1, x_2; t)$  волновая функция системы двух тождественных частиц, чему равен результат действия на нее оператора перестановки частиц  $\hat{P}\Psi(x_1, x_2; t) = ?$

6\*. Решите задачу об одномерном гармоническом осцилляторе. Найдите состояния и энергетический спектр, а также волновую функцию основного состояния в координатном и импульсном представлениях.

#### Пример билета с 3 вопросами.

1. Базис в пространстве состояний. Представление векторов состояния и операторов в базисе. Соотношения ортогональности и полноты при наличии дискретного и непрерывного спектра.
2. Уравнение Дирака.
3. Электрон находится в состоянии с проекцией спина на ось  $z$  равной  $1/2$ . Найдите вероятность обнаружить этот электрон в состоянии с проекцией спина на направление  $\mathbf{n} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$  равной  $1/2$ .

### 46. Критерии оценивания

Студенты, получившие за работу в семестре к началу экзаменационной сессии оценку «неудовлетворительно» (менее 30% усвоения материала), считаются не усвоившими материал и не выполнившими задания курса, поэтому к экзамену не допускаются.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со схемой:

Оценка	Баллы	Критерии
Отлично	10	10 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8. 9 баллов за экзамен и 10 баллов за работу в семестре
	9	9 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 8.
	8	8 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 6. 7 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре
Хорошо	7	7 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 6 баллов за экзамен и более 8 баллов за работу в семестре
	6	6 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 5. 5 баллов за экзамен и более 7 баллов за работу в семестре
	5	5 баллов за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
удовлетворительно	4	4 балла за экзамен и оценка за работу в семестре не ниже 3.
	3	3 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
неудовлетворительно	2	2 балла за экзамен и оценка за работу в семестре 3.
	1	1 балл за экзамен и оценка за работу в семестре 3.

## 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Студенты, сдающие экзамен, отвечают на вопросы билета, имея возможность на подготовку не менее 1 часа. Ответы представляются в письменном виде, по которым проводится устное собеседование.

Итоговая оценка за экзамен выставляется в соответствии со следующим критериями:

Студент, ответивший правильно на все вопросы билета и дополнительные вопросы экзаменатора, получает оценку «отл» (10) при условии оценки за работу в семестре не ниже «отл» (8). Студент, ответивший правильно на все вопросы билета и дополнительные вопросы экзаменатора, получает оценку «отлично» (8 или 9) при условии, что у него за работу в семестре стоит оценка не ниже «хорошо»

Студент, не ответивший на один вопрос билета, но ответивший правильно на другие и правильно ответивший на дополнительные вопросы, получает оценку «хорошо» (5 – 7). Оценка по десятибалльной шкале зависит как от оценки за работу в семестре, так и от качества ответов на дополнительные вопросы.

Студент, не ответивший правильно на два вопроса билета, не может претендовать на оценку выше «удовл». Оценка по десятибалльной шкале зависит как от оценки за работу в семестре, так и от качества ответов на дополнительные вопросы.

Оценка «неудовл» ставится студенту, который не смог ответить правильно ни на один вопрос билета, а также, если, подготовив правильный только на один вопрос билета, не смог ответить на дополнительные вопросы экзаменатора.

Итоговая оценка за экзамен как правило не должна отличаться более чем на 1 балл выше или ниже оценки за работу в семестре по пятибалльной шкале. Исключение составляет случай, когда студент не смог ответить правильно на вопросы билета.

Во время проведения экзамена студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий. Учебной, учебно-методической и справочной литературой пользоваться во время экзамена не допускается. Во время экзамена должны быть также выключены мобильные телефоны.

Перед началом экзаменационной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи экзамена. Формулировки вопросов в билетах студенты узнают во время консультаций.

Студенты, получившие итоговую оценку «отлично» (10) и решившие и защитившие задачи повышенной сложности домашнего задания, могут получить дополнительные зачетные единицы по курсу.