

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет  
Кафедра теоретической физики

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_



Рабочая программа дисциплины

**ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА 1**

Направление: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль): Физическая информатика

Форма обучения: **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)						Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем					Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	180	48	64	10		16	18	18	4			2
<b>Всего</b>	<b>180</b>	<b>48</b>	<b>64</b>	<b>10</b>		<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>4</b>			<b>2</b>
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 144 часа												
Компетенции: ОПК-2												

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

С. В. Цыбуля

Новосибирск, 2023

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	5
5. Перечень учебной литературы.....	12
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	12
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	13
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....	13
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	13
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	14

# 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 1» имеет своей целью дать набор необходимых сведений в области физики твёрдого тела и научить применению этой дисциплины в качестве основы для оценок возможностей элементной базы вычислительных устройств, систем обработки информации, аппаратного и программного обеспечения физических установок.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-2.</b> Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные</p>	<p><b>ОПК - 2.1.</b> Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.</p> <p><b>ОПК – 2.2.</b> Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.</p> <p><b>ОПК -2.4.</b> Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований.</p>	<p><b>Знать</b> классические постановки вопроса о корпускулярно-волновом дуализме частиц, способы формализации задач квантовой механики, особенности бозе- и ферми частиц; основные принципы нерелятивистской квантовой механики в качестве основы физики конденсированного состояния вещества.</p> <p><b>Уметь</b> решать типовые задачи квантовой механики, проводить оценки нахождение квантовых величин; применять основные принципы нерелятивистской квантовой механики для оценки свойств кристаллических конденсированных тел в качестве элементной базы приборов; увязывать требования к программному обеспечению с физическими свойствами элементной базы; работать с учебной литературой по квантовой физике, методами и подходами решения классических задач квантовой механики; применять технику расчета энергетических уровней в электрических и магнитных полях; применять технику решения уравнений Шрёдингера и Паули для одно-, дву- и трёхмерных систем.</p>

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 1», изучаемая в 5-м семестре, представляет собой начальный курс нерелятивистской квантовой механики.

Целью освоения дисциплины является ознакомление студентов с:

- 1) основными понятиями нерелятивистской квантовой механики;
- 2) способами вычисления энергетических уровней микрочастиц в различных полях;
- 3) приближенными методами квантовой механики
- 4) теорией углового момента и спина
- 5) квантованием электромагнитного поля, излучением атомных систем
- 6) базовыми понятиями теории квантовых вычислений и квантовых алгоритмов;
- 7) элементами теории рассеяния.

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 1» реализуется в 5-м семестре 3-го курса для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки **03.03.02 Физика**. Курс является одной из обязательных общеобразовательных дисциплин, реализуемых кафедрой теоретической физики, и посвящен разделу «Квантовая механика в приложении к физике твердого тела». Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам, как механика, электродинамика и оптика, а также по математике (высшая алгебра и математический анализ, функциональный анализ).

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области применения квантовой механики к анализу пределов измерений, ознакомлению студентов с наиболее интересными результатами из текущей научной литературы по квантовой информатике, по опытам с конденсатами Бозе-Эйнштейна и т.п. Специально указываются темы, активно обсуждающиеся в текущей профессиональной научной литературе. Материал курса увязывается с общефизическими и математическими дисциплинами, изучаемыми студентами-физиками (электродинамика, высшая алгебра, элементы функционального анализа и т.д.). В свою очередь курс «Физика конденсированного состояния вещества» является предпосылкой для изучения курсов «Физические основы микроэлектроники» и «Физические основы информатики».

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)						Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем					Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Консультации в период занятий	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5	180	48	64	10		16	18	18	4			2
<b>Всего</b>	<b>180</b>	<b>48</b>	<b>64</b>	<b>10</b>		<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>4</b>			<b>2</b>
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 144 часа												
Компетенции: ОПК-2												

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, лабораторные занятия в терминальном классе, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

**Текущий контроль:** обеспечивается двумя контрольными работами в семестре, еженедельным приёмом семестровых заданий для самостоятельного решения, а также подразумевает диалог с преподавателем в формате вопрос-ответ во время практических занятий.

**Промежуточная аттестация:** итоговый экзамен в конце 5-го семестра.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет **180** академических часов / **5** зачетных единиц:

- занятия лекционного типа – 48 часов;
- практические занятия – 64 часа;
- лабораторные занятия – 10 часов;
- прием заданий – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (самостоятельная подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающихся с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, лабораторные занятия, приём заданий, групповые консультации, экзамен) составляет 144 часа.

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

Дисциплина «Физика конденсированного состояния вещества 1» представляет собой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5-м семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 5 зачётных единиц, 180 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)							Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем				
<b>3 курс, 5 семестр «Квантовая механика в приложении к физике твердого тела»</b>											
1.	Цели и задачи курса. Соотношение между корпускулярной и волновой точками зрения. Волны де Бройля, волновой пакет.	1	5	2	3						
2.	Волновая функция и оценки по соотношению неопределенностей. Операторы координаты и импульса в координатном представлении.	1	6	2	2			2			

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)							Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем				
3.	Уравнение Шрёдингера. Задачи на связанные состояния. Состояния с малой энергией связи, $\delta$ -яма.	1	8	2	2	2	2				
4.	Уравнение Шрёдингера. Задачи в непрерывном спектре. Коэффициенты прохождения и отражения.	2	10	2	4	2	2				
5.	Операторы физических величин. Собственные функции и собственные значения. Уравнения Гейзенберга.	3	6	2	2				2		
6.	Гармонический осциллятор. Спектр и волновые функции в операторном методе.	3	6	2	2			2			
7.	Периодическое поле. Теорема Блоха. Цепочка $\delta$ -ям. Приближение сильной связи. Электронный спектр графена. Контрольная работа по пройденному материалу.	4	10	2	4	2	2				
8.	Квазиклассическое приближение. Квазистационарные состояния.	5	8	2	2	2	2				
9.	Алгебра операторов момента импульса. Спектр собственных значений момента и его проекции.	5	6	2	2			2			
10.	Операторы и собственные функции орбитального момента в сферических координатах.	6	8	2	4				2		
11.	Контрольная работа по пройденным темам	6	6				2	2		2	
12.	Частица в центральном поле. Спектр и волновые функции связанных состояний в атоме водорода.	7	4	2	2						
13.	Бесспиновая частица в магнитном поле. Уровни Ландау	7	6	2	2				2		
14.	Приближенные методы квантовой механики: вариационный метод и теория возмущений. Контрольная работа по пройденному материалу.	8	7	2	3			2			
15.	Влияние электрического поля на спектры атомов.	9	7	2	3				2		
16.	Квантовая механика частиц со спином $\frac{1}{2}$ , уравнение Паули. Магнитные моменты электрона, протона и нейтрона.	10	7	2	3			2			
17.	Сложение моментов. Правила отбора по моменту и четности.	11	10	2	4		2	2			
18.	Квантовые компьютеры и квантовые вычисления. Однокубитовые и двухкубитовые вентили на примере спина $\frac{1}{2}$ в магнитном поле. Основные квантовые алгоритмы.	12	8	2	4				2		
19.	Тождественность частиц. Принцип Паули.	13	5	1	2			2			

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)							Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Индивидуальная работа с преподавателем				
20.	Элементы теории атомов и молекул. Термы, таблица Менделеева, магнитные эффекты.	13	10	4	2	2	2				
21.	Нестационарные возмущения: внезапные, адиабатические и периодические.	14	8	2	4				2		
22.	Квантование электромагнитного поля. Электромагнитное излучение в дипольном приближении. Времена жизни и правила отбора.	15	8	4	2				2		
23.	Квантовая теория рассеяния. Борновское приближение, рассеяние медленных частиц.	15	6	2	2				2		
24.	Методы определения спектров возбуждений и структуры по данным рассеяния.	16	7	1	4				2		
25.	Контрольная работа по пройденным темам	16	6				2	2		2	
26.	Экзамен		2							2	
<b>Всего</b>			<b>180</b>	<b>48</b>	<b>64</b>	<b>10</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (48 часов)

#### Раздел 1. Корпускулярно-волновой дуализм: кванты света и волны частиц (2 часа)

Цель и задачи курса, интерференция на двух щелях. Волновой пакет и соотношение неопределённостей координата-импульс (качественный вывод).

#### Раздел 2. Волновая функция (2 часа)

Основные постулаты, принцип суперпозиции, вероятностная интерпретация, вычисление средних значений функций от координат. Импульсное представление и расчёт средних значений функций от импульса.

#### Раздел 3. Уравнение Шрёдингера 1 (2 часа)

Полное и стационарное уравнение Шрёдингера. Задачи на поиск энергетических уровней в одномерных потенциалах и вычисление волновых функций связанных состояний.

#### Раздел 4. Уравнение Шрёдингера 2 (2 часа)

Уравнение Шрёдингера в непрерывном спектре. Коэффициенты отражения и прохождения барьеров и ям в одном пространственном измерении.

#### Раздел 5. Операторы физических величин (2 часа)

Операторы координаты и импульса. Строгий вывод соотношения неопределённостей координата-импульс. Свойства операторов физических величин, их собственных функций и собственных значений. Условия совместной измеримости двух физических величин. Сохраняющиеся величины, уравнения Гейзенберга.

### **Раздел 6. Гармонический осциллятор (2 часа)**

Спектр и волновые функции частицы в поле гармонического осциллятора в операторном подходе. Когерентные состояния осциллятора и их свойства.

### **Раздел 7. Периодическое поле (2 часа)**

Теорема Блоха и общие свойства решений уравнения Шрёдингера в периодическом поле. Пример нахождения спектра и волновых функций частицы в поле из периодической последовательности из дельта-ям. Приближение сильной связи и электронный спектр однослойного графена.

### **Раздел 8. Квазиклассическое приближение (2 часа)**

Теорема Эренфеста и предельный переход от квантовой механики к классической. Метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна для приближённого вычисления уровней энергии и волновых функций. Понятие о квазистационарных состояниях. Туннелирование во внешнем электрическом поле и сканирующий туннельный микроскоп.

### **Раздел 9. Момент импульса в квантовой механике (2 часа)**

Операторы момента импульса, их коммутаторы и собственные значения в алгебраическом подходе.

### **Раздел 10. Орбитальный момент в квантовой механике (2 часа)**

Получение явного вида операторов орбитального момента в сферических координатах. Вычисление угловой зависимости волновых функций для разных значений квантовых чисел орбитального момента и его проекции на ось  $z$ .

### **Раздел 11. Частица в центральном поле (2 часа)**

Разделение переменных в уравнении Шрёдингера в сферически симметричных потенциалах. Спектр и волновые функции связанных состояний электрона в кулоновском поле. Волновые функции основного и первого возбуждённого состояний атома водорода.

### **Раздел 12. Частица в магнитном поле (2 часа)**

Уравнение Шрёдингера для частицы в однородном магнитном поле. Уровни Ландау, кратность вырождения. Эффект Ааронова-Бома.

### **Раздел 13. Приближённые методы квантовой механики (2 часа)**

Прямой вариационный метод: пробные волновые функции и оценка точности вычисления энергии. Возмущения, не зависящие от времени. Поправки к уровням энергии и волновым функциям вплоть до второго порядка. Учёт вырождения в спектре невозмущённых состояний.

### **Раздел 14. Эффект Штарка (2 часа)**

Влияние слабого электрического поля на спектры атомов. Линейный и квадратичный эффект Штарка для атома водорода. Электрическая поляризуемость атомов.

### **Раздел 15. Спин (2 часа)**

Квантовая механика спина. Частицы со спином  $\frac{1}{2}$ . Спиноры, матрицы Паули. Динамика частиц со спином  $\frac{1}{2}$  в электромагнитном поле. Уравнение Паули. Магнитные моменты электрон, протона и нейтрона. Прецессия спина в магнитном поле как способ измерения аномального магнитного момента элементарных частиц.



### **Раздел 16. Сложение моментов (2 часа)**

Правило сложения моментов и коэффициенты Клебша-Гордана. Теорема Вигнера-Экарта и правила отбора по моменту и чётности для скалярных и векторных операторов. Векторная модель.

### **Раздел 17. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления (2 часа)**

Кубиты, одно- и двух-кубитовые квантовые вентили. Квантовый параллелизм и задача Дойча. Квантовый алгоритм Шора. Физическая реализация кубитов и одно- и двухкубитовых вентилей как взаимодействующих спинов в переменном магнитном поле. Понятие о способах коррекции ошибок в квантовых процессорах.

### **Раздел 18. Квантовомеханическая тождественность (1 час)**

Тождественность частиц в квантовой механике. Фермионы и бозоны. Принцип запрета Паули. Свойства симметрии волновых функций тождественных бозонов и фермионов. Физические проявления тождественности.

### **Раздел 19. Элементы теории атомов и молекул (4 часа)**

Обменное взаимодействие на примере атома гелия. Классификация многоэлектронных состояний в кулоновском поле ядра, Таблица Менделеева. Тонкая структура спектров многоэлектронных атомов. Определение основных термов атомов по правилам Хунда. Атомы в магнитном поле и эффект Зеемана. Классификация состояний двухатомной молекулы, валентность и критерий образования химической связи. Адиабатическое приближение и оценка уровней энергии двухатомных молекул.

### **Раздел 20. Нестационарные возмущения (2 часа)**

Элементы теории возмущений, зависящих от времени: внезапные, адиабатические и периодические возмущения. Переходы в непрерывном спектре и «золотое» правило Ферми.

### **Раздел 21. Квантование электромагнитного поля и излучение (4 часа)**

Квантование электромагнитного поля. Фотоны, поляризация. Нерелятивистский гамильтониан взаимодействующих электронов и фотонов. Дипольное излучение, правила отбора, время жизни и угловые распределения. Понятие о работе лазера.

### **Раздел 22. Элементы теории рассеяния (2 часа)**

Постановка задачи, амплитуда, дифференциальное и полное сечение рассеяния. Формула Борна. Рассеяние быстрых электронов на тяжёлых ядрах, формула Резерфорда, формфактор. Неупругое рассеяние в борновском приближении.

### **Раздел 23. Рассеяние как метод определения структуры и спектров возбуждений (1 час)**

Дважды дифференциальное (по углу рассеяния и энергии) неупругое сечение рассеяния нейтронов на решётке из колеблющихся атомов, применение законов сохранения энергии и импульса.

## **Программа практических занятий (64 часа)**

*Занятие 1.* Соотношения де Бройля. Применение законов сохранения энергии-импульса в процессах с участием фотонов. Оценки по соотношению неопределённостей. Волновой пакет для нерелятивистских частиц **(3 часа)**

*Занятие 2.* Оператор координаты в импульсном представлении. Переход от импульсного к координатному представлению. Координатное и импульсное распределения в основном состоянии атома водорода. **(2 часа)**

*Занятие 3.* Яма с бесконечными стенками. Координатное и импульсное распределения. Переход к классическому пределу. Конечная яма. Особенности применения соотношения неопределенностей для мелкой ямы. Уровни энергии и волновые функции для нескольких  $\delta$ -ям. **(2 часа)**

*Занятие 4.* Вычисление коэффициентов отражения и прохождения для прямоугольной ямы и барьера. Предельный переход к  $\delta$ -потенциалам. Особенности применения соотношения неопределенностей для мелкой ямы. **(4 часа)**

*Занятие 5.* Операторы орбитального момента, их коммутаторы между собой и с компонентами операторов координаты, импульса и произвольного векторного оператора. Зависимость операторов координаты от времени, их коммутатор при разных временах, стандартный квантовый предел для точности измерения координаты и импульса свободной частицы. **(2 часа)**

*Занятие 6.* Спектр и волновые функции частицы в поле гармонического осциллятора из точного решения уравнения Шрёдингера. Координатная зависимость волновой функции когерентного состояния гармонического осциллятора. Невозможность введения собственных функций оператора рождения. **(2 часа)**

*Занятие 7.* Нахождение спектра энергий частицы в поле из бесконечной периодической последовательности  $\delta$ -барьеров. Примесный уровень, его энергия и волновая функция. Нахождение закона дисперсии электронов в кубических решётках в приближении сильной связи. **(4 часа)**

*Занятие 8.* Решение задачи нахождения уровней энергии в двойной яме со слабо проницаемым барьером в квазиклассическом приближении. Вывод закона Гейгера-Нэттола для зависимости времени жизни от энергии в  $\alpha$ -распаде. Нахождение квазиуровней энергии и времени жизни состояния в модельном  $\delta$ -потенциале. **(4 часа)**

*Занятие 9.* Вычисление средних значений степеней компонент операторов орбитального момента алгебраически, с использованием коммутационных соотношений. Вращательные уровни и волновые функции плоского ротатора. **(2 часа)**

*Занятие 10.* Нахождение повышающих и понижающих компонент оператора орбитального момента в сферических координатах. Нахождение нормированных собственных функций оператора орбитального момента  $l = 2$ . Представление орбитальных волновых функций в терминах декартовых компонент радиус-вектора. Построение гибридной  $s - p$  связи для атома углерода. **(4 часа)**

*Занятие 11.* Задача о дейтроне как  $s$ -волновом уровне энергии в сферически-симметричной прямоугольной яме. Кулоновское поле атома водорода в основном состоянии. Построение классических круговых орбит для ридберговских состояний атома водорода. **(2 часа)**

*Занятие 12.* Вычисление сдвига интерференционной картины в двухщелевом эксперименте с магнитным соленоидом за счёт эффекта Боме-Ааронова. **(2 часа)**

*Занятие 13.* Вычисление энергии основного состояния гармонического осциллятора вариационным методом. Поправки 1-го и 2-го порядка к энергии  $n$ -го уровня гармонического осциллятора за счёт возмущения  $\hat{V} = gx^3$ . Поправка к кулоновским уровням мезоатомов за счёт релятивистской зависимости энергии от импульса. Поправка к энергии основного состояния многозарядных водородоподобных ионов за счёт конечных размеров ядра. **(3 часа)**

*Занятие 14.* Поправка к энергии основного состояния многозарядных водородоподобных ионов за счёт конечных размеров ядра. Вычисление поляризуемости основного состояния атома водорода. Штарк-эффект для первого возбуждённого состояния атома водорода. Потенциалы взаимодействия нейтральных атомов на больших расстояниях. **(3 часа)**

*Занятие 15.* Нахождение явного вида спиноров с определённой проекцией спина на произвольное направление в пространстве. Уравнение Паули в переменном магнитном поле. Вероятность переворота спина, физическая картина ЯМР и ЭПР. Магнитный момент дейтрона и примесь орбитального момента  $l = 2$  в волновой функции связанного состояния протона и нейтрона. **(3 часа)**

*Занятие 16.* Вычисление коэффициентов Клебша-Гордана. Нахождение спина ядер по картине сверхтонкого расщепления. Сверхтонкое взаимодействие и происхождение линии  $21\text{см}$  в водороде. **(4 часа)**

*Занятие 17.* Построение одно- и двухкубитовых вентилях через комбинации прямых произведений матриц Паули. Построение состояний типа «кота Шрёдингера» путём последовательного применения вентилях  $\hat{U}_{NOT}$ . Квантовое преобразование Фурье, его факторизация, вычисление результатов его применения к конкретным начальным состояниям. **(4 часа)**

*Занятие 18.* Вычисление вероятностей двум бозонам, фермионам оказаться в одной половине сосуда. **(2 часа)**

*Занятие 19.* Вычисление потенциала ионизации гелия и гелиеподобных ионов вариационным методом. Нахождение основных термов атомов по правилам Хунда. Картина тонкого расщепления и эффект Зеемана в атоме бора. **(4 часа)**

*Занятие 20.* Вычисление вероятности электрону остаться в основном состоянии при бета-распаде трития. Кулоновское возбуждение электрона из основного в первое возбуждённое состояния пролетающим тяжёлым ионом. Двухуровневая система в переменном поле с периодической зависимостью от времени. **(4 часа)**

*Занятие 21.* Угловое распределение и вероятность излучения при переходе  $2p \rightarrow 1s$  в атоме водорода. **(3 часа)**

*Занятие 22.* Вычисление амплитуд, дифференциальных и полных сечений рассеяния на различных потенциалах по формуле Борна. **(2 часа)**

### **Программа лабораторных занятий (10 часов)**

*Занятие 1.* Используя установленную в терминальном классе компьютерную программу QUANT-X, определить энергетическую зависимость коэффициента при растущей экспоненте в выражении для волновой функции. Найти уровни энергии, отвечающие им волновые функции в координатном и импульсном представлении, вывести на монитор соответствующие графики. Применить программу QUANT-X для изучения модели положительно заряженного иона молекулярного водорода. Для этого найти зависимость от расстояния уровней энергии в случае потенциала с двумя одинаковыми ямами. Показать, что связанное состояние образуется для симметричной координатной волновой функции. **(2 часа)**

*Занятие 2.* Вычислить импульсное распределение электрона в модели положительно заряженного иона молекулярного водорода. Задав начальную локализацию электрона в одной из ям, применить программу QUANT-X для расчёта временной зависимости вероятности нахождения электрона на той или другой яме. Путём моделирования на компьютере изучить энергетическую зависимость коэффициентов отражения от прямоугольного барьера и ямы. В последнем случае убедиться в наличии резонансного поведения зависимости при таком изменении параметров ямы, что в ней появляется очередной мелкий уровень энергии. **(2 часа)**

**Занятие 3.** Применить программу QUANT-X для нахождения квазиуровней энергии в потенциале, допускающем туннелирование частицы на бесконечные расстояния. Применить результат для качественного объяснения явления  $\alpha$ -распада. Провести моделирование одномерного кристалла с одним атомом в элементарной ячейке, решив с помощью компьютерной программы задачу о нахождении спектра энергий электрона в периодическом поле с одной ямой на периоде. **(2 часа)**

**Занятие 4.** Провести моделирование одномерного кристалла с двумя атомами в элементарной ячейке, решив с помощью компьютерной программы задачу о нахождении спектра энергий электрона в периодическом поле с двумя ямами на периоде. Провести компьютерное моделирование кристалла с примесным атомом. С помощью программы QUANT рассчитать величину и положение примесного уровня энергии, и координатную зависимость волновой функции примесного атома. **(2 часа)**

**Занятие 5.** Исследовать возникновение зонного спектра в периодическом поле из барьеров. Определить зависимость ширины запрещённой зоны от ширины и высоты барьера. Построить графики зависимости энергии от квазиимпульса, вывести их на терминал и распечатать. Провести компьютерное моделирование рассеяния на примесном атоме, определив с помощью программы QUANT коэффициенты прохождения и отражения в периодическом поле с одним примесным атомом. Вывести на терминал и распечатать энергетическую зависимость этих коэффициентов. **(2 часа)**

#### **Самостоятельная работа студентов 5 семестр (36 часов)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	7
Подготовка к контрольным работам	4
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	7
Подготовка к экзамену	18

#### **5. Перечень учебной литературы.**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. Кн. 2: Квантовая механика. — Москва: Наука, 1972. — 368 с.: ил. (160 экз)
2. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1992. — 879 с.: ил. (59 экз)

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

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. Кожевников А.А. Графен и квантовые вычисления: дополнительные главы к курсу "Введение в физику твёрдого тела": учебное пособие: [для студентов отделения информатики Физ. фак. НГУ]. — М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. теорет. Физики. — Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2011. — 104 с.: ил.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

### ***7.1 Ресурсы сети Интернет***

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### ***7.2 Современные профессиональные базы данных***

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

### ***8.1 Перечень программного обеспечения***

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

### ***8.2 Информационные справочные системы***

Не используются.

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

Для реализации дисциплины «Физика конденсированного состояния вещества 1» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.
3. Терминальный класс.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по отдельным темам дисциплины.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

### 10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

#### *Текущий контроль*

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также проведения коротких самостоятельных работ в начале каждого занятия с решением типовых задач, разобранных на предыдущем занятии. Студентам необходимо успешно выполнить две контрольные работы, предполагающие решение задач из разделов «Уравнение Шрёдингера 1», «Уравнение Шрёдингера 2», «Квазиклассическое приближение», «Приближённые методы квантовой механики».

В течение семестра проводится прием выполненных обучающимся заданий/задач в отведенное время. Примеры заданий/задач приведены в п.10.3. Термин «сдать задание/задачу» означает объяснение хода ее решения и при необходимости ответы на дополнительные вопросы преподавателей.

#### *Промежуточная аттестация.*

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-2 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физики конденсированного состояния вещества в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце 5-го семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-2.

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

### Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ОПК - 2.1. Применяет теоретические основы и базовые знания для проведения научного исследования в выбранной области фундаментальной и/или экспериментальной физики.	<b>Знать</b> классические постановки вопроса о корпускулярно-волновом дуализме частиц, способы формализации задач квантовой механики, основные принципы нерелятивистской квантовой механики.	Опрос Контрольная работа Экзамен.

<p><b>ОПК – 2.2.</b> Применяет современную приборную базу (в том числе сложное физическое оборудование) для организации научного исследования.</p> <p><b>ОПК -2.4.</b> Проводит научные изыскания в избранной области экспериментальных и/или теоретических физических исследований.</p>	<p><b>Уметь</b> решать типовые задачи квантовой механики; проводить оценки нахождение квантовых величин; применять основные принципы нерелятивистской квантовой механики для оценки свойств кристаллических конденсированных тел в качестве элементной базы приборов; увязывать требования к программному обеспечению с физическими свойствами элементной базы; работать с учебной литературой по квантовой физике; владеть методами и подходами решения классических задач квантовой механики; применять технику расчета энергетических уровней в электрических и магнитных полях; применять технику решения уравнений Шрёдингера и Паули для одно-, дву- и трёхмерных систем.</p>	<p>Опрос Контрольная работа Экзамен.</p>
--	---	--

**10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физика конденсированного состояния вещества».**

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК 2.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК 2.2 ОПК 2.4	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### ЗАДАНИЕ № 1

1. Координатная волновая функция основного состояния атома водорода имеет вид  $\psi(r) = (\pi a^3)^{-1/2} e^{-r/a}$ , где  $r = |\vec{r}|$ ,  $a = \hbar^2 / m e^2$ . Вычислить  $\langle \vec{r} \rangle$ ,  $\langle \Delta x^2 \rangle$ ,  $\langle \Delta y^2 \rangle$ ,  $\langle \Delta z^2 \rangle$ ,  $\langle r \rangle$ ,  $\langle \Delta r^2 \rangle$ ,  $\langle \vec{p} \rangle$ ,  $\langle \Delta p^2_{x,y,z} \rangle$ ,  $\langle p \rangle$ ,  $\langle \Delta p^2 \rangle$  в этом состоянии. Указание: при вычислениях воспользоваться формулой  $\int_0^\infty \frac{dx}{(1+x^2)^n} = \frac{(2n-3)!! \pi}{(2n-2)!! 2}$  (5 баллов).
2. Найти энергии и волновые функции стационарных состояний частицы в поле  $U(x) = -G [\delta(x-a) + \delta(x) + \delta(x+a)]$ . При каких значениях  $a$  число уровней уменьшается до двух, до одного в таком поле? В предельном случае  $mGa / \hbar^2 \gg 1$  получить явные выражения для уровней энергии. Численно оценить параметр  $mGa / \hbar^2$ , предполагая, что частица является электроном,  $\delta$ -функция моделирует яму глубиной 13.6 эВ, шириной 1 А, расстояние между ямами  $a = 2$  А (5 баллов).
3. Вычислить в произвольный момент времени  $t$  среднее значение оператора координаты гармонического осциллятора, находящегося в когерентном состоянии  $|\alpha\rangle$  (5 баллов).
4. Потенциальная энергия электрона в металле моделируется выражением  $U(x) = \begin{cases} U_0, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$ , где  $x$  отсчитывается перпендикулярно поверхности металла. Электрон в металле (в полупространстве  $x < 0$ ) имеет энергию  $E < U_0$ . Найти в квазиклассическом приближении зависимость от работы выхода  $\varphi = U_0 - E$  тока холодной эмиссии, возникающей при наложении однородного электрического поля, перпендикулярного поверхности (5 баллов).

#### ЗАДАНИЕ № 2

1. Рассмотрим модель дейтрона как связанного состояния протона и нейтрона, взаимодействующих за счет центрально-симметричного потенциала в виде прямоугольной ямы радиуса  $R_0 = 1.7 \times 10^{-13}$  см. Глубина ямы  $U_0$ . Известно, что энергия связи дейтрона равна  $|E_d| = 2.2$  МэВ. Предполагая, что это связанное состояние является мелким ( $|E_d| \ll U_0$ ) s-волновым уровнем, вычислить необходимую глубину ямы  $U_0$ . Рассчитать вероятность того, что расстояние между протоном и нейтроном в дейтроне превышает радиус ямы  $R_0$  (5 баллов).
2. Гамильтониан квантовой системы имеет вид  $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{V}$ , где невозмущенный гамильтониан равен  $\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} - G[\delta(x-a) + \delta(x+a)]$ ,  $G > 0$ , а оператор возмущения равен  $\hat{V} = -\Delta G \delta(x-a)$ ,  $\Delta \ll 1$ . Найти энергии и волновые функции системы при условии, что  $mGa / \hbar^2 \gg 1$ . Ответ для волновых функций представить в терминах собственных функций  $\psi_s$  и  $\psi_a$  невозмущенного гамильтониана, имеющих определенную четность (5 баллов).



3. Найти собственные функции  $|j, j_z\rangle$  полного момента и его проекции на ось  $z$ , возникающие при сложении моментов  $j_1 = 1$  и  $j_2 = 1$ , в базисе вида  $|j_1, j_{1z}\rangle |j_2, j_{2z}\rangle$  (5 баллов).
4. Квантовая система состоит из двух частиц со спином  $1/2$ , взаимодействующих по закону  $\hat{V} = -\vec{s}_1 \vec{s}_2$ . Найти уровни энергии системы во внешнем постоянном однородном магнитном поле  $\mathbf{B} = (0, 0, B)$ . Выписать соответствующие выражения для спиновых волновых функций в базисе  $|s_{1z}, s_{2z}\rangle$ . Гиромагнитные отношения равны  $g_1$  и  $g_2$ . Поступательным движением пренебречь (5 баллов).
5. Два тождественных фермиона со спином  $1/2$  находятся в одномерной потенциальной яме ширины  $a$  с бесконечными стенками. Взаимодействие между ними вначале отсутствует. Выписать полные (т.е. включающие спиновую и координатную часть) волновые функции системы, отвечающие четырём нижшим энергетическим уровням. Вычислить в первом порядке теории возмущений поправки к найденным уровням энергии за счёт возмущения вида  $\hat{V}(x) = g(\vec{s}_1 \vec{s}_2) \delta(x_1 - x_2)$  (5 баллов).

### ЗАДАНИЕ № 3

1. Атом бора в основном состоянии имеет электронную конфигурацию  $1s^2 2s^2 2p$ . Определить картину зеемановского расщепления уровней (с учетом тонкой структуры уровней) в предельных случаях сильного и слабого магнитного поля (5 баллов).
2. Для описания относительного движения ядер в двухатомной молекуле можно использовать модельный гамильтониан вида  $\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2M} - Z_e e^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{a}{2r^2} \right)$ , где  $M$  – приведенная масса ядер,  $a$  – равновесное межатомное расстояние порядка борковского радиуса  $\frac{\hbar^2}{m_e e^2}$ , а  $Z_e e^2 / 2a$  – энергия диссоциации молекулы. Найти уровни энергии связанных состояний. В случае, когда радиальное и орбитальное квантовые числа не очень велики, т.е. при  $n_r \ll \xi$  и  $l \ll \xi$ , где  $\xi = M/m_e$ , получить колебательный и вращательный спектр двухатомной молекулы (5 баллов).
3. Однократно заряженная частица находится на уровне с главным квантовым числом  $n = 1$  изотропного гармонического осциллятора. Вычислить время жизни частицы на этом уровне, обусловленное однофотонным переходом. Ответ довести до числа в предположении, что масса частицы равна массе атома рубидия, а частота осциллятора  $\omega/2\pi = 50$  Гц. Найти угловое распределение испущенных квантов при излучении из состояний  $(n_x, n_y, n_z) = (1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  и  $(0, 0, 1)$  соответственно. (Нейтральные атомы рубидия в осцилляторном потенциале с аналогичными параметрами изучались в опытах с конденсатом Бозе-Эйнштейна.). Каким окажется время жизни на указанном уровне протона, если характерная энергия для потенциала ядерных сил равна  $\hbar\omega = 1$  МэВ? (7 баллов)
4. В экспериментах Р. Хофштадтера по рассеянию электронов с энергией  $E = 183$  МэВ на ядрах золота (заряд  $Z = 79$ , атомный номер  $A = 197$ ) измерен квадрат модуля формфактора как функция угла рассеяния. Эта зависимость обнаруживает минимум при угле рассеяния  $\theta = 49.4^\circ$ . Рассчитать зарядовый формфактор, рассмотрев две формы зависимости зарядовой плотности ядра от радиуса,  $\rho(r) = \rho_0 e^{-r/R}$  и  $\rho(r) = \begin{cases} \rho_0, & r \leq R, \\ 0, & r > R \end{cases}$ , где  $R = R_0 A^{1/3}$ .

Выразить параметры  $\rho_0$  и  $R_0$  через заряд ядра  $Ze$  и среднеквадратичный радиус зарядового распределения  $\langle r^2 \rangle$ . В пользу какого из указанных выше распределений плотности свидетельствуют данные эксперимента? Определить из этих данных величину параметров  $\rho_0$  и  $R_0$  для ядра золота (5 баллов).

### Примерный вариант контрольной работы

1. В состоянии с волновой функцией  $\psi(x)$  средние значения и дисперсии операторов координаты и импульса равны соответственно  $\langle \hat{x} \rangle = x_0$ ,  $\Delta x^2 = \sigma^2$  и  $\langle \hat{p} \rangle = \hbar q_0$ ,  $\Delta p^2 = \kappa^2$ . Вычислить все эти четыре характеристики в состоянии с волновой функцией  $\psi'(x) = \psi(x) \exp(ip_0 x / \hbar)$  (5 баллов).
2. Частица массы  $m$  помещена в бесконечно глубокую потенциальную яму ширины  $a$  с границами  $[0, a]$ . При  $t = 0$  её волновая функция имела вид  $\psi(x, t = 0) = A \sin^3(\pi x / a)$ . Найти: среднюю энергию частицы в этом состоянии; плотность вероятности в произвольный момент времени оказаться в интервале координат  $(x, x + dx)$ ; интервал времени  $T$ , через который частица вернётся в указанное состояние (5 баллов).
3. Оператор квантового преобразования Фурье  $\hat{U}_{QFT}$  действует на вектор состояния в вычислительном базисе  $|k\rangle = |1,0,1,1,1,0\dots\rangle$  как  $\hat{U}_{QFT}|k\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^{N-1} \exp(2\pi i j k / N) |j\rangle$ , где последовательность нулей и единиц длины  $N = 2^n$  является двоичной записью числа  $k$ .  
Найти результата действия  $\hat{U}_{QFT}$  на трехкубитовый вектор состояния  $\frac{1}{\sqrt{8}} \sum_{k=0}^7 |k\rangle \cos 2\pi k / 8$ .
4. Показать, что справедливо представление  $\hat{U}_{QFT}|k\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \prod_{l=1}^n [ |0\rangle + |1\rangle \exp(2\pi i k l / 2^l) ]$ .

## Примерные вопросы на экзамене

На проверку сформированности компетенции ОПК-2:

1. Найти среднее значение оператора координаты в когерентном состоянии гармонического осциллятора.
2. Найти дифференциальное сечение рассеяния быстрых электронов на ядре с зарядовой плотностью  $\rho(r) = \rho_0 e^{-r/a}$ .
3. Найти поправку к уровням энергии атома в состоянии с  $J \neq 0, L, S$  в слабом однородном магнитном поле (линейный эффект Зеемана).
4. Найти коэффициент отражения и прохождения от одномерной потенциальной ступеньки высотой  $U_0$  в зависимости от энергии частицы.
5. Найти уровни энергии и нормированные волновые функции гармонического осциллятора в квазиклассическом приближении.
6. Используя правила Хунда, определить основные термы атомов бора  $[(He)2s^22p]$  и кислорода  $[(He)2s^22p^4]$  и вычислить магнитные моменты этих атомов в основном состоянии.
7. Частица находится в основном состоянии осциллятора с частотой  $\omega$ . Найти вероятность остаться в этом состоянии после мгновенного удваивания частоты.
8. Используя теорию возмущений в первом порядке показать, что учёт кулоновского отталкивания электронов в атоме гелия представим в виде оператора спин-спинового взаимодействия. *Указание.* Учесть квантовомеханическую тождественность.
9. Найти уровни энергии, нормированные волновые функции и плотность уровней для частицы массы  $m$ , помещённой в параллелепипед  $L_x \times L_y \times L_z$ .
10. Используя уравнения Гейзенберга, определить зависимость от времени оператора координаты свободной частицы  $\hat{x}(t)$  и вычислить коммутатор  $[\hat{x}(t_1), \hat{x}(t_2)]$  при неравных временах.
11. Вычислить распределение по импульсам  $\rho(p)$  и дисперсию импульса  $\Delta p^2$  для частицы в поле  $U(x) = -G\delta(x)$ .
12. Построить пространственное распределение плотности электронов в атоме водорода в состоянии  $\psi_{n,n-1,n-1}$  при  $n \gg 1$ .

### Пример экзаменационного билета

1. Найти зависимость энергии от квазиимпульса в поле  $U(x) = -G \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - na)$  для состояний с  $E < 0$  в приближении  $mGa/\hbar^2 \gg 1$  (на компетенцию ОПК-1).
2. Спектр и волновые функции частицы в поле гармонического осциллятора в операторном подходе. Когерентные состояния (на компетенцию ОПК-2).

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Физика конденсированного состояния вещества»  
Направление: 03.03.02 Физика  
Направленность (профиль): Физическая информатика**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного