

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

---

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Квантовая теория

---

Уровень высшего образования

Специалитет

---

Направление подготовки / специальность

11.05.02 - Специальные радиотехнические системы

---

Направленность образовательной программы

Прием, анализ и обработка сигналов системами специального назначения

---

Форма обучения

очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.24 Квантовая теория относится к обязательной части образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен использовать в профессиональной деятельности основные законы естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, приобретать новые математические и естественнонаучные знания, используя современные образовательные и информационные технологии	ОПК-1.1: Разбирается в основных разделах математических и естественнонаучных дисциплин ОПК-1.2: Применяет основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований	ОПК-1.1: Разбирается в основных законах и математических особенностях построения квантовой механики: описание состояния с помощью волновой функции, определение наблюдаемых, вычисление средних значений физических величин, принципе неопределенности, приближенные методы вычислений  ОПК-1.2: Может применять основные законы квантовой теории для объяснения эффектов атомной физики, квантовой электроники, полупроводниковой техники	Задачи	Зачёт: Задачи

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная</b>
<b>Общая трудоемкость, з.е.</b>	<b>3</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
в том числе	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
<b>- занятия лекционного типа</b>	<b>32</b>

- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	1
самостоятельная работа	43
Промежуточная аттестация	0 Зачёт

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Волновая функция. Принцип суперпозиции.	11	2	3	5	6
Операторы физических величин. Примеры.	15	4	5	9	6
Одновременная измеримость величин. Соотношение неопределенностей.	16	4	4	8	8
Одномерный гармонический осциллятор.	10	2	4	6	4
Момент импульса. Движение в центрально-симметричном поле.	16	6	4	10	6
Уравнение Шредингера. Стационарная и нестационарная теория возмущений. Золотое правило Ферми.	25	10	8	18	7
Спин электрона. Основы квантовой криптографии.	14	4	4	8	6
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	32	65	43

#### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Физические явления, приведшие к появлению квантовой механики. Корпускулярно-волновой дуализм. Гипотезы Планка и Эйнштейна. Несовместимость интерференции с движением по классическим траекториям. Принцип суперпозиции состояний.
2. Вектор состояния. Эрмитово скалярное произведение и его свойства. Ортогональность собственных состояний, базис из собственных состояний. Линейные операторы, их матрицы и их произведение, поиск собственных значений операторов в матричной форме. Эрмитово сопряжённые операторы и их свойства. Эрмитовы (самосопряжённые) операторы и их свойства.
3. Физические (наблюдаемые) величины и предъявляемые к ним требования. Соответствие между физическими величинами и эрмитовыми операторами. Полнота описания физической системы с помощью вектора состояний, нормировка (на единицу) в дискретном спектре. Сопоставление физической величине линейного эрмитового оператора. Представление вектора состояния системы в виде разложения по собственным состояниям физической величины и статистическая интерпретация коэффициентов разложения (амплитуд вероятности). Среднее значение физической величины.

Дисперсия. Координатное представление. Волновая функция, её свойства, граничные условия.

4. Эволюция вектора состояния со временем. Уравнение Шредингера в качестве постулата квантовой механики. Принцип соответствия, аналогия между классической механикой и геометрической оптикой. Гамильтониан системы и оператор обобщенного импульса частицы.

5. Теория представлений. Необходимое и достаточное условие одновременной измеримости двух физических величин. Полный набор физических величин.

6. Одновременная (совместная) измеримость физических величин. Коммутатор и его свойства. Соотношение неопределенностей (в общем виде).

7. Временное уравнение Шредингера, его обратимость по времени. Уравнение непрерывности и плотность потока вероятности.

8. Стационарные состояния и их свойства. Оператор эволюции для системы с независимым от времени гамильтонианом.

9. Гамильтониан и уравнение Шредингера для осциллятора в координатном представлении. Метод вторичного квантования (повышающий и понижающий операторы). Энергетический спектр осциллятора. Волновые функции осциллятора в координатном представлении.

10. Правило коммутации между компонентами момента и произвольного вектора, коммутационные соотношения для операторов момента. Собственные векторы и собственные значения квадрата момента и одной из его проекций, повышающий и понижающий операторы момента импульса. Матричные элементы операторов повышающего, понижающего операторов и операторов проекции на все три оси. Операторы квадрата орбитального момента и его проекции на ось  $z$  в координатном представлении, сферические функции.

11. Спин как внутренняя переменная, отвечающая «собственному вращению» частицы. Матрицы Паули, оператор вращения для частицы со спином  $1/2$  на конечный угол. Уравнение Паули. Матрица плотности смеси частиц с полуцелым спином. Свойства матрицы плотности. Правила нахождения средних значений для смешанных состояний, описываемых матрицей плотности.

12. Классическое движение в центральном поле. Полный набор коммутирующих операторов, разделение радиальных и угловых переменных в сферической системе координат, радиальное уравнение. Центробежный потенциал и следствия его существования. Разделение переменных в квантово-механической задаче двух тел.

13. Гамильтониан водородоподобного атома. Атомная система единиц, безразмерное уравнение Шредингера в кулоновском поле. Асимптотика решения и общее решение. Энергетический спектр. Волновые функции стационарных состояний. Кратность вырождения уровней энергии атома водорода, Главное, радиальное и орбитальное квантовые числа.

14. Стационарная теория возмущений в вырожденном и невырожденном случаях. Нестационарная теория возмущений. Примеры расчетов. Переходы под действием периодического возмущения. Золотое правило Ферми.

#### **4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

<http://genphys.phys.msu.ru/rus/edu/kvant/Kvant.pdf>

#### **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

## 5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

### 5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:

1. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния гармонического осциллятора под действием возмущения  $\hat{V} = \alpha \hat{p}^2$ .  $\alpha$  – константа.  
Прим. Используйте операторы рождения и уничтожения.
2. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется выражением  $\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sin \theta \cos \varphi$ . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось z могут быть измерены в этом состоянии и с какой вероятностью?
3. В опыте Штерна-Герлаха (магнитное поле направлено вдоль оси Z) электроны в пучке обладают спином, направленным противоположно оси Z. Сколько пучков будет на экране. Ответ обосновать.
4. В первом состоянии гармонического осциллятора ( $n = 1$ ) вычислить наиболее вероятное значение координаты.
5. При измерении проекции момента импульса  $L_z$  в некотором состоянии получили среднее значение  $\langle L_z \rangle = \hbar/2$ . Пользуясь шаровыми функциями  $Y_{lm}$ , напишите хотя бы одну волновую функцию, которая описывала бы такое состояние.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.
не зачтено	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой

	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. При измерении проекции момента импульса  $L_z$  в некотором состоянии получили среднее значение  $\langle L_z \rangle = \hbar/2$ . Пользуясь шаровыми функциями, напишите хотя бы одну волновую функцию, которая описывала бы такое состояние.
2. В первом состоянии гармонического осциллятора ( $n = 1$ ) вычислить наиболее вероятное значение координаты.  $Y_{lm}$
3. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния электрона в атоме водорода  $\psi_{100}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}$  под действием внешнего однородного электрического поля напряженностью  $E$ , направленного вдоль оси  $z$ .
4. Электрон в атоме водорода находится в состоянии  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}$ . Вычислить среднее значение кинетической энергии электрона.
5. Частица находится в одномерной потенциальной яме шириной  $a$  с бесконечными стенками в состоянии  $\psi$ . Найти среднее значение и дисперсию импульса.
6. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется выражением ( $A$  – нормировочная константа):  $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \sin \theta \cos \varphi$ , причем  $\int_0^\infty R^2(r) r^2 dr = 1$ . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии?

7. С помощью теории возмущений найти сдвиг энергии основного

состояния  $\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a}$  электрона в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  под действием внешнего однородного электрического поля напряженностью  $E$ .

8. Электрон в атоме водорода находится в состоянии  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}$ . Вычислить среднее расстояние электрона от ядра.

9. В опыте Штерна-Герлаха (магнитное поле направлено вдоль оси Z) электроны в пучке обладают спином, направленным по оси X. Сколько пучков будет на экране. Ответ обосновать.

10. С помощью теории возмущений найти сдвиг энергии первого

состояния  $\psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{2\pi x}{a}$  электрона в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  под действием внешнего однородного электрического поля напряженностью  $E$ .

11. Электрон в атоме водорода находится в состоянии  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}$ . Вычислить среднее значение потенциальной энергии электрона.

12. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением ( $A$  – нормировочная константа):  $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \sin 2\theta \cos \varphi$ ,

причем  $\int_0^\infty R^2(r) r^2 dr = 1$ . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии?

13. С помощью теории возмущений найти сдвиг энергии второго

состояния  $\psi_3(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{3\pi x}{a}$  электрона в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  под действием внешнего однородного электрического поля напряженностью  $E$ .

14. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением ( $A$  – нормировочная константа):  $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \sin 2\theta \cos \varphi$ ,

причем  $\int_0^\infty R^2(r) r^2 dr = 1$ . Чему равно среднее значение проекции момента импульса  $L_z$  в этом состоянии?



15. На частицу в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  наложено

возмущение вида  $V(x) = V_0 \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ . В первом порядке теории возмущений найти сдвиг

энергии основного состояния  $\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a}$ .

16. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением ( $A$  – нормировочная константа):  $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \cos \theta (1 + \sin \theta \sin \varphi)$ ,

причем  $\int_0^\infty R^2(r) r^2 dr = 1$ . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии?

17. На частицу в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  наложено

возмущение вида  $V(x) = V_0 \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ . В первом порядке теории возмущений найти сдвиг

энергии основного состояния  $\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a}$ .

18. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния

частицы в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной  $a$  под действием

возмущения  $\hat{V} = \alpha \delta(x)$ .  $\alpha$  – константа,  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака.

19. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением ( $A$  – нормировочная константа):  $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \sin^2 \theta \sin 2\varphi$ ,

причем  $\int_0^\infty R^2(r) r^2 dr = 1$ . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии?

20. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния

гармонического осциллятора под действием возмущения  $\hat{V} = \alpha \hat{x} \hat{p}$ .  $\alpha$  – константа.

*Примечание.* Используйте операторы рождения и уничтожения.

21. В опыте Штерна-Герлаха (магнитное поле направлено вдоль оси  $Z$ ) электроны в пучке

обладают спином, направленным противоположно оси  $Z$ . Сколько пучков будет на экране. Ответ обосновать.

22. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} R(r, \theta) \sin \varphi$ . Какие значения проекции момента импульса на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии и с какой вероятностью?

23. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется

выражением  $\psi(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} R(r, \theta) \sin \varphi$ . Каковы среднее значения и дисперсия проекции момента импульса на ось  $z$  в этом состоянии?

24. Спиновое состояние частицы со спином  $\frac{1}{2}$  описывается нормированной волновой функцией вида . Чему равно среднее значение проекции спина на ось  $y$  в этом состоянии?
25. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния гармонического осциллятора под действием возмущения  $\hat{V} = \alpha \hat{p}^2$  .  $\alpha$  – константа.  
Прим. Используйте операторы рождения и уничтожения.
26. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется выражением  $\psi(r, \theta, \varphi) = R(r) \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \sin \theta \cos \varphi$  . Какие значения квадрата момента импульса и его проекции на ось  $z$  могут быть измерены в этом состоянии и с какой вероятностью?
27. В первом порядке теории возмущений найти сдвиг энергии основного состояния гармонического осциллятора под действием возмущения  $\hat{V} = \alpha \delta(x)$  .  $\alpha$  – константа.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.
не зачтено	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

- Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория) : Учебное пособие. - 6-е изд. - Москва : Издательская фирма "Физико-математическая литература" (ФИЗМАТЛИТ), 2016. - 800 с. - ВО - Бакалавриат. - ISBN 978-5-9221-0530-9., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=741026&idb=0>.
- Савельев И. В. Основы теоретической физики. В 2 томах. Том 2. Квантовая механика : учебник для вузов / Савельев И. В. - 7-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2023. - 432 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-507-47138-6., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=864990&idb=0>.
- Давыдов Александр Сергеевич. Квантовая механика : [учеб. пособие для ун-тов]. - 2-е изд., испр. и перераб. - М. : Наука, 1973. - 703 с. : с черт. - 1.56., 8 экз.

Дополнительная литература:

- Чуканов С. Н. Квантовая теория информации : учебное текстовое электронное издание локального распространения / Чуканов С. Н., Чуканов И. С., Белик А. Г. - Омск : ОмГТУ, 2023. -

164 с. - Рекомендовано редакционно-издательским советом Омского государственного технического университета. - Книга из коллекции ОмГТУ - Информатика. - ISBN 978-5-8149-3680-6., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=900290&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

[https://mipt1.ru/lectures/4/4\\_kvantmech\\_suhanov.pdf](https://mipt1.ru/lectures/4/4_kvantmech_suhanov.pdf)

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 11.05.02 - Специальные радиотехнические системы.

Автор(ы): Шарков Валерий Валерьевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 16.01.2024 г., протокол № №1.