

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
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО
решением ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. № 6

Рабочая программа дисциплины

Квантовая теория

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

Специалитет

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

11.05.02 - Специальные радиотехнические системы

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

Радиотехнические системы и комплексы специального назначения

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

2023 год

1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая теория» относится к дисциплинам вариативной части (блок Б1.В) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по специальности «Специальные радиотехнические системы» на радиофизическом факультете ННГУ. Дисциплина изучается в 6-м семестре.

Целями освоения дисциплины являются:

- ознакомление с методами теоретической физики на примере квантовой механики;
- формирование представлений о квантовомеханических закономерностях, лежащих в основе современной физики и ее фундаментальных приложений;
- получение базового образования для изучения дисциплин «Квантовая электроника», «Основы геометрической оптики и квазиоптики», «Введение в физику полупроводников».

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
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 Этап освоения: начальный	31 (ОПК-1). Знать основные разделы математических и естественнонаучных дисциплин. У1 (ОПК-1). Уметь применять основные законы естественнонаучных дисциплин.

3. Структура и содержание дисциплины «Квантовая теория»

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 65 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 32 часа практические занятия, 1 час на текущий контроль успеваемости), 43 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	Всего (часы)	В том числе				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Волновая функция. Принцип суперпозиции состояний, волновой пакет. Квантование свободной частицы в ограниченном объеме пространства, условие нормировки. Вычисление средних значений координаты и импульса.	18	6	6		12	6

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля)	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Операторы. Операторы физических величин, их свойства, примеры. Собственные функции и собственные значения операторов, их физический смысл, кратность вырождения, квантовые числа. Свойства собственных функций операторов, имеющих дискретный спектр, особенность собственных функций в случае вырождения, условие полноты.	30	10	10		20	10
Одновременная измеримость величин. Условия, при которых несколько физических величин могут иметь определенные значения в одном состоянии, одновременная измеримость физических величин, полный набор физических величин. Соотношения неопределенностей для произвольных физических величин.	14	4	4		8	6
Момент импульса. Спин. Движение в центрально-симметричном поле. Оператор момента импульса. Коммутационные соотношения между компонентами момента импульса, конус состояний. Собственные числа и собственные функции операторов квадрата момента и одной из его проекций. Матричное представление в квантовой теории, свойства матриц операторов физических величин. Спин электрона, матрицы Паули, их свойства, коммутационные соотношения между компонентами спина.	24	6	6		12	11
Уравнение Шредингера. Теория возмущений. Нестационарное уравнение Шредингера. Определение стационарного состояния, его зависимость от времени. Стационарная теория возмущений, условия применимости. Теория возмущений при наличии вырождения, секулярное уравнение. Возмущения, зависящие от времени. Переходы под влиянием возмущения, действующего в течение конечного времени. В т.ч текущий контроль	22	6	6		12	10
	1					
Промежуточная аттестация (зачет)						

Текущий контроль успеваемости проходит в рамках занятий семинарского типа. Итоговый контроль осуществляется на зачете.

4. Образовательные технологии

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме практических занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях лекционного типа:

- лекции с проблемным изложением учебного материала.

используемые на занятиях семинарского типа:

- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;

- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы.

5.1 Темы практических занятий, по которым дается домашнее задание:

1. Свойства операторов. Определение спектра собственных значений и собственных векторов некоторых операторов.
2. Вычисление вероятностей измерения физических величин в квантовых состояниях.
3. Прохождение частицы через потенциальный барьер.
4. Уровни энергии и волновые функции частицы, находящейся в потенциальной яме с бесконечными стенками.
5. Средние значения энергии, импульса, координаты частицы в различных состояниях.
6. Уровни энергии и волновые функции гармонического осциллятора.
7. Момент импульса частицы. Коммутационные соотношения различных проекций момента импульса. Сложение моментов.
8. Матричное представление операторов. Спин частицы.
9. Движение частиц в центрально-симметричном поле. Уровни энергии и волновые функции электрона в атоме водорода.
10. Теория возмущений. Эффект Штарка в атоме водорода и гармоническом осцилляторе. Нормальный и аномальный эффекты Зеемана. Переходы под действием импульса электрического поля. Правила отбора.

Выполнение домашних заданий проверяется на занятиях. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы – основная и дополнительная литература.

5.2 Вопросы, которые должны быть проработаны в ходе самостоятельной работы

1. Собственные функции и собственные числа операторов квадрата спина и одной из его проекций.
2. Сложение двух моментов. Квантовые числа суммарного момента.
3. Движение частиц в центрально-симметричном поле. Интегралы движения. Полный набор физических величин и их общие собственные функции. Стационарное уравнение Шредингера для радиальной составляющей волновой функции. Асимптотика уравнения на малых и больших расстояниях. Движение электрона в кулоновском потенциале. Спектр энергии и свойства стационарных состояний. Вырождение уровней. Спектроскопические обозначения для состояний в атоме водорода. Радиальные волновые функции. Полиномы Лагерра.
4. Переходы под воздействием периодического возмущения. Асимптотика вероят-

ности перехода в единицу времени. Закон сохранения энергии при квантовых переходах. Квантовые переходы под влиянием постоянного во времени возмущения. Полная вероятность перехода в единицу времени. Плотность конечных состояний. “Золотое правило” Ферми.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, навыков), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования

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

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать основы квантовой механики (постулаты, математические методы) и основные критерии проявления квантовомеханических закономерностей в физических системах.	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала с рядом заметных погрешностей	Знание основного материала с незначительными погрешностями	Знание основного материала без ошибок и погрешностей	Знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь проводить приближенную оценку при решении задач, связанных с теорией информации.	Отсутствует способность решения стандартных задач	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач	Способность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	Способность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	Способность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
<u>Навыки</u> Владеть навыками использования ма-	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком

тематического аппарата квантовой механики в применении к вопросам теории информации и информационных технологий.							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способность студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме и заключается в решении задач (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании по результатам решения задач в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Результатом проверки усвоения студентом материала и правильности решения задачи является выставление студенту оценки «зачтено». При отсутствии соответствующего уровня знаний и навыков студент не аттестовывается с выставлением оценки «не зачтено».

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих сформированность компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются: индивидуальное собеседование, домашние задания и тестовые контрольные задачи.

Для оценивания результатов обучения в виде умений используется индивидуальное собеседование и практические контрольные задания.

Для оценивания результатов обучения в виде владений используется индивидуальное собеседование и тестовые контрольные задачи.

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций **ОПК-1**, и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

1. При измерении проекции момента импульса L_z в некотором состоянии получили среднее значение $\langle L_z \rangle = \hbar/2$. Пользуясь шаровыми функциями $Y_{lm}(\theta, \varphi)$, напишите хотя бы одну волновую функцию, которая описывала бы такое состояние.

2. 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 .

3. Найти дисперсию проекции спина на ось y в состоянии $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ -1 \end{pmatrix}$.

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 $\langle L_z \rangle = 3\hbar/7$. Пользуясь шаровыми функциями $Y_{lm}(\theta, \varphi)$, напишите хотя бы одну волновую функцию, которая описывала бы такое состояние.

6. 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 y .

7. 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.

8. В одномерной прямоугольной потенциальной яме с абсолютно непроницаемыми стенками и шириной a находится электрон, состояние которого описывается волновой функцией $\Psi(x) = \sqrt{\frac{8}{3a}} \sin^2 \frac{\pi x}{a}$. Определить вероятность пребывания электрона в основном состоянии.

9. При измерении проекции момента импульса L_z в некотором состоянии получили среднее значение $\langle L_z \rangle = -2\hbar$. Пользуясь шаровыми функциями $Y_{lm}(\theta, \varphi)$, напишите хотя бы одну волновую функцию, которая описывала бы такое состояние.

10. 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 x .

11. Найти дисперсию проекции спина на ось x в состоянии $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}$.

12. Частица находится в одномерной потенциальной яме шириной a с бесконечными стенками в состоянии $\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi n x}{a}$. Найти среднее значение и дисперсию импульса p_x .

13. 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?

14. 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 .

15. 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.

16. 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.

17. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется выражением (A – нормировочная константа): $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r) \sin \theta \cos \varphi$, причем $\int_0^\infty R^2(r)r^2 dr = 1$. Чему равно среднее значение проекции момента импульса L_z в этом состоянии?

18. 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 .

19. 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.

20. Найти дисперсию проекции спина на ось z в состоянии $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

21. 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?

22. 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 .

23. 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?

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

25. 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?

26. 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 первого состояния $\psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{2\pi x}{a}$.

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

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

29. Волновая функция некоторой системы в сферических координатах определяется выражением (A – нормировочная константа): $\psi(r, \theta, \varphi) = AR(r)(1 + \cos \theta)$, 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?

30. 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 второго состояния $\psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{2\pi x}{a}$.

6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) основная литература:

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. - Теоретическая физика. Т. 3. - М., 1989. - 767 с. (200 экз.)

б) дополнительная литература:

1. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. - М.: Наука, 1983. – 664 с. (16 экз.)

2. Давыдов А.С. Квантовая механика. – М.: Наука, 1973. – 703 с. (10 экз.)

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа. Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы»

Автор Шарков В.В.

Рецензент (ы) Орлов И.Я

Заведующий кафедрой Бельков С.А.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета