

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
цифровых технологий



/ Кургалин С.Д.

03.05.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.О.32 КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

02.03.01 Математика и компьютерные науки

2. Профиль подготовки/специализация:

Распределенные системы и искусственный интеллект

Квантовая теория информации

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: цифровых технологий

6. Составители программы:

Запрягаев Сергей Александрович, д. ф.-м. н., профессор

7. Рекомендована: НМС ФКН (протокол № 7 от 03.05.2023)

8. Учебный год: 2024-2025 Семестр: 4

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целью курса является ознакомление студентов с основными понятиями квантовой теории и ее математическим аппаратом.

Задачи учебной дисциплины: формирование умения использовать понятия и аппарат теории для исследования квантовых информационных систем, а также для решения простейших задач квантовой теории информации.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к обязательной части учебного плана (блок Б1).

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способен консультировать и использовать фундаментальные знания в области математического анализа, комплексного и функционального анализа алгебры, аналитической геометрии, дифференциальной геометрии и топологии, дифференциальных уравнений, дискретной математики и математической логики, теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов, численных методов, теоретической механики в профессиональной деятельности.	ОПК-1.1	Обладает базовыми знаниями, полученными в области математических и (или) естественных наук.	Знать: теоретические основы нерелятивистской квантовой теории; способы применения уравнений квантовой теории; принципы применения квантовой идеологии в информационных системах.
		ОПК-1.2	Умеет использовать их в профессиональной деятельности.	Уметь: решать основные задачи квантовой теории, эффективно применять квантовую теорию при описании модельных элементарных квантовых систем.
		ОПК-1.3	Имеет навыки выбора методов решения задач профессиональной деятельности на основе теоретических знаний.	Владеть: навыками применения математического аппарата квантовой теории.

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 2/72.

Форма промежуточной аттестации 4 семестр – зачёт с оценкой.

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	Всего	По семестрам
		4 сем.
Аудиторные занятия	48	48
в том числе:	лекции	32
	практические	16
	лабораторные	
Самостоятельная работа	24	24
Зачёт с оценкой		
Итого:	72	72

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
1. Лекции			
1.1	Введение. Микромир. Дуализм. Понятие о квантовых информационных системах.	Макро- и микромир. Волновые свойства материи. Квантовые компьютеры. Квантовые каналы связи. Квантовая криптография.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.2	Основные постулаты квантовой теории	Состояние. Понятие квантового состояния. Оператор. Алгебра операторов. Принцип суперпозиции состояний. Соответствие операторов физическим величинам. Теоремы об эрмитовых операторах. Волновая функция. Уравнение Шредингера. Статистическая интерпретация волновой функции. Измерение в квантовой теории. Постулат об измерении. Принцип неопределенности для физических величин. Предельный переход от квантовой механики и классической.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.3	Теория представлений квантовых состояний	Аксиоматическая квантовая механика. Дираковские обозначения квантовых состояний. Бра- и кет-состояния. Теория представлений. Теория представлений для операторов. Оператор эволюции. Различные представления квантовой теории.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.4	Одномерное уравнение Шредингера	Одномерное движение. Свободная частица. Модельное описание взаимодействий частиц. Туннельный эффект. Линейный гармонический осциллятор.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.5	Многомерное, многочастичное уравнение Шредингера	Атом водорода. Многоэлектронные атомы. Уравнение Шредингера для системы многих частиц. Симметричные и антисимметричные состояния. Молекулы. Ядра.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.6	Спин частиц. Математический аппарат теории спина	Опыты Штерна-Герлаха. Спин электрона. Спин частиц. Матрицы Паули. Алгебра матриц Паули.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.7	Квантовая теория переходов	Нестационарная теория возмущений. Вероятность перехода в единицу времени. Золотое правило Ферми. Теория рассеяния. Борновское приближение в рассеянии.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
1.8	Кубит. Квантовые информационные системы	Кубит. Принципы реализации кубита. Спутанные состояния. Состояния Белла. Принципы работы квантовых компьютеров. Общие принципы квантовой криптографии. Понятие о телепортации. Заключение.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2. Практические занятия			
2.1	Введение. Микромир. Дуализм. Понятие о квантовых информационных системах.	Макро- и микромир. Волновые свойства материи. Квантовые компьютеры. Квантовые каналы связи. Квантовая криптография.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978

2.2	Основные постулаты квантовой теории	Состояние. Понятие квантового состояния. Оператор. Алгебра операторов. Принцип суперпозиции состояний. Соответствие операторов физическим величинам. Теоремы об эрмитовых операторах. Волновая функция. Уравнение Шредингера. Статистическая интерпретация волновой функции. Измерение в квантовой теории. Постулат об измерении. Принцип неопределенности для физических величин. Предельный переход от квантовой механики и классической.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.3	Теория представлений квантовых состояний	Аксиоматическая квантовая механика. Дираковские обозначения квантовых состояний. Бра- и кет-состояния. Теория представлений. Теория представлений для операторов. Оператор эволюции. Различные представления квантовой теории.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.4	Одномерное уравнение Шредингера	Одномерное движение. Свободная частица. Модельное описание взаимодействий частиц. Туннельный эффект. Линейный гармонический осциллятор.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.5	Многомерное, многочастичное уравнение Шредингера	Атом водорода. Многоэлектронные атомы. Уравнение Шредингера для системы многих частиц. Симметричные и антисимметричные состояния. Молекулы. Ядра.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.6	Спин частиц. Математический аппарат теории спина	Опыты Штерна-Герлаха. Спин электрона. Спин частиц. Матрицы Паули. Алгебра матриц Паули.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.7	Квантовая теория переходов	Нестационарная теория возмущений. Вероятность перехода в единицу времени. Золотое правило Ферми. Теория рассеяния. Борновское приближение в рассеянии.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978
2.8	Кубит. Квантовые информационные системы	Кубит. Принципы реализации кубита. Спутанные состояния. Состояния Белла. Принципы работы квантовых компьютеров. Общие принципы квантовой криптографии. Понятие о телепортации. Заключение.	https://edu.vsu.ru/local/crw/course.php?id=3978

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Введение. Микромир. Дуализм. Понятие о квантовых информационных системах.	4	2		4	10
2	Основные постулаты квантовой теории	4	2		4	10
3	Теория представлений квантовых состояний	4	2		4	10
4	Одномерное уравнение Шредингера	4	2		2	8
5	Многомерное, многочастичное уравнение Шредингера	4	2		2	8
6	Спин частиц. Математический аппарат теории спина	4	2		2	8

7	Квантовая теория переходов	4	2		2	8
8	Кубит. Квантовые информационные системы	4	2		4	10
	Итого:	32	16		24	72

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Освоение дисциплины складывается из аудиторной работы (учебной деятельности, выполняемой под руководством преподавателя) и внеаудиторной работы (учебной деятельности, реализуемой обучающимся самостоятельно).

Аудиторная работа состоит из работы на лекциях и выполнения практических (или лабораторных) заданий в объеме, предусмотренном учебным планом. Лекция представляет собой последовательное и систематическое изложение учебного материала, направленное на знакомство обучающихся с основными понятиями и теоретическими положениями изучаемой дисциплины. Лекционные занятия формируют базу для практических (или лабораторных) занятий, на которых полученные теоретические знания применяются для решения конкретных практических задач. Обучающимся для успешного освоения дисциплины рекомендуется вести конспект лекций и практических (лабораторных) занятий.

Самостоятельная работа предполагает углублённое изучение отдельных разделов дисциплины с использованием литературы, рекомендованной преподавателем, а также конспектов лекций, презентационным материалом (при наличии) и конспектов практических (лабораторных) занятий. В качестве плана для самостоятельной работы может быть использован раздел 13.1 настоящей рабочей программы, в котором зафиксированы разделы дисциплины и их содержание. В разделе 13.2 рабочей программы определяется количество часов, отводимое на самостоятельную работу по каждому разделу дисциплины. Больше количество часов на самостоятельную работу отводится на наиболее трудные разделы дисциплины. Для самостоятельного изучения отдельных разделов дисциплины используется перечень литературы и других ресурсов, перечисленных в пунктах 15 и 16 настоящей рабочей программы.

Успешность освоения дисциплины определяется систематичностью и глубиной аудиторной и внеаудиторной работы обучающегося.

При использовании дистанционных образовательных технологий и электронного обучения выполнять все указания преподавателей, вовремя подключаться к online занятиям, ответственно подходить к заданиям для самостоятельной работы.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Савельев, И. В. Основы теоретической физики. В 2 томах. Том 2. Квантовая механика / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 432 с. — ISBN 978-5-507-47138-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/330521
2	Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц : учебник для вузов / И. В. Савельев. — 15-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 320 с. — ISBN 978-5-507-47618-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/397337

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
1	Запрягаев, С. А. Введение в квантовые информационные системы : учебное пособие / С. А. Запрягаев. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015. — 218 с.
2	Сборник задач по квантовой механике и квантовой электронике : учебное пособие / А. В. Маругин, А. П. Савикин, В. В. Шарков, О. В. Шаркова. — Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2018. — 34 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/144859

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Ресурс
1	ЗНБ ВГУ: https://lib.vsu.ru/
2	Электронно-библиотечная система "Университетская библиотека online": http://biblioclub.ru/
3	Электронно-библиотечная система "Лань": https://e.lanbook.com/

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	Запрягаев, С. А. Введение в квантовые информационные системы : учебное пособие / С. А. Запрягаев. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015. — 218 с.

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При реализации дисциплины могут использоваться технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии на базе портала edu.vsu.ru, а также другие доступные ресурсы сети Интернет.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Аудитория для лекционных занятий: мультимедиа-проектор, экран для проектора, компьютер с выходом в сеть «Интернет». Специализированная мебель (столы ученические, стулья, доска). Программное обеспечение: LibreOffice v.5-7, программа для просмотра файлов формата pdf, браузер.

Аудитория для практических занятий: специализированная мебель, доска.

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенции	Индикаторы достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Разделы 1-8	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3	Контрольная работа
Промежуточная аттестация форма контроля – зачёт с оценкой				Перечень вопросов к зачёту

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью контрольных работ.

Комплект заданий для контрольной работы

Контрольная работа № 1

Задание 1 (20 баллов). Волновая функция задаётся на всей вещественной оси выражением

$$\Psi(x) = Ax \exp \left[-\frac{x^2}{2x_0^2} \right],$$

где x_0 – константа с размерностью длины. Вычислить нормировочную константу A .

Задание 2 (30 баллов). Доказать тождество Якоби:

$$[\hat{A}, [\hat{B}, \hat{C}]] + [\hat{C}, [\hat{A}, \hat{B}]] + [\hat{B}, [\hat{C}, \hat{A}]] = \hat{0}.$$

Контрольная работа № 2

Задание 1 (20 баллов). Частица приведена в состояние с волновой функцией

$$\Psi(x) = \begin{cases} A \sin \frac{\pi n x}{a} & \text{при } 0 \leq x \leq a; \\ 0 & \text{при } x < 0 \text{ или } x > a, \end{cases}$$

где $n = 1, 2, \dots$. Вычислить $\langle x \rangle$, $\langle (\Delta x)^2 \rangle$, $\langle p_x \rangle$, $\langle (\Delta p_x)^2 \rangle$.

Задание 2 (30 баллов). Частица массы m находится в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме ширины a . Найти энергии стационарных состояний частицы и соответствующие им волновые функции.

Контрольная работа № 3

Задание 1 (20 баллов). Получить правило действия оператора \hat{F} на вектор $|a\rangle$ в G -представлении.

Задание 2 (30 баллов). Доказать общие свойства унитарных преобразований.

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств: перечень вопросов к зачёту.

Перечень вопросов к зачёту

1. Макро- и микромир. Волновые свойства материи.
2. Квантовые компьютеры.
3. Квантовые каналы связи.

4. Квантовая криптография.
5. Состояние. Понятие квантового состояния.
6. Оператор. Алгебра операторов.
7. Принцип суперпозиции состояний.
8. Соответствие операторов физическим величинам.
9. Теоремы об эрмитовых операторах.
10. Волновая функция.
11. Уравнение Шредингера.
12. Статистическая интерпретация волновой функции. Измерение в квантовой теории. Постулат об измерении.
13. Принцип неопределенности для физических величин.
14. Предельный переход от квантовой механики и классической.
15. Аксиоматическая квантовая механика.
16. Дираковские обозначения квантовых состояний.
17. Бра и кет – состояния. Теория представлений.
18. Теория представлений для операторов.
19. Оператор эволюции. Различные представления квантовой теории.
20. Одномерное движение. Свободная частица.
21. Модельное описание взаимодействий частиц.
22. Туннельный эффект. Линейный гармонический осциллятор.
23. Атом водорода. Многоэлектронные атомы.
24. Уравнение Шредингера для системы многих частиц.
25. Симметричные и антисимметричные состояния.
26. Молекулы. Ядра.
27. Опыты Штерна Герлаха. Спин электрона.
28. Спин частиц. Матрицы Паули.
29. Алгебра матриц Паули
30. Нестационарная теория возмущений.
31. Вероятность перехода в единицу времени.
32. Золотое правило Ферми.
33. Теория рассеяния.
34. Борновское приближение в рассеянии
35. Кубит. Принципы реализации кубита.
36. Спутанные состояния. Состояния Белла.
37. Принципы работы квантовых компьютеров.
38. Общие принципы квантовой криптографии.
39. Понятие о телепортации.

Для оценивания результатов обучения на зачёте с оценкой используется 4-балльная шкала: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Дан полный, развёрнутый ответ на поставленный вопрос (вопросы), обучающийся свободно оперирует основными понятиями дисциплины, ориентируется в предметной области. Изложение материала не содержит ошибок, отличается последовательностью, грамотностью, логической стройностью.	Повышенный уровень	Отлично
Дан развёрнутый ответ на поставленный вопрос (вопросы), обучающийся свободно оперирует основными понятиями дисциплины, ориентируется в предметной области. Материал изложен в целом последовательно и грамотно, отсутствуют грубые ошибки, однако имеются отдельные неточности в	Базовый уровень	Хорошо

определениях, вычислениях, доказательствах, изложениях положений теории.		
Ответ на поставленный вопрос (вопросы) содержит изложение только базового теоретического материала, имеются ошибки в определениях, вычислениях, доказательствах, формулировках положений теории. Нарушена логическая последовательность в изложении материала.	Пороговый уровень	Удовлетворительно
Ответ на поставленный вопрос (вопросы) отсутствует, либо содержит грубые ошибки в определениях, вычислениях, доказательствах, формулировках положений теории. Обучающийся не владеет основными понятиями дисциплины. Отсутствует логическая последовательность в изложении материала.	–	Неудовлетворительно