

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

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

| | |
|----------------------------|---|
| по дисциплине: | Квантовая информатика |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра квантовой радиофизики |
| курс: | 1 |
| квалификация: | магистр |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Н.Н. Колачевский, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры квантовой радиофизики 25.05.2020

Аннотация

Дисциплина предназначена для студентов, имеющих базовые знания в области оптики и квантовой механики. Программа курса включает следующие основные разделы: понятия информации, бита, кубита, основы теории информации, однокубитные операции, теорема о запрете клонирования, алгоритм коррекции ошибок, операции над несколькими кубитами, квантовое Фурье-преобразование и алгоритм Шора, физическая реализация кубитов, перепутанные состояния, основы квантовой криптографии. В результате овладения дисциплиной обучающийся получит базовые знания в области квантовых вычислений и квантовой теории информации.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области квантовых вычислений и квантовой теории информации.

Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области квантовых вычислений и квантовой теории информации, изучение применения квантовых схем для решения задачи факторизации, задач безопасной передачи информации по квантовым каналам и разработки алгоритмов для квантовых компьютеров;
- изучение перепутанных состояний, парадокса ЭПР, неравенства Белла и трехчастичных перепутанных состояний;
- ознакомление с физическими реализациями кубитов и примерами квантовых вычислений. Ознакомление с однофотонными линиями в квантовых коммуникационных системах;
- формирование подходов к выполнению исследований студентами в области квантовых вычислений и квантовой теории информации в рамках выпускных работ на степень магистра.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|--|---|
| УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия | УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке |
| | УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.) |
| | УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные |
| | УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость |
| | ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |

| | |
|---|--|
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ) |
| | ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ) |
| | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основы теории информации, основные методы преобразования кубитов, основные квантовые алгоритмы (квантовые цепочки), принцип локальности, неравенства Белла, основные протоколы передачи квантовой информации с помощью однофотонных линий.

уметь:

- формировать квантовые цепочки, решать теоретические задачи в рамках курса, находить аналогии в широком кругу квантовых систем, позволяющие реализовывать новые алгоритмы.

владеть:

- методами расчета квантовых цепочек и преобразования волновых функций, основными методами квантовой логики, методами коррекции ошибок, методами описания интерференционных и перепутанных состояний.

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

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

| № | Тема (раздел) дисциплины | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. | | | |
|---|---|---|----------|-----------------|----------------|
| | | Лекции | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1 | Введение, понятие информации, бита, кубита. | 2 | 1 | | 3 |
| 2 | Основы теории информации. | 1 | 2 | | 3 |
| 3 | Однокубитные операции. | 2 | 1 | | 3 |
| 4 | Теорема о запрете клонирования. | 1 | 2 | | 3 |
| 5 | Алгоритм коррекции ошибок. | 2 | 1 | | 3 |
| 6 | Операции над несколькими кубитами. | 1 | 2 | | 3 |
| 7 | Квантовое Фурье-преобразование и алгоритм Шора. | 2 | 1 | | 3 |
| 8 | Физическая реализация кубитов. | 1 | 2 | | 3 |

| | | | | | |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------|----|--|----|
| 9 | Перепутанные состояния. | 2 | 1 | | 3 |
| 10 | Основы квантовой криптографии. | 1 | 2 | | 3 |
| Итого часов | | 15 | 15 | | 30 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 90 час., 2 зач.ед. | | | |

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение, понятие информации, бита, кубита.

Становление теории квантовой информации и квантовых вычислений. Классическая и квантовая физика. Суперпозиционные и перепутанные состояния. От бита к кубиту. Пространство состояний. Перемешивание состояний, селекция состояний и операции над ними. Уравнение движения. Измерения в классической физике. Проективное измерение. Непроективное измерение. Составные системы. Коллективные системы.

2. Основы теории информации.

Классическая теория информации. Необходимые сведения из термодинамики и статистической физики. Информационная энтропия Шеннона, ее математические свойства. Связь между энтропией и информацией (демон Максвелла). Информационные сообщения. Сжатие данных. Условная энтропия и взаимная информация. Канал связи и его информационная емкость. Теорема Шеннона для канала связи без шумов. Оптимальное кодирование информации. Криптография и теория информации. Обратимые логические операции.

3. Однокубитные операции.

Операции с одним кубитом. Однокубитные операции: логические, деполяризация, реполяризация, отражение. Подготовка и определение состояния кубита: подготовка известного состояния и перемешивание, определение ансамбля неизвестного состояния, определение одного состояния (не клонирование), надежность (fidelity) двух состояний, примерное определение состояния и клонирование. Неразличимость двух неортогональных состояний: неразличимость при проективном и непроективном измерениях.

4. Теорема о запрете клонирования.

Теорема о запрете клонирования. Суперпозиция состояний. Параллелизм квантовых алгоритмов. Задача Дойча. Пример отличия операций классического и квантового вычислений. Возможность проекции на различные базисы.

5. Алгоритм коррекции ошибок.

Коррекция ошибок при квантовых вычислениях. Эффекты декогерентности квантовых состояний и влияния окружающей среды. Модели ошибок при квантовых вычислениях. Отличия методов исправления ошибок при квантовых вычислениях от классических. Коды, исправляющие ошибки. Предельный уровень исправляемых ошибок при квантовых вычислениях.

6. Операции над несколькими кубитами.

Двухсоставные квантовые системы: декомпозиция Шмидта, очистка состояния, измерение степени перепутанности, перепутанность и локальные операции, перепутанность чистых состояний двух кубитов. Гейты. Гейт C-NOT. Применения квантовых корреляций: сверхплотное кодирование. Квантовая телепортация Копирование и передача квантовых состояний. Протокол квантовой телепортации. Обзор экспериментальных результатов по телепортации.

7. Квантовое Фурье-преобразование и алгоритм Шора.

Квантовое Фурье-преобразование. Задача поиска фазы. Задача факторизации. Поиск периода. Факторизация составного числа с использованием квантового алгоритма. Вероятностные вычисления.

8. Физическая реализация кубитов.

Фотоны в резонаторах. Ионные системы. Сверхпроводящие цепи. ЯМР-ячейки. Поляризационные состояния фотона. Квантовые компьютеры (КК) на ионах, захваченных в ловушку. Пример реализации. КК на основе эффекта ядерного магнитного резонанса (ЯМР). КК на фотонах. Пример реализации.

9. Перепутанные состояния.

Перепутанные состояния. Об истории квантовых корреляций: парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (EPR), нелокальность Эйнштейна. Неравенства Белла. Трехчастичные перепутанные состояния ГХЦ. Подготовка, реализация.

10. Основы квантовой криптографии.

Квантовая криптография Поляризация -- скрытая квантовая переменная. Использование поляризации фотонов для кодирования/декодирования сообщений. Идея квантовой криптографии. Квантовое распределение ключа (КРК), схема протокола КРК. Протокол BB84 КРК. Сырой и просеянный ключ. Пример реализации протокола квантовой криптографии. Коррекция ошибок. Проблема подслушивания. Критерии стойкости протоколов квантовой криптографии.

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

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Физика квантовой информации [Текст] : Квантовая криптография. Квантовая телепортация. Квантовые вычисления., [монография]/под. ред. Д. Боумейстера [и др.] , -М, Постмаркет, 2002
1. Введение в квантовые вычисления [Текст], [учеб. пособие для вузов] /Ф. Кайе, Р. Лафлам, М. Моска ; пер. с англ. Т. С. Никитиной ; под науч. ред. А. В. Анохина. -М. : Регулярная и хаотическая динамика ; Ижевск, 2009
2. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. —М.: Мир, 2006.
3. Чивилихин С.А. Квантовая информатика. Учебное пособие, ИТМО. — С.-Петербург, 2009. 80 с.

Дополнительная литература

1. Ожигов Ю.И. Квантовые вычисления. — М.: Ф-т ВМиК МГУ, 2003. 104с.

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

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Matlab, Matematica.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра квантовой радиофизики
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: Н.Н. Колачевский, д-р физ.-мат. наук, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия | УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке |
| | УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.) |
| | УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные |
| | УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи | ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость |
| | ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации |
| ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты | ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности |
| | ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели |
| | ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты |
| ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области | ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ) |
| | ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ) |
| | ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая информатика» обучающийся должен:

знать:

- основы теории информации, основные методы преобразования кубитов, основные квантовые алгоритмы (квантовые цепочки), принцип локальности, неравенства Белла, основные протоколы передачи квантовой информации с помощью однофотонных линий.

уметь:

- формировать квантовые цепочки, решать теоретические задачи в рамках курса, находить аналогии в широком кругу квантовых систем, позволяющие реализовывать новые алгоритмы.

владеть:

- методами расчета квантовых цепочек и преобразования волновых функций, основными методами квантовой логики, методами коррекции ошибок, методами описания интерференционных и перепутанных состояний.

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

Не предусмотрено.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов к экзамену:

- 1) Суперпозиционные и перепутанные состояния. От бита к кубиту. Пространство состояний. Перемешивание состояний, селекция состояний и операции над ними.
- 2) Уравнение движения. Измерения в классической физике. Проективное измерение. Непроективное измерение. Составные системы. Коллективные системы.
- 3) Классическая теория информации. Необходимые сведения из термодинамики и статистической физики. Информационная энтропия Шеннона, ее математические свойства. Связь между энтропией и информацией (демон Максвелла).
- 4) Информационные сообщения. Сжатие данных. Условная энтропия и взаимная информация. Канал связи и его информационная емкость. Теорема Шеннона для канала связи без шумов. Оптимальное кодирование информации. Криптография и теория информации. Обратимые логические операции.
- 5) Операции с одним кубитом. Однокубитные операции: логические, деполяризация, реполяризация, отражение. Подготовка и определение состояния кубита: подготовка известного состояния и перемешивание, определение ансамбля неизвестного состояния, определение одного состояния (не клонирование), надежность (fidelity) двух состояний, примерное определение состояния и клонирование. Неразличимость двух неортогональных состояний: неразличимость при проективном и непроективном измерениях.
- 6) Теорема о запрете клонирования. Суперпозиция состояний.
- 7) Параллелизм квантовых алгоритмов. Задача Дойча. Пример отличия операций классического и квантового вычислений. Возможность проекции на различные базисы.
- 8) Коррекция ошибок при квантовых вычислениях. Эффекты декогерентности квантовых состояний и влияния окружающей среды. Модели ошибок при квантовых вычислениях.
- 9) Отличия методов исправления ошибок при квантовых вычислениях от классических. Коды, исправляющие ошибки. Предельный уровень исправляемых ошибок при квантовых вычислениях.
- 10) Двухсоставные квантовые системы: декомпозиция Шмидта, очистка состояния, измерение степени перепутанности, перепутанность и локальные операции, перепутанность чистых состояний двух кубитов. Гейты. Гейт C-NOT.
- 11) Применения квантовых корреляций: сверхплотное кодирование. Квантовая телепортация. Копирование и передача квантовых состояний. Протокол квантовой телепортации. Обзор экспериментальных результатов по телепортации.
- 12) Квантовое Фурье-преобразование. Задача поиска фазы.
- 13) Задача факторизации. Поиск периода.
- 14) Факторизация составного числа с использованием квантового алгоритма. Вероятностные вычисления.
- 15) Фотоны в резонаторах. Ионные системы. Сверхпроводящие цепи.
- 16) ЯМР-ячейки. КК на основе эффекта ядерного магнитного резонанса (ЯМР). КК на фотонах. Пример реализации.
- 17) Поляризационные состояния фотона.
- 18) Квантовые компьютеры (КК) на ионах, захваченных в ловушку. Пример реализации.
- 19) Перепутанные состояния. Об истории квантовых корреляций: парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена (EPR), нелокальность Эйнштейна.

20) Неравенства Белла.

21) Трехчастичные перепутанные состояния ГХЦ. Подготовка, реализация.

22) Квантовая криптография Поляризация -- скрытая квантовая переменная. Использование поляризации фотонов для кодирования/декодирования сообщений. Идея квантовой криптографии.

23) Квантовое распределение ключа (КРК), схема протокола КРК. Протокол BB84 КРК. Сырой и просеянный ключ. Пример реализации протокола квантовой криптографии. Коррекция ошибок. Проблема подслушивания. Критерии стойкости протоколов квантовой криптографии.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Суперпозиционные и перепутанные состояния. От бита к кубиту. Пространство состояний. Перемешивание состояний, селекция состояний и операции над ними.

2. Квантовое Фурье-преобразование. Задача поиска фазы.

Билет 2.

1. Уравнение движения. Измерения в классической физике. Проективное измерение. Непроективное измерение. Составные системы. Коллективные системы.

2. Задача факторизации. Поиск периода.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Экзамен проводится по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Вопрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.