**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Введение в физическое квантовое программирование**

Учебно-методический комплекс

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 1, семестр 1**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

**Новосибирск 2018**

Учебно-методический комплекс «Введение в физическое квантовое программирование» предназначен для студентов магистратуры физического факультета НГУ, разработан в 2018 согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018). В состав комплекса включены рабочая программа дисциплины «Введение в физическое квантовое программирование», банк обучающих материалов, банк контролирующих материалов, фонд оценочных средств.

УМК одобрен на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к.ф.-м.н. И.И. Беторов

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**

**высшего образования**

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Кафедра квантовой электроники**

УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ НГУ

Чл.-к. РАН А. Е. Бондарь

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_2018 г.

**Введение в физическое квантовое программирование**

Рабочая программа дисциплины

**Физический факультет**

Направление подготовки

**03.04.02 Физика (уровень магистратуры)**

**Курс 1, семестр 1**

Профиль:

**Физика оптических явлений**

Форма обучения

**Очная**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Семестр** | **Общий**  **объем** | **Виды учебных занятий (в часах)** | | | | | **Промежуточная аттестация**  **(в период сессии) (в часах)** | | | | |
| Контактная работа обучающихся  с преподавателем | | | | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа  обучающихся с  преподавателем | | | |
| Лекции | Семинары | Практические занятия | Лабораторные занятия | Консультации | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 72 | 16 | 16 |  |  | 38 |  |  |  | 2 |  |
| Всего 72 часов / 2 зачетные единицы  из них:  - контактная работа 34 часа  - в интерактивных формах 16 часов | | | | | | | | | | | |
| Компетенции ПК-1,ПК-2 | | | | | | | | | | | |

**Новосибирск 2018**

Рабочая программа дисциплины «Введение в физическое квантовое программирование», предназначена для магистрантов физического факультета НГУ, разработана в 2018 году согласно требованиям Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования от 05.04.2017г. и решению УС ФФ (протокол № 167 от 21.03.2018).

Место дисциплины в структуре учебного плана:

Б.1 «Вариативная часть».

Рабочая программа дисциплины одобрена на заседании кафедры Квантовой Электроники ФФ НГУ **04 апреля 2018 года, протокол № 1**

Разработчик: к.ф.-м.н. И.И. Бетеров

Заведующий кафедрой КвЭл ФФ НГУ

академик РАН С.Н. Багаев

СОГЛАСОВАНО:

Заместитель декана ФФ по учебной работе

профессор, д.ф.-м.н. С.В. Цыбуля

**Содержание**

[Аннотация 6](#_Toc536171187)

[1. Цели освоения дисциплины 7](#_Toc536171188)

[2. Место дисциплины в структуре образовательной программы 7](#_Toc536171189)

[3. Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины 7](#_Toc536171190)

[4. Структура и содержание дисциплины «Введение в физическое квантовое программирование» 9](#_Toc536171191)

[5. Образовательные технологии 10](#_Toc536171192)

[6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. 11](#_Toc536171193)

[7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания 11](#_Toc536171194)

[8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины 11](#_Toc536171195)

[9. Материально-техническое обеспечение дисциплины 11](#_Toc536171196)

# Аннотация

Программа курса **«Введение в физическое квантовое программирование»** составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки магистра по направлению подготовки 03.04.02 Физика (уровень магистратуры), а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) кафедрой квантовой электроники. Дисциплина изучается студентами первого курса магистратуры физического факультета.

В результате освоения курса у обучающегося должны быть сформированы профессиональные компетенции ПК-1 и ПК-2.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, решение задач, самостоятельная работа студента, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос, проверка решения задач.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

* занятия лекционного типа – 16 часов;
* занятия семинарского типа – 16 часов;
* самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
* промежуточная аттестация (сдача дифференцированного зачета) – 2 часа;

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, семинарского типа, дифференцированный зачет) составляет 34 часа. Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 16 часов.

## Цели освоения дисциплины

Цели курса – овладение базовыми понятиями современной квантовой информатики, освоение основных квантовых алгоритмов, получение основных представлений о физических системах, используемых в качестве платформы для квантовых вычислений.

## Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс «Введение в физическое квантовое программирование» является дисциплиной специализации в образовательной магистерской программе «Квантовые информационные технологии», содержит одну часть годового цикла и необходим для овладения основными представлениями современной квантовой информатики.

Курс относится к циклу фундаментальных общефизических дисциплин. В результате прохождения курса у студентов физического факультета должно сформироваться представление о фундаментальных принципах, на которых базируется квантовая информатика, о различных квантовых алгоритмах и физических реализациях квантовых вычислений. Необходимые предпосылки для успешного освоения курса перечислены далее. В цикле математических дисциплин: знание линейной алгебры и математического анализа и умение применять эти знания при решении задач. В цикле физических дисциплин: знание общей физики и квантовой механики. Необходимость владения указанными выше математическими дисциплинами обусловлена тем обстоятельством, что они составляют основу математического аппарата квантовой информатики. Выбор физических дисциплин, знание которых необходимо для освоения курса, обусловлен тем, что квантовая информатика опирается на квантовые свойства физических систем, а различные экспериментальные реализации квантовых вычислений имеют специфические свойства, индивидуальные для каждой физической системы.

В последние десятилетия наблюдается бурный прогресс в области теоретической и экспериментальной квантовой информатики. Данный курс является вводным, предназначенным для формирования основных представлений, которые будут глубоко изучены в рамках других спецкурсов. Этим определяется глубокая взаимосвязь данного курса с другими курсами, изучаемыми магистрантами направления «Квантовые информационные технологии».

## Компетенции обучающегося, формируемые при освоении дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

**научно-исследовательская деятельность:**

ПК-1: способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области квантовых информационных технологий и решать их с помощью современного оборудования и облачных информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта, в том числе:

ПК 1.1: знать методы и способы постановки и решения задач физических исследований в области квантового программирования, основные квантовые алгоритмы, возможности, методы и системы компьютерных технологий для физических теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

ПК 1.2: уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового программирования с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий.

ПК 1.3: владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового программирования с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований.

**научно-инновационная деятельность:**

ПК-2: способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач в области физического квантового программирования

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

ПК-2.1 знать основные принципы квантовой информатики, основные квантовые алгоритмы (сверхплотное кодирование, квантовая телепортация, алгоритм Дойча, квантовое преобразование Фурье, алгоритм факторизации, алгоритм Шора), основные физические платформы для реализации квантовых вычислений;

ПК-2.2 уметь моделировать основные квантовые алгоритмы, в том числе используя имеющиеся в открытом доступе симуляторы квантовых компьютеров и квантовые процессоры, анализировать результаты выполнения квантовых алгоритмов;

ПК-2.3 владеть базовыми принципами квантовых информационных технологий; математическими подходами для описания квантовых алгоритмов, проводить оценки точности при реализации квантовых вычислений.

## Структура и содержание дисциплины «Введение в физическое квантовое программирование»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№**  **п/п** | **Раздел**  **дисциплины** | **Неделя семестра** | **Всего** | **Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)** | | | **Промежуточная аттестация (в период сессии)**  **(в часах)** |
| Аудиторные часы | | Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии) |
| Лекции  (кол-во часов) | Семинары  (кол-во  часов) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Введение в квантовую информатику  *Промежуточный контроль – домашнее задание* | 1 | 6 | 2 |  | 4 |  |
| 2 | Физическая реализация квантовых вычислений  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 2-3 | 8 | 2 | 2 | 4 |  |
| 3 | Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация  *Промежуточный контроль – выборочный опрос* | 4 - 6 | 10 | 4 | 2 | 4 |  |
| 4 | Квантовое преобразование Фурье и его приложения  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача и разбор домашнего задания* | 7 - 10 | 14 | 6 | 2 | 6 |  |
| 5 | Квантовое программирование  *Промежуточный контроль – выборочный опрос, сдача домашнего задания* | 11-13 | 12 | 2 | 4 | 6 |  |
| 6 | Физическая реализация квантовых вычислений  *Домашняя контрольно-графическая работа, разбор домашнего задания* | 14-15 | 10 |  | 4 | 6 |  |
| 7 | Контрольная работа | 16 | 10 |  | 2 | 8 |  |
| 8 | Дифференцированный зачет | 17 | 2 |  | 2 |  |  |
| **Всего** | | | **72** | **16** | **18** | **38** |  |

**Программа курса лекций**

* 1. Введение в квантовую информатику.
  2. Прогресс в современной квантовой информатике.
  3. История квантовой информатики.
  4. Физические принципы квантовых вычислений. Обратимые и необратимые операции.
  5. Кубиты и их состояния. Квантовые вентили. Примеры однокубитовых и двухкубитовых вентилей. Вентиль Тоффоли. Изображение квантовых вентилей на схемах.
  6. Простейшие квантовые алгоритмы. Генерация перепутанных состояний. Практическое применение квантовых алгоритмов.
  7. Современные прототипы квантовых компьютеров. Квантовые процессоры D-Wave и IBM.

1. Физическая реализация квантовых вычислений*.*
   1. Критерии ди Винченцо.
   2. Физические платформы для реализации квантовых вычислений.
   3. Сравнительный анализ физических систем с точки зрения перспективы реализации квантовых вычислений.
   4. Квантовая коммуникация. Теорема о невозможности копирования квантового состояния. Квантовая криптография.
2. Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация
   1. Сверхплотное кодирование. Генерация перепутанных пар фотонов.
   2. Квантовое описание светоделительной пластины. Детектирование состояний Белла.
   3. Экспериментальная реализация сверхплотного кодирования. Анализ статистики детектирования фотонов.
   4. Алгоритм квантовой телепортации. Экспериментальная реализация квантовой телепортации.
3. Квантовое преобразование фурье и его приложения
   1. Квантовый параллелизм. Алгоритмы Дойча и Дойча-Йожа.
   2. Квантовое преобразование Фурье.
   3. Квантовый алгоритм оценки фазы. Квантовые симуляторы. Схема Китаева.
   4. Алгоритм нахождения порядка числа. Алгоритм факторизации (алгоритм Шора).
4. Квантовое программирование
   1. Квантовые алгоритмы поиска. Квантовая адресация.
   2. Современные средства квантового программирования.
   3. Квантовая томография.
5. Физическая реализация квантовых вычислений
   1. Взаимодействие двухуровневых систем с переменным полем. Осцилляции Раби. Вращение кубита.
   2. Квантовая коррекция ошибок. Стабилизирующие коды.
   3. Реализация квантовых алгоритмов с использованием ядерного магнитного резонанса.
   4. Лазерное охлаждение атомов и ионов. Квантовые процессоры на основе ионов и нейтральных атомов.
   5. Сверхпроводящие кубиты. Кубиты на основе квантовых точек и азотныех вакансий в алмазах.

## Образовательные технологии

1. Лекции с использованием презентации PowerPoint
2. Математическое моделирование квантовых алгоритмов с использованием открытых программных средств, включая процессоры IBM.
3. Реферирование публикаций на английском языке
4. Самостоятельная подготовка доклада с презентацией.

## Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Имеются (в электронной форме) мультимедийные презентации по курсу и доступная учебно-научная литература.

В процессе обучения студент подготавливает расчетно-графическую работу по выполнению квантового алгоритма с использованием имеющихся в открытом доступе симуляторов квантовых вычислений и квантовых процессоров. Возможные темы работ:

1. Оценка точности квантовой телепортации с использованием процессора IBM.
2. Демонстрация квантового преобразования Фурье с использованием процессора IBM.
3. Демонстрация квантовой оценки фазы с использованием квантового преобразования Фурье.

## Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины: показатели, критерии оценивания компетенций, типовые контрольные задания

Оценочным средством для текущего контроля успеваемости в части самостоятельной работы является регулярная сдача-приемка домашних заданий и написание контрольной работы. Оценочным средством окончательного контроля является дифференцированный зачет. Освоение компетенций оценивается по способности проводить самостоятельные исследования в области квантовых информационных технологий и владению современным состоянием дел в этой области.

Освоение компетенций оценивается по пятибалльной шкале. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции сформированы в полном объеме в той части, которая соответствует содержанию дисциплины.

## Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Рекомендованная литература

1. **М.Нильсен, И.Чанг** Квантовые вычисления и квантовая информация. — Москва, «Мир», 2006. — 824 с.

**8.1. Программное обеспечение для лиц с ограниченными возможностями здоровья**

Таблица 8.2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование ПО** | **Назначение** | **Место размещения** |
| 1 | Jaws for Windows | Программа экранного доступа к системным и офисным приложениям, включая интернет-обозреватели. Информация с экрана считывается вслух, обеспечивая возможность речевого доступа к самому разнообразному контенту. Jaws также позволяет выводить информацию на обновляемый дисплей Брайля. JAWS включает большой набор клавиатурных команд, позволяющих воспроизвести действия, которые обычно выполняются только при помощи мыши. | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ, компьютерные классы (сетевые лицензии) |
| 2 | Duxbury Braille Translator v11.3 для Брайлевского принтера | Программа перевода текста в текст Брайля, и печати на Брайлевском принтере | Ресурсный центр |
| 3 | "MAGic Pro 13" (увеличение+речь) | Программа для людей со слабым зрением и для незрячих людей. Программа позволяет увеличить изображение на экране до 36 крат, есть функция речевого сопровождения | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |

## Материально-техническое обеспечение дисциплины

Требуется аудитория с использованием мультимедийного проектора

Оборудование, обеспечивающее адаптацию электронных и печатных образовательных ресурсов для обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья

Таблица 9.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№** | **Наименование оборудования** | **Назначение** | **Место размещения** |
|  | Принтер Брайля | Печать рельефно-точечным шрифтом Брайля | Ресурсный центр |
|  | Увеличитель Prodigi Duo Tablet 24 | Устройство для чтения и увеличения плоскопечатного текста | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Специализированное мобильное рабочее место «ЭлНот 311» | Мобильный компьютер с дисплеем брайля | Ресурсный центр |
|  | Портативный тактильный дисплей Брайля “Focus 40 Blue” | Навигация в операционных системах, программах и интернете с помощью отображения рельефно-точечным шрифтом Брайля получаемой информации | Ресурсный центр, читальные залы библиотеки НГУ |
|  | Устройство для печати тактильной графики «PIAF» | Печать тактильных графических изображений | Ресурсный центр |
|  | Портативный видео-увеличитель RUBY XL HD | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Складной настольный электронный видео-увеличитель «TOPAZ PHD 15» | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Электронный ручной видео-увеличитель ONYX Deskset HD 22” | Увеличение текста и подбор контрастных схем изображения | Ресурсный центр |
|  | Смартфон EISmart G3 | Смартфон клавишным управлением и озвученным интерфейсом, обучение спутниковой навигации. | Ресурсный центр |
|  | FM-система «Сонет-РСМ» РМ-3-1 | Звуковая FM-система для людей с нарушением слуха, улучшающая восприятие голосовой информации | Большая физическая аудитория главного корпуса НГУ |

**II. Банк обучающих материалов, рекомендации по организации самостоятельной работы студентов, выполнению курсовых проектов и лабораторных работ**

ЗАДАНИЯ.

1. Показать, каким образом с помощью последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилей могут быть получены все 4 перепутанных состояния Белла.
2. Показать, каким образом с помощью последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилей могут быть измерены все 4 перепутанных состояния Белла.
3. Объяснить алгоритм квантовой телепортации.
4. Продемонстрировать действие многокубитового алгоритма Дойча-Йожа.
5. Обосновать схему трехкубитового преобразования Фурье.
6. Продемонстрировать квантовую оценку фазы на примере однокубитового унитарного оператора.
7. Объяснить алгоритм факторизации Шора.
8. Объяснить алгоритм поиска в неупорядоченной базе данных.
9. Показать, что осцилляции Раби при взаимодействии двухуровневой системы с переменным полем могут быть использованы для реализации вращения состояний кубита.
10. Дать сравнительную характеристику основных физических платформ для квантовых вычислений.

**III Банк контролирующих материалов**

Дифференцированный зачет проходит в виде студенческих презентаций (длительностью 15-20 мин.), на которых студенты представляют результаты выполнения расчетно-графического задания, с ответами на вопросы преподавателя и студентов. Оценка выставляется в зависимости от качества презентации, полноты отражения темы презентации и полноты ответов на вопросы.