

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра квантовой электроники**



ТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н.
В.Е.Блинов
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины
Введение в физическое квантовое программирование**

Направление подготовки **03.04.02 Физика**
Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения **Очная**

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

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И.Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем	4
5. Перечень учебной литературы.....	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.....	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	7
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	7
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	8

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «**Введение в физическое квантовое программирование**» необходима для ознакомления обучающихся основными представлениями современной квантовой информатики.

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

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>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, основные принципы квантовой информатики, основные квантовые алгоритмы, основные физические платформы для реализации квантовых вычислений.</p> <p>Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового программирования с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, моделировать основные квантовые алгоритмы, в том числе используя имеющиеся в открытом доступе симуляторы квантовых компьютеров и квантовые процессоры, анализировать результаты выполнения квантовых алгоритмов.</p> <p>Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового программирования с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами квантовых информационных технологий; математическими подходами для описания квантовых алгоритмов, проводить оценки точности при реализации квантовых вычислений.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «**Введение в физическое квантовое программирование**» реализуется в 1 семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой квантовой электроники. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как общая физика и квантовая механика, а также по математике (основы линейной алгебры и математического анализа). 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. Необходимость владения указанными выше математическими дисциплинами обусловлена тем обстоятельством, что они составляют основу математического аппарата квантовой информатики.

Данный курс является вводным, предназначенным для формирования основных представлений, которые будут глубоко изучены в рамках других спецкурсов. Он предшествует выполнению квалификационной работы студента по данной специализации, так как дает ему необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения научных исследований в рамках подготовки его квалификационной работы.

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем

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

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студентов и ее контроль преподавателями с помощью заданий, дифференцированный зачет.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: выборочный опрос по темам предыдущих лекций, проверка домашних заданий.

Промежуточная аттестация: дифференцированный зачет.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы:

- занятия лекционного типа – 16 часов;
- практические занятия – 16 часов;

- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 38 часов;
- промежуточная аттестация (дифференцированный зачет) – 2 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, дифференцированный зачет) составляет 34 часа.

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

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Введение в квантовую информатику	1	6	2		4	
2	Основы физической реализации квантовых вычислений	2-3	8	2	2	4	
3	Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация	4-6	9	3	2	4	
4	Квантовое преобразование Фурье и его приложения	7-10	12	4	2	6	
5	Квантовое программирование	11-13	13	3	4	6	
6	Физическая реализация квантовых вычислений	14-15	12	2	4	6	
7	Расчетно-графическая работа	16	10		2	8	
8	Дифференцированный зачет	17	2				2
Всего			72	16	16	38	2

Программа и основное содержание лекций (16 часов)

1. Введение в квантовую информатику. (2 часа)

- 1.1. Прогресс в современной квантовой информатике.
- 1.2. История квантовой информатики.
- 1.3. Физические принципы квантовых вычислений. Обратимые и необратимые операции.
- 1.4. Кубиты и их состояния. Квантовые вентили. Примеры однокубитовых и двухкубитовых вентилях. Вентиль Тоффли. Изображение квантовых вентилях на схемах.
- 1.5. Простейшие квантовые алгоритмы. Генерация перепутанных состояний. Практическое применение квантовых алгоритмов.
- 1.6. Современные прототипы квантовых компьютеров. Квантовые процессоры D-Wave и IBM.

2. Основы физической реализации квантовых вычислений. (2 часа)

- 2.1. Критерии ди Винченцо.
- 2.2. Физические платформы для реализации квантовых вычислений.
- 2.3. Квантовая коммуникация. Теорема о невозможности копирования квантового состояния. Квантовая криптография.

3. Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация (3 часа)

- 3.1. Сверхплотное кодирование. Генерация перепутанных пар фотонов.

- 3.2. Квантовое описание светоделительной пластины. Детектирование состояний Белла.
- 3.3. Экспериментальная реализация сверхплотного кодирования.
- 3.4. Алгоритм квантовой телепортации. Экспериментальная реализация квантовой телепортации.
- 4. Квантовое преобразование Фурье и его приложения (4 часа)**
 - 4.1. Квантовый параллелизм. Алгоритмы Дойча и Дойча-Йожа.
 - 4.2. Квантовое преобразование Фурье.
 - 4.3. Квантовый алгоритм оценки фазы. Квантовые симуляторы. Схема Китаева.
 - 4.4. Алгоритм нахождения порядка числа. Алгоритм факторизации (алгоритм Шора).
- 5. Квантовое программирование (3 часа)**
 - 5.1. Квантовые алгоритмы поиска. Квантовая адресация.
 - 5.2. Современные средства квантового программирования.
 - 5.3. Квантовая томография.
- 6. Физическая реализация квантовых вычислений (2 часа)**
 - 6.1. Взаимодействие двухуровневых систем с переменным полем. Осцилляции Раби. Вращение кубита.
 - 6.2. Квантовая коррекция ошибок. Стабилизирующие коды.
 - 6.3. Реализация квантовых алгоритмов с использованием ядерного магнитного резонанса.
 - 6.4. Лазерное охлаждение атомов и ионов. Квантовые процессоры на основе ионов и нейтральных атомов.
 - 6.5. Сверхпроводящие кубиты. Кубиты на основе квантовых точек и азотных вакансий в алмазах.

Программа практических занятий (16 часов)

- 1. Основы физической реализации квантовых вычислений. (2 часа)**
 - 1.1. Анализ примеров простейших квантовых схем.
 - 1.2. Сравнительный анализ физических систем с точки зрения перспективы реализации квантовых вычислений.
 - 1.3. Рассмотрение примера квантового распределения ключа.
- 2. Сверхплотное кодирование и квантовая телепортация (2 часа)**
 - 2.1. Анализ алгоритма сверхплотного кодирования. Анализ схемы детектирования состояний Белла. Детектирование состояний перепутанных пар фотонов с помощью светоделителя и фотодетекторов, чувствительных к поляризации.
 - 2.2. Анализ статистики детектирования фотонов при экспериментальной реализации сверхплотного кодирования.
 - 2.3. Анализ алгоритма и схемы экспериментальной реализации квантовой телепортации.
- 3. Квантовое преобразование Фурье и его приложения (2 часа)**
 - 3.1. Анализ преобразования квантового состояния регистра при реализации алгоритмов Дойча и Дойча-Йожа.
 - 3.2. Анализ преобразования квантового состояния регистра при выполнении квантового преобразования Фурье. Примеры схем квантового преобразования Фурье для одного, двух и трех кубитов.
 - 3.3. Простейший пример выполнения квантовой оценки фазы на примере оператора Z .
 - 3.4. Пример выполнения алгоритма факторизации числа 15.
- 4. Квантовое программирование (4 часа)**
 - 4.1. Пример реализации квантового алгоритма поиска. Различные трехкубитовые схемы оракулов.
 - 4.2. Принципы использования современных средств квантового программирования.
- 5. Физическая реализация квантовых вычислений (4 часа)**
 - 5.1. Анализ вращения кубита вокруг различных осей с использованием осцилляций Раби. Вращение кубита.

- 5.2. Анализ и примеры применения схем квантовой коррекции ошибок.
 5.3. Анализ методов управления квантовыми состояниями ультрахолодных атомов и ионов для реализации квантовых вычислений.
 5.4. Анализ особенностей различных твердотельных реализаций квантовых вычислений.

6. Прием расчетно-графических работ (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (38 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций	8
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	8
Решение домашних заданий	16
Подготовка расчетно-графической работы	6

5. Перечень учебной литературы.

1. М. Нильсен, И. Чанг Квантовые вычисления и квантовая информация. — Москва, «Мир», 2006. — 824 с., ISBN 5-03-003524-9 (2 экз.)
2. К.А.Валиев, А.А. Кокин. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – Ижевск, РХД, 2001. – 352 с., ISBN 5-93972-024-2 (1 экз.)

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Дополнительные учебно-методические материалы не требуются.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MSOffice.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем выборочного опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, проверки выполнения домашних заданий.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области квантовых информационных технологий в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачете, который проводится в конце семестра в устной форме в виде презентаций, на которых студенты представляют результаты выполнения расчетно-графической работы.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>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, основные принципы квантовой информатики, основные квантовые алгоритмы, основные физические платформы для реализации квантовых вычислений.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.</p>
<p>ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p>Уметь самостоятельно ставить и решать конкретные физические задачи научных исследований в области квантового программирования с использованием современной аппаратуры и компьютерных технологий, моделировать основные квантовые алгоритмы, в том числе используя имеющиеся в открытом доступе симуляторы квантовых компьютеров и квантовые процессоры, анализировать результаты выполнения квантовых алгоритмов.</p> <p>Владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области квантового программирования с помощью современных методов и средств теоретических и экспериментальных исследований, базовыми принципами квантовых информационных технологий; математическими подходами для описания квантовых алгоритмов, проводить оценки точности при реализации квантовых вычислений.</p>	<p>Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.</p>

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Введение в физическое квантовое программирование».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и ар-

			Допускается значительное количество негрубых ошибок.	негрубых/ несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	гумантированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Пример домашнего задания

1. Показать, каким образом с помощью последовательности однокубитовых и двухкубитовых вентилях могут быть измерены все 4 перепутанных состояния Белла.

Примеры тем расчетно-графических 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.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации фонда оценочных средств
по дисциплине «Введение в физическое квантовое программирование»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного