

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"  
Институт физики



*подписано электронно-цифровой подписью*

## Программа дисциплины

Квантовые вычисления

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Теоретическая физика и моделирование физических процессов

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2021

## Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО
2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО
3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся
4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий
  - 4.1. Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)
  - 4.2. Содержание дисциплины (модуля)
5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)
6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)
7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)
9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)
10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)
11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)
12. Средства адаптации преподавания дисциплины (модуля) к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья
13. Приложение №1. Фонд оценочных средств
14. Приложение №2. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)
15. Приложение №3. Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

Программу дисциплины разработал(а)(и): заведующий кафедрой, д.н. (доцент) Калачев А.А. (Кафедра оптики и нанофотоники, Отделение физики), AAKalachev@kpfu.ru

### 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль), должен обладать следующими компетенциями:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-1	Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью методов теоретической физики, современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта
ПК-2	Способен свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач, и применять результаты научных исследований в проектной деятельности
ПК-3	Способен принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научно-инновационных исследованиях

Обучающийся, освоивший дисциплину (модуль):

Должен знать:

(ПК-1) современное состояние и тенденции развития квантовых технологий, методы анализа квантовых систем с точки зрения квантовой теории информации, методы описания открытых квантовых систем, (ПК-2) основные разделы квантовой механики и квантовой теории информации, физические основы квантовых технологий, (ПК-3) современные методы и подходы к созданию систем квантовой обработки информации.

Должен уметь:

(ПК-1) применять методы описания носителей квантовой информации, методы описания открытых квантовых систем, методы моделирования эволюции квантовых систем, (ПК-2) применять результаты научных исследований, полученные в области квантовой механики и квантовой информатики, при постановке задач в области квантовых технологий, (ПК-3) использовать освоенные методы и подходы в исследованиях, направленных на создание систем квантовой обработки информации.

Должен владеть:

(ПК-1) методами описания носителей квантовой информации, методами описания открытых квантовых систем, методами моделирования эволюции квантовых систем, (ПК-2) навыками постановки задач в области квантовых технологий, (ПК-3) навыками анализа перспектив развития квантовых технологий

Должен демонстрировать способность и готовность:

- системного научного анализа профессиональных проблем различного уровня сложности

### 2. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Данная дисциплина (модуль) включена в раздел "Б1.В.05 Дисциплины (модули)" основной профессиональной образовательной программы 03.04.02 "Физика (Теоретическая физика и моделирование физических процессов)" и относится к вариативной части.

Осваивается на 1 курсе в 2 семестре.

### 3. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетных(ые) единиц(ы) на 72 часа(ов).

Контактная работа - 24 часа(ов), в том числе лекции - 12 часа(ов), практические занятия - 12 часа(ов), лабораторные работы - 0 часа(ов), контроль самостоятельной работы - 0 часа(ов).

Самостоятельная работа - 48 часа(ов).

Контроль (зачёт / экзамен) - 0 часа(ов).

Форма промежуточного контроля дисциплины: зачет во 2 семестре.

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

##### 4.1 Структура и тематический план контактной и самостоятельной работы по дисциплине (модулю)

N	Разделы дисциплины / модуля	Се- местр	Виды и часы контактной работы, их трудоемкость (в часах)						Само- стоя- тель- ная ра- бота
			Лекции, всего	Лекции в эл. форме	Практи- ческие занятия, всего	Практи- ческие в эл. форме	Лабора- торные работы, всего	Лабора- торные в эл. форме	
1.	Тема 1. Основные понятия квантовой теории информации	2	2	0	2	0	0	0	12
2.	Тема 2. Квантовые вычисления	2	6	0	6	0	0	0	12
3.	Тема 3. Основные направления экспериментальных разработок	2	4	0	4	0	0	0	24
	Итого		12	0	12	0	0	0	48

##### 4.2 Содержание дисциплины (модуля)

###### Тема 1. Основные понятия квантовой теории информации

Кубиты. Геометрическое представление состояния кубита. Чистые и смешанные состояния кубита. Перепутанные состояния двух кубитов. Разложение Шмидта. Критерий сепарабельности. Меры информации и перепутанности. Энтропия и информация. Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения.

###### Тема 2. Квантовые вычисления

Однокубитовые и двухкубитовые вентили. Представление произвольного многокубитового вентиля через одно- и двухкубитовые. Универсальные наборы квантовых вентилях. Сетевая модель квантовых вычислений. Однонаправленные квантовые вычисления. Кластерные состояния. Концепция топологических квантовых вычислений. Классы сложности. Основные квантовые алгоритмы. Задача Дойча и Дойча-Йожи. Поиск в неупорядоченной базе данных и алгоритм Гровера. Алгоритм квантового преобразования Фурье и нахождение периода функции. Проблема факторизации больших чисел и алгоритм Шора. Устойчивые к сбоям вычисления и пороговая теорема. Моделирование квантовых систем.

###### Тема 3. Основные направления экспериментальных разработок

Условия, необходимые для выполнения квантовых вычислений. Обзор основных направлений разработок. Квантовые вычисления на ядерных спинах, квантовые вычисления на нейтральных атомах, сверхпроводниковые компьютеры, фотонные интегральные схемы и линейные оптические квантовые вычисления. Перспективные материалы для реализации квантовых вычислений.

#### 5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия. Самостоятельная работа подразделяется на самостоятельную работу на аудиторных занятиях и на внеаудиторную самостоятельную работу. Самостоятельная работа обучающихся включает как полностью самостоятельное освоение отдельных тем (разделов) дисциплины, так и проработку тем (разделов), осваиваемых во время аудиторной работы. Во время самостоятельной работы обучающиеся читают и конспектируют учебную, научную и справочную литературу, выполняют задания, направленные на закрепление знаний и отработку умений и навыков, готовятся к текущему и промежуточному контролю по дисциплине.

Организация самостоятельной работы обучающихся регламентируется нормативными документами, учебно-методической литературой и электронными образовательными ресурсами, включая:

Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования - программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры (утвержден приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 6 апреля 2021 года №245)

Письмо Министерства образования Российской Федерации №14-55-996ин/15 от 27 ноября 2002 г. "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений"

Устав федерального государственного автономного образовательного учреждения "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Правила внутреннего распорядка федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Локальные нормативные акты Казанского (Приволжского) федерального университета

Лекции David Deutsch - [http://www.quiprocone.org/Protected/DD\\_lectures.htm](http://www.quiprocone.org/Protected/DD_lectures.htm)

Лекции John Preskill - [http://theory.caltech.edu/~preskill/ph219/ph219\\_2021-22.html](http://theory.caltech.edu/~preskill/ph219/ph219_2021-22.html)

Лекции Scott Aaronson - <https://www.scottaaronson.com/blog/?p=3943>

### 6. Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю)

Фонд оценочных средств по дисциплине (модулю) включает оценочные материалы, направленные на проверку освоения компетенций, в том числе знаний, умений и навыков. Фонд оценочных средств включает оценочные средства текущего контроля и оценочные средства промежуточной аттестации.

В фонде оценочных средств содержится следующая информация:

- соответствие компетенций планируемым результатам обучения по дисциплине (модулю);
- критерии оценивания сформированности компетенций;
- механизм формирования оценки по дисциплине (модулю);
- описание порядка применения и процедуры оценивания для каждого оценочного средства;
- критерии оценивания для каждого оценочного средства;
- содержание оценочных средств, включая требования, предъявляемые к действиям обучающихся, демонстрируемым результатам, задания различных типов.

Фонд оценочных средств по дисциплине находится в Приложении 1 к программе дисциплины (модулю).

### 7. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

Освоение дисциплины (модуля) предполагает изучение основной и дополнительной учебной литературы. Литература может быть доступна обучающимся в одном из двух вариантов (либо в обоих из них):

- в электронном виде - через электронные библиотечные системы на основании заключенных КФУ договоров с правообладателями;

- в печатном виде - в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского. Обучающиеся получают учебную литературу на абонементе по читательским билетам в соответствии с правилами пользования Научной библиотекой.

Электронные издания доступны дистанционно из любой точки при введении обучающимся своего логина и пароля от личного кабинета в системе "Электронный университет". При использовании печатных изданий библиотечный фонд должен быть укомплектован ими из расчета не менее 0,5 экземпляра (для обучающихся по ФГОС 3++ - не менее 0,25 экземпляра) каждого из изданий основной литературы и не менее 0,25 экземпляра дополнительной литературы на каждого обучающегося из числа лиц, одновременно осваивающих данную дисциплину.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля), находится в Приложении 2 к рабочей программе дисциплины. Он подлежит обновлению при изменении условий договоров КФУ с правообладателями электронных изданий и при изменении комплектования фондов Научной библиотеки КФУ.

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

Архив препринтов по квантовой физике - <https://arxiv.org/archive/quant-ph>

Новости в области разработок квантовых компьютеров - <https://quantumcomputingreport.com/news/>

Открытый портал по квантовым компьютерам - <http://www.quantiki.org/>

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

Вид работ	Методические рекомендации
лекции	- изучить презентацию (выполнить промежуточные выкладки и упражнения, сформулированные в ходе лекций); - изучить литературу (найти соответствующие разделы в литературных источниках, изучить примеры решения задач); - изучить источники в интернете (найти информацию по теме лекций в интернет-ресурсах).
практические занятия	- изучить материалы лекций, соответствующие решаемым задачам; - выполнить промежуточные выкладки и упражнения, сформулированные в ходе лекций; - изучить литературу (найти соответствующие разделы в литературных источниках); - подготовить ответы на поставленные вопросы, решить предложенные задачи и проанализировать полученные результаты.

Вид работ	Методические рекомендации
самостоятельная работа	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изучить лекции в интернет-ресурсах;</li> <li>- выполнить работу с различными источниками информации: изучить основную и дополнительную литературу, осуществить поиск информации в словарях, справочниках и в Интернет-источниках.</li> <li>- решить задачи, требующие проведения численных расчётов или поиска необходимой информации в различных источниках;</li> <li>- дополнить материалы лекций, используя различные источники информации.</li> </ul>
зачет	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изучить презентацию (выполнить промежуточные выкладки и упражнения, сформулированные в ходе лекций);</li> <li>- изучить литературу (найти соответствующие разделы в литературных источниках, изучить примеры решения задач);</li> <li>- подготовить ответ на поставленный вопрос, решить предложенные задачи и проанализировать полученные результаты.</li> </ul>

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

Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем, представлен в Приложении 3 к рабочей программе дисциплины (модуля).

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине (модулю) включает в себя следующие компоненты:

Помещения для самостоятельной работы обучающихся, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья) и оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду КФУ.

Учебные аудитории для контактной работы с преподавателем, укомплектованные специализированной мебелью (столы и стулья).

Компьютер и принтер для распечатки раздаточных материалов.

Мультимедийная аудитория.

#### **12. Средства адаптации преподавания дисциплины к потребностям обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья**

При необходимости в образовательном процессе применяются следующие методы и технологии, облегчающие восприятие информации обучающимися инвалидами и лицами с ограниченными возможностями здоровья:

- создание текстовой версии любого нетекстового контента для его возможного преобразования в альтернативные формы, удобные для различных пользователей;
- создание контента, который можно представить в различных видах без потери данных или структуры, предусмотреть возможность масштабирования текста и изображений без потери качества, предусмотреть доступность управления контентом с клавиатуры;
- создание возможностей для обучающихся воспринимать одну и ту же информацию из разных источников - например, так, чтобы лица с нарушениями слуха получали информацию визуально, с нарушениями зрения - аудиально;
- применение программных средств, обеспечивающих возможность освоения навыков и умений, формируемых дисциплиной, за счёт альтернативных способов, в том числе виртуальных лабораторий и симуляционных технологий;
- применение дистанционных образовательных технологий для передачи информации, организации различных форм интерактивной контактной работы обучающегося с преподавателем, в том числе вебинаров, которые могут быть использованы для проведения виртуальных лекций с возможностью взаимодействия всех участников дистанционного обучения, проведения семинаров, выступления с докладами и защиты выполненных работ, проведения тренингов, организации коллективной работы;
- применение дистанционных образовательных технологий для организации форм текущего и промежуточного контроля;
- увеличение продолжительности сдачи обучающимся инвалидом или лицом с ограниченными возможностями здоровья форм промежуточной аттестации по отношению к установленной продолжительности их сдачи;
- продолжительности сдачи зачёта или экзамена, проводимого в письменной форме, - не более чем на 90 минут;

- продолжительности подготовки обучающегося к ответу на зачёте или экзамене, проводимом в устной форме, - не более чем на 20 минут;
- продолжительности выступления обучающегося при защите курсовой работы - не более чем на 15 минут.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и учебным планом по направлению 03.04.02 "Физика" и магистерской программе "Теоретическая физика и моделирование физических процессов".

### Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Теоретическая физика и моделирование физических процессов

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2021

#### Основная литература:

- 1) Прилипко, В. К. Физические основы квантовых вычислений. Динамика кубита : монография / В. К. Прилипко, И. И. Коваленко. - Санкт-Петербург : Лань, 2019. - 216 с. - ISBN 978-5-8114-3383-4. - Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/111888> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 2) Белинский, А. В. Квантовые измерения : учебное пособие / А. В. Белинский. - 4-е изд. - Москва : Лаборатория знаний, 2020. - 185 с. - ISBN 978-5-00101-691-5. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/135495> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 3) Колобов, М. И. Квантовое изображение : монография / М. И. Колобов ; под редакцией М. И. Колобова ; перевод с английского Т. Ю. Голубевой, А. С. Чиркина. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 524 с. - Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/48273> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 4) Аплеснин, С. С. Основы спинтроники : учебное пособие / С. С. Аплеснин. - 2-е изд. испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2021. - 288 с. - ISBN 978-5-8114-1060-6. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/167813> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.

#### Дополнительная литература:

- 1) Самарцев, В. В. Коррелированные фотоны и их применение : учебное пособие / В. В. Самарцев. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2014. - 168 с. - ISBN 978-5-9221-1511-7. - Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/59661> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 2) Панов, М. Ф. Физические основы фотоники : учебное пособие / М. Ф. Панов, А. В. Соломонов. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург : Лань, 2021. - 564 с. - ISBN 978-5-8114-2319-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/169030> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 3) Городецкий, М. Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью : монография / М. Л. Городецкий. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. - 416 с. - ISBN 978-5-9221-1283-3. - Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/2733> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.
- 4) Хренников, А. Ю. Введение в квантовую теорию информации : учебник / А. Ю. Хренников. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 284 с. - ISBN 978-5-9221-0951-2. - Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/2176> (дата обращения: 12.05.2021). - Режим доступа: для авториз. пользователей.



**Перечень информационных технологий, используемых для освоения дисциплины (модуля), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем**

Направление подготовки: 03.04.02 - Физика

Профиль подготовки: Теоретическая физика и моделирование физических процессов

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

Год начала обучения по образовательной программе: 2021

Освоение дисциплины (модуля) предполагает использование следующего программного обеспечения и информационно-справочных систем:

Операционная система Microsoft Windows 7 Профессиональная или Windows XP (Volume License)

Пакет офисного программного обеспечения Microsoft Office 365 или Microsoft Office Professional plus 2010

Браузер Mozilla Firefox

Браузер Google Chrome

Adobe Reader XI или Adobe Acrobat Reader DC

Kaspersky Endpoint Security для Windows

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе "ZNANIUM.COM", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС "ZNANIUM.COM" содержит произведения крупнейших российских учёных, руководителей государственных органов, преподавателей ведущих вузов страны, высококвалифицированных специалистов в различных сферах бизнеса. Фонд библиотеки сформирован с учетом всех изменений образовательных стандартов и включает учебники, учебные пособия, учебно-методические комплексы, монографии, авторефераты, диссертации, энциклопедии, словари и справочники, законодательно-нормативные документы, специальные периодические издания и издания, выпускаемые издательствами вузов. В настоящее время ЭБС ZNANIUM.COM соответствует всем требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования (ФГОС ВО) нового поколения.

Учебно-методическая литература для данной дисциплины имеется в наличии в электронно-библиотечной системе Издательства "Лань", доступ к которой предоставлен обучающимся. ЭБС Издательства "Лань" включает в себя электронные версии книг издательства "Лань" и других ведущих издательств учебной литературы, а также электронные версии периодических изданий по естественным, техническим и гуманитарным наукам. ЭБС Издательства "Лань" обеспечивает доступ к научной, учебной литературе и научным периодическим изданиям по максимальному количеству профильных направлений с соблюдением всех авторских и смежных прав.