

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



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности КФУ

Проф. Талорский Д.А.



\_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*подписано электронно-цифровой подписью*

### Программа дисциплины

Физические основы квантовой информатики БЗ.ДВ.10

Направление подготовки: 011800.62 - Радиофизика

Профиль подготовки: Квантовая радиофизика и квантовая электроника

Квалификация выпускника: бакалавр

Форма обучения: очное

Язык обучения: русский

**Автор(ы):**

Калачев А.А.

**Рецензент(ы):**

Самарцев В.В.

**СОГЛАСОВАНО:**

Заведующий(ая) кафедрой: Салахов М. Х.

Протокол заседания кафедры No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Учебно-методическая комиссия Института физики:

Протокол заседания УМК No \_\_\_\_ от " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ г

Регистрационный No 688417

Казань  
2017

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины
2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля
4. Структура и содержание дисциплины/ модуля
5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения
6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов
7. Литература
8. Интернет-ресурсы
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины/модуля согласно утвержденному учебному плану

Программу дисциплины разработал(а)(и) Калачев А.А. , AAKalachev@kpfu.ru

### 1. Цели освоения дисциплины

- ознакомление с основами квантовой теории информации;
- ознакомление с основами квантовых вычислений;
- ознакомление с особенностями различных реализаций квантовых компьютеров.

### 2. Место дисциплины в структуре основной образовательной программы высшего профессионального образования

Данная учебная дисциплина включена в раздел " Б3.ДВ.10 Профессиональный" основной образовательной программы 011800.62 Радиофизика и относится к дисциплинам по выбору. Осваивается на 4 курсе, 7 семестр.

Дисциплина "Физические основы квантовой информатики" относится к курсам по выбору общенаучного цикла М1.ДВ4 и является логическим продолжением и синтезом таких дисциплин как квантовая механика, информатика, атомная физика, теория твердого тела и оптика. Программа дисциплины предполагает, что слушатели знакомы, прежде всего, с основами информатики и нерелятивистской квантовой механики. Кроме того, предполагаются знания основ атомной физики, статистической физики, термодинамики, физики твердого тела и оптики.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины /модуля

В результате освоения дисциплины формируются следующие компетенции:

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ОК-11 (общекультурные компетенции)	способностью собирать, обобщать и интерпретировать с использованием современных информационных технологий информацию, необходимую для формирования суждений по соответствующим специальным, научным, социальным и этическим проблемам
ОК-12 (общекультурные компетенции)	способностью к правильному использованию общенаучной и специальной терминологии
ОК-4 (общекультурные компетенции)	способностью критически переосмысливать накопленный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности
ОК-6 (общекультурные компетенции)	способностью работать самостоятельно и в коллективе, способность к культуре социальных отношений
ПК-1 (профессиональные компетенции)	способностью использовать базовые теоретические знания (в том числе по дисциплинам профилизации) для решения профессиональных задач
ПК-10 (профессиональные компетенции)	способностью к овладению методикой проведения учебных занятий в учреждениях системы среднего общего и среднего профессионального образования
ПК-2 (профессиональные компетенции)	способностью применять на практике базовые профессиональные навыки
ПК-7 (профессиональные компетенции)	способностью к овладению методами защиты интеллектуальной собственности

Шифр компетенции	Расшифровка приобретаемой компетенции
ПК-8 (профессиональные компетенции)	способностью внедрять готовые научные разработки
ПК-9 (профессиональные компетенции)	способностью к проведению занятий в учебных лабораториях вузов

В результате освоения дисциплины студент:

1. должен знать:

основные положения квантовой теории информации, различия между квантовыми и классическим вычислениями, основные модели квантовых компьютеров и подходы к их реализации.

2. должен уметь:

ориентироваться в современных достижениях квантовой информатики

3. должен владеть:

навыками решения простейших задач квантовой теории информации

4. должен демонстрировать способность и готовность:

использовать в познавательной и профессиональной деятельности базовые знания в области математики и естественных наук и навыки работы с информацией из различных источников, а также способность понимать и излагать получаемую информацию и представлять результаты физических исследований.

#### 4. Структура и содержание дисциплины/ модуля

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

Форма промежуточного контроля дисциплины зачет в 7 семестре.

Суммарно по дисциплине можно получить 100 баллов, из них текущая работа оценивается в 50 баллов, итоговая форма контроля - в 50 баллов. Минимальное количество для допуска к зачету 28 баллов.

86 баллов и более - "отлично" (отл.);

71-85 баллов - "хорошо" (хор.);

55-70 баллов - "удовлетворительно" (удов.);

54 балла и менее - "неудовлетворительно" (неуд.).

#### 4.1 Структура и содержание аудиторной работы по дисциплине/ модулю

##### Тематический план дисциплины/модуля

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
1.	Тема 1. Основные понятия квантовой теории информации.	7	1-4	8	0	0	

N	Раздел Дисциплины/ Модуля	Семестр	Неделя семестра	Виды и часы аудиторной работы, их трудоемкость (в часах)			Текущие формы контроля
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	
2.	Тема 2. Квантовые логические элементы.	7	5-7	6	0	0	
3.	Тема 3. Квантовые операции и измерения.	7	8-9	4	0	0	
4.	Тема 4. Квантовые вычисления.	7	10-12	6	0	0	
5.	Тема 5. Квантовое исправление ошибок. Декогерентность.	7	13-14	4	0	0	
6.	Тема 6. Реализации квантовых компьютеров.	7	15-18	8	0	0	
	Тема . Итоговая форма контроля	7		0	0	0	Зачет
	Итого			36	0	0	

## 4.2 Содержание дисциплины

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

#### *лекционное занятие (8 часа(ов)):*

Кубит. Геометрическое представление состояния кубита. Чистые и смешанные состояния кубита. Перепутанное состояние двух кубитов. Разложение Шмидта. Критерий сепарабельности. Меры информации и перепутанности. Энтропия и информация.

### Тема 2. Квантовые логические элементы.

#### *лекционное занятие (6 часа(ов)):*

Однокубитовые и двухкубитовые вентили. Представление произвольного многокубитового вентиля через одно- и двухкубитовые. Универсальные наборы квантовых вентиляей.

### Тема 3. Квантовые операции и измерения.

#### *лекционное занятие (4 часа(ов)):*

Эволюция открытой квантовой системы. Динамическое отображение. Представление Крауса. Квантовые каналы. Квантовые измерения. Проекционные и POVM-измерения

### Тема 4. Квантовые вычисления.

#### *лекционное занятие (6 часа(ов)):*

Сетевая модель квантовых вычислений. Вычисление функций. Квантовый параллелизм. Алгоритм Дойча. Алгоритм Гровера. Квантовое преобразование Фурье. Квантовый алгоритм нахождения периода функции. Классы сложности. Квантовая телепортация, однонаправленные квантовые вычисления и кластерные состояния.

### Тема 5. Квантовое исправление ошибок. Декогерентность.

#### *лекционное занятие (4 часа(ов)):*

Декогерентность. Перепутывание между кубитом и окружением. Пространства, свободные от декогеренции. Теорема о невозможности клонирования. Квантовые коды исправления ошибок. Коды с тремя и семью кубитами. Устойчивое к сбоям вычисление. Пороговая теорема.

### Тема 6. Реализации квантовых компьютеров.

**лекционное занятие (8 часа(ов)):**

Условия, необходимые для выполнения квантовых вычислений. ЯМР-реализации квантовых вычислений. Квантовые вычисления на ионах в ловушках. Линейные оптические квантовые компьютеры.

**4.3 Структура и содержание самостоятельной работы дисциплины (модуля)**

N	Раздел Дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды самостоятельной работы студентов	Трудоемкость (в часах)	Формы контроля самостоятельной работы
1.	Тема 1. Основные понятия квантовой теории информации.	7	1-4	Работа с литературой и решение задач	8	Отчет или сообщение по теме
2.	Тема 2. Квантовые логические элементы.	7	5-7	Работа с литературой и решение задач	6	Отчет или сообщение по теме
3.	Тема 3. Квантовые операции и измерения.	7	8-9	Работа с литературой и решение задач	4	Отчет или сообщение по теме
4.	Тема 4. Квантовые вычисления.	7	10-12	Работа с литературой и решение задач	6	Отчет или сообщение по теме
5.	Тема 5. Квантовое исправление ошибок. Декогерентность.	7	13-14	Работа с литературой и решение задач	4	Отчет или сообщение по теме
6.	Тема 6. Реализации квантовых компьютеров.	7	15-18	Работа с литературой и решение задач	8	Отчет или сообщение по теме
	Итого				36	

**5. Образовательные технологии, включая интерактивные формы обучения**

С целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся, в рамках учебного курса предусмотрена самостоятельная работа, включающая в себя не только решение задач, сформулированных на лекциях, но и изучение некоторых вопросов по литературе, в том числе на английском языке, с последующим выступлением перед аудиторией.

**6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов****Тема 1. Основные понятия квантовой теории информации.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи из главы 1 методического пособия. Примерные темы самостоятельных работ: Вычисление базиса Шмидта. Применение критериев перепутанности для анализа двухкубитовых состояний. Вычисление мер перепутанности. Кутриты, кукварты и т.д. Разложение Шмидта для состояний в непрерывном базисе. Многочастичное перепутывание. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

**Тема 2. Квантовые логические элементы.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи из главы 2 методического пособия. Примерные темы самостоятельных работ: Эффективные разложения унитарных преобразований. Наборы универсальных квантовых вентилях. Моделирование условной динамики и вычисление качества квантовых вентилях. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

### **Тема 3. Квантовые операции и измерения.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи из главы 3 методического пособия. Примерные темы самостоятельных работ: Моделирование эволюции открытой системы методом Монте-Карло. Нахождение POVM-операторов для определённых квантовых измерений. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

### **Тема 4. Квантовые вычисления.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи из главы 4 методического пособия. Примерные темы самостоятельных работ: Анализ квантовых схем. Однонаправленные квантовые вычисления и вычисления, основанные на измерениях. Кластерные состояния. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

### **Тема 5. Квантовое исправление ошибок. Декогерентность.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи из главы 4 методического пособия. Примерные темы самостоятельных работ: Помехоустойчивые квантовые вентилях. Помехоустойчивые коды, исправляющие ошибки. Помехоустойчивые измерения. Модели ошибок. Методы построения кодов, исправляющих ошибки. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

### **Тема 6. Реализации квантовых компьютеров.**

Отчет или сообщение по теме , примерные вопросы:

Задачи, связанные с особенностями реализации квантовых вычислений в различных физических системах. Примерные темы самостоятельных работ: Материалы, перспективные для использования в качестве квантовых регистров. Анализ основополагающих экспериментов. Последние экспериментальные достижения. (ОК-11, ОК-12, ОК-4, ОК-6, ПК-1, ПК-10, ПК-2, ПК-7, ПК-8, ПК-9)

### **Тема . Итоговая форма контроля**

Примерные вопросы к зачету:

Контрольные вопросы:

1. Кубит. Геометрическое представление состояния кубита. Чистые и смешанные состояния кубита. Степень чистоты и степень совпадения квантового состояния.
2. Перепутанные, факторизованные и сепарабельные состояния двух кубитов. Разложение Шмидта. Необходимые и достаточные условия сепарабельности. Меры перепутанности
3. Двухкубитовые вентилях. Условные преобразования. Представление двухкубитового оператора  $SU$  через последовательность четырёх однокубитовых вентилях и двух вентилях  $CNOT$ .
4. Теорема об универсальном наборе квантовых вентилях
5. Основные модели квантовых каналов и представление Крауса.
6. Проекционные и POVM-измерения
7. Сетевая модель квантовых вычислений и основные элементы квантового компьютера.
5. Алгоритм Дойча.
6. Алгоритм Гровера.
7. Квантовое преобразование Фурье.
8. Квантовый алгоритм нахождения периода функции.
9. Квантовая телепортация.
10. Однонаправленные квантовые вычисления и кластерные состояния.
11. Декогерентность. Квантовые коды исправления ошибок.

12. Квантовый код, исправляющий амплитудные или фазовые ошибки, с тремя кубитами
13. Девятикубитовый код Шора.
14. Устойчивое к сбоям вычисление. Пороговая теорема.
15. Условия, необходимые для выполнения квантовых вычислений
16. Жидкостный ЯМР-квантовый компьютер.
17. Твердотельный ЯМР-квантовый компьютер.
18. Квантовые вычисления на ионах в ловушках.
19. Линейный оптический квантовый компьютер.

### 7.1. Основная литература:

Квантовые вычисления и квантовая информация, Нильсен, Майкл А.;Чанг, Исаак Л.;Вялый, М. Н.;Островский, П. М.;Валиев, К. А., 2006г.

Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника (физика, технология, диагностика и моделирование), Белоножко, Д. Ф., 2008г.

Квантовые вычисления и связь. Инженерный подход, Имре, Шандор;Балаж, Ференц;Калачев, А. А.;Самарцев, В. В.;Митрофанова, Т. Г.;Петрушкин, С. В., 2008г.

Введение в квантовые вычисления, Кайе, Филлип;Лафлам, Раймон;Моска, Мишель;Никитина, Т. С.;Анохин, А. В., 2009г.

1) Шука А.А. Наноэлектроника. - М.:Бином. Лаборатория знаний, 2012. - 342 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=4357](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=4357)

2) Шишкин, Г.Г., Агеев, И.М., Наноэлектроника. Элементы, приборы, устройства: учебное пособие. - М.:Бином. Лаборатория знаний, 2012. - 408 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=3147](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=3147)

3) Игнатов А.Н., Микросхемотехника и наноэлектроника. - "Лань", 2011. - 528 с.  
<http://e.lanbook.com/view/book/2035/>

### 7.2. Дополнительная литература:

Квантовый вызов, Гринштейн, Джордж;Зайонц, Артур Г.;Аристов, В. В., 2012г.

Теория открытых квантовых систем, Бройер, Хайнц-Питер;Петруччионе, Франческо, 2010г.

Квантовые системы, каналы, информация, Холево, Александр Семенович, 2010г.

### 7.3. Интернет-ресурсы:

Preskill J. Quantum computation and information (Caltech, 1998) -  
<http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229>

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

Лекции Michael Nielsen - <https://www.youtube.com/playlist?list=PL1826E60FD05B44E4>

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

Статья в Википедии по квантовым компьютерам - [http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_computer](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computer)

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины(модуля)

Освоение дисциплины "Физические основы квантовой информатики" предполагает использование следующего материально-технического обеспечения:

Лекционная аудитория со стандартным проекционным оборудованием

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО и учебным планом по направлению 011800.62 "Радиопизика" и профилю подготовки Квантовая радиопизика и квантовая электроника .



Автор(ы):

Калачев А.А. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рецензент(ы):

Самарцев В.В. \_\_\_\_\_

"\_\_" \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.