

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

УТВЕРЖДЕНО  
решением  
Ученого совета ННГУ  
протокол от  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г. № \_\_\_\_\_

## **Рабочая программа дисциплины**

**Физика квантовых вычислений**

(наименование дисциплины (модуля))

**Уровень высшего образования**

**магистратура**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки / специальность**

**03.04.02 Физика**

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

**Направленность образовательной программы**

**магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"**

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

**Квалификация (степень)**

**магистр**

(бакалавр / магистр / специалист)

**Форма обучения**

**очная**

(очная / очно-заочная / заочная)

**Год начала обучения**

**2023**

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

## **1. Место и цели дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Физика квантовых вычислений» относится к дисциплинам вариативной части основной образовательной программы по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

### **Цель освоения дисциплины «Физика квантовых вычислений»**

Курс нацелен на освоение слушателями основных идей квантовой информатики и квантовых вычислений, а также физических законов и математических принципов, лежащих в их основе. Особое внимание будет уделено таким явлениям как квантовая запутанность, квантовый параллелизм и квантовая интерференция. Обучающиеся освоят идеи, лежащие в основе важнейших квантовых алгоритмов, протоколов передачи и обработки квантовой информации, научатся решать задачи по данным темам.

## **2. Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины «Физика квантовых вычислений» составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 74 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (38 часов самостоятельная работа в течение семестра, 36 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

### Содержание дисциплины «Физика квантовых вычислений»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Теория квантовых вычислений. Критерии соответствия квантовой системы. Методы коррекции ошибок.	24	4	4	—	8	16
2. Кодирование квантовой информации оптическими системами.	24	4	4	—	8	16
3. Кодирование квантовой информации электронными и ядерными системами. Кубиты на основе ультрахолодных ионов и атомов. Кубиты на основе примесей в полупроводниках. Модель Лосса-ДиВинченцо. Кубиты на основе центров окраски в полупроводниках.	24	4	4	—	8	16
4. Сверхпроводниковые кубиты.	25	4	4	—	8	17
В т.ч. текущий контроль	2	2				—
Промежуточная аттестация – экзамен						

### **3. Образовательные технологии**

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) методика «вопросы и ответы»;
- 4) выполнение практического задания у доски;
- 5) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 6) работа в парах над практическим заданием;
- 7) работа в малых группах над практическим заданием;
- 8) методика «мозговой штурм».

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

#### 5. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ПК-2 Способен самостоятельно анализировать, не предвзято оценивать и ориентироваться в передовых теоретических концепциях и достижениях современной физики	(ПК-2) <b>Знать</b> основные физические принципы описания квантовых вычислений. (ПК-2) <b>Уметь</b> решать типовые задачи физики квантовых вычислений. (ПК-2) <b>Владеть</b> навыками решения основных типов задач физики квантовых вычислений.
ПК-3 Способен свободно владеть разделами физики и применять результаты научных исследований в профильных областях для решения научно-практических и научно-технологических задач	(ПК-3) <b>Знать</b> принципы применения аппарата квантовых вычислений к практическим задачам в рамках профессиональной деятельности. (ПК-3) <b>Уметь</b> формулировать практические задачи в рамках профессиональной деятельности, требующие применения аппарата квантовых вычислений. (ПК-3) <b>Владеть</b> навыками постановки и решения основных типов задач квантовых вычислений, требующимися для решения практических задач в рамках профессиональной деятельности.

#### 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

##### 6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Физика квантовых вычислений» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

## 6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

**«Плохо»** – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Неудовлетворительно»** – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Удовлетворительно»** – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

**«Хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Очень хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Отлично»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

**«Превосходно»** – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

### 6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Физика квантовых вычислений»:

1. Кодирование квантовой информации. Кубит, сфера Блоха.
2. Цифровые и аналоговые квантовые вычислители.
3. Алгоритмы Шора и Гровера.
4. Критерии ДиВинченцо.
5. Методы охлаждения ионов в ловушках. Кубиты на основе ионов в ловушках.
6. Масштабирование ионных и атомных систем. Голографические ловушки и оптические решетки.
7. Кубиты на электронных и ядерных спинах примесей в кремнии.
8. Модель Лосса-ДиВинченцо. Способы искусственного формирования квантовых точек в полупроводниковых структурах.
9. Кубиты на основе центров окраски в широкозонных полупроводниках.
10. Типы кубитов в сверхпроводящих квантовых цепях. Механизмы связи между кубитами.

6.3.2. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся:

1. Определить общий вид двухрядной унитарной матрицы – элемента унитарной группы  $U(2)$ .
2. Получить явное выражение для оператора обращения времени в случае частицы со спином (орбитальным моментом)  $3/2$ .

3. Оценить сдвиг частоты спинового резонанса для электрона, локализованного на водородоподобном доноре в 29 кремнии, за счет взаимодействия со спинами ядер. Рассмотреть случай как поляризованной, так и неполяризованной системы ядерных спинов.
4. Оценить скорость декогеренции кубитов на основе локализованных на примесях электронных спинов в результате обменного взаимодействия между различными кубитами.
5. Оценить энергию туннельной связи между парой спиновых кубитов, чьи орбитальные волновые функции известны.

6.3.3. Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Определение результата действия заданной квантовой операции на заданное состояние кубита.
2. Расчет вероятности перехода спинового кубита между собственными состояниями под действием заданного импульса.
3. Расчет спектра центра окраски по заданному спиновому гамильтониану.
4. Расчет времени релаксации спинового кубита при взаимодействии с бозонным термостатом.
5. Расчет времени декогеренции спинового кубита при взаимодействии с бозонным термостатом.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Блохинцев Д.И., «Основы квантовой механики». — М.: Наука, 1983  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70099&DB=1>
2. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. и Коган В.И. «Задачи по квантовой механике». — Москва: Наука, 1992.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70108&DB=1>
3. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. Москва: Физматлит, 2000. 896 с.
4. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая Оптика. Москва: Физматлит, 2003. 512 с.

б) дополнительная литература:

1. Демиховский В.Я., Вугальтер Г.А., «Физика квантовых низкоразмерных структур». — М: Логос, 2000  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=38775&DB=1>
2. Солимар Л. «Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение». – Москва: Мир, 1974.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=76585&DB=1>
3. Фрёман Н. и Фрёман П.О. «ВКБ-приближение». – Москва: Мир, 1967.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=71560&DB=1>
4. Лесовик Г.Б. и Садовский И.А. «Описание квантового электронного транспорта с помощью матриц рассеяния». – Успехи физических наук, т. 181, стр. 1041—1096 (2011). -  
[https://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/свободный доступ](https://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/свободный%20доступ).

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

- 1) пакеты символьной математики Wolfram Mathematica и MathWorks MATLAB;
- 2) Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ  
<http://www.lib.unn.ru/>.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Для практических занятий, связанных с работами на персональных компьютерах, используются терминал-классы, оборудованные в соответствии с требованиями охраны труда.

ННГУ обеспечен всем необходимым программным обеспечением для проведения практических занятий, связанных с работами на персональных компьютерах.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.



Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

к. ф.-м. н. \_\_\_\_\_ / Бастракова М.В. /

к. ф.-м. н. \_\_\_\_\_ / Конаков А.А. /

Рецензент(ы):

Зав. кафедрой теоретической физики  
физического факультета,  
д. ф.-м. н., доцент \_\_\_\_\_ / Бурдов В.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ от «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года, протокол  
№ б/н.

Председатель  
Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ / Перов А.А. /