

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Введение в квантовые вычисления

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Введение в квантовые вычисления» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовая криптография». Дисциплина обеспечивает базовую подготовку студентов в области физики квантовых вычислений информации. В курсе рассматриваются основные положения классической теории вычислительной сложности, гейтовая модель квантовых вычислений, универсальные наборы гейтов, алгоритмы квантовых вычислений основанные на квантовом преобразовании Фурье, в частности, алгоритм Шора, квантовые алгоритмы поиска, алгоритмы квантовой симуляции физических систем, введение в квантовую коррекцию ошибок и устойчивые к ошибкам вычисления, гибридные квантово-классические алгоритмы, в частности вариационные квантовые алгоритмы.

5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часа занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках курса «Линейная алгебра», «Теория вероятностей и математическая статистика», курса теоретической физики «Квантовая теория».

7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины, форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе						
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
<p>1. Квантовые вычисления</p> <p>§1. Необходимые сведения из классической теории алгоритмов.</p> <p>Понятие алгоритма, машина Тьюринга, универсальная машина Тьюринга. Вычислимые и невычислимые функции, проблема остановки. Задачи разрешимости, представление о классах вычислительной сложности. Классы P и NP. Вероятностная машина Тьюринга, класс BPP. Задачи пересчёта количества решений, класс сложности #P. Гейтовая модель классических вычислений.</p> <p>§2. Гейтовая модель квантовых вычислений.</p>	36	26	10			4 часа. Решение задач		20

<p>Элементарные квантовые логические вентили, однокубитные и двухкубитные вентили. Условные двухкубитные вентили, представление условных многокубитных вентилей через двухкубитные. Универсальность однокубитных вентилей и вентиля CNOT. Дискретизация однокубитных вентилей, универсальные дискретные наборы вентилей. Сложность аппроксимации произвольного унитарного преобразования.</p> <p>§3. Алгоритмы, основанные на квантовом преобразовании Фурье.</p> <p>Квантовое преобразование Фурье. Алгоритм оценки фазы, оценка необходимых ресурсов, упрощённый алгоритм Китаева. Алгоритм поиска периода функции, алгоритм Шора. Квантовые алгоритмы для задач линейной алгебры.</p> <p>§4. Квантовые алгоритмы поиска.</p> <p>Алгоритм Гровера, геометрическая иллюстрация. Оценка ресурсов. Подсчёт числа решений поисковой задачи. Ускорение решения NP-полных задач. Квантовый поиск в неструктурированной базе данных. Оптимальность алгоритма Гровера.</p> <p>§5. Введение в квантовую коррекцию ошибок.</p> <p>Представление о классических кодах коррекции ошибок на примере кода с повторением. Ошибки в квантовых вычислениях, отличие от классического случая. Трёхкубитный код, исправляющий X-ошибку. Трёхкубитный код, исправляющий Z-ошибку. Девятикубитный код Шора. Общая теория исправления ошибок, дискретизация ошибок, модель независимых ошибок. Классические линейные коды, коды Хэмминга.</p>					<p>на основные свойства квантовых логических вентилей.</p> <p>6 часов. Практическое занятие по реализации алгоритма оценки фазы на симуляторе/облачном квантовом компьютере.</p> <p>4 часа. Решение задач на описание квантовых кодов в формализме стабилизаторов.</p> <p>6 часов. Практическое занятие по реализации</p>		
---	--	--	--	--	---	--	--

Квантовые коды Кальдербанка-Шора-Стина. Формализм стабилизаторов, построение кодов КШС в формализме стабилизаторов. Унитарные преобразования и измерения в формализме стабилизаторов. Понятие о вычислениях, устойчивых к ошибкам. Построение универсального набора устойчивых к ошибкам вентилях. Измерения, устойчивые к ошибкам. Пороговая теорема.						кодирования-декодирования на симуляторе/ облачном квантовом компьютере.		
Промежуточная аттестация – экзамен			4		4	16 часов Подготовка к итоговой аттестации (экзамену).		16
Итого		18	16	2	36			36

* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме по рейтинговой системе с учётом результатов проверки домашних заданий, работы в аудитории и результатов выполнения практических компьютерных заданий.

8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

8.1 Основная и дополнительная литература доступная студентам через Интернет или по запросу лектору.

8.2 Электронные презентации основных тем дисциплины доступные через сайт Центра квантовых технологий ФФ МГУ:
<http://quantum.msu.ru>

9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Типовые вопросы к экзамену:

1. Гейтовая модель квантовых вычислений – одно- и двухкубитные вентили, условные вентили, описание измерений.
2. Универсальные наборы квантовых вентилях.
3. Квантовое преобразование Фурье и алгоритм оценки фазы.
4. Алгоритм Гровера для поиска в неструктурированной базе данных.
5. Квантовые коды коррекции ошибок. Девятикубитный код Шора.
6. Квантовые вычисления, устойчивые к ошибкам: основные понятия, пороговая теорема.

Типовые задачи к экзамену:

1. Является ли набор вентилей, содержащий H , T (Адамара и $\pi/8$) и двухкубитный вентиль CZ универсальным для квантовых вычислений? Ответ обосновать.
2. Постройте квантовую схему для симуляции трехкубитного Гамильтониана $H = X_1 \otimes Y_2 \otimes Z_3$, т.е. схему, осуществляющую преобразование $e^{i\Delta t H}$ для произвольного Δt .
3. Постройте квантовую схему, которая осуществляет обратное квантовое преобразование Фурье.
4. Рассмотрим 9-кубитный код Шора. Покажите, что фазовая ошибка в любом из первых трех кубитов может быть исправлена применением оператора $Z_1 \otimes Z_2 \otimes Z_3$.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

ВЛАДЕТЬ: профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).

ВЛАДЕТЬ: навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).

ВЛАДЕТЬ: навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

УМЕТЬ: осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (31, СПК-1).

ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3).

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска,	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков	В целом успешное, но не систематическое	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое применение навыков

критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).		поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений

<p><i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>
<p><i>УМЕТЬ:</i> осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>

<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (УЗ, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>
<p><i>ЗНАТЬ:</i> методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (31, СПК-1)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>

		вычислений	квантовых вычислений		
<p><i>ЗНАТЬ:</i> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования
--	-------------------	--	--	--	---

10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. M.A. Nielsen, I.L. Chuang Quantum Computation and Quantum Information, 10th anniversary edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010.

Дополнительная литература

1. S. Arora, B. Barak, Computational Complexity: A Modern Approach, Princeton University (<http://www.cs.princeton.edu/theory/complexity/>)
2. D.A.Lidar, T.A.Brunn, Quantum Error Correction, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

- <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/>

12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Также настоятельно рекомендуется выполнение практических работ на симуляторе/ облачном квантовом компьютере для

получения навыков программирования реального квантового процессора. Для части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте Центра.

13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости):

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Введение в квантовые вычисления» используются средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайтов с материалами лекций и семинарских занятий. Курс имеет электронные версии (презентации) лекций. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской.