

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Теория квантовых алгоритмов, квантовая вычислительная сложность

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Теория квантовых алгоритмов, квантовая вычислительная сложность» является обязательной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает подготовку студентов в области современных квантовых алгоритмов. Помимо подробного рассмотрения стандартных алгоритмов Шора и Гровера в курс включены различные квантовые алгоритмы (квантовые блуждания, решение систем линейных алгебраических уравнений, задачи на графах). Дается введение в альтернативные модели квантовых вычислений (adiaбатическая модель и модель DQC-1), а также в теорию сложности квантовых алгоритмов.

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 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 14 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов, 2 часа приема домашних заданий), 36 часов 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 уверенные знания линейной алгебры, а также обязательных курсов «Введение в квантовую информацию и квантовые вычисления» и «Классическая теория алгоритмов и вычислительной сложности».

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
1. Введение Математические основы квантовых вычислений (тензоры, унитарные и эрмитовы преобразования, матричные функции). Квантовые схемы. Формализм гейтовой модели квантовых вычислений.		1	2		3	3 часа Решение задач по основам квантовых вычислений		3

<p>2. Алгоритм Гровера Переборные задачи. Классические и квантовые вычисления с оракулом. Алгоритм Гровера.</p>	2	2		4	<p>1 час Вывод сложности алгоритма Гровера с m ответами</p> <p>2 часа Решение задач на составление квантовых схем</p>	3
<p>3. Алгоритм Шора Задача факторизации. Алгоритм поиска фазы. Квантовая реализация умножения целых чисел. Алгоритм факторизации.</p>	3	3		6	0	0
<p>4. Симуляция квантовых алгоритмов Формулировка задачи симуляции. Различные представления квантовых преобразований. Оценка сложности классического решения. Методы учета шумов. Методы оптимизации классических алгоритмов симуляции.</p>	1	1	2 часа Коллоквиум по гейтовой модели квантовых вычислений	2	<p>5 часов Реализация симуляции алгоритма Гровера</p> <p>5 часов Реализация симуляции алгоритма по выбору (решение СЛАУ, алгоритмы на графах, квантовые блуждания)</p> <p>2 часа подготовка к коллоквиуму</p>	12
<p>5. Введение в теорию сложности квантовых</p>	2	2			2 часа	2

алгоритмов Класс сложности BQP. Класс сложности BPP. Взаимоотношения с другими классами сложности						Решение задач по теории сложности алгоритмов		
6. Квантовые блуждания Классические блуждания. Переход к квантовому аналогу и проблема обратимости. Метод coin-flip. Решение переборных задач в модели квантовых блужданий.		2	0					0
7. Квантовые алгоритмы линейной алгебры Квантовый алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Увеличение скорости алгоритма. Увеличение точности алгоритма. Квантовый алгоритм вычисления ранга матрицы.		3	0		6	0		0
8. Задачи на графах. Модели задач на графах: матрица связей и список вершин. Подходы к решению задач на графах на квантовых компьютерах. Примеры алгоритмов.		2	0					0
9. Альтернативные модели квантовых вычислений. 1) Адиабатические вычисления: формализм, адиабатическая теорема, решаемые задачи, сложности платформы. 2) Модель DQC-1: модель вычислений, задача вычисления среднего значения оператора, роль		2	0	2 часа Прием домашних заданий по теме 4				

квантовой запутанности и дискорда.								
Промежуточная аттестация - экзамен			4		4	16 часов Подготовка к промежуточной аттестации (экзамену).		16
Итого	72	18	14	4	36			36

* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

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.

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

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Уровни архитектуры гейтовой модели квантовых вычислений
2. Сложность алгоритма Гровера.
3. Методы построения квантового оракула.
4. Необходимость классической части алгоритма Шора.
5. Вложенность классических и квантовых классов сложности.
6. Ограничения квантового алгоритма решения СЛАУ.
7. Методы задания графов в квантовых алгоритмах.
8. Способ достижения обратимости в квантовых блужданиях.
9. Главные параметры адиабатического квантового вычисления.

Типовые вопросы к экзамену:

1. Тензорное произведение векторов, матриц и пространств. Унитарные и эрмитовы матрицы, их связь. Функции от матриц.
2. Квантовые многокубитные состояния, вентили и схемы. Формализм квантовых измерений. Гейтовая модель квантовых вычислений.
3. Вычисления с оракулом. Переборные задачи общего вида и их классическая сложность. Построение квантовых оракулов.
4. Алгоритм Гровера с одним ответом.

5. Алгоритм Гровера с несколькими ответами.
6. Задача факторизации целых чисел. Связь с вычислением периода функций. Цепные дроби. Квантовая реализация классических функций.
7. Алгоритм Шора.
8. Методы симуляции квантовых алгоритмов.
9. Классы сложности BQP и BPP. Их взаимоотношения с другими классами сложности.
10. Классические случайные блуждания. Проблема необратимости и ее решение, переход к квантовому случаю. Решение задачи поиска.
11. Квантовый алгоритм решения СЛАУ. Ограничения использования.
12. Методы оптимизации работы квантового алгоритма решения СЛАУ.
13. Квантовые алгоритмы решения задач на графах в модели матрицы связанных вершин.
14. Квантовые алгоритмы решения задач на графах в модели списка связанных вершин.
15. Адиабатические квантовые вычисления: адиабатическая теорема, модель вычислений, решение задачи SAT и переборных задач, ограничения.
16. Модель вычислений DQC-1: модель, решение задачи вычисления среднего значения, роль квантовой запутанности и квантового дискорда.

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

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	навыков 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 (У3, 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 вычислений</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 квантовых вычислений</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>

<p>ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>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</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>
<p>ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>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</p>	<p>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</p>	<p>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</p>

10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. – М : Мир, 2006. – С. 824.
2. Прескилл Д. и др. Квантовая информация и квантовые вычисления //М.: РХД. – 2008. – Т. 11.
3. Кронберг Д. А., Ожигов Ю. И., Чернявский А. Ю. Алгебраический аппарат квантовой информатики. – 2011
4. Кронберг Д. А., Ожигов Ю. И., Чернявский А. Ю. Квантовая информатика и квантовый компьютер //М.: Макс пресс. – 2011

Дополнительная литература

4. Богданов Ю. И. и др. Вычислительные задачи моделирования элементной базы квантовых компьютеров //Информационные технологии и вычислительные системы. – 2013. – С. 17.
5. Bernstein E., Vazirani U. Quantum complexity theory //SIAM Journal on computing. – 1997. – Т. 26. – №. 5. – С. 1411-1473.
6. Ambainis A. Quantum walks and their algorithmic applications //International Journal of Quantum Information. – 2003. – Т. 1. – №. 04. – С. 507-518.
7. Harrow A. W., Hassidim A., Lloyd S. Quantum algorithm for linear systems of equations //Physical review letters. – 2009. – Т. 103. – №. 15. – С. 150502.
8. Ambainis A. Variable time amplitude amplification and a faster quantum algorithm for solving systems of linear equations //arXiv preprint arXiv:1010.4458. – 2010.
9. Childs A. M., Kothari R., Somma R. D. Quantum linear systems algorithm with exponentially improved dependence on precision //arXiv preprint arXiv:1511.02306. – 2015. – Т. 83.
10. Dürr C. et al. Quantum query complexity of some graph problems //SIAM Journal on Computing. – 2006. – Т. 35. – №. 6. – С. 1310-1328
11. Hogg T. Adiabatic quantum computing for random satisfiability problems //Physical Review A. – 2003. – Т. 67. – №. 2. – С. 022314.
12. Knill E., Laflamme R. Power of one bit of quantum information //Physical Review Letters. – 1998. – Т. 81. – №. 25. – С. 5672.

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

www.arXiv.org

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. Для большей части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте ЦКТ ФФ МГУ. Рекомендуется перед лекцией скачать соответствующую презентацию и иметь ее на интерактивном занятии на ноутбуке или планшете в режиме off-line или в распечатанном виде, используя как основу конспекта для собственных пометок и комментариев.

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 «Теория квантовых алгоритмов, квантовая вычислительная сложность» 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.