

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Компьютерное моделирование квантовых измерений и квантовой томографии

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Компьютерное моделирование квантовых измерений и квантовой томографии» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Целью курса является практическое освоение теоретических методов, представленных в рамках дисциплины «Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений». Настоящая дисциплина обеспечивает практическую подготовку студентов в области статистического компьютерного моделирования и направлена на освоение методов статистических оценок и реконструкции квантовых состояний. В рамках курса студенты будут как использовать готовые программные пакеты, так и разрабатывать собственные программы для реализации поставленных задач в среде MATLAB.

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 1 зачетную единицу, всего 36 часов, из которых 18 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия практического типа), 18 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 квантовых вычислений.

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

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 дисциплин общей физики «Оптика», «Электромагнетизм» и теоретической физики «Электродинамика», «Квантовая механика», а также математических дисциплин «Математический анализ», «Теория функций комплексной переменной», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», «Теория вероятностей и основы математической статистики».

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.
1. Распределения случайных величин 1.1. Моделирование распределений случайных величин: нормальное, биномиальное, мультиномиальное, Пуассона. 1.2. Генерация выборок случайных величин, построение гистограмм, расчёт моментов. 1.3. Метод обратного преобразования, алгоритм Метрополиса-Гастингса	4		2	Защита индивидуальных задач по теме «Распределения случайных величин»	2	Подготовка к теме «Распределения случайных величин» Решение индивидуальных задач по теме «Распределения случайных величин»	2

<p>2. Оценка статистических распределений</p> <p>2.1. Метод наименьших квадратов: обзор и реализация на основе данных, сгенерированных методом Монте-Карло.</p> <p>2.2. Функция правдоподобия: построение для одно- и двухпараметрических задач на основе сгенерированных данных. Реализация метода максимального правдоподобия.</p> <p>2.3. Информация Фишера и построение доверительных интервалов.</p> <p>2.4. Корневой подход к оцениванию плотности распределения.</p>	4		2	Защита индивидуальных задач по теме «Оценка статистических распределений»	2	<p>Подготовка к теме «Оценка статистических распределений»</p> <p>Решение индивидуальных задач по теме «Оценка статистических распределений»</p>		2
<p>3. Измерение квантовых состояний кубитов</p> <p>3.1. Моделирование измерений квантовых состояний кубитов: измерение заселённости, смена измерительного базиса, полный набор взаимно-дополнительных измерений. Оценка полноты томографического протокола.</p> <p>3.2. Моделирование инструментальных ошибок измерений.</p> <p>3.3. Реконструкция чистых состояний с использованием метода максимального правдоподобия.</p> <p>3.4. Реконструкция матрицы плотности: метод псевдоинверсии Мура-Пенроуза, корневой метод, метод выпуклой оптимизации, метод проективного градиента.</p>	8		4	Защита индивидуальных задач по темам «Измерение состояний кубитов» и «Реконструкция матрицы плотности»	4	<p>Подготовка к темам «Измерение состояний кубитов» и «Реконструкция матрицы плотности»</p> <p>Решение индивидуальных задач по темам «Измерение состояний кубитов» и «Реконструкция матрицы плотности»</p>		4

<p>3.5. Адаптивная байесовская томография.</p> <p>3.6. Томография с использованием машинного обучения.</p> <p>3.7. Учёт инструментальных ошибок.</p> <p>3.8. Универсальное распределение точности.</p> <p>3.9. Оценка адекватности модели с использованием критерия хи-квадрат.</p>							
<p>4. Томография оптических квантовых состояний</p> <p>4.1. Визуализация квантовых состояний света.</p> <p>4.2. Построение квадратурных распределений квантовых состояний света.</p> <p>4.3. Преобразование Фурье и дробное преобразование Фурье.</p> <p>4.4. Влияние конечной квантовой эффективности детекторов фотонов на результаты измерений.</p> <p>4.5. Реконструкция квантового состояния света методом максимального правдоподобия.</p>	4		2	Защита индивидуальных задач по теме «Томография оптических квантовых состояний»	2	Подготовка к теме «Томография оптических квантовых состояний» Решение индивидуальных задач по теме «Томография оптических квантовых состояний»	2
<p>5. Томография квантовых процессов</p> <p>5.1. Сравнение способов представления произвольных квантовых процессов: разложение Крауса, матрица эволюции, хи-матрица в различных представлениях и её графическое изображение.</p> <p>5.2. Рандомизированный бенчмаркинг (Randomized benchmarking) для оценки точности квантовых</p>	8		4	Защита индивидуальных задач по темам «Квантовые операции и рандомизированный бенчмаркинг» и «Томография квантовых процессов»	4	Подготовка к темам «Квантовые операции и рандомизированный бенчмаркинг» и «Томография квантовых процессов»	4

процессов. 5.3. Получение статистики измерений хи-матрицы и её реконструкция с использованием изученных ранее методов реконструкции квантовых состояний.				бенчмаркинг» и «Томография квантовых процессов»		Решение индивидуальных задач по темам «Квантовые операции и рандомизированный бенчмаркинг» и «Томография квантовых процессов»		
Промежуточная аттестация – зачет	8		4		4	Подготовка к зачёту, сдача практических работ		4
Итого	36		18		18			18

* 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.
- 8.2 Электронные презентации основных тем дисциплины доступные через сайт ЦКТ: quantum.phys.msu.ru

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

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Способы генерации статистических выборок.
2. Методы восстановления статистических распределений по результатам измерений, их преимущества и недостатки.
3. Использование информации Фишера для оценки доверительных интервалов.
4. Основные этапы процедуры томографии квантовых состояний.
5. Использование критерия хи-квадрат для построения адекватной модели квантовых измерений и квантового состояния.
6. Особенности томографии оптических состояний света.

7. Основные этапы процедуры томографии квантовых процессов.
8. Методы учёта инструментальных ошибок измерений.

Типовые вопросы к зачету:

1. Базовые статистические распределения: нормальное, биномиальное, мультиномиальное, Пуассона.
2. Генерация статистических выборок методом обратного преобразования и с использованием алгоритма Метрополиса-Гастингса.
3. Метод наименьших квадратов: описание и статистические свойства.
4. Функция правдоподобия и метод максимального правдоподобия: описание и статистические свойства.
5. Информация Фишера и неравенство Рао-Крамера.
6. Корневой подход к оцениванию плотности распределения.
7. Взаимно-дополнительные измерения над кубитом и системой кубитов. Источники инструментальных ошибок и их влияние на результат измерений.
8. Методы реконструкции матрицы плотности, их преимущества и недостатки.
9. Томография квантовых состояний с использованием адаптивной стратегии.
10. Томография квантовых состояний с использованием машинного обучения.
11. Информационная матрица и универсальное распределение точности.
12. Способы визуализации квантовых состояний света. Измерение квадратурных наблюдаемых в условиях конечной квантовой эффективности детекторов фотонов. Дробное преобразование Фурье.
13. Реконструкция квантовых состояний света с использованием метода максимального правдоподобия.
14. Рандомизированный бенчмаркинг (randomized benchmarking)
15. Методы описания квантовых процессов. Томография квантовых процессов.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

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

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

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

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области 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 квантовых вычислений (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 квантовых вычислений (З1, СПК-1).

ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовых вычислений (З2, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (З3, 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 квантовых вычислений	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений

(В1, СПК-1).					
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений (В2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области 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 квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений

<p><i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области 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 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 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 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 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 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 квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p>

<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 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 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 квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 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 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 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 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 квантовых вычислений</p>

<p>ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области 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 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 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 квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовых вычислений</p>
<p>ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области 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 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 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 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 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: Пер. с англ. Под ред. М.Н. Вялого и П.М. Островского с

- предисловием К.А. Валиева. - М.: Мир. 2006. 824 с.
2. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: ФИЗМАТЛИТ, Т. 2, (1973), 899 с.
 3. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: Надежды и реальность. 2-е изд., исп. М.–Ижевск: НИЦ РХД, 2002. 320 с.
 4. Шляйх В.П. Квантовая оптика в фазовом пространстве. – М.: ФИЗМАТЛИТ, (2005), 760 с.
 5. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. Москва: Физматлит, 2000. 896 с.
 6. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая Оптика. Москва: Физматлит, 2003. 512 с.

Дополнительная литература

1. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // Успехи Физических Наук. 2005. Т.175. №1. С.3-39.
2. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Kulik S.P. et al. Statistical reconstruction of qutrits // Phys. Rev. A. 2004. Vol. 70. 042303. 16 p.
3. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Kulik S.P. et al. Qutrit state engineering with biphotons // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. 230503. 4p.
4. Ю.И. Богданов, Унифицированный метод статистического восстановления квантовых состояний, основанный на процедуре очищения // ЖЭТФ. 2009. Т.135. Вып.6.с.1068-1078.
5. Bogdanov Yu.I., Brida G, Genovese M., Kulik S.P., Moreva E.V., Shurupov A.P. Statistical Estimation of the Efficiency of Quantum State Tomography Protocols // Phys. Rev. Lett. 2010. V.105. 010404. 4p.
6. Yu. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, A. P. Shurupov Statistical Estimation of Quantum Tomography Protocols Quality // Phys. Rev. A. 2011. V.84. 042108. 19 p.
7. Богданов Ю.И., Авосопянц Г.В., Белинский Л.В., Катамадзе К.Г., Кулик С.П., Лукичев В.Ф. Статистическое восстановление оптических квантовых состояний на основе взаимно-дополнительных квадратурных квантовых измерений // ЖЭТФ. 2016. Т.150. №2. вып. 2(8). с. 246- 253.
9. James D.F., Kwiat P.G., Munro W.J., and White A.G. Measurement of qubits // Phys. Rev. A. 2001. V.64. 052312. 15p.
10. Lvovsky A.I., Raymer M.G. Continuous-variable optical quantum-state tomography // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 1. P. 299–332.
11. Mohseni, M., RezaKhani, A.T., Lidar, D.A. Quantum-process tomography: Resource analysis of different strategies // Phys. Rev. A. 2008. Vol. 77, № 3, 032322.
12. Magesan, E., Gambetta, J.M., Johnson, B.R. et al. Efficient measurement of quantum gate error by interleaved randomized benchmarking // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, № 8, 080505.

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для освоения дисциплины необходимо посещение практических занятий и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Для всего курса имеются методические указания, выложенные на сайте ЦКТ ФФ МГУ. Рекомендуется перед практическим занятием скачать соответствующие указания и ознакомиться с теоретическим материалом, а также с материалами курса «Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений».

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 «Компьютерное моделирование квантовых измерений и квантовой томографии» используются средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайтов с материалами методических указаний. Курс имеет электронные версии методических указаний. Занятия проводятся в аудитории со стационарными компьютерами, на которые установлена программа MATLAB и базовые программы для работы с документами.

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». Компьютерный класс с учебной доской и установленным на компьютеры программным обеспечением: MATLAB, Microsoft Office, Adobe Acrobat.