

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Обработка квантовой информации
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра Российского квантового центра
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Е.О. Киктенко, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры Российского квантового центра 28.01.2025

Аннотация

Курс посвящен введению в обширную область обработки и передачи квантовой информации. В рамках курса рассматриваются основные идеи использования индивидуальных квантовых объектов для решения вычислительных задач, вводятся базовые понятия квантовой и классической теории информации, формулируются принципы построения квантовых алгоритмов и функционирования квантовых компьютеров, анализируются основные подходы к передаче информации через квантовые каналы.

Особое внимание уделяется феномену квантовой запутанности, являющейся важным ресурсом для реализации квантовых информационных технологий. Также в курсе уделяется внимание последним мировым достижениям в области квантовых вычислений.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

познакомить обучающихся с основами теории обработки квантовой информации, необходимыми для начала собственной исследовательской деятельности.

Задачи дисциплины

дать представление о формализации понятия информации с точки зрения теории вероятности; познакомить с основными идеями обработки классической информации; познакомить с формализмом положительных операторно-значных мер; познакомить с основными принципами квантовой передачи информации; познакомить с основными алгоритмами квантовых вычислений, а также современных алгоритмов квантового машинного обучения.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость

ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основные понятия квантовой и классической теории информации и принципиальные отличия между квантовой и классической теорией информации; принципы построения квантовых алгоритмов и функционирования квантовых компьютеров; основные подходы к передаче информации через квантовые каналы; основные построения алгоритмов квантового машинного обучения.

уметь:

вычислять энтропийные характеристики для классических вероятностных распределений и квантовых состояний; выполнять операции над бра- и кет- векторами; проводить очищение смешанных квантовых состояний; вычислять квантовые состояния регистра кубитов после применения заданного набора квантовых вентилей; составлять элементарные квантовые алгоритмы; проектировать простейшие протоколы квантовой коммуникации.

владеть:

математическим аппаратом классической и квантовой теории информации; формализмом описания квантовых каналов.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Повторение основ формализма квантовой механики для конечномерных пространств	4			6

2	Квантовые измерения и квантовая эволюция	6	3		9
3	Квантовая запутанность	4	2		6
4	Квантовая теория информации	4	2		12
5	Универсальные квантовые вычисления	8	4		12
6	Вариационные и адиабатические квантовые вычисления	4	4		15
Итого часов		30	15		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Повторение основ формализма квантовой механики для конечномерных пространств

Повторение основ формализма квантовой механики для конечномерных пространств. Гильбертовы пространства, бра и кет векторы, понятие унитарного, эрмитового, полу-положительного оператора. Перемножение матриц, взятие следа, собственные векторы и собственные значения. Вычисление средних значений наблюдаемых. Чистые и смешанные состояния, тензорное произведение и частичный след.

2. Квантовые измерения и квантовая эволюция

Квантовые измерения и квантовая эволюция. Формализм положительных операторно-значных мер. Теорема Наймарка. Вполне-положительные отображения сохраняющие след. Представления квантовых каналов через операторы Крауса. Представление Стайнспринга.

3. Квантовая запутанность

Квантовая запутанность. Понятие квантовой запутанности для чистых и смешанных состояний. Меры квантовой запутанности и свидетели квантовой запутанности. Использование запутанных состояний в протоколе квантовой телепортации и свехрплотного кодирования.

4. Квантовая теория информации

Квантовая теория информации. Основы классической теории информации. Обобщение классической теории информации на квантовые состояния. Передача информации через квантовые каналы, граница Холево.

5. Универсальные квантовые вычисления

Универсальные квантовые вычисления. Основные квантовые гейты, универсальный набор квантовых гейтов, теорема Соловья-Китаева. Принципы построения квантовых алгоритмов. Алгоритмы Дойча, Дойча-Йежи, Саймона, Шора, Гровера. Демонстрация “квантового превосходства”.

6. Вариационные и адиабатические квантовые вычисления

Вариационные и адиабатические квантовые вычисления. Принцип построения вариационных квантовых алгоритмов. Примеры использования вариационных квантовых алгоритмов. Использование вариационных алгоритмов для квантовой симуляции. Принцип построения адиабатических квантовых алгоритмов. Связь между вариационными и адиабатическими алгоритмами.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квантовая информация и квантовые вычисления [Текст] : в 2 т/Дж. Прескилл , -М. : Регулярная и хаотическая динамика ; Ижевск, 2011

Дополнительная литература

1. Введение в квантовую теорию информации [Текст] : [лекции для студентов вузов] / А. С. Холево ; Независимый Моск. ун-т ; Высший колледж математ. физики .— М : МЦНМО, 2002 .— 128 с.
- A. S. Holevo, "Quantum Systems, Channels, Information. A Mathematical Introduction" De Gruyter (2013)
- M. A. Nielsen and I. L. Chuang "Quantum Computation and Quantum Information" Cambridge University press (2010)

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

- <http://www.theory.caltech.edu/~preskill/ph219/index.html> Lecture notes on Quantum Computation by John Preskill
- <https://arxiv.org/abs/1907.09415> Quantum Computing: Lecture Notes

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

На лекциях могут использоваться мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

Облачный редактор LaTeX документов Overleaf (<https://www.overleaf.com/>). Облачный квантовый процессор компании IBM (<https://quantum-computing.ibm.com/>)

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;

– подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра Российского квантового центра
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
Разработчик:	Е.О. Киктенко, канд. физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Обработка квантовой информации» обучающийся должен:

знать:

основные понятия квантовой и классической теории информации и принципиальные отличия между квантовой и классической теорией информации; принципы построения квантовых алгоритмов и функционирования квантовых компьютеров; основные подходы к передаче информации через квантовые каналы; основные построения алгоритмов квантового машинного обучения.

уметь:

вычислять энтропийные характеристики для классических вероятностных распределений и квантовых состояний; выполнять операции над бра- и кет- векторами; проводить очищение смешанных квантовых состояний; вычислять квантовые состояния регистра кубитов после применения заданного набора квантовых вентилей; составлять элементарные квантовые алгоритмы; проектировать простейшие протоколы квантовой коммуникации.

владеть:

математическим аппаратом классической и квантовой теории информации; формализмом описания квантовых каналов.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Вычислить среднюю точность восстановления случайного чистого кубитного состояния при проективном измерении
2. Получить элементы SIC-POVM для кубитного случая
3. Вычислить редуцированные матрицы плотности для состояний Белла
4. Получить результирующую унитарную матрицу гейта CNOT действующего на 1-й и 3-й кубиты трехкубитной системы
5. Получить требуемые операции на стороне Алисы и Боба в протоколе квантовой телепортации на произвольном состоянии Белла
6. Получить требуемые операции на стороне Алисы и Боба в протоколе сверхплотного кодирования на произвольном состоянии Белла
7. Получить унитарную матрицу квантового оракула для произвольной булевой функции
8. Получить декомпозицию многокубитного гейта контролируемого унитарного поворота
9. Вычислить энтропию фон Неймана для заданного квантового состояния
10. Вычислить квантовую взаимную информацию для двусоставного квантового состояния

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Дать определения энтропии Шеннона и классическая взаимная информация. Сформулировать теорему кодирования классического канала.
2. Описать основные задачи процедуры классической пост-обработки в устройствах квантового распределения ключей. Описать процедуры согласования информации, верификации и усиления секретности. Объяснить принципы создания аутентифицированного канала.
3. Дать определения чистым и смешанным квантовым состояниям. Дать определение энтропия фон Неймана и способа её вычисления. Дать определение положительных операторно-значных мер и их связи с проективными квантовыми измерениями.
4. Описать последовательность операций в протоколах квантовой телепортации, и квантового сверхплотного кодирования
5. Записать матрицы основных квантовых гейтов. Представить универсальный набор квантовых гейтов. Сформулировать принцип реализации функций в парадигме обратимых квантовых вычислений.
6. Сформулировать математические задачи, лежащие в основе алгоритмов Саймона и Шора. Описать основные принципы построения этих алгоритмов.
7. Сформулировать математические задачи, лежащие в основе алгоритмов Дойча и Гровера. Описать основные принципы построения этих алгоритмов.

8. Дать определение квантового канала. Объяснить отличие между требованиями положительности и полной положительности. Дать понятия представления Стайнспринга и операторов Крауса.
9. Дать определение процессу декогеренции. Дать понятие дефазирующего, деполяризирующего и демпфирующего канала.
10. Дать понятие квантового кода исправления ошибок. Объяснить принцип функционирования кода Шора.
11. Дать определение стабилизирующим кодам квантового исправления ошибок. Объяснить принципы функционирования отказоустойчивых квантовых вычислений.
12. Дать определение свидетеля квантовой запутанности. Дать определения согласованности и негативности. Дать понятие квантового дискорда.
13. Объяснить принципы работы вариационных алгоритмов квантового машинного обучения.

Примеры контрольных заданий

1. Получить операторы локальных преобразований в протоколе квантовой телепортации на основе заданного двухкубитного запутанного состояния
2. Получить вектор состояния, являющийся очищением данного смешанного состояния
3. Вычислить редуцированные матрицы плотности для данного многосоставного состояния
4. Построить квантовый гейт реализующий заданную классическую функцию
5. Получить оптимальное количество итерации для алгоритма Гровера
6. Вычислить квантовую взаимную информацию для данного двухкубитного состояния
7. Доказать наличие запутанности в данном смешанном состоянии
8. Получить операторы Крауса для заданного взаимодействия квантовой системы с окружением
9. Получить вид состояния Чои-Ямилковского для заданного квантового канала
10. Вычислить значение согласованности для данного двухкубитного состояния

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Вычислить редуцированные матрицы плотности для данного многосоставного состояния

Билет 2.

1. Получить оптимальное количество итерации для алгоритма Гровера

Билет 3.

1. Доказать наличие запутанности в данном смешанном состоянии

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в письменной форме по билетам. В каждом билете представлено одно задание. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.