

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Квантовая теория информации

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

**3. Направление подготовки:** 03.04.02 Физика (магистратура)

**4. Аннотация:**

Курс «Квантовая теория информации» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовая криптография и квантовая связь» и «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает базовую подготовку студентов в области физики квантовой информации. Курс состоит из двух основных частей, рассматривающих, соответственно, физические основы квантовой информатики и основные сведения о квантовых вычислениях. В частности, в части курса, посвященной теории квантовой информации рассматривается различимость квантовых состояний, различные метрики на пространстве квантовых состояний, передача классической информации по квантовым каналам и граница Холево, передача квантовой информации по квантовым каналам связи, меры количества квантовой информации, энтропия фон Неймана и её свойства, перепутанность квантовых состояний, количественные меры перепутанности, ресурсная теория перепутанности, теория квантовых процессов и описание шумов в квантовых каналах, основы квантовой томографии состояний и процессов.

**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
<b>1. Основные сведения из классической теории информации</b> Энтропия Шеннона, её основные свойства. Относительная энтропия, условная энтропия и взаимная информация. Неравенство обработки данных. Теорема кодирования Шеннона для канала без шума.	2	2			2	2 часа Решение задач на основные понятия классической информации, доказательства свойств введенных на лекции величин.		2

<p><b>2. Квантовая теория информации</b></p> <p>§1. Необходимые сведения из квантовой теории.  Квантовые состояния, Гильбертово пространство. Эволюция квантовых состояний, картина Шрёдингера. Измерения, вероятности в квантовой теории, POVM-формализм, правило Борна, проекционные измерения и наблюдаемые. Эволюция в картине Гейзенберга. Смешанные состояния, матрица плотности. Составные системы, тензорное произведение пространств состояний. Перепутанные состояния, редуцированная матрица плотности, разложение Шмидта и очищение.</p> <p>§2. Различимость квантовых состояний  Расстояние между классическими распределениями вероятности. Расстояния между квантовыми состояниями. Следовая метрика, фиделити, метрика Бюреса. Соотношения между различными метриками на пространстве состояний.</p> <p>§3. Энтропия фон Неймана.  Энтропия фон Неймана для квантовых состояний, количественная оценка чистоты. Квантовая относительная энтропия, её основные свойства. Выпуклость и субаддитивность квантовой энтропии.</p> <p>§4. Квантовые процессы и шумные каналы связи  Формализм квантовых процессов, вполне положительные и сохраняющие след отображения. Представление операторной суммой, хи-матрица процесса. Примеры квантовых процессов: канал с X-ошибкой и Z-ошибкой, деполяризующий канал, канал затухания амплитуды и фазы (продольная и поперечная</p>	32	22	10		32	<p>4 часа  Решение задач для закрепления понимания формализма квантовой теории. Эволюция двухуровневой системы, сфера Блоха, белловские состояния и т.п.</p> <p>4 часа  Решение задач, например: на вычисление расстояний в различных метриках, вывод выражения для фиделити через компоненты вектора Блоха для двухуровневой системы.</p> <p>2 час  Решение задач на свойства энтропии фон Неймана.</p> <p>4 часа  Решение задач на преобразование состояний различными каналами. Написание программы для</p>		18
--	----	----	----	--	----	--	--	----

<p>релаксация). Представление о квантовой томографии состояний и процессов, информационно-полный набор измерений, методы статистической обработки результатов томографических измерений.</p> <p>§4. Передача классической и квантовой информации по квантовым каналам связи.</p> <p>Задача различения квантовых состояний. Граница Холево. Теорема Шумахера о кодировании в канале без шума. Передача данных через квантовый канал с шумом. Квантовое неравенство обработки данных, граница Синглтона, квантовое неравенство Фано.</p> <p>§5. Количественная теория перепутанности.</p> <p>Преобразования сохраняющие и изменяющие перепутанность, LOCC преобразования. Дистилляция перепутанности, количественные меры перепутанности в двухкомпонентных системах. Перепутанность смешанных состояний, связанная перепутанность. Меры перепутанности в бесконечномерных системах. Проблемы характеристики перепутанности в многокомпонентных системах.</p>						<p>восстановления состояния по результатам томографических измерений.</p> <p>4 часа. Задачи на методы различения квантовых состояний, unambiguous измерения.</p> <p>4 часа. Решение задач на количественные меры перепутанности.</p>	
						<p>14 часов</p> <p>Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).</p>	14
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>	34	24	10		34		34

\* 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.

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

Типовые вопросы к зачёту:

1. Квантовая относительная энтропия, её основные свойства
2. Представление процесса операторной суммой, хи-матрица процесса
3. Задача различения квантовых состояний. Граница Холево.
4. Теорема Шумахера о кодировании в канале без шума.

Типовые задачи к экзамену:

1. Покажите, что расстояние между распределениями вероятностей  $(p, 1-p)$  и  $(q, 1-q)$  в следовой метрике равно  $|p-q|$
2. Найдите энтропию, связанную с подбрасыванием (а) «честной» монеты, (б) «честной» игральной кости. Что произойдет с энтропией, если монета или кость «нечестные»?
3. Докажите, что двоичная энтропия  $H_2(p)$  принимает максимальное значение при  $p = 1/2$ .
4. Пусть  $|AB\rangle$  — чистое состояние составной системы, принадлежащей Алисе и Бобу. Покажите, что  $|AB\rangle$  является запутанным состоянием тогда и только тогда, когда  $S(B|A) < 0$ .

## 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 (З1, СПК-1).

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

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики 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 физики квантовых	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

вычислений (В1, СПК-1).					
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение 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 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><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><b>ЗНАТЬ:</b> 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><b>ЗНАТЬ:</b> 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. M.A. Nielsen, I.L. Chuang Quantum Computation and Quantum Information, 10<sup>th</sup> 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 квантовую информацию» 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.