

**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:	Методы квантовой теории информации в физике
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных проблем физики квантовых технологий
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: С.Н. Филиппов, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных проблем физики квантовых технологий
29.03.2025

Аннотация

Квантовая теория информации объединяет собой идеи классической теории информации и квантовой механики. В то время как классическая теория информации рассматривает задачи обработки информации (такие как ее хранение и передача), квантовая теория информации изучает, как такие задачи могут быть решены с помощью квантовых систем. Лежащая в основе теории квантовая механика является причиной важных различий между квантовой и классической теориями информации. Данный курс является введением в квантовую теорию информации и направлен на ознакомление с основными понятиями и методами.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

дать студентам, обучающимся в магистратуре, знания, необходимые для описания физических явлений методами квантовой теории информации, методами теоретической физики, методами построения соответствующих математических моделей; ознакомить с современным состоянием теории квантовой обработки и передачи информации, существующими экспериментами в данной области; продемонстрировать достоверность теории в области её применимости; дать навыки, позволяющие эффективно решать задачи многочастичной квантовой физики.

Задачи дисциплины

применение математического аппарата квантовой теории информации к различным физическим квантовым системам (оптическим, спиновым, зарядовым); изучение методов решения многочастичных квантовых задач; изучение методов описания открытых квантовых систем; овладение студентами методами квантовой информатики для описания квантовых каналов передачи информации и квантовой запутанности; изучение методов анализа и постановки физических экспериментов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
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	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

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы и основные объекты квантовой теории информации;
- свойства квантовых динамических отображений;
- методы описания непроективных квантовых измерений;
- основные характеристики перепутанных квантовых состояний;
- алгоритмы дистилляции перепутанности и методы создания перепутанных состояний;
- основные методы решения задач квантовой обработки и передачи информации;
- физические системы, реализующие квантовые протоколы обработки информации;
- методы и способы описания динамики квантовых систем.

уметь:

- пользоваться аппаратом векторного анализа в многомерных гильбертовых пространствах;
- определять степень перепутанности квантовых состояний;
- пользоваться аппаратом квантовых операторов в многомерных гильбертовых пространствах;
- пользоваться представлением состояний в виде матричного произведения;
- применять метод оператора плотности для описания эволюции квантовых систем, взаимодействующих с окружением;
- пользоваться аппаратом квантовых нелокальных во времени кинетических уравнений для описания открытых квантовых систем;
- находить размерность вспомогательного пространства при расчете временной динамики методом тензорных сетей.

владеть:

- основными методами математического аппарата квантовой теории информации;
- навыками теоретического анализа физических задач, связанных с возможными реализациями квантовых битов;
- основными методами решения задач о нахождении эволюции открытых квантовых систем;
- навыками описания и исследования многочастичных перепутанных квантовых систем.

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	Квантовая перепутанность.	5			5
2	Квантовые многочастичные системы.	5			5
3	Немарковская динамика открытых квантовых систем.	5			5
4	Численные методы анализа многочастичных квантовых систем.	5			5
5	Пропускные способности квантовых каналов.	3			3
6	Непроективные квантовые измерения.	3			3
7	Квантовые операции и квантовые инструменты. Квантовый контроль.	2			2

8	Оптические, спиновые, зарядовые и механические квантовые системы.	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Квантовая перепутанность.

перепутанность и сепарабельность двусоставных систем, дистилляция квантовой перепутанности, критерий Переса-Городецких, перепутанность и сепарабельность многочастичных систем, формулировка в терминах полуопределённого программирования, активация перепутанности, истинно перепутанные состояния и полностью сепарабельные состояния, каналы, разрушающие и аннигилирующие перепутанность, критерий Саймона для двухмодовых гауссовских состояний.

2. Квантовые многочастичные системы.

точное описание в терминах волновой функции и матрицы плотности, основное состояние локальных гамильтонианов, состояния матричного произведения, тензорные диаграммы Пенроуза, алгоритм ренормгруппы для матрицы плотности, операторы в виде матричного произведения, закон площадей для квантовой перепутанности.

3. Немарковская динамика открытых квантовых систем.

Лэмбовский сдвиг для марковской динамики, локальное во времени кинетическое уравнение с зависящим от времени генератором, положительные и отрицательные скорости релаксации и декогеренции, проекционные методы Накажimy-Цванцига, нелокальное по времени кинетическое уравнение, свойства делимости квантовых динамических отображений.

4. Численные методы анализа многочастичных квантовых систем.

временная динамика многочастичной цепочки, метод TEBD, тензорные сети для открытых квантовых систем.

5. Пропускные способности квантовых каналов.

классическая пропускная способность квантового канала, гипотеза аддитивности, классическая пропускная способность при использовании перепутанных состояний передатчика и приемника, квантовая пропускная способность, деградируемые и антидеградируемые каналы.

6. Непроективные квантовые измерения.

теорема Озавы, различные способы описания положительной операторнозначной меры, совместимость и несовместимость квантовых наблюдаемых и квантовых каналов, квантовое широкое вещание.

7. Квантовые операции и квантовые инструменты. Квантовый контроль.

отображения, не сохраняющие след, преобразование квантовых систем при непроективных измерениях, теория квантового контроля, ландшафт управления в теории квантового контроля, ловушки управления.

8. Оптические, спиновые, зарядовые и механические квантовые системы.

перепутанность в оптических системах, перепутанность в спиновых системах, перепутанность в зарядовых системах, гибридные квантовые системы, протоколы квантовой передачи информации и дистилляции перепутанности в таких системах, измерения и квантовый контроль на примере конкретных физических систем.

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

1. Необходимое оборудование для лекций: доска, мел, тряпка. Желательно также применение мультимедийного оборудования (проектор), для лучшей организации лекции.
2. Необходимое программное обеспечение: не требуется
3. Обеспечение самостоятельной работы: наличие учебников и задачников по курсу квантовой информатики и квантовых вычислений, теории открытых квантовых систем.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квантовые системы, каналы, информация [Текст], монография/А. С. Холево, -М., МЦНМО, 2010
2. Теория открытых квантовых систем [Текст], [монография]/Х. Бройер, Ф. Петруччионе, -М. : Регулярная и хаотическая динамика ; Ижевск, 2010
3. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М. : Мир, 2009.
4. Кашурников В.А., Красавин А.В. Численные методы квантовой статистики. - М.: Физматлит, 2010.

Дополнительная литература

1. Элементарное введение в квантовые вычисления [Текст] / Р. Перри ; пер. с англ. А. Д. Калашникова - Долгопрудный Интеллект, 2015
2. Heinosaari T., Ziman M. The Mathematical Language of Quantum Theory: From Uncertainty to Entanglement, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

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

1. <https://mipt.ru/science/labs/QIT-lab/for-students.php>

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

Информационный ресурс <https://mipt.ru/science/labs/QIT-lab/for-students.php> предназначен для дополнительных материалов к курсу (примеров решения задач, вспомогательной литературы).

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

Работа с учебной и научной литературой является главной формой самостоятельной работы и необходима при подготовке к контрольной работе, экзамену. Она включает проработку лекционного материала – изучение рекомендованных источников и литературы по тематике лекций. Конспект лекции должен содержать реферативную запись основных вопросов лекции, предложенных преподавателем схем (при их демонстрации), основных источников и литературы по темам, выводы по каждому вопросу. Конспект должен быть выполнен в отдельной тетради по предмету. В случае возникших затруднений в понимании учебного материала следует обратиться к другим источникам, где изложение может оказаться более доступным. Необходимо отметить, что работа с литературой не только полезна как средство более глубокого изучения любой дисциплины, но и является неотъемлемой частью профессиональной деятельности будущего выпускника.

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 фундаментальных проблем физики квантовых технологий
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: С.Н. Филиппов, канд. физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
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-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
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
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 «Методы квантовой теории информации в физике» обучающийся должен:

знать:

- принципы и основные объекты квантовой теории информации;
- свойства квантовых динамических отображений;
- методы описания непроективных квантовых измерений;
- основные характеристики перепутанных квантовых состояний;
- алгоритмы дистилляции перепутанности и методы создания перепутанных состояний;
- основные методы решения задач квантовой обработки и передачи информации;
- физические системы, реализующие квантовые протоколы обработки информации;
- методы и способы описания динамики квантовых систем.

уметь:

- пользоваться аппаратом векторного анализа в многомерных гильбертовых пространствах;
- определять степень перепутанности квантовых состояний;
- пользоваться аппаратом квантовых операторов в многомерных гильбертовых пространствах;
- пользоваться представлением состояний в виде матричного произведения;
- применять метод оператора плотности для описания эволюции квантовых систем, взаимодействующих с окружением;
- пользоваться аппаратом квантовых нелокальных во времени кинетических уравнений для описания открытых квантовых систем;
- находить размерность вспомогательного пространства при расчете временной динамики методом тензорных сетей.

владеть:

- основными методами математического аппарата квантовой теории информации;
- навыками теоретического анализа физических задач, связанных с возможными реализациями квантовых битов;
- основными методами решения задач о нахождении эволюции открытых квантовых систем;
- навыками описания и исследования многочастичных перепутанных квантовых систем.

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

Не предусмотрено.

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

Перечень контрольных вопросов:

1. Запишите уравнение Горини-Коссаковского-Сударшана-Линдблада.
2. Сформулируйте критерий Переса-Городецких перепутанности двусоставных систем.
3. Объясните тензорные диаграммы Пенроуза.
4. Запишите уравнение Накажимы-Цванцига.
5. Дайте определение деградируемых и антидеградируемых квантовых каналов.
6. Объясните различные способы задания непроективных квантовых измерений.
7. Что называется ландшафтом управления в задаче квантового контроля?
8. Дайте определение квантового канала.
9. Объясните информационный смысл пропускной способности квантового канала.
10. Запишите состояние одномерной цепочки в представлении матричного произведения.

Примеры контрольных заданий:

1. Найдите классическую пропускную способность деполяризирующего квантового канала.
2. Вычислите квантовую пропускную способность стирающего канала.
3. Определите параметры локальных кубитных деполяризирующих каналов q_1 и q_2 , при которых тензорное произведение этих каналов аннигилирует перепутанность всех входных состояний.
4. Рассчитайте временную динамику частицы в модели столкновений с одномерной цепочкой в состоянии Гринбергера-Хорна-Цайлингера и обменным гамильтонианом взаимодействия между рассматриваемой частицей и частицами окружения. Найдите соответствующее кинетическое уравнение на матрицу плотности.
5. Рассчитайте степень перепутанности двухмодового гауссовского состояния, реализуемого в процессе спонтанного параметрического рассеяния в параметрическом приближении.

Перечень экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Квантовый канал. Теорема Стайнспринга.
2. Пропускная способность квантового канала.

Билет 2.

1. Квантовая запутанность. Критерий Переса-Городецких.
2. PVM и POVM измерения.

Критерии оценивания

- оценка "отлично (10)" 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 (9)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "отлично (8)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "хорошо (7)" выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "хорошо (6)" выставляется студенту, если он знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "хорошо (5)" выставляется студенту, если он знает материал, по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "удовлетворительно (4)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка "удовлетворительно (3)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему фрагментарно основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка "неудовлетворительно (2)" выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;
- оценка "неудовлетворительно (1)" выставляется студенту, который не знает формулировок основных понятий дисциплины.

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

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться только программой дисциплины.

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 1 астрономический час на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.