

**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:	Статистическое описание квантового транспорта и теория измерений в наноструктурах
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: Г.Б. Лесовик, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных проблем физики квантовых технологий
29.03.2025

Аннотация

В курсе рассматриваются методы статистического описания квантового транспорта и применения теории измерений в наноструктурах. Особое внимание уделяется использованию матрицы рассеяния в когерентных проводниках для описания электронного транспорта, аппарата вторичного квантования для описания многочастичного транспорта, даются начальные сведения о гриновских функциях в Келдышевской технике, излагается описание шумов и статистики переноса частиц в целом, уравнений Боголюбова – де Женна, теории измерений флуктуаций тока и характеристической функции для переноса заряда. Даются необходимые знания из квантовой теории измерений: проекционный постулат фон Неймана, понятие отложенных измерений.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Дать студентам знания о методах статистического описания квантового транспорта и применения теории измерений в наноструктурах.

Эти знания охватывают использование матрицы рассеяния в когерентных проводниках для описания электронного транспорта, аппарата вторичного квантования для описания многочастичного транспорта, начальные сведения о гриновских функциях в Келдышевской технике, описание шумов и статистики переноса частиц в целом, уравнений Боголюбова – де Женна, теории измерений флуктуаций тока и характеристической функции для переноса заряда. Даются необходимые знания из квантовой теории измерений : проекционный постулат фон Неймана, понятие отложенных измерений.

Задачи дисциплины

- овладение основами теории квантового электронного транспорта
- изучение основ теории матриц рассеяния в квантовых проводниках
- получение знаний о типах флуктуаций тока
- изучение корреляторов высших порядков и функции распределения для перенесенного заряда
- изучение электронного транспорта в гибридных (нормально/сверхпроводящих) проводниках
- изучение квантовой теории измерений применительно к флуктуациям тока в квантовых проводниках

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
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-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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные принципы описания квантового транспорта
- основные принципы статистического описания флуктуаций в квантовом транспорте
- основные принципы электронного транспорта в гибридных (нормально/сверхпроводящих) проводниках
- основные принципы теории измерений применительно к квантовому транспорту

уметь:

- находить величины токов и корреляторов токов в квантовых проводниках
- выбирать подходящие способы статистического описания квантовой динамики
- строить теорию измерения для конкретных величин применительно к конкретным условиям эксперимента

владеть:

- методами вычисления средних величин и флуктуаций тока
- основными методами математического аппарата вторичного квантования и функций Грина
- методами решения уравнения Боголюбова де-Женна

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	Описание электронного транспорта с помощью матрицы рассеяния. Формула Ландауэра.	8			8

2	Использование вторичного квантования и функций Грина	4			4
3	Описание полной статистики переноса в квантовых проводниках	4			4
4	Уравнения Боголюбова – де Женна	4			4
5	Статистика электронного транспорта в гибридных сверхпроводящих структурах	6			6
6	Теория измерений для квантового транспорта	4			4
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. Описание электронного транспорта с помощью матрицы рассеяния. Формула Ландауэра.

Использование матрицы рассеяния в когерентных проводниках для описания электронного транспорта на полуклассическом уровне с применением состояний рассеяния Липпмана-Швингера. Вывод двух версий формулы Ландауэра.

2. Использование вторичного квантования и функций Грина

На базе использования матрицы рассеяния в когерентных проводниках для описания электронного транспорта объясняется использование аппарата вторичного квантования для описания многочастичного транспорта. Даются начальные сведения о гриновских функциях в Келдышевской технике, в базисе состояний Липпмана-Швингера.

3. Описание полной статистики переноса в квантовых проводниках

Дается описание шумов и статистики переноса частиц в целом. Рассмотрена теория измерений характеристической функции для переноса заряда.

Найдены корреляторы токов различных порядков для нескольких типов квантовых проводников.

4. Уравнения Боголюбова – де Женна

Изложены основные принципы электронного транспорта в гибридных (нормально/сверхпроводящих) проводниках. Подробно рассматривается вывод уравнений Боголюбова – де Женна и их свойства. Приводится описание нескольких типичных геометрий гибридных контактов.

5. Статистика электронного транспорта в гибридных сверхпроводящих структурах

На основе общих принципов описания электронного транспорта в гибридных (нормально/сверхпроводящих) проводниках дано расширение теории шумов и статистики переноса частиц в целом. Рассмотрены наиболее важные типы контактов, вычислены величины среднего тока и флуктуаций.

6. Теория измерений для квантового транспорта

Изучение квантовой теории измерений применительно к флуктуациям тока в квантовых проводниках. Изложена теория измерений флуктуаций тока с помощью квантовых точечных контактов и резонансных контуров. Также рассмотрена теория измерений характеристической функции для переноса заряда с помощью сверхпроводящего кубита.

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

Мультимедийное оборудование (проектор, экран), доска, мел или маркеры.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Г.Б. Лесовик, И.А. Садовский Описание квантового электронного транспорта с помощью матриц рассеяния // УФН 181 1041–1096 (2011)

Дополнительная литература

1. Одномерное рассеяние в квантовой механике и его приложения [Текст] : учеб. пособие для вузов / Н. М. Щелкачев, Г. Б. Лесовик ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2011 .— 79 с.

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

<http://ufn.ru/ru/articles/2011/10/b/>

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

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

Для подготовки к итоговой аттестации по предмету лучше всего пользоваться материалами лекций.

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:	<u>1</u>
квалификация:	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
Разработчик:	Г.Б. Лесовик, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними
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-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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Статистическое описание квантового транспорта и теория измерений в наноструктурах» обучающийся должен:

знать:

- основные принципы описания квантового транспорта
- основные принципы статистического описания флуктуаций в квантовом транспорте
- основные принципы электронного транспорта в гибридных (нормально/сверхпроводящих) проводниках
- основные принципы теории измерений применительно к квантовому транспорту

уметь:

- находить величины токов и корреляторов токов в квантовых проводниках
- выбирать подходящие способы статистического описания квантовой динамики
- строить теорию измерения для конкретных величин применительно к конкретным условиям эксперимента

владеть:

- методами вычисления средних величин и флуктуаций тока
- основными методами математического аппарата вторичного квантования и функций Грина
- методами решения уравнения Боголюбова де-Женна

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 примерных вопросов:

1. Сформулировать определение нелокальности электронного квантового транспорта
2. Указать примеры проявления квантовости транспорта в конкретных проводниках различного типа
3. Описать реализации квантовых вентилей с помощью «подвижных кубитов» в квантовых проводниках
4. Качественно объяснить квантовый эффект Холла в квантовых проводниках
5. Перечислить типы токовых шумов в квантовых проводниках
6. Объяснить роль обменных эффектов в транспорте двух частиц
7. Описать качественно статистику переноса заряда при нулевой температуре в нормальном проводнике
8. Описать симметрию уравнений Боголюбова – де Женна
9. Особенности шумов в гибридных сверхпроводящих системах
10. Описать способ замены проекционного постулата фон Неймана совместной унитарной эволюцией системы и измерителя

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Описание электронного транспорта с помощью матрицы рассеяния. Формула Ландауэра.
2. Уравнения Боголюбова – де Женна.

Билет 2.

1. Реализации квантовых вентилей с помощью «подвижных кубитов» в квантовых проводниках.
2. Роль обменных эффектов в транспорте двух частиц.

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

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме устного экзамена.

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.