

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Особенности электронного транспорта в системах малых размеров с сильными кулоновскими корреляциями

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

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

**4. Аннотация:**

Курс «Особенности электронного транспорта в системах малых размеров с сильными кулоновскими корреляциями» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые и оптические технологии». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области исследования особенностей электронного транспорта в коррелированных наноструктурах. В курсе представлены фундаментальные особенности электронного транспорта в структурах сверхмалых размеров и основные теоретические методы их исследования. Все понятия, подходы и эффекты физики твердотельных наноструктур рассматриваются на уровне курса общей физики с тем, чтобы при дальнейшем изучении отдельных разделов у обучающихся уже имелось представление об этом направлении физики в целом.

**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 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 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 физики квантовых и оптических технологий.

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

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, 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», а также дисциплины «Квантовая механика», «Физика твердого тела», «Статистическая физика».

## **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. Введение</b> Обзор основных проблем, возникающих при исследовании электронного транспорта в системах сверхмалых размеров. Анализ имеющихся экспериментальных данных.		1			1	1 час Знакомство с обзорами литературы по исследованию особенностей электронного транспорта в системах сверхмалых размеров.		1

<p><b>2. Неравновесный электронный транспорт через взаимодействующие наноструктуры.</b></p> <p>§1. Базовые теоретические подходы и модели, применяемые для анализа электронного транспорта через связанные наноструктуры, взаимодействующие с несколькими управляющими электродами. Приближение туннельного гамильтониана и континуальная модель.</p> <p>§2. Роль межчастичного взаимодействия в формировании отклика наноструктур на внешнее поле. Рассеяние на примесях и дефектах, кулоновское, обменное, спин-орбитальное и электрон-фононное взаимодействие.</p> <p>§3. Особенности энергетического спектра и проводимости низкоразмерных систем и связанных наноструктур в отсутствие неупругих процессов. Возникновение отщепленных состояний в запрещенной области исходного спектра в системах пониженной размерности, возникновение индуцированной туннельной проводимости. Роль интерференционных эффектов, эффект Фано.</p> <p>§4. Роль кулоновских корреляций при электронном транспорте через связанные наноструктуры. Модель Андерсона, кондовские корреляции. Проводимость через примесные комплексы в модели Хаббарда. Кулоновские корреляции экситонного типа, сингулярное поведение вольт-амперных характеристик. Отрицательная проводимость и</p>	8	5		13	<p>1 час Электронный спектр и волновые функции в модели Хаббарда для двух узлов.</p> <p>1 час Получение гамильтониана Кондо из модели Андерсона в приближении туннельного гамильтониана и слабой гибридизации.</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по теме «Неравновесный электронный транспорт через</p>		6
---	---	---	--	----	--	--	---

инверсная заселенность. §5. Влияние пространственной симметрии и способа подключения к резервуару связанных наноструктур на электронный транспорт. Появление темных и светлых состояний. Симметричная блокада туннельного тока.						взаимодействующие наноструктуры».		
<b>3. Нестационарный электронный транспорт в связанных наноструктурах</b> §6. Вывод кинетических уравнений с использованием различных подходов: диаграммной техники для неравновесных процессов и уравнений Гейзенберга. Характерные временные масштабы релаксационных процессов во взаимодействующих наноструктурах. Резонансный и нерезонансный электронный транспорт. Неадиабатический электронный насос. §7. Влияние кулоновских корреляций на кинетику зарядовых и спиновых состояний в связанных наноструктурах. Возникновение новых временных масштабов релаксации. Кинетика локализованного магнитного момента. Зависимость скорости релаксации от начального состояния. Анализ нестационарных спин-поляризованных токов.		3	3	2 часа Коллоквиум по теме «Неравновесный и нестационарный электронный транспорт через взаимодействующие наноструктуры»	6	1 час Сопоставление точных кинетических уравнений с приближенными балансными уравнениями.  7 часов Подготовка к коллоквиуму		8
<b>4. Перепутанные состояния в связанных наноструктурах</b> §8. Формирование одноэлектронных и многоэлектронных перепутанных состояний в связанных наноструктурах.		3	3		6	2 час Получить связь между степенью перепутанности двухэлектронных		4

<p>§9. Динамика перепутанных состояний в системе связанные наноструктуры - резервуар. Влияние характеристик резервуара и способа его подключения на кинетику перепутанных состояний. Изменение степени перепутанности при подключении системы к одному или нескольким резервуарам. Динамика спиновых корреляций.</p> <p>§10. Диагностика различных многоэлектронных зарядовых и спиновых состояний с помощью регистрации нестационарных спин-поляризованных токов, протекающих в управляющих электродах, и контроля за остаточным зарядом.</p>					<p>синглетных и триплетных состояний и спиновой автокорреляционной функции.</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «Перепутанные состояния в связанных наноструктурах».</p>		
<p><b>5. Неупругий электронный транспорт в связанных наноструктурах</b></p> <p>§11. Взаимодействие электронов с колебательными модами (фононами) при электронном транспорте через наноструктуры и одиночные молекулы. Гамильтониан электрон-фононного взаимодействия в рамках адиабатической схемы для систем сверхмалых размеров. Возникновение двух неупругих каналов для электронного транспорта через наноструктуры и интерференционные эффекты за счет электрон-фононного взаимодействия. Неупругая туннельная спектроскопия. Проводимость атомных цепочек. Возбуждение колебательных мод при протекании тока через наноструктуры.</p>	3	3		6	<p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «Неупругий электронный транспорт в связанных наноструктурах».</p>		2

§12. Флуктуации заряда и тока при электронном транспорте. Отклонение от пуассоновского и дробового шума. Зависимость спектров флуктуаций от приложенного напряжения. Флуктуации тока в присутствии электрон-фононного взаимодействия. Влияние кулоновского взаимодействия на спектр шума заряда и тока. Расширение спектра флуктуаций за счет Оже процессов. Возникновение фликкер шума в туннельных контактах за счет кулоновских корреляций экситонного типа.							
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>		4		4	15 часов Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).		15
<b>Итого</b>		18	16	2	36		36

\* 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 квантового центра.

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

1. Выпишите гамильтониан модели Андерсона с двумя взаимодействующими орбиталями.
2. В рамках адиабатической схемы выведите гамильтониан электрон-фононного взаимодействия при туннелировании через наноструктуру с одним электронным уровнем.
3. Кинетические уравнения для электронных чисел заполнения при туннелировании через одноуровневую наноструктуру.
4. Получить приближенное выражение для энергии связанных состояний, отщепленных от границ непрерывного спектра в 1D и 2D случаях.

5. Получите выражение для туннельного тока через наноструктуру с локализованными состояниями.
6. Условия возникновения отрицательной проводимости при туннелировании через двухуровневую наноструктуру с кулоновскими корреляциями.
7. Кинетические уравнения для электронных чисел заполнения в связанных наноструктурах.
8. Найти приближенные выражения для характерных времен релаксации заряда в двух связанных квантовых точках в резонансном и нерезонансном случае.
9. Определить спектр изолированной системы связанных квантовых точек, расположенных в вершинах правильного многоугольника.
10. Вольтамперные характеристики наноструктуры при наличии отрицательной туннельной проводимости.
11. Магнетизм в модели Андерсона.
12. Приведите простой пример «электронного» насоса.
13. Привести спектр флуктуаций тока на нулевой частоте при туннелировании через структуры с локализованными состояниями
14. Приведите пример экспериментальной схемы для диагностики двухэлектронных перепутанных состояний в системе двух квантовых точек.

#### ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

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

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

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

**УМЕТЬ:** анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий 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 и оптических технологий (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых и оптических технологий, 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 и оптических технологий (31, СПК-1).

ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (32, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, 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 и оптических технологий (В1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых и оптических технологий
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска,	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков	В целом успешное, но не систематическое	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое применение

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

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

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

		технологий	технологий		
<p><i>ЗНАТЬ:</i> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий (32, СПК-2).</p>	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий	Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых и оптических технологий

<b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (ЗЗ, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых и оптических технологий, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования
---	-------------------	---	---	---	--

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

Учебно-методическое пособие

Арсеев П.И., Маслова Н.С., Манцевич В.Н. «Основы процессов туннелирования в наноструктурах», Москва, Физический факультет МГУ, 2013

Маслова Н.С., Манцевич В.Н., Арсеев П.И., «Основные модели и методы описания нестационарного электронного транспорта в наноструктурах», Москва, Физический факультет МГУ, 2016

12. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и дополнительной учебной литературы

1. G.D. Mahan Many-Particle Physics Springer, 2000
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Курс теоретической физики, тома 3, 9, 10; М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012
3. P.I.Araseev, N.S.Maslova, Physics-Uspekhi 53(11), (2010)

4. П.И. Арсеев «О диаграммной технике для неравновесных систем: вывод, некоторые особенности и некоторые применения» УФН, 185(12), (2015)

#### **11. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»**

1. архив e-принтов <http://www.arxiv.org>
2. Сайт журналов Американского Физического Общества <http://prola.aps.org>
3. Сайт журнала «Письма ЖЭТФ» <http://www.jetpletters.ac.ru>

#### **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. Для большей части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте ЦКТ ФФ МГУ. Рекомендуется перед лекцией скачать соответствующую презентацию и иметь ее на интерактивном занятии на ноутбуке или планшете в режиме off-line или в распечатанном виде, используя как основу конспекта для собственных пометок и комментариев.

#### **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 «Особенности электронного транспорта в системах малых размеров с сильными кулоновскими корреляциями» 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.