

Лаборатория теоретической нанофизики

Годовой отчет за 2015 г.

1. Общая информация

1.1. Заведующий лаборатории

Фейгельман Михаил Викторович, д.ф.-м.н., профессор

Основное место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук

ResearcherID: M-4113-2013

Индекс Хирша (по Web of Science): 35

1.2 Краткое описание направлений деятельности лаборатории

Лаборатория специализируется на развитии теории квантовых транспортных процессов в твердотельных структурах субмикронных размеров. Основные направления исследований:

➤ **Мезоскопические электронные системы**, число частиц в которых слишком велико для того, чтобы применять уравнения квантовой механики, но слишком мало для использования статистики: флуктуации величин, характеризующих систему в целом, оказываются порядка их средних значений. В металлах характерным масштабом длины, разделяющим мезоскопические и макроскопические системы, является длина L_ϕ , на которой сохраняется фаза волновой функции электрона. В процессах, происходящих на размерах $L < L_\phi$, необходимо учитывать интерференционные эффекты от электронных волн, прошедших по различным возможным путям.

➤ **Сверхпроводящие гибридные структуры**. Физика обычных «низкотемпературных» сверхпроводников вполне хорошо изучена, если речь идет об однородном макроскопическом образце какого-либо металла или сплава. Если же мы имеем дело со сверхпроводниками очень малых (субмикронных) размеров, соединенными друг с другом микро-контактами, возникает масса удивительных эффектов, в которых чисто квантовомеханические явления проявляются на почти макроскопических масштабах. Очень интересные явления возникают в контактах сверхпроводников через слой ферромагнетика или через двумерный электронный газ в полупроводниковой гетероструктуре – все эти системы активно изучаются экспериментально в последние годы.

➤ **Квантовые фазовые переходы**. При изменении параметров – плотности электронов, внешнего магнитного поля, концентрации дефектов – тип основного состояния макроскопической квантовой системы может скачком изменяться. Такие явления называются квантовыми фазовыми переходами – в отличие от обычных переходов (например, из парамагнетика в ферромагнетик или из нормального металла в сверхпроводник), происходящих, как правило, при изменении температуры. Большой интерес вызывает проблема описания фазовых переходов между сверхпроводящим, металлическим и диэлектрическим основными состояниями в сильно неупорядоченных двумерных системах.

➤ **Спинтроника**. В последние несколько лет активно развивается новое научное направление с предполагаемым важнейшим техническим применением – спиновая электроника, или спинтроника. Речь здесь идет о переносе спинов электронов в твердотельных наноструктурах, и основанных на спиновом переносе системах передачи и обработки информации. Основным физическим объектом, с которым связано развитие спинтроники, являются полупроводниковые гетероструктуры с двумерным электронным газом. В самое последнее время начались

исследования спинового транспорта в гибридных структурах, содержащих как полупроводники так и сверхпроводники.

➤ **Двумерный электронный газ. Квантовый эффект Холла.** Двумерная электронная система может быть создана с помощью искусственной потенциальной ямы, в которой при низкой температуре заполнен только один квантовый уровень и электроны локализованы в поперечном к плоскости ямы направлении. Остальные две степени свободы образуют «двумерный мир», в котором живут электроны. В сильном перпендикулярном магнитном поле, в котором невзаимодействующие электроны находились бы на одном макроскопически вырожденном уровне Ландау, такая электронная система ведет себя как диэлектрик: диссипативный ток в ней отсутствует; при этом, однако, она имеет конечную холловскую проводимость: ток течет перпендикулярно приложенному электрическому полю. Причем существуют состояния, в которых – в зависимости от плотности электронов – холловская проводимость принимает квантованные значения и равна целым или специальным дробным долям универсальной квантовой величины. При этом сам ток может переноситься особыми квазичастицами, имеющими дробный заряд. При некоторой критической плотности электронов система ведет себя так, как будто бы никакого внешнего магнитного поля нет. Все эти эффекты вызваны взаимодействием электронов и случайно расположенными примесями.

➤ **Квантовый магнетизм и системы с «топологическим порядком».** Обычно обменное взаимодействие спинов магнитных ионов в решетке приводит к их упорядочению в ферро- или антиферро-магнитную структуру, характеризуемую дальним порядком. Это означает, что зная среднее направление локализованного магнитного момента в некотором узле решетки, можно определить, куда будет направлен магнитный момент в любом другом узле. Так всегда происходит в «квазиклассических» случаях, когда спин на каждом узле решетки велик по сравнению с минимальным возможным спином $1/2$. Однако в решетках из спинов $1/2$ квантовые флуктуации очень сильны, и в некоторых случаях даже при нулевой температуре никакой упорядоченной структуры не образуется. Такое состояние называют обычно спиновой жидкостью – в отличие от ферро- или антиферро-магнетика, аналогичных кристаллическим состояниям. Энтропия такой жидкости должна быть равна нулю (ведь мы сейчас обсуждаем случай нулевой температуры!). Настоящую теорию этого состояния еще предстоит построить.

➤ **Теория топологических изоляторов и топологических сверхпроводников.** Топологические изоляторы, а также топологические сверхпроводники сейчас активно изучаются во всем мире. Внутри своего объема такой материал является изолятором и его квантовая структура не допускает переноса электрических зарядов, но в тонком приповерхностном слое тот же материал становится проводником. Или, при охлаждении до низких температур, приобретает сверхпроводящие свойства. Этот эффект нельзя путать с классическим и описанным в курсе элементарной физики скин-эффектом: когда ток с возрастанием частоты начинает протекать преимущественно вблизи поверхности проводника. Внутри топологического изолятора заряд перемещаться не может в принципе, проводящий слой очень тонок, а его природа обусловлена сугубо квантовыми эффектами.

➤ **Физика квантовых вычислений.** Для реализации квантового вычисления надо научиться делать квантовые двоичные элементы (эквивалентные спинам $1/2$) вместо обычных классических двоичных ячеек 0,1, и управлять квантовыми состояниями этих элементов (их называют квантовыми битами, или сокращенно – кубитами) как поодиночке, так и парами из любых двух кубитов. При этом необходимо совместить два принципиально противоположных условия: с одной стороны, мы хотим иметь дело с большой квантовой системой (из многих кубитов), которая должна быть очень хорошо «заэкранирована» от любых посторонних взаимодействий с внешней средой. С другой стороны, мы должны уметь управлять (с большой точностью) значениями «полей», действующих на каждый кубит – для того чтобы реализовать

заданный алгоритм. Выполнить оба требования одновременно чрезвычайно сложно, и это потребует куда более глубокого понимания квантовой механики систем многих частиц, чем уже достигнуто физикой за последние десятилетия – а также и создания «квантовой инженерии», отличающейся от квантовой механики примерно так же, как теория машин и механизмов или сопромат отличаются от классической механики Ньютона и Лапласа.

2. Кадры

2.1 Кадровый состав лаборатории

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание	Должность	Трудоустройство в лаборатории (штатный сотрудник /совместитель)
1	Фейгельман Михаил Викторович	д.ф.м.н., профессор	в.н.с., зав. лаб.	совместитель
2	Загороднев Игорь Витальевич		н.с., зам. зав. лаб.	штатный
3	Мионов Сергей Викторович	к.ф.м.н.	н.с.	штатный
4	Аванесова Ирина Владимировна		инженер	штатный
5	Александров Дмитрий Анатольевич		м.н.с.	совместитель
6	Иоселевич Алексей Соломонович	д.ф.м.н., доцент	в.н.с.	совместитель
7	Скворцов Михаил Андреевич	д.ф.м.н., доцент	в.н.с.	совместитель
8	Махлин Юрий Генрихович	член-корреспондент РАН, д.ф.м.н., доцент	в.н.с.	совместитель
9	Фоминов Яков Викторович	к.ф.м.н., доцент	с.н.с.	совместитель
10	Тихонов Константин Сергеевич	к.ф.м.н.	м.н.с.	совместитель
11	Шарафутдинов Азат Уралович		инженер	совместитель
12	Побойко Игорь Валерьевич		инженер	совместитель
13	Степанов Николай Анатольевич		инженер	совместитель
14	Антоненко Даниил Сергеевич		инженер	совместитель
15	Репин Евгений Витальевич		инженер	совместитель
16	Светогоров Александр Егорович		инженер	совместитель
17	Сивак Владимир Владимирович		техник	совместитель
18	Лункин Алексей Владимирович		техник	совместитель
19	Курилович Владислав		техник	совместитель

	Даниилович			
20	Курилович Павел Даниилович		техник	совместитель
21	Строганов Павел Леонидович		техник	совместитель
22	Мазаник Андрей Аркадьевич		техник	совместитель

2.2 Сотрудники иных подразделений, привлекавшиеся к работе лаборатории¹

№	ФИО	Ученая степень, ученое звание	Должность	Основное подразделение МФТИ, куда зачислен сотрудник
1	Бурмистров Игорь Сергеевич	д.ф.м.н.	с.н.с.	лаборатория топологических квантовых явлений в сверхпроводящих системах

Также к работе лаборатории привлекались

2	Баско Денис Михайлович	д.ф.м.н.	Centre National de la Recherche Scientifique, Grenoble, Франция
3	Гершензон Михаил Евгеньевич	д.ф.м.н.	Rutgers University, США
4	Капустин Александр Альбертович	к.ф.м.н.	Институт физики твердого тела РАН
5	Дорожкин Сергей Иванович	д.ф.м.н.	Институт физики твердого тела РАН

3. Основные результаты работы лаборатории за 2015 г.

В данном разделе должно быть приведено описание результатов деятельности лаборатории за текущий год. Описание должно включать 1-2 страницы текстовой информации об этапах развития основных направлений деятельности лабораторий в текущем году.

Раздел 3.1. Научные исследования.

Показано существование нового канала неупругого электрон-фононного взаимодействия, связанного с наличием медленно диффундирующей моды - плотности тепловой энергии [1]. Это может приводить к существенному увеличению скорости распада фононов с энергиями много меньшей тепловой. Предсказанный эффект исследован для допированных полупроводников, а также обычных и d-волновых сверхпроводников.

Исследована зависимость сверхтекучей плотности сверхпроводника с псевдощелью от величины сверхпроводящей щели в нем [2]. Показано, что эта зависимость

¹ Сотрудники иных подразделений, которым было выплачено вознаграждение из средств Вашей лаборатории по смете Программы 5-100 МФТИ.

квадратичная, в отличие от обычной для грязных сверхпроводников линейной зависимости. Тем самым, предсказывается аномально малая сверхтекучая плотность для сверхпроводников с псевдощелью, т.е. аномально большая кинетическая индуктивность пленок из таких сверхпроводников.

Исследованы динамические свойства SNS перехода с заданной разностью фаз сверхпроводников на двух берегах под действием слабого высокочастотного внешнего напряжения [3]. Использован главным образом аналитический метод, основанный на решении нестационарного уравнения Узалея. Вычислена вещественная и мнимая части линейной высокочастотной проводимости $Y(\omega)$ как функции статической разности фаз Φ при произвольном соотношении между частотой ω , температурой T , энергией Таулеса E_T , но предполагая, что все эти величины малы по сравнению со щелью Δ в спектре сверхпроводника. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментом.

Исследована проводимость мезоскопического кольца, изготовленного из грязного сверхпроводника InO_x в магнитном поле [4]. На фоне гладкой зависимости, хорошо выделяемы осцилляции с периодом, независящим от величины магнитного поля. Даже в нормальном состоянии кольца, период этих осцилляций отвечает заряду $2e$ куперовской пары. Было обнаружено, что осцилляции не исчезают на более чем 90 периодах, выживая даже в изоляторном состоянии в полях вплоть до 12 Тл, что демонстрирует важность куперовского спаривания для переноса заряда в InO_x в широком диапазоне температур и магнитных полей за пределами сверхпроводящего состояния.

Исследован род сверхпроводящего перехода в игле туннельного микроскопа в магнитном поле [5]. Проанализирована модель конической иглы из неупорядоченного сверхпроводника. В рамках уравнения Узалея теоретически предсказано, что разрушение сверхпроводимости магнитным полем параллельным образующей конуса происходит первым родом при малых углах раствора конуса и вторым родом при больших углах раствора, что наблюдалось в экспериментах. Пространственно неоднородное решение уравнения Узалея проявляется в виде уширения особенностей плотности состояний.

Построена теория сверхпроводящего эффекта близости в гетероструктурах, содержащих слой полуметалла (half-metal) [6]. Показано, что полная спиновая поляризация в полуметалле приводит к гигантскому триплетному эффекту спинового вентилля в трехслойных системах сверхпроводник (S) – ферромагнетик (F) – полуметалл (НМ) а также к формированию фи-контакта в системах S/F/НМ/F/S. Полученные результаты находятся в качественном согласии с недавними экспериментальными данными.

В недавних экспериментах с модифицированным сверхпроводящим спиновым клапаном $CoO_x/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb$ оказалось, что введение слоя меди между слоями Fe2 и Pb, предотвращая взаимную диффузию, стабилизирует и улучшает свойства системы. Нами проведен теоретический анализ поведения критической температуры системы в рамках модели сверхпроводящего триплетного спинового клапана с учетом прозрачности границ [7]. Показано, что полученные данные могут быть интерпретированы как результат увеличения эффективной прозрачности Fe2/Pb границы.

Сделан обзор недавних экспериментов по реализации сверхпроводящего триплетного спинового клапана [8]. Теоретический анализ полученных результатов демонстрирует хорошее качественное согласие теории и эксперимента.

Измерения удельной энтропии двумерных электронных систем, образующихся на границе гетероструктуры GaAs/AlGaAs и полевого транзистора на основе оксида кремния, показали, что в области слабых магнитных полей и больших концентраций хорошо работает теория Лифшица-Косевича для невзаимодействующих электронов. В области же малых концентраций и не слишком низких температур обнаружены существенные отклонения от результатов, получающихся из теории ферми-жидкости [9-11].

Изучено поведение мезоскопических флуктуаций локальной плотности состояний в неупорядоченной взаимодействующей электронной системе около перехода металл-изолятор [12]. Показано, что мультифрактальное поведение локальной плотности состояний выживает несмотря на присутствие кулоновского взаимодействия. Вычислен спектр соответствующих мультифрактальных индексов в размерности $2+\varepsilon$ для нескольких симметричных случаев (классы A, AI, AII). Полученные результаты находятся в качественном согласии с экспериментальными данными по туннельной спектроскопии.

Вычислено транспортное сечение рассеяния электронов на круглом наноотверстии в графене, которое поддерживает краевые состояния [13]. Показано, что локальная плотность состояний и зависимость проводимости от напряжения на затворе таких структур имеет резонансный характер. Амплитуда рассеяния вблизи резонансных энергий асимметрична по долинам, что приводит к долинному эффекту Холла.

Детально исследована туннельная плотность состояний в квантовых точках и наночастицах, описываемых модельным гамильтонианом, который является расширением универсального гамильтониана на случай одноосного анизотропного обмена [14]. Получена точная аналитическая формула для туннельной плотности состояний в случае произвольной анизотропии. Показано, что также, как и в случае изотропного обмена, туннельная плотность состояний как функция энергии имеет один дополнительный максимум, связанный с наличием конечного значения спина в основном состоянии.

Для маленькой ферромагнитной частицы и/или квантовой точки около стоунеровской неустойчивости изучена динамика полной намагниченности в присутствии туннельной связи с металлическим резервуаром [15]. Обобщено действие Амбегаокара-Эккерна-Шона и соответствующие уравнения движения, известные для зарядовой степени свободы ($U(1)$ случай), на случай намагниченности ($SU(2)$). Ланжевеновские силы в этих уравнениях определяются геометрической фазой. С помощью уравнений Ланжевена показано, что низкотемпературная диффузия намагниченности на сфере Блоха определяется геометрической фазой.

Исследован адмиттанс маленького металлического островка, соединенного ёмкостным образом с затвором и многоканальным туннельным контактом с резервуаром [16]. Наличие переменного напряжения на затворе приводит к появлению переменного тока через туннельный контакт. Рассмотрен режим неупругого сотуннелирования, в котором диссипация энергии определяется рождением электрон-дырочных пар на островке. Показано, что при конечной температуре в пределе низких частот диссипация омическая, а при нулевой температуре супер-омическая. Получено, что сопротивление зарядовой релаксации имеет сильную температурную зависимость, а мнимая и действительные части адмиттанса не удовлетворяют соотношению Корринги-Шиба. При нуле температур сопротивление зарядовой релаксации обращается в нуль.

Изучено влияние индуцированной беспорядком андерсоновской локализации и межэлектронного взаимодействия на сверхпроводимость в двумерных системах [17].

Получены оценки для температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c , температурной зависимости сопротивления, магнитосопротивления; построена фазовая диаграмма. Проведенный анализ основан на ренормгрупповом подходе к нелинейной сигма модели Финкельштейна. Впервые получены уравнения ренормгруппы, в которых в низшем порядке по беспорядку взаимодействие в куперовском канале учтено во всех порядках. Рассмотрены системы с нарушенной вращательной симметрией в спиновом пространстве. В случае короткодействующего отталкивания в канале частица-дырка оценена область параметров, в которой можно ожидать увеличение сверхпроводящей температуры. Анализ уравнений ренормгруппы в случае перпендикулярного магнитного поля приводит к сильной магнетосопротивлению при температурах ниже T_c .

Изучена теплоемкость взаимодействующей неупорядоченной электронной системы с нарушенной симметрией по отношению к обращению времени в рамках двухпетлевого приближения ренормализационной группы [18]. С помощью подхода нелинейной сигма модели в двухпетлевом приближении вычислена аномальная размерность оператора Финкельштейна, который контролирует скейлинг теплоемкости с температурой. Показано, что в отличие от невзаимодействующей задачи с учетом двухпетлевого вклада абсолютное значение аномальной размерности оператора Финкельштейна отличается от аномальной размерности оператора, определяющего скейлинг второго момента локальной плотности состояний. Полученные результаты применены к переходу металл-изолятор в размерности $d=2+\epsilon$.

В модели Бозе-Кондо развит функционально-интегральный подход, из седловой точки теории получен темп спиновой релаксации [19]. Показано, что в случае омического спектра флуктуации вокруг седловой точки не дают вклада в корреляционные функции, включающие только одну компоненту спина. Вычислена четырехточечная корреляционная функция спинов, соответствующая шуму восприимчивости.

Произведен анализ плотности состояний в нулевом магнитном поле для состояний на поверхности 3D топологического изолятора с учетом тригонального искажения [20]. Показано, что из-за тригонального искажения в плотности состояний имеется одна или несколько логарифмических особенностей. В рамках теории возмущений и в квазиклассическом приближении проанализирована структура уровней Ландау. Полученные результаты были подтверждены с помощью численной диагонализации гамильтониана и находятся в согласии с экспериментом.

Исследованы магнитные осцилляции сопротивления очень чистого полого цилиндра, вдоль которого проходит магнитный поток [21]. Показано, что даже небольшие флуктуации радиуса цилиндра (не дающие вклада в длину свободного пробега) приводят к подавлению стандартных для чистого образца осцилляций с периодом $2\Phi_0$. При этом осцилляции с периодом Φ_0 , обычно характерные для грязных систем, выживают.

1. A.V. Shtyk and **M.V. Feigel'man** "Ultrasonic attenuation via energy diffusion channel in disordered conductors", *Phys. Rev. B* **92**, 195101 (2015).
2. **M.V. Feigel'man** and L.B. Ioffe "Superfluid density of a pseudogapped superconductor near the superconductor-insulator transition", *Phys. Rev. B* **92**, 100509 (2015).
3. **K.S. Tikhonov**, **M.V. Feigel'man** "Admittance of a long diffusive SNS junction", *Phys. Rev. B* **91**, 054519 (2015).
4. D. Gurovich, **K.S. Tikhonov**, D. Mahalu, D. Shahar "Little-Parks oscillations in a single ring in the vicinity of the superconductor-insulator transition", *Phys. Rev. B* **91**, 174505 (2015).

5. M. Eltschka, B. Jack, M. Assig, O.V. Kondrashov, **M.A. Skvortsov**, M. Etzkorn, C.R. Ast, K. Kern "Superconducting scanning tunneling microscopy tips in a magnetic field: Geometry-controlled order of the phase transition", *Appl. Phys. Lett.* **107**, 122601 (2015).
6. **S. Mironov** and A. Buzdin "Triplet proximity effect in superconducting heterostructures with a half-metallic layer", *Phys. Rev. B* **92**, 184506 (2015).
7. P.V. Leksin, N.N. Garif'yanov, A.A. Kamashev, **Ya.V. Fominov**, J. Schumann, C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, I.A. Garifullin "Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in $\text{CoO}_x/\text{Fe1}/\text{Cu}/\text{Fe2}/\text{Cu}/\text{Pb}$ multilayer", *Phys. Rev. B* **91**, 214508 (2015).
8. I.A. Garifullin, P.V. Leksin, N.N. Garif'yanov, A.A. Kamashev, **Ya.V. Fominov** et al. "The superconducting spin valve and triplet superconductivity" *J. Magn. Magn. Mater.* **373**, 18 (2015).
9. V.M. Pudalov, A.Yu. Kuntsevich, **I.S. Burmistrov**, M. Reznikov "Thermodynamic Studies of Two-Dimensional Correlated Electron Systems", *Journal of Low Temp. Phys.* **181**, 99 (2015).
10. Y. Tupikov, A.Yu. Kuntsevich, V.M. Pudalov, **I.S. Burmistrov** "Temperature derivative of the chemical potential and its magnetooscillations in two-dimensional system", *JETP Lett.* **101**, 131 (2015).
11. A.Yu. Kuntsevich, Y.V. Tupikov, V.M. Pudalov, **I.S. Burmistrov**, "Strongly correlated two-dimensional plasma explored from entropy measurements", *Nature Commun.* **6**, 7298 (2015).
12. **I.S. Burmistrov**, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin, "Multifractality and electron-electron interaction at Anderson transitions", *Phys. Rev. B* **91**, 085427 (2015).
13. **I.V. Zagorodnev**, Zh.A. Devizorova, V.V. Enaldiev "Resonant electron scattering by a graphene antidot", *Phys. Rev. B* **92**, 195413 (2015).
14. A.U. Sharafutdinov, **I.S. Burmistrov**, "Tunneling density of states in quantum dots with anisotropic exchange", *Phys. Rev. B* **92**, 035439 (2015).
15. A. Shnirman, Y. Gefen, A. Saha, **I.S. Burmistrov**, M.N. Kiselev, A. Altland "Geometric quantum noise of spin", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 176806 (2015).
16. **I.S. Burmistrov**, Ya.I. Rodionov "Charge relaxation resistance in the cotunneling regime of multi-channel Coulomb blockade: Violation of Korrynga-Shiba relation", *Phys. Rev. B* **92**, 195412 (2015).
17. **I.S. Burmistrov**, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance", *Phys. Rev. B* **92**, 014506 (2015).
18. **I.S. Burmistrov** "Two-loop renormalization of the Finkel'stein theory: The specific heat", *Ann. Phys.* (принята в печать 03.11.2015, доступна онлайн, doi:10.1016/j.aop.2015.11.001).
19. P. Schad, **Yu. Makhlin**, B.N. Narozhny, G. Schön, and A. Shnirman "Majorana representation for dissipative spin systems", *Ann. Phys.* **361**, 401 (2015).
20. **E.V. Repin**, **I.S. Burmistrov** "Surface states in a 3D topological insulator: The role of hexagonal warping and curvature", *JETP* **148**, 584 (2015).
21. **A.S. Ioselevich** "Oscillations of magnetoresistance in a clean hollow cylinder with fluctuating radius", *JETP Letters* **101**, 390 (2015).

Раздел 3.2. Образовательная и научно-популярная деятельность.

Лаборатория принимает активное участие в организации научно-образовательных семинаров и коллоквиумов МЦФИ. Так, организованы и проведены семинары:

1. Д. Баско – доцент университета Джозефа Фурье и исследователь из Neel Institute (Grenoble, France)
2. М. Гершензон – профессор Rutgers University (New Jersey, USA)
3. С. Миронов – с 01 июля штатный сотрудник лаборатории теоретической нанофизики МФТИ (до 2015 г postdoc Université Bordeaux, France).

В декабре 2015 г. также запланирована лекция В. Кравцова - зав. отделом теории конденсированного состояния Международного центра теоретической физики (ICTP) в Триесте (Италия).

В весеннем семестре 2015 г. были организованы спецкурсы для студентов старших курсов и аспирантов, читавшиеся приглашенными лекторами из зарубежных институтов

1. "Теория квантового транспорта», лектор - Д. Баско, доцент университета Джозефа Фурье и исследователь из Neel Institute (Grenoble, France). 8 лекций, материалы курса доступны на web-странице лаборатории https://mipt.ru/science/labs/theoretical_nanophysics_lab.
2. "Symmetry, Topology and Coherence in Condensed Matter Physics", лектор - профессор MIT, известный физик-теоретик Л. Левитов. 12 лекций и 12 семинаров на английском языке, информация о курсе и некоторые материалы доступны на web-странице <https://stellar.mit.edu/S/project/symmetry/index.html>

Сотрудники лаборатории принимают активное участие в образовательном процессе МФТИ:

1. Ю.Г. Махлин ведет курс по диаграммной технике (осенний семестр 2015 г.)
2. М.А. Скворцов читал курс лекций "Функциональные интегралы в теории твердого тела" для студентов 5 курса (весенний семестр 2015 г.)
3. И.С. Бурмистров читал семестровый курс «Квантовая мезоскопика. Целочисленный квантовый эффект Холла», для студентов 5-го курса. Им также разработан принципиально новый курс «Квантовые явления в наноструктурах», для студентов 5-го курса кафедры «Физика и технология наноструктур»
4. Я.В. Фоминов вел курс лекций "Транспорт в мезоскопических системах" для студентов 5-го курса.
5. К.С. Тихонов ведет курс "Задачи по квантовой механике" для 3-курсников
6. А.С. Иосилевич читает курс "Теория протекания и фракталы" для 3-курсников
7. И.В. Загороднев в весеннем семестре вел семинары и лабораторные работы на кафедре общей физики МФТИ
8. Силами сотрудников Лаборатории организованы факультетские лекции (М.В. Фейгельман, М.А. Скворцов, Я.В. Фоминов и др.) и семинары (И.В. Побойко, Н.А. Степанов, А.Е. Светогоров) "Приближенные методы аналитических вычислений" для студентов 2-го курса ФОПФ МФТИ.

При активном участии сотрудников Лаборатории успешно продолжена работа по реконструкции учебного плана курса общей физики 6-го семестра для ФОПФ. Обновленный курс был впервые реализован в весеннем семестре 2015 г. По результатам семестра была проведена его коррекция и доработка. Таким образом, подготовлен окончательный вариант обновленного курса, который будет прочитан в весеннем семестре 2016 г.

Наконец, сотрудники Лаборатории в данный момент осуществляют руководство 11-ю студентами на кафедре "Проблемы теоретической физики" ФОПФ МФТИ.

4. Планы деятельности лаборатории на следующие 2016-2017 гг

В данном разделе необходимо отразить план работ лаборатории на 2016-2017 гг. Описание плана работы лаборатории должно включать 1-2 страницы текстовой информации об этапах развития основных направлений деятельности лаборатории на следующие 2016-2017 гг с обоснованием актуальности продолжения (или начала) работ.

Раздел 4.1. Научные исследования

В ближайшие годы предполагается продолжить исследования по всем научным направлениям работы лаборатории, перечисленным в разделе 1.2. Актуальность данных тем связана в первую очередь с фундаментальными физическими проблемами, лежащими в их основе, но имеет также и прикладной характер, связанный с развитием новых устройств электроники, основанных на новых принципах: квантовые компьютеры, спинтроника,

valleytronica, сверхпроводящая электроника и т.д.. Кроме того, актуальность исследований подтверждается регулярными публикациями сотрудников лаборатории в высокорейтинговых журналах.

Приведем ниже конкретные научные планы на ближайшее время.

Запланированы исследования теплопроводности одномерной цепочки спинов $\frac{1}{2}$ с анизотропным взаимодействием (разным для z-z компонент спинов и их компонент в плоскости x-y) и случайным полем, направленным вдоль оси z в области параметров, соответствующих достаточно сильному взаимодействию z-z компонент, когда рассеяние квазичастиц (спинов) малых энергий на случайном поле подавлено из-за квантовых флуктуаций.

Представляет интерес исследование джозефсоновского тока через контакт между обычным и топологическим сверхпроводниками (S-TS контакт). Можно ожидать (в наиболее простых моделях такого контакта), что критический ток будет сильно подавлен по сравнению с обычным выражением для туннельного контакта (т.к. содержит более высокую степень малой прозрачности барьера). Планируется вычислить величину критического тока в зависимости от параметров контакта и величины сверхпроводящих щелей. Эта же задачу можно исследовать и методами теории случайных матриц, в которой следует ожидать, что для S-TS контакта общего вида подобного подавления критического тока не имеется. Ток-фазовая зависимость в таком случае должна иметь аномальный вид.

Планируется рассмотреть гексагональную модель Китаева во внешнем магнитном поле в четвертом порядке по величине поля h_z и вычислить спиновую корреляционную функцию. Ожидается, что в отличие от ранее полученного результата (Тихонов, Фейгельман, Китаев 2011 во втором порядке) коническая точка фермионного спектра сдвинется на величину порядка h_z^2 . Этот эффект может быть также представлен как результат включения векторного потенциала $A \sim h_z^2$ в дираковский гамильтониан фермионов.

Планируется исследовать плотность состояний в диффузных сверхпроводниках с магнитными примесями, подчиняющимися статистике Пуассона. Таким образом могут быть описаны примеси произвольной силы. Теория среднего поля предсказывает нетривиальную структуру плотности состояний, содержащую континуум квазичастичных состояний, а также, возможно, примесную зону. В этом приближении все края спектра являются жесткими и обозначают четкие границы между областями конечной и нулевой плотности состояний. Однако, имеются эффекты, которые не учитываются приближением среднего поля. В результате некоторых оптимальных флуктуаций расположения примесей локально состояния могут возникать и вне краев спектра. После усреднения это приводит к размытию жестких краев и появлению подщелевых состояний. Мы планируем изучить этот механизм и вычислить плотность подщелевых состояний.

Для спин-бозонной модели использование майорановского представления спиновых операторов позволяет получить корреляторы поперечных компонент спина в низшем порядке теории возмущений. Однако для продольной компоненты соответствующее выражение приводит к неверному результату на больших временах. Предполагается развить методы вычисления, позволяющие избежать этой проблемы и вычислять спиновые корреляторы удобным образом. Ожидается, что высокая точность уже в низшем порядке будет достигнута, если избегать использования продольного майорановского фермиона. При этом корреляторы остальных, поперечных майорановских фермионов должны легко вычисляться с использованием эффективного гауссова действия.

Будет рассмотрена нестационарная система проводников, сопротивления между которыми испытывают сильные флуктуации во времени. Транспорт между парой соседних проводников определяется теми моментами, когда соответствующее сопротивление аномально мало (проводники "касаются друг друга"). В такие моменты возникает "пробой" и заряд легко перетекает между парой соприкоснувшихся проводников. Планируется рассмотреть, как трехмерные, так и низкоразмерные массивы проводников и исследовать проводимость системы, растекание заряда, первоначально сосредоточенного на одном проводнике, а также флуктуации зарядов и электрических полей, их пространственно-временную корреляцию. Данная система

может реализовываться в коллоидных растворах и системах металлических шариков, соединенных деформируемыми полимерными молекулами.

Запланированы исследования электронного транспорта на краю двумерного топологического изолятора в режиме, когда часть каналов топологически защищена от рассеяния назад. В приближении большого полного числа каналов край можно рассматривать как квазиодномерный квантовый провод и описывать его в терминах нелинейной сигма модели с топологическим членом. Пренебрегая эффектами локализации, будет вычислена средняя функция распределения коэффициентов прохождения как функция длины образца и подробно разобраны экспериментально наиболее важные случаи контакта между двумя состояниями квантового эффекта Холла с различными числами заполнения и относительно толстой квантовой ямы, демонстрирующей квантовый спин-Холл эффект.

Будет исследовано время жизни слабо подкритичного сверхтокового состояния в джозефсоновских контактах за счёт квантовых флуктуаций. Вероятность распада определяется действием инстантонной траектории для разности фаз на переходе. При низких температурах динамика фазы является массивной и определяется эффективной емкостью, которую можно представить в виде суммы геометрической и внутренней емкостей контакта. Будут рассмотрены две модели джозефсоновского контакта: произвольный короткий проводник с заданным набором прозрачностей и диффузный провод произвольной длины.

Планируется построить теорию сверхпроводящих джозефсоновских ϕ -контактов с перестраиваемой величиной спонтанной разности фаз для широкого класса систем, содержащих слой полуметалла, нанопроволоки, абрикосовские вихри и токовые инжекторы. Будут изучены особенности ток-фазовых характеристик таких контактов, рассчитаны интервалы возможной перестройки разности фаз и определены параметры, оптимальные для экспериментальной реализации ϕ -состояний. Также будут сформулированы предложения по использованию данных систем в устройствах вычислительной микроэлектроники.

Раздел 4.2. Образовательная и научно-популярная деятельности

Лаборатория продолжит активное участие в организации научных семинаров и коллоквиумов МЦФИ, а также лекций и курсов лекций приглашенных профессоров.

Будет продолжено и по возможности расширено сотрудничество с кафедрой общей физики и кафедрой теоретической физики МФТИ.

Раздел 4.3 Развитие кадрового потенциала

Планируется продолжить политику увеличения числа штатных сотрудников лаборатории. Кроме того, большие усилия прикладываются для скорейшего вовлечения студентов старших курсов и аспирантов в мир современных научных исследований в области теоретической физики.

5. Плановые результаты и показатели деятельности лаборатории

5.1 Достижение плановых показателей деятельности лаборатории

№	Наименование показателя	2015	
		План	Факт
1	Количество публикаций в журналах с импакт-фактором не ниже 2,5 (по <i>Journal Citation Reports</i>), индексируемых <i>Web of Science</i> , не менее	10	16
2	Суммарный импакт-фактор публикаций в журналах с импакт-фактором не ниже 2,5 (по <i>Journal Citation Reports</i>), индексируемых <i>Web of Science</i> , не менее	40	69.018
3	Количество планируемых докладов сотрудников лаборатории на международных конференциях, не менее	7	25
4	Объем самостоятельно привлекаемых грантов и контрактов, млн. руб., не менее	3.0	4.0
5	Количество защит кандидатских диссертаций, не менее	1	1 (защита А.У. Шарафутдинова назначена на 25 декабря 2015 г.)
6	Количество защищенных дипломных работ (бакалаврских и магистерских), не менее	1	2

5.2 Расшифровка достигнутых показателей деятельности лаборатории

выходные данные статей с указанием импакт-фактора журнала:

1. **M.V. Feigel'man** and L.B. Ioffe "Superfluid density of a pseudogapped superconductor near the superconductor-insulator transition", *Phys. Rev. B* **92**, 100509 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
2. A.V. Shtyk and **M.V. Feigel'man** "Ultrasonic attenuation via energy diffusion channel in disordered conductors", *Phys. Rev. B* **92**, 195101 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
3. **K.S. Tikhonov**, **M.V. Feigel'man** "Admittance of a long diffusive SNS junction", *Phys. Rev. B* **91**, 054519 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
4. D. Gurovich, **K.S. Tikhonov**, D. Mahalu, D. Shahar "Little-Parks oscillations in a single ring in the vicinity of the superconductor-insulator transition", *Phys. Rev. B* **91**, 174505 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
5. **I.V. Zagorodnev**, Zh.A. Devizorova, V.V. Enaldiev "Resonant electron scattering by a graphene antidot", *Phys. Rev. B* **92**, 195413 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
6. **S. Mironov** and A. Buzdin "Triplet proximity effect in superconducting heterostructures with a half-metallic layer", *Phys. Rev. B* **92**, 184506 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
7. M. Eltschka, B. Jack, M. Assig, O.V. Kondrashov, **M.A. Skvortsov**, M. Etzkorn, C.R. Ast, K. Kern "Superconducting scanning tunneling microscopy tips in a magnetic field: Geometry-controlled order of the phase transition", *Appl. Phys. Lett.* **107**, 122601 (2015). (импакт-фактор журнала 3.515)
8. P.V. Leksin, N.N. Garif'yanov, A.A. Kamashev, **Ya.V. Fominov**, J. Schumann, C. Hess, V. Kataev, B. Büchner, I.A. Garifullin "Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in CoO_x/Fe1/Cu/Fe2/Cu/Pb multilayer", *Phys. Rev. B* **91**, 214508 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)

9. A.Yu. Kuntsevich, Y.V. Tupikov, V.M. Pudalov, **I.S. Burmistrov**, "Strongly correlated two-dimensional plasma explored from entropy measurements", *Nature Commun.* **6**, 7298 (2015). (импакт-фактор журнала 10.742)
10. **I.S. Burmistrov**, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin, "Multifractality and electron-electron interaction at Anderson transitions", *Phys. Rev. B* **91**, 085427 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
11. A.U. Sharafutdinov, **I.S. Burmistrov**, "Tunneling density of states in quantum dots with anisotropic exchange", *Phys. Rev. B* **92**, 035439 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
12. A. Shnirman, Y. Gefen, A. Saha, **I.S. Burmistrov**, M.N. Kiselev, A. Altland "Geometric quantum noise of spin", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 176806 (2015). (импакт-фактор журнала 7.728)
13. **I.S. Burmistrov**, Ya.I. Rodionov "Charge relaxation resistance in the cotunneling regime of multi-channel Coulomb blockade: Violation of Korringa-Shiba relation", *Phys. Rev. B* **92**, 195412 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
14. **I.S. Burmistrov**, I.V. Gornyi, A.D. Mirlin "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance", *Phys. Rev. B* **92**, 014506 (2015). (импакт-фактор журнала 3.664)
15. **I.S. Burmistrov** "Two-loop renormalization of the Finkel'stein theory: The specific heat", *Ann. Phys.* (принята в печать 03.11.2015, доступна онлайн <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003491615003978>, doi:10.1016/j.aop.2015.11.001). (импакт-фактор журнала 3.065)
16. P. Schad, **Yu. Makhlin**, B.N. Narozhny, G. Schön, and A. Shnirman "Majorana representation for dissipative spin systems", *Ann. Phys.* **361**, 401 (2015). (импакт-фактор журнала 3.065)

перечень докладов сотрудников лаборатории на международных конференциях

М.В. Фейгельман:

1. Mechanisms and Materials of Superconductivity (M2S), Geneva, 23-28 August 2015, приглашенный доклад <http://www.m2s-2015.ch/program.php>.
2. 5th International Conference Fundamental Problems of High Temperature Superconductivity, приглашенный доклад (Малаховка, Московская обл., 5-9 октября 2015) <http://fps15.lebedev.ru/ru/program/>.

С.В. Миронов:

3. "Triplet proximity effect in superconducting heterostructures with a half-metallic layer", oral talk at the International Conference "Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems" (2-4 сентября 2015, г. Москва).
4. "Triplet spin-valve effect in layered superconductor/ferromagnet/half-metal systems", oral talk at the 5th International Conference Fundamental Problems of High Temperature Superconductivity (Малаховка, Московская обл., 5-9 октября 2015).

И.В. Загороднев:

5. International conference on localization, interactions and superconductivity, стендовый доклад "Resonant electron scattering on a graphene nanohole", (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черногловка, Московской обл.).
6. XIX International Symposium "Nanophysics and Nanoelectronics" стендовый доклад "Resonant electron scattering on a graphene nanohole", (10–14 марта 2015, г. Нижний Новгород).

К.С. Тихонов:

7. Workshop "Localization, interactions, and superconductivity", Россия, г. Черногловка, июль 2015, устный доклад "Numerical study of spectrum and eigenfunction statistics on disordered random regular graphs" (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черногловка, Московской обл.).

И.С. Бурмистров:

8. V International conference "Fundamental problems of high temperature superconductivity", Россия, Московская обл., Малаховка, октябрь 2015, устный доклад "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance"

9. Workshop "Localization, interactions, and superconductivity", Россия, г. Черногловка, 29 июня – 3 июля 2015, устный доклад "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance"
10. XIX International Symposium "Nanophysics and Nanoelectronics", устный доклад "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance" (10–14 марта 2015, г. Нижний Новгород)
11. XIX International Symposium "Nanophysics and Nanoelectronics", доклад "Multifractality at Anderson transitions with Coulomb interaction" (10–14 марта 2015 г, г. Нижний Новгород)
12. International conference "Landau Days", Россия, Московская обл., г. Черногловка, 29 июня – 3 июля 2015, устный доклад "Multifractality at Anderson transitions with Coulomb interaction"

М.А. Скворцов:

13. Workshop "Quantum Matter and Quantum Devices", (Дельфт, Нидерланды 29.04-01.05.2015) приглашенный доклад "Electromagnetic response of strongly disordered superconductors" <http://casimir.researchschool.nl/workshop-quantum-matter-and-quantum-devices-register-now-only--places-left--2467.html>.
14. International workshop "Superconductivity on the Verge" (Лейден, Нидерланды 27-31.07.2015; 45 чел.), приглашенный доклад "Superfluid density in inhomogeneous superconductors" <https://www.lorentzcenter.nl/lc/web/2015/692/info.php3?wsid=692&venue=Oort>)

Ю.Г. Махлин:

15. Topology and Superconductivity 2015 Symposium in honor of the 70th anniversary of Vladimir Mineev, November 27, 2015, Grenoble, France, приглашенный доклад "Superfluid ^3He : topology in the bulk and boundary states" <http://inac.cea.fr/Pisp/mike.zhitomirsky/TS2015.html>
16. Workshop "Localization, interactions, and superconductivity", Россия, г. Черногловка, 29 июня – 3 июля 2015, устный доклад "Superconductor-insulator transitions: Phase diagram and magnetoresistance"

Д.С. Антоненко

17. Workshop Quantum Matter and Quantum Devices, Delft, April 29th – May 1st, 2015 oral talk "Quantum decay of supercurrent in Josephson junctions beyond the tunnel limit" <http://casimir.researchschool.nl/workshop-quantum-matter-and-quantum-devices-register-here--2467.html>
18. Workshop "Localization, interactions, and superconductivity", Россия, г. Черногловка, 29 июня – 3 июля 2015, стендовый доклад "Quantum decay of supercurrent in Josephson junctions beyond the tunnel limit"

И.В. Побойко

19. Workshop Quantum Matter and Quantum Devices, Delft, April 29th – May 1st, 2015 poster "Transport in 1D spin chains"
20. International conference on localization, interactions and superconductivity, стендовый доклад "Transport in 1D spin chains", (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черногловка, Московской обл.).

А.Е. Светогоров

21. Workshop Quantum Matter and Quantum Devices, Delft, April 29th – May 1st, 2015 poster "Noise influence on the coherent dynamics of two-level systems (qubits)"
22. International conference on localization, interactions and superconductivity, стендовый доклад "Noise influence on non-adiabatic geometric phase of two-level system (qubit)", (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черногловка, Московской обл.).

Е.В. Репин

23. XIX International Symposium "Nanophysics and Nanoelectronics" стендовый доклад "Уровни Ландау и туннельная плотность поверхностных состояний 3D топологического изолятора: эффекты гексагонального искажения и кривизны" (10–14 марта 2015, г. Нижний Новгород)
24. International conference on localization, interactions and superconductivity, стендовый доклад "Surface states in a 3D topological insulator: The role of hexagonal warping and curvature", (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черногловка, Московской обл.).

Н.А. Степанов

25. International conference on localization, interactions and superconductivity, стендовый доклад “Fluctuation states at the Fermi energy in superconductors”, (29 июня – 3 июля, 2015, г. Черноголовка, Московской обл.).

реквизиты и стоимость (общая и на 2015 г) договоров, контрактов, соглашений о грантах. и т.д.

1. Договор № 3-10/2014н от 15 октября 2014 г (2-ой этап – 2015 г.) на выполнение НИР. Заказчик – ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, исполнитель – МФТИ. Стоимость работ в 2015 г.: 1000 тыс. руб.
2. Договор №1-04/2015н от 15 апреля 2015 г. на выполнение НИР. Заказчик – ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, исполнитель – МФТИ. Стоимость работ: 1500 тыс. руб.
3. Договор № 2-07/2015н от 20 июля 2015 г. на выполнение НИР. Заказчик – ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, исполнитель – МФТИ. Стоимость работ: 1500 тыс. руб.

Общая стоимость договоров в 2015 г.: 4 млн. руб.

Общая стоимость договоров за 2014-2015 гг: 4,5 млн. руб. (включает в себя 500 тыс. руб. 1-го этапа договора № 3-10/2014н от 15 октября 2014 г.)

6. Объяснения расхождение плановых и фактически достигнутых значений показателей деятельности лабораторий

Раздел заполняется в случае невыполнения запланированных показателей деятельности лаборатории.

7. Список закупленного оборудования в 2015 году

В разделе необходимо отразить перечень закупленного оборудования за счет средств лаборатории с указанием цены и обоснованием необходимости его закупки.

Оборудование не закупалось.

8. Список закупленных основных расходных материалов в 2015 году

В разделе необходимо отразить перечень закупленных основных расходных материалов за счет средств лаборатории с указанием цены и обоснованием необходимости их закупки.

Расходные материалы не закупались.

9. Дополнительная поддержка лаборатории за счет Программы 5-100

В данном разделе следует указать какого вида дополнительная поддержка за счет средств Программы 5-100 была выделена лаборатории: оплата дополнительного оборудования, ремонт.

Дополнительная поддержка не предоставлялась.

10. Другая информация

В разделе можно указать любую дополнительную информацию о деятельности лаборатории в 2015 году