

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Баховадинов Мурод Султонович

**ЭФФЕКТЫ БЕСПОРЯДКА В ОДНОМЕРНЫХ КВАНТОВЫХ
СИСТЕМАХ**

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физических наук

Москва - 2024

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» и в Российском Квантовом Центре.

Научный руководитель:

Георгий Всеволодович Шляпников, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Теория многих тел» и научный директор Российского Квантового Центра.

ТЕМА ДИССЕРТАЦИИ

Теоретическое и экспериментальное исследование когерентных свойств макроскопических систем является одной из основных задач современной физики конденсированного состояния. Между тем беспорядок в таких системах всегда присутствует в виде дефектов и примесей в широком диапазоне концентраций. Следовательно, любое соответствующее теоретическое исследование, естественно, должно включать в свои рамки беспорядок. Такое исследование было впервые проведено Ф. У. Андерсоном [1], который показал, что все или часть состояний частиц подвергаются локализационному переходу при (конечном) беспорядке. Волновые функции составляющих квантовых частиц локализуются в реальном пространстве, что становится драматичным в более низких измерениях, $d < 3$. В локализованной фазе подавляется перенос заряда, спина или тепла. Реализация этого состояния вещества группами А. Аспе и М. Ингушио [2, 3] в разбавленных квазиодномерных системах холодных бозонных атомов оживила исследовательскую деятельность в области неупорядоченных систем [4, 5]. Локализация Андерсона — явление физики одной частицы. Вопрос о влиянии межчастичных взаимодействий на локализацию, долгое время оставался открытым. В своей основополагающей работе Баско, Алейнер и Альтшулер [6] показали, что изолированные неупорядоченные квантовые системы при наличии межчастичных взаимодействий могут демонстрировать переход металл-изолятор при конечных плотностях энергии - явление, названное многочастичной локализацией (МЧЛ). В этой работе авторы рассмотрели многочастичное пространство Фока, построенное из локализованных одночастичных состояний, и поставили вопрос о том, достаточны ли матричные элементы межчастичного взаимодействия, чтобы вызвать делокализацию в рассматриваемом Гильбертовом пространстве. Было показано, что это действительно так, если рассматривать конечные плотности энергии. Несколько лет спустя первые численные доказательства в поддержку теории пертурбативных исследований были продемонстрированы А. Палом и Д. Хьюзом [7], что сделало область МЧЛ одним из активных направлений исследований современной физики конденсированного состояния [8, 9].

Задачи, рассматриваемые в данной работе, в основном сформулированы в ходе аспирантской деятельности автора. Все рассмотренные задачи являются квазиодномерными, в которых эффекты квантовых флуктуаций наиболее сильны. Взаимодействие беспорядка с межчастичными взаимодействиями в таких системах является известной задачей [10, 11, 12, 13]. Однако в этой диссертации мы рассматриваем переходы локализация-делокализация в семействе нетрадиционных моделей.

Цели и задачи

1. Исследование возможных новых квантовых фаз и переходов в сильно неупорядоченных квантовых системах с наложенными ограничениями. Получение фазовой диаграммы рассматриваемых моделей с использованием метода точной диагонализации. Исследование эффектов двухкомпонентного беспорядка в случае модели Ферми-Хаббарда с бесконечным локальным отталкиванием.
2. Низкотемпературная фазовая диаграмма неупорядоченной модели с парными перескоками в одном измерении с использованием метода перенормировки матрицы плотности (ДМРГ). Возможные механизмы перехода Березинского-Костерлица-Таулесса, который происходит при конечной силе беспорядка и больших амплитудах парных прыжков.
3. Эффекты одиночной примеси в жидкости Латтинжера со связанными спиновым и зарядовым каналами методом бозонизации. Получение фазовой диаграммы Кейна-Фишера, когда такая связь вызвана спин-орбитальным взаимодействием.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Переход МЧЛ изучается на примере двух одномерных квантовых систем с наложенными ограничениями на их локальные степени свободы. Впервые мы представляем семейство моделей, которые демонстрируют МЧЛ, хотя в соответствующих гамильтонианах отсутствуют явные члены взаимодействия. Первая модель — это модель твердых бозонов с прыжками на ближайшие и следующие за ближайшими узлы. На основе численных расчетов для цепочек конечных размеров показано, что при конечных амплитудах прыжка на следующие за ближайшими узлы, в системе присутствует эффективное взаимодействие и наблюдается переход МЧЛ, хотя в гамильтониане явный член взаимодействия отсутствует. При нулевых же амплитудах прыжка на следующие за ближайшими узлы происходит Андерсоновская локализация при любой амплитуде беспорядка. Вторая модель — это одномерная модель Ферми-Хаббарда в режиме бесконечного отталкивания на узле. Для этой модели численно показано, что любой конечный потенциальный беспорядок вызывает переход Андерсона. Напротив, случайное магнитное поле имеет двойное проявление: с одной

стороны, при малых, но конечных случайных полях система остается хаотичной. С другой стороны, относительно большие случайные поля вызывают переход МЧЛ. Изучено взаимодействие двух типов беспорядка и получена фазовая диаграмма модели в цепочках конечного размера.

2. Изучаются эффекты беспорядка в одномерной системе фермионов с одночастичными и парными перескоками. С помощью численных расчетов получена фазовая диаграмма модели в чистом случае. Показано, что в режиме сильных парных прыжков член беспорядка иррелевантен в смысле ренормгруппы и электронная жидкость с алгебраически затухающими корреляциями при конечном, но малом беспорядке, сохраняется. При больших же амплитудах беспорядка система переходит в фазу локализации по механизму Березинского-Костерлица-Таулесса. Фазовая диаграмма неупорядоченной модели получена на основе спада пространственных корреляторов и усредненного по беспорядку параметра жидкости Латтинжера K . Найденный переход происходит по сценарию Джиамарчи-Шульца.
3. Исследовано влияние одиночной примеси на Латтинжеровскую жидкость со связанными спиновыми и зарядовыми степенями свободы с использованием методов бозонизации и пертурбативной ренормгруппы. Спин-зарядовое сцепление вызвано конечным спин-орбитальным взаимодействием. Фазовая диаграмма Кейна-Фишера, полученная для несцепленных мод, расширена на случай спин-зарядового сцепления. Полученные результаты опровергают предыдущие предсказания о наблюдении эффекта спиновой фильтрации в рассматриваемой модели. Результаты показывают, что эффекты спин-орбитального взаимодействия в системе с одной примесью наиболее сильны для сильновзаимодействующих систем, тогда как для слабовзаимодействующего электронного газа эти эффекты слабы. Также получены выражения для параметров Латтинжеровской жидкости и скоростей возбуждения возникающих мод.

Личный вклад в положения, выносимые на защиту

Значительная часть Главы 1 и Главы 2 представленной работы, включая выбор численных методов, реализацию численных алгоритмов, выбор необходимых величин для расчетов и анализа данных, выполнена автором. Аналитические расчеты и анализ полученных результатов Главы 3 также выполнены автором. Работа выполнялась в Лаборатории «Теория многих тел» Российского Квантового Центра и на физическом факультете Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» в период с 2019 по 2023 год.

ПУБЛИКАЦИИ И АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Главный автор или главные авторы обозначены жирным шрифтом в списке публикаций.

Публикации повышенного уровня

1. **Bahovadinov, M. S.**, and Matveenکو, S. I., Effects of a single impurity in a Luttinger liquid with spin-orbit coupling. (Эффекты одиночной примеси в жидкости Латтинжера со спин-орбитальным взаимодействием). *Journal of Physics: Condensed Matter*, **34**, 315601 (2022).
2. **Bahovadinov, M. S.**, Kurlov, D. V., Matveenکو, S. I., Altshuler, B. L., and Shlyapnikov, G. V., Many-body localization transition in a frustrated XY chain. (Многочастичная локализация в фрустрированной XY цепочке). *Phys. Rev. B*, **106**, 075107 (2022).
3. **Bahovadinov M. S.**, Sharipov R. O., Altshuler B. L., and Shlyapnikov G. V., Tomonaga-Luttinger liquid-Bose glass phase transition in a system of 1D disordered fermions with pair hoppings. (Фазовый переход жидкость Томонаги-Латтинжера - Бозе стекло в одномерной системе фермионов с парными перескоками в беспорядке). *Phys. Rev. B*, **109**, 014203 (2024).
4. **Kurlov, D. V.**, Bahovadinov, M. S., Matveenکو, S. I., Fedorov, A. K., Gritsev, V., Altshuler, B. L., and Shlyapnikov, G. V., Disordered impenetrable two-component fermions in one dimension. (Непроницаемые двухкомпонентные фермионы в одномерной системе с беспорядком). *Phys. Rev. B*, **107**, 184202 (2023).
5. **Bahovadinov, M. S.**, **Buijsman, W.**, Fedorov, A. K., Gritsev, V., and Kurlov, D. V., Many-body localization of Z_3 Fock parafermions. (Многочастичная локализация Z_3 Фоковских парафермионов). *Phys. Rev. B*, **106**, 224205 (2022).
6. **Matveenکو, S. I.**, Bahovadinov, M. S., Baranov, M. A., and Shlyapnikov, G. V., Rotons and their damping in elongated dipolar Bose-Einstein condensates. (Ротонны и их затухание в вытянутых дипольярных Бозе-Эйнштейновских конденсатах). *Phys. Rev. A*, **106**, 013319 (2022).
7. **Bakker, L. R.**, Bahovadinov, M. S., Kurlov, D. V., Gritsev, V., Fedorov, A. K., and Krimer, D. O., Driven-dissipative time crystalline phases in a two-mode bosonic system with Kerr nonlinearity. (Кристаллические фазы с управляемой диссипацией во времени в двухмодовой бозонной системе с Керровской нелинейностью). *Phys. Rev. Lett.*, **129**, 250401 (2022).

Публикации стандартного уровня

1. Bahovadinov, M. S., Kurlov, D. V., Altshuler, B. L., and Shlyapnikov, G. V., Many-body localization of 1D disordered impenetrable two-component fermions. (Многочастичная локализация в одномерных непроницаемых двухкомпонентных фермионов с беспорядком). *The European Physical Journal D*, **76**, 116 (2022).

Доклады на конференциях и семинарах

Результаты работы были доложены в виде стендовых и устных докладов на следующих конференциях и семинарах: Третий Ежегодный семинар по квантовым вычислениям (Сочи, Февраль 2022 г.), VI Международная конференция по квантовым технологиям (Москва, Июль 2021 г.) и на VII Международной конференции по квантовым технологиям (Москва, Июль 2023 г.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех основных глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 80 страниц с 23 рисунками. Справочный список содержит 182 наименования.

- Первая глава диссертации посвящена двум интересным моделям, которые демонстрируют переход МЧЛ, хотя в соответствующих гамильтонианах отсутствуют члены взаимодействия. Вместо этого они подчиняются наложенным ограничениям на локальные степени свободы. Первая модель представляет собой семейство одномерных систем со спином $S = 1/2$, рассматриваемые в лестничной геометрии, тогда как вторая модель представляет собой модель Ферми-Хаббарда в пределе бесконечного отталкивания на узле. С помощью крупномасштабных численных расчетов мы показываем, что обе модели демонстрируют переход МЧЛ при конечной силе беспорядка.
- Во второй главе мы рассматриваем квазиодномерную модель фермионов при низких температурах в беспорядке. Помимо члена беспорядка, который присутствует в каждом узле решетки, гамильтониан системы включает в себя члены одночастичных и парных перескоков. С помощью крупномасштабного численного метода ДМРГ мы впервые показываем, что низко-температурные свойства чистой системы при нулевой температуре хорошо описывается в рамках теории жидкости Томонаги-Латтинджера.

Затем мы изучаем роль составляющих членов гамильтониана и показываем, что член парных перескоков может гарантировать сохранение фазы жидкости Латтинджера при конечном беспорядке, если амплитуда парного прыжка достаточно сильна.

- Последняя глава посвящена исследованию одиночной примеси в многоканальной Латтинжеровской жидкости при низких температурах. Жидкость Латтинжера состоит из носителей \uparrow / \downarrow и, следовательно, имеет два канала: спиновый и зарядовый. В одном измерении эти каналы разделены. При наличии спин-орбитального взаимодействия два канала сцеплены. В этой главе мы изучаем эффекты одной примеси в такой электронной жидкости, используя методы бозонизации и пертурбативной ренормгруппы.

Список литературы

1. Anderson, P. W. Absence of Diffusion in Certain Random Lattices / P. W. Anderson // Phys. Rev. — 1958. — Mar. — Vol. 109. — P. 1492–1505.
2. Direct observation of Anderson localization of matter waves in a controlled disorder / Juliette Billy, Vincent Josse, Zhanchun Zuo [et al.] // Nature. — 2008. — Jun. — Vol. 453, no. 7197. — P. 891–894.
3. Anderson localization of a non-interacting Bose–Einstein condensate / Roati Giacomo, D’Errico Chiara, Fallani Leonardo [et al.] // Nature. — 2008. — Jun. — Vol. 453, no. 7197. — P. 895–898.
4. Evers, F. Anderson transitions / Ferdinand Evers, Alexander D. Mirlin // Rev. Mod. Phys. — 2008. — Oct. — Vol. 80. — P. 1355–1417.
5. Segev, M. Anderson localization of light / Mordechai Segev, Yaron Silberberg, Demetrios N. Christodoulides // Nature Photonics. — 2013. — Feb. — Vol. 7, no. 3. — P. 197–204.
6. Basko, D. M. Metal–insulator transition in a weakly interacting many-electron system with localized single-particle states / D M Basko, I L Aleiner, B L Altshuler // Ann. Phys. (N. Y.). — 2006. — May. — Vol. 321, no. 5. — P. 1126–1205.
7. Pal, A. Many-body localization phase transition / Arijeet Pal, David A Huse // Phys. Rev. B Condens. Matter Mater. Phys. — 2010. — Nov. — Vol. 82, no. 17.

8. Luitz, D. J. The ergodic side of the many-body localization transition / David J Luitz, Yevgeny Bar Lev // Ann. Phys. — 2017. — Jul. — Vol. 529, no. 7. — P. 1600350.
9. Abanin, D. A. Recent progress in many-body localization / Dmitry A Abanin, Zlatko Papić // Ann. Phys. — 2017. — Jul. — Vol. 529, no. 7. — P. 1700169.
10. Giamarchi, T. Quantum physics in one dimension / Thierry Giamarchi. — [S. l.] : Clarendon press, 2003. — Vol. 121.
11. Apel, W. Localisation and interaction in one dimension / W Apel, T M Rice // J. Phys. — 1983. — Apr. — Vol. 16, no. 10. — P. L271–L273.
12. Kane, C. Transport in a one-channel Luttinger liquid / CL Kane, Matthew PA Fisher // Physical review letters. — 1992. — Vol. 68, no. 8. — P. 1220.
13. Kane, C. Transmission through barriers and resonant tunneling in an interacting one-dimensional electron gas / CL Kane, Matthew PA Fisher // Physical Review B. — 1992. — Vol. 46, no. 23. — P. 15233.