

## **Нарожный Борис Николаевич**

кандидат физико-математических наук  
доцент

«Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11  
E-mail: narozhny@gmail.com

### **Отзыв официального оппонента**

на диссертацию Шарафутдинова Азата Ураловича «Спиновые корреляции в квантовых точках и наночастицах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

**Актуальность.** Минитюаризация технологий современной электроники вплотную приближается к уровню где понимание квантовых явлений – и в частности, эффектов электрон-электронного взаимодействия – становится важным для практичеких применений. При этом граница между экспериментальными образцами, изучающимися в научных лабораториях, и индустриально производящимися элементами электронных приборов постепенно стирается. В результате физика низкоразмерных систем переживает своего рода ренессанс. Исследования в этой области имеют не только академический, но и практический интерес. Например, квантовые точки, которым посвящена диссертационная работа А.У. Шарафутдинова, уже применяются для производства компьютерных дисплеев и телевизоров. Может показаться, что факт индустриального применения может свидетельствовать о том, что свойства системы уже хорошо изучены. Такое представления было бы обманчивым. Действительно, одноэлектронные свойства квантовых точек давно известны, так же как и текоторые эффекты кулоновского взаимодействия – например, кулоновская блокада. В то же время эффекты обменного взаимодействия в многоэлектронных квантовых точках (а так же в наночастицах) до конца не изучены, несмотря на обширную литературу. Исследования влияния обменного взаимодействия на термодинамические и транспортные свойства квантовых точек и наночастиц представленные в работе А.У. Шарафутдинова предсталяют собой значительный вклад в понимание природы электронных свойств кватновых точек, необходимое для будущих технологий основанных на надёжном контроле за состоянием и поведением квантовых точек в лабораторных и (потенциально) индустриальных условиях.

**Новизна и достоверность.** В диссертационной работе представлены следующие результаты: (i) найдено точное выражение для статистической суммы, продольной и поперечной спиновой восприимчивости и туннельной плотности состояний квантовой точки с произвольным одночастичным спектром (Глава 1); (ii) для случая

эквидистантного спектра (Глава 2) найдена огибающая динамической спиновой восприимчивости; показано, что огибающая как функция частоты имеет один максимум и один минимум в то время как огибающая туннельной плотности состояний имеет один дополнительный максимум: (iii) для изинговского и гейзенберговского случаев доказано, что флуктуации одночастичного спектра квантовой точки не приводят к смещению стоунеровской неустойчивости (Глава 3); (iv) выведено эффективное действие, описывающее динамику полного спина квантовой точки в случае туннельной связи с резервуаром (Глава 4).

Результаты выносимые на защиту являются оригинальными и получены автором впервые. Расчёты были произведены с помощью современных методов теоретической физики, таких как метод Вея-Нормана-Колоколова и метод функционального интегрирования. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. В тех предельных случаях, которые были ранее рассмотрены в литературе, полученные результаты воспроизводят известные, за исключением вопроса о туннельной плотности состояний, в котором автор опровергает существующий в литературе результат.

**Научная значимость.** Основное физическое явление рассмотренное в диссертации – Стоунеровская неустойчивость в квантовых точках и наночастицах. Для исследования роли анизотропии обменного взаимодействия вблизи неустойчивости, автором рассмотрена феноменологическая модель нульмерной системы описываемая так называемым универсальным Гамильтонианом с анизотропным обменом. Несмотря на то, что в случае произвольной анизотропии эта модель не имеет последовательного микроскопического обоснования, её решение представляет собой своего рода плавную интерполяцию между двумя известными случаями изотропного (Гейзенберговского) и Изинговского обмена. Качественное значение выбранной модели состоит в том, что она позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые черты спектра возбуждений ферромагнитных наночастиц. В квантовых точках обменное взаимодействие чаще всего изотропно, однако анизотропия может быть привнесена, например, с помощью ферромагнитных контактов.

Результаты представленные в первых трёх главах диссертационной работы опираются на точное интегральное представление для статистической суммы модели полученное в первой главе. Для изотропного случая полученный результат совпадает с известным. Дифференцируя статистическую сумму по магнитному полю, автор находит точное интегральное представление для продольной спиновой восприимчивости. Эти результаты интересны тем, что получены без использования сложных методов математической физики (таких как анзац Бете), но при этом являются точными. В случае же туннельной плотности состояний использование специальных методов оказывается необходимым: точное интегральное представление получено с помощью метода Вея-Нормана-Колоколова. Результаты полученные в первой главе диссертационной работы имеют не только непосредственное значение для дальнейшего анализа Стоунеровского перехода в квантовых точках, но и представляют более широкий методический интерес. В частности, автор продемонстрировал удачное использование метода Вея-Нормана-Колоколова и получил конечный результат без непосредственного решения нелинейных уравнений определяющих явный вид параметров преобразования Вея-Нормана.

Вторая глава диссертации посвящена подробному анализу точных результатов первой главы для случая эквидистантного спектра. В этом случае интегралы дающие точные представления физических величин удаётся вычислить (по крайней мере во всех интересных предельных случаях) и получить компактные выражения для спиновой восприимчивости и туннельной плотности состояний. Последняя оказывается немонотонной функцией энергии имеющей один максимум, а не два, как было предсказано ранее. За исключением этого случая, результаты А.У. Шарафутдинова находятся в полном согласии с немногими асимптотическими вычислениями имеющимися в литературе.

Модель эквидистантного спектра несколько искусственна и её изучение мотивируется прежде всего тем, что в этом случае вычисления удаётся довести до конца. Однако, анализ роли флуктуаций одночастичного спектра, представленный в третьей главе диссертационной работы, показывает, что (по крайней мере в некоторых наиболее интересных случаях) флуктуации не приводят к качественным изменениям результатов полученных для эквидистантного спектра. Поскольку для туннельной плотности состояний (в случае изотропного обменного взаимодействия) это утверждение уже было рассмотрено в литературе, автор сконцентрировал свои усилия на расчётах спиновой восприимчивости.

Основным результатом представленным в третьей главе диссертационной работы является утверждение, что Стоунеровская неустойчивость не смещается в присутствии флуктуаций одночастичного спектра. В качестве доказательства этого результата в работе вычислены все моменты спиновой восприимчивости, которые оказываются конечными вплоть до точки перехода. В то же время, флуктуации спектра приводят к уширению пиков мнимой части поперечной восприимчивости. Новых немонотонностей при этом не возникает, что позволяет говорить о сохранении качественного поведения квантовой точки в случае (слабо) неэквидистантного спектра.

В первых трёх главах диссертационной работы рассмотрены свойства замкнутых квантовых точек. В четвертой главе диссертационной работы автор несколько расширяет предмет исследований и ставит вопрос о влиянии контактов (которые могут быть присоединены к квантовой точке в лаборатории) на мезоскопическую Стоунеровскую неустойчивость. Основным достижением этой главы стоит считать вывод эффективного действия для полного спина квантовой точки. Это действие представляет собой обобщение известного действия Амбегаокара-Эккерна-Шона на случай когда квантовая точка туннельно связана со внешним резервуаром. Предложенный вывод использует метод Вей-Нормана-Колоколова и не предполагает адиабатического приближения. Результаты представленные в четвёртой главе имеют важное методическое значение и могут быть использованы в дальнейших исследованиях экспериментально наблюдаемых величин.

**Замечания.** Диссертационная работа А.У. Шарафутдинова (по крайней мере имеющийся в моём распоряжении экземпляр) написана довольно лаконично и содержит заметное количество опечаток. В некоторых местах можно предъявить претензии и к литературному стилю работы. С научной точки зрения, диссертация

имеет следующие недостатки, не влияющие на высокую оценку физических результатов:

- (i) Диссертация практически не содержит обзора литературы несмотря на то, что квантовые точки являются объектом интенсивных исследований многочисленных научных групп как в России, так и за рубежом. Список литературы представляется несколько не полным. В тексте имеются пустые («неразрешённые») ссылки.
- (ii) В диссертации представлены чисто теоретические расчёты без обсуждения связи полученных результатов с экспериментом. Для методических результатов представленных в первой и четвёртой главах такой подход легко объяснить. Однако во второй и третьей главах автор рассматривает наблюдаемые величины (спиновую восприимчивость и туннельную плотность состояний). Обсуждение значения полученных результатов для возможных экспериментов или сравнение теоретических предсказаний с уже имеющимися наблюдениями значительно улучшили бы работу.
- (iii) На мой вкус в работе не хватает качественного обсуждения полученных результатов, а так же основных методов вычислений. Продольная спиновая восприимчивость, рассмотренная во второй главе диссертационной работы в ряде асимптотических режимов, представлена в виде комбинации членов не зависящих от температуры (похожих на спиновую восприимчивость ферми-жидкости) и обратно пропорциональных температуре. На первый взгляд, восприимчивость Кюри свидетельствует о том, что обменное взаимодействие не оказывает существенного влияния на поведение системы. Так ли это? Можно ли прийти к такому выводу с помощью физических аргументов без использования точного решения задачи. Более того, в некоторых промежуточных областях температур и магнитных полей восприимчивость оказывается пропорциональной или температуре, или коню из температуры. Каким образом можно было бы понять такое поведение? Наконец, туннельная плотность состояний оказывается немонотонной функцией энергии. В чём причина этого поведения? В чём заключается принципиальное отличие физической картины квантовой точки представленной в диссертации от более ранней работы Киселёва и Гефена, в которой содержится неправильный, с точки зрения автора, результат?
- (iv) В работе использован метод Вея-Нормана-Колоколова, который нечасто встречается в литературе, так как во многих случаях требует решения нелинейных уравнений определяющих параметры преобразования Вея-Нормана. В настоящей работе решения этих уравнений удалось избежать. Казалось бы, это обстоятельство должно было быть подчёркнуто автором как одно из важнейших методических достижений работы. Можно ли привести какие-то общие аргументы, почему в данной задаче такое упрощение оказывается возможным? Каким образом можно распространить эти аргументы на другие спиновые задачи (или же данная работа уникальна в этом отношении). Можно ли развить этот метод для случая других групп симметрии?

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах и доложены на российских и международных конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А. У. Шарафутдинова удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Её автор безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

кандидат физико-математических наук,  
доцент Национального Исследовательского Ядерного Университета «МИФИ»  
Нарожный Борис Николаевич.  
7 декабря 2015 г.

*Фамилия*

Подпись Б.Н. Нарожного заверяю



*Н. Н. Кудряшов*