

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Лазарева Ильи Дмитриевича**  
**на тему: «Многочастичная запутанность**  
**в многоквантовой спектроскопии ЯМР в твердом теле»**  
**по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»**

Исследование многочастичной запутанности в многоквантовой спектроскопии ЯМР является актуальной задачей физики конденсированного состояния. В диссертации И. Д. Лазарева исследуется многочастичная запутанность в системах с большим количеством частиц в рамках многоквантовой спектроскопии ЯМР в твердом теле, а также методы экспериментального измерения величин квантовой информации Фишера и кривой информации Вигнера-Янасе.

**Актуальность** теоретического исследования многочастичной запутанности в системах с большим количеством частиц обусловлена общим стремительным прогрессом в области квантовой обработки информации. Квантовая запутанность является ключевым ресурсом квантовых технологий, поэтому важно уметь характеризовать на количественном уровне этот ресурс. Кроме того, особый интерес представляют такие явления, как термализация, локализация, скремблирование, в которых квантовая запутанность также играет важную роль. Исследование данных процессов требует развития методов экспериментального изучения квантовой запутанности.

Представленные в диссертации теоретические результаты являются важными для дальнейшего развития методов многоквантовой спектроскопии ЯМР. Все опубликованные результаты относятся к тематике, находящейся на острие современной физики конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения и списка использованной литературы из 171 наименований. Она изложена на 95 страницах.

Во **введении** к диссертации обосновывается актуальность темы работы, формулируются ее цели, научная новизна и практическая значимость, перечисляются положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации представлена литературным обзором. Она посвящена роли многочастичной запутанности в квантовой теории информации и методам ее детектирования. Большое внимание уделяется методу оценки количества запутанных частиц

в квантовой системе с помощью квантовых информационных величин. Также в этой главе представлен небольшой обзор многоквантового эксперимента ЯМР и примеры систем, подходящих для исследования многочастичной запутанности в рамках многоквантовой спектроскопии ЯМР.

Во второй главе разработана теория многоквантового эксперимента ЯМР для низких температур. Температура учитывается в начальном термодинамическом равновесном состоянии системы.

В третьей главе диссертации рассматривается несферическая нанопора, заполненная частицами со спином  $1/2$  в сильном внешнем магнитном поле. Изучена температурная зависимость многочастичной запутанности, возникающей в полости с большим количеством частиц на подготовительном периоде многоквантового эксперимента ЯМР. Рассчитана зависимость нижней границы информации Фишера от времени для системы с 201 частицами. Показано, что запутанность существует в течение всего процесса эволюции, за исключением короткого начального периода времени. Также исследована зависимость от температуры максимального размера запутанного кластера за время эволюции.

Четвертая глава диссертации посвящена многочастичной запутанности в цепочках ядерных спинов. Изучена временная эволюция нижней границы информации Фишера в зигзагообразных цепочках. Получены зависимости максимального размера запутанного кластера от температуры в таких цепочках. Установлено, что при низких температурах почти все спины в цепочке запутанны.

В пятой главе разработана теория экспериментального метода определения косой информации Вигнера-Янасе в рамках многоквантовой спектроскопии ЯМР. Получено выражение для косой информации Вигнера-Янасе через второй момент распределения интенсивностей многоквантовых когерентностей ЯМР. Это позволяет экспериментально измерять точное значение косой информации Вигнера-Янасе в многоквантовом эксперименте ЯМР. Косая информация может использоваться для исследования многочастичной запутанности. На примерах показано, что косая информация и квантовая информация Фишера дают сравнимые оценки размеров запутанных кластеров.

Выводы, приведенные Лазаревым И. Д. в заключении к диссертации, кратко излагают основные результаты, полученные автором в диссертационной работе. Выводы завершаются списком опубликованных работ. Приведенный выше анализ диссертации по главам подчеркивает научную новизну основных результатов диссертации. Достоверность основных выводов, сформулированных диссертантом, обеспечивается правильным выбором

необходимых теоретических методов исследования и апробацией работы на российских и международных конференциях.

**Новизна и практическая значимость** полученных результатов подтверждаются достаточным количеством публикаций в ведущих физических журналах. Материалы диссертации опубликованы в 6 (шести) статьях в научных журналах, индексируемых базой данных «Web of Science», включая статьи в *Physical Review A* и *Physics Letters A*.

Вместе с тем по диссертации **можно сделать некоторые замечания:**

1. При рассмотрении многоспиновой запутанности в квазиодномерных цепочках в главе 4 используется гауссово приближение для распределения интенсивностей многоквантовых когерентностей. Остается неясным, насколько оправдано это приближение и как выход за его рамки может поменять результат.
2. В главе 5 на рис. 5.1 приведены зависимости оценки снизу числа запутанных спинов от обратной температуры на основе квантовой информации Фишера и на основе косой информации Вигнера-Янасе. Несмотря на качественное согласие между этими результатами имеются существенные количественные отличия. С чем они связаны, и которая из оценок более адекватна?
3. В диссертации практически отсутствует качественное рассмотрение.

Приведенные замечания, конечно, не снижают общей положительной оценки представленной диссертации, выполненной на высоком уровне, и значимости полученных результатов. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Следует отметить, что диссертационная работа Лазарева И. Д. демонстрирует высокую квалификацию автора как физика-теоретика и является заметным вкладом в развитие многоквантовой спектроскопии ЯМР.

Диссертационная работа Лазарева Ильи Дмитриевича «Многочастичная запутанность в многоквантовой спектроскопии ЯМР в твердом теле» представляет собой законченное научное исследование, которое содержит решения поставленных научных задач, имеющих большое значение для развития многоквантовой спектроскопии ЯМР, и содержит новые важные результаты, которые могут быть рекомендованы к использованию для решения различных теоретических и прикладных задач в области квантовой обработки информации.

Диссертация и автореферат написаны хорошим и понятным языком. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Итак, результаты диссертации представляются достоверными и научно обоснованными, обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» (по физико-математическим наукам), удовлетворяет критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно п. 3.1 этого Положения. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Соискатель Лазарев И. Д., безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

начальник лаборатории, лаборатория физики микро- и наноструктур

ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова"

ПОГОСОВ Вальтер Валентинович

Контактные данные:

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.02 – теоретическая физика

Адрес места работы:

127055, Москва, ул. Сущевская, д. 22,

ФГУП ВНИИА, подразд. 176

Тел.: +7 (499) 978-78-03; e-mail:

Подпись д.ф.-м.н. В.В. Погосова заверяю.

Ученый секретарь НТС ФГУП ВНИИА,

кандидат технических наук

Л. В. Феоктистова