

**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»**

Диссертационная работа И.Д. Лазарева посвящена теоретическому исследованию квантовых корреляций и, в частности, такой важнейшей их характеристике как многочастичная запутанность, в применении к многоквантовой спектроскопии ЯМР. В работе развивается теория методов измерения фундаментальных квантовых информационных характеристик - квантовой информации Фишера и кривой информации Вигнера-Янасе.

Квантовые корреляции ответственны за преимущества квантовых приборов и устройств над их классическими аналогами. Такие корреляции отсутствуют в классической физике. Изучение их свойств и методов управления ими является теоретической основой квантовых технологий. Поэтому тематика исследований, проведенных И.Д. Лазаревым в его диссертационной работе, безусловно относится к одной из актуальных областей современной науки. Уместно напомнить, что именно исследования квантовой запутанности были удостоены в этом году Нобелевской премии по физике. Отметим также, что современные методы исследования квантовых корреляций ограничены, как правило, изучением запутанности и квантового дискорда в малокубитных системах, тогда как в диссертации Лазарева это ограничение снято и сделан принципиально важный шаг к изучению многочастичной запутанности. В этом, в частности, состоит новизна и оригинальность данной работы.

Перейдем к конкретной характеристике содержания диссертации. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и основных выводов; список использованной литературы содержит 171 наименование. Не пересказывая всего содержания диссертации, остановлюсь на тех ее результатах, которые представляются наиболее важными.

В первую очередь надо отметить, что развитые в диссертации теоретические подходы привязаны к конкретной экспериментальной базе – методике многоквантовой ЯМР спектроскопии. Это направление является одним из наиболее передовых и информативных методов исследования конденсированного состояния, оно активно развивается в передовых лабораториях разных стран и, в частности, в Институте проблем химической физики РАН в Черноголовке. Именно на этой базе диссертант успешно развил строгую теорию многоквантового эксперимента ЯМР при низких температурах (гл. 2). Здесь впервые показано, что как при высоких, так и при низких температурах коррелятор, описывающий наблюдаемый сигнал после трех периодов эксперимента, позволяет определить нижнюю границу информации Фишера с помощью второго момента многоквантового спектра ЯМР. Данный результат очень важен, так как открывает возможность экспериментального исследования многочастичной запутанности в твердом теле при любых температурах.

Развивая этот подход, автор диссертации предложил оригинальный метод экспериментального измерения кривой информации Вигнера-Янасе в рамках того же многоквантового эксперимента ЯМР (гл. 5). Здесь показано, что кривая информации Вигнера-Янасе, исследуемая при некоторой температуре  $T$ , равна удвоенному второму моменту многоквантового спектра ЯМР в системе с вдвое большей температурой  $2T$ . Благодаря этому, диссертанту удалось провести непосредственное сравнение оценок многочастичной запутанности, полученных на основе квантовой информации Фишера и кривой информации Вигнера-Янасе.

Наряду с этими достаточно общими теоретическими достижениями, в диссертации представлены более конкретные результаты, относящиеся к многоквантовой ЯМР

спектроскопии в таких объектах, как нанопоры, заполненные газом спин-несущих атомов или молекул (гл. 3), и кристаллы гамбергита, цепочки гидроксильных протонов которого могут быть рассмотрены как квазиодномерные зигзагообразные спиновые системы (гл. 4). Благодаря своим своеобразным физическим характеристикам, оба эти объекта позволяют применить к ним упрощенные теоретические подходы и непосредственно сопоставлять теорию с экспериментом, что и является предметом исследований, проводимых в ИПХФ РАН под руководством проф. Э.Б. Фельдмана. Здесь диссертантом подробно исследованы зависимости многочастичной запутанности от температуры, времени и количества частиц в нанопоре и проведено исследование многочастичной запутанности в зигзагообразных цепочках с учетом дипольных взаимодействий ближайших и следующих соседей. В результате впервые получены оценки размера запутанных кластеров в зависимости от температуры, времени и параметров цепи.

Наконец, отметим приведенный в 1-й главе диссертации отличный литературный обзор, начинающийся с исторической справки о становлении квантовой теории и содержащий основные сведения о явлении запутанности, в особенности многочастичной. Обзор свидетельствует о достаточно широкой эрудиции и высокой квалификации диссертанта и может быть полезен для знакомства с этим кругом проблем.

Научная новизна и практическая значимость диссертации И.Д. Лазарева заслуживают в целом высокой оценки. В первую очередь это определяется выполненными впервые теоретическими исследованиями температурной зависимости размера запутанного кластера в условиях многоквантового эксперимента ЯМР на системах с большим числом взаимодействующих спинов. В частности, конкретно показано, что кристалл гамбергита, в котором существенно взаимодействие между ближайшими и следующими соседями в протонных цепочках, может служить перспективной площадкой для исследования многочастичной запутанности и передачи квантовых состояний. Особенно значимым для практического применения представляется предложенный в диссертации метод измерения кривой информации Вигнера-Янасе в многоквантовом ЯМР эксперименте.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации не вызывают сомнений. Это подтверждается использованием общепризнанных научных методик и, в частности, повторяемостью и согласием с литературными данными теоретических результатов для ранее изученных одномерных однородных моделей.

В качестве критического замечания отмечу, что в диссертации, на мой взгляд, недостаточно подробно обсуждены конкретные преимущества использования именно многочастичной запутанности к квантовым вычислениям. Какие реальные перспективы открывает такой подход, имеются ли уже достоверные оценки – или же это дело отдаленного будущего?

Сходная проблема возникает и с низкими температурами. В ряде случаев теоретически изученные диссертантом температурные диапазоны (милликельвины) пока малодоступны. Понятно, что эти исследования устремлены в будущее, это похвально и необходимо. Тем не менее, хотелось бы более четко представлять себе перспективу.

Эти замечания не снижают высокой оценки диссертации в целом. Исходя из объема, количества и качества проведенных исследований, считаю, что диссертация И.Д. Лазарева является законченной квалификационной работой. Представленные результаты являются оригинальными, они прошли апробацию на многочисленных научных семинарах и конференциях и были опубликованы в 5 рецензируемых научных статьях.

## **Заключение**

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 Илья Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник лаборатории исследования свойств магнитных и оптических микро- и наноструктур

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
«Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Ацаркин Вадим Александрович

21.11.2022 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (495) 629-34-40; e-mail: atsarkin@cplire.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

1.3.4.– «Радиофизика»

Адрес места работы:

125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН»

Тел.: + 7 (495) 629 3574; e-mail: ire@cplire.ru