

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

Рецензируемая работа посвящена теоретическому исследованию многочастичной запутанности состояний, возникающей при условиях проведения экспериментов по наблюдению многоквантового (МК) ЯМР в твёрдом теле.

Активное развитие многоквантовой (МК) спектроскопии ЯМР, появившейся как следствие интенсивного развития многоимпульсного ЯМР, началось в конце 70-х – начале 80-х годов в качестве мощного, а часто и фактически незаменимого средства для практического исследования структуры макромолекул (например, белков), кластеров и локальных структур, размещенных на поверхностях, жидких кристаллов, полостей наноразмеров и т. п.. В основе МК - спектроскопии лежит наблюдение за поведением многоспиновых-многоквантовых когерентных состояний. Эти состояния возникают под действием внутренних взаимодействий в условиях облучения ядерной спиновой подсистемы вещества, находящегося в конденсированном состоянии, определённой последовательностью радиочастотных импульсов. Под МК- спектром обычно понимается распределение интенсивностей спектральных компонент в зависимости от порядка когерентности (зависимость профиля интенсивностей многоквантовых когерентностей от их порядков).

Появившаяся возможность экспериментального изучения с помощью МК- спектроскопии ЯМР развития с течением времени многоспиновых корреляций оказалась востребована в статистической физике необратимых процессов,

процессов передачи информации, квантовой метрологии, при изучении физических процессов, необходимых для развития квантовой информатики (создания квантовых регистров). Дело в том, что система ядерных магнитных моментов (спинов) твердого тела, наблюдаемая методами ЯМР, служит хорошим примером замкнутой системы, изолированной практически полностью от остальных степеней свободы образца, а, как известно, в замкнутой системе квантовая информация сохраняется со временем. При этом, изначально локализованная в одночастичных (односпиновых) состояниях, эта информация перераспределяется по множеству многоспиновых степеней свободы, что может быть отображено появлением временных корреляционных функций (ВКФ) весьма сложной структуры.

В связи с изложенным, важнейшей задачей является извлечение из наблюдаемых экспериментально ВКФ информации о наиболее тонких характеристиках поведения многоспиновых систем. Таких, как например, «запутанность», а также развитие методов определения по экспериментальным данным различных «информационных характеристик».

Как, следует из сказанного, избранное автором направление лежит в русле важнейших фундаментальных исследований: динамика многоспиновых процессов, возникающая при этом запутанность состояний и её связь с квантовыми информационными параметрами (в данном случае - квантовой информации Фишера и кривой информации Вигнера-Янасе). Всё это и обуславливает актуальность представленной работы.

Структура диссертации достаточно традиционна. Она состоит из «Введения», пяти глав и основных выводов, приводимых в конце раздела «Заключение».

**Во Введении**, обосновывается актуальность работы, сформулированы задачи и цели работы и указаны объекты исследования.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, содержащий сведения (в том числе и небольшой исторический обзор) о квантовых корреляциях, включая довольно подробные определения запутанности, информации Фишера (как классической, так и квантовой) и кривой информации Вигнера-Янасе. Включение этих описаний и определений является тем более важным, что в современной литературе при обсуждении квантовых корреляций присутствует заметное «разночтение» как в некоторых определениях и понятиях, так и в оперировании иными, чем указаны выше, информационными и метрологическими критериями. Далее в обзоре приведены основные сведения о спектроскопии МК ЯМР и предполагаемых объектах исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическому обсуждению МК экспериментов, которые позволили бы измерить нижнюю границу квантовой информации Фишера, дающей некоторую количественную оценку числа запутанных частиц в системе. При этом автор не предполагает традиционного для магнитного резонанса использования высокотемпературного приближения для начальной матрицы плотности, что позволило рассмотреть случай низких температур.

**Третья глава** – основополагающая часть работы. В ней методом МК ЯМР определяется квантовая информация Фишера и, таким образом, исследуется многочастичная запутанность, возникающая в сферически несимметричных полостях нано-размеров, в зависимости от температуры и начального состояния системы. Рассмотрены начальные состояния, характеризуемые либо зеемановской, либо дипольной температурой. Благодаря высокой подвижности несущих спин частиц межъядерное диполь-дипольное взаимодействие частично усредняется, а остающаяся, в конце концов, часть двухспинового двухквантового гамильтониана, коммутирует с квадратом полного спинового момента. Это позволяет сформировать матрицу из сравнительно небольших блоков, что и позволило учесть в расчётах 201 спин.

Была построена температурная зависимость запутанности и продемонстрировано, что она велика только при очень низких температурах. Так при  $T \sim 0.01$  К запутанными оказываются все 200 спинов, находящихся в нанополости. С ростом температуры запутанность очень быстро сокращается и при более высоких температурах может существовать только парная запутанность. Кроме того, исследована зависимость запутанности от плотности числа частиц в полости и времени приготовления и продемонстрировано, что с ростом плотности, количество запутанных спинов растёт при прочих равных условиях и запутанность присутствует на протяжении практически всего времени подготовительного периода.

**В четвёртой главе** рассматриваются спиновые системы с низкой размерностью. Основное внимание уделяется исследованию многочастичной запутанности в кристаллах гамберита, в котором спиновые цепочки ядер фтора зигзагообразны. Этот акцент не удивителен. Простые линейные цепочки ядер фтора в кристаллах фторapatита многократно исследовались методами МК ЯМР в разных лабораториях и обсуждались в целом ряде работ. В диссертации показано, что поведение температурной зависимости многочастичной запутанности в зигзагообразной цепочке совпадает с её поведением в линейной цепочке (эквивалентные спины) по-крайней мере качественно.

**В пятой главе** обсуждается связь кривой информации Вигнера-Янасе с экспериментами по МК ЯМР. Показано, что величина информации Фишера лежит между однократным и двукратным значениями информации Вигнера-Янасе. Температурные же зависимости для числа запутанных спинов, задаваемые этими величинами для нанополости и гамберита, весьма схожи. В то же время, как следует из приведенной оценки, использование информации Вигнера-Янасе при низких температурах даёт некоторое преимущество, т.к. позволяет при прочих равных условиях использовать для оценок несколько более высокие температуры.

**К сожалению**, рецензируемая диссертация не лишена некоторых недостатков. Прежде всего, это относится к небрежности написания/оформления. Так факт, что в работе и, соответственно, в расчётах речь идёт только о спинах с  $S=1/2$  выясняется только в «Заключении». Автор иногда вводит новые обозначения, не поясняя их. Так на стр. 43 в формуле (2.8) вдруг возникает величина  $\rho_{LT}$ , а в формуле (2.13) на той же странице «всплывает» загадочная величина « $b$ ». Можно привести и другие примеры. Сказанное выше относится и к рисункам. Так на всех трёх рисунках 3.3, (стр. 57) не указана величина, отложенная по вертикальной шкале, а на стр. 52, рисунке 3.2 горизонтальная шкала посвящена таинственному параметру « $b$ »... Остаётся во многом рассчитывать лишь на «догадливость» читателя.

Сделанные замечания тем не менее не снижают общей высокой оценки работы.

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

**Официальный оппонент:**

Доктор физ.-мат. наук,

«Ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической химической физики,  
Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н.

Семенова Российской академии наук,

ЛУНДИН Андрей Арнольдович

22 ноября 2022 года

**Контактные данные:**

тел.:

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:

01.04.17– химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

**Адрес места работы:**

117977, (Россия) г. Москва, ул. Косыгина, д. 4,  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
ИМ. Н.Н. СЕМЕНОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК,  
лаборатория теоретической химической физики.  
Тел.:(495)9397458; e-mail:

Подпись сотрудника ЛУНДИНА Андрея Арнольдовича

Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н.  
Семенова Российской академии наук удостоверяю: