ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
Институт информационных технологий, математики и механики

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертационную работу Артёма Александровича Александрова
«Эффекты конденсации степеней свободы в сложных системах»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика»

1. Общая характеристика и актуальность исследования

Диссертационная работа Александрова А. А. посвящена исследованию коллективного поведения взаимодействующих систем с большим числом степеней свободы, рассматриваемого через призму синхронизации и «конденсации» степеней свободы в сложных системах классической и квантовой природы. В данной работе изучаются вопросы, которые можно отнести к фундаментальным проблемам теоретической физики и нелинейной динамики. В качестве базовой модели рассматривается модель Курамото и её обобщения (с инерцией, шумом, на различных типах графов).

Научная задача состоит в объяснении закономерностей возникновения и структурной организации коллективных режимов в ансамблях на различных топологиях связей при воздействии шума и учете инерции и требует для решения соединения методов статистической физики, теории графов, теории динамических систем и информационной геометрии. Тема и круг проблем, обсуждаемых и решаемых в рамках диссертации, соответствуют специальности 1.3.3 «Теоретическая физика» и сопоставляются как с задачами данного направления, так и с приложениями в нейродинамике и квантовых системах (в частности, в экситон-поляритонных конденсатах). Работа демонстрирует междисциплинарный подход и решает ряд содержательных подзадач, представляющих интерес для широкого круга специалистов.

Актуальность обусловлена большим количеством приложений — от физики конденсированного состояния и экситон-поляритонных конденсатов до нейроморфных архитектур и нейродинамики. Междисциплинарность представленных в работе результатов является одним из неоспоримых достоинств и делает ее достаточно значимой для статистической физики, нелинейной динамики и теории сложных систем.

Автор диссертационной работы последовательно использует методы фазовой редукции, анзацы Ватанабе–Строгаца и Отта–Антонсена, элементы информационной геометрии, предельные конструкции на графах и построение термодинамического предела через графоны для вывода критических параметров и анализа фазовых переходов. Тем самым, Александров А. А. демонстрирует знание и умение применять широкий круг подходов к анализу коллективной динамики осцилляторных ансамблей из большого числа элементов.

603950, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23 • тел.: +7 (831) 462-33-20 • e-mail: lev.smirnov@itmm.unn.ru

2. Структура и содержание работы

Структура диссертации включает введение, шесть глав, заключение и приложения. Введение содержит постановку цели и задач исследования, обоснование актуальности и новизны. В главах излагаются теоретические результаты, снабженные достаточно подробными аналитическими выкладками, подтвержденные численными расчетами и проиллюстрированные наглядным материалом в виде рисунков, а также формулируются основные утверждения и выводы. Работа написана грамотным научным языком, ее текст хорошо организован и имеет внутреннюю логическую связанность. Подача материала выстроена последовательно и опирается на широкий круг апробированных в современной литературе методов и подходов.

2.1. Глава 1. Основные понятия

Даны определения и примеры синхронизации по частоте и фазе (захват), связь фазовой редукции с бифуркацией Андронова–Хопфа и устойчивыми предельными циклами. Обсуждены классические осцилляторы (**осциллятор Ландау–Стюарт, осциллятор Ван дер Поля),** отображение Пуанкаре и число вращения.

2.2. Глава 2. Модель Курамото и её свойства

Изложены фундаментальные свойства модели, методика нахождения критического коэффициента связи через анализ устойчивости асинхронного состояния; отмечены предпосылки: среднеполевой характер взаимодействия и унимодальность распределения частот.

2.3. Глава 3. Низкоразмерная (мёбиусова) динамика на графах

Показано, что на ряде топологий (полный граф, звезда, декартовы произведения) динамика редуцируется к потокам на диске Пуанкаре (анзацы Ватанабе–Строгаца и Отта–Антонсена). Выявлены механизмы взрывной синхронизации и гистерезиса на графе-звезде и его обобщениях, условия появления высокосимметричных и химерных состояний. Предложена информационно-геометрическая интерпретация фазовых переходов (метрика Фишера, расхождение Кульбака–Лейблера).

2.4. Глава 4. Шум, устойчивость и подавление гистерезиса

Синхронные состояния описываются стационарными решениями уравнения Фоккера–Планка; шум повышает устойчивость асинхронии и смещает критический порог. Обсуждается применимость анзаца Отта–Антонсена при наличии шума (вблизи критической точки, при малом параметре порядка). На графе типа «звезда» аналитически и численно показано подавление гистерезиса шумом.

2.5. Глава 5. Термодинамический предел, графоны и метод Пенроуза

Построен предел Власова через графоны для плотных взвешенных графов, получены оценки порогов синхронизации по спектру графона. Метод Пенроуза распространён на модели с шумом, инерцией и задержкой; получены явные выражения порогов для глобальной связи; обсуждено влияние шума на формирование химер.

2.6. Глава 6. Квантовые приложения

Рассмотрены SYK-подобные модели с притяжением, массивы контактов сверхпроводящих зёрен и экситон-поляритонные конденсаты; после фазовой редукции возникает динамика типа Курамото, включая влияние запаздывания. Синхронизация трактуется как конденсация «мягких» фазовых мод.

3. Научная новизна, достоверность и значимость

3.1. Новизна и значимость результатов

К числу наиболее существенных результатов и интересных моментов, представленных в диссертационной работе, относятся:

- анализ низкоразмерной (мёбиусовой) динамики в модели Курамото на специальных графах (в частности, граф «звезда», декартовы произведения графов), выявление особенностей коллективного поведения в соответствующих ансамблях осцилляторов, в том числе, демонстрация механизмов гистерезиса и «взрывной» синхронизации;
- развитие с использованием графонов аналитических подходов к описанию синхронизации в термодинамическом пределе для широкого класса взвешенных плотных графов; установление связи спектральных характеристик графона с критической константой связи;
- исследование влияния шума и инерции на устойчивость асинхронного состояния и ассоциированные с этим фазовые переходы и эффекты, включая подавление гистерезиса;
- постановка задач синхронизации в квантовых системах (в частности, в ансамблях сверхпроводящих зёрен и в экситон-поляритонных конденсатах, структурированных в виде решетки) и интерпретация синхронизации как конденсации «мягких» фазовых мод.

Полученные результаты носят оригинальный характер, имеют достаточно высокую теоретическую значимость и могут служить основой для дальнейших исследований в смежных областях физики сложных систем.

3.2. Достоверность и апробация результатов

Результаты диссертационной работы согласуются с известными положениями нелинейной динамики, статистической физики и современной теорией сложных систем, а также подтверждаются независимыми подходами: строгими аналитическими выкладками, асимптотическими оценками и численным моделированием. Данные результаты опубликованы в виде 5 статей в рецензируемых журналах (большинство - Q1), а также представлены в качестве докладов на конференциях. Представленные публикации и доклады на конференциях подтверждают достоверность и апробацию результатов.

4. Замечания и дискуссионные вопросы

При всех достоинствах работы необходимо отметить ряд моментов, требующих обсуждения или уточнения.

4.1. О сопоставлении ансамбля фазовых осцилляторов на графе «звезда» с моделью активных ротаторов.

В диссертационной работе показано, что модель для ансамбля фазовых осцилляторов на графах типа «звезда» можно переписать в виде уравнений для разности фаз. В этих переменных данная модель близка к активно обсуждаемой в литературе модели активных ротаторов. Было бы конструктивно и целесообразно провести прямое сравнение этих двух моделей: показать, где они согласуются, а где различаются, в какой мере результаты одной переносятся на другую (режимы, пороги и сценарии перехода к синхронизации, наличие эффекта гистерезиса), и можно ли это сделать в принципе.

4.2. О приближениях при анализе синхронизации с инерцией и шумом.

При изучении потери устойчивости асинхронного состояния в модели с инерцией (со второй производной по времени) и шумом используется приближение, согласно которому данное состояние можно описать равномерным распределением по фазе и δ-функцией по скорости. Однако корректная одночастичная функция распределения должна включать в себя максвелловскую функцию распределение по скорости даже при малом, но конечном шуме. Отсюда вытекают ограничения формул, полученных в диссертационной работе. Представляется важным дать оценки этих ограничений и сопоставить приведенные в диссертации выражения пороговых значений для фазового перехода с известными асимптотиками для критической величины коэффициента связи и первого параметра порядка в пределе малой инерции (например, см. работу [Munyayev V.O. et al., New J. Phys. 22, 023036, (2020)]). Также стоит отметить, что для анализа гистерезиса требуется проводить анализ существования и устойчивости частично синхронного состояния с ненулевым значением первого параметра порядка.

4.3. О результатах для моделей на случайных графах и возможностях их обобщения и развития.

Значительное внимание уделяется коллективной динамике в ансамблях на графах, включая случайные графы. Однако до конца не ясно, какие из полученных результатов относятся именно к этому случаю. Если эта линия намечена как перспективная, было бы полезно конкретизировать возможные задачи коллективной динамики в сетях со случайной топологией и примеры их приложений. Дополнительно заслуживает обсуждения вопрос: можно ли обобщить метод перехода к термодинамическому пределу с использованием графонов на случай, когда распределёнными являются не коэффициенты связи, а фазовые сдвиги в описывающих взаимодействие функциях (например, см. работу [Smirnov L.A., Pikovsky A., Phys. Rev. Lett. 132, 107401, (2024)])?

4.4. О квантовых системах и возможностях учета квантовых флуктуаций.

В главе 6, посвященной коллективным эффектам в квантовых системах (в частности, в экситон-поляритонных конденсатах), анализ проводится в рамках среднего поля, что фактически устраняет квантовый характер исходных систем и «размывает» их изначальную квантовую природу. Было бы конструктивно обсудить, как квантовые эффекты (в частности, квантовые флуктуационные) способны повлиять на коллективные свойства ансамбля и модифицировать совместное скоррелированное поведение его элементов, какие методы могли бы позволить развить теоретические представления в данном направлении и какой математический аппарат уместен для этого.

4.5 Прочие замечания

В тексте диссертационной работы имеются незначительные опечатки и стилистические неточности. Например, опечатки встречаются в подписи к рисунку 4.1, периодически неверно склоняется «анзац Отта-Антонсена» (стр. 13, 14 и др.). В русскоязычной литературе принято использовать термины «устойчивость», «унимодальность» вместо терминов «стабильность», «юнимодальность», соответственно. Поскольку диссертация является личным (авторским) трудом, то с формальной точки зрения несколько смущает употребление в её тексте местоимения «мы».

Выше перечислены замечания не снижают общей высокой оценки работы, но важные с точки зрения усиления результатов и ясности изложения.

5. Заключение

В целом диссертационная работа Александрова А. А. «Эффекты конденсации степеней свободы в сложных системах» является завершенным и самостоятельным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Она соответствует требованиям пп. 9–11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от

24.09.2013 № 842). Несмотря на высказанные замечания, не снижающие научной ценности полученных результатов, диссертация Александрова А. А. вносит свой достойный вклад в развитие теоретической физики и нелинейной динамики.

Считаю, что Александров Артём Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент:
кандидат физико-математических наук, (специальность – 01.04.03)
заведующий научно-исследовательской лабораторией
«Искусственного интеллекта и обработки больших массивов данных»
Института информационных технологий, математики и механики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603022, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23
тел.: +7 (831) 462-33-20, e-mail: lev.smirnov@itmm.unn.ru

Смирнов Л.А. Смирнов

Подпись Л.А. Смирнова заверяю:

Начальник управления кадров Т.А. Лапоног

(ФИО, должность, организация)

ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ
НАЧАЛЬНИК УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ФГАОУ ВО «ННГУ» им. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО
Т.А. ЛАПОНОГ

Дата: «09» сентября 2025 г.

Официальный оппонент	Смирнов / Л.А. Смирнов /
Начальник управления кадров	/ Т.А. Лапоног /
Дата	«09» сентября 2025 г.