

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Института спектроскопии РАН

профессор Задков В.Н.



2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию С.В. Тарасова

«Автомодельность термодинамических и статистических величин в критической области бозе-эйнштейновской конденсации идеального газа в мезоскопических системах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на стыке специальностей 01.04.03 – радиофизика и 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Изучение различных фазовых переходов второго рода в мезоскопических системах и развитие методов их описания составляют важное и актуальное направление современной физики. Заметное продвижение в этом направлении ожидается в результате исследований бозе-эйнштейновской конденсации, которые в последние годы активно проводятся в большом числе лабораторий по всему миру. Достигнутый прогресс в экспериментальной технике, выражающийся в возможности эффективно управлять свойствами содержащей бозоны среды (конфигурировать профиль магнито-оптической ловушки в экспериментах с атомами, варьировать параметры полупроводниковых структур-резонаторов в экспериментах с экситонами и поляритонами и пр.), делает опыты по конденсации в бозе-системах ценным источником данных о фазовых переходах. Проводимые эксперименты демонстрируют весьма богатую физику изучаемых систем (включающую макроскопические когерентные эффекты, генерацию вихрей и солитонов, генерацию света ансамблем бозонов и т.д.), исчерпывающий теоретический анализ которой еще далек от завершения.

Как справедливо замечает автор диссертационной работы, сложность теоретического исследования фазовых переходов связана с тем, что свойства многочастичной системы определяет большой набор разнообразных факторов, корректный учет которых представляет

серьезную проблему. Диссертационная работа ограничена изучением случая идеального газа, и в этой упрощенной модели автор дает полное и прозрачное описание бозе-конденсации атомов в критической области параметров, являющейся самой тяжелой для анализа и характеризующейся сильными флуктуациями параметра порядка. При этом автору удалось в полной мере учесть конечность размеров системы, влияние профиля удерживающего потенциала и условие точного сохранения числа частиц в системе. Построение такого описания, позволяющего проследить непрерывную эволюцию свойств системы при переходе из одной фазы в другую, даже для случая невзаимодействующего газа оставалось до недавнего времени открытым вопросом физики конденсированного состояния вещества. Таким образом, актуальность и новизна диссертации сомнений не вызывают.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и Приложения. Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, а также кратко изложены ее основные результаты.

Первые три главы посвящены построению последовательной аналитической теории явления бозе-эйнштейновской конденсации идеального газа в каноническом ансамбле в критической области параметров системы, где происходит непосредственный переход от неупорядоченной фазы к фазе конденсата. Эта теория строится для произвольного числа бозе-атомов в ловушке произвольного размера и с произвольным профилем удерживающего потенциала. За основу берется микроскопический гамильтониан системы и распределение Гиббса, дополненное строгим условием фиксированности числа частиц в системе. Учет указанного условия, накладывающего связи на числа заполнения разных одночастичных уровней и представляющего наибольшую техническую трудность, реализуется с помощью выделения неаналитичной связи между решениями поставленной задачи для канонического ансамбля и вспомогательной задачи о распределении числа частиц вне конденсата для большого канонического ансамбля с независимыми и неограниченными числами заполнения уровней и нулевым химическим потенциалом. Эта связь основывается на том установленном факте, что относительный статистический вес надконденсатных состояний, которые могут реализоваться в задаче о каноническом ансамбле, тождественно совпадает с весом тех же состояний во вспомогательной. При этом показывается, что моменты и форма распределения числа надконденсатных частиц в приведенной вспомогательной задаче определяют для исходной системы и параметр порядка, и статистическую сумму, и все термодинамические характеристики.

Статистические распределения числа частиц в конденсате и вне его исследуются автором с помощью подходов статистической радиофизики, таких как метод характеристической функции и кумулянтный анализ. Дополнив эти методы применением преобразования Меллина, автор получает оригинальное представление логарифма характеристической функции, позволяющее разделить вклады в статистику от размерных параметров системы и геометрических свойств ловушки (профиля удерживающего потенциала). При этом геометрические свойства системы характеризуются специальными функциями, называемыми автором «функциями ловушки» и являющимися обобщенными дзета-функциями, определенными безразмерным одночастичным энергетическим спектром удерживающихся атомов. Технике их анализа для ловушки произвольной формы посвящено Приложение диссертации.

Развитие указанных методов позволило автору получить наиболее значительный результат диссертации, а именно, раскрыть автомодельную структуру критической области идеального бозе-газа и показать, что с увеличением размеров системы все статистические характеристики, отмасштабированные соответствующим образом, быстро сходятся к неким универсальным зависимостям единого аргумента, являющегося определенной комбинацией числа частиц в ловушке и размерных параметров системы. Сами эти универсальные зависимости диктуются лишь геометрическими свойствами удерживающего потенциала, но не какими-либо размерными параметрами ловушки и атомов. Указанные универсальные зависимости найдены явно и детально исследованы для ловушек произвольной размерности и формы, в которых фазовый переход бозе-конденсации выражен наиболее ярко. Как оказалось, центральная предельная теорема не всегда применима к вычислению статистики, с чем связано подробно изученное в диссертации разделение всех ловушек на две категории, названные гауссовым и аномальным классами. Для первой категории характерен быстрый рост энергетической плотности состояний при росте энергий, а статистика числа частиц в конденсате и вне его характеризуется гауссовыми флуктуациями. Для второй категории энергетическая плотность состояний растет медленно, статистику бозе-конденсации определяет лишь небольшое число низколежащих уровней и флуктуации числа частиц в конденсате оказываются существенно негауссовыми.

Исследуемые в третьей главе термодинамические характеристики, такие как свободная энергия, средняя энергия и теплоемкость, представлены автором в виде комбинации медленно меняющегося вклада, определяемого вспомогательной задачей, и вклада критической функции, имеющей автомодельный характер и зависящей от указанного выше единого аргумента. Этот подход позволил непрерывным образом описать эволюцию термодинамических характеристик системы при переходе через критическую точку, не прибегая к численному моделированию и не используя эвристических моделей. В частности, автору в рамках канонического ансамбля удалось дать корректное аналитическое описание лямбда-особенности теплоемкости в окрестности критической точки для ловушки произвольной формы. Значимым выводом данной главы является то, что для ловушек так называемого аномального класса, где лишь небольшое число низкорасположенных и заселенных уровней определяют свойства системы, поведение термодинамических характеристик в критической области может существенно зависеть от негрубых изменений профиля удерживающего потенциала, например, от изменения граничных условий.

В четвертой главе диссертации автор более детально обращается к указанным системам аномального класса и предлагает удерживающие потенциалы специальных видов, в которых эксперименты с бозе-газом могут позволить продемонстрировать влияние граничных условий на термодинамические величины системы, упускаемое при рассмотрении системы в термодинамическом пределе. Это влияние рассматривается на примере лямбда-особенности удельной теплоемкости, возникающей в окрестности критической точки, и раскрывается с позиции автомодельности структуры критической области, исследованной в предыдущих главах. Исходной задачей автору служит анализ удельной теплоемкости идеального газа в кубических ловушках-ящиках, одинаковых по размеру, но отличающихся периодическими либо нулевыми граничными условиями, налагаемыми ловушкой на одночастичную волновую функцию. Показано, что возникающее при смене граничных условий непропорциональное

изменение высоты уровней и числа одночастичных состояний (именно, запрет для системы с нулевыми граничными условиями «плоскостей» состояний, для которых две из трех проекции волнового вектора нулевые) существенно перестраивает зависимость автомоделной переменной от параметров системы и изменяет саму автомоделную зависимость термодинамической характеристики. В результате смена граничных условий меняет положение и величину максимума удельной теплоемкости. Автор показывает, что ситуацию, возникающую в модельной кубической ловушке, можно воссоздать и в ловушках, приближенных к используемым в современных экспериментах. В качестве таковых предлагаются квазидвумерные ловушки цилиндрической геометрии, рассеечение которых специально сформированной лазерной плоскостью позволяет изменить азимутальные граничные условия с периодических на нулевые. Также предлагаются ловушки декартовой геометрии с узким потенциальным барьером в области удержания атомов, установка высоты которого выше определенного порога позволяет перестроить основное состояние, «запретив» одну из собственных одночастичных волновых функций.

Стоит отметить, что ловушки подобных конфигураций с изменяемыми граничными условиями до сих пор не использовались в лабораторных исследованиях. Однако все их отдельные элементы (включая обеспечение нулевого сечения двухчастичного рассеяния методами резонансов Фешбаха, создание потенциальных барьеров и «лазерных» стенок) успешно реализовывались в экспериментах с холодным бозе-газом. Приведенные автором оценки величины эффекта показывают, что в системах типичного для атомных ловушек размера относительные изменения термодинамических характеристик в критической области лежат в диапазоне 1-10%, что является доступной для измерения величиной.

В пятой главе проводится явное сравнение описаний критической области идеального бозе-газа, построенных в рамках канонического и большого канонического ансамблей. Для этого с помощью методов характеристической функции и кумулянтного анализа (то есть тех же подходов статистической радиофизики, что были использованы в первых трех главах) проводится исследование статистических и термодинамических величин в приближении большого канонического ансамбля, фиксирующего не полное, а лишь среднее число частиц в системе. Автор показывает, что близкое к автомоделному поведение в окрестности критической точки демонстрирует химический потенциал системы, причем это свойство наследуется как статистическими, так и термодинамическими характеристиками системы. При этом универсальный аргумент, обнаруживающий самоподобные свойства критической области, и скейлинг рассмотренных термодинамических величин – энергии и теплоемкости – для разных ансамблей оказываются одними и теми же, однако соответствующие автомоделные функции, к которым сводятся статистические и термодинамические характеристики, значительно отличаются. Поскольку речь идет об автомоделных зависимостях, то неэквивалентность описаний, обнаруживаемая переходом к разрешающему критическую область аргументу, не исчезает с увеличением размера системы даже при переходе к термодинамическому пределу. Как показано в данной главе, для термодинамических величин типа средней энергии и теплоемкости, не имеющих вклада от основного состояния, асимптотики вдали от критической точки совпадают в каноническом и большом каноническом ансамблях. С учетом того, что с ростом размера системы ширина критической области в терминах абсолютных температур неограниченно уменьшается,

исследование задачи в термодинамическом пределе зачастую ограничено поиском указанных асимптотик. Внесение ясности в данный вопрос также является заслугой диссертанта.

Диссертация не лишена недостатков:

В частности, недостаточно полно описаны предыдущие результаты в области диссертации

Однако отмеченный недостаток не умаляет достоинств диссертации, выполненной на весьма высоком научном уровне.

Оценивая диссертацию в целом, нужно отметить широкий набор полученных новых аналитических результатов и убедительную демонстрацию их достоверности. Эти результаты подкреплены сравнением с результатами численных расчетов, основанных на точных рекуррентных соотношениях для статистической суммы системы, включающей заданное число невзаимодействующих бозе-частиц. Представленный в диссертации материал репрезентативен, логично и аккуратно изложен.

Предмет исследования, примененные методы и характер полученных результатов позволяют однозначно заключить, что диссертация С.В. Тарасова соответствует специальностям 01.04.03 – радиофизика и 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Основой диссертации являются 13 опубликованных работ (5 из них – статьи в научных журналах мирового уровня), что заведомо достаточно для кандидатской диссертации. Следует также отметить, что диссертант неоднократно представлял свои работы на международных и российских конференциях. Личный вклад автора не вызывает сомнений

Результаты диссертационной работы могут использоваться в научных организациях, занимающихся теоретическими либо экспериментальными исследованиями в области бозе-конденсации (НИЦ ИФФ РАН, ФИАН, ИСАН, ИАиЭ СО РАН, ИФТТ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, КФТИ Казанского научного центра РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау, ИФП им. П.Л. Капицы РАН).

Диссертация С.В. Тарасова является законченным и достоверным научным исследованием и соответствует требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации к кандидатским диссертациям. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы. Автор диссертации, С.В. Тарасов, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук на стыке специальностей 01.04.03 – радиофизика и 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв утверждён и одобрен на заседании семинара лаборатории спектроскопии наноструктур ИСАН 25. 05.2016, протокол № 1.

Зав. лаборатории спектроскопии наноструктур

Института спектроскопии РАН,

профессор МФТИ

Ю. Е. Лозовик

Телефон: +7 (495)851-08-81 доб. 3-01

e-mail: lozovik@isan.troitsk.ru
142190 г. Москва, г.Троицк, ул. Физическая, 5

Подпись Ю.Е. Лозовика заверяю:

Ученый секретарь ИСАН,
к. ф.-м. н.



Е.Б.Перминов

« 6 » июня 2016 г.