

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Сергея Владимировича Тарасова

«Автомодельность термодинамических и статистических величин
в критической области бозе-эйнштейновской конденсации идеального газа
в мезоскопических системах»

на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
на стыке специальностей

01.04.03 — радиофизика и 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Теоретические и экспериментальные исследования бозе-эйнштейновской конденсации атомов в газах и разных видов квазичастиц в конденсированных средах, помещённых в различные ловушки, находятся на переднем крае современной физики. Многочисленные эксперименты нацелены как на выяснение фундаментальных особенностей процесса бозе-эйнштейновской конденсации, так и на развитие практических приложений, использующих когерентные свойства бозе-эйнштейновских конденсатов. Поскольку реально создаваемые бозе-системы имеют конечные размеры и включают конечное число частиц или квазичастиц, учёт мезоскопичности и анализ автомодельности выявляемых закономерностей чрезвычайно актуальны.

Вместе с тем следует отметить, что имеющееся на сегодняшний день описание конденсации бозе-частиц, удерживаемых в потенциальных ловушках, является довольно фрагментарным. В известных подходах часто ограничиваются численным моделированием либо рассматривают термодинамический предел бесконечно больших систем в приближении большого канонического ансамбля. Особую сложность представляет анализ эффектов конденсации бозонов в критической области параметров, т.е. в переходной области между классической высокотемпературной и конденсированной низкотемпературной фазами.

Диссертационная работа С. В. Тарасова посвящена аналитическому описанию бозе-эйнштейновской конденсации идеального газа в физических системах конечного размера в окрестности критической точки фазового перехода. Эта работа даёт существенное продвижение в теории бозе-эйнштейновской конденсации в наиболее трудной для изучения области параметров. Профиль и характерные размеры потенциала, удерживающего бозе-атомы, а также число атомов в ловушке допускаются произвольными, что позволяет выявить автомодельность статистических и термодинамических свойств изучаемых систем.

Автором диссертации поставлены следующие основные задачи исследования:

- изучение автомодельных характеристик критических явлений, связанных с бозе-эйнштейновской конденсацией;

- описание статистических свойств бозе-системы на основе анализа распределения вероятностей для числа несконденсированных частиц в ловушке;
- детальное исследование термодинамических свойств бозе-системы, включая тонкую структуру лямбда-особенности теплоёмкости;
- выяснение зависимости критических свойств бозе-системы от профиля и размерности потенциала, удерживающего газ атомов;
- сравнение описаний критических явлений с помощью канонического ансамбля, когда число частиц в системе строго фиксировано, и большого канонического ансамбля, когда фиксировано лишь среднее число частиц, и установление неэквивалентности этих двух описаний.

Последовательному решению каждой из перечисленных пяти задач посвящена отдельная глава диссертации. Работа находится на стыке физики конденсированного состояния вещества, где накоплен большой материал по различным фазовым переходам, и радиофизики, в статистическом разделе которой изучается широкий круг флуктуационных и критических явлений. В диссертации использована специальная математическая техника, вовлекающая кумулянтный анализ, интегральные преобразования Меллина и Фурье, спектральные дзета-функции и др. Методы исследования спектральных дзета-функций для произвольных ловушек и ряд конкретных примеров обсуждаются в приложении к диссертации.

В описанной в диссертационном исследовании микроскопической теории бозе-эйнштейновской конденсации не используется большое каноническое приближение и явно учитывается то, что число удерживаемых ловушкой бозонов является постоянным. Для модели канонического ансамбля приведённое описание не опирается на какие-либо дополнительные предположения и справедливо во всей области изменения параметров системы. Технически данное решение получено с помощью оригинального неаналитического преобразования из решения вспомогательной задачи о статистике и флуктуациях числа возбуждений в системе, т.е. полного числа частиц на всех уровнях, кроме основного.

Значительным достижением диссертационной работы является то, что для больших бозе-систем поведение статистических и термодинамических характеристик во всей критической области фактически удалось свести к функциям единственной переменной, являющейся определённой комбинацией температуры, числа частиц, их массы и параметров ловушки. Эти функции описывают плавную, без скачков и разрывов, эволюцию характеристик при изменении фазового состояния для систем любого размера, в том числе и в термодинамическом пределе. Подобное свойство делает анализ картины фазового перехода простым и прозрачным даже в критической области, где автору удалось отдельно учесть влияние на свойства системы её размерных физических параметров и геометрических особенностей ловушки. Аналогичные результаты получены также в приближении большого канонического ансамбля, причём показано, что относительное отличие значений соответствующих автомодельных функций в этом случае от их

значений в случае канонического ансамбля может достигать величины порядка единицы.

Важным результатом является и проведённая классификация, разделяющая все ловушки на два класса универсальности в зависимости от характера статистики распределений числа частиц в конденсате и вне конденсата — гауссов и аномальный. Факт отнесения ловушки к тому или иному классу зависит от функционального вида спектральной плотности собственных состояний, определяемых ловушкой для отдельного атома. Автором выявлены особенности поведения термодинамических величин, в том числе удельной теплоёмкости, характерные для систем разных классов. Также установлено, что данная классификация одинаково применима к описанию системы как в рамках канонического, так и в рамках большого канонического ансамбля. То свойство систем аномального класса, что их термодинамические величины демонстрируют явную зависимость от возмущений спектра и смены граничных условий в ловушках, предложено для экспериментального наблюдения. С этой целью проанализирован ряд специальных профилей удерживающих потенциалов и проведена количественная оценка ожидаемых эффектов.

Некоторые утверждения диссертации можно было бы изложить чуть более широко. Во вводной части диссертации есть фраза о том, что в статистической физике существует парадигма — изучать статистику и термодинамику системы сразу и только в термодинамическом пределе. При такой формулировке может сложиться впечатление, что этот метод является единственным. Здесь автору стоило бы сказать, что данный метод в настоящее время используется лишь как первый шаг в изучении сложных систем, но в современной статистической физике не воспринимается как единственная возможность, ведь довольно хорошо известна необходимость использования и других подходов. Было бы также полезно отдельно обсудить, всегда ли можно понимать явление бозе-эйнштейновской конденсации как фазовый переход и какую роль при этом играет конечность системы. Далее, в формулах (4.11) и (5.22) используется нижняя ветвь функции Ламберта W_{-1} . Функция Ламберта встречается в статистической физике, но не является совсем стандартной, поэтому было бы полезно несколько подробнее описать эту функцию и её ветви непосредственно в тексте диссертации. Имеются некоторые неотредактированные грамматические неточности, например, в последнем предложении на с. 110 и в первом предложении на с. 116. Отмеченные замечания, однако, несущественны и не влияют на высокую оценку диссертации и научную и практическую ценность её результатов.

Диссертационная работа С. В. Тарасова выполнена на высоком научном уровне и содержит решение задачи, имеющей существенное значение для развития современной физики фазовых переходов, а именно, задачи о строгом и последовательном описании явления бозе-эйнштейновской конденсации в системе с фиксированным числом невзаимодействующих атомов во всей области параметров и для ловушек произвольного профиля. Диссертация является законченной научной работой. Её содержание достаточно полно

отражено в автореферате. Соискатель внёс определяющий вклад в постановку и решение рассматриваемых задач, включая развитие и применение специальных методов математической физики, и в физическую интерпретацию полученных решений.

Результаты диссертации являются новыми, актуальными и надёжно обоснованными, они опубликованы в 6 ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах и неоднократно докладывались автором на всероссийских и международных конференциях. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается использованием строгих математических методов, согласием с известными ранее частными результатами для ловушек с идеальным бозе-газом, а также совпадением найденных аналитических решений с результатами прямого численного моделирования на основе известных рекуррентных соотношений. Результаты могут найти своё практическое применение в ФИАН, ИПФ РАН, МФТИ, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ИФП РАН и других научных и научно-образовательных организациях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Автомодельность термодинамических и статистических величин в критической области бозе-эйнштейновской конденсации идеального газа в мезоскопических системах» на стыке специальностей 01.04.03 — радиофизика и 01.04.07 — физика конденсированного состояния отвечает критериям Положения о присуждении учёных степеней ВАК, а её автор Сергей Владимирович Тарасов заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук (ФИАН)

Собьянин

Денис Николаевич Собьянин

26 мая 2016 г.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53, ОТФ ФИАН
Тел.: +7(499) 132-60-50, e-mail: sobyanin@lpi.ru

Подпись Д. Н. Собьянина удостоверяю

Учёный секретарь ФИАН



[Handwritten signature]
М. М. Цвентух