

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА**  
о диссертации Калиниченко Игоря Степановича  
«Высокотемпературные разложения большого  
термодинамического потенциала в фоновых полях»,  
представленной на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

В диссертационной работе Калиниченко И. С. предложен новый метод вывода высокотемпературного разложения большого термодинамического потенциала. Полученное разложение используется для изучения термодинамического поведения газа заряженных бозонов, находящихся в магнитном поле, а также для исследования зависимости свободной энергии скалярных частиц в стационарном медленно меняющемся гравитационном поле от времениподобного вектора Киллинга, которым обладает фоновая метрика.

**Актуальность.** Релятивистская теория систем частиц, находящихся в термодинамическом равновесии, начала активно развиваться с середины прошлого века. Несколько позже были получены асимптотические формулы для высокотемпературных разложений различных термодинамических величин в отсутствие фона. Естественным развитием служит вывод аналогичных разложений для систем, находящихся в классических внешних полях. Такая задача представляет особый интерес еще и потому, что наличие ненулевых внешних полей в большей степени соответствует реальным физическим моделям. Такие поля могут существенно менять термодинамическое поведение системы.

**Научная новизна.** Построенное в диссертации высокотемпературное разложение является полным, а также в неявном виде содержит в себе непертурбативные по фоновым полям поправки. В частности, с его помощью решена задача о вычислении в явном виде экспоненциально подавленных вкладов в  $\Omega$ -потенциал частиц, находящихся во внешнем магнитном поле, и изучены фазовые переходы в такой системе. Другим ключевым аспектом диссертационной работы является построение явно общековариантного метода вычисления термодинамических потенциалов для частиц, находящихся в стационарном гравитационном поле, а также анализ зависимости таких потенциалов от вектора Киллинга.

**Общая характеристика** диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и четырех приложений. Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, обоснована их актуальность и новизна, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертант вводит понятие  $\zeta$ -функции для оператора типа Клейна-Гордона, который преобразован по Фурье относительно времени. С ее помощью оказывается удобным записать однопетлевую поправку в большой термодинамический потенциал. Далее методами комплексного анализа выводится асимптотическая по обратной температуре формула

разложения большого термодинамического потенциала. Фактически же задача сводится к поиску коэффициентов асимптотического разложения  $\zeta$ -функции, связанных с известными и хорошо изученными в литературе коэффициентами теплового ядра, а также некоторых функций  $\sigma$ , которые имеют нетривиальную зависимость от фоновых полей и, в частности, содержат в себе непертурбативные поправки.

Во **второй главе** рассматриваются частицы в постоянном однородном магнитном поле. Как для бозонов, так и для фермионов найдены тепловые ядра и построены асимптотические разложения для  $\zeta$ -функций. Показано, что функции  $\sigma$  в данном случае сводятся к обычной дзета-функции Гурвица. Построены их различные разложения и найдены непертурбативные вклады. Далее анализируется газ релятивистских бозонов, находящихся в постоянном магнитном поле. Методами компьютерной алгебры изучается намагниченность системы, а также явно строится график зависимости напряженности магнитного поля от индукции. Такая зависимость хорошо дополняет полученные другими авторами результаты и проливает свет на род возникающего фазового перехода. Выражения для ключевых параметров получены аналитически. В последнем параграфе главы изучается намагниченность системы бозонов с самодействием. Главной особенностью здесь является выход за пределы однопетлевого приближения и учет «кольцевых» диаграмм. Показано, что при достаточно высокой плотности частиц система переходит в ферромагнитное состояние.

**Третья глава** представляет собой применение полученных ранее формул к случаю стационарной фоновой метрики с времениподобным вектором Киллинга. В параграфе 3.2 диссертантом описан прием, позволяющий не делать обычное для таких вычислений  $3+1$  разбиение, и сохраняющий удобные четырехмерные обозначения. Здесь же построены наивные выражения для функций  $\sigma$  (без непертурбативных вкладов). Следующий параграф содержит высокотемпературные разложения для свободных энергий в бозонном и фермионном случае. Получены новые результаты, касающиеся зависимости коэффициентов такого разложения от вектора Киллинга. Пробел, связанный с отсутствием экспоненциально подавленных вкладов в разложении, решается в параграфе 3.5 с помощью построения и дальнейшего использования приближенного выражения для теплового ядра. Интересным является тот факт, что данные вклады имеют зависимость от вектора Киллинга.

**Достоверность и обоснованность** результатов базируется на применении стандартных методов теоретической физики. Полученные результаты согласуются с исследованиями, выполненными ранее другими авторами.

**Основные результаты диссертации опубликованы** в 4 работах в ведущих по данному научному направлению международных журналах.

В адрес диссертации можно высказать следующие замечания:

1. Приложения диссертации, с моей точки зрения, перегружены информацией, часть из них логичнее было бы разместить в основном тексте, некоторые сократить.

2. Во введении автором упоминается возможность описания модели адрона как мешка кварков. В этой связи было бы интересно изучить влияние граничных условий на полученные результаты.

3. Считаю, что ряд утверждений недостаточно подробно обоснованы в диссертации. Например, в первой главе обсуждаются некоторые предположения относительно свойств  $\zeta$ -функций. В данном случае, стоило бы сделать более детальное описание, а не ограничиваться ссылками на работу автора.

Однако приведенные замечания носят частный характер и не снижают научную ценность работы. Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми и представляют несомненный научный интерес. Результаты исследования прошли необходимую апробацию, публикации по теме диссертации раскрывают положения, выносимые на защиту. Автореферат диссертации адекватно отражает ее содержание.

Все сказанное позволяет заключить, что диссертация «Высокотемпературные разложения большого термодинамического потенциала в фоновых полях» соответствует требованиям, изложенным в пункте 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Калинин Игорь Степанович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Официальный оппонент  
профессор кафедры теоретической физики  
физического факультета  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный университет  
имени М. В. Ломоносова»,  
доктор физико-математических наук  
(01.04.02 – Теоретическая физика),  
профессор

29.01.2018

Халилов Владислав Рустемович

Декан  
физического факультета МГУ  
профессор

*Сведения об организации:*  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1.  
Тел.: +7(495)939-10-00 , e-mail: info@rector.msu.ru,  
адрес сайта: www.msu.ru

