

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

**Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова**

профессор А.А. Федянин

«14»

105

2024 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию КОВАЛЕНКО Александра Михайловича «Флуктуационные явления в анизотропной гидродинамике», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

В диссертации А.М. Коваленко исследуются вопросы распространения звука и ударных волн в рамках анизотропной релятивистской гидродинамики, которая была разработана для более точного гидродинамического описания неравновесных стадий эволюции кварк-глюонной материи, создаваемой в столкновениях тяжёлых ядер.

Актуальность работы

Теоретическое описание эволюции плотной и горячей адронной материи, рождающейся при столкновении тяжёлых ядер, является актуальной областью исследования в настоящее время. Одними из методов такого описания служат гидродинамические подходы, направленные на изучение коллективных свойств создаваемой кварк-глюонной плазмы, которая проявляет свойства идеальной жидкости. Особенности поведения данного вещества создают необходимость модифицирования уже известных гидродинамических теорий. Примером такой теории является анизотропная релятивистская гидродинамика, которая учитывает сильные анизотропные свойства неравновесной кварк-глюонной материи на ранних стадиях её эволюции.

Исследования звуковых явлений, проводимые Коваленко А. М. в рамках диссертационной работы, дополняют предыдущие результаты, полученные в анизотропной релятивистской гидродинамике. Продемонстрированное влияние анизотропии на свойства ударных волн и характеристики звука в анизотропной среде помогает лучше понять процессы, происходящие на ранних стадиях столкновений, и их вклад в конечное распределение частиц. Это подчеркивает актуальность темы исследования, рассмотренной в диссертации.

Научная новизна

Результаты диссертационной работы позволяют оценить характер влияния анизотропии на распространение звука и связанных с ним явлений. Научную новизну работы составляют результаты теоретических исследований. Эти исследования позволяют получить общее представление о том, как изотропные решения изменяются в условиях анизотропной релятивистской гидродинамики. Вытекающие из этого разрывные решения ударных волн и анализ волнового уравнения выявляют ряд интересных особенностей и эффектов, которые возникают при использовании анизотропного подхода. Например, при постоянном параметре анизотропии наблюдается эффект преломления потока, проходящего через ударную волну. Также в работе представлены аналитические выражения для анизотропии скоростей звука и различных свойств ударных волн, формируемых в разных направлениях. Важным результатом исследования является обнаруженная возможность изотропизации системы путем генерации ударных волн.

Практическая значимость

В диссертационной работе Коваленко А. М. было создано обобщение известных методов изучения звуковых явлений в гидродинамике на анизотропный случай. В общем случае это означает, что деформация импульсного распределения влияет на конечные результаты. Отдельно стоит отметить вывод о том, что образование ударных волн может привести к изотропизации системы.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений

Достоверность полученных результатов основывается на широко используемых методах работы с гидродинамическими теориями и логической непротиворечивости результатов. Аналитические выкладки содержат достаточное количество шагов для проверки вычислений.

Структура диссертации

Диссертационная работа А. М. Коваленко включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы из 74 наименований и четыре приложения. Полный объем диссертации 93 страниц, включая 24 рисунка.

Во **введении** диссертации представлен обзор текущего прогресса в исследовании кварк-глюонной плазмы гидродинамическими методами и

звуковых явлений в контексте столкновений тяжёлых ядер. Перечислены положения, вынесенные на защиту, а также актуальность, научная новизна и значимость результатов работы.

В **первой** главе содержится описание анизотропной релятивистской гидродинамики. Представлены основные отличия от изотропной релятивистской гидродинамики, заключающиеся в изменении тензора энергии импульса и одночастичной функции распределения. Приведён вывод формул для анизотропных физических величин, таких как плотность энергии и давление. В конце содержится решение кинетического уравнения Больцмана в частном случае буст-инвариантного движения в продольном направлении и отсутствии поперечного расширения.

Вторая глава посвящена выводу и решению волнового уравнения в случае постоянной анизотропии. Показано различие скоростей звука в продольном и поперечном направлениях. Исходя из разных скоростей звука и основываясь на предположении об эллиптической форме звукового фронта, выводятся выражения для углов конуса Маха. Было показано, что все выражения при стремлении параметра анизотропии к нулю соотносятся с уже известными изотропными выражениями.

В **третьей** главе изучается уравнение согласования тензора энергии-импульса на границе плоской ударной волны. Из данного уравнения автором были получены разрывные решения для ударных волн сжатия в случае постоянного параметра анизотропии. Было продемонстрировано, что возникает преломление падающего на ударную волну потока. Для сильных ударных волн при достаточно большой анизотропии появляются свойства волн разрежения, которые свидетельствуют о возможных ограничениях на параметры задачи, что отмечает и сам автор. Аналитически были получены выражения для скоростей потока в граничных – продольном и поперечном – случаях. В случае, когда анизотропия для падающего и прошедшего потоков различается, автор рассматривает задачу без эффекта преломления потока для соответствия между числом уравнений и числом неизвестных. Было показано, что такие ударные волны изотропизуют систему.

Четвертая глава посвящена вопросу о линейной устойчивости ударных волн в анизотропной релятивистской гидродинамике. Основным требованием на неустойчивость в системе являлось условие затухания возмущений на пространственной бесконечности. Автором было показано, что при любом полярном угле режим неустойчивости с таким условием затухания не наблюдается. Для продольного и поперечного случаев расположения нормали ударной волны к оси анизотропии доказательство устойчивости проведено аналитически.

В **заключении** перечислены основные результаты работы.

В качестве **замечаний** к диссертации можно отметить следующее:

1. В третьей главе на рисунках 3.1 и 3.2 приведены надписи на английском языке, что немного диссонирует с подписями на русском языке к данным рисункам.

2. В формулах (5.131) и (5.133) на странице 68 и в автореферате в уравнении (21) отсутствует величина амплитуды возмущения ϵa .

3. Вносит путаницу определение угла α . Во второй главе это угол отсчитывается от оси Ox , а начиная с третьей главы от оси Oz .

4. Не обсуждается вопрос как зависит формулировка анизотропной гидродинамики от существующих двух разных определений скорости.

Однако, данные замечания никак не умаляют достоинства работы, высокой оценки ее качества и сделанных выводов.

Основные результаты представлены в 5 статьях, которые были опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и входящих в список ВАК. В целом работа изложена логично и доступным языком, наглядно иллюстрирована. Теоретическая мотивация работы и глубина проработки материала находятся на достаточно высоком уровне. Выводы работы хорошо обоснованы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Коваленко А. М. «Флуктуационные явления в анизотропной гидродинамике» соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 год № 335, а сам Коваленко Александр Михайлович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

Отзыв составил

в. н. с. ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,

доктор физ.-мат. наук

 Снигирев А.М.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании Семинара ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ, 4.12.2023.

Заведующий ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ,

профессор, член-корреспондент РАН

 Боос Э.Э.

Директор НИИЯФ МГУ

профессор, член-корреспондент РАН

 Боос Э.Э.