

# ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Коваленко Александра Михайловича «Флуктуационные явления в анизотропной гидродинамике», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — Теоретическая физика.

## **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертация А.М. Коваленко посвящена исследованию звуковых явлений и их свойств в анизотропной релятивистской гидродинамике. Актуальность данной работы обусловлена рядом факторов, связанных с теориями и направлениями исследований. Прежде всего, речь идет о развитии анизотропной релятивистской гидродинамики, которая стала одним из ключевых инструментов для понимания эволюции кварк-глюонной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов. Во-вторых, изучение звуковых явлений, которое сопровождалось определёнными трудностями в диссипативных теориях, становится более прозрачным в случае анизотропного подхода.

Феноменологическое описание неравновесных стадий эволюции кварк-глюонной плазмы представляет собой широкий пласт методов и подходов, в том числе гидродинамических. Несмотря на значительный успех некоторых диссипативных гидродинамических теорий, их применение к ранним стадиям столкновений тяжёлых становится ограниченным. Учёт малой величины продольного давления, создаваемого в системе, относительно поперечного давления, приводит в известных диссипативных теориях к появлению отрицательных значений давления в ходе эволюции системы. Это может означать неприменимость подобного гидродинамического разложения и необходимость учёта всё больших порядков в разложении. Анизотропная релятивистская гидродинамика предполагает явное введение анизотропии, что позволяет обойти эту проблему уже в нулевом порядке. Таким образом, анизотропный параметр, введённый в теорию, является результатом некоторого пересуммирования градиентов в разложении. Исследование различных явлений, в том числе и звуковых, несомненно, является актуальной задачей, способной дать результаты, отражающие особенности неравновесной кварк-глюонной плазмы.

## **Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы**

Достоверность результатов автора обеспечивается как выбором используемых методов, которые уже неоднократно применялись в случае изотропного описания, так и наглядностью аналитических результатов, которые согласуются с изотропным пределом. Подробное текстовое описание результатов численных расчётов сопровождается многочисленными графиками решений уравнений.

## **Научная новизна диссертационной работы**

Результаты работы дают качественное представление о деформации изотропных решений в анизотропной релятивистской гидродинамике. Следствия из разрывных решений ударных, как и анализ волнового уравнения, выражаются в ряде интересных особенностей и эффектов, которые возникают при работе в рамках анизотропного подхода. Например, при постоянном параметре анизотропии из решений ударных волн следует эффект преломления прошедшего через ударную волну потока. Также анизотропия скоростей звука, и как следствие, неравнозначность свойств ударных волн, генерируемых в различных направлениях, представлена в работе в виде соответствующих аналитических выражений. Важным фундаментальным результатом является продемонстрированная возможность изотропизации системы посредством генерации ударных волн.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

Практическая значимость результатов диссертационной работы связана с показанной возможностью получения разрывных решений для ударных волн в гидродинамических моделях, описывающих столкновения тяжёлых ядер. Было исследовано влияние параметра анизотропии на свойства ударных волн и распространение звука, что расширяет понимание вопроса об изотропизации кварк-глюонной плазмы и её неравновесных свойствах. Полученные результаты в частном случае постоянного параметра анизотропии создают основу для последующих исследований в данном направлении.

### **Структура диссертационной работы**

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

Во **введении** дается обоснование актуальности темы диссертации. Обсуждаются предпосылки к созданию анизотропной релятивистской гидродинамики и излагается история её развития. Также обсуждается роль звуковых явлений в кварк-глюонной плазме и приводятся результаты соответствующих исследований. Представлен план диссертации.

**Первая** глава посвящена формулированию основных положений анизотропной релятивистской гидродинамики. Приведён вывод анизотропного тензора энергии-импульса из предположения различных давлений в продольной и поперечном направлении. Затем приводится анзац для одночастичной функции распределения, где явным образом введён параметр анизотропии. Приведены соотношения между изотропными и анизотропными формами для плотности энергии и давлений. В конце приведён вывод уравнений движения из кинетического уравнения Больцмана и их решений в случае только продольного расширения.

Во **второй** главе приводится вывод волнового уравнения в случае постоянного параметра анизотропии. При анализе волнового уравнения автор выделяет две различные скорости звука в продольном и поперечном направлении. Показано, что в поперечном направлении скорость звука выше изотропной, а в продольном ниже, причём последняя стремится к нулю с ростом параметра анизотропии. Используя

полученную анизотропию распространения звука в среде, были выведены формулы для углов конуса Маха.

В **третьей** главе автором получены разрывные решения для плоских ударных волн сжатия в анизотропной релятивистской гидродинамике. В случае постоянной анизотропии приведены аналитические выражения для поперечных и продольных ударных волн, а также результаты численного расчёта для произвольного полярного угла. Было показано, что в случае постоянной анизотропии возникают эффекты преломления потока, проходящего через ударную волну. При больших анизотропиях ударная волна показывает характерные черты волн разрежения, что указывает на ограничения рассмотрения случая постоянной анизотропии. Для изменяемой анизотропии были проведены расчёты, которые показали наличие ограничения сверху на параметр анизотропии. Также была продемонстрирована возможность изотропизации системы путём появления ударных волн.

**Четвертая** глава посвящена анализу линейной устойчивости ударных волн относительно малого гармонического возмущения. Под неустойчивым режимом понимается режим, при котором присутствует экспоненциальный рост возмущения со временем, однако отсутствует экспоненциальный рост на пространственной бесконечности. Было показано, что данный режим не наблюдается в случае постоянной анизотропии. Для поперечного и продольного случаев анализ был проведён аналитически, в произвольном же случае были применены численные методы.

В **Заключении** суммируются основные результаты и выводы диссертационной работы.

В **Приложении** приведены вспомогательные вычисления касательно ударных волн и доказательства их устойчивости в случае постоянной анизотропии.

#### **Замечания к диссертационной работе:**

1. Во второй главе автор выводит соотношения для углов Маха в случае постоянной анизотропии, однако не было приведено сравнения с результатами работ, где конус Маха рассматривался в изотропном случае в контексте объяснения двугорбой структуры в азимутальных корреляциях партопных струй. Хотелось бы увидеть зависимость углового расстояния между двумя пиками от параметра анизотропии, предварительно рассмотрев дополнительную деформацию конуса Маха в радиальном потоке.
2. В левой панели рис. 1.1 имело бы смысл использовать логарифмическую шкалу для  $\tau$ , так как для малых  $\tau$  имеется очень резкая  $\tau$ -зависимость величины  $\xi$ . Отметим также отсутствие указания размерности  $\tau$  на рис. 1.1.

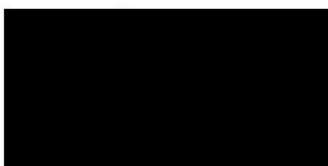
Сделанные замечания ни в коей мере не снижают общей высокой оценки диссертационной работы, которая, несомненно, вносит большой вклад в гидродинамические методы изучения кварк-глюонной плазмы. Диссертационная работа А. М. Коваленко выполнена на самом высоком научном уровне. Актуальность и практическая значимость диссертационной работы не вызывает сомнения.

Основные результаты докладывались на международных конференциях и опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК.

Изложение диссертационной работы логически последовательно. Автореферат диссертации в полной мере и правильно отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа А. М. Коваленко «Флуктуационные явления в анизотропной гидродинамике» полностью соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор Коваленко Александр Михайлович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

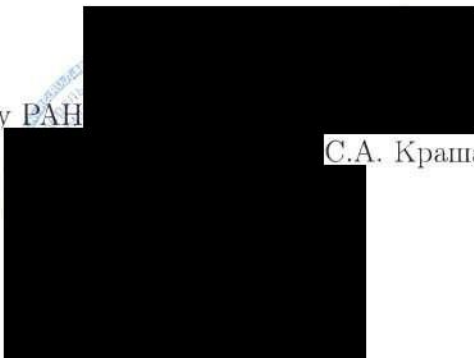
Доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
Российской академии наук  
Захаров Бронислав Глебович



5 апреля 2024 г.

Адрес: 142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова,  
д. 1А, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
E-mail: bgz@itp.ac.ru

Подпись Б.Г. Захарова удостоверяю  
Ученый секретарь ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН  
кандидат химических наук



С.А. Крашаков