

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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*.

Теория кварк-глюонной и адронной материи является одним из наиболее **важных** направлений современной физики, как в связи с ее собственной значимостью, так и как инструмент для описания экспериментов, в том числе на комплексе «NICA» в ОИЯИ. Поскольку последовательное описание динамики соответствующих процессов представляет значительные трудности, особую роль играет релятивистская гидродинамика, последовательно учитывающая законы сохранения. Обычное приближение для тензора энергии-импульса соответствует изотропному распределению давления в локальной системе отсчета, что, как известно, связано с равновесным состоянием. В то же время, разные скорости расширения материи в разных направлениях приводят к анизотропному распределению по импульсам, и, как следствие, к сильной анизотропии давлений в системе, особенно на ранних стадиях после столкновения. Развивающаяся в последнее время анизотропная релятивистская гидродинамика позволяет учитывать анизотропные свойства кварк-глюонной плазмы явным образом. В числе характеристик адронных сред, которые могут рассчитываться подобными методами, можно упомянуть скорость звука, которая, служит индикатором ее свойств и может быть использована для изучения уравнения состояния системы. Другим объектом изучения являются ударные волны, играющие важную роль в процессе изотропизации и термализации кварк-глюонной плазмы.

В диссертации А.М. Коваленко исследуются **актуальные** 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.

**Научная новизна и практическая значимость.**

В анизотропной релятивистской гидродинамике впервые были получены результаты, связанные с распространением звука и свойствах ударных волн, что составляет **научную новизну** работы. Было показано, что в рамках анизотропного подхода возможно получение разрывных решений ударных волн, в которых присутствует нетривиальная зависимость от анизотропии.

Обнаруженные эффекты преломления потока к оси анизотропии и изотропизации системы посредством генерации ударных волн расширяют картину неравновесной стадии эволюции кварк-глюонной материи, созданной в столкновениях тяжёлых ядер. Результаты работы имеют **практическую значимость** и являются подспорьем для более глубокого анализа звуковых явлений в кварк-глюонной плазме.

#### **Обоснованность и достоверность выводов и заключений.**

Достоверность результатов вытекает из методов их получения, которые являются общепризнанными в контексте изучения гидродинамических свойств жидкости, и подкрепляются последовательностью в проведении вычислений. Численный анализ сопровождается многочисленными графиками, которые согласуются как с аналитически решёнными частными случаями, так и с изотропным пределом.

#### **Структура диссертации.**

Диссертационная работа А. М. Коваленко состоит из введения, четырех глав, заключение, списка литературы из 74 наименований и четырех приложений. Она содержит 93 страницы текста, включая 24 рисунка.

Во **введении** диссертации представлен краткий обзор, обсуждается актуальность темы, формулируются основные положения, включая значимость результатов и научную новизну.

В **первой** главе даётся подробное изложение основ анизотропной релятивистской гидродинамики. Из общих положений об анизотропии выводится анизотропный тензор энергии-импульса. Во втором параграфе представлено описание кинетического аппарата анизотропной релятивистской гидродинамики. Также рассмотрено решение кинетического уравнения Больцмана в случае продольного расширения гидродинамической системы, благодаря чему удаётся получить ответ для эволюции параметра анизотропии.

**Вторая** глава посвящена вопросу распространения звука в анизотропной релятивистской гидродинамике в случае постоянного параметра анизотропии. Представлен вывод волнового уравнения, из которого были получены продольная и поперечная скорости звука. Далее обсуждается движение сверхзвуковой частицы, которая генерирует ассиметричный конус Маха в среде. Показано, что появляются два различных угла раскрытия конуса Маха (углы Маха) и выведены формулы для них, которые зависят от величины анизотропии.

В **третьей** главе исследуются разрывные решения ударных волн сжатия в анизотропной релятивистской гидродинамике при постоянной анизотропии. Аналитически получены формулы для скоростей падающего и прошедшего



потоков в случае продольного и поперечного расположения нормали ударной волны по отношению к оси анизотропии. Показано, что в терминах разности скоростей потоков в поперечном случае анизотропия ослабляет ударную волну, а в продольном, наоборот, усиливает. В случае произвольного полярного угла появляется эффект отклонения потока от первоначального направления в сторону оси анизотропии. В случае изменяющейся анизотропии и отсутствии преломления потока показано, что имеется ограничение на параметр анизотропии. Основным свойством ударных волн такого типа является возможность изотропизации системы. Для прошедшего потока анизотропия испытывает значительное падение по сравнению с величиной анизотропии падающего потока.

**Четвертая** глава посвящена вопросу 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 представлены и обсуждены основные результаты диссертационной работы.

В Приложениях приведены вспомогательные вычисления и аналитическое доказательство устойчивости продольной и поперечной ударных волн.

#### **Замечания.**

1. На с. 16 отмечается, что “релаксация системы к изотропному состоянию осуществлялась посредством введения анзаца для источника в уравнении для сохранения потока энтропии, а поток плотности числа частиц не рассматривался” При обсуждении законов сохранения (1.59/ 1.60) отмечено: “Для выполнения закона сохранения энергии необходимо, чтобы правая часть уравнения (1.60) была равна нулю”. Почему не рассматривается сохранение тока, ведь сохраняющиеся заряды – электрический, барионный, странность – играют огромную роль в соударениях тяжелых ионов?

2. Как отмечается в Заключении на с. 73 “Несмотря на то, что фиксация параметра является грубым приближением, полученное асимметричное волновое уравнение даёт верное качественное описание влияния анизотропии”, хотя в предшествующем тексте этот вопрос не обсуждается. По-видимому, соискатель мог бы предположить, какие из результатов претендуют на выход за рамки этого приближения, например, соотношение (2.16), переписанное как правило сумм для

квадратов продольной и поперечной скоростей звука:  $2C_{\perp} + C_{\parallel} = 1$ . Возможно, оно даже обобщается на случай отсутствия аксиальной симметрии и наличия трех различных скоростей звука, так что  $\sum C_i^2 = 1$ . Данный вопрос, впрочем, можно понимать скорее как относящийся к дальнейшей работе.

3. В диссертации есть опечатки и неточности. Например, на с. 13 после (1.5) написано “где  $c$  - скорость света”, тогда как в самом уравнении этот символ отсутствует, т.к.  $c=1$ .

### **Оценка содержания диссертации и её завершенности.**

Несмотря на замечания, следует отметить, что в работе продемонстрирован достаточно высокий уровень научной подготовки, подкреплённый последовательностью изложения. В диссертации детально сформулированы все основные этапы работы и применяемые теоретические методы исследования. Результаты диссертации полностью отражены в 5 публикациях и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и входящих в список ВАК. 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, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени *кандидата* физико-математических наук по специальности 1.3.3 — *теоретическая физика*.

Официальный оппонент,  
заместитель директора Лаборатории  
теоретической физики ОИЯИ

Объединенный институт  
ядерных исследований (ОИЯИ)  
доктор физико-математических наук  
[REDACTED] Теряев Олег Валерианович  
141980, Московская обл.,  
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

7 мая 2024 г.