



## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Глазырина Семёна Игоревича** «Свойства фронтов горения в сверхновых типа Ia», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика

Диссертационная работа Глазырина С.И. посвящена одной из самых актуальных проблем современной астрофизики – теоретическому исследованию механизмов взрыва термоядерных сверхновых (типа Ia). Изучение сверхновых этого типа стало особенно актуальным в связи с их использованием в космологии как «стандартных свеч», что возможно только с использованием феноменологических закономерностей (соотношение Псковского-Филлиппса -- зависимость максимума блеска и скорости спадания кривой блеска после максимума). Теоретическое обоснование такой зависимости не получено, но без её понимания трудно избавиться от систематических ошибок, особенно для сверхновых на больших красных смещениях, что ограничивает их использование для космологических целей. Неясен также в деталях сам механизм взрыва – сейчас понятно, что центральный поджиг белого карлика с массой близкой к максимальной должен из дефлаграционного режима горения перейти в детонационный, но физически обоснованной модели такого перехода пока не создано. Таким образом, тема диссертационной работы Глазырина С.И. является **крайне актуальной**. Диссертант видит свою задачу в развитии моделей горения в сверхновых типа Ia на основе детального физического исследования неустойчивостей термоядерного пламени в белых карликах с массой близкой к Chandrasekharovскому пределу. **Новизна в постановке задачи** состоит в детальном учете микроскопической структуры пламени, исследовании термопульсационной неустойчивости, неустойчивости Ландау-Дарье и учёта турбулентности на ускорение фронта горения. При этом используется как аналитическое рассмотрение, так и численные расчеты на основе существующих и оригинальных численных схем.

Диссертация Глазырина С.И. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации – 107 стр., включая 21 рисунок, 6 таблиц и списка литературы из 171 наименования. Во введении (стр. 4-15) автор подробно описывает современные представления и сверхновых типа Ia и механизмах их взрыва, обосновывает актуальность и постановку задачи, формулирует цели и задачи работы, описывает основные теоретические методы и подходы, используемые в работе, приводит положения, выносимые на защиту, а также кратко излагает содержание последующих глав диссертации.

Первая глава (с. 16-25) посвящена изучению общей картины взрыва термоядерной сверхновой. Автор строит аналитическую модель дефлаграционного горения в предположении политропного уравнения состояния белого карлика, которая позволяет проводить оценки дефлаграционной фазы взрыва, а также обсуждает возможные механизмы перехода дефлаграции в детонацию.

Во второй глава (с. 26-46) исследуется плоская волна горения в условиях вырожденного белого карлика. Несмотря на то, что такие задачи решались ранее, независимая проверка результатов представляется весьма важной. Используя методы статистической физики, автор вычисляет кинетические коэффициенты (электронную теплопроводность, кулоновский логарифм, длину свободного пробега электронов), оценивает безразмерные гидродинамические параметры подобия (число Льюиса и число Прандтля) задачи, приводит скорости используемых в расчётах ядерных реакций, записывает уравнение состояния и выписывает основные уравнения. Далее (п. 2.7) описывается решение одномерной системы уравнений с горением кодом FRONT1D, разработанным автором. В п. 2.9. приводятся результаты расчётов для разного химического состава, плотностей и набора ядерных реакций. Получено согласие с ранними расчётами Тиммеса и Вусли на уровне 20-30% и обсуждаются возможные причины расхождения.

В третьей главе (с. 47-62) подробно исследуется термопульсационная неустойчивость пламени, которая может возникать при некоторых критических безразмерных числах Льюиса и Зельдовича. В п. 3.1. строится одномерная упрощённая модель пульсаций, в п. 3.2. исследуется её устойчивость и находится критическое число Зельдовича. В п. 3.3. проводится численное исследование устойчивости рассматриваемой модели, и далее в п. 3.5. на основе разработанных и проверенных на аналитических примерах схем проводится численное исследование термопульсационной неустойчивости горения в сверхновой. Делается **основной вывод** о термопульсационной устойчивости дефлаграционного горения в условиях сверхновых типа Ia.

Четвёртая глава (с. 63-71) посвящена численному исследованию неустойчивости тонкого фронта горения Ландау-Дарье в канале. Эта неустойчивость может приводить к фрактализации фронта пламени сверхновых, что может быть существенным для перехода в детонацию. Вначале описывается физическая картина неустойчивости, а в п. 4.1 предложен численный трехмерный метод FRONT3D для решения этой задачи. В п. 4.2. представлены результаты расчета неустойчивости Ландау-Дарье для горения в канале для двух различных типов возмущений (одномодовое и многомодовое). Показано, что в обоих случаях неустойчивость приводит к появлению «каспов» фронта.

В пятой главе (с. 72-87) изучается влияние турбулентности на скорость распространения пламени. В п. 4.2 рассматривается неустойчивость Рэлей-Тэйлора\_ Ландау для тонкого

фронта, являющаяся основной для турбулизации пламени в условиях сверхновых на масштабах звезды. В п. 5.2. вводятся безразмерные критерии влияния турбулентности на пламя. В п. 5.3. строится гидродинамическая модель турбулентного пламени в режиме «искривлённого пламени» в  $k$ - $\epsilon$  модели (уравнения 5.34-5.41). Полученные уравнения решаются численно кодом FRONT3D для различных параметров белого карлика.

**Основной вывод** расчётов состоит в получении ускорения пламени до скоростей порядка 5% от скорости звука, что подтверждает полученные ранее выводы о недостаточности режима «искривлённого пламени» для перехода в детонацию.

В Заключении кратко сформулированы основные выводы диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в высокорейтинговых международных журналах, докладывались лично автором на нескольких международных и всероссийских конференциях и семинарах.

К диссертационной работе Глазырина С.И. следует сделать несколько небольших замечаний.

1. На стр. 27 в формуле (2.1) пропущена скорость света  $c$ , хотя в следующей формуле (2.2) она явно присутствует. Равенство её единице оговаривается ниже.
2. На стр. 30 после формулы (2.20) неверно определена скорость  $v_F$
3. На стр. 53, второй абзац, во втором предложении пропущено подлежащее, что делает неясным смысл предложения.
4. В Главе 4 следует признать неудачным обозначение одной и той же греческой буквой  $\mu$  разных величин – контраста плотности и коэффициента Маркштейна (который в дальнейшем нигде не используется).
5. На стр. 74 не определена величина  $v_{fl}$  – является ли она скоростью нормального горения  $u_n$ ?
6. В тексте встречаются опечатки.

Эти замечания носят в основном редакционный характер и не снижают высокую научную и практическую ценность диссертационной работы Глазырина С.И. и могут быть учтены в дальнейшей работе.

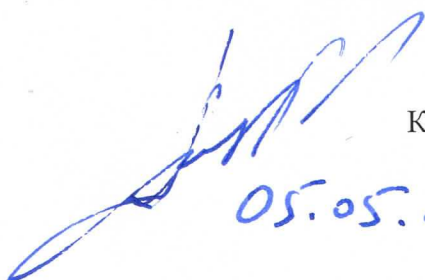
Общее заключение. В диссертационной работе Глазырина С.И. получены **новые важные результаты** в области теоретической физики и астрофизики – подробно изучена структура и неустойчивости тонкого дефлаграционного фронта термоядерного горения в сверхновых типа Ia, а также рассчитано влияние турбулентности на скорость такого горения. Показано, что при реалистических параметрах термодинамическая неустойчивость не развивается, а турбулентность в режиме искривлённого пламени приводит к незначительному ускорению фронта горения. Эти результаты важны для дальнейшего развития моделей термоядерного горения в астрофизических и лабораторных условиях.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается проверкой численных расчётов на аналитических моделях, а также согласием с результатами независимых расчётов другими авторами. Апробация работы подтверждается публикациями в высокорейтинговых журналах и многочисленными докладами на международных конференциях. Результаты диссертации могут быть использованы специалистами ИТЭФ, ФИАН, АКЦ ФИАН, НИИЯФ и ГАИШ МГУ, САО РАН, МИФИ, ИНАСАН, ФТИ им. Иоффе, ВНИИЭФ, Института Астрофизики общества Макса Планка (Гархинг) и других отечественных и зарубежных институтов и лабораторий. Диссертационная работа Глазырина С.И. **полностью отвечает** всем требованиям Положения ВАК о диссертациях на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а сам автор, Глазырин Семён Игоревич, **безусловно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук** по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Доктор физико—математических наук,

Профессор

К.А.Постнов



05.05.2014

Подпись д.ф.-м.н. проф. Постнова К.А. заверяю.

Директор ГАИШ МГУ

академик РАН



А.М.Черепашук