

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию Глазырина Семена Игоревича
«Свойства фронтов горения в сверхновых типа Ia»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация Глазырина Семена Игоревича «Свойства фронтов горения в сверхновых типа Ia» посвящена исследованию одного из механизмов взрыва Сверхновых. Рассматриваемый механизм предполагает, что энергетика взрыва обусловлена протеканием ядерных реакций и выделившаяся в результате энергия приводит к катастрофическому разрушению предсверхновой. Считается, что указанный сценарий позволяет объяснить взрывы сверхновых первого типа. Наиболее правдоподобным на сегодняшний день сценарием взрыва СНа является двухстадийный процесс, когда часть вещества звезды сгорает в дефлаграционном режиме, а часть в детонационном. В рамках такой модели принимается, что на первом этапе (предположительно в результате развития тепловой неустойчивости в центре предсверхновой) возникает волна медленного горения – дефлаграции, распространяющаяся по веществу с сильно дозвуковой скоростью, затем, на втором этапе, волна дефлаграции, в силу тех или иных причин, трансформируется в детонационную волну и оставшееся вещество сгорает в детонационном режиме. Такой сценарий позволяет в принципе объяснить как энергетику взрыва, так и элементный состав остатка СНа. Однако до сих пор остается открытым вопрос: в какой момент и в силу каких причин дозвуковая волна дефлаграции переходит в сверхзвуковую волну детонации? Этим вопросом занимались многочисленные исследователи, были предложены различные механизмы такой трансформации, но окончательно признанной модели не существует. Автор диссертации развивает направление исследований, которое полагает, что переход дефлаграции в детонацию обусловлен искривлением (под совместным действием неустойчивостей Даррье-Ландау и Релея-Тейлора), турбулизацией и эффективным ускорением фронта пламени, что приводит к формированию волн сжатия перед фронтом, нагреву вещества и формированию в результате детонационной волны. Описанный сценарий сам по себе является правдоподобным, но его реализуемость критически зависит от термодинамических и кинетических свойств вещества предсверхновой. А именно, уравнения состояния, сетки ядерных реакций и их калорийности, коэффициента теплопроводности (диффузией компонентов топлива в условиях предсверхновой традиционно пренебрегают). Излишне говорить, что задачи такой сложности в скольнибудь общей постановке могут быть исследованы только с привлечением численных методов. Но даже современные вычислительные ресурсы не позволяют моделировать такие задачи, где пространственные масштабы разнятся на многие порядки (от ширины зоны реакции в волне дефлаграции или детонации до радиуса предсверхновой). Поэтому полную задачу приходится разбивать на подзадачи, решаемые на современных вычислительных системах, и, согласовывая результаты, описывать общий ход процесса. Таким путем пошел автор диссертации и этим обусловлена структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении автор дает обстоятельный обзор по теме диссертации. Обосновывает ее актуальность и новизну.

Первая глава носит в значительной степени общетеоретический характер. Автор описывает различные режимы горения (дефлаграцию и детонацию) и механизмы перехода одного режима в другой. Здесь же исследуется задача о чисто дефлаграционном режиме горения предсверхновой – белого карлика (приблизительно) чандрасекаровской массы.

Принимая естественную гипотезу, что в процессе выгорания звезда проходит через последовательность равновесных состояний, автор показывает, что таком режиме выгорает порядка 70% массы предсверхновой. Хотя рассмотренная задача является модельной и одномерной, она демонстрирует необходимость привлечения детонационной стадии горения для объяснения наблюдаемой энергетики взрыва.

Во второй главе автор описывает физико-математическую модель, содержащую гидродинамическую и кинетическую подмодели, в рамках которой исследуются процессы, протекающие при взрыве СНIa. Отдельно рассчитывается коэффициент электронной теплопроводности, играющий определяющую роль в процессе распространения волны дефлаграции. Результат сравнивается с формулой Яковлева-Урпина и указывается их согласие. Описываются и обосновываются используемые в дальнейшем уравнения состояния электронного газа (в том числе вырожденного и релятивистского) и ионного газа, сетки ядерных реакций. С использованием этих данных проведено моделирование распространения волны дефлаграции при различных входных данных (плотности вещества перед фронтом, сетки ядерных реакций) и проведено сравнение результатов.

Третья глава посвящена исследованию (одномерной) термо-пульсационной неустойчивости волны дефлаграции в условиях предсверхновой. Разбирается модельная постановка задачи, позволяющая решить эту задачу аналитически и выявить характерные черты развития неустойчивости. Далее эта задача исследуется численно в рамках описанной во второй главе модели и устанавливаются критические числа Зельдовича в некотором характерном диапазоне плотностей. На основании этих результатов делается вывод о том, что в условиях предсверхновой - белого карлика термо-пульсационная неустойчивость не развивается.

В четвертой главе исследуется процесс распространения фронта пламени в канале. При этом внутренняя структура фронта горения не учитывается, фронт горения в этой модели рассматривается как поверхность, распространяющаяся с некоторой фиксированной скоростью по нормали к себе относительно вещества. Эта нормальная скорость плоского фронта рассчитана автором в предыдущей главе (при различных входных данных и сетке ядерных реакций). В рамках такой модели развивается гидродинамическая неустойчивость Даррье-Ландау, приводящая к искривлению фронта пламени и его эффективному ускорению. Вопрос, на который должно ответить это исследование, – как сильно ускорится пламя. Проведенное автором численное моделирование показало, что это ускорение невелико и составляет 3-4% от скорости плоского фронта. Столь незначительное ускорение не может рассматриваться в качестве причины перехода дефлаграции в детонацию.

В пятой главе исследуется процесс распространения фронта пламени в турбулентном потоке. Задача решается в предположении сферической симметрии (средних характеристик течения) в самосогласованной постановке, подразумевающей, что турбулентность сама вызвана движущимся фронтом. Турбулентность рассматривается в рамках к-е модели с некоторым образом выбранными эмпирическими коэффициентами, конкретизирующими замыкающие соотношения. Результаты проведенного автором численного моделирования показали, что эффективное ускорение фронта пламени составляет 3-7% от скорости звука. Делается вывод, что такого ускорения недостаточно для порождения детонационной волны.

В заключении еще раз сформулированы основные результаты работы.

Замечания к представленной работе следующие.

1. Численное моделирование распространения искривленного фронта пламени выполнено автором в двумерной плоской постановке и на основании этих расчетов сделаны выводы о степени ускорения волны горения. Было бы интересно (и более адекватно рассматриваемой проблеме) провести трехмерное моделирование этого

процесса, тем более, что автором уже разработан и реализован соответствующий вычислительный комплекс. В целом создалось впечатление, что созданный автором вычислительный инструментарий позволяет исследовать более масштабные (в плане привлечения и использования вычислительных ресурсов) физические и гидродинамические задачи.

2. При описании численного моделирования автор не приводит данных о подробности расчетных сеток. Не указывается также, выполнялись ли сравнительные расчеты на более (или менее) подробных сетках и, если выполнялись, что показало сравнение. Это замечание быть может не совсем уместно, учитывая специальность, по которой защищается представленная работа, но коль скоро автор для целей своего исследования активно использует численные методы такие сравнительные расчеты и их результаты были бы интересны.
3. Моделирование распространения пламени в турбулентном потоке автор автор проводил при фиксированных эмпирических коэффициентах. Интересно было бы выяснить, как меняются результаты при варьировании этих коэффициентов, возможно ли получить более эффективное ускорение пламени (при еще физически приемлемых коэффициентах).
4. Некоторые места работы написаны неясно и содержат «жаргонные» выражения. Например, как соотносятся формула (5.42) и дальнейшее утверждение, что скорость пламени определяется кинетической энергией турбулентных пульсаций.

Указанные недостатки не умаляют качества работы, которую можно охарактеризовать как законченное самостоятельное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Автором получены новые интересные результаты, имеющие несомненную ценность как для астрофизики, так и для математического моделирования задач гидродинамики горения. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений, так как работа посвящена проблеме, которая в течение последних десятилетий активно исследуется многочисленными научными группами и до сих пор не имеет решения. Свидетельством новизны и актуальности полученных результатов являются публикации автора в высокорейтинговых физических и астрофизических журналах. Достоверность полученных автором результатов подтверждается их непротиворечивостью и совпадением (там, где можно провести прямое сопоставление) с данными других исследователей.

Основные результаты диссертации опубликованы в печати в виде пяти статей в реферируемых журналах.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а ее автор, Глазырин Семен Игоревич, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент
ведущий научный сотрудник
Института прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН,
д.ф.-м.н.

А.В.Колдоба
05.05.2014

Подпись в.н.с. ИПМ РАН А.В.Колдобы достоверно
Ученый секретарь ИПМ РАН
к.ф.-м.н.



А.И.Маслов