

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Урвачева Егора Михайловича

«Многомерное моделирование сверхновых с помощью

M1-приближения для переноса излучения»,

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Диссертационное исследование Урвачева Е.М. посвящено разработке и применению инструментария, позволяющего проводить численное интегрирование связанных уравнений гидродинамики и переноса излучения в рамках M1-приближения для многомерного моделирования различных астрофизических объектов. В диссертации выполнено моделирование сверхновых, но подчеркивается, что это не единственная область применения вычислительного комплекса.

При моделировании сверхновых крайне важным является корректный учет переноса излучения. Моделирование переноса излучения является очень сложной задачей. Как правило, в столь сложных задачах приходится искать компромисс между подробностью описания тех или иных процессов, в данном случае – эволюции поля излучения, и вычислительными возможностями. Для расчета поля излучения часто, в том числе и в рассматриваемой работе, используются упрощенные модели, которые основаны на уравнениях меньшей размерности. В рамках M1-приближения, принятого в диссертационной работе Урвачева Е.М., исходные уравнения переноса фотонов интегрируются с определенными весами по телесному углу и энергии (частоте) фотонов. В результате теряется информация об отдельных лучах и спектральных свойствах, а поле излучения описывается интегральными характеристиками - плотностью энергии, потоком и тензором давления излучения, которые необходимы и достаточны для учета влияния излучения на динамику вещества. Для замыкания полученной системы моментных уравнений тензор давления излучения связывается с плотностью и потоком энергии излучения некоторым алгебраическим соотношением. В результате возникает система уравнений гиперболического типа, для численного интегрирования которой можно применять хорошо зарекомендовавшие себя в задачах гидродинамики подходы. В работе рассмотрены два подхода к описанию поля излучения – в лабораторной (первая глава) и сопутствующей (вторая - четвертая главы) системах. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, которые проанализированы автором диссертации на примерах тех или иных ситуаций.

Как и многие современные работы, посвященные теоретическому описанию физических процессов, диссертация Урвачева Е.М. в качестве инструментария использует численные методы. Следует подчеркнуть, что в этом отношении работа выполнена на высоком уровне. Пройдены все необходимые этапы на пути к численному моделированию: выбор вычислительного алгоритма, его программная реализация, распараллеливание, тщательная верификация и масштабирование кода.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы и изображений. Во введении сформулированы цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, обоснованы актуальность и новизна исследований, описаны личный вклад и научная и практическая значимость работы.

В первой главе представлены результаты моделирования сверхмощных сверхновых с помощью M1-приближения для расчета переноса излучения. При этом применяется подход, в рамках которого моменты интенсивности излучения измеряются в лабораторной системе отсчета. Рассматривается

сценарий, когда взрывающаяся звезда окружена плотным облаком вещества. Радиационно-доминированная ударная волна, бегущая по облаку, приводит к образованию плотного, геометрически тонкого слоя, который эффективно излучает свою кинетическую энергию. Для многомерного исследования в настоящей диссертации представлена упрощенная постановка, которая воспроизводит формирование слоя и его общую динамику. Упрощенная постановка сверхмощной сверхновой позволила исследовать многомерную динамику плотного слоя при учете переноса излучения в рамках M1-приближения. Двумерное моделирование показало, что этот слой становится неустойчивым, однако неустойчивость не влияет на кривую блеска на ранних временах.

Во второй главе рассмотрены результаты моделирования сверхновой SN2009ip, которая дает хорошие результаты при использовании для прямого метода определения космологических расстояний. В этой главе для расчета поля излучения применяется подход, в рамках которого моменты интенсивности излучения измеряются в лабораторной системе отсчета. Обсуждаются достоинства и недостатки этого способа описания поля излучения по сравнению с описанием, принятым в первой главе. Для моделирования использовался упрощенный сценарий ударно-волнового механизма в приближении серой непрозрачности (непрозрачность не зависит от частоты). Несмотря на упрощение, такая постановка воспроизводит особенности кривой блеска объекта, а также динамику движения системы.

В третьей главе представлены результаты моделирования сверхновых второго типа, модуль переноса излучения в котором основан на явной схеме годуновского типа с приближенными римановскими солверами. Для уменьшения влияния численной диффузии использовалась модифицированная версия римановского HLL-солвера, в которой корректно описывается выход на диффузионный режим. В результате выполненных расчетов была установлена двухпиковая структура кривой светимости в UХ-фильтре.

В четвертой главе рассмотрено моделирование объекта AT2018cow, который примечателен наличием раннего рентгеновского излучения. Одним из возможных объяснений такого излучения является наличие более плотного выброса массы в экваториальной плоскости. Была создана двумерная модель с присутствием в системе плотного экваториального диска. Результаты двумерного радиационно-гидродинамического моделирования показали, что ударная волна движется по такому диску медленнее, чем по исходной области меньшей плотности, что приводит к образованию зоны повышенной температуры. В рентгеновском диапазоне такая зона лучше всего видима под углами, близкими к углу раскрытия диска. Такие радиационные свойства позволяют объяснять особенности рентгеновского излучения этого объекта.

В пятой главе рассматривалось применение открытой библиотеки машинного обучения CatBoost для определения параметров моделей сверхновых по их кривым блеска. Для демонстрации возможностей алгоритма была выбрана модель для поздних стадий кривых блеска сверхновых, когда основным источником энергии является распад радиоактивных элементов. В рассмотренной модели учитываются пять наиболее энергичных цепочек распадов, начинающихся с элементов ^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{44}Ti , ^{22}Na , ^{60}Co . Показано, что алгоритм с использованием даже стандартных настроек неплохо предсказывает массы изотопов даже при малой базе из порядка 1000 кривых блеска.

В заключении подведены итоги диссертационного исследования.

Все полученные в диссертации результаты обоснованы как строго математически, так и с помощью численных методов. Там, где это возможно, произведено сравнение с наблюдательными данными или расчетами, основанными на использовании других алгоритмов.


К работе можно высказать следующие замечания:

1. В третьей главе описывается вычислительный алгоритм годовского типа для численного интегрирования уравнений М1-приближения, основанный на расщеплении по процессам и использовании HLL-солвера для приближенного решения задачи Римана. Этот солвер модифицирован введением некоторого коэффициента, призванного уменьшить численную диффузию и дать возможность корректного описания распространения излучения в диффузионном режиме. Было бы полезно пояснить правило, по которому выбирался этот коэффициент. Диффузионное приближение формально возникает, если в уравнении для потока излучения пренебречь нестационарным членом, т.е. дивергенция тензора излучения компенсируется потоком излучения (с коэффициентом). Представляется разумным аппроксимировать уравнения, не прибегая к расщеплению, что возможно позволит аккуратно рассчитывать и диффузионный режим.
2. Во второй главе при построении М1-приближения вводятся те же величины: плотность энергии, поток и тензор давления излучения. Можно ли утверждать, что эти величины связаны между собой тем же соотношением, что и в первой главе?
3. Во второй главе упоминается полностью консервативная разностная схема. Какая схема имеется в виду?

Указанные недостатки носят редакционный и пожелательный характер и не умаляют качества работы, которую можно охарактеризовать как законченное самостоятельное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Автором получены интересные результаты, имеющие несомненную ценность для моделирования радиационно-гидродинамических течений как в астрофизических, так и лабораторных условиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в печати. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что представленная Урвачевым Е.М. работа «Многомерное моделирование сверхновых с помощью М1-приближения для переноса излучения», удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой моделирования и технологий
разработки нефтяных месторождений МФТИ (НИУ),  /Колдоба А.В./

Адрес: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Тел.: +79152546351.

E-mail: koldoba@rambler.ru.

Подпись заведующего кафедрой моделирования и технологий разработки нефтяных месторождений МФТИ (НИУ) Колдобы Александра Васильевича удостоверяю.

Секретарь Ученого совета МФТИ (НИУ)

к.ф.-м.н.



/Евсеев Е.Г./