

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГУП «ВНИИА»
доктор экономических наук



С.Ю. Лопарев

«28» марта 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного унитарного предприятия

«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»
(ФГУП «ВНИИА») 127055, Москва, Сущевская ул., д.22, адрес сайта: <http://www.vniiia.ru>

Диссертация Урвачева Егора Михайловича «Многомерное моделирование сверхновых с помощью M1-приближения для переноса излучения» выполнена в научно-исследовательском подразделении ФГУП «ВНИИА».

В период подготовки диссертации соискатель Урвачев Егор Михайлович работал в научно-исследовательском подразделении ФГУП «ВНИИА» в должности младшего научного сотрудника.

В 2018 г. Урвачев Е.М. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», Факультет общей и прикладной физики, ему присвоена квалификация магистра по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика». С 2018 г. по настоящее время проходит обучение в аспирантуре Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по образовательной программе высшего образования – программе подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль подготовки: «Астрофизика и звездная астрономия». Кандидатские экзамены сданы в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель – Блинников Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, работает в ФГУП «ВНИИА» в должности главного научного сотрудника.

По результатам рассмотрения диссертации «Многомерное моделирование сверхновых с помощью M1-приближения для переноса излучения» научно-техническим советом (НТС) ФГУП «ВНИИА» принято следующее заключение:

Диссертация Урвачева Егора Михайловича «Многомерное моделирование сверхновых с помощью M1-приближения для переноса излучения» посвящена развитию методики

многомерного радиационно-гидродинамического моделирования, а также дальнейшему ее применению для исследования набора существенно многомерных сценариев для астрофизических объектов, корректное рассмотрение которых невозможно в одномерном сферически-симметричном приближении.

Были поставлены следующие задачи:

1. Выбор наиболее приемлемого приближения для моделирования переноса излучения в астрофизических объектах, а также его дальнейшая реализация в численном коде.

2. Верификация разработанной методики на тестовых задачах с известными аналитическими и полуаналитическими решениями, а также ее валидация на одномерных моделях астрофизических объектов, также рассчитанных с помощью другого радиационно-гидродинамического кода.

3. Создание упрощенной модели ударно-волнового механизма для сверхмощной сверхновой и дальнейшее исследование с ее помощью влияния неустойчивости плотного слоя на кривую блеска объекта.

4. Создание двумерной модели для AT2018cow с наличием в системе плотного экваториального диска и исследование с ее помощью возможности объяснения раннего рентгеновского излучения от объекта.

Актуальность работы. Использование сверхновых как инструмента измерения космологических расстояний является одним из их важнейших приложений. Одним из наиболее известных способов определения расстояний является метод, основанный на сверхновых типа Ia, который, в том числе, позволил открыть ускоренное расширение Вселенной. Тем не менее, такой способ требует калибровки, которая проводится по объектам, расположенным в локальной Вселенной. На больших же красных смещениях свойства сверхновых типа Ia могут быть другими, поэтому использование такого метода может привести к значительным ошибкам при определении расстояний до далеких объектов. Такой проблемы помогут избежать прямые методы определения космологических расстояний. Метод плотного слоя (Dense Shell Method, DSM) является представителем класса прямых методов. Он основан на сверхновых типа IIp, активно обнаруживаемых в текущую эру многоканальной астрономии, в том числе и на больших красных смещениях.

Среди сверхновых типа IIp встречаются представители класса сверхмощных сверхновых, максимальное значение светимости которых на один-два порядка превосходит аналогичное значение для известных классов сверхновых. Согласно одному из наиболее вероятных сценариев образования таких объектов столь высокая светимость объясняется прохождением сильной ударной волны по плотному околозвездному веществу. Эта модель была широко исследована в одномерном моделировании в литературе. При таком сценарии вещество собирается в плотный, геометрически тонкий слой, а максимум кривой блеска может превосходить значение 10^{45} эрг/с. Положение такого слоя совпадает с положением фотосферы,

параметры которой на этапе роста кривой блеска и используются в методе DSM для определения расстояния до объекта. При этом в текущих вариантах метода предполагается, что плотный слой обладает сферической симметрией. За счет же различных гидродинамических неустойчивостей слой может деформироваться или даже фрагментироваться, что приведет к изменениям параметров фотосферы, следовательно, и к ошибке в определении расстояний.

В литературе преимущественно представлены исследования неустойчивости плотного слоя на стадии остатка сверхновой. На такой стадии среда является оптически прозрачной и излучение может быть рассмотрено в режиме объемных потерь, которое учитывает лишь локальные свойства среды. На начальном же этапе кривой блеска одни области сверхновой могут быть оптически толстыми, а другие – оптические прозрачными. Кроме этого, нелокальные эффекты переноса могут существенно изменить динамику роста возмущений. Именно поэтому для более полного ответа на вопрос неустойчивости тонкого плотного слоя, возникающего в ударно-волновом сценарии для сверхновых, требуется учет более точного переноса излучения.

Многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование необходимо не только для сверхмощных сверхновых, но и, например, для сверхновых типа IIP. Поляризационные наблюдения и спектральные данные для отдельных сверхновых типа IIP указывают на признаки отсутствия сферической симметрии, происхождение которой может объясняться различными факторами. Одним из таких факторов является асимметричный звездный ветер на досверхновой стадии, как, например, для Бетельгейзе, вероятность взрыва которой в ближайшее время широко обсуждается.

Отдельным вопросом является объяснение жесткого рентгеновского излучения от разнообразных объектов. Одним из наиболее интересных объектов является AT2018cow, ставший первоначальным целого класса объектов, так называемых «коров». Помимо прочих удивительных наблюдательных особенностей, объект примечателен своим сильным рентгеновским излучением, что как раз и является общим свойством для объектов класса «коров». Согласно одному из возможных сценариев, такое излучение объясняется наличием в системе плотного экваториального диска. Динамику движения такой системы невозможно учесть в одномерном сферически-симметричном расчете. Кроме того, совсем недавно с помощью телескопа «Спектр-РГ» был обнаружен объект AT2020nrf – самая яркая вспышка из класса «коров».

Запущенный в декабре 2021 года крупнейший в истории человечества космический телескоп «Джеймс Уэбб» поможет заглянуть гораздо дальше во Вселенную и открыть еще более удивительные объекты. К примеру, взрыв сверхмассивной звезды третьего поколения может наблюдаться как постоянный источник излучения в инфракрасном диапазоне. При этом сценарий взрыва такой звезды такой звезды также является существенно многомерным.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем. В диссертации получены следующие новые научные результаты, которые выносятся на защиту:

1. Использование модели серой непрозрачности при учете переноса излучения в M1-приближении позволяет воспроизвести образование и динамику движения плотного тонкого слоя, а также поведение болометрической кривой светимости при ударно-волновом сценарии для сверхновых.

2. Для моделирования ударно-волнового сценария для сверхновых при рассмотрении системы уравнений на моменты интенсивности излучения в M1-приближении в рамках модели серой непрозрачности достаточен учет доплеровских эффектов с точностью $O(v^2/c^2)$, если моменты заданы в лабораторной системе отсчета, и с точностью $O(v/c)$, если они заданы в сопутствующей.

3. Характер изменения болометрической светимости на этапе роста кривой блеска согласуется на уровне 10% в одномерной и двумерной моделях ударно-волнового сценария для сверхновых, обладающих изначальной сферической симметрией, при использовании M1-приближения переноса излучения в рамках серой модели непрозрачности.

4. Моделирование сверхновых второго типа с помощью явных численных схем годуновского типа в эйлеровых кодах требует использования схем с малой численной диффузией. Это может быть обеспечено модификацией римановского решателя, при котором в пределе большой оптической толщины поток между гранями ячеек стремится к потоку, согласующемуся с определяемым из диффузационного приближения.

5. Область высокой температуры в объекте AT2018cow может быть получена при наличии в системе плотного экваториального диска (в рамках модели серой непрозрачности). Такая область видна в близком к рентгеновскому диапазоне под углами, близкими к углу раскрытия диска, и позволяет указать на механизм формирования наблюдаемого излучения.

Личный вклад автора. Соискателем были реализованы методы для моделирования переноса излучения в рамках M1-приближения в численном многомерном коде FRONT, развиваемом во ФГУП «ВНИИА». Соискатель проделывал ключевые шаги в многомерном моделировании ударно-волнового сценария для сверхновых, а также сценария асимметричного взрыва для объекта AT2018cow. В основных результатах, выносимых на защиту, вклад соискателя является определяющим. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов. Достоверность реализованной соискателем методики радиационно-гидродинамического моделирования в рамках M1-приближения для переноса излучения в многомерном численном коде FRONT обеспечивается путем сравнения результатов расчета тестовых задач с известными аналитическими и полуаналитическими решениями, а также с результатами, полученными с

помощью многомерного кода HERACLES, развивающегося другими авторами (верификация). Кроме этого, проводилось сравнение результатов расчета одномерных моделей для различных астрофизических объектов с решениями, полученными с помощью многократно апробированного для расчета кривых блесках сверхновых одномерного кода STELLA, в котором реализована более точная модель переноса излучения, а также с наблюдаемыми данными (валидация).

Степень новизны полученных результатов. В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Проведено многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование ударно-волнового сценария для сверхновых с учетом M1-приближения для переноса излучения. В рамках модели серой непрозрачности сделан вывод о совпадении характера изменения болометрической светимости сверхновой на этапе роста кривой блеска в одномерной и двумерной моделях, обладающих изначальной сферической симметрией.

2. Проведено многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование сценария для AT2018cow с учетом наличия в системе плотного экваториального диска. Показаны особенности динамики такой системы, сделан вывод о возможности объяснения раннего рентгеновского излучения от объекта при таком сценарии.

3. Проведено сравнительное моделирование одномерного сценария для сверхновой второго типа с помощью кодов, основанных на лагранжевом и эйлеровом гидродинамических подходах. Явно продемонстрированы проблемы при использовании эйлеровых кодов для моделирования таких сверхновых, а также показаны возможные пути их решения.

Практическая значимость и ценность научной работы. Сделанный вывод о согласии характера изменения болометрической светимости на этапе роста кривой блеска в одномерной и многомерной постановках ударно-волнового сценария для сверхновых важен для прямого метода определения космологических расстояний DSM. Текущие варианты этого метода основаны на сферической симметрии возникающего в системе плотного слоя. Отработанная методика моделирования может также применяться для исследования разнообразных астрофизических объектов, обладающих существенно многомерной структурой.

Полнота изложения результатов в работах, опубликованных автором. Основные результаты, изложенные в диссертации, в полной мере отражены в 4 опубликованных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных Scopus и Web of Science:

1. Urvachev E. et al. The Simulation of Superluminous Supernovae Using the M1 Approach for Radiation Transfer //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2021. – Т. 256. – №. 1. – С. 8.

2. Urvachev E. M., Blinnikov S. I., Nomoto K. Transient AT2018cow: A Scenario with an Equatorial Disk //Astronomy Letters. – 2021. – Т. 47. – №. 11. – С. 738-745.

3. Урвачев Е.М., Глазырин С. И. Моделирование болометрических кривых блеска сверхновой SN2009ip //Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34. – №. 1. – С. 16-32.

4. Урвачев Е. М. и др. Об особенностях моделирования сверхновых типа IIP в приближении серой непрозрачности и свойства их кривых блеска //Письма в Астрономический журнал. – 2022. – Т. 48. – №. 1. – С. 24-33.

Апробация результатов работы. Результаты диссертации докладывались на семинарах и конференциях: Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике МКТЭФ в 2019, 2020, 2021 годах, HED@FAIR Annual meeting в 2019 году, Седьмая Тарусская школа-семинар «Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике» в 2019 году, 54-ая Зимняя школа НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ в 2020 году, XV и XVI научно-технические конференции ВНИИА в 2021 и 2022 годах, Конференция Успехи Российской Астрофизики 2021: теория и эксперимент. Результаты работы также обсуждались на семинарах ИТЭФ, Kavli IPMI (Токийский университет, Япония).

Заключение: диссертация Урвачева Егора Михайловича «Многомерное моделирование сверхновых с помощью M1-приближения для переноса излучения» является самостоятельно выполненной завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842. Диссертация соответствует пункту № 1 области исследований паспорта заявленной специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Диссертацию рекомендуется представить к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании НТС ФГУП «ВНИИА» от 17.03.2022 (протокол НТС № 3/2022).

Присутствовало на заседании 22 чел. Результаты голосования: «за» - 22 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Научный руководитель ФГУП «ВНИИА»,
председатель НТС ФГУП «ВНИИА»,
доктор физико-математических наук

Андрияш
Александр Викторович