

На правах рукописи

Урвачев Егор Михайлович

**Многомерное моделирование сверхновых с помощью
M1-приближения для переноса излучения**

Специальность 01.03.02 —
«Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Сверхновые являются одними из наиболее примечательных объектов для исследования в астрофизике. Они играют важную роль в динамике межзвездной среды [1; 2] и ее обогащении химическими элементами [3–5], генерации и ускорении космических лучей [6–9], формировании нейтронных звезд [10; 11]. Использование сверхновых как инструмента для измерения космологических расстояний делает возможным определение параметров космологической модели нашей Вселенной, что крайне важно для понимания фундаментальных законов физики.

Есть несколько различных способов определения расстояний с помощью сверхновых. Одним из самых известных является метод, основанный на сверхновых типа Ia [12–14], позволивший открыть ускоренное расширение Вселенной [15; 16]. Тем не менее, такой подход требует калибровки, которая производится по объектам в локальной Вселенной. На больших красных смещениях свойства сверхновых типа Ia могут быть другими, поэтому такой метод может привести к значительным ошибкам при измерении расстояния до далеких объектов. Такой проблемы помогут избежать прямые методы определения космологических расстояний.

Существуют различные прямые методы для определения расстояний, например, с использованием параллакса квазаров [17], на основе аккреционных дисков [18; 19]. Отдельно можно выделить группу методов, основанных на расширяющейся фотосфере [20–22] сверхновых типа II — наиболее часто наблюдаемого подтипа коллапсирующих сверхновых [23; 24]. Идеи этих методов лежат в основе прямого “метода плотного слоя” (Dense Shell Method, DSM) [25; 26], основанного на сверхновых типа II_p, активно обнаруживаемых в текущую эру многоканальной астрономии, в том числе и на больших красных смещениях [27; 28].

Среди сверхновых типа II_p встречаются представители класса сверхмощных сверхновых, максимальное значение светимости которых на один-два порядка превосходит аналогичное значения для известных классов сверхновых [29; 30]. Для корректного использования таких объектов в различных целях необходимо понимать механизмы возникновения столь большой светимости. В настоящее время существует несколько сценариев образования сверхмощных сверхновых, например, парная неустойчивость (парно-нестабильные сверхновые) [31–34] и магнитарная накачка [35–39]. Тем не менее, модель для парно-нестабильных сверхновых, которая основана на очень массивной предсверхновой и большой энергии взрыва, может объяснить лишь очень медленные кривые блеска. [33]. С другой стороны, магнитарный сценарий требует экстремальных физических свойств быстро вращающейся и сильно намагниченной нейтронной звезды (период вращения ~ 1 мс и магнитное поле $\sim 10^{15}$ Г). Хотя магнитарные модели быстрее

меняют поток, чем парно-нестабильные, но все же не могут объяснять самые быстрые сверхмощные сверхновые.

Согласно одному из наиболее вероятных сценариев образования сверхмощных сверхновых столь высокая светимость может быть объяснена прохождением сильной ударной волны по плотному околозвездному веществу (ударно-волновой механизм) [40—42]. Эта модель была широко исследована в одномерном моделировании. При таком сценарии вещество собирается в плотный, геометрически тонкий слой, а максимум кривой блеска может превосходить значение $\sim 10^{45}$ эрг/с [43—46]. Положение такого слоя совпадает с положением фотосферы, параметры которой на этапе роста кривой блеска и используются в методе DSM для определения расстояний. При этом в текущих вариантах метода предполагается, что слой сферически симметричный. 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.

Важно отметить, что в основном в литературе представлены исследования неустойчивости плотного слоя, возникшего в результате катастрофического охлаждения уже на стадии остатка сверхновой [47]. Хотя механизмы образования таких слоев и являются схожими, тем не менее, на этапе роста кривой блеска физические параметры системы могут быть другими, что может изменить результат. В работах [48—50] представлены результаты многомерного моделирования плотного слоя в остатках сверхновых с учетом магнитного поля. Было показано, что плотный тонкий слой подвержен возмущениям из-за неустойчивости типа Рэля—Тейлора. При этом использовалось приближение свободно уходящего излучения, для которого важны лишь локальные свойства среды. Другим предельным случаем является оптически толстый режим, при котором свободный пробег фотонов существенно меньше характерных пространственных масштабов системы. При этом может быть применен гидродинамический подход с учетом вклада излучения в уравнение состояния вещества. Подобный метод, близкий к диффузионному режиму для переноса излучения, был использован в работе [51] для трехмерного моделирования магнитарного сценария сверхмощных сверхновых.

В реальности в сверхновых одни области могут быть оптически толстыми, а другие — оптически прозрачными, особенно на поздних стадиях. Поэтому для более полного ответа на вопрос неустойчивости тонкого плотного слоя в сверхмощных сверхновых необходимо проведение многомерных расчетов с учетом более точной модели переноса излучения, одновременно учитывающей эти два режима. Кроме этого, неучитываемые в более простых моделях нелокальные эффекты переноса могут изменить темп роста возмущений и в результате привести к стабилизации слоя.

Многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование необходимо не только для сверхмощных сверхновых, но и, например, для сверхновых типа II-P. Поляризационные наблюдения и спектральные данные для отдельных сверхновых типа II-P указывают на признаки отсутствия сферической симметрии, происхождение которой может объясняться различными факторами: асферическим распределением ^{56}Ni в центральных областях оболочки [52; 53]; асимметричным выбросом или асимметричным звездным ветром на досверхновой стадии, как, например, для Бетельгейзе [54]; неоднородной оболочкой со сгустками [55].

Отдельным вопросом является объяснение жесткого рентгеновского излучения от разнообразных объектов. Такое излучение может быть задетектировано, например, с помощью Международной обсерватории гамма-лучей (INTEGRAL) [56–59]. Одним из интересных объектов, наблюдавшимся в том числе с помощью INTEGRAL, является AT2018cow, ставший первоначальником целого класса объектов, так называемых “коров”. Этот транзиент обладает целым рядом удивительных наблюдательных особенностей [60; 61]. Высокая светимость объекта может объясняться в рамках ударно-волнового сценария [62; 63]. Тем не менее, для объяснения высокой светимости на хвосте кривой блеска требуется наличие дополнительного источника энергии: радиоактивный распад [63], магнитарная накачка [64], приливное разрушение в поле черной дыры [65] и т.д. Помимо прочего, объект примечателен своим сильным рентгеновским излучением [66], 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 [66]. Динамику такой системы невозможно учесть в одномерном сферически-симметричном расчете. Кроме этого, совсем недавно с помощью российско-немецкого телескопа “Спектр-РГ” [67] был обнаружен транзиент AT2020nrf [68] — 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 [69–71]. К примеру, взрыв сверхмассивной звезды третьего поколения может наблюдаться как постоянный источник излучения в инфракрасном диапазоне [72]. При этом сценарий взрыва такой звезды также является существенно многомерным [73]. Также коллапс сверхмассивной звезды может привести к всплеску высокоэнергетического излучения подобного длинным гамма-всплескам [74; 75].

Цели и задачи диссертационного исследования

Одной из главных целей настоящей диссертации является развитие методики многомерного радиационно-гидродинамического моделирования и дальнейшее ее применение для исследования существенно многомерных

сценариев, корректное рассмотрение которых невозможно в сферически-симметричном приближении:

- Ударно-волновой сценарий для сверхновых: распространение сильной ударной волны по плотному околозвездному веществу, сопровождаемое образованием плотного тонкого слоя, который может быть подвержен различным неустойчивостям.
- Взрыв сверхновой в изначально асимметричной системе на примере сценария с экваториальным диском для AT2018cow.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить 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 сценария 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.

Научная новизна

1. Впервые проведено многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование ударно-волнового сценария для сверхновых с учетом M1-приближения для переноса излучения. В рамках модели серой непрозрачности сделан новый вывод о совпадении характера изменения болометрической светимости сверхновой на этапе роста кривой блеска в одномерной и двумерной моделях, обладающих изначально сферической симметрией.
2. Впервые проведено многомерное радиационно-гидродинамическое моделирование сценария для AT2018cow с учетом наличия в системе плотного экваториального диска в рамках M1-приближения для переноса излучения. 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. Впервые

явно продемонстрированы проблемы при использовании эйлеровых кодов для моделирования таких сверхновых, а также показаны возможные пути их решения.

Научная и практическая значимость

Сделанный вывод о совпадении в одномерной и многомерной постановках ударно-волнового сценария для сверхновых характера изменения болометрической светимости на этапе роста кривой блеска 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. Кроме этого, развиваемый радиационно-гидродинамический код может использоваться и для моделирования земных экспериментов, в частности, для решения задач лазерного термоядерного синтеза.

Методология и методы исследования

Основной метод исследования — построение численных моделей радиационной гидродинамики. Кроме этого, применяются модули, разработанные автором диссертации, для учета радиационной гидродинамики в численном коде, разрабатываемом в коллаборации.

Основные положения, выносимые 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 достаточна точность $O(v^2/c^2)$, если моменты заданы в лабораторной системе отсчета, и точность $O(v/c)$, 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 которой в пределе большой оптической толщины поток между гранями ячеек стремится к потоку, согласующемуся с определяемым из диффузионного 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.

Достоверность полученных результатов

Достоверность реализованной автором диссертации методики радиационно-гидродинамического моделирования в рамках M1-приближения для переноса излучения в многомерном коде FRONT, разрабатываемом в коллаборации (обновленной версии кода FRONT3D [76]), обеспечивается путем сравнения результатов расчета тестовых задач с известными аналитическими и полуаналитическими решениями, а также с результатами, полученными с помощью многомерного кода HERACLES [77] (верификация). Кроме этого, проводилось сравнение результатов расчета одномерных моделей для различных астрофизических объектов с решениями, полученными с помощью многократно апробированного для расчета кривых блеска сверхновых одномерного кода STELLA [78], в котором реализована более точная модель переноса излучения, а также с наблюдаемыми данными (валидация).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих 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 IPMU (Токийский университет, Япония).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 статьях, опубликованных в рецензируемых научных издания [A1–A4].

Личный вклад

Автором были реализованы методы для моделирования переноса излучения в рамках M1-приближения в численном многомерном коде FRONT, развиваемом в коллаборации. Модуль гидродинамики, использующийся при проведении представленных в диссертации расчетов, реализован Глазыриным С. И. Описание реализованных методик представлено в работах [A1; A3; A4]. Используемая для демонстрации особенностей M1-приближения в работе [A1] версия кода SHDOM разрабатывается Шидловским Д. С. (в работе [A1] вклад авторов равный). Обсуждение результатов, полученных с помощью кода SHDOM, не является предметом настоящей диссертации.

Автор проделывал ключевые шаги в многомерном моделировании ударно-волнового сценария для сверхновых [A1; A3] и сценария асимметричного взрыва для AT2018cow [A2]. Также автором была проведена отработка применения развитой методики к сверхновым типа IIP [A4].

В основных результатах, выносимых на защиту, вклад диссертанта является определяющим.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **главе 1** представлен обзор различных методов учета переноса излучения. Выделена группа методов, основанная на использовании интегральных по телесному углу и частоте фотонов моментов интенсивности. В **параграфе 1.1** рассмотрена система уравнений для моментов интенсивности, измеренных в лабораторной системе отсчета. Также приводится описание M1-приближения, использующегося для замыкания представленной системы уравнений. Такое приближение представляет собой интерполяцию между двумя предельными случаями: изотропное поле излучения

и режим направленного потока излучения. В параграфах 1.1.1-1.1.4 рассматриваются двумерные тестовые задачи (тест излучающей сферы, двух излучающих сфер, тени, луча света), демонстрирующие особенности М1-приближения для переноса излучения. При этом проводится сравнение как с аналитическими решениями, так и с результатами, полученными с помощью открытого многомерного кода HERACLES. В параграфе 1.1.5 представлены тестовые задачи, необходимые для проверки корректности реализации рассматриваемого приближения для описания структуры ударных волны при наличии переноса излучения. В параграфе 1.1.6 рассматривается тестовая задача о рассеянии излучения в быстро движущейся оптически плотной среде, что является примером режима динамической диффузии. При этом результаты, представленные на рисунке 1, явно показывают, что для корректного описания распространения и размытия гауссова профиля излучения в режиме динамической диффузии недостаточно точности $O(v/c)$ при описании взаимодействия излучения и вещества в лабораторной системе отсчета, а необходима точность $O(v^2/c^2)$.

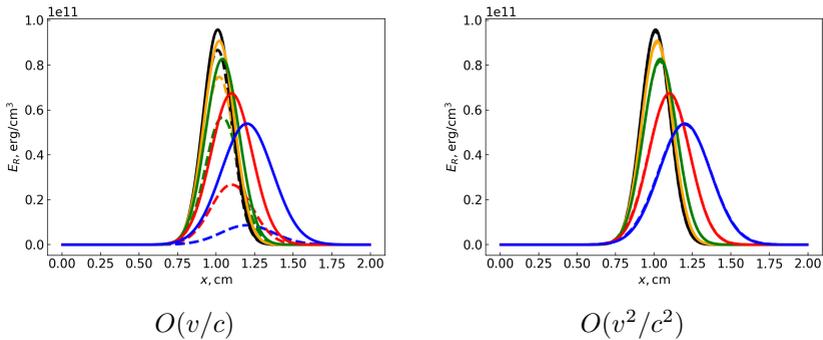


Рис. 1 — Профили плотности энергии излучения в тесте адвекции излучения. Расположение профилей сверху вниз соответствует моментам времени $t = 5 \times 10^{-12}, 10^{-11}, 2 \times 10^{-11}, 5 \times 10^{-11}, 10^{-10}$ с. Результаты получены с помощью кода FRONT (штриховые линии) с точностью $O(v/c)$ и $O(v^2/c^2)$. Модуль переноса излучения в лабораторной системе отсчета. Аналитическое решение соответствует сплошным линиям.

В параграфе 1.2 представлены результаты расчетов сверхмощных сверхновых при учете переноса излучения в М1-приближении при подходе 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 представлена упрощенная постановка, которая воспроизводит формирование слоя и

его общую динамику. Эта постановка была исследована в одномерии с помощью кодов STELLA и FRONT, которые дали согласующиеся друг с другом результаты. Постановка воспроизводит ударно-волновой сценарий для сверхмощной сверхновой: пиковое значение кривой блеска в расчетах превышает значение 10^{45} эрг/с на момент времени $t \approx 15$ дней после взрыва.

Также в **параграфе 1.2** приводятся результаты двумерных расчетов упрощенной модели сверхмощной сверхновой. Показано, что в используемой модели слой становится неустойчивым и теряет сферическую симметрию после $t > 50$ дней при расчетах на сетках с RZ -цилиндрической геометрией — см. рисунок 2. Несмотря на то, что слой теряет сферическую симметрию, общее направление движения остается радиальным, и слой не разделяется на отдельные фрагменты. Кроме того, в среднем динамика центра масс плотного тонкого слоя совпадает в 1D и 2D расчетах. Поскольку на сетках с RZ -цилиндрической геометрией затравочными возмущениями для неустойчивости могут быть сеточные, то в **параграфе 1.2** приводятся результаты 2D расчетов и на сетках с $R\theta$ -сферической геометрией с начальными возмущениями плотности, в которых плотный тонкий слой также искривляется, что указывает на возможную физическую природу неустойчивости. Несмотря на то, что вопрос о природе неустойчивости тонкого слоя является открытым, важным выводом является слабость возмущений на этапе роста кривой блеска.

В **параграфе 1.3** проводится сравнение болометрических кривых блеска для модельной постановки сверхмощной сверхновой, полученных в рамках 1D и 2D моделирования. При этом для одномерных расчетов светимость определяется как напрямую из расчета, так и с помощью фотосферного метода, когда светимость оценивается как светимость черного тела с параметрами фотосферы. Для двумерных расчетов использовался только фотосферный метод. Несмотря на различия методов, полученные с помощью них кривые блеска хорошо согласуются друг с другом — см. рисунок 3. Также из рисунка 3 хорошо видно, что светимость объекта в двумерном расчете слабо отличается от одномерного сферически-симметричного случая.

В **главе 2** подчеркиваются минусы подхода для учета переноса излучения в лабораторной системе отсчета, главным из которых является сложное описание взаимодействия излучения и вещества. В **параграфе 2.1** рассмотрена система уравнений для моментов интенсивности, измеренных в сопутствующей системе отсчета. Затем также рассматриваются несколько тестовых задач для верификации реализации метода. В **параграфе 2.1.1** повторно рассматривается тест рассеяния в движущейся среде. При этом явно демонстрируется, что при подходе в сопутствующей системе достаточно точности лишь $O(v/c)$ для корректного описания режима динамической диффузии, в то время как в лабораторной системе требовалась точность $O(v^2/c^2)$. В **параграфе 2.1.2** рассматривается тестовая задача о распаде

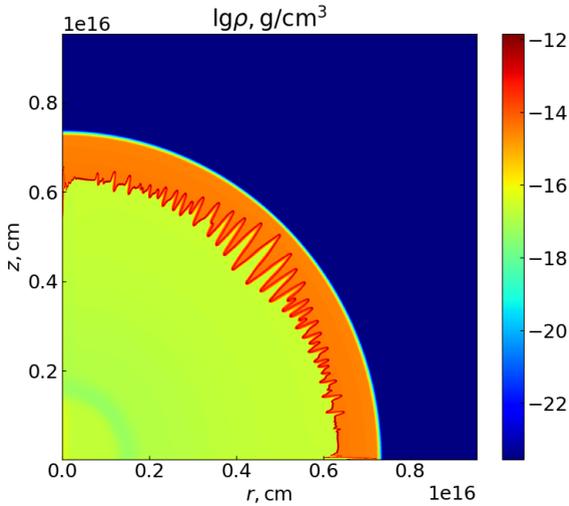


Рис. 2 — Профили плотности на момент времени $t = 100$ дней в двумерном расчете модельной сверхмощной сверхновой. Результаты получены с помощью кода FRONT на сетке 2048^2 с RZ-цилиндрической геометрией. Модуль переноса излучения в лабораторной системе отсчета.

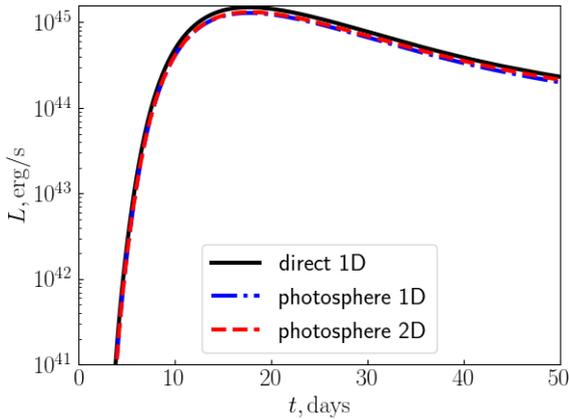


Рис. 3 — БолOMETрические кривые блеска для модельной сверхмощной сверхновой, полученные с помощью кода FRONT. Прямой метод соответствует черным сплошным линиям для 1D, а фотосферный метод — синим штриховым для 1D и красным штриховым для 2D.

разрыва с учетом наличия излучения. Представленный тест показывает корректность описания обмена энергией между излучением и веществом.

В **параграфе 2.2** представлены результаты моделирования сверхновой SN2009ip, которая дает хорошие результаты при использовании для прямого метода определения космологических расстояний DSM. Для моделирования, также как в главе 1, использовался упрощенный сценарий ударно-волнового механизма в приближении серой непрозрачности. Расчеты проводились с использованием модулей кода FRONT, основанных на моментной системе уравнений переноса излучения как в лабораторной, так и в сопутствующей системах отсчета. Результаты, полученные с помощью этих двух различных подходов, согласуются друг с другом, а также с одномомерным кодом STELLA.

Также в **параграфе 2.2** продемонстрировано, что в модели серой непрозрачности светимость SN2009ip за несколько дней резко увеличивается до максимального значения, превышающего 2×10^{44} эрг/с, которое достигается примерно на $t_m = 5$ день, что по порядку величины максимальной светимости и времени роста кривой блеска совпадает с моделью реалистичной непрозрачности — см. рисунок 4. При этом, наблюдаемые значения болометрической светимости [79] оказываются на порядок меньше. Тем не менее, такое различие вовсе не указывает на некорректность используемой модели: в ударно-волновом сценарии основной вклад в общий поток вносит диапазон экстремального ультрафиолета, который не наблюдается и не учитывается в чернотельных фитах [79]. Полученный же в расчетах кодом STELLA поток в диапазоне UVBRI, являющийся по своей сути наблюдаемой болометрикой, находится уже в согласии с данными [79] — см. рисунок 4.

В конце **параграфа 2.2** приводятся результаты двумерного радиационно-гидродинамического моделирования упрощенной постановки SN2009ip кодом FRONT с модулем переноса излучения как в сопутствующей системе, так и в лабораторной. Результаты, полученные с помощью различных модулей находятся в согласии друг с другом и показывают, что возникающий в системе слой сохраняет сферическую симметрию, по крайней мере, на этапе роста кривой блеска.

В **главе 3** обосновывается выбор модуля переноса излучения в сопутствующей системе отсчета в качестве основного метода кода FRONT для моделирования астрофизических объектов, а в **параграфе 3.1** приводится описание численной реализации используемой методики.

В **параграфе 3.2** представлены результаты моделирования сверхновых второго типа. Параметры моделей таких объектов приводят к некоторым проблемам при их расчете кодами, основанными на явных численных схемах годовновского типа на эйлеровых сетках с фиксированным пространственным размером. Во-первых, использование стандартных приближенных римановских решателей приводит к завышению потока излучения за

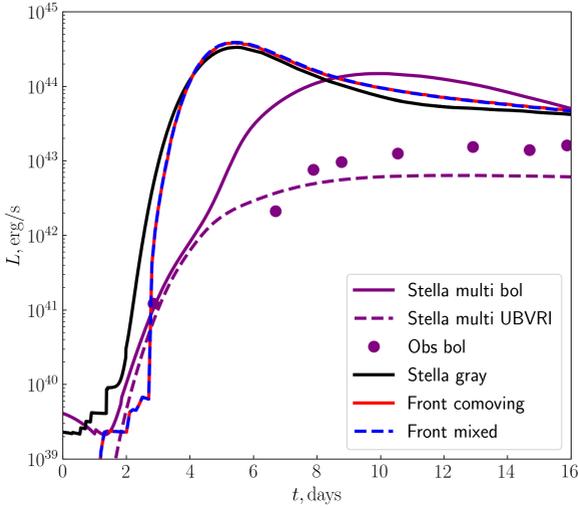


Рис. 4 — Болометрические кривые блеска для сверхновой SN2009ip, рассчитанные с помощью кода STELLA с учетом реалистичной модели непрозрачности (фиолетовая сплошная линия), а также серой модели непрозрачности (черная сплошная линия). Также изображена кривая блеска в диапазоне UBVRI, рассчитанная кодом STELLA при реалистичной непрозрачности (фиолетовая штриховая линия), и наблюдательные болометрические данные из работы [79] (фиолетовые точки). Результат одномерного расчета кодом FRONT в сером приближении с модулем переноса излучения в сопутствующей системе отсчета соответствует красной линии, а с модулем в лабораторной системе отсчета — синей.

счет доминирующего вклада численной диффузии при больших оптических толщинах. Во-вторых, на эйлеровой сетке должны быть разрешены как начальные профили физических величин, так и профили на момент достаточно поздних времен, когда вещество уже разлетелось достаточно далеко. Эти проблемы были наглядно продемонстрированы в рамках разработанной с помощью одномерного лагранжевого кода STELLA упрощенной постановки сверхновой второго типа.

Таке в **параграфе 3.2** были описаны возможные пути решения вышеописанных проблем, реализованные при моделировании кодом FRONT, модуль переноса излучения в котором основан на явной схеме с приближенными римановскими решателями. Для уменьшения влияния численной диффузии использовалась модифицированная версия римановского решателя, в котором корректно описывается выход на диффузионный режим. Если использовать стандартный римановский решатель, то динамика системы будет описываться неверно из-за завышения потока излучения, выходя-

щего с границы оптически толстой области в оптически прозрачную, при недостаточном пространственном разрешении сетки (в случае стандартного решателя даже в одномерии необходимо порядка миллиона ячеек для получения корректных результатов). Профили же физических величин, полученные с использованием модифицированной версии решателя при том же относительно небольшом пространственном разрешении, находятся в хорошем согласии с кодом STELLA — см. рисунок 5.

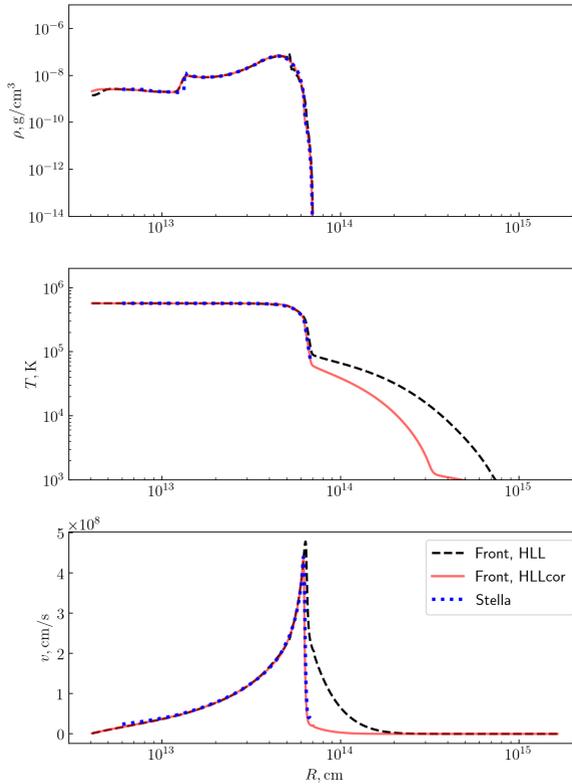
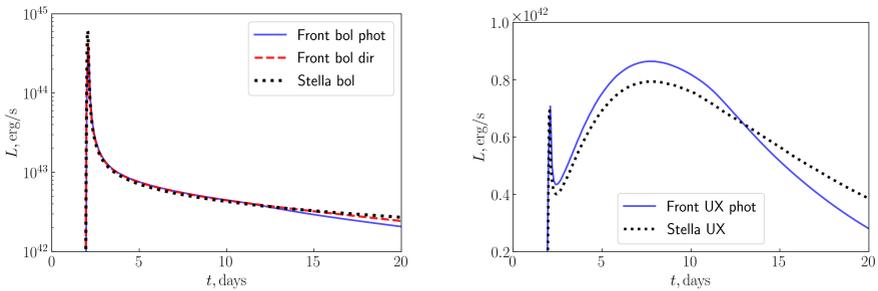


Рис. 5 — Профили плотности ρ , температуры T и скорости вещества v для модельной сверхновой второго типа на момент времени $t = 2$ дней, рассчитанные с помощью кода STELLA (пунктирные линии) и кода FRONT с использованием стандартного (штриховые линии) и модифицированного (сплошные линии) римановских решателей.

Для моделирования разлета в вакуум на фиксированной эйлеровой сетке кода FRONT начальная область моделирования была дополнена областью вещества с крайне низкой плотностью и температурой. На основе

сравнительного моделирования в **параграфе 3.2** было показано, что профили физических величин, полученные в расчетах модельной сверхновой второго типа кодами STELLA и FRONT, хорошо согласуются друг с другом.

В **параграфе 3.3** проводится сравнение кривых блеска модельной сверхновой второго типа, вычисленных с помощью кодов STELLA и FRONT — см. рисунок 6. Также была подчеркнута интересная особенность кривой светимости в фильтре UX — ее двухпиковая структура. Для рассмотренной модели сверхновой за первый пик ответственно свечение фронта ударной волны. Также в момент первого пика максимальна и температура фотосферы. Дальнейшее же ее остывание и расширение приводят сначала к минимуму светимости в фильтре UX , а затем и ко второму максимуму. При этом температура фотосферы после своего первоначального максимума падает со временем монотонно, а не имеет минимум, совпадающий по времени с минимумом светимости в фильтре UX .



Болометрика

Фильтр UX

Рис. 6 — Болометрические кривые светимости и кривые светимости в фильтре UX для модельной сверхновой второго типа, рассчитанные с помощью кода STELLA (пунктирные линии) и кода FRONT с использованием прямого (штриховые линии) и фотосферного (сплошные линии) методов.

В **главе 4** рассмотрено применение развитой методики для моделирования объекта AT2018cow, который примечателен наличием раннего рентгеновского излучения. Одним из возможных объяснений такого излучения является наличие более плотного выброса массы в экваториальной плоскости. В **параграфе 4.1** описана используемая одномерная модель с маломассивным выбросом, которая была выбрана в качестве основы для построения двумерной модели с наличием экваториального диска.

В **параграфе 4.2** показано, что результаты расчета упрощенной одномерной модели ударно-волнового сценария, качественно воспроизводящие болометрическую кривую блеска, согласуются между кодом FRONT и одномерным кодом STELLA. Результаты двумерного радиационно-гидродинамического моделирования кодом FRONT сценария с плотным эквато-

риальным диском, представленные на рисунке 7, показали, что ударная волна движется по такому диску медленнее, чем по исходной области меньшей плотности, и приводит к образованию сильно нагретой области.

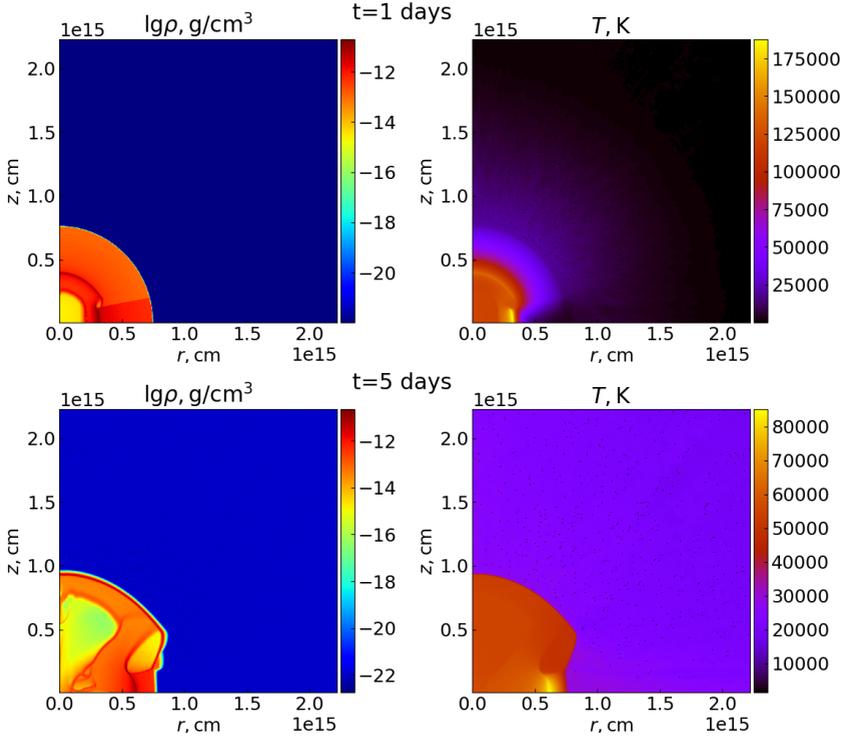


Рис. 7 — Профили плотности и температуры вещества на различные моменты времени в двумерном расчете кодом FRONT сценария с наличием экваториального диска для AT2018cow.

В конце **параграфа 4.2** приводятся карты фотосферных температур для AT2018cow в рамках сценария с экваториальным диском. Продемонстрировано, что возникшая в системе сильно нагретая область лучше всего видна в близком к рентгеновскому диапазону под углами, близкими к углу раскрытия диска (см. рисунок 8) и позволяет указать на механизм формирования наблюдаемого излучения.

В **главе 5** рассматривается применение открытой библиотеки машинного обучения CatBoost [80] 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

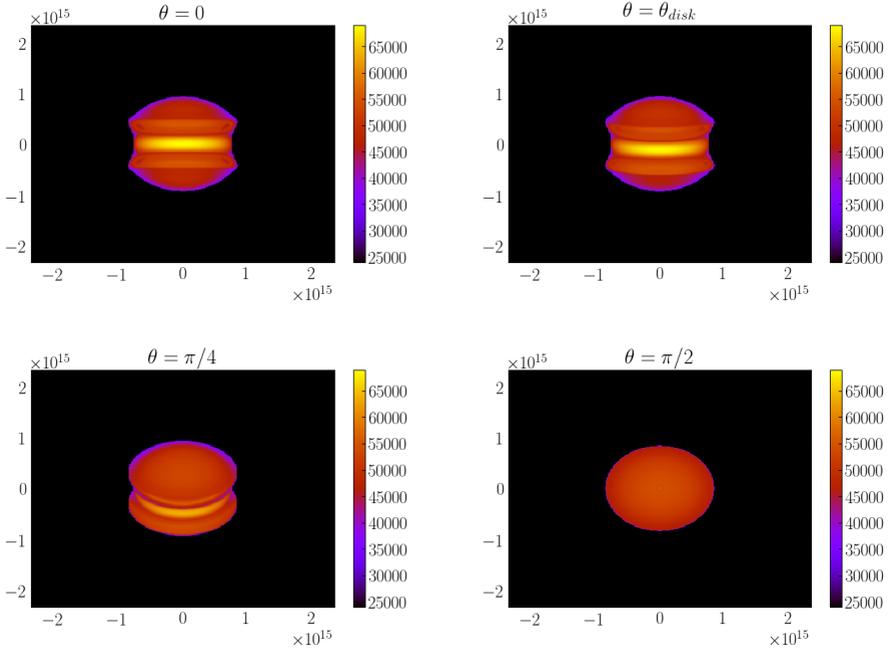


Рис. 8 — Карты фотосферных температур для различных углов наблюдения на момент времени $t = 5$ дней при непрозрачности $\kappa = 0.02 \text{ см}^2/\text{г}$.

распадов, начинающихся с ^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{44}Ti , ^{22}Na , ^{60}Co , при этом доминируют вклады от ^{56}Ni , ^{57}Ni и ^{44}Ti .

В параграфе 5.1 представлены результаты исследования по определению масс изотопов по полученным синтетическим кривым блеска, вычисленным при различных массах трех доминирующих изотопов. При этом перепад значений был довольно сильным и составлял два порядка. Массы ^{22}Na и ^{60}Co при этом были фиксированы. Показано, что алгоритм с использованием стандартных настроек неплохо предсказывает массы изотопов даже при малой базе данных из $N_1 = 1000$ кривых блеска. При увеличении числа кривых блеска в базе данных до $N_2 = 10000$ точность определения масс значительно повышается. Также алгоритм был применен и в случае, когда кривые блеска вычислялись при различных массах всех пяти используемых в модели изотопов. В этом случае точность определения масс ^{56}Ni , ^{57}Ni и ^{44}Ti несколько ухудшилась, но все равно осталась на приемлемом уровне. В то же время, предсказания для масс ^{60}Co и ^{22}Na в целом оказались неудовлетворительными, вероятнее всего, из-за их слабого вклада в общую кривую блеска. В случае же зашумленной тестовой выборки (рассматривалась случайная ошибка в значениях светимости с максимальным

отклонением в 5%) точность предсказания масс даже трех доминирующих изотопов резко ухудшилась, особенно в интервале малых масс.

В **заклучении** суммированы основные результаты диссертации.

В **приложении А** представлено описание текущей версии многогруппового модуля переноса излучения кода FRONT. В **параграфе А.1** рассмотрена тестовая задача об излучении горячей области в неподвижную холодную среду со степенной зависимостью непрозрачности от частоты фотонов. В **параграфе А.2** представлено описание текущей версии модуля расчета непрозрачности в коде FRONT, включающего в себя учет свободно-свободно, свободно-связанных электронных переходов, а также рассеяния на свободных электронах. Кроме этого, представлено сравнение вычисленной с помощью модуля кода FRONT непрозрачности с данными Лос-Аламосской национальной лаборатории [81].

В **приложении Б** представлены результаты исследования сильного масштабирования кода FRONT, показывающие эффективность его применения на высокопроизводительных вычислительных кластерах.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. The Simulation of Superluminous Supernovae Using the M1 Approach for Radiation Transfer [Текст] / E. Urvachev [et al.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2021. — Vol. 256, no. 1. — P. 8.
- A2. *Урвачев, Е. М.* Транзиент AT2018cow: сценарий с экваториальным диском [Текст] / Е. М. Урвачев, С. И. Блинников, К. Номото // Письма в *Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 11. — С. 765—772.
- A3. *Урвачев, Е. М.* Моделирование болометрических кривых блеска сверхновой SN2009ip [Текст] / Е. М. Урвачев, С. И. Глазырин // *Математическое моделирование*. — 2022. — Т. 34, № 1. — С. 16—32.
- A4. Об особенностях моделирования сверхновых типа IIp в приближении серой непрозрачности и свойства их кривых блеска [Текст] / Е. М. Урвачев [и др.] // Письма в *Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 48, № 1. — С. 24—33.

Список литературы

1. A supernova-regulated interstellar medium: simulations of the turbulent multiphase medium [Текст] / M. Korpi [и др.] // The Astrophysical Journal Letters. — 1999. — Т. 514, № 2. — С. L99.
2. *Kim, C.-G.* Momentum injection by supernovae in the interstellar medium [Текст] / C.-G. Kim, E. C. Ostriker // The Astrophysical Journal. — 2015. — Т. 802, № 2. — С. 99.

3. *Matteucci, F.* Relative roles of type I and II supernovae in the chemical enrichment of the interstellar gas [Текст] / F. Matteucci, L. Greggio // *Astronomy and Astrophysics*. — 1986. — Т. 154. — С. 279–287.
4. The first supernova explosions: Energetics, feedback, and chemical enrichment [Текст] / Т. Н. Greif [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — Т. 670, № 1. — С. 1.
5. *Nomoto, K.* Nucleosynthesis in stars and the chemical enrichment of galaxies [Текст] / К. Nomoto, С. Kobayashi, N. Tominaga // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — Т. 51. — С. 457–509.
6. *Hillas, A.* Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? [Текст] / A. Hillas // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. — 2005. — Т. 31, № 5. — R95.
7. *Butt, Y.* Beyond the myth of the supernova-remnant origin of cosmic rays [Текст] / Y. Butt // *Nature*. — 2009. — Т. 460, № 7256. — С. 701–704.
8. Observational signatures of particle acceleration in supernova remnants [Текст] / E. Helder [и др.] // *Space Science Reviews*. — 2012. — Т. 173, № 1–4. — С. 369–431.
9. *Bykov, A.* Particle Acceleration in Mildly Relativistic Outflows of Fast Energetic Transient Sources [Текст] / A. Bykov, V. Romansky, S. Osipov // *Universe*. — 2022. — Т. 8, № 1. — С. 32.
10. *Cameron, A. G.* Neutron stars [Текст] / A. G. Cameron // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1970. — Т. 8, № 1. — С. 179–208.
11. Neutron stars and pulsars [Текст] / W. Becker [и др.]. — 2009.
12. *Branch, D.* Type Ia supernovae as standard candles [Текст] / D. Branch, G. Tammann // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1992. — Т. 30, № 1. — С. 359–389.
13. *Pskovskii, I. P.* Light curves, color curves, and expansion velocity of type I supernovae as functions of the rate of brightness decline [Текст] / I. P. Pskovskii // *Soviet Astronomy*. — 1977. — Т. 21. — С. 675–682.
14. *Phillips, M. M.* The absolute magnitudes of Type IA supernovae [Текст] / M. M. Phillips // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — Т. 413. — С. L105–L108.
15. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant [Текст] / A. G. Riess [и др.] // *The Astronomical Journal*. — 1998. — Т. 116, № 3. — С. 1009.
16. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae [Текст] / S. Perlmutter [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — Т. 517, № 2. — С. 565.

17. *Elvis, M.* Quasar parallax: a method for determining direct geometrical distances to quasars [Текст] / M. Elvis, M. Karovska // The Astrophysical Journal Letters. — 2002. — Т. 581, № 2. — С. L67.
18. A new direct method for measuring the Hubble constant from reverberating accretion discs in active galaxies [Текст] / S. Collier [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1999. — Т. 302, № 1. — С. L24—L28.
19. The megamaser cosmology project. IV. A direct measurement of the Hubble constant from UGC 3789 [Текст] / M. Reid [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2013. — Т. 767, № 2. — С. 154.
20. *Schmidt, B. P.* Expanding photospheres of type II supernovae and the extragalactic distance scale [Текст] / B. P. Schmidt, R. P. Kirshner, R. G. Eastman // The Astrophysical Journal. — 1992. — Т. 395. — С. 366—386.
21. The distances to five Type II supernovae using the expanding photosphere method, and the value of H0 [Текст] / B. P. Schmidt [и др.] // The Astrophysical Journal. — 1994. — Т. 432. — С. 42—48.
22. Type IIP supernovae as cosmological probes: a spectral-fitting expanding atmosphere model distance to SN 1999em [Текст] / E. Baron [и др.] // The Astrophysical Journal Letters. — 2004. — Т. 616, № 2. — С. L91.
23. *Weaver, T.* The physics of supernova explosions [Текст] / T. Weaver, S. Woosley // Annual review of astronomy and astrophysics. Volume 24. — 1986.
24. *Burrows, A.* Colloquium: Perspectives on core-collapse supernova theory [Текст] / A. Burrows // Reviews of Modern Physics. — 2013. — Т. 85, № 1. — С. 245.
25. Direct determination of the hubble parameter using type IIn supernovae [Текст] / S. Blinnikov [и др.] // JETP letters. — 2012. — Т. 96, № 3. — С. 153—157.
26. Study of supernovae important for cosmology [Текст] / P. V. Baklanov [и др.] // JETP letters. — 2013. — Т. 98, № 7. — С. 432—439.
27. *Cooke, J.* Detecting $z > 2$ type IIn supernovae [Текст] / J. Cooke // The Astrophysical Journal. — 2008. — Т. 677, № 1. — С. 137.
28. Type IIn supernovae at redshift $z=2$ from archival data [Текст] / J. Cooke [и др.] // Nature. — 2009. — Т. 460, № 7252. — С. 237—239.
29. *Gal-Yam, A.* Luminous supernovae [Текст] / A. Gal-Yam // Science. — 2012. — Т. 337, № 6097. — С. 927—932.
30. *Nicholl, M.* Superluminous supernovae: an explosive decade [Текст] / M. Nicholl // Astronomy and Geophysics. — 2021. — Т. 62, № 5. — С. 5—34.

31. *Langer, N.* The evolution of very luminous stars. I-Presupernova evolution [Текст] / N. Langer, M. El Eid // *Astronomy and Astrophysics*. — 1986. — Т. 167. — С. 265—273.
32. *Kasen, D.* Pair instability supernovae: light curves, spectra, and shock breakout [Текст] / D. Kasen, S. Woosley, A. Heger // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — Т. 734, № 2. — С. 102.
33. *Kozyreva, A.* Can pair-instability supernova models match the observations of superluminous supernovae? [Текст] / A. Kozyreva, S. Blinnikov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — Т. 454, № 4. — С. 4357—4365.
34. *Woosley, S. E.* The deaths of very massive stars [Текст] / S. E. Woosley, A. Heger // *Very Massive Stars in the Local Universe*. — Springer, 2015. — С. 199—225.
35. *Woosley, S.* Bright supernovae from magnetar birth [Текст] / S. Woosley // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2010. — Т. 719, № 2. — С. L204.
36. *Kasen, D.* Supernova light curves powered by young magnetars [Текст] / D. Kasen, L. Bildsten // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Т. 717, № 1. — С. 245.
37. *Barkov, M. V.* Recycling of neutron stars in common envelopes and hypernova explosions [Текст] / M. V. Barkov, S. S. Komissarov // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — Т. 415, № 1. — С. 944—958.
38. Slowly fading super-luminous supernovae that are not pair-instability explosions [Текст] / M. Nicholl [и др.] // *Nature*. — 2013. — Т. 502, № 7471. — С. 346—349.
39. Super-luminous type Ic supernovae: catching a magnetar by the tail [Текст] / C. Ingera [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2013. — Т. 770, № 2. — С. 128.
40. *Grasberg, E.* Type II supernovae—Two successive explosions? [Текст] / E. Grasberg, D. Nadezhin // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*. — 1986. — Т. 12. — С. 168—175.
41. The Type II_n supernova 1994W: evidence for the explosive ejection of a circumstellar envelope [Текст] / N. N. Chugai [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2004. — Т. 352, № 4. — С. 1213—1231.
42. *Woosley, S. E.* Pulsational pair instability as an explanation for the most luminous supernovae [Текст] / S. E. Woosley, S. Blinnikov, A. Heger // *Nature*. — 2007. — Т. 450, № 7168. — С. 390—392.

43. *Chevalier, R. A.* Shock breakout in dense mass loss: luminous supernovae [Текст] / R. A. Chevalier, C. M. Irwin // The Astrophysical Journal Letters. — 2011. — Т. 729, № 1. — С. L6.
44. An analytic bolometric light curve model of interaction-powered supernovae and its application to Type IIn supernovae [Текст] / T. J. Moriya [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — Т. 435, № 2. — С. 1520–1535.
45. Type I superluminous supernovae as explosions inside non-hydrogen circumstellar envelopes [Текст] / E. Sorokina [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2016. — Т. 829, № 1. — С. 17.
46. *Moriya, T. J.* Superluminous supernovae [Текст] / T. J. Moriya, E. I. Sorokina, R. A. Chevalier // Space Science Reviews. — 2018. — Т. 214, № 2. — С. 1–37.
47. *Chevalier, R.* Hydrodynamic instabilities in supernova remnants: Early radiative cooling [Текст] / R. Chevalier, J. M. Blondin // The Astrophysical Journal. — 1995. — Т. 444. — С. 312–317.
48. On physical and numerical instabilities arising in simulations of non-stationary radiatively cooling shocks [Текст] / D. Badjin [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — Т. 459, № 2. — С. 2188–2211.
49. *Badjin, D. A.* Physical and numerical instabilities of radiatively cooling shocks in turbulent magnetized media [Текст] / D. A. Badjin, S. I. Glazyrin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Т. 507, № 1. — С. 1492–1512.
50. *Шарова, Ю. С.* Исследование влияния фоновой нейтральной компоненты на динамику оболочки в остатках сверхновых [Текст] / Ю. С. Шарова, С. И. Глазырин, В. А. Гасилов // Письма в Астрономический журнал. — 2021. — Т. 47, № 11. — С. 773–781.
51. *Chen, K.-J.* Three-dimensional Simulations of Magnetar-powered Superluminous Supernovae [Текст] / K.-J. Chen, S. Woosley, D. J. Whalen // The Astrophysical Journal. — 2020. — Т. 893, № 2. — С. 99.
52. *Utrobin, V. P.* Asymmetry of SN 1987A: fast Ni-56 clump [Текст] / V. P. Utrobin, N. N. Chugai, A. A. Andronova // Astronomy and Astrophysics. — 1995. — Т. 295. — С. 129–135.
53. *Chugai, N. N.* Optical signatures of circumstellar interaction in type IIP supernovae [Текст] / N. N. Chugai, R. A. Chevalier, V. P. Utrobin // The Astrophysical Journal. — 2007. — Т. 662, № 2. — С. 1136.

54. The close circumstellar environment of Betelgeuse-II. Diffraction-limited spectro-imaging from 7.76 to 19.50 μm with VLT/VISIR [Текст] / P. Kervella [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — Т. 531. — A117.
55. *Utrobin, V.* Parameters of type IIP SN 2012A and clumpiness effects [Текст] / V. Utrobin, N. Chugai // *Astronomy & Astrophysics*. — 2015. — Т. 575. — A100.
56. The INTEGRAL mission [Текст] / C. Winkler [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — Т. 411, № 1. — С. L1–L6.
57. INTEGRAL observations of the cosmic X-ray background in the 5–100 keV range via occultation by the Earth [Текст] / E. Churazov [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Т. 467, № 2. — С. 529–540.
58. 15 years of galactic surveys and hard X-ray background measurements [Текст] / R. A. Krivonos [и др.] // *New Astronomy Reviews*. — 2021. — С. 101612.
59. INTEGRAL/IBIS 17-yr hard X-ray all-sky survey [Текст] / R. A. Krivonos [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — Т. 510, № 4. — С. 4796–4807.
60. The cow: discovery of a luminous, hot, and rapidly evolving transient [Текст] / S. Prentice [и др.] // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2018. — Т. 865, № 1. — С. L3.
61. The fast, luminous ultraviolet transient AT2018cow: extreme supernova, or disruption of a star by an intermediate-mass black hole? [Текст] / D. A. Perley [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Т. 484, № 1. — С. 1031–1049.
62. *Fox, O. D.* Signatures of circumstellar interaction in the unusual transient AT 2018cow [Текст] / O. D. Fox, N. Smith // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Т. 488, № 3. — С. 3772–3782.
63. A Model for the Fast Blue Optical Transient AT2018cow: Circumstellar Interaction of a Pulsational Pair-instability Supernova [Текст] / S.-C. Leung [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — Т. 903, № 1. — С. 66.
64. Multimessenger Implications of AT2018cow: High-energy Cosmic-Ray and Neutrino Emissions from Magnetar-powered Superluminous Transients [Текст] / K. Fang [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — Т. 878, № 1. — С. 34.
65. Swift spectra of AT2018cow: a white dwarf tidal disruption event? [Текст] / N. P. M. Kuin [и др.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2019. — Т. 487, № 2. — С. 2505–2521.

66. An embedded X-ray source shines through the aspherical AT 2018cow: revealing the inner workings of the most luminous fast-evolving optical transients [Текст] / R. Margutti [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2019. — Т. 872, № 1. — С. 18.
67. *Clery, D.* X-ray telescope keeps Russia's space science hopes alive [Текст] / D. Clery. — 2019.
68. The X-ray and Radio Loud Fast Blue Optical Transient AT2020mrf: Implications for an Emerging Class of Engine-Driven Massive Star Explosions [Текст] / Y. Yao [и др.] // arXiv preprint arXiv:2112.00751. — 2021.
69. The james webb space telescope [Текст] / J. P. Gardner [и др.] // Space Science Reviews. — 2006. — Т. 123, № 4. — С. 485—606.
70. Detection of isolated population III stars with the James Webb Space Telescope [Текст] / С.-Е. Rydberg [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2013. — Т. 429, № 4. — С. 3658—3664.
71. *Kalirai, J.* Scientific discovery with the James Webb space telescope [Текст] / J. Kalirai // Contemporary Physics. — 2018. — Т. 59, № 3. — С. 251—290.
72. Observational properties of a general relativistic instability supernova from a primordial supermassive star [Текст] / Т. J. Moriya [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Т. 503, № 1. — С. 1206—1213.
73. The general relativistic instability supernova of a supermassive Population III star [Текст] / К.-J. Chen [и др.] // The Astrophysical Journal. — 2014. — Т. 790, № 2. — С. 162.
74. *Komissarov, S. S.* Supercollapsars and their X-ray bursts [Текст] / S. S. Komissarov, M. V. Barkov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2010. — Т. 402, № 1. — С. L25—L29.
75. *Barkov, M. V.* Hard X-Ray bursts in collapse of supermassive stars [Текст] / M. V. Barkov // Astrophysical Bulletin. — 2010. — Т. 65, № 3. — С. 217—222.
76. *Glazyrin, S.* Investigation of burning in type Ia supernovae [Текст] / S. Glazyrin // Astronomy Letters. — 2013. — Т. 39, № 4. — С. 221—226.
77. *Gonzalez, M.* HERACLES: a three-dimensional radiation hydrodynamics code [Текст] / M. Gonzalez, E. Audit, P. Huynh // Astronomy & Astrophysics. — 2007. — Т. 464, № 2. — С. 429—435.
78. Theoretical light curves for deflagration models of type Ia supernova [Текст] / S. Blinnikov [и др.] // Astronomy & Astrophysics. — 2006. — Т. 453, № 1. — С. 229—240.

79. A panchromatic view of the restless SN 2009ip reveals the explosive ejection of a massive star envelope [Текст] / R. Margutti [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2014. — Т. 780, № 1.
80. *Dorogush, A. V.* CatBoost: gradient boosting with categorical features support [Текст] / A. V. Dorogush, V. Ershov, A. Gulin // arXiv preprint arXiv:1810.11363. — 2018.
81. A new generation of Los Alamos opacity tables [Текст] / J. Colgan [и др.] // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — Т. 817, № 2. — С. 116.

Урвачев Егор Михайлович

Многомерное моделирование сверхновых с помощью M1-приближения для
переноса излучения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____

