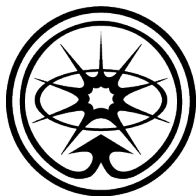


На правах рукописи



**Поташов Марат Шамилевич**

**Эффекты неравновесности и нестационарности  
в оболочках сверхновых**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звёздная астрономия»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институте теоретической и экспериментальной физики имени А.И.Алиханова Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Блинников Сергей Иванович**,  
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Бисноватый-Коган Геннадий Семёнович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук, главный научный сотрудник

**Постнов Константин Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 27 мая 2020 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан 2020 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д 002.280.01,  
канд. физ.-мат. наук

Н. В. Чупина

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Для исследования современной структуры Вселенной требуются новые данные – расстояния до объектов с известными красными смещениями. Среди многообразия различных методик измерения расстояний есть способы, не опирающиеся на лестницу космологических расстояний, например, метод расширяющихся фотосфер (Expanding Photosphere Method, EPM) [1] или метод расширяющихся атмосфер (Spectral-fitting Expanding Atmosphere Method, SEAM) [2], которые используют в качестве объектов сверхновые типа II. Важность прямых методов измерения космологических расстояний особенно актуальна в свете проблемы неопределённости в измерении параметра Хаббла (Hubble tension) [3–6].

Отметим, что использование такого метода как SEAM требует построения физической модели сверхновой второго типа, детально воспроизводящей её спектр излучения. Для полного моделирования физических процессов, происходящих в сверхновой, необходимо одновременно учитывать гидродинамику разлёта оболочки, взаимодействие поля излучения с веществом, перенос излучения в линиях и континууме и кинетику населённости уровней в атомах многозарядной плазмы вещества. Это даёт систему интегро-дифференциальных уравнений радиационной гидродинамики, полное численное решение которой пока является непосильной задачей даже в одномерном случае. Приходится прибегать к неизбежным упрощениям в этой полной системе. Одно из таких упрощений – стационарное приближение кинетической системы населённости уровней, в рамках которого считается, что система находится в статистическом равновесии. *Эффектом нестационарности* называют отклонение истинных населённостей уровней от их стационарных значений.

На важность учёта нестационарности в кинетике в период небулярной фазы для SN II указывали Аксельрод [7], Клэйтон и др. [8], Франссон и Козма [9]. Было показано, что через несколько лет после взрыва (для SN 1987A ~ 800 дней [9–12]) эффект нестационарности начинает проявляться для водорода в оболочке сверхновой. Учёт этого

эффекта привёл к увеличению степени ионизации и температуры вещества в 2–4 раза и усилению эмиссии по сравнению со стационарным приближением. В этих работах нестационарность учитывалась не только в уравнениях кинетики и ионизации, но и в уравнении энергии.

Эффект нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых II типа на фотосферной фазе был применён Киришнером и Кваном [13] для объяснения высокой светимости линии  $H\alpha$  в спектрах SN 1970G, а также Чугаем [14] для объяснения высокой степени возбуждения водорода во внешних слоях атмосферы ( $v > 7000 \text{ км с}^{-1}$ ) SN 1987A в первые 40 дней после взрыва.

Утробин и Чугай [15] нашли проявление сильного эффекта нестационарности в кинетике ионизации и линиях водорода в сверхновых типа II в течение фотосферной фазы. В следующей работе [16] нестационарность была учтена ещё и в уравнении энергии. Сначала производилось независимое гидродинамическое моделирование оболочки, а затем с имеющимися профилем плотности вещества, скоростями разлёта, радиусом фотосферы и эффективной температурой решались нестационарное уравнение для температуры вещества и полная кинетическая система населённостей уровней как атомов, так и молекул. В этих работах было показано, что учёт эффекта нестационарной ионизации позволяет получить спектры излучения пекулярной SN 1987A с более сильной линией  $H\alpha$ , что ранее не удавалось сделать без замещения радиоактивного  $^{56}\text{Ni}$  до внешних высокоскоростных слоёв в стационарном приближении. В следующей работе [17] важность эффекта нестационарности была показана и для нормальной SN 1999em.

Выводы Утробина и Чугая были отчасти подтверждены Дессартом и Хилиером с помощью программного пакета CMFGEN. В работе [18] применявшийся подход был ещё стационарным, и именно он был реализован в CMFGEN. Моделирование обнаруживало проблему – линия  $H\alpha$  в богатых водородом оболочках была слабее наблюдаемой в рекомбинационную эпоху. В частности, для SN 1987A модель не воспроизводила линию для времён позже 4 дней, а для SN 1999em позже 20 дней. Далее Дессарт и Хилиер усовершенствовали программу, включив в неё временную зависимость в кинетической системе и в уравнении энергии [19], а затем и в переносе излучения [20; 21]. Это позволило усилить линию  $H\alpha$  в результирующем спектре излучения, что привело к лучшему согласию с наблюдениями. Профиль плотности и обилие элементов для

CMFGEN брались из независимого гидродинамического моделирования кодом KEPLER (подробности в [21]).

С другой стороны, Де и др. [22] нашли на основе расчётов с помощью программного пакета PHOENIX, что нестационарная кинетика важна только в первые дни после взрыва сверхновой. Более того, они утверждают, что роль нестационарности даже в эти первые дни не очень велика, иллюстрируя это на примере моделей SN 1987A и SN 1999em. Стационарный подход используется и в последующих статьях группы PHOENIX (см., например, Инсерра и др. [23]).

Подавляющее большинство кодов симуляций методом Монте-Карло также пренебрегают эффектом нестационарности в кинетике [24–28; SEDONA 29; ARTIS 30]. Фойгль и др. [31], используя открытый код TARDIS [32], не отрицая важность эффекта нестационарности в кинетике, тем не менее пренебрегают им при моделировании спектров SN 1999em и получают хорошее согласие моделируемых спектров с наблюдаемыми.

Таким образом, выводы различных исследовательских групп расходятся, и важность эффекта до сих пор ставится под сомнение. Ответ на вопрос, важен ли эффект нестационарной ионизации или нет, является одной из важнейших задач настоящей диссертации.

В диссертации также развивается новый метод определения расстояний до сверхновых SNe II<sub>n</sub>. Для нового метода не требуется приближения стандартной свечи, как для сверхновых типа Ia. Этот метод принадлежит к прямым методам, не зависящим от лестницы космологических расстояний. Метод, предложенный Блинниковым, Поташовым, Баклановым и Долговым, основан на наблюдении и определении линейных размеров расширяющейся плотной оболочки (Dense Shell, DS) в SN II<sub>n</sub> [A1–A3]. Расширяющийся плотный слой дал название методу: “метод плотного слоя” (Dense Shell Method, DSM). Этот метод частично основан на EPM и SEAM, а частично – на методе расширяющегося фронта ударной волны (Expanding Shock Front Method, ESM) [33].

В пике абсолютная звёздная величина SN II<sub>n</sub> достигает значения  $M_R \sim -22^m$  (например, SN 2008fz [34; 35]). Свойство SNe II<sub>n</sub> светить так ярко позволяет отнести их к классу сверхмощных сверхновых (Superluminous Supernovae, SLSN) [35]. Такие сверхновые наблюдаются даже при очень больших красных смещениях  $z = 2 - 4$  [36–42].

Разрабатываемый метод DSM позволяет измерять расстояния до таких далёких объектов, при наличии хорошего спектра, *напрямую*.

## **Цели и задачи работы**

Первая цель диссертационной работы – ответить на вопрос, важен ли эффект нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа IIР в течение фазы плато. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- Аналитически исследовать упрощённую систему кинетики атома водорода (“два уровня плюс континуум”) в условиях сверхновой типа IIР на стадии плато.
- Изучить различные факторы, влияющие на выраженность эффекта нестационарности.
- Исследовать эффект на примере полной кинетической системы, учитывающей ударные процессы, содержащей также гелий и металлические примеси.

Вторая цель диссертационной работы – развитие прямого метода измерения расстояний до сверхновых. В этом случае ставятся следующие **задачи**:

- Обобщение и реализация алгоритма расчёта расстояния до SNe IIп методом плотного слоя (DSM), для учёта множества наблюдательных данных и их ошибок.
- Получение расстояний до сверхновых методом DSM.

## **Научная новизна**

- Впервые подробно аналитически рассмотрена кинетическая модельная система, анализ которой разрешает давно обсуждаемый вопрос о важности учёта эффекта нестационарности. Рассмотрены многочисленные факторы, влияющие на выраженность эффекта.
- Разработан метод расчёта кинетики многозарядной плазмы в оболочке сверхновой. Алгоритм (код LEVELS) решает зависящую от времени систему интегро-дифференциальных уравнений кинетики населённостей уровней элементов совместно с уравнением переноса в линиях в модифицированном приближении Соболева и строит наблюдательные спектры.

- В диссертации расширяется подход к новому методу DSM, позволяющему прямым способом измерять расстояния до SN IIп. При помощи обобщённой реализации метода DSM получены расстояния до сверхновых SN 2006gy и SN 2009ip. Эти значения хорошо согласуются с известными ранее расстояниями до родительских галактик, что подтверждает работоспособность метода.

## **Научная и практическая значимость работы**

Построенная простая кинетическая модельная система и её аналитический анализ позволяют разобраться во всех факторах, влияющих на нестационарность ионизации в оболочках сверхновых в течение фотосферной фазы.

Разработанные и применённые в программе LEVELS алгоритмы учитывают нестационарную ионизацию и эффекты нелокального термодинамического равновесия (НЛТР) в кинетических схемах на основе рассчитанной кодом STELLA модели сверхновой, что позволяет корректно описать перенос излучения в линиях и кинетику в сверхновых.

Также показана эффективность разработанных автором алгоритмов и реализующих их программных кодов для определения расстояний до сверхновых прямым методом плотного слоя (DSM).

## **Методы исследования**

Основными методами исследования, применявшимися для получения результатов, были построения аналитических и численных моделей кинетических систем, как простых, чисто водородных, так и полных, содержащих также гелий и металлические примеси.

Помимо этого с помощью численных методов, был развит подход для определения фотометрических расстояний до SN IIп – метод плотного слоя (Dense Shell Method, DSM).

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Продемонстрирована важность учёта эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых при помощи простой аналитической водородной модели, реалистично описывающей

основные свойства полной системы. Получено доказательство неизбежности эффекта “закалки” ионизации при больших временах, сравнимых с длительностью фазы плато. Приведено доказательство ограниченности, устойчивости и диссипативности решений простой системы.

2. Получен критерий проверки статистической равновесности (стационарности), на основе времени релаксации системы с “замороженными” коэффициентами. Критерий позволяет установить важность эффекта нестационарности для любых масштабов времён.
3. Получена формула для анализа эволюции времени релаксации. Показано, что на это время сильнее других факторов влияет форма спектра заданного внешнего излучения в полосе частот между порогом Бальмера и Лаймана, падающего на рассматриваемую атомную систему.
4. Разработан метод (реализованный в авторском коде LEVELS) расчёта кинетики многозарядной плазмы в оболочке сверхновой. Алгоритм решает зависящую от времени систему интегро-дифференциальных уравнений кинетики населённостей уровней элементов совместно с уравнением переноса в линиях в модифицированном приближении Соболева. Полученные населённости уровней используются для построения спектров.
5. Численно показано, что время релаксации остаётся намного большим, чем характерное время изменения параметров оболочки сверхновой даже в случае учёта дополнительных уровней в модели атома водорода, тонкой структуры, ударных процессов и примесей металлов. Ни один из этих дополнительных факторов не отменяет эффект нестационарной ионизации.
6. Разработан численный алгоритм для расчёта фотометрических расстояний до SN II<sub>n</sub> новым методом космографии DSM (Dense Shell Method). Полученные методом DSM расстояния до сверхновых SN 2006gy, SN 2009ip оказываются в хорошем согласии с известными ранее расстояниями до родительских галактик.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих семинарах и конференциях:



7–10 октябрь, **2010**: Международная астрофизическая конференция “Новейшие методы исследования космических объектов” (КФУ, Казань)

21–24 декабрь, **2010**, 13–16 декабрь, **2011**, 20–23 декабрь, **2016** : “Всероссийская астрофизическая конференция Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (ИКИ РАН, Москва)

5 сентябрь, **2011**: Российско–Швейцарская встреча SCOPE5 (ИНАСАН, Москва)

18–28 январь, **2012**, 23–25 январь, **2013**, 31 январь–3 февраль, **2014**, 18–21 июнь, **2018**, 17–21 июнь, **2019** : Расширенный семинар “Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике” (ИКИ РАН, Таруса)

22–26 июль, **2013**: “Dark matter, dark energy and their detection” (НГУ, Новосибирск)

9–10 сентябрь, **2013**: Russian–Swiss Workshop, “Heavy elements nucleosynthesis and galactic chemical evolution” (ИТЭФ, Москва)

29–30 сентябрь, **2014**: “Brainstorming and Fun: Stellar Evolution/Explosions, Nuclear/Particle Physics Input, Origin of the Elements and Evolution of Galaxies” (Basel University, Basel, Switzerland)

4 декабрь, **2014**: Семинар теоретдела ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера (Новосибирск)

22–23 апрель, **2015**: “Молодёжная конференция по физике высоких энергий, квантовой теории поля, математической физике и космологии, посвященная 70-летию ИТЭФ” (ИТЭФ, Москва)

21–25 сентябрь, **2015**: “Механизмы излучения космических объектов: классика и современность” (СПбГУ, Санкт-Петербург)

29 сентябрь–2 октябрь, **2015**: Первый Международный научный форум молодых ученых “Наука будущего – наука молодых” (СевГУ, Севастополь)

2–3 март, **2017**: Симпозиум “30 лет Сверхновой SN 1987A” (ФИАН, Москва)

3 июль, **2017**: Russian–Swiss, “Galactic chemical evolution and Heavy elements nucleosynthesis” (ИНАСАН, Москва)

10–14 июль, **2017**: “Physics of Neutron Stars – 2017” (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург)

11–15 сентябрь, **2017**: “High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VI” (ИКИ РАН, Москва)

22 декабрь, **2017**, 17 декабрь, **2018** : “Успехи российской астрофизики 2017: Теория и Эксперимент” (ГАИШ, Москва)

21–24 январь, **2018**: “660. Wilhelm und Else Heraeus-Seminar Supernovae – From Simulations to Observations and Nucleosynthetic Fingerprints” (Physikzentrum, Bad Honnef, Germany)

26–29 ноябрь, **2018**: “Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике” (ИТЭФ, Москва)

17–19 декабрь, **2019**: Научная конференция, “ИТЭФ – Итоги года” (ИТЭФ, Москва)

Также автор докладывался на семинарах ИТЭФ (Москва), ИЯФ (Новосибирск), Курчатовский институт (Москва), NAOJ (Митака, Япония), IPMU (Кашива, Япония), MPA (Гархинг, Германия).

## Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus [A1–A6].

## Личный вклад

Автор предложил простую аналитическую модель водородной оболочки, реалистично описывающую основные свойства полной системы. Автор проделал все ключевые шаги анализа и развития простой модели [A5; A6]. Она позволила ответить на вопрос о важности учёта эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых.

Автор реализовал код LEVELS, полностью переработав первый вариант программы, рассчитывающей *стационарные* НЛТР населённости в многозарядной плазме оболочки сверхновой, предложенный Андроновой А. А. Автор существенно расширил применимость алгоритмов, добавив в них учёт *нестационарности* и модифицированное приближение Соболева [A4]. С помощью кода LEVELS автор обобщил анализ простой аналитической модели, численно доказав необходимость учёта эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых [A6].

На основе первой версии кода для вычисления расстояний методом DSM, реализованной Баклановым П. В., автор разработал новый оригинальный код, позволивший существенно улучшить качество и точность работы метода. Первоначальная версия позволяла оценить расстояния, используя две точки наблюдений. Вариант, представленный в диссертации, использует множество наблюдательных данных, с учётом их ошибок. С помощью новой программной реализации были определены расстояния до сверхновых SN 2006gy и SN 2009ip в работах [A1—A3] (в этих статьях вклад авторов равный). Полученные значения прекрасно согласуются с известными ранее расстояниями до родительских галактик, что подтверждает работоспособность метода.

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

## Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц, и приложения. Полный объём диссертации составляет 141 страницы, включая 24 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 200 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в данной диссертационной работе. Показана неоднозначность в оценке важности роли эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых в течение фотосферной фазы. Дается обзор современного состояния области, формулируются цели и ставятся задачи работы, оценивается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Также во введении кратко изложено содержание глав диссертации.

В **главе 1** рассматривается простая чисто водородная кинетическая система (“два уровня + континуум”), помещённая в заданное излучение в континууме в некоторой надфотосферной области оболочки сверхновой второго типа на фазе плато. В **параграфе 1.1** усреднённая по углам интенсивность излучения на частоте  $L\alpha$  задаётся убывающей

степенным образом по времени  $J_c(\nu_{L\alpha}, t) \propto t^{-s_1}$ , полный коэффициент фотоионизации со второго уровня при этом убывает как  $P_{2c}(t) \propto t^{-s_2}$ .

В **параграфе 1.2** установлено, что в пределе больших времён эффект нестационарности (отклонения истинных населённостей от стационарных) существенен *при любых условиях*. Истинная относительная концентрация электронов  $u_e(t) = n_e(t)/N(t)$  выходит на константу при больших временах вне зависимости от начальных условий. Здесь  $n_e(t)$  – концентрация свободных электронов, а  $N(t)$  – концентрация водорода. В свою очередь, стационарная относительная концентрация электронов степенным образом стремится к нулю:

$$u_e^{ss} \sim t^{-(s_1+s_2-3)/2}.$$

Видно, что в нестационарном случае оболочка разлетается с *бóльшей* степенью ионизации по сравнению со стационарным приближением, и вещество испытывает “закалку”.

В **параграфе 1.2.1** доказано свойство *диссипативности* системы – начальные условия быстро “забываются” со временем. Поэтому, без ограничения общности, в **параграфе 1.3** при рассмотрении поведения системы на малых временах считается, что начальные значения нормированных населённостей совпадают со стационарными в момент  $t_0$ , начала фотосферной фазы. Показано, что если отклонение истинных нормированных населённостей основного уровня водорода  $u_1(t) = n_1(t)/N(t)$  от стационарных  $u_1^{ss}(t)$  мало, то оно будет меняться со временем как

$$u_1(t) \simeq u_1^{ss}(t) - \int_{t_0}^t \exp\left(\int_{t'}^t \lambda(\zeta') d\zeta'\right) \dot{u}_1^{ss}(t') dt'.$$

Здесь  $\lambda$  – наименьшее по модулю собственное число матрицы Якоби *простой* кинетической системы.

В **параграфе 1.4** при помощи системы с “замороженными” коэффициентами определяется физический смысл собственного числа:

$$\lambda(t) = -t_{ss}(t)^{-1},$$

где  $t_{ss}(t)$  – время релаксации системы. Для того, чтобы определить важность эффекта нестационарности для любых масштабов времён,

строится критерий проверки статистической равновесности на основе времени релаксации. Если время релаксации системы по отношению к характерному времени изменения параметров сверхновой мало, то кинетическая система, описывающая населённости уровней, статистически равновесна, и вместо неё можно рассматривать стационарное алгебраическое приближение.

Если время релаксации всюду будет мало, то отклонения населённостей будут также незначительными всегда. Поэтому важно проанализировать *эволюцию* времени релаксации и оценить какие факторы на неё влияют. Для этого в **параграфе 1.5** аналитически получена формула для времени установления статистического равновесия

$$t_{ss}(t) \approx f(t, N_0, T_e) \sqrt{\frac{P_{2c}(t_0)}{J_c(\nu_{L\alpha}, t_0)}} \left(\frac{t}{t_0}\right)^{\frac{s_1 - s_2}{2}}.$$

Показано, что на время релаксации сильнее других факторов влияет форма спектра заданного внешнего излучения в полосе частот между порогами Бальмера и Лаймана. Чем ближе интенсивность окружающего жёсткого непрерывного излучения к оптически тонкому пределу (малая металличность оболочки), тем меньше время релаксации. Однако для чисто водородной оболочки даже в оптически тонком пределе время релаксации остаётся значительным, и наблюдается эффект нестационарности.

В конце **главы 1** аналитически показано, что, например, для переходов триплета атомов кальция эффекта нестационарной ионизации быть не должно.

В **параграфе 2.1 главы 2** мы описали детали моделирования оболочки сверхновой оригинальным программным кодом LEVELS. Это программный пакет для расчёта кинетики многозарядной плазмы в оболочке сверхновой, а также для построений спектров. LEVELS решает зависящую от времени систему интегро-дифференциальных уравнений кинетики населённостей уровней элементов совместно с уравнением переноса в линиях в модифицированном приближении Соболева. Для работы LEVELS требуется гидродинамическая и термодинамическая модель оболочки сверхновой, которая берётся из расчётов STELLA. Полученные населённости уровней используются для построения спектров.

В **параграфе 2.2** на примере модели SN 1999em в случае чисто водородной оболочки мы продемонстрировали эффект нестационарной ионизации при помощи программных пакетов STELLA и LEVELS (Рис. 1).

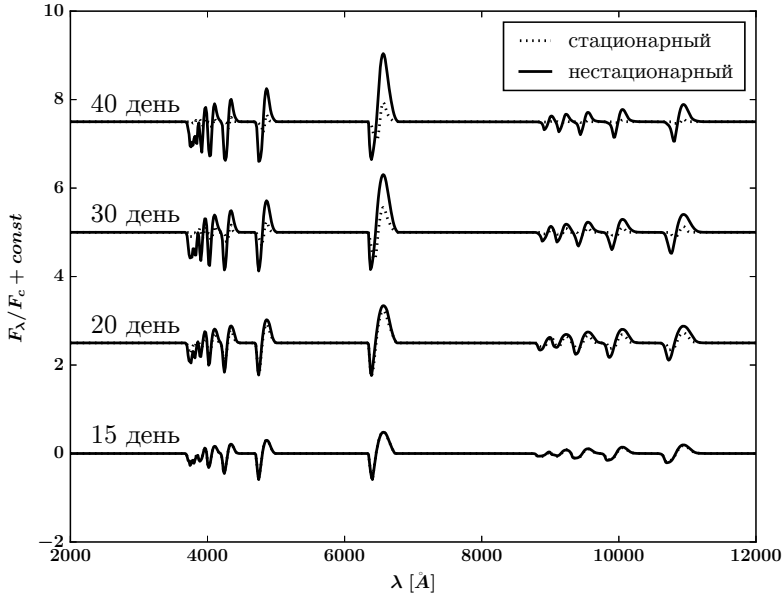


Рис. 1 — Нормированные спектры модели SN 1999em для четырех моментов времени: 15, 20, 30, 40 дней после взрыва, рассчитанные для стационарного (штриховая линия) и нестационарного (сплошная линия) случаев. Результат диссертанта из работы [A4].

В **параграфах 2.3** мы обобщили определение времени релаксации системы, как обратное к наименьшему по модулю собственному числу матрицы Якоби для *полной* кинетической системы (многоуровневые модели атома водорода, учёт ударных процессов и учёт металлических примесей и т.д.). Численно мы проследили эволюцию времён релаксации для различных систем. Параметры и свойства этих систем перечислены в таблице 2 диссертационной работы.

В **параграфах 2.3.1** и **2.3.3** было показано, что добавление дополнительных уровней в модель атома водорода и учёт тонкой структуры

слабо влияет на эффект нестационарности вопреки утверждению работ Де и др. [43] [22] .

В **параграфе 2.3.2** выяснилось, что на время релаксации ударные процессы влияют только в самом начале фотосферной фазы, уменьшая его.

В **параграфе 2.3.4** мы рассмотрели эволюцию времени релаксации для кинетической системы ( $M_5$  в таблице 2) с учётом ударных процессов, 10-ти уровней в атоме водорода и металлических примесей. Также учитывалось селективное поглощение  $L\alpha$  фотонов в линиях металлов (например, Fe II). Обилие металлов в оболочке сверхновой – важный фактор, влияющий на выраженность эффекта нестационарности. Наличие примесей приводит к уменьшению времени релаксации. Мы первоначально подтверждаем это аналитически (см. ур. 2.35, 2.36), а потом численно, что можно наблюдать на рисунке 2.5 диссертационной работы. Здесь на рисунке 2 приведены только две кривые из полного графика. Модели  $M_5$  на рисунке 2 соответствует жирная сплошная линия. На отклонение сплошной кривой от тонкой штриховой в первые 5 дней фазы плато влияют удары. Далее в течение ещё 25 дней кривая модели  $M_5$ , как было показано аналитически (см. ур. 2.35) проходит где-то на порядок ниже, чем чёрная кривая чисто водородной безударной модели Н. Начиная с 50-го дня на эволюцию времени релаксации начинают значительно влиять свободные электроны (см. ур. 2.36). В соответствии с главой 1, приближение интенсивности окружающего жёсткого непрерывного излучения к оптически тонкому пределу тоже уменьшает время установления статистического равновесия. Но даже если учесть все перечисленные факторы, время релаксации остаётся намного бóльшим, чем характерное время изменения параметров оболочки, и следовательно, ни один из этих факторов не отменяет эффект нестационарной ионизации. Однако, чтобы однозначно ответить на вопрос, важен ли эффект нестационарности для любой системы, требуется проверить критерий статистической равновесности на полной кинетической системе или воспользоваться оценочной формулой (2.36) для времени релаксации.

В конце **параграфа 2.3.4** мы построили спектры SN 1999em на 35-й день после взрыва, где подтвердили важность эффекта для  $H\alpha$ , и его отсутствие для триплета Ca II. Также мы показали возможность

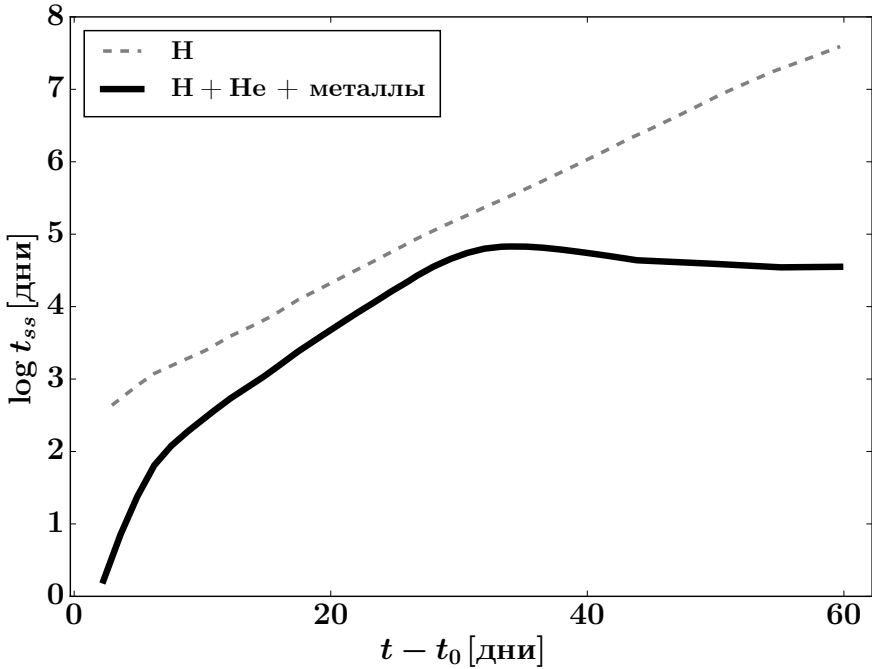


Рис. 2 — Иллюстрация численного расчёта времён релаксации для двух моделей. Тонка штриховая линия соответствует чисто водородной безударной модели из главы 1. Жирная сплошная линия – это модель с учётом ударов, 10-ти уровней в атоме водорода и металлических примесей. По оси абсцисс физическое время, где  $t_0=20$  дней – начало фотосферной фазы. Результат диссертанта из работы [A6].

уменьшения времени релаксации за счёт снятия запрета на однофотонный переход  $2s \rightarrow 1s$  при учёте коллективного электрического поля. Но снова заметим, что этого всё равно недостаточно для полной отмены эффекта нестационарности.

В параграфе 2.4 мы показали, что эффект нестационарности в случае SN II<sub>n</sub> уменьшает силу узкой компоненты H $\alpha$  в дни роста кривой блеска, в отличие от проявления этого эффекта для обычной SN II<sub>P</sub>, где наоборот наблюдается усиление.

Глава 3 посвящена применению нового метода для определения расстояний до SN II<sub>n</sub> методом плотного слоя (Dense Shell Method –



DSM). Приведены формулы для вычисления фотометрических космологических расстояний и иллюстрируется работоспособность метода на примере SN 2009ip. Фотометрическое расстояние, полученное методом DSM до SN 2009ip, хорошо согласуется с известным расстоянием до родительской галактики NGC 725. Наши результаты по SN 2009ip подтверждают вывод о том, что SNe II<sub>n</sub> могут быть использованы в космологии как *первичные индикаторы расстояния* с новым методом DSM.

В **заключении** суммированы **основные** результаты диссертации, выносимые на защиту.

В **приложении А** дано краткое описание радиационно-гидродинамического кода STELLA.

### Публикации автора по теме диссертации

- A1. *Blinnikov S. I., Potashov M. S., Baklanov P. V., Dolgov A. D.* Direct determination of the hubble parameter using type II<sub>n</sub> supernovae // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2012. — Aug. — Vol. 96, no. 3. — P. 167—171.
- A2. *Potashov M. S., Blinnikov S. I., Baklanov P. V., Dolgov A. D.* Direct distance measurements to SN 2009ip // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2013. — Feb. — Vol. 431, no. 1. — P. L98—L101.
- A3. *Бакланов П. В., Блинников С. И., Поташов М. Ш., Долгов А. Д.* Изучение сверхновых, важных для космологии // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2013. — Т. 98, № 7. — С. 489.
- A4. *Поташов М. Ш., Блинников С. И., Утробин В. П.* Нестационарная ионизация в оболочках сверхновых типа II на фотосферной фазе // Письма в астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. — 2017. — Т. 43, № 01. — С. 40—54.
- A5. *Поташов М. Ш., Блинников С. И.* Аналитическая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа II на фотосферной фазе // Письма в астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. — 2019. — Т. 45, № 05. — С. 320—325.

- A6. *Potashov M. S., Yudin A. V.* A simple model of time-dependent ionization in Type IIP supernova envelopes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — Jan. — Vol. 491, no. 2. — P. 2674—2687.

## Список литературы

1. *Kirshner R. P., Kwan J.* Distances to extragalactic supernovae // *The Astrophysical Journal*. — 1974. — Oct. — Vol. 193. — P. 27.
2. *Baron E., Nugent P. E., Branch D., Hauschildt P. H.* Type IIP Supernovae as Cosmological Probes: A Spectral-fitting Expanding Atmosphere Model Distance to SN 1999em // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — Dec. — Vol. 616, no. 2. — P. L91—L94.
3. *Riess A. G., Casertano S., Yuan W., [et al.].* Milky Way Cepheid Standards for Measuring Cosmic Distances and Application to Gaia DR2: Implications for the Hubble Constant // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — Apr. — Vol. 861, no. 2. — P. 126.
4. *Mörtsell E., Dhawan S.* Does the Hubble constant tension call for new physics? // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2018. — Sept. — Vol. 2018, no. 09. — P. 025—025.
5. *Ezquiaga J. M., Zumalacárregui M.* Dark Energy in Light of Multi-Messenger Gravitational-Wave Astronomy // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2018. — Dec. — Vol. 5. — P. 1—36.
6. *Taubenberger S., Suyu S. H., Komatsu E., [et al.].* The Hubble Constant determined through an inverse distance ladder including quasar time delays and Type Ia supernovae // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Aug. — Vol. 628. — P. L7.
7. *Axelrod T. S.* Late time optical spectra from the Ni-56 model for Type 1 supernovae : PhD thesis / Axelrod T. S. — 1980.
8. *Clayton D. D., Leising M. D., The L.-S., [et al.].* The Co-57 abundance in SN 1987A // *The Astrophysical Journal*. — 1992. — Nov. — Vol. 399. — P. L141.
9. *Fransson C., Kozma C.* The freeze-out phase of SN 1987A - Implications for the light curve // *The Astrophysical Journal*. — 1993. — May. — Vol. 408. — P. L25.

10. *Kozma C., Fransson C.* Late Spectral Evolution of SN 1987A. I. Temperature and Ionization // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — Apr. — Vol. 496, no. 2. — P. 946—966.
11. *Kozma C., Fransson C.* Late Spectral Evolution of SN 1987A. II. Line Emission // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — Apr. — Vol. 497, no. 1. — P. 431—457.
12. *Jerkstrand A., Fransson C., Kozma C.* The 44 Ti-powered spectrum of SN 1987A // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — June. — Vol. 530. — A45.
13. *Kirshner R. P., Kwan J.* The envelopes of type II supernovae. // *The Astrophysical Journal*. — 1975. — Apr. — Vol. 197. — P. 415.
14. *Chugai N. N.* Pre-Discovery Hard X- and Gamma-Ray Luminosity of SN 1987A from Optical Spectra // *Supernovae*. — New York, NY : Springer New York, 1991. — P. 286—290.
15. *Utrobin V. P., Chugai N. N.* Ionization freeze-out and hydrogen excitation in the SN IIP atmosphere // *Astronomy Letters*. — 2002. — June. — Vol. 28, no. 6. — P. 386—392.
16. *Utrobin V. P., Chugai N. N.* Strong effects of time-dependent ionization in early SN 1987A // *Astronomy and Astrophysics*. — 2005. — Jan. — Vol. 441, no. 1. — P. 271—281.
17. *Utrobin V. P.* An optimal hydrodynamic model for the normal type IIP supernova 1999em // *Astronomy and Astrophysics*. — 2007. — Jan. — Vol. 461, no. 1. — P. 233—251.
18. *Dessart L., Blondin S., Brown P. J., [et al.].* Using Quantitative Spectroscopic Analysis to Determine the Properties and Distances of Type II Plateau Supernovae: SN 2005cs and SN 2006bp // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Mar. — Vol. 675, no. 1. — P. 644—669.
19. *Dessart L., Hillier D. J.* Time-dependent effects in photospheric-phase Type II supernova spectra // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — Dec. — Vol. 383, no. 1. — P. 57—74.
20. *Dessart L., Hillier D. J.* Supernova radiative-transfer modelling: a new approach using non-local thermodynamic equilibrium and full time dependence // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Apr. — Vol. 405. — P. 23.

21. *Hillier D. J., Dessart L.* Time-dependent radiative transfer calculations for supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — July. — Vol. 424, no. 1. — P. 252–271.
22. *De S., Baron E., Hauschildt P. H.* On the hydrogen recombination time in Type II supernova atmospheres // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Jan. — Vol. 401, no. 3. — P. 2081–2092.
23. *Inserra C., Baron E., Turatto M.* Quantitative photospheric spectral analysis of the Type IIP supernova 2007od // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — May. — Vol. 422, no. 2. — P. 1178–1185.
24. *Mazzali P. A., Lucy L. B.* The application of Monte Carlo methods to the synthesis of early-time supernovae spectra // *Astronomy and Astrophysics*. — 1993. — Vol. 279. — P. 447–456.
25. *Lucy L. B.* Improved Monte Carlo techniques for the spectral synthesis of supernovae // *Astronomy and Astrophysics*. — 1999.
26. *Lucy L.* An iterative technique for solving equations of statistical equilibrium // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2001. — Sept. — Vol. 326, no. 1. — P. 95–101.
27. *Lucy L. B.* Monte Carlo transition probabilities // *Astronomy & Astrophysics*. — 2002. — Mar. — Vol. 384, no. 2. — P. 725–735.
28. *Lucy L. B.* Monte Carlo transition probabilities. II. // *Astronomy & Astrophysics*. — 2003. — May. — Vol. 403, no. 1. — P. 261–275.
29. *Kasen D., Thomas R. C., Nugent P.* Time-dependent Monte Carlo Radiative Transfer Calculations for Three-dimensional Supernova Spectra, Light Curves, and Polarization // *The Astrophysical Journal*. — 2006. — Nov. — Vol. 651, no. 1. — P. 366–380.
30. *Kromer M., Sim S. A.* Time-dependent three-dimensional spectrum synthesis for Type Ia supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — Oct. — Vol. 398, no. 4. — P. 1809–1826.
31. *Vogl C., Sim S. A., Noebauer U. M., [et al.].* Spectral modeling of type II supernovae // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — Jan. — Vol. 621. — A29.

32. *Kerzendorf W. E., Sim S. A.* A spectral synthesis code for rapid modelling of supernovae // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — Apr. — Vol. 440, no. 1. — P. 387–404.
33. *Bartel N., Bietenholz M. F., Rupen M. P., Dwarkadas V. V.* SN 1993J VLBI. IV. A Geometric Distance to M81 with the Expanding Shock Front Method // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — Oct. — Vol. 668, no. 2. — P. 924–940.
34. *Drake A. J., Djorgovski S. G., Prieto J. L., [et al.]*. Discovery of the extremely energetic supernova 2008fz // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Aug. — Vol. 718, no. 2. — P. L127–L131.
35. *Moriya T. J., Sorokina E. I., Chevalier R. A.* Superluminous supernovae // *Space Science Reviews*. — 2018. — Mar. — Vol. 214, no. 2. — P. 37.
36. *Cooke J.* Detecting  $z > 2$  Type II<sub>n</sub> Supernovae // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — Apr. — Vol. 677, no. 1. — P. 137–145.
37. *Cooke J., Sullivan M., Barton E. J., [et al.]*. Type II<sub>n</sub> supernovae at redshift  $z \approx 2$  from archival data // *Nature*. — 2009. — July. — Vol. 460, no. 7252. — P. 237–239.
38. *Moriya T. J., Blinnikov S. I., Tominaga N., [et al.]*. Type II<sub>n</sub> superluminous supernovae from collision of supernova ejecta and dense circumstellar medium // *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1480 / ed. by K. Umemura, M and Omukai. — Univ Tsukuba, Ctr Computat Sci; Kyoto Univ, Yukawa Inst Theoret Phys; Univ Tokyo, Kavli Inst Phys & Math Universe; Japan Soc Promot Sci. 2012. — P. 391–393. — (AIP Conference Proceedings).
39. *Cooke J., Sullivan M., Gal-Yam A., [et al.]*. Superluminous supernovae at redshifts of 2.05 and 3.90 // *Nature*. — 2012. — Nov. — Vol. 491, no. 7423. — P. 228–231.
40. *Abbott T., Cooke J., Curtin C., [et al.]*. Superluminous Supernovae at High Redshift // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. — 2017. — Mar. — Vol. 34. — e012.

41. *Curtin C., Cooke J., Moriya T. J., [et al.].* First Release of High-redshift Superluminous Supernovae from the Subaru HIgh-Z SUpernova CAmpaign (SHIZUCA). II. Spectroscopic Properties // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2019. — Mar. — Vol. 241, no. 2. — P. 17.
42. *Moriya T. J., Tanaka M., Yasuda N., [et al.].* First Release of High-Redshift Superluminous Supernovae from the Subaru HIgh- Z SUpernova CAmpaign (SHIZUCA). I. Photometric Properties // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2019. — Mar. — Vol. 241, no. 2. — P. 16.
43. *De S., Baron E., Hauschildt P. H.* Hydrogen recombination with multilevel atoms // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2010. — СЕНТ. — Т. 407, № 1. — С. 658—668.

*Поташов Марат Шамилович*

Эффекты неравновесности и нестационарности  
в оболочках сверхновых

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 \_\_\_\_\_

