На правах рукописи

### Землянуха Петр Михайлович

# Свойства областей образования массивных звезд и звездных скоплений на различных масштабах

## Специальность 1.3.1. — «Физика космоса, астрономия»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, стар- ший научный сотрудник Зинченко Игорь Иванович
Официальные оппоненты:	Васильев Евгений Олегович, доктор физико-математических наук, лаборатория теоретической астрофизики Аст- рокосмического центра ФГБУН Физического института им. П.Н.Лебедева РАН, ведущий научный сотрудник
	Хайбрахманов Сергей Александрович, кандидат физико-математических наук, до- цент, кафедра гидроаэромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный уни- верситет», старший научный сотрудник
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Уральский федеральный уни- верситет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится 15 декабря 2023 года в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: г. Москва ул. Пятницкая, д. 48.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: г. Москва ул. Пятницкая, д. 48, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.032.01.

Автореферат разослан 25 октября 2023 года. Телефон для справок: +7(495)951-54-61.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.032.01, к.ф.-м.н.

Чупина Наталия Викторовна

#### Общая характеристика работы

Актуальность темы. Массивные звезды играют существенную роль в жизни Вселенной. Их эволюция в большей мере, чем звезд малой массы, связана с окружающим газом межзвездной среды. Массивными звездами считаются звезды классов О и В. Это относительно короткоживущие звезды, чья температура довольно высока (~10-60×10<sup>3</sup> K). Звезды образуются из газа межзвездной среды. Исторически, предполагается, что в результате развития гравитационных неустойчивостей конденсируется вещество [1]. По достижению определенной плотности конденсация образует звезду. По мере притока вещества увеличивается оптическая толщина среды, что уменьшает отвод энергии из центра, кинетическая температура газа в котором возрастает [2]. Соответственно, масса протозвездного объекта определяется начальными условиями в родительском газе. При больших массах светимость протозвезды возрастает, что, вкупе со смещением спектра излучения в ультрафиолетовую область спектра, приводит к разогреву и ионизации втекающего газа, что замедляет аккрецию, останавливает ее или приводит к движению газа от центрального источника. Как следствие, масса протозвезды в таком рассмотрении ограничена, массы наблюдаемых источников ее превосходят на порядки [2]. Очевидно, однако, что такое рассмотрение является упрощенным и природа процессов сложнее описанной выше схемы и требует как рассмотрения более сложных физических принципов так и внимательного и детального изучения наблюдательных данных.

В настоящее время рассматривается ряд факторов, которые могут стимулировать процессы образования звезд и приводить к образованию звезд большой массы: сценарий турбулентного ядра с постоянной аккрецией и монолитным коллапсом [3], конкурентной аккреции [4], глобального иерархического коллапса [5], глобального неизотопного коллапса [6] и аккреции вследствие инерциальных внешних потоков [7], набор массы вследствие ударных волн и коллапса («collect and collapse») [8]. Обсуждается роль стимулированного звездообразования [9], в которой плотные области газа могут быть дополнительно сжаты давлением возникшим вследствие нагрева ультрафиолетовым (УФ) излучением [10] или сверхзвуковыми систематическими движениям [11]. Такое разнообразие сценариев вызвано тем, что в данный момент происходит смена парадигмы понимания процессов образования звезд большой массы, что в свою очередь, вызвано инструментальными успехами последнего времени. От предположения о квазиравновесности процессов образования звезд переходят к предположениям, в которых газ молекулярного облака и массивная протозвезда/протоскопление динамически связаны [6]. Для дальнейшего понимания процессов эволюции требуются наблюдения в различных частотных диапазонах, сопоставления излучения в различных молекулярных линиях трассирующих разные области около протозвездного объекта с данными наблюдения пылевого континуума и излучения компактных ионизированных зон, совместно - на разных масштабах.

Вопрос описания стимулированного (индуцированного) звездообразования обычно обсуждается отдельно от приведенных выше сценариев. Структура наблюдаемых объектов, предполагаемая последовательность событий указывают на то, что результат образования одних протозвездных объектов мог создавать возмущения, являющиеся спусковым механизмом для образования других молодых массивных протозвездных объектов. В эти явления входят ударные волны, возникающие на границе Н II зон или высокоскоростных истечений, которые приводят к фрагментации газа (см, напр. [10]). Данный механизм подтверждается большим числом косвенных признаков (см., напр., [12; 13]). Наиболее очевидным аргументом является факт накопления массы в оболочке Н II зоны [11], которое объясняется сверхзвуковым характером расширения стенок. Фрагментация оболочки Н II зоны обсуждалась [A1], однако, молодого звёздного поколения, ассоциированного с фрагментами, в работе не зарегистрировано. Кроме того, предполагается [14], что в поле УФ излучения величина плотности газа во фрагментах будет стремится к некому критическому значению, которое, в свою очередь, со временем уменьшается. Весьма вероятно, что для образования звезд большой массы требуются условия, в которых эрозия УФ полем не так значительна.

Последнее время произошло значительное развитие в подходе к интерпретации наблюдательных данных. Оценка физических параметров объектов зачастую проводится подгоном параметров аналитической или численной модели под наблюдения, в простейшем случае, например, Гауссова профиля под спектральную линию газа межзвездной среды. Использование более сложных моделей позволяет интерпретировать более сложные данные (например, линии метанола [15]) и расширить число оцениваемых параметров. Рост доступных вычислительных мощностей позволил перейти от итеративного поиска оптимальных параметров модели при вписывании ее в наблюдаемые данные к генерации большого числа модельных прецедентов и выборе репрезентативных. Наиболее распространен метод марковских цепей по Монте-Карло [16; 17]. Данный подход, совместно с Баесовым подходом, был применен для изучения кривой вращения Галактики [18], длительных вспышек в гамма-диапазоне [19], анализа величины турбулентных движений в протопланетных дисках [20], извлечения физических параметров из них [21]. Однако, объем вычислений растет экспоненциально с числом свободных параметров, что ограничивает применимость подхода. Модельные вычисления можно ускорить с помошью экстраполяции модельных оценок искусственными нейронными сетями [21], что ограниченно применимо. Оценки, сделанные такими методами, весьма важны для понимания процессов эволюции звезд. Развитие методов статистического анализа позволяет получать доверительные оценки для каждого объекта из выборок и обзоров, другими методами трудноизвлекаемые. Подобных работ известно не много, (например, «Analysing the SEDs of protoplanetary disks with machine learning» [22]), однако подобный подход, очевидно, является следующим шагом в эпистимологии наблюдательной астрономии.

Таким образом, изучение процессов образования массивных звезд является актуальной темой современных исследований: за недавнее время выдвинут ряд теоретических сценариев образования звезд большой массы, и для их подтверждения необходимо сопоставление с наблюдаемыми явлениями.

Целью данной работы является изучение процессов образования звезд на разных пространственных масштабах (от сгустка до ядра), извлечение физических свойств газа и его кинематических характеристик и сопоставление наблюдаемых феноменов и оценок с известными сценариями образования массивных звезд.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1. Провести наблюдения выборки протозвездных ядер на телескопах IRAM 30м, Onsala 30м, VLA и других.
- 2. Разработать ряд методов обработки и анализа данных, упрощающих решение задач приведенных ниже.
- Восстановить радиальные профили физических параметров и кинематическую структуру ядра L1287 с помошью не-ЛТР моделирования переноса излучения в оптически толстых линиях и соотнести оценки параметров с предполагаемыми в сценариях эволюции.
- 4. Проанализировать распределение газа в окрестностях протозвездных объектов W42MME, S255IR NIRS3 и S255N SMA1 и сравнить его особенности с предполагаемыми сценариями эволюции газа.
- 5. Проанализировать распределение атомарного газа и особенности эволюции оболочки Н II зоны S187.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. Представлено три оригинальных алгоритма анализа спектральных карт. Предложено использовать метод k—ближайших соседей при вписывании модельных спектров в наблюдаемые, что позволяет уменьшить доверительные диапазоны оценок физических параметров. Предложено использовать статистические процедуры снижения размерности, включая метод главных компонент, благодоря чему возможно вписывание результатов моделирования переноса излучения в разных линиях в наблюдаемые спектральные карты, а также увеличить число свободных параметров модели при том же объеме вычислительных затрат на минимизацию.
- 2. В результате обзора выборки областей образования массивных звезд (~50 источников) установлено, что в большинстве источ-

ников линии HCO<sup>+</sup> и HCN (1–0) имеет значительную оптическую толщину. Показано, что излучение в линии HCO<sup>+</sup>, H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, HCN и H<sup>13</sup>CN (1–0) являются инструментом изучения крупномасштабных движений газа плотных ядер. Обнаружены признаки сжатия или расширения у источников L1287, G37.427+1.518, G77.462+1.759.

- 3. Установлено, что распределение физических параметров в ядре L1287 на масштабах порядка 0.1-1 пк может быть описано степенными функциями. Показано, что скорость сжатия газа ядра убывает по закону  $r^{-0.1}$ , что не совместимо со сценарием коллапса в режиме свободного падения, но согласуются с предположением, что в L1287 наблюдается аккреция ядра вследствие инерциальных потоков или глобального иерархического коллапса.
- 4. Представлены результаты анализа выборки массивных протозвездных источников. В источнике S255N SMA1(a&b) обнаружен квази кеплеровский тор большого размера (12000 а. е.). Выявлены признаки наличия потоков газа между окружающим веществом, тором и сгустками около протозвезд. Показано, что в области S305 наблюдается пара Н II зон, идентифицирована область фотодиссоциации около них. Выявлен признак накопления массой оболчки Н II зоны, установлено, что масса оболочки ~560 М<sub>☉</sub>. Подтверждено, что источник W42 MME является массивной протозвездой на раннем этапе эволюции, до образования ультракомпактной Н II области, характерной для звезд класса "О".
- 5. Установлено, что атомарный газ, ассоциированный с областью S187, является оболочкой Н II зоны, связан с областью фотодиссоциации и сильно фрагментирован (~100 фрагментов). Установлены физические параметры фрагментов, их медианная масса ~1.1 M<sub>☉</sub>, размеры лежат в пределах 0.03–0.23 пк. Установлено, что соотношение масса–размер для фрагментов описывается степенным законом, показатель которого (2.39±0.08) близок к таковому для дозвездных ядер и газовых структур больших масштабов. Выявлены признаки того, что звездообразование в крупных молекулярных стустках инициируется возмущениями, созданными расширением Н II зоны. Показано, что для большей части фрагментов не обнаружено ассоциированных молодых звездных объектов.

Научная новизна: Используя современные инструменты обработки интерферометрических данных, на основе комбинированных данных наблюдений на нескольких антенных решетках, с рекордным разрешением для галактических источников исследовано распределение атомарного газа в области S187 в линии атомарного нейтрального водорода. Наблюдения в линии эмиссии атомарного водорода галактических источников, в особенности оболочек Н II зон, редки и важны для изучения структуры областей фотодиссоциации. Используя информацию, извлеченую из профиля поглощения, и прибегая к авторскому методу, определены физические параметры газа оболочки, получены карты распределения оптической толщины, лучевой концентрации и спиновой температуры по источнику. Представленные наблюдения обладают наилучшим разрешением для галактических источников (8" против 30" GASKAP [23] и ~40" THOR [24]), что позволило впервые обнаружить и описать фрагментарную структуру атомарного газа. Подобная фрагментарность предполагается рядом теоретических работ [14], но наблюдательные свидетельства приводятся впервые.

В методической части работы впервые предложено использовать метод снижения размерности при регрессионном анализе моделей. Данный подход позволяет расширить число свободных параметров модели при вписывании при тех же вычислительных затратах.

Используя оригинальные авторские методы, восстановлено радиальное распределение физических параметров в ядре L1287. Исследования, в которых проводится вписывание в спектральные карты модельных карт, редки. Такие исследования позволяют получать пространственное распределение параметров модели и интерпретировать сложные физические процессы в объектах. Аналогичная задача решалась, например, для изучения свойств турбулентности в протопланетном диске [20] и вызвала бурную дискуссию о физике процессов в них. Распределения параметров газа, включая поле скоростей, в плотных ядрах является научно важной задачей астрофизики, так как позволяет оценить реализуемость различных сценариев эволюции ядра. Благодаря использованию методов снижения размерности, получены радиальные распределения физических параметров в ядре L1287, в том числе распределение скорости сжатия газа. Радиальные распределения редко приводятся в литературе, как правило приводятся распределение допплеровского смещения линии в картинной плоскости. Форма распределения предполагает доминирование механизма накопления газа ядром вследствие инерциальных потоков газа из периферии, что не совместимо с предположением о коллапсе в режиме свободного падения.

**Практическая значимость** Алгоритмы регрессионного анализа, включающие процедуры снижения размерности, используются для решения практических задач, например, астроклиматических [A2]. Алгоритмы могут использоваться при проектировании систем облучения приемной аппаратуры и для других задач оптимизации. Идеи, на которых основан алгоритм оказали влияние на другие методы статистического анализа [25–27].

Особенности, выявленные при анализе объектов S255IR, S255N и W42MME оказали влияние на последовавшие работы других авторов. Особенности дифференциации нейтрального атомарного водорода и других фракций M3C в объекте S187 важны для изучения физики областей фотодиссоциации. Профили физических параметров ядра L1287 представляют интерес как для задач физического моделирования эволюции ядер, так и для моделирования химических процессов в ядрах.

Методология и методы исследования. В исследовании использовались данные с обсерваторий IRAM 30м, Onsala 20м, VLA, SMA, ALMA и GMRT, а также ряд архивных данных. В работе используются современные методы обработки данных и их анализа, такие как CASA, MIRIAD, astropy, scikit-learn и самостоятельно разработанные автором.

Достоверность результатов обеспечивается использованием высококлассных инструментов и качеством наблюдательных данных, а также подтверждается их согласием с теоретическими представлениями об эволюции рассматриваемых объектов. Представленные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях рекомендованых ВАК, а также обсуждались на конференциях и семинарах в т. ч. международного уровня.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на конференциях:

- 1. Russian-Indian Workshop «Radio Astronomy And Star Formation».
- 2. Astrochemistry VII: Through the Cosmos from Galaxies to Planets.
- 3. YERAC 2015.
- 4. «Физика Космоса». 44, 45, 46, 47-ая Всероссийские с международным участием студенческие научные конференции.
- 5. XX, XXI и XXII научные конференции по радиофизике. ННГУ.
- 6. Всероссийская астрономическая конференция 2017 г.
- 7. Всероссийская конференция «Звездообразование и планетообразование» 2021 г.
- 8. Семинары секции «Межзвездная среда и Звездообразование» Научного совета по астрономии РАН.

**Личный вклад.** Автор участвовал в подготовке и подаче заявок на наблюдения, обработке интерферометрических данных и данных одиночной антенны, анализе наблюдений, оценке физических параметров газа и интерпретации результатов. Идеи и реализации алгоритмов также являются авторскими. Все представленные результаты получены лично автором или при его определяющем вкладе.

В работах [A1; A3] автором была проведена обработка, анализ и интерпретация данных наблюдений в радиолиниях, в т. ч. в линии H I, исключая анализ излучения метанола который проведен Салий С.В. Анализ общей структуры объекта проводился автором.

В работе [A4] вклад автора является определяющим. Соискатель является автором алгоритма, им было проведено вписывание модели, оценены параметры объекта и проведены сравнения с возможными сценариями коллапса ядра.

В работах [A5—A7] вклад автора включает обработку интерферометрических данных и комбинироване их с одиночной антенной, а также по-

лучением ряда оценок физических параметров и интерпретацией результатов.

В работах [A8—A12] автор участвовал в наблюдениях и обработке данных. В диссертации представлена авторская часть работы.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 11 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 12—в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

### Краткое содержание работы

Во **введении** представлен краткий обзор содержания диссертации, объектов исследования, описана актуальность диссертационной работы, ее цели, задачи, новизна полученных результатов, их практическая и научная значимость. Представлена информация по апробации результатов, научным публикациям по результатам исследований соискателя и его вкладе.

В **первой главе** описаны оригинальные методические подходы к анализу спектральных карт. Предлагается 3 метода для анализа спектральных карт в линиях молекул или атомов, адаптированные для особенностей наблюдений и исследовательских задач. Во **введении** обсуждается проблематика методик анализа спектральных наблюдений, предпосылки и наблюдательные особенности определившие подходы.

В ряде случаев, особенности кинематической структуры излучающего газа, различия в условиях возбуждения в объекте и зашумленность затрудняют или делают невозможным интерпретацию наблюдательных данных с помощью разложения спектра на набор гауссиан(или иные профили). Использование более сложных подходов, в которых моделируется перенос излучения в объекте является обратной задачей, сложность решения которой зависит от приближений, то есть от числа свободных параметров модели. Существует ряд методов по поиску оптимальных параметров модели (методы наименьших квадратов, дифференциальной эволюции, цепочек Маркова по Монте Карло), достоверность которых растет с их вычислительной сложностью. Вычислительная сложность также растет с числом параметров модели. При этом, астрономические наблюдения обладают рядом особенностей, которые позволяют при модификации известных методов добиваться более эффективной их работы. Методы используются в других главах диссертации.

В §1.1 представлен метод анализа спектральных карт в линиях, имеющих расщепление сверхтонкой структуры и с низким отношением сигналшум. Предложено использование метода k-ближайших соседей совместно с методом наименьших квадратов. Метод kBC в данном случае был использован для усреднения набора наблюдаемых спектров. Критерием близости является выбор наименьшего квадрата разности в наборе наблюдаемых спектров. В качестве примера рассматривается применение алгоритма для оценки допплеровской скорости газа по наблюдениям в линиях  $N_2H^+u$   $NH_3$  приналичии двух компонент в линии и оценка кинетической температуры газа по данным в линиях переходов  $NH_3$  (1,1) и (2,2).

В §1.2 представлено развитие алгоритма, предложенного в §1.1. В данном случае метод kБС предлагается использовать для выбора начальных условий метода наименьших квадратов, что сильно ускоряет сходимость последнего. Предполагается, что для нескольких точек карты параметры известны априорно. В соседние точки вписывается оценки, сделанные с помошью метода наименьших квадратов, результат и наблюдаемый спектр в ключевую выборку метода кБС.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1. Оценить параметры модели в отдельных точках априори (Например, спиновую температуру и оптическую толщину из спектров поглощения).
- Перейти к точкам, близлежащим с точками с априорными оценками. Вписать наблюдаемый спектр модель в этих точках, взяв с начальные условия для вписывания и из предыдущего шага. Добавить наблюдаемый спектр и параметры, полученные в результате вписывания в массив прецедентов.
- Вписать в соседние точки не подвергавшиеся оценке модельные профили с начальными условиями вычисленными с помощью метода kBC из массива прецедентов.
- 4. Повторить предыдущий шаг пока вся карта не будет покрыта.
- 5. Повторить предыдущие два шага до тех пор пока результаты вписывания не сойдутся.

Подобный алгоритм позволяет изучать спектральные карты в источниках со сложной кинематиечской структурой и несколькими перекрывающимися компонентами линии. Алгоритм предлагается использовать для анализа в линии 21-см, априорные оценки при этом извлекаются из профилей поглощения независимо от метода.

В §1.3 представлено описание алгоритма для поиска вероятных значений параметров моделей с коррелированными параметрами. Описываются методические особенности, требуемые для проведения подобного анализа. Отличие алгоритма от §1.1 и §1.2 заключается в том, что анализируются не некоторые точки отдельно, а во всей карте сразу. В этом случае в каждой точке наблюдений моделируется спектр, который затем сопоставляется с наблюдаемым. Алгоритм аналогичен цепочкам Маркова по методу Монте Карло, однако предлагается использовать методы снижения размерности для уменьшения числа итераций. Метод предполагает заполнение пространства параметров ансамблем прецедентов, вычисление модельных спектров для ансамбля и оценку вероятных значений параметров. Мы используем заполнение регулярными сетками, деформированными в направлении наибольшей ковариации ранее рассчитанного облака параметров, ограниченных доверительным диапазоном. Предлагается анализ угловых диаграмм для функции невязки. Обсуждается критерий выбора числа компонент, в достаточной мере представляющих данные и ориентированный на задачи сэмплирования. В разделе рассматривается проблема нормировки при использовании метода главных компонент в контексте задачи.

Благодаря снижению размерности модели на несколько порядков ускоряется процесс заполнения пространства прецедентов. Методика предлагается для анализа пространственных моделей, что предполагает одновременный подгон модельных профилей под спектр во всей карте. В частности, предлагается использовать алгоритм для анализа распределения физических параметров в ядрах со структурой близкой к сферически-симметричной.

Вторая глава посвящена исследованию оболочки Н II зоны S187. В главе представлен комплексный анализ данных в диапазоне от ИК до дециметровых радиоволн для выявления особенностей морфологии и физических свойств наблюдаемого объекта. Наиболее ценными данными из представленных являются наблюдения в линии 21-см, которые при комбинировании позволили достичь разрешения в 8″ для линии эмиссии с СКО 3К, что позволило обнаружить сильную фрагментацию атомарного газа в оболочке. Во введении приведен краткий обзор литературы, суммирующей изучение нейтрального атомарного водорода в в областях фотодиссоциации (ФДО), а также характеристика исследуемого объекта и связанных с ним.

В §2.1 представлено описание наблюдательных и архивных данных, включая: радиоконтинуум (1420 МГц), линию 21-см, молекулярные линии: изотопологи СО, линии НСО<sup>+</sup> и CS, а также архивные ИК данные обсерваторий Спицера, WISE, 2MASS, SCUBA. Описаны процедуры обработки данных и параметры выходных изображений.

В §2.2 представлено описание наблюдательных феноменов и оценки потоков и размеров источников. Приведено описание структуры излучения в континууме и разных линиях.

В §2.4 представлены оценки физических параметров атомарного и молекулярного газа. Используя профиль поглощения в линии 21-см в направлении источника NVSS 012258+614815сделаны оценки оптической толщины газа, по линии излучения - спиновой температуры. Используя метод, из §1.2 сделана оценка распределения оптической толщины и спиновой температуры по источнику. Вычислена полная масса атомарного водорода (260±56  ${\rm M}_{\odot}$ ). Обнаружена фрагментарныая структура атомарного газа, оценены физические параметры отдельных фрагментов. Установлено, что соотношение масса-размер находится в тесной связи ( $R^2=0.94$ ) по степенному закону с индексом  $k=2.39\pm.06$ Оценена масса молекулярной фракции оболочки и отдельных ядер, их вириальные параметры.

В §2.5 представлено обсуждение наблюдательных феноменов и физических оценок. Представлен анализ крупномасштабной структуры, показано, что, вероятно, область S187 находится на пересечении пузырей, трассируемых в H I и  $^{12}$ CO. Описана структура оболочки по интерпретации многоволновых наблюдений. Обсуждается природа фрагментов, которая, вероятно, связана со сверхзвуковыми движениями в оболочке и турбулентными эффектами или же с неоднородностями, которые могут формироваться вследствие неравновесных процессов в поле УФ излучения. Также, описаны детали оболочки и особенности молекулярных ядер, в результате чего делается вывод о том, что они находятся в одной эволюционной цепочке, но на разных этапах. Описывается структура области ФДО, а также ее сходства и различия со структурой перехода газа из молекулярной фазы в атомарную и ионизированную.

В §2.6 приведены основные результаты и выводы.

**Третья глава** посвящена обзору протозвзедных ядер. Глава состоит из четырех разделов. В §3.1 дается сводка наблюдательных данных используемых для анализа объектов. В §3.2 представлено описание результатов наблюдений. Обсуждение результатов и основные выводы представлены в разделах §3.3 и §3.4, соответственно.

Четвертая глава посвящена детальному рассмотрению физических свойств ядра L1287, в частности - профилю систематической скорости движения газа, т.е. зависимости скорости сжатия газа от центра ядра. Во введении представлен краткий обзор возможных сценариев эволюции ядер и методологии исследования.

В §4.1 представлено описание источника. В §4.2 представлены оценка физических параметров источника, его морфология, а также процедура применения метода из §1.3. В §4.3 представлено обсуждение результатов применения метода, сделанных оценок и их сопоставление с предполагаемыми профилями параметров в теоретиечских моделях. Показано, что наиболее вероятный сценарий глобального сжатия ядра. В §4.4 приведены основные результаты.

**Пятая глава** посвящена анализу взаимодействия протозвездных объектов S255N SMA1, S255IR NIRS3, W42-MME и S305 VM2&VM4 и их окружения. Проанализирована динамика газа посредством интерпретации кубов данных в ряде молекулярных линий, оценены физические параметры газа около протозвездных объектов на различных пространственных масштабах. Во **введении** представлен обзор литературы по сценариям образования массивных протозвездных объектов.

В §5.1 представлено описание особенностей взаимодействия истечений из S255IR NIRS3 и S255IR SMA2 и газа ядра. Представлено описание наблюдательных данных, их обработки, в т.ч. комбинирования интерферометрических данных и данных одиночной антенны. Представлено описание наблюдательных феноменов - морфологии наблюдаемых структур, их сопоставление с опубликованными в других работах. Представлено обсуждение наблюдаемых структур, в частности особенности простанственно-кинематического распределения газа по данным в крыльях линии CO(3–2). Показано наличие полостей на протяжении всего пути истечения.

В §5.2 представлен комплексный анализ ядра S255N по данным многочастотных наблюдений и комбинирования данных одиночной антенны и интерферометра. Представлено описание наблюдений и методов обработки данных, их интерпретация. Для анализа физических параметров ядра и его структуры использовался метод, представленный в §1.2. Показана фрагментарность ядра, в центральной области которого обнаружен протозвездный тор с признаками квазикеплеровского вращения. Показано, что оценка массы центрального сгустка близка к приведённой в литературе. Представлено обсуждение наблюдаемых феноменов и сделанных оценок, приведены промежуточные выводы.

В §5.3 и §5.4 проедставлен анализ источников W42MME и S305. Представлено описание наблюдательных данных, методик обработки данных и наблюдаемых структур. Представлено обсуждение наблюдательных феноменов. Сделаны некоторые оценки, необходимые для понимания особенностей эволюции объектов, и выводы, основанные на особенности морфологии и сделанных оценках.

В §5.5 представлены основные результаты главы.

В <u>заключении</u> приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

- 1. Предложено **три** оригинальных алгоритма анализа астрономических данных, которые апробированы в рамках исследований.
  - а) Алгоритм усреднения наблюдаемых спектров по методу k-ближайших соседей, что позволяет уточнить оценки при анализе распределения доплеровских смещений линий или распределения физических параметров объекта.
  - б) Алгоритм анализа объектов в линиях с множеством кинематических компонент для итеративного анализа карт на основе метода k-ближайших соседей и метода градиентного спуска, а также экстраполяции внешних оценок.
  - в) Алгоритм анализа вероятностных распределений физических параметров с помощью сопоставления ансамбля модельных расчетов и набора наблюдаемых спектральных карт. Алгоритм использует метод снижения размерности при семплировании, что, насколько нам известно, ранее не использовалось. Соискателем также предложены оригинальные методы анализа результатов семплирования.
- Представлены результаты наблюдений с высоким угловым разрешением (8 " или 0.06 пк) излучения в линии Н I в направлении области Н II S187. Оценены физические параметры атомарного га-

за в направлении источника NVSS 012258+614815 и всей оболочки S187. Масса атомарного газа, связанного с S187, оценивается в 260±56 M<sub>☉</sub>. Медианное значение спиновой температуры оболочки оценено в ~50 К. Характерный размер оболочки ~4 пк, толщина атомарного слоя варьируется в диапазоне от 0.2 пк до 4 пк. Толщина наименьшая в направлении где атомарная фракция ограничена плотной стенкой, наибольшая - в направлении где стенок не сформировано и излучение покидает область Н II. Форма распределения атомарного газа близка к сферической, наблюдаются признаки расширения. Излучение в линии 21-см, пространственно коррелирует с излучением на 12 мкм WISE и трассирует результаты взаимодействия между зоной Н II и молекулярным облаком. Атомарная оболочка является крайне неоднородной и содержит в себе ~100 фрагментов, медианная масса которых равна  $\sim 1.1~M_{\odot}$ . Сумма масс фрагментов больше  $\sim 114~M_{\odot}$  что близко к полной массе оболочки. Размеры фрагментов варьируются от 0.03 до 0.23 пк. Масса и размер фрагментов сильно коррелированны, с зависимостью близкой к степенной с индексом в 2.39±0.08. Эта оценка близка к аналогичным оценкам для молекулярных облаков и предполагает, что они являются дозвездными ядрами, разрушаемыми полем УФ излучения. Два молекулярных ядра (S187 NE и SE) выделяются в молекулярной части оболочки Н II зоны S187. Они имеют близкие массы ( $\sim 1200 \text{ M}_{\odot}$  и  $\sim 900 \text{ M}_{\odot}$ , соответственно), но имеют различную структуру. В S187 SE содержится некоторое количество молодых звездных объектов, источник IRAS, истечения, а также ряд других признаков происходящих процессов звездообразования, что является аргументом того, что ядро испытало взаимодействие с зоной Н II. Никаких признаков ударных волн или процессов фотодиссоциации на границе ядра не обнаруживается, что ожидается при контакте с Н II зоной. Ядро S187 NE имеет такие признаки, но область контакта мала. Никаких признаков процессов образования звезд, напротив, в ядре не обнаружено. Три молодых звездных объекта присутствуют в области контакта с атомарной оболочкой. Структура излучения в различных молекулярных линиях предполагает нагрев и увеличение турбулентных движений ближе к зоне контакта. Периферия ядра, находящаяся в направлении Н II области, разрушена, вероятно, полем излучения.

3. Результаты наблюдений 50 протозвездных ядер в ряде линий основных и дейтерированных изотопологов молекул. Для части из них изучены карты в наиболее сильных линиях. Проведен анализ состава и морфологии отдельных источников. Показано, что линии молекул DCO<sup>+</sup> обнаружены в 16 источниках из 50 наблюдавшихся, DCN – в 17 из 50, DNC – в 15 из 47, N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> – в 2 из 47. Карты источ-

ников G121.28+0.65, G34.403+0.233, G37.427+1.518, G77.462+1.759 и G99.982+4.17 в различных молекулярных линиях показывают, что объекты обладают плотными ядрами, внутри которых находятся молодые звездные объекты. В ядре G77.462+1.759 обнаружены признаки вращения. G192.76+00.10 имеет сложную, ветвящуюся структуру. Обнаружены плотные сгустки, в направлении которых наблюдаются погруженные ИК источники, ассоциируемые с протозвездами. Кинетическая температура газа измерена в диапазоне 15-40 К с медианой в 23 К.

- 4. Проведена оценка физических параметров протозвездного ядра L1287 с помощью вписывания модельных карт в линиях  $HCO^+(1-0), H^{13}CO^+(1-0), HCN(1-0)$  и  $H^{13}CN(1-0)$  в наблюдаемые карты. Рассчитаны оптимальные значения параметров сферически-симметричной модели и определены их доверительные диапазоны. Получено, что плотность в ядре L1287 убывает с расстоянием от центра, как  $r^{-1.7}$ , а турбулентная скорость и скорость сжатия убывают, как  $r^{-0.4}$  и  $r^{-0.1}$ , соответственно. Абсолютное значение степенного индекса радиального профиля скорости сжатия с учетом вероятной погрешности ниже значения 0.5, ожидаемого в случае коллапса газа на протозвезду в режиме свободного падения, что является указанием на существование глобального сжатия ядра L1287, предсказываемого в предположении иерархического коллапса ядра.
- Показано, что высокоскоростное истечение из источников SMA1 и SMA2 ядра S255IR оказывает сильное влияние на структуру ядра. Показаны признауи химической дифференциации газа.
- 6. В области S255N обнаружен газовый тор, вращающийся вокруг источника SMA1, с внутренним и внешним радиусом R<sub>in</sub> ≈ 8000 а.е. и R<sub>out</sub> ≈ 12000 а.е., соответственно. Профиль вращения характерен для кеплеровского закона движения с центральной массой в ~ 8.5/sin<sup>2</sup>(i) M<sub>☉</sub>, где i угол наклона к наблюдателю. В центре тора находятся два сгустка, аккреция на них предполагается что идет через тор.
- 7. Показано, что ядра S255IR и S255N крайне неоднородны, в них отсутствуют признаки однородного коллапса.
- В области S305 наблюдается пара Н II зон, область ФДО около них имеет существенную массу (~500 M<sub>☉</sub>), что предполагает сценарий "collect and collapse". Показаны признаки индуцированного образования одной зоной другой.
- В области W42 около источника W42MME отсутствует излучение в радиоконтинууме, что предполагает отсутствие UC H II зоны и достаточно ранний этап эволюции протозвездного источника.

Основные физические результаты и выводы сделаны на основе оригинальных алгоритмов, предложенных автором. В рамках работы исследован ряд источников, в дальнейшем предполагается расширить список. Автором приведен анализ фрагментированности атомарной фракции оболочки Н II зоны. Дальнейшее исследование аналогичных объектов позволит сделать выводы о том, насколько данный феномен типичен. Анализ большего числа протозвездных ядер позволит выявить реализуемость различных сценариев эволюции ядер и возможную связь с их физическими параметрами. Требуется количественно сравнить вычислительную эффективность алгоритмов, включающих процедуры снижения размерности с другими методами, в особенности - с методом цепочек Маркова Монте Карло. Кроме того, линейный метод снижения размерности планируется дополнить нелинейными подходами. Планируется также расширить применение метода для более сложных моделей переноса излучения и расширить типы анализируемых объектов.

#### Публикации автора по теме диссертации

- A1. Fragmented atomic shell around S187 H II region and its interaction with molecular and ionized gas / P. Zemlyanukha, I. I. Zinchenko, E. Dombek, L. E. Pirogov, A. Topchieva, G. Joncas, L. K. Dewangan, D. K. Ojha, S. K. Ghosh // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. Vol. 515, no. 2. P. 2445—2463.
- A2. Machine learning methods for Precipitable Water Vapor estimation by radiometric data in millimetre wavelength / G. Bubnov, P. Zemlyanukha, E. Dombek, V. Vdovin // Journal of Physics Conference Series. Vol. 1. — 2021. — P. 6. — (Journal of Physics Conference Series).
- А3. Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах / П. М. Землянуха, И. И. Зинченко, С. В. Салий, О. Л. Рябухина, Ш. Ю. Лью // Астрономический Журнал. 2018. Т. 95, № 5. С. 344—365.
- А4. Пирогов, Л. Е. Использование метода главных компонент для оценки параметров плотношо ядра L1287 при вписывании модельных спектральных карт в наблюдаемые / Л. Е. Пирогов, П. М. Землянуха // Астрономический Журнал. — 2021. — Т. 98, № 2. — С. 105—115.
- A5. The Disk-Outflow System around the Rare Young O-type Protostar W42-MME / L. K. Dewangan, I. I. Zinchenko, P. M. Zemlyanukha, S. .-. Liu, Y. .-. Su, S. E. Kurtz, D. K. Ojha, A. G. Pazukhin, Y. D. Mayya // The Astrophysical Journal. 2022. Vol. 925, no. 1. P. 41.

- A6. Probing Gas Kinematics and PDR Structure around O-type Stars in the Sh 2-305 H II Region / N. K. Bhadari, L. K. Dewangan, P. M. Zemlyanukha, D. K. Ojha, I. I. Zinchenko, S. Sharma // The Astrophysical Journal. — 2021. — Vol. 922, no. 2. — P. 12.
- A7. The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation / I. Zinchenko, S. .-. Liu, Y. .-. Su, S. V. Salii, A. M. Sobolev, P. Zemlyanukha, H. Beuther, D. K. Ojha, M. R. Samal, Y. Wang // The Astrophysical Journal. 2015. Vol. 810, no. 1. P. 18.
- A8. Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex / O. L. Ryabukhina, I. I. Zinchenko, M. R. Samal, P. M. Zemlyanukha, D. A. Ladeyschikov, A. M. Sobolev, C. Henkel, D. K. Ojha // Research in Astronomy and Astrophysics. 2018. Vol. 18, no. 8. P. 095.
- А9. Обзор областей образования массовных звезд в линиях дейтерированных молекул / Е. А. Трофимова, И. И. Зинченко, П. М. Землянуха, М. Томассон // Астрономический Журнал. — 2020. — Т. 97, № 3. — С. 225—241.
- А10. Многочастотные исследования массивных ядер со сложной пространственно-кинематической структурой / Л. Е. Пирогов, В. М. Шульга, И. И. Зинченко, П. М. Землянуха, А. Н. Патока, М. Томассон // Астрономический Журнал. — 2016. — Т. 93, № 10. — С. 871—891.
- A11. Deuterated molecules in regions of high-mass star formation / I. I. Zinchenko, A. G. Pazukhin, E. A. Trofimova, P. M. Zemlyanukha, C. Henkel, M. Thomasson // Proceedings of Science. 2022. Vol. MUTO2022. P. 038.
- A12. Multiline observations of S255IR with ALMA / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, P. Zemlyanukha // IAU Symposium. — 2018. — Vol. 332. — P. 270—273.

#### Список литературы

- 1. Jeans, J. H. The Stability of a Spherical Nebula / J. H. Jeans // Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A. 1902. T. 199. C. 1–53.
- 2. Spitzer, L. Physical processes in the interstellar medium / L. Spitzer. 1978.
- McKee, C. F. The Formation of Massive Stars from Turbulent Cores / C. F. McKee, J. C. Tan // The Astrophysical Journal. – 2003. – T. 585, № 2. – C. 850–871.

- Competitive accretion in embedded stellar clusters / I. A. Bonnell, M. R. Bate, C. J. Clarke, J. E. Pringle // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2001. - T. 323, № 4. - C. 785-794.
- Global hierarchical collapse in molecular clouds. Towards a comprehensive scenario / E. Vázquez-Semadeni, A. Palau, J. Ballesteros-Paredes, G. C. Gómez, M. Zamora-Avilés // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2019. - T. 490, № 3. - C. 3061-3097.
- 6. Motte, F. High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way / F. Motte, S. Bontemps, F. Louvet // ARA&A. 2018. T. 56. C. 41–82.
- The Origin of Massive Stars: The Inertial-inflow Model / P. Padoan, L. Pan, M. Juvela, T. Haugbølle, Å. Nordlund // The Astrophysical Journal. - 2020. - T. 900, № 1. - C. 82.
- The Preferential Formation of High-Mass Stars in Shocked Interstellar Gas Layers / A. P. Whitworth, A. S. Bhattal, S. J. Chapman, M. J. Disney, J. A. Turner // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 1994. - T. 268. - C. 291.
- 9. Searching for signs of triggered star formation toward IC 1848 / M. A. Thompson, G. J. White, L. K. Morgan, J. Miao, C. V. M. Fridlund, M. Huldtgren-White // A&A. - 2004. - T. 414. -C. 1017-1041.
- Lefloch, B. Cometary globules I. Formation, evolution and morphology. / B. Lefloch, B. Lazareff // A&A. - 1994. - T. 289. -C. 559-578.
- Deharveng, L. Massive Star Formation Triggered by Galactic H II Regions / L. Deharveng, A. Zavagno // Massive Star Formation: Observations Confront Theory. T. 387 / под ред. H. Beuther, H. Linz, T. Henning. — 2008. — С. 338. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- Cyganowski, C. J. Evidence for a Massive Protocluster in S255N / C. J. Cyganowski, C. L. Brogan, T. R. Hunter // AJ. - 2007. -T. 134. - C. 346-358.
- Kang, S.-J. IRAS 01202+6133: A Possible Case of Protostellar Collapse Triggered by a Small H II Region / S.-J. Kang, C. R. Kerton // The Astrophysical Journal. - 2012. - T. 759, № 1. - C. 13.
- Gorti, U. Photoevaporation of Clumps in Photodissociation Regions / U. Gorti, D. Hollenbach // The Astrophysical Journal. – 2002. – T. 573, № 1. – C. 215–237.

- The methanol emission in the J<sub>1</sub>- J<sub>0</sub> A<sup>-+</sup> line series as a tracer of specific physical conditions in high-mass star-forming regions / S. V. Salii, I. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, A. M. Sobolev, A. Aberfelds, Y.-N. Su // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. T. 512, № 3. C. 3215-3229.
- 16. Speagle, J. S. A Conceptual Introduction to Markov Chain Monte Carlo Methods / J. S. Speagle // arXiv e-prints. 2019. arXiv:1909.12313.
- emcee: The MCMC Hammer / D. Foreman-Mackey, D. W. Hogg, D. Lang, J. Goodman // PASP. - 2013. - T. 125, № 925. - C. 306.
- Gaussian processes, median statistics, Milky Way rotation curves / H. Yu, A. Singal, J. Peyton, S. Crandall, B. Ratra // Ap&SS. – 2020. – T. 365, № 8. – C. 146.
- Bryant, C. M. How unbiased statistical methods lead to biased scientific discoveries: A case study of the Efron-Petrosian statistic applied to the luminosity-redshift evolution of gamma-ray bursts / C. M. Bryant, J. A. Osborne, A. Shahmoradi // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — T. 504, № 3. — C. 4192—4203.
- 20. Measuring Turbulent Motion in Planet-forming Disks with ALMA: A Detection around DM Tau and Nondetections around MWC 480 and V4046 Sgr / K. Flaherty, A. M. Hughes, J. B. Simon, C. Qi, X.-N. Bai, A. Bulatek, S. M. Andrews, D. J. Wilner, Á. Kóspál // The Astrophysical Journal. — 2020. — T. 895, № 2. — C. 109.
- Modeling protoplanetary disk SEDs with artificial neural networks. Revisiting the viscous disk model and updated disk masses / Á. Ribas, C. C. Espaillat, E. Macías, L. M. Sarro // A&A. - 2020. - T. 642. -A171.
- Analysing the SEDs of protoplanetary disks with machine learning / T. Kaeufer, P. Woitke, M. Min, I. Kamp, C. Pinte // A&A. - 2023. -T. 672. - A30.
- GASKAP-The Galactic ASKAP Survey / J. M. Dickey [et al.] // PASA. - 2013. - T. 30. - e003.
- 24. The HI/OH/Recombination line survey of the inner Milky Way (THOR). Survey overview and data release 1 / H. Beuther [et al.] // A&A. -2016. T.595. A32.
- Bao, Y. Two Novel SMOTE Methods for Solving Imbalanced Classification Problems / Y. Bao, S. Yang // IEEE Access. - 2023. -T. 11. - C. 5816-5823.

- 26. Cloud Computing Storage Data Access Control Method Based on Dynamic Re-Encryption / X. Chen, D. Zeng, S. Pang, F. Jun, J. Su // Sec. and Commun. Netw. USA, 2021. T. 2021. URL: https://doi.org/10.1155/2021/4953074.
- 27. Hou, Z. Remote English Teaching Resource Sharing Based on Internet O2O Model / Z. Hou, B. Ding // Sci. Program. London, GBR, 2022. T. 2022. URL: https://doi.org/10.1155/2022/1217807.

#### Землянуха Петр Михайлович

Свойства областей образования массивных звезд и звездных скоплений на различных масштабах

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 \_\_\_\_\_