Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

На правах рукописи

### Землянуха Петр Михайлович

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

Специальность 1.3.1 Физика космоса, астрономия

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: д. ф.-м. н., с.н.с. Зинченко Игорь Иванович

Нижний Новгород — 2023

### Оглавление

Стр.

Введение								
Глава	1. Mer	годы статистического анализа спектров						
	про	тозвездных ядер	15					
1.1	Метод	, k-ближайших соседей для оценки физических						
	парам	етров газа	17					
1.2	Метод	д k-ближайших соседей для анализа карт в линии HI 2						
1.3	Алгор	Алгоритм вписывания модельных спектральных карт в						
	наблюдаемые с помощью метода главных компонент							
	1.3.1	Анализ многомерной функции ошибки методом угловых						
		диаграмм	28					
	1.3.2	Ошибка, вносимая при снижении размерности	29					
	1.3.3	Нормировка при преобразовании метода Главных						
		Компонент	31					
	1.3.4	Физическая интерпретация опорных векторов в методе						
		Главных Компонент	33					
1.4	Основ	ные результаты	34					
Глава 2	2. Обз	ор протозвездных ядер в линиях молекул						
	тра	ссеров плотного газа	35					
2.1	Обьек	ты исследования и наблюдения	36					
	2.1.1	Onsala 20м	36					
	2.1.2	30м IRAM	38					
2.2	Резуль	ьтаты наблюдений	43					
2.3	Обсуждение результатов наблюдений							
	2.3.1	Кинематика ядер	51					
	2.3.2	Особенности региона G192.76	53					
2.4	Основ	ные результаты	56					
Глава	3. Кин	нематика ядра L1287	58					
3.1	Оценк	а физических параметров ядра L1287	61					
	3.1.1	Наблюдательные проявления L1287	61					

	3.1.2	Анализ карт ядра L1287 в различных молекулярных					
		линиях					
3.2	Обсух	кдение результатов					
3.3	Основ	Основные результаты					
Глава	4. Сво	ойства оболочки зоны Н II S187					
4.1	Наблюдения и архивные данне						
	4.1.1	Линия HI и радиоконтинуум					
	4.1.2	Молекулярные линии					
	4.1.3	Данные в ИК дипазоне					
4.2	Резул	ьтаты наблюдений					
	4.2.1	Радиоконтинуум					
	4.2.2	Данные в линии НІ					
	4.2.3	Молекулярный газ					
4.3	Оцени	ка физических свойств					
	4.3.1	Свойства газа НІ					
	4.3.2	Свойства молекулярного газа					
	4.3.3	Молодое звездное население					
4.4	Обсух	кдение					
	4.4.1	Крупномасштабные структуры					
	4.4.2	Оболочка					
	4.4.3	Этапы эволюции оболочки					
	4.4.4	Области фотодиссоциации					
4.5	Основ	вные результаты					
Глава	5. Си	стемы сгусток, диск, истечение у массивных					
	про	отозвезд					
5.1	Ядро	S255IR					
	5.1.1	Данные наблюдений и их обработка					
	5.1.2	Описание наблюдаемых феноменов					
	5.1.3	Структура ядра S255IR					
5.2	5.2 Ядро S255N						
	5.2.1	Данные наблюдений и их анализ					
	5.2.2	Результаты					

	5.2.3	Обсуждение структуры ядра S255N						
	5.2.4	Промежуточные выводы по S255N						
5.3	Систе	Ma W42MME						
	5.3.1	Данные наблюдений						
	5.3.2	Обсуждение наблюдаемых феноменов						
	5.3.3	Обсуждение структуры W42MME						
5.4	НП об	ласть S305						
	5.4.1	Данные наблюдений						
	5.4.2	Описание наблюдаемых феноменов						
	5.4.3	Оценка физических параметров объекта						
	5.4.4	Обсуждение структуры S305						
5.5	Основ	ные результаты						
Заключение								
Список литературы								
Список рисунков								
Список таблиц								
Приложение А. Аппендикс								
А.1 Дополнительные рисунки								

#### Введение

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 [13]. 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 [14]. 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 [14]. 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 [15], конкурентной аккреции [16], глобального иерархического коллапса [17], глобального неизотопного коллапса [18] и аккреции вследствие инерциальных внешних потоков [19], набор массы вследствие ударных волн и коллапса («collect and collapse») [20]. Обсуждается роль стимулированного звездообразования [21], в которой плотные области газа могут быть дополнительно сжаты давлением возникшим вследствие нагрева ультрафиолетовым (УФ) излучением [22] или сверхзвуковыми систематическими движениям [23]. 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 [18]. 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. [22]). Данный механизм подтверждается большим числом косвенных признаков (см., напр., [24; 25]). Наиболее очевидным аргументом является факт накопления массы в оболочке Н II зоны [23], которое объясняется сверхзвуковым характером расширения стенок. Фрагментация оболочки Н II зоны обсуждалась [1], однако, молодого звёздного поколения, ассоциированного с фрагментами, в работе не зарегистрировано. Кроме того, предполагается [26], 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 [27]) 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 [28; 29]. Данный подход, совместно с Баесовым подходом, был применен для изучения кривой вращения Галактики [30], длительных вспышек в гамма-диапазоне [31], анализа величины турбулентных движений в протопланетных дисках [32], извлечения физических параметров из них [33]. 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 [33], 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» [34]), 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.
- 3. 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 источников 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 H II зон, идентифицирована область фотодиссоциации около них. Выявлен признак накопления массой оболчки H II зоны, установлено, что масса оболочки ~560 M<sub>☉</sub>. Подтверждено, что источник W42 MME является массивной протозвездой на раннем этапе эволюции, до образования ультракомпактной H II области, характерной для звезд класса "O".

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 сгустках 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 [35] и ~40″ THOR [36]), что позволило впервые обнаружить и описать фрагментарную структуру атомарного газа. Подобная фрагментарность предполагается рядом теоретических работ [26], 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 [32] 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 [2]. 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 [37—39].

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 [1; 3] автором была проведена обработка, анализ и интерпретация данных наблюдений в радиолиниях, в т. ч. в линии Н I, исключая анализ излучения метанола который проведен Салий С.В. Анализ общей структуры объекта проводился автором. В работе [4] 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 [5—7] вклад автора включает обработку интерферометрических данных и комбинироване их с одиночной антенной, а также получением ряда оценок физических параметров и интерпретацией результатов.

В работах [8—12] 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.

### Публикации автора по теме диссертации

- 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.
- 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).
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Multiline observations of S255IR with ALMA / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, P. Zemlyanukha // IAU Symposium. — 2018. — Vol. 332. — P. 270—273.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения. Полный объём диссертации составляет 230 страниц, включая 78 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 251 наименование.

## Глава 1. Методы статистического анализа спектров протозвездных ядер

В главах 4, 2, 3 и 5 представлен анализ данных наблюдений в молекулярных линиях. При этом часть данных имеет характерные особенности, затрудняющие их интерпретацию. Причина этих особенностей (Гл. 4, 5) в сложной кинематической структуре и в разных условиях возбуждения излучения в объектах. Как следствие, профили наблюдаемых линий состоят из набора частично перекрывающихся спектральных компонент. Вписывание в наблюдаемый спектр набора модельных компонент, например, гауссиан, по методу Левенберга-Маркварта (LMA) [40] приводит к проблеме выбора начальной точки, от которой зависит решение задачи регрессии. Подобная задача обычно решается с помощью введения предположений о вероятных диапазонах параметров компонент линий. Однако, эти предположения будут неточны для объектов со сложной внутренней кинематикой.

Наш подход заключается в выборе начальных условий для метода МНК таким образом, чтобы начальные условия были максимально близки к глобальному минимуму функции ошибки. В части 1.2 мы предлагаем использовать метод k-ближайших соседей (kBC) для выбора начальных условий метода наименьших квадратов (MHK). Начальные условия выбираются или из внешних достоверных оценок или из предыдущих расчётов. Этот подход является развитием метода, предложенного ранее и рассматриваемого в части 1.1. Этот метод был предложен для анализа профилей линий аммиака в плотном ядре S255N (см/ Гл. 5). Представленные данные обладали низким отношением сигнал/шум (5 – 7) и относительно низким спектральным разрешением (1.72 км с<sup>-1</sup>). Метод kБС в данном случае использован для усреднения набора наблюдаемых спектров. Критерием является наименьший квадрат разности в наборе спектров карты.

Для анализа профилей линий газа протозвездных ядер (Гл. 3) данного подхода недостаточно – требуется изучение параметров газа во всем объекте в целом. При рассмотрении объектов с сферически симметричной структурой более точные оценки можно сделать, прибегая к моделированию процессов переноса излучения внутри объекта [4]. Изображения части протозвездных ядер зачастую имеют форму близкую к округлой, что позволяет предположить их радиальную симметрию. Нами проводилось моделирование переноса излучения в предположении о радиальной слоистой структуре объекта. При этом моделировались спектры в точках с разными прицельным параметрами, соответствующими наблюдаемым и сравнивались с наблюдаемыми.

В данной главе описываются методические особенности, требуемые для проведения подобного анализа. Подбор параметров по методу МНК или другими градиентными или симплексными методами затруднителен – конечные параметры сильно зависят от выбора начальной точки, параметров метода. Зачастую метод расходится из-за связанности параметров. Подобных проблем можно избежать прибегая к методу цепочек Маркова и его производным, как например в работе «Measuring Turbulent Motion in Planet-forming Disks with ALMA: A Detection around DM Tau and Nondetections around MWC 480 and V4046 Sgr» [32]. Метод предполагает заполнение пространства параметров ансамблем прецедентов и оценку вероятных значений параметров. Подобный метод, однако, имеет значительную вычислительную сложность, которая растёт степенным образом с числом параметров.

Наш подход заключается также в заполнении пространства параметров, в отличии от движения от итерации к итерации. Мы используем заполнение регулярными сетками, более плотно заполненными в направлении наибольшей ковариации ранее рассчитанного облака параметров, ограниченных доверительным диапазоном. Для выбора оптимального заполнения используя метод главных компонент (мГК) или аналогичные. Благодаря этому снижается размерность модели, что на несколько порядков ускоряет вычисления.

Предлагаемые методы не ограничиваются астрономическими исследованиями и применяются в других областях, в частности для анализа астроклиматических данных [2].

Глава состоит из четырех разделов. В первых трех разделах представлены оригинальные методы анализа данных. В разделе 1.4 представлены основные результаты главы. Методы опубликованы в работах Fragmented atomic shell around S187 H II region and its interaction with molecular and ionized gas / P. Zemlyanukha [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. Vol. 515, no. 2. P. 2445—2463; Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах / П. М. Землянуха [et al.] // Астрономический Журнал. 2018. Т. 95, № 5. С. 344—365; *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.

## 1.1 Метод k-ближайших соседей для оценки физических параметров газа

Данный метод предлагается использовать при наличии в спектре двух компонент с различными доплеровскими скоростями при наличии сверхтонкого расщепления в линии, а также для анализа данных с низким отношением сигнал/шум. Использование метода моментов для идентификации кинематических фрагментов не всегда представляется лучшим решением, особенно для линий молекул со сверхтонкой структурой, таких как NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>. Подобные оценки могут быть смещены из-за асимметрии линии, причиной которой является наличие сверхтонкой структуры. Кроме того, в случае наблюдения двух и более спектральных компонент первый момент дает усредненную оценку их скорости.

Определить пространственные границы компонент проблематично, так как они могут взаимодействовать, перекрываться и быть представлены разными молекулярными линиями по-разному, в зависимости от того, одинаковые физические условия в компонентах или нет. Поэтому минимальное число компонент мы оцениваем по количеству пиков гистограммы распределения интенсивности наблюдаемых спектров по скоростям (напр., Рис. 1.1). Данная гистограмма представляет собой средневзвешено усредненный спектр по полю карты, пики в гистограмме разных линий свидетельствует о наличии компонент. Например, при анализе объекта S255N, в линии СО ожидались признаки наличия кинематических фрагментов во внешних разреженных слоях ядра. Другие линии (например  $N_2H^+$  и  $NH_3$ ) трассируют более глубокие плотные слои и могут совместно использоваться для оценки числа компонент. Линии, имеющие расщепление на сверхтонкую структуру, в ряде случаев позволяют точнее оценить параметры газа так как информация о излучающем газе представлена большим числом каналов.



Рисунок 1.1 — Пример гистограммы распределения интенсивности линии по скорости с различным алгоритмом выбора ширины столбца для данных NH<sub>3</sub> (1,1). Синим изображен метод байесовских блоков, оранжевым – правило Кнута, зеленым – с разбиением по 0.2 км/с.

По форме гистораммы можно судить о внутренней структуре газа – является ядро однородным или имеет существенные возмущения, а также можно ли представить газ, в виде изолированных или перекрывающихся компонент по скорости (то есть кинематических фрагментов ядра), или же они являются частью процесса с одним спектральным распределением. Существует ряд методов, позволяющих выбрать ширину столбца гистограммы, два из которых предлагается использовать: правило Кнута [41] и метод Байесовских Блоков [42], реализации которых взяты из библиотеки astropy [43]. Примеры их использования приведены на Рис. 1.1. Оценка положения центра линии проводилась с помощью вписывания в наблюдаемые спектры модельных профилей линий перехода с учетом сверхтонкой структуры в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) для гауссова профиля оптической толщины:

$$T(v) = \sum_{n_g=1}^{m} (J(T_{ex}^{n_g}) - J(T_{bg}))(1 - e^{-\tau_{n_g}(v)}), \qquad (1.1)$$

$$\tau_{n_g}(v) = \sum_{i=1}^{n_{hfs}} \frac{8\pi^3 \nu_{ref}}{3kJ(T_{ex}^{n_g})} \frac{S\mu^2}{g_i} N_u^{n_g} \varphi_{n_g i}(v), \qquad (1.2)$$

$$\varphi_{n_g i}(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{n_g}} e^{\frac{-(v-v_i-v_{n_g})^2}{2\sigma_{n_g}^2}},$$
(1.3)

где  $T(\mathbf{v})$  – яркостная температура принимаемого излучения,  $\tau_{n_g}(v)$  – оптическая толщина спектральной компоненты  $n_g$ ,  $T_{ex}^{n_g}$  – температура возбуждения,  $N_u^{n_g}$  – лучевая концентрация молекул на верхнем уровне рассматриваемого перехода,  $\sigma_{n_g}$  – ширина линии,  $v_{n_g}$  – положение центра компоненты линии (индексом  $n_g$  отмечены искомые параметрами модели при аппроксимации),  $J(T) = \frac{h v_{ref}/k}{exp(h v_{ref}/kT)-1}$ ,  $T_{bg} = 2.73K$  температура фонового реликтового излучения,  $\mathbf{v}_{ref}$  – частота перехода,  $\boldsymbol{\mu}$  – дипольный момент, S – сила линии,  $g_i$  – статистический вес энергетического уровня *i*-й компоненты сверхтонкой структуры,  $n_{hfs}$  - количество компонент сверхтонкой структуры (18 – NH<sub>3</sub>(1,1), 24 – NH<sub>3</sub>(2,2), 38 – N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3–2))  $v_i$  – доплеровская скорость *i*-го перехода в линии,  $m \ge 1$  – количество спектральных компонент в линии.

Аппроксимация применима для линий  $NH_3$  (1,1) и (2,2) и  $N_2H^+(3-2)$ . Зачастую наблюдается 2 пика в спектре, поэтому была предусмотрена возможность вписывания линий, содержащих *m* независимых спектральных компонент. Выбор между одной и двумя компонентами должен производиться сравнением среднеквадратичного отклонения в спектре после вычета модели. При этом, большее число параметров предполагает большую неопределенность вписывания. При отношении среднеквадратичного отклонения (СКО) однокомпонентной модели к СКО двухкомпонентной меньше 1.4 используется однокомпонентная модель.

Согласно предложенному выше проводится аппроксимация спектров в карте, точка за точкой. Однако, в ряде точек карты метод не позволяет сделать достоверные оценки. Для расширения областей используется метод k-ближайших соседей (kBC) [44]. Спектры доверительных реализаций использовались в качестве ключевого множества объектов. Остальные области рассматривались в качестве входных данных. Величина скорости спектральной компоненты оценивалась как:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n v_i d(s_k, s_i)^{-2}}{\sum_{i=1}^n d(s_k, s_i)^{-2}}$$
(1.4)

где  $v_k$  – значение скорости в искомом спектре,  $v_i$  – значение скорости для известного (ключевого) спектра,  $s_k$ ,  $s_i$  – искомый и спектр, для которого оценка скорости известна, n = 5 – количество ближайших спектров, по которым проводится оценка скорости,  $d(s_1,s_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^{l} (s_{1_j} - s_{2_j})^2}$  – расстояние в пространстве интенсивностей между двумя спектрами (аналогично функции невязки в МНК), l – количество «соседей», по которым проходит усреднение,  $s_{i_j}$  – величина интенсивности в канале j спектра. В подобной форме метод напоминает метод наименьших квадратов, однако в данном случае алгоритм спуска по параметрам к минимуму ошибки заменен на поиск n «похожих» спектров из ключевого множества, при этом для искомого прецедента (спектра) оптимальным параметром считается средневзвешенная величина по l соседям. Таким образом, величина параметра для исходного спектра интерполируется из ранее сделанных оценок. Пример аппроксимации спектра методом наименьших квадратов и первый ближайший «сосед» приведен на Рис 1.2.

#### 1.2 Метод k-ближайших соседей для анализа карт в линии HI

В данной части мы представляем описание метода k-ближайших соседей для анализа спектральных карт преимущественно в линии H I, используя предположение о гауссовом профиле линии или прибегая к простым моделям переноса излучения. Данный метод рекомендуется в случае значительного числа перекрывающихся допплеровских компонент в спектре, а также в случае наличия точек на карте с известными оценками параметрами линий или газа.

Весьма частый подход, к которому прибегают при анализе спектральных карт – вписывание независимо, точка за точкой, методом наименьших квадратов модельных рассчетов с независимыми параметрами. Основная проблема в данном случае заключаетсая в наличии зависимости результатов вписывания от выбора начальных параметров метода оптимизации. Спектр в линии H I обычно состоит из некоторого числа пиков, которые, обычно, представляют в виде



Рисунок 1.2 — Наблюдаемый спектр N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3—2) в точке (-7", 7") относительно S225N-SMA1 (гистограмма), его аппроксимация методом наименьших квадратов (красная сплошная линия) и 1-й ближайший kBC сосед (голубой штриховой линией), вертикальными линиями обозначены сверхтонкие компоненты перехода (3—2), длина которых пропорциональна статистическим весам.

отдельных гауссиан и связанны со структурой Галактики. Пики могут располагаться достаточно близко и как следствие быть статистически сложно различимы. Этот эффект увеличивается с уменьшением отношения С/Ш. Параметры модели и их доверительные интервалы могут быть выбраны с помощью заполнения (сэмплирования) пространства параметров функции правдоподобия [28], с помощью заполнения регулярными сетками пространства сниженной размерности [4] или другими аналогичными подходами к сэмплированию. Подобный подход проблематичен при анализе спектральных карт точка за точкой. Вычислительная сложность методов заполнения весьма высока. Она растет экспоненциально с числом параметров модели. Вычисления должны повторяться для каждой точки карты независимо.

В случае данных, наблюдаемых в S187 (Гл. 4), существует точка на карте, в которой физические параметры газа известны. Эта информация может быть использована для анализа карты. Мы предполагаем, что физические параметры являются пространственно-зависимыми, то есть результаты вписывания модели можно использовать как начальные условия для вписывания в соседней точке. Мы определяем функцию ошибки следующим образом:

$$\chi^{2} = \frac{1}{N_{v} - N_{p}} \sum_{i=1}^{N_{v}} \frac{(I_{i}^{obs} - I_{i}^{mod})^{2}}{\sigma^{2}} , \qquad (1.5)$$

где  $N_p$  - число параметров модели,  $N_v$  – число спектральных каналов, задействуемых во вписывании.  $I_i^{obs}$  – наблюдаемая интенсивность в спектральном канале *i* и  $I_i^{mod}$  – модельная интенсивность (смотри, напр. Ур. 4.2),  $\sigma$  – СКО в наблюдаемом спектре вне линии. Для нахождения минимума функции ошибки мы использовали библиотеку LMFIT [45] и алгоритм Левенберга–Маркварта(ЛМ) [40]. В общем случае, начальные условия для процедуры вписывания могут быть вычислены с помощью результатов предыдущих вычислений выбранных из других точек на карте. Мы использовали метод k-ближайших соседей для вычисления начального значения ЛМ следующим образом:

$$p_k = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{N_v} p_i d(I_{jk}, I_{ji})^{-2}}{\sum_{i=1}^{N_v} d(I_{jk}, I_{ji})^{-2}} \quad , \tag{1.6}$$

где  $p_k$  – значение параметра,  $d(I_1, I_2)$  – расстояние между спектрами, определяемое по формуле:

$$d(I_1, I_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\chi^2(I_1)_{1_j} - \chi^2(I_2)_{2_j})^2} , \qquad (1.7)$$

где m - число соседей. Мы использовали Евклидову метрику в пространстве параметров модели. Это соответствует взвешенному усреднению k сэмплов из модельных параметров. Эти k сэмплов выбраны используя минимум квадратичной девиации от рассматриваемого спектра. Мы использовали процедуры пакета SCIKIT-LEARN [46] в нашем алгоритме. В рамках такого подхода проблема выбора начальной точки метода ЛМ сводится к проблеме поиска или генерации адекватного набора прецедентов. Результаты декомпозиции спектров поглощения и результаты вписывания методом ЛМ в других точках использовались в качестве такого набора. Как следствие, проводилась процедура анализа карты координата за координатой, начиная от областей с известными оценками. Процедура повторяется несколько раз, сохраняя промежуточные результаты сэмплирования. Число повторных проходов по карте определяется исходя из сходимости в оценок параметров модели в отдельных точках.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

- 1. Оценить параметры модели в отдельных точках внешним образом (Например, спиновую температуру и оптическую толщину из спектров поглощения).
- 2. Выбрать спектры по ближайшим координатам к спектрам, в которых вписывание уже было проведено.
- 3. В выбранные спектры вписать по ЛМ модель с начальными условиями по kBC и добавить наблюдаемый спектр и параметры, полученные в результате вписывания ЛМ в массив прецедентов.
- 4. Повторить предыдущие два шага, пока вся карта не будет покрыта.
- 5. Повторить предыдущий шаг до тех пор, пока в каждой точке карты оценка параметров модели в ней не будет отличаться меньше чем на ошибку параметра по ЛМ относительно предыдущей итерации.

Подобный подход является относительно вычислительно эффективным, так как начальные условия метода наименьших квадратов находятся достаточно близко от минимума невязки и большого числа итераций для оценки параметров в одной точке не требуется. Предположение, которое используется в алгоритме, заключаются в том, что одни и те же физические условия продуцируют одинаковые спектры, и что эти параметры не значительно меняются между соседними координатами. Информация о доверительных интервалов оценок в отдельных точках может использоваться для проведения общих оценок объекта.

## 1.3 Алгоритм вписывания модельных спектральных карт в наблюдаемые с помощью метода главных компонент

Процесс вписывания модельных спектральных карт в наблюдаемые с помощью обычных итеративных методов для оценки физических параметров осложнен тем, что функция ошибки (суммарная невязка между наблюдаемыми и модельными спектрами) является функцией многих параметров и может иметь несколько локальных минимумов, что приводит к зависимости оценки от начальных значений. Наличие корреляции между параметрами модели может при этом серьезно ухудшать сходимость.

Иной подход заключается в том, чтобы заранее рассчитать множество модельных карт для некоторого набора модельных параметров и выбрать из них те, что близки к наблюдаемым. Сложность данного подхода состоит в том, что проведение расчетов для дискретной *n*-мерной сетки (где n – число параметров), достаточно плотно перекрывающей пространство вероятных значений, может выходить за пределы вычислительных возможностей. Очевидно, однако, что такая сетка избыточна. Однако, параметры модели как правило являются коррелированными. Исключив корреляции возможно уменьшить n, т.е. снизить размерность модели. В качестве такого преобразования можно использовать метод главных компонент (ГК), который является подмножеством методов снижения размерности [47]. Он предполагает нахождение такого линейного отображения, в котором исходное множество параметров будет представлено базисом векторов (главных компонент), корреляции между которыми сведены к Минимуму.

Таким образом общий подход заключается в следующем: случайным образом генерируется набор модельных параметров, по величине функции невязки оценивается значимые параметры из набора. По мере увеличения набора растет доверительность оценки коррелированности, по достижению некоторой плотности параметров процедура снижения размерности становится статистически обоснована. Применив к полученной области некоторое преобразование, которое минимизирует связи между параметрами, и отобразив его в новое пространство ортогональных векторов, можно снизить размерность, отбросив вектора, которые несут минимальную информацию о параметрах модели. Заполнив оставшееся пространство векторов достаточно плотной сеткой и сделав обратное преобразование, получаем заполненное пространство параметров модели вблизи минимума, точное значение которого можно найти методом регрессии.

Описанные общие положения определили алгоритм нахождения физических параметров плотных ядер молекулярных облаков с помощью вписывания модельных карт молекулярных линий в наблюдаемые. Алгоритм включал в себя предварительный анализ данных наблюдений и определение параметров, которые будут свободными, снижение размерности и выделение области модельных параметров вблизи минимума невязки методом ГК, нахождение оптималь-



Рисунок 1.3 — Блок-схема алгоритма определения параметров при вписывании модельных спектральных карт в наблюдаемые.

ных значений свободных параметров с помощью метода k-ближайших соседей (kБС) [44] и определение границ доверительных областей для каждого из них. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.3. Оптимальные параметры определялись, исходя из минимума функции ошибки:

$$\chi^2 = \frac{1}{N_p - n} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m \frac{(I_{ij}^{obs} - I_{ij}^{mod})^2}{\sigma_j^2} , \qquad (1.8)$$

где N – количество пространственных точек в карте, m – количество каналов в спектре,  $I_{ij}^{obs}$  и  $I_{ij}^{mod}$  – наблюдаемая и модельная интенсивность в *i*-м спектральном канале для *j*-й точки на карте, соответственно,  $\sigma_j$  – среднеквадратичное отклонение наблюдаемого спектра в точке *j*, рассчитанное по флуктуациям интенсивности вне диапазона линии,  $N_p = m \times N$ , n – количество параметров модели.

В ходе предварительного анализа определялись координаты центральной точки на карте (центр ядра) и скорость источника по данным наблюдений оптически тонкой линии. Затем с помощью генератора случайных чисел задавалось множество значений модельных параметров в достаточно широких диапазонах, рассчитывались модельные спектральные карты и значения функции ошибки. Для полученной выборки параметров рассчитывались матрицы прямого и обратного преобразования в пространство ГК, число компонент сокращалось, а оставшееся пространство заполнялось регулярной сеткой. Узлы сетки с помощью обратного преобразования отображались в значения физических параметров и являлись набором перцедентов, для которых моделировались спектральные карты и вычислялась величина невязки. Среди данного множества отбирались те, что удовлетворяли неравенству:  $\chi^2 \leq \chi^2_{min}(3\sigma_{obs})$ , где  $\chi^2_{min}(3\sigma_{obs})$  есть значение функции ошибки при тех же модельных параметрах, что дают минимальное значение  $\chi^2$  для данного множества при добавлении к наблюдаемым интенсивностям шумов с среднеквадратичным отклонением, равным  $3\sigma_{obs}$ .

Очевидно, однако, что вероятность того, что узел сетки точно соответствует минимуму невязки крайне мала. Заключительный шаг заключался в расчете значений физических параметров, соответствующих точному минимуму функции ошибки, и оценке погрешностей. Для этого был использован метод kBC [44], ранее применявшийся нами для оценки физических параметров плотного ядра S255N [3]. Метод kBC аналогичен методу наименьших квадратов, но в отличие от последнего не подгоняет параметры модели под наблюдаемые спектры, а рассчитывает оптимальные значения параметров из заранее полученных модельных спектров по тому же критерию. Этот метод эквивалентен интерполяции между узлами сетки со взвешиванием на расстояние до узлов. Данный метод позволяет проводить регрессионный анализ между множеством модельных карт с различными параметрами и наблюдаемой картой. Таким образом, среди всех модельных карт находилось k ближайших к наблюдаемой по критерию минимума значения  $\chi^2$  в узлах сетки. В случае, если такой минимум отсутствовал ( $\chi^2$  возрастает при увеличении k, усреднение по моделям увеличивает функцию ошибки), требовалась более частая сетка в области главных компонент около предполагаемого минимума. Оптимальным значением параметра р являлось взвешенное на  $\chi^2$  среднее по k отобранным реализациям:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{k} p_i / \chi_i^2}{\sum_{i=1}^{k} 1 / \chi_i^2} , \qquad (1.9)$$

где  $p_i$  и  $\chi_i^2$  – значения параметра и функции ошибки для прецедента с номером *i*- из набора, соответственно. При этом, величина невязки по  $\chi_i^2$  возрастает с *i*, для i = 0 она минимальна

Используя карты объекта в нескольких спектральных линиях с различной оптической толщиной, можно сузить диапазон доверительных значений, вписывая модельные спектры в эти карты одновременно. Дополнительными параметрами модели при этом будут являться относительные распространенности молекул. Суммарная функция ошибки для карт в нескольких линиях  $(n_{lines})$  имеет следующий вид:

$$\chi^2 = \frac{1}{N_p - n} \sum_{k=1}^{n_{lines}} \sum_{j=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{(I_{ijk}^{obs} - I_{ijk}^{mod})^2}{\sigma_{jk}^2} , \qquad (1.10)$$

где  $N_p = \sum_{k=1}^{n_{lines}} N_k \times m_k$ ,  $N_k$  – количество пространственных точек на карте в *k*-й линии,  $m_k$  – количество каналов в спектре *k*-й линии,  $\sigma_{jk}$  – среднеквадратичное отклонение наблюдаемого спектра в *k*-линии в прецеденте с номером *j* из набора (преобразованых в пространство модельных параметров сетки).

Доверительные области вероятных значений параметров определялись с помощью сечения функции ошибки многих параметров гиперплоскостью  $\chi^2 = \chi^2_{\sigma}$ . Расчет  $\chi^2_{\sigma}$  не зависит от выбора базиса, и его удобно проводить в пространстве главных компонент. В качестве порогового значения было принято  $\chi^2_{\sigma} = \chi^2_{min}(pc_l^{opt} \pm \sigma_{pc_l})$ , значение функции ошибки в случае, когда одна из главных компонент  $p_l$  принимает значение, смещенное от оптимального на  $\sigma_{pc_l}$ , а остальные компоненты варьируются так, чтобы функция ошибки приняла минимальное значение. В качестве  $\sigma_{pc_l}$  бралась симметричная оценка погрешности компоненты  $pc_l$ , представляющая собой диагональный элемент матрицы, обратной к матрице Гессе:  $\sigma^2_{pc_l} = \beta_{ll}^{-1}$  (см. напр., [48; 49]), элемент которой рассчитывался, как:

$$\beta_{lm} = \sum_{k=1}^{n_{lines}} \sum_{j=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{m_k} \frac{1}{\sigma_{jk}^2} \frac{\partial I_{ijk}^{mod}}{\partial pc_l} \frac{\partial I_{ijk}^{mod}}{\partial pc_m} , \qquad (1.11)$$

где  $pc_l, pc_m$  – различные главные компоненты. Производные в 1.11 рассчитывались численно по всему множеству модельных карт. После оценки порогового значения  $\chi^2_{\sigma}$ , строились двумерные проекции функции ошибки и ее сечения гиперплоскостью  $\chi^2 = \chi^2_{\sigma}$  на плоскости различных пар модельных параметров и определялись доверительные области. Эти области в общем случае являются несимметричными относительно оптимальных значений параметров. Пример использования двумерных проекций функции ошибки для оценки доверительных диапазонов модельных параметров при анализе карт молекулярных линий в ядре L1287 дается в разделе 3.1.2.

## 1.3.1 Анализ многомерной функции ошибки методом угловых диаграмм

Анализ функции ошибки в предлагаемых нами подходах аналогичен часто используемому при анализе распределения плотности вероятности по методу цепочек Маркова Монте Карло (MCMC). Метод заключается в отображении функции многих параметров характеризующую соответствие модели и наблюдений на пары параметров. Каждой паре параметров при этом ставится в соответствие интеграл по функции правдоподобия, в случае MCMC. Таким образом, результирующий набор проекций характеризует связи между параметрами и их доверительные диапазоны и доверительные области параметров. В данной работе мы используем функцию невязки (Ур. 1.10), и интегрирование заменено поиском минимального значения функции невязки в наборе следующим образом:

$$\chi_{ij}^{2} = min(\chi^{2})|p_{i} \in [p_{i}, p_{i} + \Delta p_{i}]\&p_{j} \in [p_{j}, p_{j} + \Delta p_{j}] \quad , \tag{1.12}$$

где  $\chi_{ij}^2$  - отображение функции невязки на пары параметров *i* и *j* с величинами  $p_i$  и  $p_j$  в дискрете  $\Delta p_j$  и  $\Delta p_i$ . Подобное отображение эквивалентно поиску оптимальных параметров модели при зафиксированных параметрах *i*, *j* и остальных свободных. Соответственно, для построения отображений на все возможные пары параметров модели требуется выполнить следующие шаги:

- 1. Разбить пространство параметров модели на регулярную сетку.
- 2. Итерировать каждую пару параметров (а и b).
- Для диапазона каждой ячейки двумерной сетки пары a и b найти минимальное значение \u03c0<sup>2</sup> по рассчитанной ранее статистике. Тройку величин [a, b, \u03c0<sup>2</sup>] сохранить в отдельный список.
- 4. Перевести список к регулярной сетке (гридировать) с помощью интерполяции минимум 1-го порядка.
- 5. Перейти к следующей итерации.

Аналогичным образом составляются одномерные сечения. Возможено составление проекций на объем из 3-х параметров.

Анализируя кривизну невязки получившихся изображений около глобальных или локальных минимумов предлагается составить матрицу кривизны невязки (как, напр., в [50]) и вычислить доверительный порог функции ошибки. Порог функции ошибки не зависит от того, представлена ли она в пространстве параметров модели или в пространстве главных компонент. Вычисление в пространстве главных компонент является предпочтительным в силу исключенных линейных зависимостей между параметрами. В случае вычислений в пространстве параметров модели вычисление матрицы Гессе является линейным разложением в окрестности минимума функции невязки. В случае анализа многомерных моделей подобный подход может быть недостаточен и может требовать использования тензоров более высокого порядка, отражающих кривизну невязки в связи трех и более параметров или использования недекартовых топологий пространства параметров. Линейный вариант метода главных компонент не позволяет исключить нелинейные зависимости между параметрами, которые могут приводить к недекартовым топологиям. Использование нелинейных методов снижения размерности позволило бы улучшить точность оценок доверительного порога функции ошибки, но применение метода показывает, что вклад ошибки, вносимой неучтенными нелинейностями, оценивается как много меньший по сравнению с неопределённостями, вносимые шумами.

Величина доверительного порога функции ошибки и имеющийся массив прецедентов позволяют оценить доверительные области. Отображение на пары параметров функции ошибки и ее порога позволяет проследить связанность параметров и различимость отдельных минимумов. Одномерные отображения позволяют оценить доверительные диапазоны на каждый параметр модели. Так как при построении проекций выбирается наименьшее возможное значение, то данный коридор является максимально широким из возможных.

#### 1.3.2 Ошибка, вносимая при снижении размерности

Выбор достаточного количества компонент разложения является непростой задачей, поскольку любой метод снижения размерности приводит к потере информации. Обзор возможных вариантов ее решения представлен в приложении статьи [51] и в ссылках к этой статье.

Количество оставшихся компонент, определяющее величину потерянной информации при снижении размерности, выбиралось таким образом, чтобы отношение суммы собственных векторов матрицы ковариации ГК к сумме собственных векторов матрицы ковариации физических параметров отличалось от единицы (значения в случае тождественного преобразования) не более, чем на 10%, а смещение в оценке параметров не приводило к систематическим ошибкам [51; 52].



Рисунок 1.4 — Гистограмма распределения смещения индекса спадания плотности после прямого и обратного преобразования ГК для источника G268 для некоторых параметров модели ( $\alpha_{ys}$ ).

Однако, задача снижения размерности как часть алгоритмов регрессионного анализа имеет свои особенности. В предлагаемом подходе метод главных компонент используется для генерации сеток, покрывающих пространство параметров модели и оценки доверительных интервалов вероятных значений параметров. Потеря информации при данном подходе проявляется в смещении узлов сетки при прямом и обратном преобразования в пространство сниженной размерности. Для оценки величины смещения мы заполнили пространство параметров модели регулярной сеткой из 6 отсчетов на каждый параметр в диапазоне 5  $\Delta \sigma$  от минимума  $\chi^2$ , где  $\Delta \sigma$  - разброс значений в доверительном

диапазоне. Сгенерированный набор значений состоящий из узлов сетки был преобразован в пространство главных компонент, а, затем, преобразован обратно. Затем было рассчитано относительное отклонение каждого узла сетки после преобразований. Результаты представлены на Рис. 1.4 для 7 и 9 компонент. На данном рисунке видно, что смещение узлов сетки не превышает 10% на всем поле рассматриваемых параметров при разложении на 9 компонент. При разложении на 7 компонент параметр индекса спадания систематической скорости сильно размывается. Отклонение максимально на краю сетки, что соответствует меньшим величинам доверительности. Число компонент равное 7 является недостаточным для корректного семплирования. Смещение узлов сетки значительно, и не покрывает доверительные области для некоторых пар параметров, находящихся в тесной зависимости. Как следствие, доверительный диапазон будет оценен как более узкий. Данные оценки демонстрируются постфактум, после достаточного заполнения пространства параметров. В процессе работы алгоритма подобные деформации семплирования могут приводить к нахождению ложных минимумов, или не нахождению минимумов вообще, так как смещение в результате недостаточного представления больше характерного размера минимума. В случае небольших отклонений картина не искажается, так как смещение компенсируется покрытием соседними узлами сетки. Это очевидно из представленного на Рис. 1.5. На нем представлена гистограмма относительных расстояний между узлом сетки и ближайшим узлом после прямого и обратного преобразования для всех параметров и для параметра с наибольшим отклонением.

#### 1.3.3 Нормировка при преобразовании метода Главных Компонент

Выбор нормировки при использовании метода главных компонент может также представлять сложность и вносить искажения в оценки. Однако, в предлагаемом подходе проблема нормировки не является острой. На первом шаге случайным образом генерируется выборка модельных прецедентов, которая позволяет грубо оценить области доверительных значений и порог функции ошибки. Отсекая значения выше этого порога можно оценить разброс значений и коэффициенты нормировки. При этом нормировка может быть выполнена



Рисунок 1.5 — Гистограмма распределения относительного отклонения между величиной параметра индекса спадания плотности после прямого и обратного преобразования и любой ближайшей из исходного множества.

на среднее значение и величину разброса, то есть стандартным образом. Этот подход является вполне применимым, однако, более разумно проводить нормировку относительно наиболее вероятного значения (с минимальным значением  $\chi^2$  в выборке или в результате применения метода kBC). При этом подходе из исходного множества параметров модели вычитается наиболее вероятное значение и делится на величину стандартной девиации. В результате получаются значения, диапазон которых лежит в пределах величин [-2, 2] (Рис. 1.4), что вполне пригодно для применения метода ГК.

### 1.3.4 Физическая интерпретация опорных векторов в методе Главных Компонент

Метод главных компонент используется для задач астрономии, зачастую, применимо к данным наблюдений, которые, как предполагается, должны представлять физические параметры среды(напр, [53]). В некоторых случаях мГК используются для задач классификации объектов (напр., [54]). В этом случае предполагается, что подобная классификация будет физически обусловлена. Можно предположить, что в рассматриваемом подходе в результате снижения размерности будет выбран базис, который параметризует модель более фундаментально, чем параметры, введенные аналитически. Это не так, как видно из Рис. АА.4. На рисунке представлены проекции функции ошибки на пары параметров модели, а также линиями отмечен вклад каждой компоненты пространства сниженной размерности в физический параметр, или пару параметров модели. В данном случае рассматривается применение вышеописанного метода к анализу объекта G268, однако, в случае объектов L1287 и др. наблюдаются аналогичные особенности. Можно было бы ожидать, что некоторые компоненты будут отражать более общие закономерности объекта, такие как, например, полная масса ядра. Подобных компонент не наблюдается. Наблюдается, что компоненты 4-6 имеют малый вклад в параметры объекта, относящиеся к параметрам, связанным с общим числом молекул в ядре ( $n_0, X_0, a_n, R_{max}$ ), и, как следствие, интенсивность линии и глубину провала. Большая часть компонент вытянута в направлении наибольшей корреляции пар параметров. Компонента РС 1 в большей мере отражает связь  $X_0$  и  $n_0$ , РС 6 – ортогональна РС 1. Компоненты 4 и 5 имеют малый вклад в параметры, связанные с общим числом молекул и больший – в параметры, связанные с свойствами систематических и турбулентных движений (V<sub>turb</sub>, V<sub>sus</sub> и их индексы). Однако, остальные компоненты (РС0-3 и РС6) также определяют эти параметры. Компоненты вытянуты в направлении линии корреляции, что прослеживается, например, в паре параметров  $n_0$  и  $\alpha_0$  или  $V_{sys}$  и  $\alpha_v$ , за счет чего достигается

### 1.4 Основные результаты

Предложено **три** оригинальных алгоритма, которые апробированы в рамках проведенных автором и его коллегами исследований.

- Алгоритм анализа спектральных карт в линиях со сверхтонкой структурой и низким соотношением сигнал/шум, в основе которого лежит метод k-ближайших соседей что позволяет усреднять близкие по невязке спектры.
- 2. Алгоритм анализа объектов в линиях с множеством компонент и итеративного анализа карт на основе метода k-ближайших соседей и метода градиентного спуска, а также экстраполяции внешних оценок.
- Алгоритм анализа вероятных 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, является новаторским. Соискателем предложены оригинальные методы анализа результатов сэмплирования.

## Глава 2. Обзор протозвездных ядер в линиях молекул трассеров плотного газа

Обзоры протозвездных ядер с целью оценок их физических характеристик имеют очевидную важность. Научный интерес к этим исследованием был заложен основателем научной школы, к которой принадлежит автор А. Г. Кисляковым (напр. [55] и [56]), и эти исследования продолжаются и по сей день. Это довольно популярный подход к изучению протозвездных ядер (напр, проект CORES (телескоп IRAM 30m) или MALT90 (телескоп MOPRA 22m)). Как следствие, для получения новых результатов требуется оригинальный подход к выбору молекулярных линий и объектов исследования. В данной главе представлены результаты наблюдений ряда ядер в линиях ряда молекул, содержащих основной и дейтерированный изотоп водорода с целью изучить распространенность дейтерированных молекул и физические условия в протозвездных ядрах. В главе также представлены карты отдельных источников и анализ их морфологической структуры.

Глава состоит из четырех разделов. В разделе 2.1 дается сводка наблюдательных данных используемых для анализа объектов. В разделе 2.2 представлено описание наблюдательных проявлений источников. Обсуждение и основные результаты приведены в разделах 2.3 и 2.4, соответственно. Основные результаты исследований опубликованы в работах Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex / O. L. Ryabukhina [et al.] // Research in Astronomy and Astrophysics. 2018. Vol. 18, no. 8. P. 095; Обзор областей образования массовных звезд в линиях дейтерированных молекул / Е. А. Трофимова [et al.] // Астрономический Журнал. 2020. Т. 97, № 3. С. 225—241; Многочастотные исследования массивных ядер со сложной пространственно-кинематической структурой / Л. Е. Пирогов [et al.] // Астрономический Журнал. 2016. Т. 93, № 10. С. 871—891; Deuterated molecules in regions of high-mass star formation / I. I. Zinchenko [et al.] // Proceedings of Science. 2022. Vol. MUTO2022. P. 038

### 2.1 Объекты исследования и наблюдения

Объектами для наблюдения был выбран ряд протозвездных ядер и молекулярных облаков. Критериями являлись наличие мощных ИК источников, ассоциированных с протозвездными объектами, мазеров H<sub>2</sub>O и компактных H II зон. Полный список источников приведен в табл. 2. Часть объектов выбрана с целью изучения распределения относительного содержания молекул, содержащих изотоп дейтерия. Остальная часть была выбрана согласно наблюдениям в КрAO на PT-22, на которых были зарегистрированы сложные профили линий HCN, характерные для сжимающихся и расширяющихся оболочек ядер. Молекулярное облако G192.76+00.10 было выбрано как образец процесса звездообразования на крупных масштабах, часть комплекса S254-S258. В облаке зарегистрированы ИК источники, наблюдаются процессы звездообразования[57], однако кинематика газа не изучалась.

Для проведения исследования данной выборки объектов соискатель участвовал в 3-х сессиях наблюдений на телескопах 20-м Onsala и 30-м IRAM описанных ниже.

#### 2.1.1 Onsala 20м

Наблюдения проведены в 2015 и 2016 годах с помощью 20-м радиотелескопа обсерватории Онсала (Швеция) в течение недели каждая[9; 10]. Обсерватория расположена близ деревни Kungsbacka, на уровне моря.

В 2015 году общее время накопления составило ~43 часов. При наблюдениях использовался новый двухполяризационный приемник трехмиллиметрового диапазона с СИС-смесителем на входе, имеющий шумовую температуру ~50-60К в диапазоне 85–86 ГГц [58]. Шумовая температура системы в течение основного периода наблюдений изменялась в диапазоне ~150–250 К в зависимости от высоты источника и частоты. Для спектрального анализа использовался Фурье-спектроанализатор (FFTS) с полосой 2.5 ГГц и разрешением по частоте 76 кГц (32768 каналов). Наблюдения в широкой полосе позволяли регистрировать одновременно несколько молекулярных линий. Наблюдения проводились
в диапазонах с центральными частотами 86.6 и 88.9 ГГц. Для более детального исследования профилей линий отдельные позиции в источниках наблюдались с Фурье-спектроанализатором, имеющим полосу 625 МГц и разрешение по частоте 19 кГц. При обработке сигналы от двух поляризаций суммировались, что давало выигрыш по чувствительности в  $\sqrt{2}$  раз. Ширина основного луча диаграммы направленности телескопа Онсала составляет 44″ на частоте 86 ГГц. Эффективность использования основного луча, зависящая от высоты источника, на частоте 86 ГГц варировалась в диапазоне ~0.4–0.58 для высот ~30–70°, соответственно. С помошью этого параметра антенные температуры пересчитывались в температуры, приведенные к основному лучу диаграммы направленности ( $T_{mb}$ ). Пример спектра объекта 121.28+0.65, полученного в направлении позиции с относительными координатами (20″, 20″), приведен на рис. 2.1, для объектов 77.462+1.759 и 99.982+4.17 на рисунках 2.2 и 2.3, соответственно.

В 2016 году общее время накопления составило 60 часов. Наблюдения проводились на длине волны 4мм. Для регистрации линии использовался спектроанализатор, что и в 2015г. Использовались два варианта настройки приемника, при которых перекрывались следующие полосы частот: (1) 71.94–74.44 ГГц, (2) 75.45-77.95 ГГц, (3) 83.94-86.44 ГГц и 87.45-89.95 ГГц. Одновременно наблюдались полосы (1,3) или (2,4). Эти пары включают в себя нижнюю и верхнюю боковые полосы приемника, соответственно. На этих частотах ширина дигаммы направленности на половинном уровне имеет размер от 50" до 40". Наблюдения проводились в основном в режиме диаграммной модуляции с разносом лучей около 11'. Часть данных получена в режиме частотной модуляции. Точность наведения проверялась по наблюдениям мазерных источников SiO, она составляла  $\leqslant 5''$ . Минимальная шумовая температура системы в ходе наблюдений составляла около 150К, в ясную погоду. В неблагоприятных условиях температура возрастала в несколько раз. Результаты измерений были пересчитаны с учетом коэфициента использования диаграммы направленности в яркостною температуру, приведённую к основному лучу согласно документации.

В табл. 1 приведен список зарегистрированных молекулярных линий с указанием перехода, частоты и энергии верхнего уровня.



Рисунок 2.1 — Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в объекте 121.28+0.65, наблюдавшийся в 2015г. в Онсала. Показана часть полосы спектроанализатора, на участках с молекулярными линиями.



Наблюдения проводились в обсерватории IRAM в сентябре 2016 года. Наблюдения проводились Землянухой П.М. Общее время накопления составляло ~28 часов. Обсерватория расположена в горах Рісо Veleta на высоте около 3000м над уровнем моря. В качестве приемника использовалась система HERA - HEterodyne Receiver Array. Она представляет 9 отдельных супергетеродинных приемников, собранных в матрицу 3х3, каждый из которых является двухполяризационным. Каждый приемник оборудован СИС-смесителем, позволяющим принимать излучение на частотах от 215 до 272 ГГЦ (1.3 мм канал). Устройство оборудовано деротатором поля, позволяющим сохранить ориентацию матрицы относительно сканируемого участка неба на протяжении его движения по небосклону. Система принимает излучение от 3х3 лучей каждый шириной ~12″ на длине волны 1.3мм. Система предназначена для проведения картирования объектов в широком поле [59]. Приемники являются охлаждаемыми, собственная шумовая температура ~95 K, при эффективности основного луча B<sub>eff</sub>=0.52.



Рисунок 2.2 — Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в объекте 77.462+1.759, набл. 2015г. Онсала.

Целью исследования являлось картирование области плотного газа G192.76+00.10 в линиях CO(2–1),  $^{13}$ CO(2–1), C<sup>18</sup>O(2–1), CS(5–4), и CH<sub>3</sub>CCH(13–12). Для наблюдения использовались одновременно верхняя и нижняя боковые полосы приемника, FTS в качестве спектрометра. Он был настроен таким образом, чтобы в каждой из полос принимать по одной линии, с разрешением в 50кГц для изотопов CO, 200 кГц для CS и CH<sub>3</sub>CCH. При обработке сигналы в разныхьполяризациях поляризации усреднялись, что давало выигрыш чувствительности в  $\sqrt{2}$  раз. На протяжении всего времени наблюдений погода существенным образом менялась, шумовая температура системы (приемники+атмосфера) колебалась выше ~210K со средней ~290K. Стоит отметить, что наблюдения также осложняли погодные условия, в которых, при относительно прозрачной атмосфере, наблюдалась ее нестабильность, что не позволило настроить положение контррефлектора, сократив общее время наблюдений.

Молекула	Переход	Частота, МГц	$E_{\rm up},{\rm K}$
DCO <sup>+</sup>	1-0	72039.312	3.457
DCN	$1-0 F_1=1-1$	72413.484	3.475

Таблица 1 — Наблюдаемые линии на телескопе OSO

Таблица 1 – продолжение

Молекула	Переход	Частота	$E_{\rm up}$
	1-0 F <sub>1</sub> =2-1	72414.905	3.475
	1-0 F <sub>1</sub> =0-1	72417.030	3.476
$CH_3CN$	4(3)-3(3)	73577.451	73.132
	4(2)-3(2)	73584.543	37.511
	4(1)-3(1)	73588.799	15.975
	4(0)-3(0)	73590.217	8.83
DNC	1-0	76305.697	3.662
$N_2D^+$	$1-0 \ F_1=1-1 \ F=2-1,2$	77107.798	3.701
	$1-0 F_1=2-1 F=3-2$	77109.632	3.701
	$1-0 \ F_1=0-1 \ F=1-0,1,2$	77112.130	3.701
$\mathrm{HC^{18}O^{+}}$	1-0	85162.223	4.087
$\rm NH_2D$	$1(1,1)^+$ - $1(0,1)^-$ F=2-2	85926.263	20.679
$\rm H^{13}CN$	1-0 F=2-1	86340.176	4.144
$\rm HCO^+$	1-0	89188.526	4.280
$c-C_3H_2$	$2_{1,2}-1_{0,1}$	85338.906	6.45
$\mathrm{HCS^{+}}$	2-1	85347.869	6.14
$\mathrm{CH}_3\mathrm{C}_2\mathrm{H}$	$5_3 - 4_3$	85442.600	77.34
	$5_2 - 4_2$	85450.765	41.21
	$5_1 - 4_1$	85455.665	19.53
	$5_0 - 4_0$	85457.299	12.30
$C_4H$	9 – 8  19/2 – 17/2	85634.000	20.55
Нα	$H(42)\alpha$	85688.390	
$\rm NH_2D$	$1_{1,1} - 1_{0,1} F = 0 - 1$	85924.747	20.68
	$1_{1,1} - 1_{0,1} F = 2 - 1$	85925.684	20.68
	$1_{1,1} - 1_{0,1} F = 2 - 2$	85926.263	20.68
	$1_{1,1} - 1_{0,1} F = 1 - 2$	85926.858	20.68
	$1_{1,1} - 1_{0,1} F = 1 - 0$	85927.721	20.68
$\mathrm{HC^{15}N}$	1-0	86054.967	4.13
SO	$2_2 - 1_1$	86093.983	19.31
$C_2S$	$7_6-6_5$	86181.413	23.35
$\rm H^{13}CN$	1 - 0 F = 1 - 1	86338.7367	4.14
	1 - 0 F = 2 - 1	86340.1764	4.14
	1 - 0 F = 0 - 1	86342.2551	4.14

Таблица 1 – продолжение

Молекула	Переход	Частота	$E_{\rm up}$
HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} \ 3/2 - 1/2 \ F = 2 - 1$	86670.82	4.18
HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} \ 3/2 - 1/2 \ F = 1 - 0$	86708.35	4.16
$\rm H^{13}CO^+$	1-0	86754.288	4.16
HCO	$1_{0,1} - 0_{0,0} \ 1/2 - 1/2 \ F = 1 - 1$	86777.43	4.18
SiO	2-1	86846.995	6.25
$HN^{13}C$	1 - 0 F = 2 - 1	87090.859	4.18
$C_2H$	$1 - 0 \ 3/2 - 1/2 \ F = 1 - 1$	87284.156	4.19
	$1 - 0 \ 3/2 - 1/2 \ F = 2 - 1$	87316.925	4.19
	$1 - 0 \ 3/2 - 1/2 \ F = 1 - 0$	87328.624	4.19
	$1 - 0 \ 1/2 - 1/2 \ F = 1 - 1$	87402.004	4.20
	$1 - 0 \ 1/2 - 1/2 \ F = 0 - 1$	87407.165	4.20
	$1 - 0 \ 1/2 - 1/2 \ F = 1 - 0$	87446.512	4.20
HNCO	$4_{0,4}$ - $3_{0,3}$	87925.238	10.55
HCN	1 - 0 F = 1 - 1	88630.4157	4.25
	1 - 0 F = 2 - 1	88631.8473	4.25
	1 - 0 F = 0 - 1	88633.936	4.25
$H^{15}NC$	1-0	88865.692	4.26
HCO <sup>+</sup>	1-0	89188.526	4.28

Таблица 2 — Список источников, наблюдавшихся на телескопе OSO

Источник	$\alpha(J2000) \qquad \delta(J2000)$		$V_{\rm LSR}$	Ассоциации
	(h)(m)(s)	(°)(')(")	(км/с)	
G121.30 + 0.66	00:36:47.50	+63:29:02.1	-17.7	IRAS00338+6312
S184	00:52:25.15	+56:33:53.3	-30.4	G123.07-6.31, IRAS00494 $+5617$
$G125.52{+}2.03$	01:15:43.03	$+64{:}46{:}38.1$	-54.5	IRAS01123+6430
$S187(N_2H^+)$	01:23:15.38	$+61{:}49{:}43.1$	-14.0	G126.68-0.81, IRAS01194 $+6136$
G126.72-0.82	01:23:36.30	$+61{:}48{:}47.1$	-14.0	IRAS01202+6133
G133.69+1.22	02:25:28.23	$+62{:}06{:}57.7$	-43.1	
$G133.71{+}1.22$	02:25:40.56	$+62{:}05{:}53.2$	-38.9	IRAS02219+6152, AFGL326
$G133.75{+}1.20$	02:25:53.50	$+62{:}04{:}10.7$	-38.9	
$G133.95{+}1.07$	02:27:04.68	$+61{:}52{:}25.5$	-47.7	IRAS02232+6138, AFGL3314
S199	02:57:35.60	$+60{:}17{:}22.0$	-38.0	IRAS02575 $+6017$ , AFGL4029
S201	03:03:17.90	$+60{:}27{:}52.0$	-37.0	G138.5+1.6, IRAS02593+6016
AFGL490	03:27:31.51	+58:44:28.8	-12.0	IRAS03236+5836
G142.00+1.83	03:27:38.77	$+58{:}47{:}00.1$	0.0	

Таблица 2 – продолжение

Источник	$\alpha$ (J2000)	δ(J2000)	$V_{\rm LSR}$	Ассоциации
	(h)(m)(s)	$(^{\circ})(')(")$	(км/с)	
Per4	03:29:18.00	$+31{:}27{:}31.0$	7.6	G158.27-20.37
G170.66-0.27	05:20:16.14	+36:37:21.1	-18.8	IRAS05168 + 3634
G174.20-0.08	05:30:45.62	$+33{:}47{:}51.6$	-3.5	AFGL5142 45
$G173.17{+}2.35$	05:37:57.85	$+35{:}58{:}40.5$	-19.5	$IRAS05345 {+} 3556$
S231	05:39:12.90	$+35{:}45{:}54.0$	-16.6	G173.48+2.45, IRAS05358+3543
$G173.58{+}2.44$	05:39:27.94	$+35{:}40{:}41.4$	-16.0	IRAS05361 + 3539
S235	05:40:53.32	$+35{:}41{:}48.7$	-17.0	G173.72+2.70, IRAS05375+3540
G205.11-14.11	05:47:05.45	$+00{:}21{:}50.0$	9.8	AFGL818, NGC2071, IRAS05445+0016
$G189.78{+}0.35$	06:08:35.41	+20:39:02.9	9.1	
AFGL6366	06:08:41.00	+21:31:01.0	3.0	G189.03 $\pm$ 0.78, IRAS06056 $\pm$ 2131
S247	06:08:53.94	+21:38:36.6	3.3	G188.95 $\pm$ 0.89, IRAS06058 $\pm$ 2138
S255N	06:12:53.64	+18:00:26.8	7.1	G192.58-0.04
S255IR	06:12:54.00	+17:59:23.1	7.1	G192.60-0.05
$G192.76{+}00.10$	6:13:40	+17:54:40	8	
$G202.99 {+} 2.11$	06:40:44.59	$+09{:}48{:}12.6$	18.0	
NGC2264	06:40:58.00	$+09{:}53{:}42.0$	18.0	$G202.94{+}2.19$
W217	06:41:10.96	$+09{:}29{:}31.8$	18.0	IRAS06384+0932, AFGL989
W40	18:31:15.75	-02:06:49.3	5.0	
$G34.40 {+} 0.23$	18:53:17.41	$+01{:}24{:}54.6$	59.4	IRAS18507 + 0121
$G34.26 {+} 0.15$	18:53:18.80	$+01{:}14{:}55.6$	60.4	IRAS18507 + 0110
$G37.43 {+} 1.51$	18:54:14.30	$+04{:}41{:}39.0$	44.0	IRAS18517 + 0437
$G58.47 {+} 0.43$	19:38:58.12	$+22{:}46{:}32.2$	37.3	IRAS19368+2239
S88B	19:46:47.32	$+25{:}12{:}45.6$	22.7	$G61.48{+}0.10$
S100	20:01:45.59	+33:32:41.1	-23.8	G70.29+1.60, IRAS19598+3324
G65.78-2.61	20:07:06.74	$+27{:}28{:}52{.}9$	8.0	$\mathrm{IRAS20050}{+}2720$
G69.54-0.98	20:10:09.13	+31:31:37.3	11.8	IRAS20081 + 3122
$G77.46 {+} 1.76$	20:20:38.54	$+39{:}38{:}18.9$	3.1	IRAS20188 $+3928$ , JC20188 $+3928$
G75.78-0.34	20:21:43.89	$+37{:}26{:}38.6$	-0.4	
$G79.27 {+} 0.39$	20:31:57.50	+40:18:30.0	1.2	
$G79.34{+}0.33$	20:32:21.80	+40:20:08.0	0.0	
W75N	20:38:36.93	+42:37:37.0	10.7	G81.87 + 0.78
W75(OH)	20:39:00.60	+42:22:48.8	-3.8	G81.72 + 0.57
W75S3	20:39:03.43	+42:25:53.0	2.1	$G81.77 {+} 0.60$
$G81.50 {+} 0.14$	20:40:08.30	+41:56:26.0	-4.5	
$G92.67 {+} 3.07$	21:09:21.74	+52:22:37.6	-15.2	
$G99.98{+}4.17$	21:40:42.36	$+58{:}16{:}09.7$	1.8	IRAS21391+5802, L1121
S140	22:19:18.20	+63:18:51.2	-7.0	G106.80 + 5.31
$G109.87 {+} 2.11$	22:56:18.10	+62:01:49.4	0.0	
G108.76-0.95	22:58:42.71	$+58{:}47{:}09.2$	-50.4	$ m JC22566{+}5830$
S153	22:58:47.66	$+58{:}45{:}00.7$	-51.0	G108.76-0.99, IRAS22566 $+5828$
S152(OH)	22:58:49.60	+58:45:15.3	-52.7	G108.77-0.98

Источник	$\alpha$ (J2000)	$\delta(J2000)$	$V_{\rm LSR}$	Ассоциации
	(h)(m)(s)	(°)(')(")	(км/с)	
S156	23:05:09.90	+60:14:31.0	-50.6	G110.11 + 0.04
$G111.54{+}0.78$	23:13:44.72	$+61{:}28{:}09.7$	-57.6	IRAS23116+6111
S158	23:13:44.84	+61:26:50.7	-55.5	G111.53 + 0.76

## 2.2 Результаты наблюдений

В статьях [8—10] приведены методики и результаты наблюдений, которые проводил в т.ч. автор работы. Ниже мы приводим краткую выдержку из приведенных статей в той части где существенен вклад автора. В табл. 3 приведена сводка параметров линий для разных источников. Параметры линий были оценены с помощью стандартных процедур GILDAS. Излучение в линиях молекул DCO<sup>+</sup> обнаружено в 16 источниках из 50-ти, для остальных оценена верхний предел интенсивности излучения. Линии DCN (1-0) зарегистрированы в 17 источниках. В полосе (2) наблюдались 47 источников из 50, при этом в 15 из них регистрируется линия DNC (1-0), в 2-х N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> (1-0) [9]. В 15 источниках зарегистрировано наличие линии NH<sub>2</sub>D (1(1,1)<sup>+</sup> – 1(0,1)<sup>-</sup>), обсуждение результатов опубликовано в [9].



Рисунок 2.3 — Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в объекте 99.982+4.17, набл. 2015г. Онсала.

 $N_2D^+$  $DCO^+$ DCN DNC Источник Χ, ν. Χ, Υ.  $\Delta V$ , I.  $\Delta V$ , I.  $\Delta V$ ,  $\Delta V$ , I. I. мΚ км/с мΚ км/с км/с км/с км/с мΚ км/с км/с км/с мΚ G121.30+0.66 -16,98(02)470(10)1,69(05)-17,17(04)230(10)2,09(09)-17,53(02)330(10)2,22(06)S184  $<\!\!54$ 3,29 $<\!\!54$ 3,29 $<\!97$ 3,29G125.52+2.03  $<\!\!68$ 2,22  $<\!\!68$ 2,22< 1062,22 $S187(N_2H^+)$ -12,97(01)1270(20)0.95(02)-13,30(04)250(20)0,97(06)-13,34(03)470(20)1,32(07)G126.72-0.82 G133.69+1.22 4.99 $<\!92$ < 924,99 $<\!66$ 4.99G133.71+1.22  $<\!58$ 13,313.313.3 $<\!58$  $<\!31$ G133.75+1.20 3,253,253,25 $<\!151$  $<\!151$  $<\!62$ G133.95+1.07  $<\!\!83$ 55 $<\!67$  $<\!83$ 5S199  $<\!\!76$ 1,93  $<\!76$ < 1211,931,93S201 $<\!64$ 2,83 <64 2,83 < 1042,83AFGL490 1210(20)1,23(02)-12,57(07)150(10)1,76(13)-12,57(01)630(10)1,39(02)-12,50(05)100(10)1.99(09)-12,40(01)G142.00+1.83 2.04< 1122.04< 118< 1182.04Per 4 7,25(03)930(05)1,11(06)G170.66-0.27 -15.95(02)690(30)0,92(05)0.92 $<\!131$ 0.92 $<\!\!87$ G174.20-0.08 -4,39(05)580(40)1,57(13)< 1541.71-3,99(06)360(30)1,85(15)G173.17+2.35 2,47(12)2,472,47-20,02(05)500(20) $<\!70$  $<\!96$ S231  $<\!50$ 2,85-16,56(09)250(20)2,47(15)< 392,85G173.58 + 2.44-16,72(02)640(30)1,20(06)1,24 -16,60(04)380(30)1,29(10) $<\!\!85$ S2352,37 $<\!62$ 2,37< 1142,37 $<\!62$ G205.11-14.11 < 1271,858,66(04)530(40)0,9(08) $G189.78 {+} 0.35$  $<\!91$ 2,482,482,48 $<\!91$ < 122AFGL6366  $<\!\!78$ 2,53 $<\!\!78$ 2,53S247 $<\!\!68$ 2,94 $<\!\!68$ 2,94< 1082,94

Таблица 3 — Параметры зарегистрированных линий дейтерированных молекул. В скобках приведены среднеквадратичные погрешности для последних знаков.

Источник		$\mathrm{DCO}^+$		DCN			DNC			$N_2D^+$		
	ν,	I,	$\Delta V,$	ν,	Ι,	$\Delta V,$	V,	I,	$\Delta V,$	ν,	I,	$\Delta V,$
	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	${ m Km/c}$	мК	км/с	км/с	мК	км/с
S255N		<44	2,97	6,34(07)	250(10)	2,86(17)		<90	2,97			
S255IR		$<\!\!154$	2,32		$<\!\!154$	2,32						
W217	5,89(04)	920(30)	2,90(09)	7,25(08)	370(30)	2,42(20)	7,02(07)	520(20)	3,53(16)			
W40												
G34.40 + 0.23												
$G34.26 {+} 0.15$												
$G37.43 {+} 1.51$												
$G58.47 {+} 0.43$		$<\!\!64$	$2,\!59$		$<\!\!64$	$2,\!59$		$<\!\!83$	$2,\!59$			
S88B												
G65.78-2.61		<80	$3,\!07$		$<\!\!80$	$3,\!07$						
G69.54-0.98		${<}65$	$3,\!88$		${<}65$	$3,\!88$						
$G77.46 {+} 1.76$	2,14(07)	350(30)	1,97(16)	2,02(10)	250(20)	2,28(19)	1,90(06)	460(30)	1,90(15)			
G75.78-0.34		$<\!\!42$	4,13	0,86(12)	210(10)	4,06(21)		< 38	$4,\!13$			
$G79.27 {+} 0.39$	2,20(04)	930(30)	2,18(09)		$<\!\!113$	2,26	1,89(02)	640(10)	2,33(04)	1,54(07)	140(10)	2,09(11)
$G79.34{+}0.33$	1,39(05)	730(30)	2,29(12)		$<\!\!165$	$1,\!85$	$0,\!65(04)$	440(30)	1,41(10)			
W75N		<64	$3,\!86$	9,08(10)	400(20)	3,73(18)		$<\!\!96$	$3,\!86$			
W75(OH)		$<\!79$	$4,\!65$	-2,77(17)	560(24)	5,21(24)	-2,83(06)	460(10)	4,96(13)			
W75S3	-3,49(03)	550(20)	2,14(07)	-3,77(04)	390(10)	2,35(08)	-4,08(02)	80(20)	2,02(05)			
$G92.67 {+} 3.07$		$<\!\!63$	2,21		${<}63$	2,21		${<}56$	$2,\!21$			
$G99.98{+}4.17$	1,13(03)	1430(60)	1,54(07)		$<\!\!119$	1,72	$0,\!88(06)$	460(40)	1,19(13)			
S140		${<}79$	2,52	-6,74(06)	390(20)	2,42(11)		$<\!63$	$2,\!52$			
$G109.87 {+} 2.11$		$<\!75$	4,01		$<\!75$	4,01		$<\!63$	$4,\!01$			
G108.76-0.95	-49,42(01)	810(10)	1,89(03)	-49,87(04)	180(10)	1,30(09)	-50,22(03)	530(20)	2,18(07)			
S153	-50,01(03)	890(30)	2,02(07)		$<\!77$	$2,\!59$	-50,74(05)	480(20)	2,51(12)			
S152(OH)	-49,91(02)	1420(30)	1,68(04)	-50,17(10)	290(20)	2,41(17)						
S156		$<\!91$	5,04		$<\!\!91$	5,04		$<\!\!47$	$5,\!04$			

Таблица 3 – продолжение

Источник	DCO <sup>+</sup>			DCN			DNC			$N_2D^+$		
	ν,	I,	$\Delta V,$	ν,	I,	$\Delta V,$	V,	I,	$\Delta V,$	ν,	I,	$\Delta V,$
	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	$\kappa$ м/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с
G111.54+0.78		$<\!\!58$	3,76	-56,46(07)	420(20)	3,63(12)		<43	3,76			
S158		$<\!\!32$	4,66	-54,85(08)	430(20)	4,51(14)		$<\!\!56$	4,66			

Таблица 3 – продолжение

Источник		H <sup>13</sup> CN		HCO <sup>+</sup> HC <sup>18</sup> C			$\mathrm{HC^{18}O^{+}}$	+		
	ν,	Ι,	$\Delta V,$	V,	I,	$\Delta V,$	ν,	Ι,	$\Delta V,$	
	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	
$G121.30{+}0.66$	-17,93(06)	154(6)	2,92(10)	-17,77(01)	7825(37)	2,79(01)	-17,63(09)	129(13)	1,84(21)	
S184	-31,36(06)	302(10)	3,29(10)							
$G125.52{+}2.03$				-55,49(03)	1198(24)	$2,\!61(06)$				
$S187(N_2H^+)$		${<}58$	1,08	-14,13(01)	1431(17)	$2,\!36(03)$				
G126.72-0.82				-14,693(01)	4035(27)	2,21(02)				
$G133.69{+}1.22$				-44,14(01)	5696(18)	4,21(02)				
$G133.71{+}1.22$				-39,36(01)	6244(69)	8,16(04)				
$G133.75{+}1.20$				-39,13(01)	7372(223)	4,05(03)				
$G133.95{+}1.07$	-48,03(10)	504(17)	5,00(18)							
S199	-38,67(0,05)	262(14)	1,93(11)	-38,52(01)	6655(23)	$2,\!65(01)$				
S201				-39,22(03)	1333(21)	$3,\!67(07)$				
AFGL490	-12,75(07)	94(8)	1,58(03)	-13,60(01)	779(4)	$2,\!97(03)$				
$G142.00{+}1.83$				-13,41(01)	4078(36)	2,09(02)				
Per 4				7,59(01)	3938(44)	$0,\!93(01)$				
G170.66-0.27				-16,21(03)	975(24)	$2,\!30(07)$				
G174.20-0.08				-3,53(01)	4016(17)	$3,\!65(02)$				
$G173.17{+}2.35$				-20,22(01)	3421(25)	$2,\!81(02)$				
S231	-16,21(05)	360(10)	3,24(08)	-16,24(01)	5660(23)	$5,\!29(03)$				
$G173.58{+}2.44$				-16,6(01)	3001(15)	3,42(02)				
S235	-16,76(02)	729(11)	2,37(04)	-17,29(01)	7864(26)	$2,\!27(01)$				
G205.11-14.11	$10,\!38(05)$	414(13)	2,81(08)							
$G189.78{+}0.35$	$10,\!01(03)$	443(12)	2,48(08)	9,46(01)	5588(19)	3,92(02)				
AFGL6366	3,13(03)	423(12)	2,53(07)							
S247				3,54(01)	5974(18)	4,12(02)				
S255N	7,47(02)	540(8)	3,08(04)	7,288(01)	9322(23)	3,35(01)				

Таблица 4 — Параметры линий  $\mathrm{H^{13}CN}$ ,  $\mathrm{HCO^{+}}$  и  $\mathrm{HC^{18}O^{+}}$ .

Источник		$\rm H^{13}CN$		HCO <sup>+</sup> HC <sup>18</sup> C			$\mathrm{HC^{18}O^{+}}$	+		
	V,	I,	$\Delta V,$	V,	I,	$\Delta V,$	ν,	I,	$\Delta V,$	
	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	
S255IR	10,09(10)	355(30)	2,32(19)							
W217	9,05(03)	722(18)	2,64(06)	8,53(01)	13752(89)	$3,\!96(01)$				
W40				4,41(01)	4894(21)	1,56(01)				
$G34.40{+}0.23$				$59,\!29(08)$	1086(27)	8,49(19)				
$G34.26{+}0.15$				$56,\!68(01)$	5879(26)	2,86(02)				
$G37.43 {+} 1.51$				44,04(01)	9309(29)	$3,\!49(01)$				
$G58.47{+}0.43$				36,10(01)	3679(35)	$3,\!20(03)$				
S88B				22,08(01)	5055(38)	4,31(02)				
G65.78-2.61	5,51(07)	319(14)	3,07(12)							
G69.54-0.98	11,17(08)	341(13)	3,88(13)							
$G77.46{+}1.76$	1,33(06)	371(16)	2,56(10)	1,98(01)	4864(25)	$6,\!31(03)$				
G75.78-0.34	-3,99(03)	230(8)	4,20(14)	0,15(03)	2701(100)	$11,\!53(13)$				
$G79.27{+}0.39$				1,45(01)	1135(8)	2,17(02)				
$G79.34{+}0.33$				-0,72(04)	1318(21)	2,56(09)				
W75N	8,96(03)	812(11)	3,79(05)	9,59(01)	8940(75)	6,03(03)	8,78(12)	172(10)	4,07(29)	
W75(OH)	-3,94(05)	958(16)	4,67(08)	-3,35(01)	18596(196)	5,03(02)	-3,49(18)	257(26)	3,76(44)	
W75S3	-4,62(03)	439(8)	2,71(05)	-3,58(02)	7294(314)	4,40(04)	-4,28(09)	184(18)	1,93(22)	
$G92.67{+}3.07$	-6,77(03)	527(13)	2,21(06)	-6,99(01)	7045(14)	$2,\!89(01)$				
$G99.98{+}4.17$	0,11(04)	388(13)	2,43(08)	-0,04(02)	4675(293)	1,48(01)				
S140	-7,31(02)	724(9)	2,63(03)	-7,07(01)	14820(16)	2,99(01)				
G109.87 + 2.11	-3,67(08)	402(15)	4,01(14)	-4,03(02)	5463(117)	$7,\!64(05)$				
G108.76-0.95	$-51,\!68(07)$	122(6)	2,56(13)	-51,33(01)	5027(89)	$3,\!19(02)$				
S153	-52,09(10)	228(14)	3,24(17)	-51,21(02)	3619(423)	4,11(12)				
S152(OH)	-52,27(08)	268(13)	8,93(12)							
S156				-52,92(01)	3833(217)	4,36(07)				
$G111.54{+}0.78$	-58,62(03)	736(12)	3,89(06)	-59,14(01)	7840(9)	5,19(01)				

Таблица 4 – продолжение

Источник	H <sup>13</sup> CN				$\mathrm{HCO}^+$		$\mathrm{HC^{18}O^{+}}$		
	ν,	Ι,	$\Delta V,$	ν,	Ι,	$\Delta V,$	V,	Ι,	$\Delta V,$
	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с	км/с	мК	км/с
S158	-57,67(04)	795(11)	4,81(07)	-58,33(01)	8229(12)	4,46(01)			

Таблица 4 – продолжение

# 2.3 Обсуждение результатов наблюдений

# 2.3.1 Кинематика ядер

Карты интегральных интенсивностей отдельных молекулярных линий приведены на Рис. 2.4 и Рис. 2.5. Для объекта 37.427+1.518 картировалась только центральная часть области. На картах указаны позиции источников IRAS, источников мазерного, инфракрасного и субмиллиметрового излучения.



Right ascension

Рисунок 2.4 — Спектральная карта объекта G77.46+1.76 в линии HCN (1-0) с вписанной моделью (красным) по методу, приведенному в Гл.1.3. Изолинии и оттенки серого соответствуют излучению пыли на длине волны 0.85 мм [60]

В большинстве случаев на картах в различных линиях видны компактные области повышенной интенсивности, пространственно коррелирующие друг с



# Right Ascension (2000.0)

Рисунок 2.5 — Спектральная карта объекта G121.30+0.66 в линии H<sup>13</sup>CN (1–0) с вписанной моделью (красным) по методу, приведенному в Гл.1.3. Изолинии и оттенки серого соответствуют излучению пыли на длине волны 0.85 мм [60]

другом и, очевидно, связанные с областями повышенной плотности (плотными ядрами). В большинстве случаев источники IRAS, мазерные и иные источники концентрируются вблизи центров ядер, указывая на начавшийся в них процесс звездообразования. Излучение NH<sub>2</sub>D в меньшей степени коррелирует с излучением других молекул [10].

В четырех объектах форма ядер близка к сферически-симметричной. Карты молекулярного излучения в 34.403+0.233 (темное инфракрасное облако G034.43+00.24) обладают вытянутой формой в направлении север-юг. Некоторые отличия карт излучения в различных молекулярных линиях в данном объекте могут быть связаны с тем, что ядро состоит из двух пространственно неразрешенных при наших наблюдениях компактных сгустков с различным химическим составом [61]. В объекте 99.982+4.17 ядро расположено в южной части исследованной области. К северу от ядра наблюдается достаточно протяжённая и, по-видимому, более разреженная область [10].

В ядре G77.46+1.76 наблюдаются признаки вращения по направлению оси на юго-восток (PA~54°), как видно из рис. 2.6



Рисунок 2.6 — Диаграмма позиция - скорость в линии молекулы CS в направлении наибольшего градиента первого момента линии в объекте G77.46+1.76. На левой панели приведена карта нулевого момента в линии HCO<sup>+</sup> (1–0) и приведено направление среза. На правой панели приведена диаграмма позиция-скорость в линии молекулы CS.

## 2.3.2 Особенности региона G192.76

Мы провели картирование объекта G192.76 на телескопе IRAM в широком поле зрения в линиях <sup>12</sup>CO(2–1), C<sup>18</sup>O(2–1), <sup>13</sup>CO(2–1), CS(5–4), CH<sub>3</sub>CCH(13–12). На спектрах линии <sup>13</sup>CO (2–1) обнаружены 4 кинематические компоненты, как видно из Рис. 2.7. Компонента на скорости 14 км с<sup>-1</sup> довольно узкая (ширина на половинном уровне  $\approx 0.65$  км с<sup>-1</sup>), и относится, по всей видимости к другому рукаву Галактики. Остальные 3 компоненты на скоростях 4-10 км/с кинематически близки к газу, зарегистрированному в комплексе S254-S258 [62]. Наличие двух компонент, по всей вероятности, связано с самопоглощением в нем, так как провал в <sup>12</sup>CO находится на той же скорости, что и пик спектра в других изотопологах молекулы. На Рис. 2.8 представлена поканальная карта в этой линии. Наблюдается признаки истечений, индикаторами которых являются избыток излучения в крыльях линии.



Рисунок 2.7 — Спектр линии <sup>12</sup>CO (2–1), усреднённый по центральной области (6:13:40, +17:54:40 радиус=60") и вписанные в него гауссовы компоненты.

Морфология компонент весьма однозначна. Мы наблюдаем вытянутую структуру в направлении север-юг с ответвлением на запад, в направлении ионизированной зоны S258. В целом она повторяет представленную в [63] картину, с тем исключением, что относительно плотный газ имеет больший размер в сечении поперек вытянутости. На

Мы провели повторный расчет кинетической температуры (в предположения термализованности молекул CO) и количества молекул на луче зрения аналогично [8] и получили отличные оценки. Была проведена поточечная аппроксимация карты источника 4-мя гауссовыми компонентами, оценена антенная температура компонент в диапазоне скоростей 7-10 км с<sup>-1</sup>, на основе которой оценена температура газа. Мы предполагали термализованность, однородность и большую оптическую толщину газа. Результат представлен на Рис. 2.9. Однако, сделанная нами оценка, хоть и ближе приведенной в работе [8] к оценкам кинетичекой температуры, которая предполагается равной температуре пыли рассчитанной из результатов наблюдений на обсерватории Гершеля [63], все же отличается от нее (Рис. 2.10). Оценки разными методами для диапазона тем-



Рисунок 2.8 — Поканальная карта источника G192.76 интенсивности в линия ях <sup>12</sup>CO(2–1) (цветом), изофоты излучения в линии <sup>13</sup>CO(2–1) представлены контурами белого.

ператур до ~20 К близки. Оценки выше ~ 30 К (по <sup>12</sup>CO), обнаруживаемые в направлении около ионизированных зон S255 и S258, отличаются друг от друга. Подобное различие обусловлено как принятыми допущениями, так и отличиями в физике нагрева пыли и газа.



Рисунок 2.9 — Кинетическая температура газа по оценке из линии CO(2–1).



- Представлены наблюдения ~ 50 протозвездных ядер. Для части из них были построены подробные 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 источников 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 обнаружено вращение.
- G192.76+00.10 имеет сложную, ветвящуюся структуру. Присутствуют как общие градиенты скорости газа, так и локальные неоднородности.
   Зарегистрированы плотные сгустки, в направлении которых наблюдаются вложенные ИК источники, ассоциируемые с протозвездами. Оце-



Рисунок 2.10 — Поточечное сравнение оценок температуры возбуждения по данным в линии <sup>12</sup>CO (2–1) и оценки темпрературы пыли по данным Гершеля из работы [63]

нена кинетическая температура газа, значения находятся в пределах 15-40K с медианой в 23K.

# Глава 3. Кинематика ядра L1287

Исследования структуры и кинематики плотных ядер молекулярных облаков дают информацию о начальных условиях и ранних стадиях процесса звездообразования, которая используется в теоретических моделях. Это является особенно важным при изучении областей образования массивных звезд и звездных скоплений, сценарий эволюции которых в настоящее время только разрабатывается (см., напр., [18; 64]). Согласно данным наблюдений массивные звезды ( $\gtrsim 8 \,\mathrm{M}_0$ ) и звездные скопления образуются в близких к вириальному равновесию плотных ядрах, находящихся в массивных газо-пылевых комплексах и сгустках, имеющих форму волокон (см., напр., [65-69]). Существующие теоретические модели звездообразования используют различные предположения о начальном состоянии ядер. Так, в модели изотермической сферы, применяемой для описания образования изолированных звезд малой массы [70; 71], предполагается, что квазиравновесное сферическое ядро с профилем плотности Боннора-Эберта (с плоским участком вблизи центра и близким к  $\propto r^{-2}$  внутри оболочки) эволюционирует к состоянию с сингулярностью в центре (протозвезда), после чего начинается коллапс, который распространяется изнутри наружу ("insideout"). В модели турбулентного ядра [15], предложенной для описания образования массивных звезд и звездных скоплений, в качестве начального состояния также рассматривается сфера в гидростатическом равновесии, находящаяся в условиях, в которых развивается сверхзвуковая турбулентность, с характерным профилем плотности скорости в области, профили плотности и скорости в области, где газ коллапсирует на протозвезду, как в модели изотермической сферы, так и в модели турбулентного ядра имеют вид  $\propto r^{-3/2}$  и  $\propto r^{-1/2}$ , соответственно. Как показано в работе [73], данные профили не зависят от уравнения состояния в ядре.

Альтернативная модель глобального иерархического коллапса [74] исходит из того, что ядра, как и родительские облака, являются неравновесными объектами, находящимися в процессе глобального коллапса еще до формирования протозвезды, а наблюдаемая близость их к состоянию вириального равновесия происходит, в частности, из-за близости скорости свободного падения к вириальной. В данной модели, основанной на классических работах Ларсона и Пенстона [75; 76], после формирования протозвезды профиль плотности в оболочке имеет вид  $\propto r^{-2}$ , а скорость сжатия не зависит от радиального расстояния (см., напр., [74; 77]). Вблизи протозвезды, где происходит коллапс, радиальные профили плотности и скорости сжатия такие же, как и в моделях изотермической сферы и турбулентного ядра. Таким образом, для того, чтобы сделать выбор между указанными моделями, информации о профиле плотности недостаточно, необходимо, в первую очередь, оценить профиль скорости во внешних областях ядер.

Кинематику ядер оценивают, в основном, по данным наблюдений в молекулярных линиях. Наличие систематических скоростей на луче зрения приводит к смещению центров оптически толстых и тонких линий (см., напр., [78]) и к появлению асимметрии на спектрах оптически толстых линий за счет поглощения излучения внутренних слоев внешними и эффекта Доплера (см., напр., [79; 80]). Усредненное значение скорости сжатия ядра можно оценить в рамках более или менее простых моделей из наблюдений асимметричной линии в одной точке (см., напр., [81-84]). Для оценки радиального профиля систематической скорости необходимо моделировать перенос излучения в ядре, и сопоставлять модельные и наблюдаемые спектры в разных точках карты, одновременно рассчитывая или задавая профили других физических параметров. Методы автоматического вписывания модельных спектральных карт в наблюдаемые в случае нескольких свободных параметров на сегодняшний день используются редко (напр., [32]). Обычно исследователи сравнивают спектры, наблюдаемые в отдельных точках, с модельными, реже спектральные карты, варьируя одиндва параметра и считая остальные заданными на основании независимых наблюдений, предсказаний теоретических моделей или результатов предварительных расчетов (см., напр., [85—90]). Систематическая скорость сжатия при этом считается либо постоянной, либо используется радиальный профиль  $\propto r^{-1/2}$ . Сложность нахождения оптимальных значений при одновременном варьировании нескольких параметров связана с тем, что функция ошибки может иметь более одного локального минимума, а сами параметры могут коррелировать друг с другом, что приводит к зависимости от начальных условий и плохой сходимости. Использование специальных методов поиска глобального минимума функции ошибки (например, метода дифференциальной эволюции [91] или использование цепочек Маркова [32]) в случае модели с несколькими свободными параметрами неизбежно приводит к существенным вычислительным затратам.

Для анализа экспериментальных данных в последнее время успешно применяется метод главных компонент (ГК) [47]. Он предполагает преобразование некой выборки к такому оптимальному базису, линейные связи между базовыми векторами которого исключены. Это позволяет представить исходную выборку в меньшем базисе, то есть снизить размерность исходной выборки. Данный метод нередко используется для снижения размерности астрономических данных (см., напр., [92] и ссылки в этой работе), однако его также можно применить к результатам модельных расчетов, снизив размерность модели и определив область значений параметров вблизи минимума функции ошибки. Точные значения модельных параметров, соответствующие минимуму функции ошибки, можно рассчитать с помощью метода регрессии. В частности, весьма удобным для этой цели представляется метод k-ближайших соседей (kBC) [44]. Он является аналогом метода наименьших квадратов, но в отличие от последнего позволяет выбрать из набора моделей те, что соответствуют данным наблюдений по критерию минимума квадрата ошибки. Подробное описание метода представлено на главе 1.3

Целью настоящей работы является применение описанного в главе 1.3 алогритма к данным наблюдений в ядре L1287 с целью оценки профилей физических параметров и сопоставлением оценок с предполагаемыми в различных сценариях эволюции подобных ядер. В данном объекте формируется скопление звезд малой и промежуточной масс, а наблюдаемые профили оптически толстых линий обладают асимметрией, характер которой указывает на сжатие (см., напр., [93]). Для анализа были использованы данные наблюдений в линиях HCO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0), которые являются индикаторами газа с высокой плотностью ( $\gtrsim 10^5$  см<sup>-3</sup>, [79]), а также линий изотопов этих молекул. Наблюдения в различных линиях молекул HCO<sup>+</sup> и HCN нередко используются для поиска массивных ядер с систематическими движениями на луче зрения (см., напр., [94—98]). Линия HCN(1-0), однако, для этих целей используется реже. Она обладает тремя сверхтонкими компонентами с различной оптической толщиной и отношениями интенсивностей, отличающимися от случая локального термодинамического равновесия (ЛТР), наблюдаемые профили которых могут перекрываться. Для определения параметров физической и кинематической структуры ядер по данным HCN(1-0) необходимо использовать не-ЛТР модели (см., напр., [99; 100]). В настоящей работе для расчета возбуждения HCO<sup>+</sup>, HCN и их изотопов использовалась 1D микротурбулентная сферически-симметричная

не-ЛТР модель, в которой физические параметры, включая систематическую скорость, являлись функциями расстояния от центра.

Глава состоит из четырех разделов. В разделе 3.1.1 дается сводка наблюдательных данных и физических свойств ядра L1287. Применение алгоритма к данным наблюдений L1287 и результаты оценки физических параметров приведены в разделе 3.1.2. Обсуждение результатов и выводы представлены в разделах 3.2 и 3.3, соответственно. Основные результаты исследований опубликованы в работах *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; Многочастотные исследования массивных ядер со сложной пространственно-кинематической структурой / Л. Е. Пирогов [et al.] // Астрономический Журнал. 2016. Т. 93, № 10. С. 871—891.

# 3.1 Оценка физических параметров ядра L1287

## 3.1.1 Наблюдательные проявления L1287

Темное облако L1287 расположено на расстоянии  $0.93 \pm 0.03$  кпк [101] и имеет форму волокна длиной ~ 10 пк. Карта излучения пыли в континууме на длине волны 500 µm, полученная на телескопе *Herschel* в направлении L1287 (observation ID: 1342249229, [102]), приведена на рис. **3.1** (цвета различных оттенков). В центральной части облака расположено ядро повышенной плотности, в котором находится источник IRAS 00338+6312 ( $L \sim 10^3 L_0$ , [93]). В ядре также обнаружены два объекта типа FU Ori (RNO 1B/1C) [103—105], а также скопление ИК и радиоисточников, которые, вероятно, связаны с молодыми звездными объектами малой и промежуточной массы [105; 106]. Здесь же обнаружены мазерные линии молекул воды [107] и метанола [108]. Наблюдения в молекулярных линиях [93; 109; 110] показали наличие биполярного истечения в направлении на северо-восток и на юго-запад. По данным наблюдений в линии H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0) в работе [111] сделан вывод о наличии в центральной части ядра вращающегося диска радиусом ~ 7800 а.е., вдоль оси которого направлено биполярное



Рисунок 3.1 — Карта темного облака L1287 на длине волны 500 µm по данным наблюдений на телескопе *Herschel*. Изолинии интегральной интенсивности линии HCO<sup>+</sup>(1–0) соответствуют значениям 20% и 50% от максимума (38.6 K км/c) [10]. Звездочкой показан источник IRAS 00338+6312.

истечение. По данным интерферометрических наблюдений внутренняя часть ядра ( $\leq 0.1$  пк) сильно фрагментирована [112; 113]. В работе [113] была предложена кинематическая модель центральной части ядра L1287, согласно которой движения газа, направленные к центру из внешних областей ядра, становятся неизотропными вблизи центра и переходят во вращение диска. Размеры областей излучения ядра L1287 в различных молекулярных линиях и в континууме варьируют в диапазоне от нескольких десятых до одного парсека [93; 114—117], форма областей излучения в целом близка к сферически-симметричной. Профили оптически толстых линий в ядре L1287 асимметричны и имеют два пика, разделенные провалом, причем амплитуда голубого пика на большей части карт выше, чем у красного [86; 93; 114].

Ядро L1287 наблюдалось в 2015 году на радиотелескопе OSO-20m. Подробное описание наблюдений находится в разделе 2.1. Были проведены наблюдения в различных молекулярных линиях в диапазоне частот ~ 85 - 89 ГГц [10]. Угловое разрешение при наблюдениях составляло ~ 42'', что соответствовало линейному разрешению ~ 0.19 пк. Изолинии интегральной интенсивности линии HCO<sup>+</sup>(1–0), наложенные на карту *Herschel*, приведены на рис. 3.1. Наблюдавшиеся практически во всей области (~ 0.9 пк) асимметричные профили HCO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0) и симметричные профили оптически тонких линий, пики интенсивности которых близки к положению провалов на профилях оптически толстых линий, по всей вероятности, указывают на сжатие газа.

#### 3.1.2 Анализ карт ядра L1287 в различных молекулярных линиях

Алгоритм, изложенный в разделе 1.3, был применен для оценки физических параметров ядра L1287. Для этого проводилось вписывание карт в линиях  $HCO^{+}(1-0)$ ,  $H^{13}CO^{+}(1-0)$ , HCN(1-0) и  $H^{13}CN(1-0)$ , рассчитанных в рамках 1D микротурбулентной модели (см. Приложение), в центральную часть наблюдаемой области с угловым размером 80" (~ 0.4 пк). Физические параметры (плотность, турбулентная, систематическая скорость и кинетическая температура) зависели от расстояния от центра r по закону:  $P = P_0/(1 + (r/R_0)^{\alpha_p})$ , где *R*<sub>0</sub> есть радиус центрального слоя. Свободными параметрами модели являлись величины P<sub>0</sub> для радиальных профилей плотности, турбулентной и систематической скоростей  $(n_0, V_{turb}, V_{sys})$ , соответственно), степенные индексы  $\alpha_p$   $(\alpha_n,$  $\boldsymbol{\alpha}_{turb}, \, \boldsymbol{\alpha}_{sys}),$  а также относительные распространенности молекул (X), не зависящие от радиального расстояния, и внешний радиус ядра (R<sub>max</sub>). Профиль кинетической температуры задавался в виде  $T = 80 \text{ K}/(1 + (r/R_0)^{0.3})$  и не менялся в процессе расчетов. При этом кинетическая температура изменялась в диапазоне от 40 K в центральном слое до $\lesssim 20$  K на периферии, что в целом соответствует оценкам по данным наблюдений (см., напр., [10; 114; 115; 117]). Хотя температуры пыли в L1287 по данным наблюдений *Herschel* составляют  $\sim 15-24$  K (http://www.astro.cardiff.ac.uk/research/ViaLactea/ [63]), данные интерферометрических наблюдений указывают, что во внутренних областях ядра L1287 ( $\lesssim 0.1$  пк), где сильны эффекты фрагментации, кинетическая температура фрагментов может достигать  $\sim 80 - 100$  К (см. Рис. 10 из работы [112]). Таким образом, в расчетах значение 40 К было принято в качестве усредненного значения кинетической температуры в центральном слое, радиус которого  $(R_0)$  задавался равным  $2 \times 10^{16}$  см (~ 1300 a.e.).

Значения лучевой скорости и координат центра ядра были оценены по линии H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0). Далее для поиска минимума функции ошибки была использована карта в линии  $\text{HCO}^+(1-0)$ . С помощью генератора случайных чисел был создан массив из 6000 значений параметров, которые были случайно и равновероятно распределены в следующих диапазонах восьми параметров:  $n_0 = [10^{6.5}...10^9]$  см<sup>-3</sup>,  $\alpha_n = [1.3...2.5]$ ,  $V_{turb} = [1.4...7.5]$  км/с,  $\alpha_{turb} = [0.1...0.7]$ ,  $V_{sys} = [-1.3...-0.2]$  км/с,  $\alpha_{sys} = [-0.2...0.4]$ ,  $X(\text{HCO}^+) = [10^{-10.5}...10^{-8}]$ ,  $R_{max} = [10^{17.7} - 10^{19.2}]$  см. Хотя предполагалось, что данные диапазоны заведомо включают в себя оптимальные значения параметров для ядра L1287, их границы не являлись жесткими и могли быть расширены при обратном преобразовании из пространства ГК.

Для каждого значения массива параметров рассчитывалась карта в линии НСО<sup>+</sup> (1–0) и функция ошибки. В соответствии с принятым критерием:  $\chi^2 \leq \chi_{min}(3\sigma_{obs})^2$  из первоначального множества было отобрано 246 значений. Данного количества было достаточно для построения статистики в пространстве главных компонент. Для этих значений с помощью процедуры из библиотеки scikit-learn [46] были вычислены коэффициенты преобразования в пространство главных компонент. С помощью графика зависимости величины R (отношения суммы диагональных компонент матрицы ковариации ГК к сумме диагональных компонент матрицы ковариации физических параметров), от количества компонент было оценено минимальное достаточное количество ГК, необходимое для представления физических параметров (рис. 3.2). Из рис. 3.2 видно, что 5 главных компонент представляют 8 физических параметров в достаточной мере на уровне R = 0.9. Для пяти главных компонент отличие после обратного преобразования не превышало 5% от шага сетки для всех параметров, что не предполагает искажения дальнейших расчетов и накопления ошибки и оценивалась по методу, который представлен в разделе 1.3.2. На рис. 3.2 также показан вклад каждой отдельной компоненты в относительную матрицу ковариации ГК.

В пространстве оставшихся пяти главных компонент была построена равномерная 5-мерная сетка, центр которой находился в точке с наименьшей величиной функции ошибки, размер сетки соответствовал  $6\Delta(pc_i)$ , где  $\Delta(pc_i)$  представляет собой среднеквадратичное отклонение значений *i*-й компоненты, вычисленное по отобранному множеству точек. Массив значений ГК был пересчитан к массиву значений физических параметров, для которых были рассчитаны спектральные карты и оценены функции ошибки. Из рассчитанных модельных карт методом kBC было оценено значение оптимальных физических параметров по данным HCO<sup>+</sup>(1–0). Варьируя с помощью метода наименьших квадратов значения относительных содержаний H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>, HCN и H<sup>13</sup>CN, мы вписали соответствующие модельные спектральные карты в наблюдаемые. При этом также происходила небольшая подгонка параметров в пределах диапазонов погрешностей, рассчитанных по данным HCO<sup>+</sup>(1–0). На основе сравнения набора модельных спектральных карт с наблюдаемыми была оценена общая по четырем линиям функция ошибки по формуле (1.10). Полученные модельные спектры для всех четырех линий оказались близки к наблюдаемым вплоть до масштабов  $\sim 0.8$  пк, что подтверждало адекватность использованной модели.

На рис. 3.3 представлен набор проекций 8-мерной функции ошибки на плоскости различных пар параметров, а также графики зависимости проекции функции ошибки от каждого из параметров. Из двумерных проекций и графиков следует, что модель имеет глобальный минимум, и для каждого параметра можно определить уровень доверительности. Некоторые параметры коррелируют друг с другом. Отчетливая корреляция наблюдается между  $R_{max}$ и относительной концентрацией  $\mathrm{HCO}^+$  (X<sub>0</sub>), между  $\alpha_n$  и X<sub>0</sub>, а также между турбулентной и систематической скоростями в центральном слое и соответствующими степенными индексами радиальных профилей этих величин. Более слабая корреляция существует между  $\alpha_n$  и  $n_0$ , а также между  $R_{max}$  и  $\alpha_n$ . Точное положение минимума оценивалось методом kBC по всем линиям, оно отмечено красным крестиком на двумерных проекциях и красной вертикальной линией на графиках зависимости проекций  $\chi^2$  от отдельных параметров. Доверительные области были рассчитаны с использованием сечения функции ошибки гиперплоскостью  $\chi^2_{\sigma}$ . Проекции сечений функции ошибки гиперплоскостью  $\chi^2_{\sigma}$ представляют собой контуры на плоскостях пар параметров, им соответствуют горизонтальные линии на графиках (см. рис. 3.3). Доверительные области не симметричны относительно оптимальных значений. Искажения формы контуров связаны с шумами наблюдений и дискретностью заполнения пространства параметров. При анализе зависимостей  $\chi^2$  от отдельных параметров в более широких диапазонах, чем представлены на рис. 3.3, обнаружены дополнительные локальные минимумы, значения в которых, однако, выше значения, соответствующего глобальному минимуму, а соответствующие значения параметров существенно расходятся с независимыми оценками.

Оценки физических параметров ядра L1287, соответствующие глобальному минимуму функции ошибки, а также неопределенности этих оценок, соответствующие границам доверительных диапазонов (рис. 3.3), приведены в табл. 5. Заметим, что в соответствии с заданным видом радиальных профилей значения физических параметров в центральном слое вдвое ниже соответствующих значений  $n_0$ ,  $V_{turb}$  и  $V_{sys}$ .

### 3.2 Обсуждение результатов

На рис. 3.4, 3.5 показаны спектральные карты центральной части ядра L1287 (~ 0.4 пк) в линиях HCO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0), H<sup>13</sup>CO+(1–0) и H<sup>13</sup>CN(1–0) со вписанными модельными спектрами, соответствующими глобальному минимуму функции ошибки. Асимметрия и провал на наблюдаемых профилях оптически толстых линий HCO<sup>+</sup>(1–0) и HCN(1–0) хорошо воспроизводится моделью. В центральной и юго-западной частях анализируемой области на спектрах оптически толстых линий заметно излучение высокоскоростного газа, которое не учитывалось в модельных расчетах. Небольшое расхождение между модельными и наблюдаемыми спектрами на краях рассматриваемой области может быть связано с отличием от сферической симметрии. Диаметр модельного облака (1.6 пк) превышает наблюдаемые размеры областей излучения в различных молекулярных линиях, индикаторах плотного газа HCO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0) и NH<sub>3</sub>(1,1) (~ 0.3–0.5 пк) [10; 114; 115], поскольку включает в себя внешние слои с низкой плотностью, которые обуславливают провал на профилях оптически толстых линий, поглощая излучение от центральных слоев.

Рассчитанные физические параметры ядра с учетом погрешно-(см. табл. 5) согласуются с оценками, стей полученными ИЗ незанаблюдений. висимых данных Так, модельная лучевая концентрация 20''молекулярного водорода области радиусом  $\sim$ согласуется ДЛЯ рассчитанным по данным наблюдений coзначением, пыли на теле-(http://www.astro.cardiff.ac.uk/research/ViaLactea/ Herschel, скопе |63| $(4.6(-2.3/+3.0) 10^{23}$  см<sup>-2</sup> и  $1.8(1.2) 10^{23}$  см<sup>-3</sup>, соответственно). Масса ядра, рассчитанная из модели для области радиусом  $\sim 0.6$  пк, составляет  $\sim 1200 \text{ M}_0$ , что с учетом погрешности ( $\gtrsim 50\%$ ), связанной, в первую очередь, с погрешностью величины  $n_0$ , согласуется со значением 810 М<sub>0</sub>, полученном из наблюдений пыли для области с близким радиусом [117]. Степенной индекс радиального

профиля плотности 1.7(-0.3/+0.1) также не противоречит значению 1.25(0.2), полученному из наблюдений пыли в континууме [117]. Обе эти оценки лежат в диапазоне значений степенного индекса профиля плотности, полученном для выборок плотных ядер, связанных с областями образования массивных звезд и звезд в скоплениях (см., напр, [117—119]), однако ниже значения 2, предсказываемого моделями изотермической сферы [70] и глобального коллапса [74].

Отношения модельных распространенностей основных и более редких изотопов ([HCO<sup>+</sup>]/[H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>] и [HCN]/[H<sup>13</sup>CN]) в ~ 2 раза ниже, чем значение отношения изотопов [<sup>12</sup>C]/[<sup>13</sup>C]~ 58, рассчитанное из гелиоцентрической зависимости этого отношения [120] для  $R_G \sim 9$  кпк (L1287). Неопределенности отношений модельных распространенностей, однако, достаточно высоки ( $\gtrsim 80\%$ ), чтобы делать дальнейшие выводы из данного расхождения. Работа по уточнению оценок распространенности была проведена путем включения наблюдений в других переходах, а также включением линий других молекул но на данный момент не представлена.

Турбулентная скорость достаточно резко спадает с расстоянием от центра (от 2.8 км/с в центральном слое до ~ 0.6 км/с во внешнем), что необходимо для воспроизведения формы провала на спектрах  $\text{HCO}^+(1-0)$  и HCN(1-0) (сплошная кривая 1 на рис. 3.6, правая панель). Скорость сжатия по абсолютной величине слабо убывает с расстоянием от центра (~ 0.33 км/с в центральном слое и ~ 0.25 км/с во внешнем слое) (пунктирная кривая 1 на рис. 3.6, правая панель). Ее среднее значение по модельному облаку составляет ~ 0.26(0.09) км/с, что не противоречит значению ~ 0.22 км/с, рассчитанному из параметров линии  $\text{HCO}^+(1-0)$  для точки (60″,40″) по формуле двухслойной модели [81] (значение, приведенное в работе [10], является заниженным).

Степенной индекс радиального профиля скорости сжатия, полученный в модельных расчетах с учетом погрешностей, оказался меньше значения 0.5 для случае коллапса газа на протозвезду в режиме свободного падения [15; 70; 74]. В работе [86] было проведено сравнение данных наблюдений ядра 0038+6312 (L1287) в линиях HCO<sup>+</sup>(1–0), CS(2–1 и 5–4) с результатами расчетов для модели с профилями плотности и скорости сжатия  $\propto r^{-3/2}$  и  $\propto r^{-1/2}$ , соответственно. Хотя интенсивности и ширины модельных спектров оказались в неплохом согласии с наблюдаемыми в направлении отдельных позиций с учетом чувствительности и спектрального разрешения использованных данных, провал на про-

филе линий HCO<sup>+</sup>(1–0) не был воспроизведен (см. Fig.4 из работы [86]). Это связано с различием радиальных профилей скорости, принятых в модели [86], и профилей, полученных в наших расчетах (рис. 3.6, правая панель). На левой панели рис. 3.6 приведены радиальные профили плотности и кинетической температуры для нашей модели и модели [86].

Как показано в модели глобального иерархического коллапса (см., напр., [74; 77]), если ядро глобально неравновесно, в нем будет происходить сжатие с постоянной скоростью, которое сохраняется во внешних слоях и после формирования протозвезды. Для сравнения нами было проведено вписывание модельных карт в наблюдаемые для случая, когда степенной индекс радиального профиля систематической скорости имел фиксированное значение 0.5. Соответствующий профиль скорости обозначен индексом 1А на рис. 3.6 (правая панель). На рис. 3.7 приведены наблюдаемые линии HCO<sup>+</sup>(1–0) и HCN(1–0) для точки (60",40") вблизи центра ядра и модельные спектры для значения степенного индекса систематической скорости 0.1, соответствующего глобальному минимуму функции ошибки, и для случая, когда индекс равен 0.5, соответственно. Из сравнения спектров видно, что модель с индексом 0.1 более точно воспроизводит интенсивности и ширины асимметричного профиля HCO<sup>+</sup>(1–0) и, в особенности, профилей трех сверхтонких HCN(1–0), чем модель с индексом 0.5. Аналогичный вывод справедлив и для других точек, хотя в юго-западной части высокоскоростное излучение, связанное с биполярным истечением, сильнее искажает форму спектров (рис. 3.4), что затрудняет сравнение моделей. Тот факт, что полученное в модели со степенным индексом профиля скорости в качестве свободного параметра значение оказалось ниже значения 0.5, может указывать на вероятность существования в ядре неоднородного характера сжатия газа: с постоянной скоростью в протяженной оболочке и с профилем  $\propto r^{-1/2}$ в области вблизи центра. Использование модели с единым степенным индексом при этом случае дает взвешенное среднее значение по всему ядру.

Хотя использованная нами 1D модель с едиными степенными индексами радиальных профилей физических параметров является достаточно упрощенной, она позволила, используя разработанный алгоритм вписывания модельных спектральных карт в наблюдаемые с помощью методов ГК и kBC, достаточно хорошо воспроизвести наблюдаемые спектральные карты в линиях HCO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0), H<sup>13</sup>CO+(1–0) и H<sup>13</sup>CN(1–0) и оценить радиальные профили физических параметров во внешних областях ядра L1287 ( $r \gtrsim 0.1$  пк). Некоторые отличия между модельными и наблюдаемыми спектрами могут быть устранены, по-видимому, в рамках более сложных моделей с составными радиальными профилями параметров, а также 2D и 3D моделей, позволяющих учесть возможную пространственную неоднородность поля скоростей, вращение и высокоскоростные истечения. Для уменьшения погрешностей рассчитанных параметров и подтверждения вывода о возможном глобальном сжатии ядра L1287 необходимы дальнейшие наблюдения в молекулярных линиях, имеющих различную оптическую толщину, с лучшим пространственным и спектральным разрешением.

## 3.3 Основные результаты

- С помощью алгоритма описанного в главе 1.3 проведена оценка физических параметров протозвездного ядра L1287 путем вписывание модельных карт в линиях HCO<sup>+</sup>(1–0), H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0) и H<sup>13</sup>CN(1–0) в наблюдаемые карты. Рассчитаны оптимальные значения параметров 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.
- Оцененное 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 ряде теоретических работ.



Рисунок 3.2 — График зависимости отношения суммы диагональных компонент матрицы ковариации ГК к сумме диагональных компонент матрицы ковариации физических параметров от количества компонент (красные крестики). Зелеными кружками показан вклад в относительную матрицу ковариации ГК отдельной компоненты. Горизонтальная линия соответствует уровню отсечки 0.9.



Рисунок 3.3 — Проекции 8-мерной функции ошибки ( $\chi^2$ ) на плоскости различных пар параметров, рассчитанные по данным вписывания модельных спектральных карт в линиях HCN(1–0), HCO<sup>+</sup>(1–0), H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0) и H<sup>13</sup>CN(1–0) в наблюдаемые карты в ядре L1287. Над каждым столбцом проекций приведены графики зависимости функции ошибки от отдельного параметра. Красные точки на диаграммах и красные вертикальные линии на верхних графиках соответствуют глобальному минимуму функции ошибки, полученному из метода kBC. Доверительные области для оптимальных значений параметров, рассчитанные из сечения функции ошибки гиперплоскостью  $\chi^2_{\sigma}$ , показаны голубыми контурами и горизонтальными линиями на двумерных проекциях и одномерных графиках, соответственно.



Рисунок 3.4 — Результаты вписывания модельных спектров HCO<sup>+</sup>(1–0) и HCN(1–0) (плавные кривые) в наблюдаемые (гистограммы) в центральной части ядра L1287. По оси абсцисс отложены скорости в диапазоне [-33...-5] км/с.



Рисунок 3.5 — Результаты вписывания модельных спектров H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0) и H<sup>13</sup>CN(1–0) (плавные кривые) в наблюдаемые (гистограммы) в центральной части ядра L1287. По оси абсцисс отложены скорости в диапазоне [-28.5...-7] км/с.


Рисунок 3.6 — Модельные радиальные профили плотности и кинетической температуры (левая панель), скорости сжатия и турбулентной скорости (правая панель). Под цифрой 1 приведены профили, полученные в настоящей работе, под цифрой 2 приведены профили, использованные в работе [86]; радиус облака для этой модели принят равным 1.4 пк, что соответствует расстоянию 0.93 кпк до L1287. Под индексом 1А на правой панели показан профиль скорости сжатия, полученный в модели с фиксированным значением степенного индекса 0.5.



Рисунок 3.7 — Наблюдаемые и модельные профили линий HCO<sup>+</sup>(1–0) и HCN(1–0) в направлении позиции (60", 40") для моделей с различными значениями степенного индекса радиального профиля скорости сжатия.

Значение
$2.6^{+1.7}_{-1.3}$
$1.7^{+0.1}_{-0.3}$
$5.6^{+0.7}_{-1.4}$
$0.44_{-0.13}^{0.05}$
$-0.66^{+0.21}_{-0.24}$
$0.1\substack{+0.08\\-0.13}$
$0.8^{+0.2}_{-0.25}$
$1.0^{+0.5}_{-0.4}$
$3.7^{+2.4}_{-2.0}$
$2.5^{+1.4}_{-1.1}$
$8.5_{-4.8}^{+5.3}$

Таблица 5 — Полученные значения физических параметров

## Глава 4. Свойства оболочки зоны Н II S187

Расширение Н II областей считается одним из факторов, которые индуцируют образование звезд в межзвездной среде, в том числе как триггер образования звезд большой массы. Природа такого триггера может заключаться в накоплении газа оболочкой H II зоны в процессе ее расширения[20], а также компрессии газа окружающего вещества вследствие давления горячих слоев[21]. Динамика такого процесса обычно изучается на основе наблюдений в линиях переходов атомов CI/CII/OI [121-123]. Диссоциация молекулярного газа окрующего Н II зону в атомарный в область фотодиссоциации весьма естественна и предсказывается существующими моделями [124; 125]. Однако, представлено всего несколько наблюдений атомарной оболочки около Н II зон в линии нейтрального атомарного водорода [126—128]. Такая редкость связана со сложностями проведения наблюдений в линии нейтрального атомарного водорода (21 см, Н I). Излучение в линии Н I около ионизированной зоны обычно поглощается в толще Галактического газа, как правило неизбежно присутствующего на луче зрения на тех же скоростях. Оценки параметров атомарного водорода затруднены. Весьма сложно независимо оценить спиновую температуру и оптическую толщину, что приводит к ошибкам в оценках масс газа [129]. Спектры поглощения позволяют существенно уточнить оценки. По стечению обстоятельств, в направлении на некоторые источники присутствуют достаточно сильные радиоисточники, поглощение в линии Н Іпозволяет оценить оптическую толщину газа, и число молекул на луче зрения, как следствие[130].

Для изучения атомарного газа около Н II зоны требуются наблюдения линии Н I с высоким угловым разрешением, интерпретированные совместно с кинематикой, морфологией и свойствами остальных составляющих межзвездной среды и ионизированной зоны.

Ниже представлен подобный анализ для области S187 (Sh2-187, KR120, LBN 126.7-00.80). Регион S187 – Н II зона (Рис. 4.1), которая возбуждена кластером B0V звезд с сумарной светимостью в  $10^{47}$  фотонов/с, [128], исторически названным S187 В или BD52. Эта зона весьма молода, возраст ее оценивается в  $\simeq 5 \times 10^5$  лет [128]. Расстояние до объекта оценивается в  $1.4\pm0.26$  кпк по данным фотометрии [131] или в ~0.9 кпк используя данные Gaia DR2 и анализ в линиях CO связанных крупномасштабных структур [132]. Так как оценки доверительности последнего значения не приведены, мы принимаем расстояние в  $1.4\pm0.26$  кпс. Н II зона окружена оболочкой из атомарного и молекулярного газа [128; 133]. Ряд молодых звездных объектов обнаружен в направлении на оболочку [134; 135]. Зарегистрировано три источника мазерного излучения, включая два мазера ОН [136] и мазер H<sub>2</sub>O [137], ассоциирующийся с мазером CH<sub>3</sub>OH [138], свидетельствующие о протекающих процессах звездообразования в оболочке. Обнаружены два компактных радиоисточника, известные как радиогалактики [135; 139]. Ранее их ошибочно идентифицировали как ультракомпактные Н II области [140]. Эти источники имеют исторические названия S187-1(a&b) (NVSS 012258+614815, ABG85 94) и S187-2(a&b) (NVSS 012250+615451).

Предполагаемая причина образования источника IRAS 01202+6133 ( $M \sim 21 \text{ M}_{\odot}, L \sim 5600 \text{ L}_{\odot}$ ) заключается в расширении зоны S187 [25]. Также, известен источник S187H $\alpha$ , который имеет массу  $25\pm12 \text{ M}_{\odot}[142]$ . Истечение молекулярного водорода ассоциировано с S187H $\alpha$  [143]. Также, истечение в линии <sup>12</sup>CO зарегистрировано рядом с этим объектом. Мазерные пятна H<sub>2</sub>O [137; 144—146] и CH<sub>3</sub>OH [138] обнаружены вблизи S187H $\alpha$ , что является свидетельством протекающих процессов звездообразования. Обнаружен также мазер OH [136] к северу от IRAS 01202+6133, но нам не известно никаких детальных исследований, посвященных ассоциированному молодому звездному объекту. Трассеры плотного молекулярного газа обсуждались в работах Kang, Kerton [25] и Zinchenko, Caselli, Pirogov [147] (а также ссылки в них). Молекулярная часть оболочки также наблюдалась в линиях <sup>12</sup>CO, C<sup>18</sup>O и <sup>13</sup>CO (1–0) [133], с оценокй суммарной массы в 7600 M<sub>☉</sub>.

Многочастотное исследование области S187 и ее окружения было проведено Joncas, Durand, Roger [128], включая данные в линии H I с 1' угловым разрешением и 1.32 км с<sup>-1</sup> спектральным при чувствительности в 4.9 К. Н II область взаимодействует с окружающим ее нейтральным газом [128]. Ионизованная область окружена оболочкой, включающей газ H I. Атомарный газ негомогенен, имеет систематический градиент скорости. Общая оценка массы порядка 70 М<sub>☉</sub>. В области присутствует молодое звездное поколение, вероятно, связанное с эволюцией ионизированной области и ее оболочки[134; 139]. Излучение пыли сигнализирует о наличии двух типов частиц размеров больше 0.004 мкм [128]. В целом, окружение области S187 является хорошей целью для изучения



Рисунок 4.1 — Структура области S187 и его окружения. Излучение в континууме на частоте 1420 МГц GMRT обозначено красным, которое отражает распределение ионизированного газа. Яркие красные пятна относятся к радиогалактикам (S187-1(a&b) и S187-2(a&b)) Излучение 12 мкм WSSA отмечено серым и представляет область ФДО около ионизированной зоны. Белые контуры представляют излучение SCUBA 850 мкм, которое связяно с холодной пылью в молекулярном веществе. Мазеры паров воды [141] отмечены треугольником, ОН – перевернутым треугольником [136]. Объект S187 Н $\alpha$  отмечен звездочкой

взаимодействия ионизированного, атомарного и молекулярного газа, и влияния взаимодействия на процессы образования звезд.

В этом исследовании мы представляем новые данные с обсерватории GMRT в линии H I и континууме области S187. Данные включают два молекулярных ядра (S187 NE & S187 SE), находящиеся в оболочке около H II зоны. Эти ядра иллюстрируют различные фазы взаимодействия молекулярного, атомарного и ионизированного газа.

Глава состоит из четырех разделов. В разделе 4.1 дается сводка данных наблюдений используемых для анализа объекта. В разделе 4.2 представлено описание наблюдаемых проявлений источника. Оценки физических параметров приведены в разделе 4.3. Обсуждение результатов и положения представлены в разделах 4.4 и 4.5, соответственно. Основные результаты исследований опубликованы в работе Fragmented atomic shell around S187 H II region and its interaction with molecular and ionized gas / P. Zemlyanukha [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. Vol. 515, no. 2. P. 2445—2463.

## 4.1 Наблюдения и архивные данне

## 4.1.1 Линия HI и радиоконтинуум

Данные в линии 21 см были получены используя GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope, project 26\_012) 4 и 5 сентября 2014 года. Для наблюдений использовался основной спектральный приемник GMRT, настроеный на спектральное разрешение в 8.138 кГц (1.72 км с<sup>-1</sup>) что определило общую полосу приема в 4166.7 кГц. Источники 3C48, 0102+584, 0217+738, и 3C147 использовались в качестве калибровочных. 3C48 использовался в качестве калибровки шкалы потока, 3C48, 0102+548, и 0217+738 – для калибровки фазы. Линия поглощения 21 см была обнаружена в направлении на 3C147, 02117+738, 0102+584. Каналы, подверженные воздействию, были исключены при калибровке. Около 30% от всех данных были вручную отброшены вследствие наличия радиопомех в некоторых парах антенн. Калибровка проводилась в CASA [148]. Яркий компактный источник NVSS 012258+614815 использовался для фазовой самокалибровки. СКО изображения излучения в континууме равнялось 0.1 мЯн/луч в центре поля при восстановлении изображения с взвешиванием по Бриггсу. При этом размер осей эллипса, соответствующий срезу по половинному уровню синтезированной диаграммы направленности (FWHM), равнялся  $2.28 \times 2.1''$ , позиционный угол (ПУ): -2°. UV-сглаженное изображение в континууме было построено для того чтобы получить изображение с достаточным С/Ш для протяженных структур (FWHM:  $8.3 \times 7.0^{\circ}$ , ПУ: -10°, 0.7K CKO).

Два спектральных краты были восстановлены из набора калиброванных флагированных видностей с разными размерами диаграммамы направленности (д.н.). Один куб, восстановленный с д.н. взвешенной по Бриггсу (FWHM:  $2.7 \times 2.2''$ , ПУ. -13°) и другой с UV-сглаживаниеми естественным взвешиванием видностей ( $8.11 \times 7.28''$ , ПУ 7.4°) для достижения чувствительности к протяженным структурам. UV-сглаженные данные в линии 21 см были скомбинированы с данными обзора WSRT CGPS в линии H I [149] используя CASA sdintimaging [150] для заполнения пространства видностей. Сглаженное комбинированное изображение имело поканальное СКО около 3 K, взвешенные по Бриггсу данные GMRT имели чувствительность порядка 1 мЯн (80 K) для каждого канала.

## 4.1.2 Молекулярные линии

Новые наблюдения в линии HCO<sup>+</sup>(1–0) были получены в апреле 2021 года на 20-м телескопе обсерватории Онсала (проект O2020b-02). При наблюдениях использовался двухполяризационный приемник основанный на SIS смесителе в полосе 3 мм [151]. Линии регистрировались анализатором спектра на быстром преобразовании Фурье с разрешением в 76 кГц. Подобная конфигурация определяет разрешение ~ 0.26 км с<sup>-1</sup> в доплеровских скоростях на частоте 89.2 ГГц. Для улучшения чувствительности сигнал в обеих поляризациях был сложен при обработке данных, что увеличило чувствительность в  $\sqrt{2}$  раз. Наблюдения проводились в режиме частотной модуляции. Шумовая температура системы изменялась в диапазоне ~ 170 – 290 К в зависимости от погодных условий. Эффективность главного луча составляла ~ 0.44 для зенитного угла ~ 60° на котором наблюдался источник и была учтена при обработке. Ширина диаграммы направленности на половинном уровне (FWHM) телескопа OSO-20m на частоте 86 ГГц равна 43". Положение контррефлектора и ошибки наведения регулярно корректировались по наблюдениям мазеров SiO. Картирование проводилось с шагом в 20". Обработка проводилась в программе CLASS из пакета GILDAS <sup>1</sup>, XS <sup>2</sup>, и программ нашего авторства.

Линия CS(2–1) наблюдалась Д. Джонкасом. Данные были получены 30 ноября 1987 года на 14-м телескопе Радиоастрономической обсерватории пяти колледжей (FCRAO). Данные ранее не публиковались. Телескоп был оборудован охлаждённым 3-мм приёмником и цифровым спектральным анализатором с разрешением 50 кГц в 256 спектральных каналах. Погода была ясная, типичная системная температура была 400 К. Отдельные сканы обрабатывались в программе IRAF [152] из которых была составлена спектральная карта используя разработанную нами программу, основанную на пакете Astropy [43]. Спектральное разрешение равнялось 0.25 км с<sup>-1</sup> при угловом в 45 ″. Эффективность главного лепестка диаграммы направленности на этих частотах была принята как 0.48, что следует из обзора FCRAO GRS [153]. Мы предполагаем, что погрешность потока была менее 15%, также взятая из Arvidsson, Kerton [133]. Эти данные обладают большим покрытием, чем в линии CS (2–1) ранее представленные в работе Zinchenko, Caselli, Pirogov [147].

Наблюдения в линиях <sup>12</sup>CO (1–0), <sup>13</sup>CO (1–0) и C<sup>18</sup>O (1–0) были любезно предоставлены Крисом Ардвиссоном и были получены на 14 м телескопе FCRAO, обработка проводилась К. Брунт. Спектральное разрешение в данных равнялось 0.25 км с<sup>-1</sup> при угловом в 46 ″ [133]. Мы также использовали данные в линии <sup>12</sup>CO (1–0) из обзора FCRAO CGPS для изучения протяженных структур около региона S187. Данные в линии HCO<sup>+</sup> (1–0) в направлении источника IRAS 01202+6133 были взяты из работы Zinchenko, Caselli, Pirogov [147]. Они были получены на обсерватории Онсала. Спектральное разрешение равнялось 84 м с<sup>-1</sup> при СКО в 0.4 К.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS

 $<sup>^{2}</sup> https://www.chalmers.se/en/researchinfrastructure/oso/radio-astronomy/Pages/software.aspx$ 

## 4.1.3 Данные в ИК дипазоне

Мы использовали архивные данные из архива спутника WISE для изучения излучения пыли в регионе. Мы также использовали наблюдения спутника 2MASS (фотометрические полосы H и Ks) [154] совместно с WISE (в каналах 3.4, 4.6, 12 мкм) фотометрическими данными для классификации молодых звездных объектов. Мы использовали данные Spitzer IRSA (3.6, 4.5, 5.8 и 8 мкм), unWISE [155] (3.4 и 4.6 мкм) и WSSA (12 мкм) [156] из архивов для задач представления. Мы также использовали изображение SCUBA на длине волны 850 мкм из архива, описанное в [133].

## 4.2 Результаты наблюдений

Мы представляем результаты наблюдений в континууме на частоте 1420 МГц и в линии 21 см, как в поглощении так и в эмиссии. Сначала мы обсуждаем компактные структуры, а затем – протяженные структуры. Мы также представляем структуру, представленную излучением молекулярного газа, в дополнение к представленному в Arvidsson, Kerton [133].

# 4.2.1 Радиоконтинуум

Структура континуума на частоте 1420 МГц согласуется с предыдущими исследованиями [133; 139]. Шесть компактных источников обнаружены в поле наблюдений, пять расположены рядом с Н II зоной S187 (Рис. 4.1), четыре из них обнаруживаются в каталоге NVSS. Координаты и потоки источников представлены в Таблице 6.

Параметры источников были оценены используя вписывание двумерных гауссиан в программе CASA. Наиболее яркий источник, NVSS 012258+614815 (S187-1), расположен около области S187. Этот источник известен как радиогалактика [133; 139]. Источник разрешен на две компактные структуры и про-



Рисунок 4.2 — Изображение NVSS 012258+614815 (S187-1 a&b) в континууме GMRT 1420 МГц. Диаграмма направленнгости показана в левом нижнем углу. Шкала потока в логарифмических величинах.



Рисунок 4.3 — Спектр в линии НІ в направлении NVSS 012258+614815 (а и b). Линия эмиссии взята из обзора CGPS в 1' радиусе около радиогалактики. Профиль поглощения получен из данных GMRT. Яркостная температура приведена в линейно-логарифмическом масштабе: значения в 50 К в линейной шкале, выше – в логарифмической.

тяженную слабую компоненту. Компактные источники разделены на 10 секунд дуги. (Рис. 4.2), яркостная температура равна  $24000\pm120$ K для S187 1a и  $14300\pm120$ K S187 1b (Рис. 4.3). NVSS 012250+61545 (S187 2) также разделяется на две компактные структуры. Точечный источник с потоком в  $0.67\pm0.14$  мЯн обнаружен в направлении на источник IRAS 01202+6133. Этот источник идентифицируется с протозвездными объектом первого класса [25]. Мазерный источник первого класса присутствует около источника IRAS 01202+6133 [157]. Этот источник является областью образования звезд большой массы [25]. Насколько нам известно, источники в радиоконтинууме ранее не наблюдались около IRAS 01202+6133. Как следствие, имеющиеся данные не позволяют оценить спектральный индекс, однако, вероятно, источник является ультракомпактной H II зоной около молодой звезды.

S187-1 a&b ярче, чем протяженное излучение зоны H II, что требует высокого динамического диапазона и качественной калибровки. UV-сглаженное изображение представлено на Рис. 4.1. Излучение H II зоны не гомогенно. Форма близка к шаровидной, поверх которой располагается структура в форме

82

дуги. Дуга прилегает к области излучения на 850 мкм SCUBA, связанной с родительским облаком источника IRAS 01202+6133, как видно на Рис. 4.1. Два слабых пика в радио-континууме обнаруживаются вблизи от пиков на SCUBA 850 мкм и WISE 12 мкм (Рис. 4.1). Мы ассоциируем эти особенности с областями активной фотодиссоциации (ФДО) и называем их S187 PDR1 и S187 PDR2, (коорд. в Табл. 7, смотри Рис. 4.4). Излучение SCUBA 850 мкм обнаружено рядом с ИК пиками, связанными с PDR1 and PDR2. Слабое излучение в радиоконтинууме окружает область S187 PDR2 с севера и с юга (Fig 4.4, b и с). Такая морфология является аргументом, что области S187 PDR1&2 являются относительно малыми, ограниченными плотным газом областями.

Источник Координаты, Ј2000 Поток на 1420 МГц, мЯн Размер, после деконволюции: major,minor,п.у., секунд ,  $01^{h}22^{m}58^{s}.11304(.0006) + 061^{\circ}48' 15'' .188(.0037)$ 386.4(2.5) $1.27(0.02) \times 0.38(0.063) \times 91(2.5)$ S187-1a  $01^{h}22^{m}59^{s}.39627(.002) + 061^{\circ}48' \ 13'' \ .52(.013)$ S187-1b 116.7(0.8) $1.4(0.08) \times 0.35(0.2) \times 112(4.9)$  $01^{h}22^{m}51^{s}.346(.0017) + 061^{\circ}54' 48'' .22(.015)$ S187-2a 13.7(0.3) $1.3(0.1) \times 0.58(0.16) \times 144(7.4)$  $01^{h}22^{m}50^{s}.91(.02) + 061^{\circ}54' 51'' .93(.14)$ S187-2b 7.9(0.7)4.42(0.4)x3.4(0.4)x131(22) $01^{h}23^{m}33^{s}.36(.012) + 061^{\circ}48' 48'' .09(.15)$ IRAS 01202+6133 0.67(0.14)точечный  $01^{h}23^{m}54^{s}.1(.012) + 061^{\circ}43' 57'' .73(.08)$ NVSS 012355+614404 1.8(0.24)точечный  $01^{h}23^{m}04^{s}.8(.1) + 061^{\circ}51' 41'' .2(.4)$ S1871200(20)175.62(3.6)x141.3(3)x162(4)

Таблица 6 — Координаты источников в континууме и их параметры оценённые с помощью вписывания двумерной гауссианы в CASA.

Таблица 7 — Параметры ИК источников и источников в молекулярных линиях оценённые с помощью вписывания двумерных гауссиан в CASA. Интегральное излучение в линиии С<sup>18</sup>О отмечено как ∫С<sup>18</sup>О.

Источник	Координаты, Ј2000	Размер: макс,мин,ПУ	карта
S187-NE	$01^h23^m29^s.9(1.37) + 061^\circ54' \ 28'' \ .8(8.9)$	$4.1(0.4) \times 3.65(0.2) \times 129(7.5)$	$\int C^{18}O$
S187-SW	$01^{h}23^{m}30^{s}.5(1.2) + 061^{\circ}48' \ 49'' \ .7(7.0)$	4.2(0.4)x3.4(0.3)x93(17)	$\int C^{18}O$
S187-PDR1	$01^{h}23^{m}17^{s}.93(.03) + 061^{\circ}53' 10'' .34(.2)$	3.12(.01)x2.00(.006)x128(0.29)	12 мкм WISE
S187-PDR2	$01^h 22^m 50^s.2(.02) + 061^\circ 52' \ 28'' \ .8(.1)$	$2.04(.008) \times 1.27(.005) \times 69.4(.3)$	12 мкм WISE
вложенный пузырь Н I	$01^h23^m39^s.8(.1) + 061^\circ51' \ 37'' \ (1.5)$	3.9(.1)x4.1(.1)x90	12 мкм WISE

# 4.2.2 Данные в линии HI

Используя комбинирование данных GMRT и CGPS, нам удалось получить кубы данных с высоким угловым разрешением в линии атомарного водорода. Мы также использовали только данные наблюдений GMRT для восстановления изображений с узкой диаграммой направленности для получения изображений в линии поглощения с высоким контрастом в направлении S187-1(a&b). Профили излучения и поглощения в линии 21 см показаны на Рис. 4.3. Эти профили содержат по крайней мере 8 спектральных особенностей. Особенности в линии излучения на скоростях в [-5; -20] км с<sup>-1</sup> пространственнно расположены около области S187, на тех же скоростях что и молекулярный газ трассируемый в линиях <sup>12</sup>CO (обсуждается ниже). Эти скорости соответствуют рукаву Ориона Галактики[128].



Рисунок 4.4 - a) Различные особенности в направлении на комплекс S187. Фоновым изображением отображено излучение Spitzer 5.8 мкм расположенное поверх изображения WISE WSSA 12 мкм (в зелено-желтых цветах). Средняя интенсивность в линии C<sup>18</sup>O ([-17.5,-12] км/с) показана в голубых заполненных контурах. Черные контуры представляют излучение в линии 21 см в том же диапазоне скоростей. Толщина контуров увеличивается к более ярким областям. Диаграммы направленности (46, 8, 8 секунд дуги для C<sup>18</sup>O, Н I и 1420 МГц континуума, соответственно) показаны в левом нижнем углу изображения. Позиция S187 Н $\alpha$  отмечена звездочкой. Остальные маркеры аналогичны Рис. 4.1. *b*) Увеличенное изображение S187 PDR2. Схема изображения аналогична *a*), исключая диапазон скоростей [-13,-10] км/с для линий. Светло-серые контуры представляют излучение в континууме на 1420 МНz по уровню в 7 К. Отметки склонения соответствуют углам в +061°51′ 24″ и +061°51′ 36″. *c*) Увеличенное изображение S187 PDR1. Схема изображение b), исключая диапазон скоростей [-17,-13] км/с для линий. Также, вместо линии C<sup>18</sup>O нарисована линия HCO<sup>+</sup>(1–0) в желтых контурах.

Мы разрешили источник NVSS 012258+614815 на две компактные структуры, что дает возможность точной оценки оптической толщины и лучевой концентрации поглощающего газа (см. далее). Другие компактные источники являются недостаточно сильными, при доступной нам конфигурации профиля поглощения не обнаружено.

Особенности в линии эмиссии по комбинированным данным CGPS+GMRT показаны в поканальных картах (Приложение, Рис. А.1). Поверх изображений нанесены контуры, соответствующие изофотам излучения в линии <sup>12</sup>CO (2-1) на тех же скоростях, по данным взятым из Arvidsson, Kerton [133]. Наблюдаемые структуры хорошо согласуются с обсуждаемыми в Joncas, Durand, Roger [128] несмотря на на порядок улучшенное разрешение (с 60 '' до 8 '') при в 5 раз улучшенной чувствительности (с 0.7 до 0.15 мЯн). Излучение в линии Н I не однородно, однако, поканальные карты показывают пространственно-кинематическую связанность структур на размерах до ~0.6 пк. Особенности, которые пространственно расположены около Н II зоны обнаруживаются на скоростях от -20.7 до -3.5 км с<sup>-1</sup>. В предположении сферически-симметричной расширяющийся сферы в направлении на центр проекция доплеровской скорости на луч зрения будет наибольшей. Этот эффект наблюдается в данных H I: на границе диапазона скоростей области излучения расположены в направлении на центр Н II зоны, трассируя части расширяющихся стенок зоны Н II. Как показано на Рис. 4.4, интегральное излучение в линии Н I неплохо соотносится с излучением 5.8 мкм Spitzer. Локальные пики в линии Н I слегка сдвинуты от пиков в ИК в направлении от центра зоны Н II. Область эмиссии в линии Н I имеет форму близкую к сфере, однако, границы сферы сильно неоднородны и имеют рваный характер. Исключение составляет северо-восточная часть карты, где граница четко сформирована и имеет форму дуги, вогнутой внутрь H I и H II зоны.

## 4.2.3 Молекулярный газ

Оболочка зоны S187 имеет молекулярную часть, описанную в работах Joncas, Durand, Roger [128], Arvidsson, Kerton [133] и Zinchenko, Caselli, Pirogov [147]. Она состоит из плотных областей с молекулярными ядрами и диффузным газом, окружающим Н II зону. Мы использовали линии CS(2–1) и HCO<sup>+</sup>(1–0)

как трассеры плотных областей. Молекулярное излучение в линиях изотопологов СО представлено в приложении (Рисунки А.2, А.1, А.3). Линия <sup>12</sup>СО обнаруживается во всем поле наблюдений. Линия <sup>13</sup>СО имеет более протяжённую область излучения чем линия H I. Излучение в линии C<sup>18</sup>О обычно является оптически тонким и трассирует лучевую концентрацию молекулярного газа. Мы ассоциируем пики излучения в этой линии с плотными ядрами, что располагаются в молекулярной части оболочки H II зоны. Мы обнаруживаем два пика излучения в линии C<sup>18</sup>O на разных скоростях, один из которых в дальнейшем будет называться S187 SE – родительское облако источника IRAS 01202+6133 и S187 NE. S187 NE пространственно и кинематически коррелирует с пиком в линии <sup>12</sup>CO, в то время как S187 SE – нет. На скорости S187 SE (~ –15 км с<sup>-1</sup>) излучение в линии <sup>12</sup>CO в основном однородно (Рис. А.1).

Яркие пики излучения C<sup>18</sup>O сильно антикоррелируют с данными H I наиболее выражено в направлении S187 SE. Молекулярное излучение в этом ядре вытянуто в направлении на кластер звезд, возбуждающий зону S187. Пик излучения в линии H I также обнаруживается в направлении на центр H II зоны. Структур в излучении на 12мкм WISE не обнаружено в направлении или рядом с S187 SE. Излучения в линии H I не обнаруживается в направлении ядра S187 SE. Отсутствие атомарной фракции в этом направлении может быть эффектом проекции молекулярного облака на область H II, что предполагает что молекулярный газ не имеет отношения к оболочке H II зоны. Однако, анти-корреляция между линией H I и C<sup>18</sup>O предполагает вложенность молекулярного газа в атомарную среду. В линии <sup>12</sup>CO не наблюдается структур, которые можно было бы связать с ядром. Пик в линии H I на скорости -11 км с<sup>-1</sup> обнаруживается вблизи пика молекулярного излучения, связанного с объектом S187-H $\alpha$ .

Распределение линии CS (Рис. 4.5) хорошо согласуется с описанным в Zinchenko, Caselli, Pirogov [147]. Однако, в представленных нами данных наблюдается протяженная структура, тянущаяся к северу и югу от источника IRAS 01202+6133. Типичная яркостная температура этой особенности ~0.6±0.2 К при центральной скорости в  $-15 \text{ км c}^{-1}$ . Пики в линиях CS и HCO<sup>+</sup> смещены относительно пика в линии C<sup>18</sup>O наружу, от кластера S187B. Излучение в линии HCO<sup>+</sup>, связанное с S187 NE, имеет сходные характеристики. Также наблюдается компактная и протяженная часть излучения. Координаты пика 1<sup>h</sup>23<sup>m</sup>34<sup>s</sup>.7 +61°54'38".8 с максимальной интенсивностью в 2.8±0.2 К на скорости в  $-16\pm0.3 \text{ км c}^{-1}$  с полушириной линии ~2 км с<sup>-1</sup>. Компактная особенность



Рисунок 4.5 — Профили линий С<sup>18</sup>О (1–0), <sup>12</sup>СО(1–0), СS(2–1) и HCO<sup>+</sup>(1–0) в направлении нескольких позиций. Интенсивность линии <sup>12</sup>СО(1–0) разделена на 7. Вертикальные линии соответствуют скорости пика линии С<sup>18</sup>О.

имеет ширину линии на половинном уровне  $\sim 3 \text{ км c}^{-1}$  с центром на  $-15\pm0.3$  км с<sup>-1</sup> при пике  $1.7\pm0.25$  К. Протяженная особенность обнаруживается в направлении S187 PDR1. Профиль линии имеет негауссову форму с множеством пиков. Профили линий показаны на Рис. 4.5.

## 4.3 Оценка физических свойств

## 4.3.1 Свойства газа HI

Наличие двух близко расположенных ярких источников в радиоконтинууме на частоте 1420 МГц (S187-1a&b) дает возможность измерить профиль поглощения холодного нейтрального атомарного газа и оценить его оптическую толщину. Используя линию излучения из обзора CGPS, мы смогли оценить спиновую температуру нейтрального водорода. В дальнейших оценках мы также предполагаем, что излучение фонового газа в линии 21 см незначительно меняет свои свойства в поле зрения GMRT.

Мы оцениваем оптическую толщину в направлении S187-1(a&b) из двух спектров поглощения:

$$\tau(v) = -\ln\left[\frac{T_{br}^{a}(v) - T_{br}^{b}(v)}{T_{c}^{a} - T_{c}^{b}}\right],$$
(4.1)

где  $T^a_{br}(v)$  и  $T^b_{br}(v)$  – наблюдаемые профили яркостной температуры в направлении компонент a и b источника S187-1 (см. Рис. 4.3).  $T_c^a$  и  $T_c^b$  - яркостные температуры источников в континууме. Мы предполагаем, что обе компоненты имеют одинаковый фактор заполнения. Мы также предполагаем, что среда в направлении на обе компоненты (разделенные на 9.5" или 0.05 пк) имеет одинаковую оптическую толщину. Оценки размера компонент а и b из карты радиоконтинуума весьма близки (Табл. 6), и согласуются с представленными в работе Snell, Bally [139]. Используя этот подход, мы исключаем ошибки калибровки, в том числе между разными инструментами, а также потерю потока интерферометром, что происходит при оценке параметров газа из профилей излучения и поглощения, как, например в работе «Exploring the Properties of Warm and Cold Atomic Hydrogen in the Taurus and Gemini Regions» [130]. В ней профиль поглощения получен интерферометрическими инструментами, спектр излучения получен с помошью одиночной антенны. Спиновая температура среды вычислена используя спектр излучения, извлечённый из области рядом с S187-1(a&b) из обзора CGPS в пределах 1', исключая область S187-1:

$$T_s(v) = T_{em}(v)/(1 - e^{-\tau(v)}),$$



Рисунок 4.6 — Профили оптической толщины и спиновой температуры в направлении на S187-1(a&b)

где  $T_{em}$  это яркостная температура, взятая из обзора CGPS (см Рис. 4.3),  $\tau$  взята из Ур. 4.1. Результирующие профили показаны на Рис. 4.6. Очевидно, что оценки  $T_s(v)$  и  $\tau(v)$  являются взвешенно-усреднёнными оценками вдоль луча зрения.

Для оценки свойств атомарного газа на всей области, занимаемой оболочкой S187, мы использовали плоско-слоистую модель. В нашей модели яркостная температура  $T_b^i$  излученная слоем *i* определяется как:

$$T_b^i(v) = T_s^i(1 - e^{-\tau_i(v)}) + T_b^{i-1}(v)e^{-\tau_i(v)},$$
(4.2)

где

$$\tau_i(v) = \tau_i \times exp(-(v - \Delta v_i)^2 / (2\sigma_i^2)), \qquad (4.3)$$

– есть профиль оптической толщины слоя i,  $\tau_i$  - пиковое значение оптической толщины i,  $\Delta v_i$  - доплеровская скорость слоя,  $\sigma_i$  - доплеровское уширение профиля слоя и  $T_s^i$  - спиновая температура слоя. Общее число слоев определялось

по числу компонент при разложении профиля оптической толщины на гауссианы. Число компонент, ассоциированных с S187 и оценивалось только в диапазоне допплеровских скоростей линий молекулярного газа ассоциированного с S187[128]. Мы постулировали уменьшение скорости с индексом *i*. Мы предполагали, что внешние слои относятся к внешним слоям галактики. Мы провели вписывание по методу Нелдера-Мида используя пакет LMFIT [45] для каждой позиции, точку за точкой. Затем мы использовали метод k-ближайших сосседей(kNN) из библиотеки SCIKIT-LEARN [46] для оценки параметров атомарного газа в S187 аналогично описанному в «Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах» [3].

Как описано в следующей части, атомарный газ в объекте имеет форму расширяющегося пузыря, как следствие - предположение о гауссовости компонент линии далеко от идеального. Мы оцениваем лучевую концентрацию атомарного слоя из следующего выражения:

$$N_{HI} = 1.823 \times 10^{18} cm^{-2} \int \frac{\tau T_b(v)}{[1 - exp(-\tau(v))]} dv, \qquad (4.4)$$

из работы Saha, Roy, Bhattacharya [129]. В данном случае мы определяем  $T_b$  как яркостную температуру компоненты модели, подогнанную под наблюдаемый спектр в данных CGPS+GMRT с вычтенным континуумом, а  $\tau$  из формулы (4.3). Карта оценки лучевой концентрации атомарного газа относящегося к области S187 показана на Рис. 4.7. Общая масса атомарного газа оценена в 113±34 M<sub>☉</sub>. Предполагая тепловое уширение линии мы оценили верхнюю границу кинетической температуры газа в  $T_{kin} < 1000$  K. В случае термализации, кинетическая температура должна быть равна спиновой температуре. Медианная величина спиновой температуры излучения, которое мы идентифицируем с оболочкой S187 равна  $\approx 50$  K. Пик спиновой температуры обнаруживается в направлении S187 PDR1 со значением в 110 К. Ширина на уровне половины интенсивности диаграммы позиция-скорость около  $\sim 10'$  что мы принимаем за типичный размер оболочки H I.

Карта лучевой концентрации атомарного газа похожа на карту излучения на 12 мкм WISE, которое трассирует в основном горячую пыль и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) на фронтах ионизации. Однако, попиксельное сравнение показывает существенное отличие от линейной зависимости (См. Рис. 4.16). Отрицательная взаимосвязь Н I с 12 мкм WISE



Рисунок 4.7 — Карта оценки лучевая концентрация газа в направлении S187. Белые контуры отражают излучение континуума на частоте 1420 МГц, что соответствует Н II зоне. Маркеры аналогично Рис. 4.4.

наблюдается в диапазоне потоков [0,~1.5] кЯн WISE. Эти точки расположены на периферии карты. Коэффициент детерминации R<sup>2</sup>=0.26 относительно мал и связан с не систематическими отклонениями от линейной регрессии. Эти отклонения, вероятно, связаны с неточностями сделанных оценок или отличающимися условиями возбуждения или отличиями в условиях генерации ПАУ и Н1. Вполне возможно, что не весь атомарный газ, связанный с S187 имеет образован в результате диссоциации молекулярной оболочки.

## Фрагментация атомарного газа

Мы проанализировали кубы данных в линии Н1 используя алгоритм FELLWALKER [158]. Мы использовали лимит отсечки в 7 СКО и рассматривали диапазон скоростей [-19, -5] км с<sup>-1</sup>. Результаты представлены на Рис. 4.8 и на Рис. А.1 (с разбивкой по скоростям). Мы обнаружили ~100 деталей, связанных с атомарной оболочкой S187. Мы предполагаем, что данные детали являются неоднородностями в атомарном слое, в дальнейшем называемые фрагментами. Большая часть фрагментов обнаруживается на периферии и хорошо коррелирует с пиками на 4.6 и 12 мкм WISE. Группа фрагментов малого размера присутствует около S187 PDR1, S187 PDR2 и S187 SE. 5% фрагментов имеют размер меньше чем два размера диаграммы направленности. Большая часть фрагментов об является на периферии и хорошо коррелирунати ствует около S187 PDR1, S187 PDR2 и S187 SE. 5% фрагментов имеют размер меньше чем два размера диаграммы направленности. Большая часть фрагментов является разрешёнными источниками.

Мы оценили массы фрагментов из лучевой концентрации, которую рассчитали в приближении малой оптической толщины ( $N_{HI} = (1.823 \times 10^{18} cm^{-2} \int T_b dV$ ), а также из оценки их геометрических размеров [159]). Результаты представлены на Рис. 4.9. Общая масса всех фрагментов ~114 M<sub>☉</sub>. Данная оценка близка к массе всей оболочки сделанной ранее, что предполагает сильную фрагментированность оболочки. Типичная объёмная плотность газа равна ~ $5.4 \times 10^4$  см<sup>-3</sup>. Размеры фрагментов колеблются от 0.03 пк до 0.23 пк. Размер оценивался как стандартная девиация по отдельным пикселям, пересчитанная к расстоянию 1.4 кпк, взвешенная на интенсивность. Наши данные показывают весьма тесное соотношение между размером и массой ( $\mathbb{R}^2$ =0.94) по степенному закону с индексом  $k = 2.39 \pm 0.06$  (см. Рис 4.10).

#### 4.3.2 Свойства молекулярного газа

Мы проанализировали данные  ${}^{13}$ CO и C ${}^{18}$ O из работы Arvidsson, Kerton [133]. Эти данные имеют то же пространственное покрытие и покрытие в доплеровских скоростях, что и комбинированные данные в линии H I.

Лучевая концентрация изотопологов CO  $(N_{\rm CO})$  вычислена используя (ур. 90) из Mangum, Shirley [162]. Мы приняли равную температуру возбуждения



Рисунок 4.8 — Пространственное распределение фрагментов в линии Н I идентифицированное с помощью CUPID Fellwalker. Эллипсами отмечен размер фрагментов (стандартной девиации около центроида). Карта на фоне отображает пиковую интенсивность в линии Н I. Маркеры аналогично Рис. 4.4.

для линий <sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO и C<sup>18</sup>O и оценили ее из данных линии <sup>12</sup>CO используя (ур. 15.30) из Wilson, Rohlfs, Huttemeister [159]. Необходимо отметить, что излучения в линии <sup>12</sup>CO, ассоциированного с S187 SE, не было обнаружено. Для этого ядра температура возбуждения была принята в 9.5 К используя оценку кинетической температуры, сделанную Kang, Kerton [25]. Относительное содержание молекул <sup>13</sup>CO/<sup>12</sup>CO=0.0145 было вычислено с учётом галактоцентрического расстояния принятого в 9.27 кпк [163]. Распространённость молекул CO в H<sub>2</sub> (7.7×10<sup>-5</sup> для S187) была вычислена учитывая используя галактоцентрическое расстояние [164]. Мы оценили массу оболочки из данных <sup>13</sup>CO в 6400 M<sub>☉</sub>, что близко к оценке Arvidsson, Kerton [133], сделанной по тем же данным.



Рисунок 4.9 — Свойства фрагментов. Верхний левый: гистограмма распределения масс фрагментов. Верхний правый: Гистограмма распределения линейных размеров объекта. Левый нижний: гистограмма распределения вириальных параметров объектов. Нижний правый: Гистограмма объёмная плотности атомарного газа в фрагментах. Основания ячеек гистограммы имеют логарифмический шаг, исключая нижний левый рисунок.

Мы оценили вириальный параметр ядер S187 SE и S187 NE по формуле  $\alpha_{vir} = 1.2\sigma^2 \sqrt{S_{eff}}/(10^3 M)$ , где M – масса ядра в массах Солнца  $M_{\odot}$ ,  $\sigma$  в км с<sup>-1</sup> – ширина линии, вычисленная по второму статистическому моменту линии <sup>13</sup>CO,  $S_{eff} = \int T_b ds/T_b$  – эффективная площадь ядра, в пк<sup>2</sup> по линии <sup>13</sup>CO с яркостной температурой  $T_b$  и ds - элементарная площадь. Величины  $\sigma$  равны ~1.4 и ~0.9 км с<sup>-1</sup>, массы - ~1200 и ~900 М<sub>☉</sub> для S187 SE и S187 NE, соответственно.  $\alpha_{vir}$  оценивается как 2.75 и 1.4 для S187 SE и S187 NE, соответственно. Массы ядер близки, отличие вириальных параметров обусловлено различными ширинами линий, что, в свою очередь, вероятно связано с нетепловыми движениями в ядрах.

96



Рисунок 4.10 — Соотношения между различными парами параметров фрагментов. Верхний левый: линейного размера с доплеровской шириной. Верхний правый: вириального параметра с линейным размером. Левый нижний: Массы с линейным размером. Правый нижний: объемной плотности с линейным размером. Линия регрессии показана красным. Те же соотношения из «Physical Properties and Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic

Ring Survey» [160] и Larson [161] показаны штрих-пунктирной линией.

#### 4.3.3 Молодое звездное население

Для идентификации молодых звездных объектов (YSO, M3O) мы использовали данные 2MASS (H и Ks) а также фотометрические данные WISE (W1, W2, и W3). Koenig, Leisawitz [165] предложил несколько схем идентификации YSO, две из которых мы и использовали. Одна из них основана на цветах  $H-K_s$ и W1–W2, другая на соотношении цвета W1–W2 и W2–W3. Результаты представлены на Рис. 4.11.



Рисунок 4.11 — Расположение YSO около S187. Фоновое изображение отражает усреднённое по скорости [-17.5,-12] км с<sup>-1</sup> излучение Н I . Голубые контуры соответствуют излучению С<sup>18</sup>О усредненному по тому же диапазону.

## 4.4 Обсуждение

Наши данные иллюстрируют практически все аспекты процессов формирования молодых звезды: зону Н II с ионизирующим кластером, области ФДО и слой Н I молодое звездное поколение, а также, по крайней мере два молекулярных ядра, вероятно, находящихся на разных этапах эволюции. В разделе 4.4.1 мы обсуждаем крупномасштабные особенности, которые могут иметь связь с происхождением области S187. В разделе 4.4.2 мы обсуждаем общую конфигурацию газа и молодого поколения около области Н II. В разделе 4.4.3 мы обсуждаем внутреннюю пространственно-кинематическую структуру оболочки.



Рисунок 4.12 — Карта окрестностей области S187. Усреднённое излучение H I (в [-14 –17 км с<sup>-1</sup>], CGPS) показано фоновым изображением. Излучение <sup>12</sup>CO усреднено по диапазону [-5 –17] км с<sup>-1</sup> и показано контурами. Прямоугольник обозначает область PV-среза (Рис. 4.13).



Рисунок 4.13 — Диаграмма позицияскорость атомарного и молекулярного газа около области S187. Координаты среза показаны на Рис. 4.12. Черные эллипсы отражают предполагаемое положение остатков сверхновых.

## 4.4.1 Крупномасштабные структуры

Одна из интересных особенностей, которая, вероятно, не имеет прямого отношения к области S187 – узкая компонента линии H I, наблюдающаяся как в поглощении так и в эмиссии на скорости в ~5 км с<sup>-1</sup> (Рис. 4.3 и 4.6). Вращение галактики не предполагает наличия газа на таких скоростях в этом квадранте [128]. Происхождение данной компоненты является интересным фактом, однако лежит за пределами данного исследования. Обычно такие особенности объясняются наличием локальных потоков около Солнца, вызванных галактическим возмущением плотности газа [166]. Предлагаемое нами объяснение подобных

99

крупномасштабных кинематических особенностей связано с остатками сверхновых, обнаруженных вблизи объекта [167]. Общая картина близлежащих к S187 областей отображена на Рис. 4.12 и была взята из обзоров CGPS H I и <sup>12</sup>CO (2–1) [149]. Диаграмма позиция-скорость представлена на Рис. 4.13. Такая диаграмма позиция-скорость могла быть сформирована двумя пузырями. Особенность на скорости ~5 км с<sup>-1</sup>, вероятно, является частью пузырей. «Необычная» скорость может быть связана с их расширением.

Мы полагаем, что эти пузыри являются частью остатков сверхновой. Северный пузырь, вероятно, связан с источником SNR G127.1+0.5 [168], южный можно идентифицировать с пульсаром B0105+65 и оболочкой G126.1-0.8 [167].

Мы оценили кинематический возраст оболочек по формуле  $t_{dyn} = \alpha R/V_{exp}$ . Коэффициент  $\alpha$  был равен 0.25 при предположении о радиационном механизме расширения и  $\alpha = 0.6$  для механизма, связанного с звездным ветром. R – внутренний радиус атомарного кольца,  $V_{exp}$  - скорость расширения [167]. Мы оцениваем возраст северного пузыря t $\sim 3.6 \times 10^5$  лет (радиационное расширение) или t $\sim 8.8 \times 10^5$  лет (звездный ветер) [167]. Оценка возраста южного пузыря равна t $\sim 3.0 \times 10^5$  лет или t=7.15 $\times 10^5$  лет для радиационного механизма и вследствие звездного ветра, соответственно. Оценки возраста обоих пузырей относительно близки.

Основываясь на вышесказанном, область S187 находится на пересечении двух пузырей. Важно отметить, что молекулярный газ наблюдается только на скоростях порядка –12.5 км с<sup>-1</sup>, то есть с одной стороны пузыря.

### 4.4.2 Оболочка

Используя данные, представленные в разделе 4.2, мы прослеживаем различные части расширяющегося газа и пыли, окружающие область Н II. Изображение, на котором выделены различные части показано на Рис. 4.4. Поканальные карты, в которых представлена сравнение излучения Н I и изотопологов СО, представлены на Рис. А.1, А.2, А.3. Наши наблюдения свидетельствуют о расширении части атомарного газа оболочки. Расширяющаяся часть имеет форму близкую к сфере, центр которой близок к центру Н II зоны. Диаграмма позиция-скорость оболочки изображена на Рис. 4.14. Скорость ионизирован-



Рисунок 4.14 — Диаграмма позиция-скорость атомарного и молекулярного газа в оболочке. Нормированные профили радио и ИК излучения приведены снизу. Эллипс изображает внутреннюю границу радиально-расширяющийся оболоч-

ки. Направление среза изображено на Рис. 4.18 красным квадратом.

ной зоны оценена по линии H109 $\alpha$  и равна –14.6 км с<sup>-1</sup> [128], что близко к скорости центра расширяющийся сферы. Излучение H I, относящиеся к S187, наблюдается на скоростях от –21.5 до –8.5 км с<sup>-1</sup> (Рис. 4.14. Атомарный слой в направлении на центр должен быть смещен по эффекту Допплера относительно средней скорости. Как следствие, излучение на скорости в –14.6 км с<sup>-1</sup> не должно быть зарегистрировано. Наблюдаемое излучение в линии H I в направлении на центр не может быть объяснено доплеровским уширением расширяющихся стенок. Причиной подобного эффекта может быть как остающийся внутри H II зоны атомарный газ так и газ в окружающем пространстве не вовлечённый в систематическое расширение.



Рисунок 4.15 — Соотношение между интенсивностями линий Н I и <sup>12</sup>CO. Цвет соответствует различным каналам по скорости. Области с высокой плотностью точек изображены контурами. Возможная отрицательная корреляция на скорости в [-15.1, -16.9] км с<sup>-1</sup> обозначена белой линией.



Рисунок 4.16 — Соотношение между потоком на 12 мкм WISE и лучевой концентрацией Н I.

Мы не обнаружили антикорреляции между данными <sup>12</sup>СО и Н I при поточечном сравнении интенсивностей линий (Рис. 4.15), исключая диапазон скоростей [-17,-15] км с<sup>-1</sup>, где зависимость угадывается и изображена белой линией. Эти точки локализованы в окрестности S187 PDR1. Это соотношение должно иллюстрировать процессы диссоциации. На остальных скоростях никаких линейных соотношений не наблюдается, что вероятно, связано с неразрешенной областью диссоциации, особенно в молекулярных данных.

Оболочка Н I имеет меньшую толщину в направлении молекулярного ядра S187 NE. Оболочка коррелирует с областью ФДО, которую мы ассоциируем с излучением на 12 мкм (Рис. 4.16). В работе [169] замечено, что в областях в которых ФДО ограничены плотностью, наблюдается слияние областей диссоциации H<sub>2</sub> и CO. В случае ядра S187 NE расстояние между пиками <sup>13</sup>CO и Н I меньше 25″ (0.2 пк) (S187 PDR1, S187 NE, Fig. A.3), что предполагает, что область диссоциации имеет толщину меньше 0.2 пк. Пик 12 мкм может быть сдвинут относительно пика Н I из-за эффекта проекции или оптической толщины, что видно на диаграмме позиция-скорость (Рис. 4.17, а.), внизу. Излучение на частоте 1420 МГц также представлено для иллюстрации области Н II. (S187 PDR1



Рисунок 4.17 — Диаграммы позиция-скорость в направлении на различные области оболочки (Рис. 4.17). *а)* Разрез через область S187 PDR1 (здесь и далее положительные оффсеты в направлении S187В, звездному скоплению, возбуждающему S187). *b)* Разрез в направлении, где не наблюдается выделенной границы или стенки в молекулярном газе и ИК данных. *c)* срез через S187 PDR2, *d)* срез через S187 SE (S187-IRS). Нормированные графики интенсивности излучения в континууме и интегрального излучения в линии <sup>13</sup>CO и C<sup>18</sup>O, а также лучевой концентрации атомарного газа в направлении среза нарисованы в нижней части каждой панели. (Нормировочные коэффициенты: 8 мЯн, 7 ГЯн ср<sup>-1</sup>, 17 К км с<sup>-1</sup>, 2 К км с<sup>-1</sup>, 6 К км с<sup>-1</sup>, 5×10<sup>21</sup> см<sup>-2</sup> для 1420 МГц континуум, 12 мкм WSSA WISE, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>O, HCO<sup>+</sup> интегральной интенсивности, а также лучевой концентрации H I, соответственно).

трассируется Н I и WISE 12 мкм, S187 NE трассируется HCO<sup>+</sup> и C<sup>18</sup>O). Срез в направлении, где не наблюдается стенок из молекулярного газа и границы в ИК данных, показан на Рис. 4.17, *b*. Тем не менее, излучение в линии H I имеет определенную морфологию, но компактные структуры не наблюдаются. В этом направлении слой H I значительно толще, чем около S187 PDR1, около ~2.4 пк. Слабое излучение в линии C<sup>18</sup>O и <sup>13</sup>CO предполагает наличие небольшого числа молекулярного материала оболочки в направлении среза. Срез через область S187 PDR2 показан на Рис. 4.17, *c*. Линия C<sup>18</sup>O слабее, чем в S187 PDR1, но ярче, чем по срезу *b*. Характер распределения излучения WISE 12 мкм и 1420 МГц предполагает сжатие газа.

## Фрагментация

Несмотря на то, что оболочка представляет кинематически единую структуру (см. раздел 4.4.2), мы обнаруживаем множество меньших особенностей, которые мы идентифицируем как фрагменты оболочки (см. раздел 4.3.1) и оцениваем их физические параметры. Угол наклона соотношения массы и размера фрагментов (Рис. 4.10) удивительно близок к углу наклона того же соотношения, оцененного для молекулярных облаков [напр. 160; 170]. В работе Kritsuk, Lee, Norman [171] утверждается, что подобное соотношение, может быть, возникает в средах с доминирующей сверхзвуковой турбулентностью, вызванной, вероятно, крупномасштабным введением кинетической энергии в среду. Массы фрагментов, наблюдаемых в H I, ниже оценок, молекулярных фрагментов «Physical Properties and Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic Ring Survey» [160] для тех же размеров. Этот эффект может быть связан с тем, что часть вещества была выметена из фрагмента или с тем, что существенная часть материала фрагмента находится в молекулярной фазе.

Пик функции распределения масс соответствует ~ 1  $M_{\odot}$  (Рис. 4.9), что близко к пику функции распределения масс дозвездных ядер [напр. 172]. Вполне вероятно, что наблюдаемые нами фрагменты представляют остатки молекулярных сгустков, диссоциированные до атомарного газа под действием УФ излучения центрального кластера. Однако для подтверждения гипотезы требуются наблюдения в молекулярных линиях с сопоставимым угловым разрешением.

Дисперсия скоростей фрагментов увеличивается с увеличением размеров фрагментов (Рис. 4.10), так же как и в соотношениях Ларсона [161]. Однако, угол наклона в нашем случае круче, дисперсия скоростей существенно выше, чем представлены Ларсоном для молекулярных облаков и конденсаций аналогичного размера. Оцененые нами значения существенно выше, чем обнаруживаются в массивных дозвездных ядрах [напр. 173]. Подобное отличие может быть обусловлено тем, что фрагменты находятся под действием поля излучения и диссоциируют в окружающую среду, что приводит к большему уширению профиля линии.

Высокая дисперсия скоростей приводит к высоким оценкам вириального параметра, который для большинства фрагментов  $\alpha \gtrsim 2$  (Рис. 4.9, 4.10), что предполагает их гравитационную несвязанность [напр. 174]. Вириальный параметр увеличивается с увеличением размера фрагмента. Наиболее компактные фрагменты относительно плотны и могут представлять гравитационно-связанные образования.

В качестве альтернативы, подобные фрагменты могут образоваться внутри области ФДО вследствие динамической компрессии. Ударные волны могут образоваться из-за высокого давления в регионах, нагретых полем УФ излучения, что приводит к образованию неоднородностей. Подобное состояние неустойчиво, свежеобразовавшиеся фрагменты диссоциируют, испаряются и теряют массу. Характерные времена процесса исчезновения фрагментов относительно большие и порядка оценки времени жизни под-пузыря [26]. В сценарии расширяющейся Н II зоны все новый и новый газ должен включаться в процесс фрагментации и диссоциации. Как следствие, физические параметры фрагментов S187 довольно молода (~ 5 × 10<sup>5</sup>лет), но мы не смогли обнаружить подобной зависимости. Вполне возможно, что это связано с ограниченной чувствительно линии тренда в зависимости плотности и вириального параметра, чем массы-размера не исключает возможности наличия радиальной зависимости.

## 4.4.3 Этапы эволюции оболочки

#### Под-пузырь

Одной из наиболее сложных пространственно кинематических особенностей в оболочке S187 является, вероятно, пузереобразная особенность HI которая показана на Рис. 4.4 (надпись Н I subbuble, координаты приведены в Табл. 7). Спектры в направлении на этот пузырь показаны на Рис. 4.5. Слабое излучение в линии HCO<sup>+</sup> и CS присутствует. Профиль линии HCO<sup>+</sup> близок по форме к профилю линии <sup>12</sup>CO. Пики линий C<sup>18</sup>O и CS обнаруживаются на скорости –13 км с<sup>-1</sup>. Диаграмма позиция-скорость показана на Рис. 4.18, е). Центр диаграммы позиция скорость соответствует направлению на источник II класса, направление среза показано на Рис. 4.18, слева. Излучение в линии 21 см имеет округлую форму, которая вероятно, вызвана расширяющимся слоем атомарного газа движимого источником II класса. Излучение, идентифицируемое с под-пузырем обнаруживается на скоростях, от  $-19 \text{ км c}^{-1}$  до  $-8 \text{ км c}^{-1}$ . Пик излучения 12 мкм близок к центру пузыря. Пространственно-кинематическая структура газа в линии <sup>13</sup>CO имеет схожую с Н I структуру, но с меньшей дисперсией скоростей. Излучение в континууме не зарегистрировано ни нами (1.4 ГГц), ни в данных из литературы на 8.2 и 4.9 ГГц [139]. Мазер ОН присутствует около источника II класса [136]. Карта интегрального излучения в линии CS имеет слабую округлую форму на границе пузыря, как видно на Рис. 4.19. В направлении на Н II зону стенка пузыря в линии Н I интенсивнее. Как показано в работе [128], в направлении на вложенный пузырь имеются потоки солнечного ветра из кластера S187В что могло привести к более ранней эволюции, чем ядра S187 NE и SE. Используя формулу из [175], мы оцениваем возраст под-пузыря в  $6 \times 10^4$  лет.

Этот под-пузырь, по всей видимости, является результатом взаимодействия источника II класса и окружающего вещества, которое, в свою очередь, является частью оболочки Н II зоны. Весьма вероятно, что его образование вызвано возмущениям от Н II зоны. Наблюдается ряд молодых звёздных источников в направлении границы под-пузыря. Некоторые из них идентифицируется с источниками в рентгеновском диапазоне из каталога 2XCO [176]. Избыток



Рисунок 4.18 — (Лево:) Направления срезов PV диаграмм (Рис. 4.17, белые квадраты, надписи соответствуют) и Рис. 4.14 (красный квадрат). Излучение 3.4 мкм WISE приведено на фоне. (Право:) Срез через *е)*, Под-пузырь H I. Шкалы и масштабы те же, что и на Рис. 4.17.

излучения 12 мкм и соотношения 3.4 к 4.6 мкм наблюдается в направлении подпузыря (Рис. 4.20 и 4.19) предполагает, что в нем происходит дополнительная генерация или возбуждение РАН источником II класса. Молодые звездные объекты на границе пузыря весьма вероятно также являются частью цепи событий стимулированного звездообразования.

## Ядро S187 SE

Молекулярное ядро S187 SE расположено к юго-востоку от ионизирующего скопления S187B (Табл. 7). S187 SE ассоциирован с ярким ИК источником который является протозвездным объектом I-го класса. Ядро также содержит ряд мазерных пятен. Диаграмма позиция-скорость в направлении на это ядро представлена на Рис. 4.17, d. Мы определяем это ядро как кинематически-



Рисунок 4.19 — Структура молекулярного газа в направлении на S187 SE. Интегральное излучение в линии С<sup>18</sup>О в голубых контурах, СS (2–1) - в пунктирных красных, сглаженное излучение континуума на 1420 МГц изображено белыми контурами (уровни: 1, 2 мЯн/луч) поверх изображения цвета [3.4]–[4.6]. Маркеры аналогичны Рис. 4.4


Рисунок 4.20 — Оболочка S187 в ИК континууме. Изображение WISE WSSA 12 мкм в красном. Лучевая концентрация атомарного газа изображена контурами. Соотношения потоков на 12, 22 и 160 мкм отмечены синим и зеленым цветом Маркеры аналогично Рис. 4.4

когерентный газ, представленный линией С<sup>18</sup>О. Внутренняя структура этого объекта весьма богата. Линии HCO<sup>+</sup>, CS, HCN и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> наблюдались [147] и показали весьма сложную структуру ядра. Протяженные структуры, описанные в приведенной выше работе похожи на наблюдаемые нами в линии С<sup>18</sup>О. Однако, ядро содержит по крайней мере два фрагмента с плотным молекулярным газом (вероятно, связанных с IRAS 01202+6133 и S187 H $\alpha$ ). Излучение в линиях аммиака обнаружено в направлении на S187 H $\alpha$  [142]. Пик излучения SCUBA 850 мкм наблюдается в направлении S187 NIRS1. Впрочем, пика в молекулярных линиях в направлении на S187 NIRS1 не наблюдается.

Мы обнаружили компактный источник излучения в континууме, который, по всей видимости, является UC H II, около IRAS 01202+6133. Линия H I менее интенсивна в направлении на ядро на скорости в -15 км с<sup>-1</sup>. Профиль линии  $\rm HCO^+$  отличается от профиля линии  $\rm C^{18}O$  (Рис. 4.5), как и их пространственное распределение (Рис. 4.17, g): расположение пика излучения в линии  $C^{18}O$  хорошо соотносится с положением источника IRAS 01202+6133. Пик линии HCO+ на скорости -14.3км с<sup>-1</sup> сдвинут на  $\sim 80$  " относительно пика С<sup>18</sup>О (-13.6 км с<sup>-1</sup>). Пик отношения потоков на 4.6/3.4 мкм близок к пику HCO<sup>+</sup>, пик излучения CS также смещен относительно IRAS 01202+6133. Мы предполагаем, что подобная дифференциация связана с взаимодействием области UC H II и родительского газа молекулярного ядра. Лучевая концентрация, трассирумая C<sup>18</sup>O и связанная с протяженной частью ядра, расположена вокруг IRAS 01202+6133, в то время как центральная плотная часть ядра испытывает воздействие UC H II зоны. Мы не наблюдаем особенностей, которые можно интерпретировать как самопоглощение в линии HCO<sup>+</sup>(1–0) (E<sub>u</sub>  $\approx$ 4.28K). Само-поглощение наблюдалось для линии HCO<sup>+</sup>(3–2) (Е<sub>и</sub> ≈17К) [25]. В случае термализации подобный эффект вполне согласуется с предположением о величине кинетической температуры в 9.5 К газа ядра.

Мы не можем ассоциировать пики или какое-либо излучение в линии <sup>12</sup>CO с ядром S187 SE. Вполне вероятной причиной такого эффекта может быть значительная оптическая толщина в линии, в отличие от S187 NE. Область излучения <sup>12</sup>CO в направлении S187 NE, однако, более протяженная, чем C<sup>18</sup>O. Излучение <sup>12</sup>CO, вероятно, представляет разреженный газ около ядра. В случае S187 SE такой периферии не наблюдается в линиях C<sup>18</sup>O, <sup>13</sup>CO и HCO<sup>+</sup>. Области излучения в этих линиях окружены излучением в линии H I. Ядро, по всей видимости, вложено в оболочку. Атомарный газ должен быть сформирован в

процессе диссоциации. Ядро S187 SE является достаточно плотным ( $1 \times 10^5$  см<sup>-3</sup> [147]), яркие пятна излучения на 12 мкм (такие, как, например в S187 PDR1 и S187 PDR2) должны обнаруживаться в области ФДО на границе с молекулярным веществом. Подобных пятен не обнаружено. Молекулярный газ, наблюдающийся в линии C<sup>18</sup>O, вытянут в направлении центра области H II, с пиком около границы атомарного слоя. Расположение вытянутости, вероятно, близко к картинной плоскости - никаких значительных градиентов скорости на диаграмме позиция-скорость (Рис. 4.17, d) в молекулярных данных не прослеживается. Характер морфологии излучения радиоконтинуума предполагает вложенность молекулярного газа в область H II. Соотношение потоков на 160 и 12 мкм в направлении областей излучения CS и C<sup>18</sup>O может быть интерпретировано как доминирование холодной пыли в ядре.

Причина наличия корреляции между показателем цвета [3.4]-[4.6] и интенсивности излучения в линии C<sup>18</sup>O в направлении на ядро S187 SE остаётся не ясной. Поток в полосе 4.6мкм WISE может быть увеличен за счет рекомбинационных линий [177], что в случае S187 SE может иметь отношение только к области H II. Линии H<sub>2</sub> могут привести к уменьшению показателю цвета. Наблюдения в фильтре H<sub>2</sub> представлены Salas, Cruz-González, Porras [143]. Характер морфологии представленных карт отличается от морфрологии карты цвета. Излучение в канале 3.4 мкм может быть насыщенным вследствие значительной оптической толщины в случае молекулярного ядра [178], обусловленной как ПАУ, так силикатами и частицами. Оптическая толщина в канале на 4.6 мкм увеличивается меньше, что делает возможным подобное покраснение. Наши оценки потоков близки к приведённым «Spitzer IRAC Color Diagnostics for Extended Emission in Star-forming Regions» [179] (в статье приводятся значения для данных Спицера) для случая покраснения в газе излучения ФДО.

Кинематически-морфологическая структура ядра а также свидетельства наличия ряда активных процессов зведообразования являются индикаторами того, что ядро S187 SE подвергалось воздействию внешнего давления. Наиболее очевидным (и вероятным) объяснением является то, что давление вызвано расширением области Н II. Однако, нет наблюдательных проявлений, свидетельствующих о наличии ударных волн или ионизационных фронтов на границе области ФДО и молекулярного газа, которые наблюдались бы в каналах 12 мкм или отношении потоков на 3.4 и 4.6 мкм. Ядро вытянуто в направлении центра Н II зоны и давление и поток ионизирующего излучения могут быть уменьшены геометрическими факторами, что привело к возмущению среды, нежели к ее диссоциации. Сильное поглощение в пыли могло бы также поглотить излучения и защитить молекулярный газ от диссоциации.

### Ядро S187 NE

Ядро S187 NE имеет массу близкую к массе ядра S187 SE (координаты приведены в Табл. 7). Область излучения ФДО, трассируемая по 3.6 и 4.6 мкм, не перекрывается с областью излучения в линии C<sup>18</sup>O, из чего следует, что ядро фактически не затронуто расширением области Н II. Область ФДО расположена между Н II зоной и молекулярным газом, как показано на Рис. 4.4, ребром к наблюдателю. Структура области ФДО, атомарного и молекулярного слоя показана на Рис. 4.17, а). Наблюдается переход от невозмущенного к затронутому Н II зоной молекулярному газу, с расширением линии HCO<sup>+</sup>, перекрывающей пространственно и кинематически линию Н I. Источники класса-I и -II обнаружены между S187 NE и областью Н II, но внутри S187 NE их не зарегистрировано.

Спектры линий молекул ядра S187 NE показаны на Рис. 4.5. В отличие от другого ядра и областей ФДО профили линии HCO<sup>+</sup>, и <sup>12</sup>CO повторяют форму линии C<sup>18</sup>O, с пиком на –16.4 км с<sup>-1</sup>. Пик линии CS не обнаружен при чувствительности в 1 К. Энергии верхнего уровня переходов CS(2–1) и HCO<sup>+</sup>(1–0) близки (7.1 и 4.28 K, соответственно [180]). Критическая плотность перехода CS(2-1) ( $1.3 \times 10^5$  см<sup>-3</sup>) в два раза больше HCO<sup>+</sup>(1–0) ( $6.8 \times 10^4$  см<sup>-3</sup>) [180]. Отсутствие линии CS может быть следствием отсутствия плотных областей в ядре или наличия химических процессов, занизивших распространённость CS.

Диаграммы позиция-скорость в направлении ядра представлены на Рис. 4.17, а. Прослеживается увеличение ширины линии  $C^{18}O$  с 1.4 до 3.6 км с<sup>-1</sup> в направлении ионизированной области. Этот эффект может быть следствием увеличения величины турбулентных движений, вызванных расширением оболочки S187. Этот эффект может быть аналогичен механизмам образования фрагментов, наблюдаемых в H1, обсуждавшихся в секции 4.4.2. Профили линий далеки от гауссовых, как видно из Рис. 4.5. Излучение в линии HCO<sup>+</sup> свидетельствует о наличии двух компонент (Рис. 4.17, d). Одна -

пространственно компактная структура с пиком, находящимся на расстоянии  $\sim 60''$  от пика C<sup>18</sup>O в направлении от S187 В. Кинематически более широкая ( $\sim 5 \text{ км c}^{-1}$ ) но более слабая по интенсивности компонента коррелирует с областью излучения в линии H I. Она сдвинута относительно основного пика C<sup>18</sup>O в направлении к S187 В на  $\sim 80''$ . Мы ассоциируем эту компоненту с процессами фотодиссоциации, которые должны происходить в этой области. [181].

Пик в излучении  ${}^{12}$ CO сдвинут на 40 '' относительно пика C ${}^{18}$ O в направлении S187 В (Рис. A.1). Такое смещение может быть обусловлено нагревом [159] вследствие нагревания газа ядра из области ФДО. ИК излучение, трассирующее ФДО в направлении ядра, значительно ярче, чем в других направлениях, что говорит об обратном воздействии со стороны ядра на ФДО. Сдвиг пиков может быть обусловлен значительной оптической толщиной, но он должен быть более значимым в направлении на центр ядра. Свободно-свободное излучение также является более интенсивным в направлении S187 NE, пространственно соотносясь с пиками в излучении Н І. Голубое пятно на Рис. 4.20 расположено между областью, связанной с холодным газом и пылью (зеленым) и ФДО (красным). Это пятно хорошо соотносится с излучением Н I и протяженной особенностью в НСО<sup>+</sup>. Вероятно, оно связано с газом, испытавшим воздействие ударных волн, вероятно, в линииях Br a 4.06 мкм, как, например в Орион Бар[182]. Эта область наблюдалась в линии H<sub>2</sub> [143] при этом связанного с пятном излучения не наблюдалось. Никаких протяженных зеленых объектов (EGO) не наблюдалось в S187 NE.

Некоторые пики излучения в линии C<sup>18</sup>O были обнаружены в северной и южной части оболочки, как видно на Рис.А.2. Их координаты  $\alpha = 1^{h}22^{m}59^{s}.3$ ,  $\delta = +61^{\circ}42' \ 28'' \ 8 \ u \ 1^{h}22^{m}41^{s}.1$ ,  $+61^{\circ}49' \ 54'' \ 3$ . К сожалению, они не покрыты наблюдениями в линиях CS или HCO<sup>+</sup> и не обсуждаются в данной работе.

### 4.4.4 Области фотодиссоциации

В наших наблюдениях прослеживаются структуры, связанные с областями диссоциации находящиеся в различных физических условиях. Эти структуры представленны на диаграммах позиция-скорость (Рис. 4.17) а также на картах (Рис. 4.4, слева). Общая структура близка к представленной в работе Tielens, Hollenbach [183]. Карты областей S187 PDR1 и S187 PDR2 показаны на Рис. 4.4, по центру и справа.

В наших наблюдениях представлено свободно-свободное излучение, ИК излучение на 12 мкм, Н I, CO, HCO<sup>+</sup> и C<sup>18</sup>O. Пики излучения последовательно расположены в направлении от возбуждающего Н II зону кластера S187 В до молекулярного газа в ядре S187 NE, в S187 PDR1. Пространственно-кинематическая структура различных трассеров предполагает, что область ФДО видна с ребра. Линия HCO<sup>+</sup> наблюдается в молекулярном ядре и в направлении слоя, трассируемого в линии H I, как показано на Puc. 4.18, справа, в центре изображения. Ширина линии увеличивается в направлении S187 PDR1. Форма спектра линии далека от гауссовой и имеет несколько пиков (Puc. 4.5). Особенностей в линии, характерных для поглощения, не наблюдается в направлении на ядро S187 NE (в отличие от S187 SE, [25]) предполагая аналогичный эффект в направлении S187 PDR1. Линий C<sup>18</sup>O или излучения SCUBA 850мкм не обнаружено в направлении пика HCO<sup>+</sup>, связанного с S187 PDR1. Центроид линии соответствует доплеоровской скорости в ~15 км с<sup>-1</sup>.

Газ, излучающий в линии НСО<sup>+</sup>, вероятно расположен за передним краем ударных волн (прослеживаемых на 5.8 мкм Spitzer) и слоем атомарного газа оболочки. Эта картина отличается от классического представления об эволюции области ФДО, где атомарный газ обнаруживается между областью H II и молекулярным веществом [184]. Структуры, наблюдаемые в излучении на 5.8 мкм, выглядят нитевидными, в отличие от S187 PDR2. Источник второго класса обнаруживается в направлении пика в линии HCO<sup>+</sup> относящегося к S187 PDR1. Вероятно, этот газ мог выжить после прохождения через него ударных волн. Распространённость НСО<sup>+</sup>, должна увеличиться вследствие данного процесса. Однако, прямого свидетельства реализации подобной схемы мы представить не можем. Для этого требуются наблюдения с высоким разрешением в ряде линий. Разница между фронтами образования HCO+ и разрушения H<sub>2</sub> обсуждалась в работе Kirsanova, Wiebe [169]. Подобный эффект может быть усилен фрагментацией газа. Диаграммы позиция-скорость в линии Н I асимметричны относительно пиков в молекулярном газе. Молекулярные линии ярче в направлении положительных скоростей. Так как атомарный газ образуется вследствие диссоциации, подобный эффект может быть вызван не-однородным облучением или ослаблением фрагментом, трассируемым в HCO<sup>+</sup>.

Структура диаграмм позиция-скорость предполагает, что область S187 PDR2 расположена более или менее ребром к наблюдателю (~  $20^{\circ}$ ). Структура излучения на 5.8 мкм Spitzer и 4.6 мкм WISE предполагает наличие эффекта экранирования. Карта лучевой концентрации (Рис. 4.7) показывает, что большая часть атомарной массы находится перед экраном, у границы H II. Диаграмма позиция-скорость в атомарном газ сигнализирует о наличии стенки на границе области H II, (Рис. 4.17, b). На диаграмме позиция-скорость (Рис. 4.17, с) и на поканальных картах (Рис. А.1, А.2, А.3) трассируется по-кидающее H II зону излучение на расстоянии до 4 пк от центра H II зоны. Руководствуясь представлением о пространственно-кинематической структуре атомарного газа H I, мы делаем вывод, что зона H II только на некоторых секторах эффективно закрыта молекулярным газом и пылью.

#### 4.5 Основные результаты

- Представлены результаты наблюдений с высоким угловым разрешением (8 " или 0.06 пк) излучения в линии Н I в направлении области Н II S187. Данное разрешение является рекордным для линии Н I в галактике.
- Используя высокое качество полученных данных, были оценены физические параметры атомарного газа в направлении NVSS 012258+614815и оболочки S187. Масса атомарного газа, связанного с S187, оценивается в 260±56 М<sub>☉</sub>. Медианное значение спиновой температуры оболочки оценено в ~50 К. Характерный размер оболочки ~4 пк, однако толщина атомарного слоя оценивается в диапазоне от 0.2 пк до 4 пк.
- Форма распределения атомарного газа близка к расширяющейся сфере, пространственно коррелируя с излучением на 12 мкм WISE и трассируя результаты взаимодействия между зоной Н II и молекулярным облаком.
- Атомарная оболочка является крайне неоднородной и содержит в себе по крайней мере ~100 фрагментов, медианная масса которых равна ~1.1 М<sub>☉</sub>. Суммарная масса фрагментов оценивается больше, чем ~114 М<sub>☉</sub>, что близко к всей массе атомарной фракции оболочки. Раз-

меры обнаруженных фрагментов варьируются от 0.03 до 0.23 пк, зависимость массы-размера близка к степенному с индексом в 2.39±0.08. Эта оценка весьма близка к аналогичным оценкам для молекулярных облаков и предполагает, что они являются дозвездными ядрами, эрродирующими под действием УФ излучения.

— Два молекулярных ядра (S187 NE и SE) обнаружены и описаны в окружении S187. Они имеют близкие массы (~1200 M<sub>☉</sub> и ~900 M<sub>☉</sub>, соответственно) и находятся в различных физических состояниях. 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 ФДО не обнаруживается, что предполагается при контакте с Н II зоной. Ядро S187 NE только начало испытывать воздействие оболочки. Никаких признаков процессов образования звезд в ядре не обнаружено. Три молодых звездных объекта присутствуют в области контакта с атомарной оболочкой. Пространственно-кинематическое распределение молекулярных линий предполагает нагрев и увеличение турбулентных движений ближе к зоне контакта. Периферия ядра, находящаяся в направлении H II области, разрушена, вероятно, полем излучения.

# Глава 5. Системы сгусток, диск, истечение у массивных протозвезд

В настоящее время существует по крайней мере шесть конкурирующих теоретических сценариев образования массивных звед: сценарий турбулентного ядра с постоянной аккрецией и монолитным коллапсом [15], конкурентной аккреции [16], глобального иерархического коллапса [17], глобального неизотопного коллапса [18] и аккреции вследствие инерциальных внешних потоков [19], набор массы вследствие ударных волн и коллапса (collect and collapse)[20] (список не полный). Обсуждается роль стимулированного звездообразования [21], в которой плотные области газа могут быть дополнительно сжаты давлением вследствие нагрева УФ излучением [22]. Такое разнообразие сценариев вызвано, тем, что в данный момент меняется парадигма понимания процессов образования звезд большой массы. От предположения о квазистачности процессов переходят к предположениям, в которых газ и массивная протозвезда/кластер эволюционируют одновременно[18]. Для дальнейшего понимания процессов эволюции требуются наблюдения в различных частотных диапазонах, сопоставления излучения различных молекулярных линий трассирующих разные области около протозвездного объекта с данными наблюдения пылевого континуума и излучения компактных ионизированных зон, совместно - на разных масштабах. Наблюдения на одиночных антенных не способны разрешить детали движений газа около протозвездного объекта (разрешение в 12 " соответствует линейным размерам в 0.1 пк на расстоянии 2 кпк). Интерферометрические наблюдения обладают существенным недостатком связанным с потерей потока от протяженных структур. Как следствие, интерпретация движений газа на масштабах от ядра до протозвездного сгустка затруднена.

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, [22]). Данный механизм подтверждается большим числом косвенных признаков (см., напр., [24; 25]). Наиболее очевидным аргументом является факт накопления массы в оболочке H II зоны[23], которое объясняется сверхзвуковым характером расширения стенок. Фрагментация оболочки H II зоны обсуждалась в главе 4.4.2, однако, молодого звёздного поколения, ассоциированного с фрагментами, не зарегистрировано. Кроме того, предполагается [26], что в поле УФ излучения величина плотности газа во фрагментах будет стремиться 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.

В данной главе представлен анализ 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.

разделе 5.1 представлено описание системы диск-истечение в В S255IR NIRS3 и его возможное влияние на химическую дифференциацию окружающего газа. В разделе 5.2 представлено описание кинематики ядра S255N, особенностей его неоднородной структуры и наблюдательных проявлений взаимодействия газа ядра S255N и сгустка S255N SMA1, а также оценка физических параметров газа. В разделе 5.3 представлены особенности, связанные с источником W42 MME. Это объект с ассоциированными мазерными источниками, высокоскоростным истечением. В нем, однако, не обнаруживается излучения радиоконтинуума трассирующего ионизированный газ, что свидетельствует об отсутствии UCH II зоны, и, как следствие, молодости объекта. В разделе приведены некоторые особенности морфологии излучения, которые позволяют сделать вывод о механизмах аккреции газа на протозвезду, сделаны некоторые оценки физических параметров и показано отсутствие UC H II зоны с высоким соотношением С/Ш. В разделе 5.4 представлено описание области ФДО, сформированной двумя массивными молодыми звездами S305 VM2&VM4. Они образуют две Н II зоны, вложенные одна в другую. В разделе показаны особенности морфологии стенок Н II зон и оценки физических параметров газа, а также наблюдающихся неоднородностей в молекулярном газе, окружающем области ФДО. В разделе 5.5 представлены основные результаты главы.

Основные результаты исследований опубликованы в работах Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах / П. М. Землянуха [et al.] // Астрономический Журнал. 2018. Т. 95, № 5. С. 344—365,

The Disk-Outflow System around the Rare Young O-type Protostar W42-MME / L. K. Dewangan [et al.] // The Astrophysical Journal. 2022. Vol. 925, no. 1. P. 41, Probing Gas Kinematics and PDR Structure around O-type Stars in the Sh 2-305 H II Region / N. K. Bhadari [et al.] // The Astrophysical Journal. 2021. Vol. 922, no. 2. P. 12,

The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation / I. Zinchenko [et al.] // The Astrophysical Journal. 2015. Vol. 810, no. 1. P. 18

, Multiline observations of S255IR with ALMA / I. Zinchenko [et al.] // IAU Symposium. 2018. Vol. 332. P. 270—273.

#### 5.1 Ядро S255IR

Область S255IR (S255-2) расположена на расстоянии 1.78<sup>+0.12</sup><sub>-0.11</sub> КПК [185]. Эта область является плотным молекулярным ядром ( $M \sim 300 M_{\odot}, n$  $\sim 2 \times 10^5$ см<sup>-3</sup>, Т<sub>kin</sub>  $\sim 40$  K [147]). Ядро является частью молекулярного облака, которое включает S255N (обсуждается в разделе 5.2) и S255S. Внутренняя структура ядер S255IR и S255N обсуждалась в работах «A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics» [186], «The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation» [7], «Пространственно-кинематическая структура области образования массивных звезд S255N на разных масштабах» [3]. Облако расположено между Н II зон S255 и S257. Облако граничит с Н II зонами. В зоне контакта наблюдаются фронтами фотодиссоциации, наблюдаемыми в ИК диапазоне [187] (см. Рис. 5.1). В то же время в трассерах плотного газа стенок около  $\Phi \square O$ не наблюдается [147], как и нагрева по оценкам кинетической температуры из линий изотопологов СО. Предполагается, что молекулярное облако сформировано расширением Н II зон [187], что стимулировало образование звезд. Молекулярный газ наблюдается в окрестности Н II зон. Молодое звездное поколение изучалось в работах [57; 188—190]. Дифференциация возрастов молодого звездного поколения и HII зон подтверждает гипотезу о стимулированном звездообразовании. Область S255IR содержит в себе скопление молодых звезд,

видимых в ближнем ИК диапазоне, UC H II зоны (S255-2a, S255-b и S255-2c) [57]. В ядре разрешено 32 ИК источника [191]. Наиболее яркий из них (>70 Ян 1.65 мкм MSX [192]), S255 NIRS3, весьма активно изучается. Macca газа, ассоциированногог с источником оценивается в  $\sim 20~M_{\odot}$  [и ссылок в ней 193]. Он окружен сплюснутой вращающейся структурой типа оболочки с субкеплеровским вращением [193]. Масса газа, непосредственно окружающего протозвездный объект (<2700 a.e.) составляет 1.64 M<sub>☉</sub> [193]. Темп аккреции оценивается  $1 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  [193]. В этом объекте была зарегистрирована вспышка, связанная с выпадением массы  $(10^5 L_{\odot}, 10^{-3} M_{\odot})$  [и ссылок в ней 194]. Признаки предыдущих эпизодов аккреции предполагаются формой истечения [185], трассируемого в РСДБ наблюдениях мазерных пятен за несколько эпох. Особенности движения мазерных пятен также предполагают вращающуюся структуру, внутренние части которой, по всей видимости, запускают истечение. Структура истечений и его воздействия на окружающий газ обсуждалась в работах [7; 12; 195; 196]. Ниже рассматривается воздействие протозвездных объектов на крупномасштабную структуру газа ядра по результатам анализа комбинированных данных полученных из наблюдений на интерферометре и одиночной антенне.

#### 5.1.1 Данные наблюдений и их обработка

Область S255IR наблюдалась на интерферометре SMA в компактной конфигурации в декабре 2010 на частоте 350 ГГц. Наблюдения проводились в три сессии, в направлении на S255IR NIRS3 и со смещением на северо-восток и югозапад для картирования истечения. Размер каждой из восстановленных карт определялся в уровнем 0.1 по основному лучу антенны интерферометра (54″ для 1.1 мм). Температура шума системы изменялась в промежутке 200–400 К. Диапазон заполнения пространственных частот был равен 10–90  $k\lambda$ . Также, проводились наблюдения на частоте 225 ГГц в январе 2011 года в протяженной конфигурации интерферометра. На этой частоте ширина луча на половинном уровне (FWHM) одной антенной решетки равнялась 54″, температура шума системы была в диапазоне 90-200К при покрытии пространственных частот в диапазоне 50-350  $k\lambda$ .



Рисунок 5.1 — Трехцветное IRAC изображение Спицера области S255N и ее окружения. Композиция из изображений в диапазоне 8.0 µm (красный), 4.5 мкм (зеленый), и 3.6 мкм (голубой). S255N расположена в комплексе областей текущего и прошедшего звездообразования [24].

Картирование источника проводилось также на телескопе IRAM-30м в линиях N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>J=3–2 (октябрь 2012г.) SiO J=5–4 (декабрь 2012), CO J=3–2 и CS J=7–6 (январь 2014). Температуры шума системы равнялись ~200 K, ~300 K, ~600 K и ~600 K, соответственно. Размеры карт равнялись  $2.0 \times 2.5'$ (N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>и SiO) и 1.5 × 1.0' (CO и CS). Подробное описание наблюдений представлено в работе «The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation» [7].

Данные одиночной антенны и интерферометрические данные были обработаны стандартными процедурами пакетов GILDAS и MIR. Затем данные были совмещены для построения комбинированных изображений.

Как отмечено ранее, интерферометрические данные обладают ограниченной чувствительностью к низким пространственным частотам, что соответствует протяженным структурам на небе. Набор коротких баз ограничен фактическим наличием антенн, однако, в ряде линий поток от протяженных структур значителен. Это затрудняет или делает невозможным интерпретацию наблюдений. Данную проблему можно обойти исключив компактные базы или соответствующие каналы из рассмотрения. Подобное, впрочем, справедливо при наблюдении излучения оптически тонкой среды, что не часто встречается при наблюдении протяженных источников. Однако, возможно совместить наблюдения одиночной антенны и интерферометра, заполнив низкие пространственные частоты из данных одиночной антенны. Для этого из наблюдений одиночной антенны синтезируется набор видностей в полной мере его представляющий, потоки инструментов совмещаются в области перекрывающихся баз, общий набор гридируется и восстанавливается аналогично стандартным процедурам синтеза интерферометрических изображений [197]. Пример пространственных спектров представлен на Рис. 5.2.

В результате комбинирования были построены изображения в линиях молекул N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>J=3–2, SiO J=5–4, CO J=3–2 и CS J=7–6 на основе наблюдений IRAM-30м и SMA. Представленные ниже данные были повторно обработаны с использованием процедуры SDCONTINUUMIMAGING пакета CASA. Карты в линиях CO и CS значительно отличаются от опубликованных в работе[7], в отличии от карт в линиях N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и SiO. Это обусловлено особенностями обработки - в работе «The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation» [7] восстанавливались 3 карты отдельно (используюя MIRIAD), которые потом сводились в одно изображение мозаикой. В данной работе изображение восстанавливалось из 3-х полей со смещенными фазовыми центрами одновременно, из трех наборов видностей. При чистке использовалась одна модель источника на 3 датасета видностей, чистка проводилась в наборе масштабов кратных  $2^n \times FWHM$ , где n=[0...6], FWHM - ширина на половинном уровне синтезированного луча.

Параметры обсуждаемых кубов данных представлены в таблице 8.

N	Молекула, линия	$E_u$ ., K	ДН (″х″;°.)	RMS <sup>1</sup> , Ян/луч	Порог <sup>2</sup> Ян/луч
1	CS J=7-6	49.37K	2.6x2.58;60	0.2	0.6
2	CO J=3-2	$5.53\mathrm{K}$	2.1x1.8;-71	0.1	0.4
3	$N_{2}H^{+}J_{=}4-3$	9.32K	2.6 x 2.58;59	0.2	0.5
4	SiO J= $5-4$	$14.48\mathrm{K}$	3.7x3;78	0.05	0.15

Таблица 8 — Параметры восстановленных кубов данных



Рисунок 5.2 — Пространственный спектр в направлении источника S255IR NIRS3 по данным SMA и 30м IRAM после относительной калибровки потока. Красные точки соответствуют 30м антенне, черные - интерферометру.

#### 5.1.2 Описание наблюдаемых феноменов

Описание наблюдений представлено в статье «The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation» [7]. В данном разделе описаны только те результаты наблюдений, относящиеся к структурам с размерами 3-40" которые могут указывать на взаимодействие протозвезды и окружающего его газа ядра. Эти данные основаны на результатах комбинирования данных телескопов SMA и 30м IRAM. Кроме того, представленные данные сопоставляются с данными наблюдений ALMA, опубликованными в работе «Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations» [195] и любезно представленными И.И. Зинченко. Данные ALMA обладают существенно большей чувствительностью, динамическим диапазоном и заполнением UV плоскости, однако, имеют меньшее поле карты. Кроме того, в них отсутствуют нулевые и околонулевые пространственные частоты, связанные с масштабами порядка масштабов молекулярного облака и ядра. Используя весь набор имеющихся наблюдений, нами представлен анализ морфологии газа ядра, вовлеченного во взаимодействие с протозвездным объектом S255IR NIRS3.



Рисунок 5.3 — Карта «красной» компоненты излучения линии CO(3-2). Контурами представлена интегральная интенсивность излучения в диапазоне, указанном на вставке. Изображение взято из «Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation» [196] в той же линии и соответствует диапазону [20,90] км с<sup>-1</sup>, покрывает только часть карты. Маркерами отмечены координаты сгустков S255IR SMA1 (NIRS3) [57] и SMA2 [196]. Размеры синтезированных лучей телескопов приведены слева снизу.

На рисунках 5.3, 5.4, 5.6, 5.5, 5.7 представлены карты нулевого момента в линиях CO, CS, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>и SiO. Поканальные карты (Рис. А.5, А.6, А.7) представлены в аппендиксе. Излучение в крыльях линии CO разбито на 6 диапазонов:



Рисунок 5.4 — Карта «синей» компоненты излучения в трех диапазонах линии CO(3-2), аналогично Рис. 5.3, со смещением в отрицательные значения. Изображение взято из «Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation» [196] в той же линии и соответствует диапазону [-67,-16] км с<sup>-1</sup>, покрывает только часть карты. Маркерами отмечены координаты сгустков S255IR SMA1 (NIRS3) [57] и SMA2 [196].

[-70,-40],[-36,-19],[-19,3],[70,30],[30,17],[17,11] км с<sup>-1</sup>, связанного с высокоскоростными истечениями. Как отмечено в работе «Disks and outflows in the S255IRarea of high mass star formation from ALMA observations» [195] в «красном» и«синем» крыле линии наблюдаются истечения, источниками которых являютсяS255IR NIRS3 (или SMA1) и SMA2. Одно из них является коллимированным(с малым углом раскрыва) и с признаками прецессии (из SMA2), другое имеетбольшой угол раскрыва (NIRS3). Наблюдаемые данные позволяют обнаружитьналичие некоторых особенностей, не опубликованных ранее.



Рисунок 5.5 — Карта интегрального излучения в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (контуры в оттенках зеленого). Красными и синими контурами отмечено интегральное излучение в линии СО ([-36,-19] и [30,17] км с<sup>-1</sup>). Фоном изображено излучение в радиоконтинууме на частоте 1420 МГц. Размеры синтезированных лучей телескопов приведены слева снизу.

В «синем» крыле линии форма излучения различна на различных доплеровских скоростях. Компонента на скорости < -40 км с<sup>-1</sup>имеет структуру из 3-х пятен, каждое из которых в данных SMA+30м остается неразрешенной. Подобная структура на меньших масштабах наблюдается в данных ALMA[196]. Компонента на скорости [-36,-19] км с<sup>-1</sup>разрешена, имеет форму вытянутого пятна и расположена на большем расстоянии от источника (24″). На доступном нам уровне чувствительности оно не является пространственно и кинематически связанным с высокоскоростной компонентой. Положение пятна смещено относительно линии, задаваемой узлами высокоскоростной компоненты, но может располагаться на предполагаемой линией прецессии. Пятно также наблюдается



Рисунок 5.6 — Аналогично Рис. 5.5, однако, контуры в оттенках зеленого соответствуют излучению в линии молекулы CS.

в непосредственной близости от S255IR SMA1 и S255IR NIRS3 и вытянуто том же направлении, что и структуры, описанные выше. Компонента с меньшей скоростью ([-19,3] км с<sup>-1</sup>) имеет более протяженную U-образную структуру в направлении юго-запад, а также крестообразную около S255IR NIRS3. Примечательно, что синее крыло линии наблюдается как к северо-востоку так и к юго-западу от объекта.

В «красном» крыле линии СО наблюдается в целом похожая картина. Излучение тянется на большее расстояние, чем это прослеживается в данных ALMA. Высокоскоростная и среднескоростная компонента в структуре, связанной с SMA2, по форме близки к сектору с углом ~ 5°. Раскрыв сектора заканчивается пиком излучения, при этом пики в разных диапазонах скоростей в линии СО пространственно разнесены, ближе всего к источнику истечения расположен пик в низкоскоростной компоненте, затем в высокоскоростной и,



Рисунок 5.7 — Аналогично Рис. 5.5, однако, контуры в оттенках зеленого соответствуют излучению в линии молекулы SiO. Стрелочками отмечена часть источников в радиоконтинууме и пик в излучении ряда молекулярных линий.

на максимальном удалении в средней. Около источника NIRS3 наблюдается излучение во всем диапазоне скоростей, при этом излучение на больших скоростях более компактно, на меньших - более протяженное. В направлении на Н II зону S255-2a (см Рис. 5.7) излучение во всех компонентах линии СО менее яркое. Среднескоростная компонента истечения из SMA1 заканчивается на границе зоны S255-2b. Детектируется также излучение в красном крыле линии юго-западной части карты, куда направлено истечение в «синем» крыле линии.

Излучение в линии CS наблюдается в протяженных и компактных структурах (Рис. 5.6). Компактные яркие пятна ассоциируются со сгустками SMA1 и SMA2. Форма пятен несферическая и вытянутая в направлении истечений трассируемых в крыльях линии CO. Наблюдается пятно и юго-западней SMA1 (также в N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>и SiO, см, Рис. 5.7, 5.6, 5.3, 5.4), граничащее с низкоскоростной частью крыла линии CO, как красного так и синего. Вероятно, данная структура лежит на границе с полостью, образованной истечением. Протяжённая компонента в излучении имеет вид неоднородной структуры, вызванной, вероятно, шумами. Компонента имеет аморфную неоднородную форму и детектируется в направлении всего молекулярного ядра.

Структура излучения в линии  $N_2H^+$  отличается от наблюдаемой в линии молекулы CS. Пики излучения компактных структур смещены относительно пиков CS и не соответствуют положению сгустков и протозвездных источников. Излучение  $N_2H^+$  ярче в направлении SMA2. Излучение слабее в направлении, где детектируется излучение в крыле линии CO. Визуально, карта разбита на две части истечением из SMA2. Структура излучения  $N_2H^+$  менее однородна, чем в CS. В излучении линии SiO компактная компонента доминирует над протяженной. Пик ассоциируется с SMA1. Протяженная часть имеет малую интенсивность. Аналогично CS,  $N_2H^+$  и SiO наблюдается пятно излучения к юго-западу (Обозначено (1) на Рис. 5.7).

# 5.1.3 Структура ядра S255IR

Вышеупомянутая структура излучения в приведенных линиях согласуется со структурами, наблюдаемыми в CO, CS и  $N_2H^+$  [195; 196] и не противоречит данным в линии CH<sub>3</sub>CN, представленным в работе [193] по данным ALMA. Целью вышеупомянутых исследований являлось изучение структур на меньших масштабах, чем в диссертационной работе. Компактное излучение в линии CS весьма точно повторяет форму излучения в линии C<sup>34</sup>S из [Рис. 4, колонка справа 196]. При этом наблюдаемые в комбинированных данных структуры имеют большую протяженность. Комбинированные данные в CO позволили выявить большее число слабых протяженных деталей, чем в [7; 186; 198] (SMA, и компактные и расширеные конфигурации + комбинирование с 30м IRAM). Также, в комбинированных данных наблюдается излучение в крыльях линии CO вблизи SMA2. В данных CS пик в направлении на SMA2 не так выражен, в остальном форма сходна. Излучение в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> имеет ряд отличий от упомянутых работ в деталях. Несмотря на меньшую восстановленную диаграмму и лучшую чувствительность, излучение более однородно, пики в направлении SMA1 и SMA2 менее выделены и имеют другую форму. Карты в SiO имеют ограниченную чувствительность, однако, ряд деталей в истечении и в плотных сгустках совпадает с данными ALMA [196]. Протяженная компонента SiO имеет форму, отличную от представленной в [7]. В отличие от представленных ранее данных, излучение детектируется в меньшей мере, что, вероятно, связано с неоднозначностью относительной калибровки потоков в разных методах и деконволюции изображения одиночной антенны.

#### Структура газа ядра

В работах «Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations» [195] и «Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation» [196] констатируется наличие волокна, соединяющего сгустки SMA1 и SMA2. Его размер, однако, близок к максимальному регистрируемому интерферометром, и волокно, возможно, его реальные размеры больше описанных. Наши данные (Рис. 5.6, 5.5, А.5, А.6, А.7) не указывают на наличие подобной структуры, что, однако, может быть связано с как с аппаратурными эффектами так и не подходящим выбором линий молекул для регистрации такого рода структур.

Структура ядра, не затронутого истечениями, не однородна. Однако, неоднородности не имеют характер организованных структур нитевидного характера (по крайнем мере на доступном уровне чувствительности). Признаки подобной картины представлены, например, в [199]. Причины наличия неодородностей могут являться свидетельством внешних воздействий. Данное ядро расположено между двух Н II зон, и его неоднородность может быть следствием возмущений связанных с компрессией стенками зон. Наличие неоднородностей подтверждается невысоким фактором заполнения при наблюдениях на одиночном телескопе[200]. Отсутствие организованных структур является свидетельством отсутствия процессов инерциальной аккреции на масштабах порядка размера ядра. Сценарий инерциальной аккреции предполагает наличие выделенных направлений, по которым происходит приток газа в ядро. Направлений, а также выделенных структур не наблюдается (Рис. 5.6, 5.5, А.5, А.6, А.7). Морфология газа предполагает реализацию сценария турбулентного ядра, наличие источников, (S255-2a, 2b, NIRS3, SMA2) которые можно выстроить в последовательность, предполагает последовательное (и, возможно, стимулированное) звездообразование. Отличие формы областей излучения CS/N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> предполагает наличие активных химических процессов не только в стенках пустот и в плотных сгустках, но и в веществе между сгустками.

#### 5.2 Ядро S255N

Исследуемый нами объект является частью молекулярного облака[10; 201], расположенного между 2-х зон ионизированного водорода S255 и S257 (Рис. 5.1). Предполагается, что весь комплекс S254-S258 образован последовательным звездообразованием [62], расширение зон Н II привело к сжатию газа в молекулярное облако. Оно содержит в себе 3 ядра: S255IR, S255S и S255N. Первое находится на более позднем этапе эволюции[57; 198]: его излучение является существенно более ярким в ИК диапазоне, в нем зарегистрировано мазерное излучение паров воды и метанола в линиях II класса.[186; 202]. Ядро S255S является наиболее молодым из всех трех ядер, о чем свидетельствует меньшая интенсивность излучения в диапазоне ИК и 1.3 мм, а также компактность истечения в ядре [198]. В нем зарегистрировано меньшее количество молекулярных линий в 1.3 мм диапазоне [198], а также нет признаков образования массивных звезд, поэтому оно нами не рассматривается.

Ранее, н.р. соискателя были проведены наблюдения молекулярного облако, частью которого является S255N (другие названия Sh2-255 FIR1 и G192.60-MM1), на однозеркальных радиотелескопах (OSO-20м, IRAM-30м, NRAO-12м)[200], а также ядра S255N на интерферометрах SMA и VLA[186]. Масса ядра S255N по данным наблюдений на одиночных антеннах ~300M<sub>☉</sub>,  $n_{H_2} \sim 2 \times 10^5$  см<sup>-3</sup>,  $T_k \sim 40$ K,  $\Delta V \sim 2$ км/с [200], его светимость порядка  $10^5 L_{\odot}$  [203]. В этой области наблюдаются ультракомпактная зона HII[204], а также мазеры H<sub>2</sub>O и CH<sub>3</sub>OH I класса. Такие характеристики ядра являются признаками образования звезд большой массы. Также, показано несовпадение положения пиков излучения в молекулярных линиях CO(2–1), HCN(1–0), HNC(1–0), HCO<sup>+</sup>(1–0), C<sup>18</sup>O(2–1), C<sup>34</sup>S(5–4) [200]. В работах [24; 186] показано наличие горячих массивных протозвездных сгустков в ядре, скорости половины из них

отличались от скорости окружающего их газа. Масса наиболее яркого из них  $\approx$  16 M<sub>☉</sub>[186] в пересчете на расстояние в 1.78 кПк[185]. В работе [186] обнаружено наличие 2-х спектральных компонент линии аммиака (1,1) в направлении, не совпадающем с горячим сгустком. В ядре присутствует несколько высокоскоростных истечений, что также говорит о богатой кинематике газа. В своей работе мы предпринимаем попытку оценить движение газа на масштабах от размеров ядра до сгустков, собрав имеющиеся наблюдения воедино. Кроме того, мы использовали подход, описанный в части 1.1, для анализа кинематики газа ядра, и выделения его излучения на фоне более яркого от газа сгустков. Для обнаружения и идентификации кинематических фрагментов ядра мы используем оригинальные методы анализа данных, однако, фрагменты прослеживаются и на диаграммах позиция-скорость в ряде молекулярных линий.

Таблица 9 — Список анализируемых линий. Символом \* отмечены данные, полученные в протяженной и компактной конфигурации. SMA+IRAM и SMA\*+IRAM – комбинированные данные

Молекула, переход	Частота, ГГц	Телескоп
$NH_3$ (1,1)	23.69	VLA
$NH_3$ (2,2)	23.72	VLA
CH <sub>3</sub> OH-E $(5_1 - 4_2)$	216.94	SMA
SiO $(5-4)$	217.10	SMA+IRAM
CO (2—1)	217.23	SMA*+IRAM
DCN $(3-2)$	217.23	SMA
CH <sub>3</sub> OH-E $(4_2 - 3_1)$	218.44	SMA
$C^{18}O(2-1)$	219.65	$SMA^*$
$CH_{3}CN$ (12–11)	220.59	$SMA^*$
CH <sub>3</sub> OH-E $(8_0 - 7_1)$	220.07	SMA
CH <sub>3</sub> OH-E $(8_{-1}-7_0)$	229.75	SMA
CH <sub>3</sub> OH-E $(3_{-2}-4_{-1})$	230.02	SMA
$CH_3OH (9_{-1}-8_0)$	278.30	SMA
$N_2H^+$ (3–2)	279.51	SMA+IRAM
$DCO^{+}$ (4-3)	288.14	SMA
SO $(6_5 - 5_4)$	288.51	$SMA^*$
$C^{34}S$ (6–5)	289.20	SMA
CH <sub>3</sub> OH-E $(6_0-5_0)$	289.93	SMA

# 5.2.1 Данные наблюдений и их анализ

В работе используются данные наблюдений, полученные на интерферометрах SMA[186; 198], VLA[186] и однозеркальном 30-м телескопе IRAM[186; 198]. В Табл. 9 приведен список наблюдавшихся молекул, частот их переходов, а также использованных инструментов. Все данные были повторно обработаны, для [186] проведена самокалибровка. Линии CO (2–1), C<sup>18</sup>O(2–1), CH<sub>3</sub>CN(12–11), SO(6<sub>5</sub> - 5<sub>4</sub>) наблюдались два раза в компактной и один раз в протяженной конфигурации SMA. Они были сведены в одно изображение на каждую линию. Ширина синтезированной диаграммы направленности для такого случая составляла  $\approx 1.14''$  (217 ГГц), а для остальных наблюдений (в компактной конфигурации SMA)  $\approx 3.4''$ . Для VLA ширина диаграммы равнялась  $\approx 2.55''$  (23.7 ГГц) для, IRAM — 12'' (217 ГГц). Координаты фазового центра при наблюдениях на SMA были  $\alpha$ (2000)=06<sup>h</sup>12<sup>m</sup>53.800<sup>s</sup>,  $\delta$ (2000)=17°59'22.097''.

# Обработка данных

Так как одна из основных целей нашей работы - исследование кинематики протозвездного ядра на разных пространственных масштабах, мы рассматривали объекты разной протяженности, от  $2.5 \times 10^{-3}$  пк до 0.48 пк, которые были ранее обнаружены в ядре S255N[203]. Максимальный угловой размер, к которому чувствительны инструменты на рассматриваемых нами частотах, для VLA равен 66", для SMA - 25", что соответствует линейным размерам в 0.52 и 0.2 пк, соответственно, на расстоянии в 1.78 кпк[185]. Такие ограничения затрудняют интерпретацию наблюдений в широком диапазоне пространственных масштабов. Существенную роль также играет потеря потока интерферометром, которую мы компенсировали комбинированием данных с наблюдениям SMA сильно отличается от наблюдаемого на IRAM-30м в том же направлении. Поэтому мы совместили данные интерферометра SMA с данными наблюдений на одиночной антенне IRAM-30м. Комбинирование проводилось для линий N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3–2), CO(2–1) и SiO(5–4), а также для данных наблюдений в континууме на 1.3 мм. Спектральные линии совмещались в пространстве видностей с относительной калибровкой по интегральному потоку в области перекрывающихся пространственных частот; для данных континуума проводилось совмещение восстановленных изображений с помощью Фурье-преобразования через стандартные процедуры пакета MIRIAD [205]. Для относительной калибровки потока синтезированных видностей по данным одиночной антенны на частоте линии CO(2—1) использовались "крылья"линии в диапазоне 3-7 км/с и 11-15 км/с.

Для линий CO(2—1), C<sup>18</sup>O(2—1), SO(6<sub>5</sub>—5<sub>4</sub>), DCO<sup>+</sup>(4—3), DCN(3—2) проводилась самокалибровка наблюдений по линии CH<sub>3</sub>OH (4<sub>2</sub>-3<sub>1</sub>) [186]. Самокалибровка по этой линии была достаточно эффективна, так как в поле телескопа наблюдался единственный яркий мазерный источник[206].

### 5.2.2 Результаты

#### Пространственно-кинематическая структура ядра

Для исследования кинематики газа внутри ядра мы рассматривали в первую очередь излучение в линиях  $N_2H^+(3-2)$ , и  $NH_3$  (1,1) так как они трассируют плотный, спокойный газ. Кроме того, обе линии содержат сверхтонкую структуру, что позволяет точнее измерять доплеровский сдвиг и, как следствие, скорость газа. Данные  $N_2H^+$  мы сопоставляем с линиями CO (2–1), SO (6<sub>5</sub>–5<sub>4</sub>), C<sup>18</sup>O (2–1) на диаграмме позиция-скорость, которая представлена на Рис. 5.18.

Ядро S255N является частью более протяженной структуры [201], которая также наблюдается в наших данных. Излучение в линии CO(2—1) не имеет границы на севере и на юге карты как видно из Рис. 5.8 (комбинированные данные). Карта первого момента линии на масштабах больше 20" соответствует приведенной в [10]. Однако, из сопоставления первого и второго момента линии CO (Рис. 5.9) следует, что ширина линии растет к центру диапазона скоростей по закону, близкому к линейному. Направление изменения скорости близко к направлению на ионизированные области S255 и S257 от центра карты, при этом в центре карты наблюдается среднее значение скорости газа. При этом отсутствует выделенная ось симметрии. Наличие такой оси характерно для вра-



Рисунок 5.8 — Карта первого момента линии CO(2—1)(фон). Контурами отмечены изофоты пиковой интенсивности аммиака (1,1) [4, 5.4, 6.8, 8,9.5]К. Звездочками отмечено положение сгустков по данным [186]

щения, что показано в работе [207]. Подобное распределение не характерно для изотропного коллапса. Однако, уширение линии к центру диапазона может являться признаком перемешивания двух порций газа, движимым расширением оболочек.

Как видно из Рис. 5.11, кинематика ядра весьма сложна. В работе [186] указано на наличие двух спектральных компонент аммиака в газе, не относящихся к протозвездным сгусткам, что также обнаруживается в наших данных. Наблюдается смещение скорости компонент от точки к точке. Общее направление проходит с юго-запада на северо-восток и восток, с ~ 6.7 км/с до ~ 11 км/с. Однако, скорость изменяется не равномерно. Есть области, в которых смещение линии практически отсутствует. На Рис. 5.10 представлено распределение количества пикселей по скоростям для линии CO(2–1), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3–2) и NH<sub>3</sub>(1,1), Наибольшее совпадение пиков распределения разных линий прослеживается на скорости ~ 7.8 км/с. Газ с такими скоростями локализован преимущественно



Рисунок 5.9 — Зависимость второго момента (ширины) линии для CO (2—1) и  $N_2H^+$  (3-2) от первого (скорости).

в юго-западной части карты. На скорости в ~ 7.1 км/с также есть небольшой пик, расположенный на южном краю карты. По данным работ [10] и [186] скорость ядра S255N равна 8.9 км/с, что соответствует пику 4 на Рис. 5.10. Однако, в линии CO его положение смещено относительно  $N_2H^+$  и NH<sub>3</sub> на ~ 0.3 км/с. Также присутствуют небольшие пики на скоростях 8.3 км/с и 9.6 км/с. Мы обозначаем каждый кинематический фрагмент номерами от 1 до 5, начиная с наименьший скорости, в соответствии с гистограммой на Рис. 5.10. Параметры фрагментов приведены в Таб. 10.

Таким образом, газ в ядре распределен не однородно. Существуют области, не имеющие существенного смещения скорости, которые в дальнейшем называем кинематическими фрагментами ядра. На Рис. 5.18 представлен частотный срез куба данных в линиях CO(2-1),  $N_2H^+(3-2)$ ,  $SO(6_5-5_4)$  и  $C^{18}O(2-1)$ вдоль пути, проходящего по периферии ядра, пересекая фрагменты. Путь отмечен на Рис. 5.12 красной ломаной. Срез спектра излучения в линии СО в целом повторяет пространственно-частотную структуру линий  $N_2H^+$  и  $NH_3$ , однако в линиях SO и  $C^{18}O$  прослеживаются существенно более компактные структуры.



Рисунок 5.10 — Гистограмма распределения скоростей в разных линиях линиям: цифрами и вертикальными пунктирными полосами обозначено положение кинематических фрагментов ядра. Для построения гистограммы скоростей СО использована карта 1-го момента, для остальных - оценка скорости методом

кNN. Звездочками отмечены скорости сгустков по данным [186]

Фрагменты 1, 3 и 4 коррелируют с обеими линиями, второй фрагмент преимущественно с С<sup>18</sup>О. Излучение линии СО на скорости ~ 7.9 км/с наблюдается на всем пути среза. Мы полагаем, что оно связано с окружающим ядро разреженным газом, наблюдавшимся в [201]. В отличие от СО, излучение в NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> на данной скорости локализовано лишь в юго-восточной части ядра. Эта часть изображена на Рис. 5.18 в начале и конце пути среза. На расстоянии 50"от начала наблюдаются 2 спектральные компоненты как в линии NH<sub>3</sub>, так и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, что также ранее отмечалось в работе [186]. В линии СО красная компонента явно не выражена. Также, в линиях СО и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> с угловым и спектральным разрешением в 1.2 ″ и 0.5 км/с граница между фрагментами отсутствует, исключая 5-й фрагмент. Стоит также отметить, что несмотря на разное пространственное положение максимумов излучения в линиях NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, в остальном их



Рисунок 5.11 — Карты доплеровской скорости спектральных компонент линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3—2) по комбинированным данным наблюдений SMA и IRAM. Изображение слева отражает скорость синей компоненты в спектре, справа - красная спектральная компонента. Контурами приведена пиковая интенсивность линии NH<sub>3</sub> с линией уровня [4.,5.3,6.7,8.1,9.5] К. Белыми звездочками отмечено положение сгустков по данным [186]. Красной ломаной линией отмечен путь среза спектрограммы на Рис. 5.18 с началом в кружочке и отметкой каждые 10″.

пространственно-частотные распределения близки друг к другу. Большая протяженность излучения  $N_2H^+$  объяснима дополнением к интерферометрическим данным наблюдений на одиночной антенне.

Скорости сгустков SMA1, SMA2 и SMA3, приведенные в статье [186], близки к скоростям газа, наблюдаемого в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3—2), что не верно для SMA4 SMA5 и SMA6. Кроме того, между сгустками SMA1-3 прослеживается непрерывное вытянутое волокно газа в линии C<sup>18</sup>O(2—1) с градиентом скорости вдоль него, что отражено на диаграмме позиция-скорость Рис. А.8. Примечательно, что линия DCO<sup>+</sup>(4—3) смещена относительно максимумов излучения C<sup>18</sup>O, наблюдаемого в сгустках. Пик излучения DCO<sup>+</sup>, находящийся на краю карты, имеет координаты (7",-34") относительно фазового центра при ширине линии на половинном уровне 0.7 км/с с центром на скорости 8.8 км/с и интенсивностью линии  $\approx$  3 К. Спектры линий DCO<sup>+</sup>, CO и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> приведены на Рис. А.9. У линии CO присутствует красное крыло, что является признаком высокоскоростного истечения. В статье [208; 209] приведен ИК источник с близкими координатами, который, по всей вероятности, идентифицируется с истечением и пи-



Рисунок 5.12 — Диаграмма позиция - скорость в линии NH<sub>3</sub>. На фоне представлена модель кеплеровского тора с параметрами R<sub>out</sub>=0.06 пк, R<sub>in</sub>=0.04 пк, M<sub>c</sub>=8.5 M<sub>☉</sub>. Контуры: изофоты [2.8, 3.2, 3.7, 4.3, 5.0] К основной компоненты сверхтонкой структуры линии аммиака, крестиками - положение скорости методом к-Ближайших Соседей в той же линии. Горизонтальными отрезками отмечена погрешность оценки скорости.

ком DCO<sup>+</sup>. Пространственно-скоростная структура газа в окрестностях сгустка SMA1 является более сложной, чем в остальном ядре.

(-)-)						
Номер фрагмента	Скорость, км/с	$\mathbf{T}_k,\mathbf{K}$	Комментарии			
1	$\sim 7.2$	10-25	SMA5			
2	$\sim 7.8$	10-40	SMA1, SMA4			
3	$\sim 8.3$	6-30,80	SMA3			
4	$\sim 9.1$	10-53	SMA2, SMA6			
5	$\sim 10.3$	12-23	Ориентирован в направлении истечения из SMA1			

Таблица 10 — Параметры кинематических фрагментов ядра. Т,К указан диапазон кинетических температур во фрагментах, полученный из переходов (1,1) и (2,2) аммиака.

#### Центральная область

Наибольший интерес представляет область пересечения кинематических фрагментов 2, 3 и 5 в окрестности SMA1. В этом направлении присутствует пик излучения континуума на 1.3 мм. Согласно данным, приведенным в статье [186], доплеровская скорость наиболее яркого сгустка, ассоциируемого с пиком излучения пыли S255N-SMA1, равна 8 км/с, однако в работе [24] высказывается предположение о наличии двух пространственно неразрешенных сгустков внутри SMA1. Также, известно о биполярном истечении в линиях CO(2-1) и SiO(5-4). В статье [198] присутствует указание на вращение сгустка SMA1 радиусом в  $\sim 1.5''$ , что соответствует 2500 а.е. на расстоянии 1.78 кпк, однако, гипотеза о наличии двух сгустков не рассматривалась. По данным линии аммиака (Рис 5.13) в направлении на SMA1 нами наблюдается существенно более протяженная структура, чем описана в [198] и [186], ориентированная перпендикулярно истечению, скорость которой варьирует от 9 до 10.4 км/с преимущественно вдоль структуры. На Рис. 5.14 представлена карта скорости обнаруженного объекта, а также диаграмма позиция-скорость сгустка в линиях  $\mathrm{C}^{18}\mathrm{O}(2\text{--}1)$ и DCO<sup>+</sup>(4—3) с отмеченной на ней оценкой скорости по аммиаку.

Диаграмма позиция-скорость в линии (1,1) аммиака представлена на Рис. 5.12. Подобный профиль скорости характерен для кеплеровского тора (см, например, [210], [211]), обращенного к нам плоскостью вращения с параметрами внутреннего и внешнего радиуса  $R_{in} \approx 8000$  а.е. и  $R_{out} \approx 12000$  а.е., соответственно, центральной массой в  $M_c \approx 8.5 M_{\odot}/sin^2(i)$ , где *i* - угол между осью тора и направлением на наблюдателя. Форма изолиний излучения аммиака и линейная форма зависимости скорости от радиуса во внутренней части



Рисунок 5.13 — Карта доплеровской скорости по данным аппроксимации линии NH<sub>3</sub>(1,1) (в градациях цвета). Контурами изображена интегральная интенсивность в крыльях линии CO(2—1) [26.5,35.5] и [-18.5,-8] для непрерывных и штриховых контуров соответственно, ассоциируемые с биполярным истечением. В левой нижней части рисунка показан размер диаграммы направленности VLA (внешний эллипс) и SMA (внутренний). Звездочкой отмечено положение сгустка SMA1, знаками х и + — положение мазерных источников по данным [202](метанол, линия 1-го класса) и [24](H<sub>2</sub>O), соответственно.

тора свидетельствуют о том, что угол близок к 90°. Построение диаграммы позиция-скорость проводилось аналогично методу, предложенному в аппендиксе работы [212], но без учета скорости в радиальном направлении. Сопоставлялись форма изолиний для наблюдаемой и моделированной диаграммы позиция-скорость. Размеры внешнего и внутреннего радиуса прослеживаются визуально на наблюдаемой диаграмме позиция-скорость: линейный рост от центра соответствует внутреннему радиусу, гиперболическая - газу между внутренним и внешним. (Рис 5.12). Стоит отметить неравномерное распределение интенсивности линии аммиака по радиусу, а также наличие излучения не связанного с



Рисунок 5.14 — Пространственно-кинематическая структура сгустка SMA1 и его окрестностей. а) Карта пиковой интенсивности в линии C<sup>18</sup>O(2—1) (фон), в градациях желтого-фиолетового - карта скорости линии аммиака, черными контурами показана пиковая интенсивность в линии DCO<sup>+</sup>(4—3), [0.4,0.55,0.7,0.85,1] Ян/луч. Зелеными линиями - направление среза диаграммы позиция-скорость вдоль и поперек изменения скорости тора, b) и c) соответственно. Звездочками - положение сгустков. b,c) Диаграммы позиция-скорость вдоль и поперек тора. Фон - C<sup>18</sup>O, черные сплошные контуры - DCO<sup>+</sup>, оранжевый пунктир - NH<sub>3</sub>(1,1) d) Карта пиковой интенсивности в линии C<sup>18</sup>O, красными сплошными линиями - красное крыло линии CO (бледное - [35,40], яркое - [16,26] км/с, штрихами - синее крыло (крупными бледными -[-32.5,-37.5], мелкими - [-5,2]км/с).

тором, по видимому, окружающего газа. К северу (положительное направление на Рис. 5.12) наблюдается излучение аммиака, смещенное на 0.8 км/с.

Как следует из Рис 5.14 (а), между сгустками SMA1 и SMA3 излучение в линии C<sup>18</sup>O(2—1) пространственно и частотно непрерывно. Кроме того, мы обнаруживаем, что SMA1, состоит из двух отдельных сгустков, в даль-

Переход	Частота, ГГц	$E_{low}, \mathbf{K}$	$E_{up}, \mathbf{K}$	Комментарии
$5_1 - 4_2$	216.945	37	47	мазер II класса
$4_2 - 3_1$	218.440	27	37	мазер I класса
$8_0 - 7_1$	220.078	78	88	
$8_{-1}$ — $7_0$	229.758	70	81	мазер I класса
$3_{-2}$ — $4_{-1}$	230.027	20	31	
$9_{-1} - 8_0$	278.304	88	102	мазер I класса
$6_0 - 5_0$	289.939	40	53	

Таблица 11 — Список зарегистрированных в диапазоне 216-290 ГГц линий метанола, использованных для получения оценок физических условий

нейшем называемых SMA1-NE и SMA1-SW. SMA1-NE ярче в C<sup>18</sup>O, его доплеровская скорость равна 7 км/с, SW - 9.8 км/с. По данным C<sup>18</sup>O(2—1), их координаты равны  $\alpha(2000)=06^{h}12^{m}53.715^{s}\pm0.005^{s} \delta(2000)=18^{\circ}00'27.73''\pm0.07''$  и  $\alpha(2000)=06^{h}12^{m}53.588^{s}\pm0.007^{s} \delta(2000)=18^{\circ}00'26.2''\pm0.1''$ , соответственно.

#### Анализ наблюдений линий метанола

В S255N зарегистрировано излучение в 7 линиях метанола (три мазерных линии класса I, одна мазерная линия класса II и три квазитепловые линии, см. Табл. 11). Однако, в мазерной линии второго класса, судя по всему, излучение имеет тепловую природу.

Нами был обнаружен яркий источник с координатами  $06^{h}12^{m}53.70^{s}$ + $18^{\circ}00'24.7'$  со скоростью линии 11.2 км/с в переходах метанола  $8_{-1}$ – $7_{0}$ ,  $9_{-1}$ – $8_{0}$ . Спектры источника приведены на Рис. А.10. Интенсивность линий  $\approx 7$  Ян/луч, что существенно больше зарегистрированного в направлении на истечение с координатами  $06^{h}12^{m}54.2^{s}$  + $18^{\circ}00'14.9'$ . Подобная разница потоков является указанием на мазерную природу излучения. В работах [213] [214] [215] и др. на частотах этих переходов также зарегистрировано мазерное излучение. Положение мазера локализовано на юго-восточной границе сгустка SMA1 и биполярного истечения как пространственно так и частотно, что можно увидеть на Рис. 5.18. Нами зарегистрирован только один яркий источник, в отличие от 2-х, приведенных в работе [202]. По остальным мазерным источникам работы [202] также наблюдается излучение в линиях I-го класса. Однако недостаточная чувствительность не позволяет сделать однозначного ответа о природе возбуждения молекул. В направлении точек 5, 6 и 7 линия достаточно узка и имеет признаки мазерной, в то время как в направлении синей части биполярного истечения форма спектров повторяет зарегистрированный в линиях  $SO(6_5-5_4)$  и SiO(5-4) в том же направлении.

Положение точек, в которых проводилась оценка наблюдений, показано на Рис. 5.17. В большинстве случаев максимумы излучения в линиях метанола смещены относительно центров сгустков, приведенных в [186]. В линиях метанола также выделены максимумы излучения, расположенные вдоль линии высокоскоростного истечения[198]. Их координаты приведены в Табл. 12.

Во всех максимумах спектры линий существенно отличаются от гауссовых. При этом, в положениях (1) и (2) явно выделяются 2 спектральных пика на  $\sim 10$  км/с и  $\sim 6$  км/с. В положениях (3), (4) явное разделение на спектральные компоненты отсутствует. В связи с этим, в положениях (1) и (2) спектры аппроксимировались 2 гауссианами и оценки проводились отдельно, по каждой из компонент; в положениях (3) и (4) выделялась только одна компонента на скоростях 7 и 8 км/с соответственно.

#### Прочие линии

Угловое расстояние между двумя пиками излучения в линиях CH<sub>3</sub>CN  $(12_0-11_0)$  и C<sup>18</sup>O (2-1) внутри SMA1, идентифицируемых с NE и SW равно 1.5''. Это расстояние соответствует линейному в картинной плоскости в ~ 2700 а.е. на расстоянии в 1.78 кпк[185].

В результате повторной обработки данных переходов CH<sub>3</sub>CN (12—11)[186; 198] пространственно и частотно разделяются SMA1-NE и SW, что видно из Рис. 5.15. Методом вращательных диаграмм [216] были оценены кинетические температуры газа (T<sub>k</sub>) для SMA1-NE и SW которые составили  $150\pm5$ K и  $25^{+5}_{-10K}$ соответственно. Для оценки NE использовались первые пять переходов K-лестницы, для SW - три перехода. Из анализа данных метанола температуры сгустков лежат в пределах от 20 K и от 45 K до 100 K соответственно, что близко


Рисунок 5.15 — Диаграмма позиция - скорость CH<sub>3</sub>CN (12<sub>0</sub>-11<sub>0</sub>) вдоль направления SMA1 NE → SMA1 SW (контуры). На фоне представлена диаграмма в линии C<sup>18</sup>O (2—1). Контуры соответствуют уровням [ 0.07, 0.09, 0.12, 0.15, 0.2] Ян/луч. В левой нижней части рисунка показаны размер синтезированного луча диаграммы направленности SMA на частоте 220.74 ГГц и ширина спектрального канала.

к оценкам по CH<sub>3</sub>CN. Координаты ИК источника, указанные в работе [209], существенно ближе к SMA1-NE, чем SW.

Мы построили карту распределения  $T_k$  полученную на основе линий (2,2) и (1,1) аммиака (Рис. 5.16). Типичные значения лежат в пределах 10-60 К. Из Рис. 5.14 видно, что излучение аммиака связано со сгустком SW. Оценки температуры SW по данным NH<sub>3</sub> близки к оценкам по CH<sub>3</sub>CN, в то время как признаки горячего газа связанного с NE в аммиаке отсутствуют. С областью низких температур около SMA1-SW также коррелирует излучение DCN (3—2) и DCO<sup>+</sup>(4—3) к югу от сгустков, однако к северу излучение DCN отсутствует. Излучение DCO<sup>+</sup> к северу (как видно из Рис. 5.14), связано с взаимодействующим с SMA1-NE газом, так как оно пространственно и частотно лежит внутри той части области излучения C<sup>18</sup>O, в котором излучение в линиях аммиака не



Рисунок 5.16 — Карта распределения кинетической температуры по данным переходов (1,1) и (2,2) аммиака. Градацией оранжевого изображена оценка величины температуры, фоном и контурами в градациях серого - пиковая интенсивность С<sup>18</sup>О, [0.2,0.4,0.6,0.8,1] Ян/луч, голубыми контурами - интегральная интенсивность ([-3:19]км/с) DCN. Линии контуров соответствуют [0.7,1.5,2.3,3]Ян/луч м/с.

прослеживается. В направлении на SMA2 температура газа по данным аммиака растет до 54К. На северной границе карты, с пиком, имеющим координаты  $6^{h}12^{m}53^{s}$ ,  $18^{\circ}01'01''$ , также наблюдается холодная область с температурой около 10К. Примечательно, что температура растет в направлении на восток и запад от пика излучения аммиака в S255N-NH3, что согласуется и с отношением интенсивностей линий в 2-х переходах по этим координатам. Из распределения температуры по скоростям по данным аммиака мы делаем оценку диапазона температур, характерную для каждого фрагмента, которые приведены в Табл. 10. В точках 5 и 8 NH<sub>3</sub> Табл. 12 оценки кинетической температуры по метанолу и аммиаку близки.

Оценка массы волокна, соединяющего сгустки SMA2, SMA1 и SMA3, равна ~ 8 М<sub>☉</sub>. Для расчета массы использовалась линия C<sup>18</sup>O (2—1). Лучевая концентрация молекул C<sup>18</sup>O получена по формуле 15.28 из работы [217], масса газа вычислена исходя из распространенности данного изотопа оксида углерода  $1.7 \times 10^{-7}$  [218].

N	RA(2000)	DEC(2000)	ближайший объект
1	6:12:53.42	18:00:23.65	около SMA1
2	6:12:53.70	18:00:26.90	$2$ и $3^{1}$
3	6:12:53.86	18:00:30.15	5 и 6 <sup>1</sup>
4	6:12:54.49	18:00:43.65	SMA4
5	6:12:53.98	18:00:14.40	SMA5, $7^1$
6	6:12:53.55	18:00:21.15	SMA3
7	6:12:53.41	18:00:23.15	SMA1
8	6:12:52.88	18:00:33.90	SMA2
$\mathrm{NH}_3$	6:12:53.23	18:00:37.40	Пик $NH_3$ (1,1)

Таблица 12 — Координаты максимумов излучения в линии метанола

Таблица 13 — Физические параметры газа по данным аппроксимации. В скобках приведены диапазоны параметров на уровне 1 **σ**. В положении (4) диапазон по плотности 3-9 - это диапазон сетки параметров в базе, то есть никаких ограничений модель не дает. ff - фактор заполнения диаграммы направленности В колонке "!"приведено количество линий с ненулевыми значениями интенсивностей в даннах положениях.

Ν	$V_{LSR}(\kappa m/c)$	$T_k, K$	$ m lg(N_m/\Delta V)$	$lg(n)[H_2]$	$\lg(\mathrm{N}_{CH_3OH}/\mathrm{N}_{H_2})$	ff	$\chi^2/\mathrm{Ntr}$	!
1	9.8	45(40-100)	10.50(10.00-11.00)	$6.0(<\!7.5)$	-6	12.45	0.90	7
1	5.6	50(>25)	10.00(9.50-10.50)	6.5(3.0-9.0)	-8	1.15	0.16	7
$2^3$	7.6	30(>20)	11.25(10.00-12.00)	$3.5(<\!7.0)$	-6	11	1.9	6
$2^{4}$	11.3	60(45-100)	9.75(9.50-10.00)	6.0(5.75 - 6.75)	-6	77	4.4	5
3	7.1	40(30-160)	11.25(10.5-12.5)	$6.0(<\!7.5)$	-6	4	0.9	7
4	7.8	120(>45)	9.50(9.25-10.0)	6.5(3.0-9.0)	-6	69.7	4.4	4
6	9.2	85(50-200)	9.0(8.75 - 9.25)	6.0(>5.5)	-6	67.2	1.32	4
7	9.7	60(40-120)	9.75(9.5-10.0)	6.0(5.5-7.0)	-6	65.02	5.09	6
5	7.5	165(>50)	$8.00(<\!\!8.5)$	6.0(5.5-7.5)	-6	99.0	2.24	2
6	4.9	50(10-220)	$9.25(<\!9.0)$	6.0(3-9)	-6	55.8	0.50	5
7	5.4	55(40-120)	9.50(9.25 - 9.75)	6.0(5.5-7.0)	-6	65.41	2.22	6
8	4.7	$20(<\!30)$	11.25(8-13)	3.5(3-9)	-7	9.35	1.05	3
$\mathrm{NH}_3$	9.5	$15(<\!25)$	11.25(11-12)	5.0(3-9)	-8	54.8	1.06	3
$\mathrm{NH}_3$	7.6	$15(<\!25)$	11.50(11.25 - 11.75)	6.5(>5.5)	-8	77.9	2.60	4



Рисунок 5.17 — Карта первого момента линии СО (2—1). Контурами отмечены изофоты пиковой интенсивности С<sup>18</sup>О (2—1), [0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2] К. Звездочками отмечено расположение сгустков по данным [186], крестиками с цифрами положение пиков излучения метанола, представленных в Табл. 12

# 5.2.3 Обсуждение структуры ядра S255N

Ядро S255N имеет довольно сложную кинематическую структуру. По всей видимости, оно сжато расширяющимися ионизированными H II областями[62]. Область излучения в линии N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3—2), котороя связана с излучением плотного газа, вплотную расположена между наблюдаемым в ИК диапазоне излучением нагретой пыли вокруг ионизированных областей S255 и S257. Крупномасштабные кинематические фрагменты пространственно ориентированы параллельно границе газа и пылевых оболочек, в то время как однозначных указаний на природу фрагментов нет. Согласно работе [209], в нем обнаружены 13 протозвездных ИК источников I и II класса. В нем также зарегистрировано 7 крупных протозвездных сгустков с массами 1-16 M<sub>☉</sub>, частично идентифицируемых с ИК источниками. Наличие такого числа источников является свидетельством активного образования в ядре звезд как малой так и большой массы. Отсутствие характерных для сжатия профилей скорости также является аргументом того, что ядро еще не перешло в фазу коллапса периферии.



Рисунок 5.18 — Срез спектрограммы вдоль пути, обозначенного на рис 5.11. Фон - совмещенные данные IRAM+SMA в линии CO (2—1), красные контуры - линия N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3—2), уровни - [6,9,12,16,23,31,43,58] Ян/луч, синие разомкнутые контуры - излучение в линии SO (6<sub>5</sub>—5<sub>4</sub>), [0.18,0.2,0.35,0.5,0.7,1] Ян/луч, заполненные контуры в градациях голубого-фиолетового - изофоты линии C<sup>18</sup>O (2—1), [0.17,0.23,0.3,0.38,0.49] Ян/луч. Вертикальными штрих-пунктирными линиями и цифрами обозначены положения кинематических компонент, идентифицированных по Рис. 5.11.

Стоит отметить, что различные пространственные масштабы, трассируемые разными молекулами, имеют общую кинематическую структуру. Тем не менее, наблюдается несколько особенностей. Внешние разреженные области ядра, трассируемые в линии CO (2–1), содержат компоненту на скорости  $\sim 8$ км/с, которая, по всей видимости, связана с невозмущенным газом, окружающим ядро. Кроме этого, можно выделить три направления изменения скорости - от центра к северо-востоку, к юго-западу и к юго-востоку. Два последних соответствуют направлениям на ионизированные области S255 и S257, что является аргументом в пользу происхождения части кинематических фрагментов как следствия внешнего воздействия. Срез скорости молекул, трассирующих плотный газ (NH<sub>3</sub>(1,1), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3-2), C<sup>18</sup>O(2-1)) повторяет срез в линии CO (2-1) за исключением компоненты на ~ 8 км/с, а также направлений на плотные сгустки. Однако, не все фрагменты газа могут быть сформированы внешними факторами. В частности, в линии С<sup>18</sup>О локализуется протяженная структура, соединяющая сгустки SMA1, SMA2 и SMA3, кинематически с ними связанная. Кроме того, в направлении синего крыла биполярного истечения из сгустка SMA1 в линиях  $N_2H^+$  и  $NH_3$  наблюдается 2 фрагмента на луче зрения, причем один из них не связан с разреженным газом ядра, так как не виден в линии CO(2-1).

Данные  $N_2H^+$ ,  $NH_3$ ,  $C^{18}O$  и SO позволяют сделать вывод, что вещество в ядре распределено довольно неоднородно, присутствуют взаимодействующие компоненты газа, кинематически отличные друг от друга. Не во всех из них находятся сгустки, как видно на гистограмме скоростей (Рис. 5.10).

Плотный и компактный газ, наблюдаемый в  $C^{18}O(2-1)$  имеет вытянутую структуру. Существенная часть коррелирует с излучением в линии  $N_2H^+(3-2)$ , однако, несовпадающая часть локализована в области перекрытия кинематических фрагментов ядра. На Рис. 5.14 видно, что SMA1 окружен веществом в основном с севера и с юга, как видно из диаграмм позиция-скорость. Спектр линии на доступном нам разрешении меняется плавно, разделяясь на 2 компоненты к SMA1 (к NE и SW), что является признаком взаимодействия вытянутой структуры со сгустками. Важно также, что в центре SMA1, в диапазоне 8-9 км/с излучение существенно слабее, чем в волокне. Это явление может быть признаком того, что большая часть газа волокна в окрестности сгустков вовлечена во взаимодействие с ним (Рис. 5.18).

Данные С<sup>18</sup>О, СН<sub>3</sub>СN, СН<sub>3</sub>ОН и DCO<sup>+</sup> позволяют сделать однозначный вывод о наличии двух сгустков, раннее не разрешенных и интерпретированных как объект S255N SMA1. Мы также продолжаем пользоваться обозначением SMA1 для наиболее проэволюционировавшей, кинематически богатой центральной части ядра. Примечательно, что средняя скорость обнаруженного гигантского тора совпадает со скоростью SMA1-SW, хотя его размер намного больше, чем расстояние (в картинной плоскости) между NE и SW. Наблюдаются компактные области излучения в линии DCO<sup>+</sup>, кинематически связанные с обоими сгустками. Существенная часть излучения DCO<sup>+</sup> расположена вне сгустков, но внутри тора, коррелируя с  $C^{18}O$  (Рис 5.14). Сгусток NE ассоциируется с биполярным истечением (Рис. A.11), наблюдаемым в крыльях линий CO(2-1),  $SO(6_5-5_4)$ , SiO(5-4), а также с водяным мазером [24] и мазерами метанола из работы [202] и зарегистрированого нами. Внутри газа, взаимодействующего с NE, присутствуют области излучения DCO<sup>+</sup>. Аналогичного эффекта для SW не прослеживается. Примечательно, что положение SW находится практически на линии биполярного истечения из NE. Его происхождение вполне может быть результатом воздействия истечения на газ ядра. Однако, место тора в этой картине остается не ясным. Его признаки также наблюдаются в данных C<sup>18</sup>O(2—1). На Рис.А.11 прослеживается несимметричность профилей скорости линии СО относительно NE.

Из анализа диаграммы позиция-скорость в линиях  $C^{18}O$ , SO, NH<sub>3</sub>, DCO<sup>+</sup> можно утверждать, что тор, трассируемый в линиях аммиака, является частью механизма аккреции более протяженного плотного вещества вытянутой волокнообразной структуры на два молодых протозвездных сгустка. Диаграмма позиция-скорость в линии  $C^{18}O$  в окрестностях SMA1 указывает на активный обмен вещества между сгустками и окружающим газом в плоскости вращения тора с квазикеплеровскими профилями по радиусу (Рис. 5.14, a,b,c).

Обнаруженный тор является одним из нескольких десятков дископодобных объектов вокруг массивных протозвезд [7; 219—223]. Однако, большая часть известных дисков обладает меньшим размером или находится около менее массивных протозвезд. Тороиды также известны, они больше дисков и обладают существенной толщиной [210; 211; 224—227]. Наиболее близким по размерам и физическим параметрам из известных является объект G28.20—0.05. Обнаруженный нами объект имеет большие размеры (~24 000 а.е. в диаметре против ≤12 000 а.е. в G28.20—0.05). Оба региона объединяет наличие ультракомпактной НІІ области. Оценка температуры по линиям аммиака у обеих объектов близка [225]. Однако, наблюдаются также и более теплые и химически богатые тороподобные вращающиеся структуры [226; 227]. Известно о наличии пылевой компоненты [221] в похожем объекте. В случае S255N SMA1 признаков такой составляющей не зарегистрировано [186; 198; 208].

Теоретические модели предсказывают появление тороподобных объектов и их гравитационную нестабильность [228], а также их существенную роль для поздней аккреции вещества на протозвезду в качестве переходной структуры [229]. Обнаружение тора согласуется с предположением о формировании массивных звезд путем дисковой аккреции [230; 231]. Для оценки темпов аккреции и детального изучения взаимодействия тора с окружающим газом требуется наблюдение области с меньшим угловым разрешением и одновременно большей чувствительностью.

### 5.2.4 Промежуточные выводы по S255N

Мы рассмотрели кинематическую структуру ядра S255N на разных пространственных масштабах – от внешних слоев ядра до плотных сгустков, и обнаружили следующее:

- 1. Ядро не имеет характерных признаков изотропного коллапса или вращения. Крупномасштабные движения в целом согласуются с описанными в работе [232]. Однако, структура ядра весьма неоднородна.
- 2. Наблюдается как минимум пять кинематически-однородных частей ядра, скорости которых отличаются друг от друга.
- Фрагменты ядра больших размеров (~1/3 размеров ядра) ориентированы параллельно границам областей ионизированного водорода S255 и S257.
- 4. Большая часть фрагментов меньшего размера связана со сгустком SMA1. Один из фрагментов расположен в юго-восточном направлении от SMA1 по линии биполярного истечения и вытянут вдоль него. Другой фрагмент ядра также имеет вытянутую структуру. Он соединяет сгустки SMA 3-1-2 и довольно массивен (~ 8M<sub>☉</sub>).

- 5. Обнаружен околозвездный тор, вращающийся вокруг 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 между осью вращения и направлением на наблюдателя.
- SMA1 пространственно разрешается на два отдельных сгустка, NE и SW. Они активно взаимодействуют с тором и с волокном. Один из сгустков является достаточно холодным (~25 K), другой горячим (~150 K). Биполярное истечение связано с горячим источником.
- 7. Кинетическая температура и концентрация газа в сгустках и истечениях варьирует в пределах от 15 до 220 К и 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup>, соответственно. Кроме того, фактор заполнения диаграммы направленности для источников в истечениях мал, что говорит о сильной фрагментированности газа.
- Температура газа в ядре распределена неоднородно как по фрагментам, так и внутри фрагментов. Фрагменты, не содержащие сгустки, имеют меньший разброс оценок температуры и температуры в них ниже.
- 9. Обнаружен сгусток с координатами (7",-34") относительно SMA1, а также связанное с ним высокоскоростное истечение.

#### **5.3** Система W42MME

Область W42 содержит две биполярных области H II[233], зарегистрированы мазерные пятна на границе области ионизации (W42 MME) на частоте 6.7 ГГц ( $v_{lsr} \sim 58.1$ км с<sup>-1</sup>; [234]). Основываясь на фотометрии, сделанной в ближнем ИК диапазоне, и спектроскопических наблюдениях в работе, Blum, Conti, Damineli [235] утверждается, что область H II W42 ионизируется звездами типа O5-O6. Допплеровская скорость газа оценивается в ~59.6 км с<sup>-1</sup>[236] по рекомбинационным линиям атомов С II и <sup>3</sup>He. Скорость газа молекулярного облака, ассоциированного с W42 (U23.38–0.18, [237]) лежит в диапазоне [58,69] км с<sup>-1</sup>[238]. Близость наблюдаемых скоростей ионизированного и молекулярного газа предполагает что область H II связана с мазерным излучением 6.7 ГГц

(MME) и относится к одной физической системе. Расстояние до области W42 оценивается в 3.8 кпк [238, и ссылок в ней].

В работе «Massive Young Stellar Object W42-MME: the Discovery of an Infrared Jet Using VLT/NACO Near-infrared Images» [233] обнаружено, что координаты мазерного пятна MME находятся в центре биполярного истечения размером около парсека в изображении излучения H<sub>2</sub>. Было показано, что истечение приводится в движение молодой звездой класса O (масса 19±4 M<sub>☉</sub>, визуальная экстинция 48±14 магнитуд) с яркостью в ~4.5 × 10<sup>4</sup> L<sub>☉</sub>[233]. Важным фактом является отсутствие детектирования излучения в радиоконтинууме (5 ГГЦ, ~1.5″, СКО 0.4 мЯн/луч, проект CORNISH)[233]. Обычно, излучение в радиоконтинууме 1-10 ГГц около протозвездных источников генерируется за счет свободно-свободного перехода при столкновении электронов с ионами в H II зонах. Молодые протозвезды класса O образуют компактные H II зоны. Отсутствие зарегистрированного излучения в радиоконтинууме предполагает, что W42MME источник находится на стадии до образования UCH II зоны или что зона мала.

# 5.3.1 Данные наблюдений

Полное описание наблюдений приведено в работе [5]. Ниже приведено подробное описание наблюдений, в обработку которых внесен значительный вклад автором, и краткое описание остальных.

Важной задачей работы был поиск излучения в радиоконтинууме, которое бы позволило подтвердить молодой возраст источника W42 MME. Для этого были проведены наблюдения VLA в феврале-июне 2017 (PI:Stan Kurtz) по проекту с кодом 17А-254. В феврале, марте и мае проводилось картирование 7мм диапазоне длинн волн (CS,SiO) и конфигурации D телескопа. В июне проводились наблюдения в полосе 13мм (линии NH<sub>3</sub>) конфигурации C интерферометра.

Наблюдения в 7 мм диапазоне длин волн включали частоы перехода линии CS (1–0),  $\nu_0$ =48.9909549 ГГ, и SiO (1–0),  $\nu_0$ =43.423853 ГГц, а также и широкополосный континуум. Наблюдения проводились в течение 1 часа в феврале, марте и мае 2017 года. Половина часа из этого времени была потрачена для наблюдения источника W42 MME, что привело к общему времени накопления в 1.5 часа. Во все дни в качестве калибровки потока использовался 3С 268 и J1832-1035 в качестве источника для калибровки фазы. Центр поля при наблюдении W42 MME был выбран по координатам  $\alpha(2000)=18^{h}38^{m}14^{s}.54\pm0.005^{s}$  $\delta(2000)=-06^{\circ}48'01''.86$  при допплеровской скорости источника в 58.1км с<sup>-1</sup>.

Каждая молекулярная линия была центрирована в 32 МГц полосе при наблюдении в двух поляризациях (RR,LL). Полоса была разбита на 256 каналов, каждый шириной в 125 кГц. Подобная разбивка эквивалентна ширине полосы в 200км с<sup>-1</sup> при ширине канала 0.77км с<sup>-1</sup>для линии CS и полосе 220 км с<sup>-1</sup> с шириной канала в 0.86 км с<sup>-1</sup> для SiO. Каналы, не содержащие линий или помех были использованы для построения изображения в континууме (от 43.4 до 49.0 ГГц). Размер диаграммы VLA в окне 7мм был порядка  $1.7 \times 1.4''$ . СКО изображения в континууме было равно 1 мЯн/луч.

Излучение в полосе 13мм наблюдалось в течение 1 часа по 5 дней июня 2017 года. Время "на источнике" равнялось 28 минутам для каждой сессии, что привело к общему времени интегрирования около 2-х часов. Около 30% наблюдательных данных было отброшено вследствие сильных радиопомех. Источники 3C 268 и J1832–1035 использовались для калибровки потока и фазы, соответственно. Поле W42 MME центрировано по тем же координатам, что и для CS+SiO.

Три инверсионные линии аммиака (1,1);(2,2);(3,3) регистрировались в окнах с шириной 8 МГц, 256 каналов, шириной 31.25 кГц каждый. Такой выбор конфигурации приемника позволил регистрировать излучение в полосе 100 км с<sup>-1</sup> с разрешением 0.4 км с<sup>-1</sup> для каждого перехода. Кроме того, полоса 13 мм (от 19 до 23 ГГц) была покрыта 32 спектральными окнами по 128 МГц, с каналами по 2 МГц в каждом. 13 мм полоса использовалась для регистрации излучения в континууме. Данные были обработаны процедурами как автоматической так и ручной чистки от радиопомех. Излучение в континууме было восстановлено с диаграммой  $1.0 \times 0.75''$  при СКО 0.3 мЯн/луч. Однако, на изображении имелись артефакты вызванные неточностями калибровочных источников, а также яркие источники вне главного лепестка диаграммы направленности. Максимальная интенсивность артефактов равнялась 2 мЯн/луч, (динамический диапазон, т.е. отношение максимальной яркости на изображении к максимальной яркости предполагаемого артефакта равнялся 10).

В работе использовались данные SMA (код: 2016А-A004, PI: Sheng-Yuan Liu). Наблюдения проводились в полосе 230 ГГц в компактной (июнь 2016) и расширенной (октябрь 2016) конфигурации. В полосу входили линии изотопологов CO (2–1), а также SiO (5–4) и серия линий К-лесенки CH<sub>3</sub>CN (J=12–11). Данные были обработаны оригинальными скриптами, основанными на MIRIAD-РYTHON[239]. Из-за ограниченной чувствительности данные в расширенной конфигурации использовались только для построения изображений в изотопологах CO.

В работе использовались данные ALMA, как оригинальные (Цикл 6, полоса 7, проект 2018.1.01318.S), так и архивные (проект #2019.1.00195.L), а также карты оценок кинетической температуры по Herschel[63]. Также, использовались архивные данные обсерватории SOFIA (02\_0113), а также COHRS (CO (3-2)), Hi-GAL и GLIMPSE, а также VLT/NACO (K<sub>s</sub> и L'), а также CPS 6см (VLA в конфигурации В). Список линий представлен в таблице 14. Подробное описание наблюдений смотри в работе [5].

### 5.3.2 Обсуждение наблюдаемых феноменов

На рисунках 5.19 и 5.21 показана крупномасштабная структура излучения в сантиметровом радиоконтинууме и мелкомасштабная в суб-мм континууме и линиях по данным ALMA (и др.). На Рис. 5.19(а) изображено излучение на 7 мм VLA поверх излучения в H<sub>2</sub>, которое иллюстрирует структуру области W42 (и W42 MME) на крупных масштабах. В фоновой карте наблюдается истечение на масштабе парсеков, узлы H<sub>2</sub> и изгибно-ударные структуры (bow shock). Узлы, находящиеся в непосредственной близости к MME отмечены стрелочками. На Рис. 5.19(б) показаны изофоты излучения 13 мм радиоконтинуума на двухцветной композитной карте (13 мм - красным, 5.8 мкм Спитцера - голубым). Морфология излучения на 13 мм и 5.8 мкм близка. Наблюдаются два пятна по форме близких к кругу и являющихся Н II зонами и аморфное пятно на юге. Аморфная структура, вероятно, является полостью в молекулярном облаке, заполненной ионизированным газом [233].

Рисунки 5.19(c) и 5.19(d) отражают излучение, зарегистрированное SOFIA на 25.2 и 37.1 мкм в континууме. Излучение наблюдается в направ-

Телескоп Линия	частота ( $\nu_{obs}$ [ГГц])	размер ДН
ALMA CO(3–2)	345.796	$0^{\prime\prime}$ 31 × 0^{\prime\prime} 25
ALMA SiO(8–7)	347.331	$0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 30 $\times$ $0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 25
ALMA SO 8(8)–7(7)	344.311	$0^{\prime\prime}_{\cdot}$ 31 $\times$ $0^{\prime\prime}_{\cdot}$ 25
ALMA $H^{13}CO^{+}(4-3)$	346.998	$0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 31 $\times$ $0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 25
ALMA $HCO^+(4-3)$	356.734	$0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 30 $\times$ 0 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 24
ALMA $CH_3OH(4_{1,3}-3_{0,3})$	358.606	$0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 30 $\times$ 0 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 24
ALMA $NS(15/2-13/2)f$	346.220	$0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 31 $\times$ $0\rlap{.}^{\prime\prime}$ 25
ALMA CH <sub>3</sub> CCH( $21_K$ – $20_K$ ) $K = 0$ –4	(358.709 - 818)	$0^{\prime\prime}$ 30 × $0^{\prime\prime}$ 24
ALMA $CH_3CN(12_K-11_K) K = 0-7$	(220.747 - 539)	$1\rlap{.}^{\prime\prime}$ 4 $\times$ 0 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 8
$\mathrm{SMA}^{c+e}$ CO(2–1)	230.538	$2\rlap.^{\prime\prime}$ 2 $\times$ 1 $\rlap.^{\prime\prime}$ 6
$SMA^{c+e\ 13}CO(2-1)$	220.399	$3^{\prime\prime}_{\cdot}~4\times2^{\prime\prime}_{\cdot}~4$
$\mathrm{SMA}^{c+e} \mathrm{C}^{18}\mathrm{O}(2-1)$	219.560	$3^{\prime\prime}_{\cdot}~4\times2^{\prime\prime}_{\cdot}~4$
$SMA^{c \ 13}CS(5-4)$	231.221	$2\rlap{.}^{\prime\prime}$ 6 $\times$ 1 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 9
$SMA^c HC_3N(24-23)$	218.325	$2\rlap{.}^{\prime\prime}$ 6 $\times$ 2 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 1
$\mathrm{SMA}^c$ SiO(5–4)	217.105	$2\rlap{.}^{\prime\prime}$ 6 $\times$ 2 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 1
$\mathrm{SMA}^c \mathrm{SO}(5_5 - 4_4)$	215.221	$3\rlap.^{\prime\prime}$ 4 $\times$ 2 $\rlap.^{\prime\prime}$ 4
$SMA^c SO(5_6-4_5)$	219.949	$2\rlap{.}^{\prime\prime}$ 6 $\times$ 2 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 0
$\mathrm{SMA}^c \mathrm{CH}_3\mathrm{CN}(12_1-11_1)$	220.743	$3^{\prime\prime}_{\cdot}~4\times2^{\prime\prime}_{\cdot}~4$
$\mathrm{SMA}^c \mathrm{CH}_3\mathrm{CN}(12_0-11_0)$	220.747	$3^{\prime\prime}_{\cdot}~4\times2^{\prime\prime}_{\cdot}~4$
$SMA^{c} CH_{3}OH(5_{1,4}-4_{2,2})$	216.946	$3\rlap.^{\prime\prime}$ 5 $\times$ 2 $\rlap.^{\prime\prime}$ 5
$SMA^{c} H_{2}CO(3_{0,3}-2_{0,2})$	218.222	$2\rlap.^{\prime\prime}$ 2 $\times$ 1 $\rlap.^{\prime\prime}$ 7
$SMA^{c} H_{2}CO(3_{2,2}-2_{2,1})$	218.476	$2^{\prime\prime}_{\cdot}$ 6 $\times$ 2 $^{\prime\prime}_{\cdot}$ 0
$SMA^{c} H_{2}CO(3_{2,1}-2_{2,0})$	218.760	$2\rlap{.}^{\prime\prime}$ 4 $\times$ 1 $\rlap{.}^{\prime\prime}$ 9
VLA CS(1–0)	48.990	1". 7 × 1". 4

Таблица 14 — Список спектральных линий. SMA<sup>c</sup> отмечена компактная конфигурация, SMA<sup>c+e</sup> - расширенная и компактная

лении W42 MME. Предполагается, что на этих частотах (ближний ИК, 25 и 37 мкм) оно генерируется за счет рассеянного света, покидающего полости[241], в то время как в среднем ИК оно может иметь тепловую природу и генерироваться теплой пылью в стенках пустот. На рисунке 5.19(с) нанесено изображение 6см континуума CPS. Один из пиков (I4) располагается вплотную к MME, однако, морфология излучения на 7 и 11 мм предполагает, что данное пятно относится скорее к ионизированной полости чем к MME.

На Рис. 5.20 изображено излучение в мм- и суб-мм континууме ALMA, области W42 (a) и MME (b). Круг на (a) отмечает поле зрения (б). На (a) прослеживается морфология радиоконтинуума H II зон (см. Рис 5.19). Примечательно, что обнаруживается излучение между H II зонами, в т.ч. компактное на 0.8 мм. Обсуждение феномена лежит вне данного исследования. На (б) прослеживается набор компактных и протяженных структур. Наиболее яркая структура в центре ассоциируется с мазерным источником, и, вероятно, генерируется в





Рисунок 5.19 — а) Карта излучения в 7 мм радиоконтинуума VLA (49 ГГц) в контурах поверх линии H<sub>2</sub> (континуум вычтен). Синтезированый луч VLA на 7 мм отмечен эллипсом в левом нижнем углу. Направление магнитного поля (В) [взято из 240] (голубая стрелка). b) Композитная двухцветная карта (VLA 13 мм (красное) и Spitzer 5.8 мкм (голубой)). Изображение перекрыто контурами изофот радиоконтинуума VLA 13 мм (23 ГГц) в голубых и желтых линиях. (1.27 мЯн/луч и (3.38, 5.06, 6.75, 8.44, 10.97) × 14.35 мЯн/луч, соответственно). c) Карта GPS 6 см в контурах поверх изображения SOFIA/FORCAST на 25.2 мкм. d) Карта SOFIA/FORCAST на 37.1 мкм. Большой круг отображает из Рис. 5.20(а). ММЕ обозначен ромбом, и звезды O5–O6 - звездочкой.

оболочке молодого объекта. Протяженные структуры, вероятно, представляют излучение пыли в окружающем MME газе: стенках и других структурах.

На Рис. 5.21 представлено окружение области ММЕ в некоторых молекулярных линиях. На Рис. 5.21(а) представлено интегральное излучение в линии H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> трассирующее молекулярный газ. На (b) изображена карта первого момента линии H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> (центройд линии), иллюстрирующая дифференциацию



Рисунок 5.20 — а) Изображение радиоконтинуума на 1.35 мм по архивным данным ALMA. Снтезированый луч равен 1."  $2 \times 1$ ." 1, п.у = 80deg.2 (изображен в левом нижнем углу). Большой круг изображает область построения Рис. 5.20,(b). b) На рисунке изображена область, показанная окружностью на (а) в радиоконтинууме на длине волны 865 мкм по данным ALMA. Размер Д.Н. равен 0." 29 × 0." 23, П.У. = 83deg.2 (изображена в левом нижнем углу). Коор-

динаты мазерного излучения на 6.7 ГГц (MME) отмечены ромбом.

допплероской скорости молекулярных конденсаций. На (c) изображена карта первого момента  $H^{13}CO^+$  перекрытая изофотами излучения SiO и H<sub>2</sub>. Стрелочками обозначены пики в линии SiO. Северный пик в SiO хорошо соотносится с направлением истечения трассируемого в H<sub>2</sub> и совпадает по положению с пиком  $H^{13}CO^+$ . На (d) представлена карта второго момента линии  $H^{13}CO^+$  (ширины линии). Примечательно, что наиболее широкая линия наблюдается в направлении северного пика SiO (см. (c)).

Более подробное обсуждение менее значимых наблюдательных феноменов смотри в «The Disk-Outflow System around the Rare Young O-type Protostar W42-MME» [5].



Рисунок 5.21 — а) Карта распределения интегральной интенсивности излучения в линии молекулы  $H^{13}CO^+$  (ALMA, [60, 70] км c<sup>-1</sup>). Размер ДН равен 0." 31 × 0." 25, при П.У. = 83deg.2 (левый нижний угол). b)  $H^{13}CO^+$  карта первого момента. c) Контуры, соответствующие изофтотам интегрального излучения SiO и H<sub>2</sub> поверх карты первого момента  $H^{13}CO^+$ . Излучение SiO зарегистрированное SMA показано желтыми контурами, H<sub>2</sub> - пурпурными (полная карта на Puc. 5.19(a)). Линии уровня ALMA SiO(8–7) (белым) соответствуют изофотам 24.16, 27.61, 30.20, 38.83, 43.14, 47.45, 86.28, 129.42, 172.56, 258.84, 345.12, 517.67, 690.23, 819.65 мЯн/луч км с<sup>-1</sup> (1 $\sigma \sim$ 4.2 мЯн/луч км с<sup>-1</sup>). d) Карта второго момента H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> Ha (a) и (b), белый контур представляет уровень интегрального излучения H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> в 150 мЯн/луч км с<sup>-1</sup>.

# 5.3.3 Обсуждение структуры W42MME

Мы не обнаруживаем излучение в сантиметровом радиоконтинууме в направлении W42 MME на уровне  $\sim 0.3$  мЯн. К примеру, интегральная интенсивность H II зон в W42 в 7мм континууме 0.1 и 0.7 Ян. Интегральная интенсивность на длине волны 21 см ультракомпактных H II зон в S255IR NIRS3 и S255N SMA1 лежит равен 6-16 мЯн, соответственно. При спектральном индексе -0.1 [242] поток на 7 мм пересчитанный на расстояние до W42 MME предполагает-

162

ся 0.8 и 2.25 мЯн/луч. Спектральный класс, светимость и масса центрального сгустка сходны [3; 7] и ссылок в них. Ульракомпактная Н II область в S187SE обнаруженная нами имеет поток 0.67 мЯн на 21 см (См. 4.2.1), что предполагает поток в 0.092 мЯн/луч на 7 мм на расстоянии W42 MME (спектральный индекс равен -0.1,). Источник имеет сходную светимость (5600 L<sub> $\odot$ </sub> в S187 IRAS 01202+6133, 4500 L<sub> $\odot$ </sub> в W42 MME) и массу центрального сгустка (~21 M<sub> $\odot$ </sub> против ~19 M<sub> $\odot$ </sub> в W42 MME). Утверждается, что источник IRAS 01202+6133 находится на крайне раннем этапе эволюции [25], вероятно, более раннем чем в S255IR и S255N. Параметры всех четырех источников близки. W42 MME нам не удалось обнаружить излучение Н II зоны, что является аргументом что он находится на ранней стадии и Н II зона около него еще не сформирована и недостаточно ярка.

С помощью вращательных диаграмм молекулы CH<sub>3</sub>CN оценена кинетическая температура MME равная 221±30 К (см Рис. 5.22 (а) и (б)). Форма изофот предполагает сильную неоднородность оболочки (см Рис. 5.22 (с) и (d)), дифференциация оценки температуры по источнику соотносится с морфологией истечения, трассируемого в крыльях линии CO.

Морфология излучения SiO,  $H^{13}CO^+$  и  $H_2$  показывает клочковатую структуру истечения (см. Рис. 5.21). Эти клочки, вероятно, связаны с эпизодичностью выбросов (как и в S255IR NIRS3, смотри раздел 5.1). Излучение в  $H^{13}CO^+$ , вероятно, трассирует газ повышенной плотности, испытавший воздействие истечения. В работе «The Disk-Outflow System around the Rare Young O-type Protostar W42-MME» [5] показано наличие структуры, диаграмма позиция-скорость которой может быть интерпретирована как кеплеровская (см. Рис. 13). Подобная структура источника характерна для механизма эпизодической аккреции через диск.

#### 5.4 HII область S305

Область S305(SH 2-305, LBN 1048, RCW 8) является частью молекулярного облака, расположенного на расстоянии ~3.7 кпк от Солнца[243]. Ассоциированный с S305 молекулярный газ обнаруживается в диапазоне скоростей [40,48] км с<sup>-1</sup>[244]. На Рис. 5.23(а) представлено двухцветное композитное изоб-



Рисунок 5.22 — а) На панели показан спектр в линиях  $CH_3CN(12_K-11_K)$  K = 0-7 (радиус усреднения ~1" около MME) из ALMA band-6. Наблюдаемый спектр ALMA  $CH_3CN$  нарисован черной линией, модельный - красной. b) Вращательная диаграмма по  $CH_3CN$  в направлении MME. Прямой линией обозначена линия тренда, вписанная в оценки интенсивности линий переходов  $CH_3CN$  (Рис. 5.22,а).

ражение S305 в полосах 4.5мкм (красным) 3.6мкм (зеленым) Spitzer. В центре наблюдается протяженная оболочкоподобная структура и две массивных звезды (O8.5V: VM4 и O9.5V: VM2 [245], отмечены звездочкой). Молодое звездное поколение (M3O)[243] и радиоконтинуум в контурах GMRT[244] также отмечены на указанном рисунке.

На Рис. 5.23, (b) представлена оценка лучевой концентрации газа по данным телескопа Herschel, перекрытая изображением NRAO VLA Sky Survey (NVSS; разрешение ~45", [246]), что позволяет оценить расположение плотных конденсаций относительно ионизированного вещества. Рис. 5.23, (c) содержит изображение с картой лучевой концентрации по телескопу Herschel и изображенное контурами излучение в линии <sup>12</sup>CO J=1–0 данных FUGIN (~20")[247]. Ранее известные пылевые облака[248] подписаны на рисунке. Заметная часть M3O обнаруживается в направлении на молекулярные конденсации, однако, их распространение выглядит однородным около S305.

Протяженная структура, которая наблюдается в карте оценки кинетической температуры по данным обсерватории Herschel, представлена на Рис. 5.23 (d). Рис. 5.23 представляет структуру объекта, трассируемую в разных диапазонах электромагнитного излучения. Данные представлены, описаны и обсуждены в работах «Stellar Cores in the Sh 2-305 H II Region» [243] и «Probing the

164

Physical Conditions and Star Formation Processes in the Galactic H II Region S305» [244].

Основываясь на исследованиях, опубликованных в работах «Stellar Cores in the Sh 2-305 H II Region» [243] и «Probing the Physical Conditions and Star Formation Processes in the Galactic H II Region S305» [244] утверждается, что область, окружающая S305 является кандидатом на область с признаками стимулированного звездообразования. Подобный вывод следует из особенностей морфологии, анализа динамического возраста области H II и характерных времен фрагментации ассоциированной молекулярной оболочки. Однако, прямого свидетельства сценарию стимулированного образования не зарегистрировано.

### 5.4.1 Данные наблюдений

Подробное описание используемых данных представлено в работе [6]. Ниже приведены основные параметры наборов.

В исследовании используются данные обсерватории SOFIA в линии С II (158 мкм). Проект 06\_0226; PI: Loren Dean Anderson, данные взяты из архива. Ширина ДН на половинном уровне равнялась 14″.1 при частотном разрешении в 0.385 км с<sup>-1</sup> по Доплеру[249; 250]. Данные были сглажены до разрешения 25″ при шаге в 7″.

В работе также используются данные различных обзоров ИК диапазона: GLIMPSE360 (3.6 и 4.5 мкм), WISE (12 мкм), NVSS (21 см) и FUGIN ( ${}^{12}CO/{}^{13}CO$ , J=1–0). Также использовались оценки сделанные в рамках проекта *ViaLactea* основанные на данных обсерватории Herschel[63]. Излучение в радиоконтинууме GMRT на частоте 1280 МГц взято из работы [244].

# 5.4.2 Описание наблюдаемых феноменов

Подробное описание наблюдаемых особенностей представлено в работе [6]. Ниже приведены основные, наиболее важные детали. Данное исследование призвано изучить особенности области ФДО около S305. Представлено излучение в линии С II, что позволяет изучить простренственно-кинематическую структуру объекта. На Рис. 5.24 представлена поканальная карта источника в этой линии, нанесённая поверх изображения WISE 12 мкм (которое трассирует в основном горячую пыль и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) в области ФДО[1]). Морфология излучения предполагает наличие двух компонент - протяжённой и компактной. Излучение сильно фрагментировано и дифференцировано по скоростям. Протяженная компонента наиболее выражена на скорости 43.3 км с<sup>-1</sup>, в то время как компактная представлена на скорости 45.6 км с<sup>-1</sup>. Излучение на большем сдвиге по скорости более компактно и сосредоточено в центре Н II зоны.

#### 5.4.3 Оценка физических параметров объекта

Ниже приведена оценка лучевой концентрации нейтрального атомарного водорода (N(H)) и масса излучающего в линии С II газа как для компактной, так и для протяженной структуры. Использовалась формула A4 из работы Kaufman, Wolfire, Hollenbach [251]:

$$N(H) = \frac{L_{ch}(PDR)}{L_{ch}(HII)} \frac{Z n_e^{1/3} \Phi_i^{1/3} f_{C^+}}{15} \times 10^{21} [^{-2}], \qquad (5.1)$$

Где  $\Phi_i = 10^{49} \Phi_{49} c^{-1}$  - абсолютная светимость ионизирующих УФ фотонов,  $f_{C^+}$  - доля однократно ионизированного водорода в водороде, Z=1 стандартная распространённость (или металличность),  $n_e$  - концентрация электронов. Используя куб данных в С II было оценено отношение светимостей зон Н II и ФДО  $\frac{L_{ch}(PDR)}{L_{ch}(HII)} \sim 9$ . Мы предполагали, что излучение, пространственно перекрывающееся с излучением в радиоконтинууме GMRT и не относящееся к стенкам ФДО исходит из Н II зоны, остальное относили к ФДО.

Остальные параметры (Z=1,  $n_e = 500 \text{ см}^{-3}$ ,  $\Phi_i = 10^{49} \text{ c}^{-1}$  и  $f_{C^+} = 0.1$ ) взяты как типичные из работ «The PDR structure and kinematics around the compact H II regions S235 A and S235 C with [C II], [<sup>13</sup>C II], [O I], and HCO<sup>+</sup> line profiles» [181] и Kaufman, Wolfire, Hollenbach [251]. Типичные значения лучевой концентрации оценены в ~5 × 10<sup>20</sup> см<sup>-2</sup> и массы в ~ 565 M<sub>☉</sub>. Оценка массы основана на

предположении, что область ФДО является сферой, что область имеет одинаковую толщину и весь газ перешёл в атомарную форму. Значения носят условный характер в силу грубости предположений. Оценки, сделанные из [ур 4. 181] в предположении температуры возбуждения равной 120 К и малой оптической толщины дают близкие значения лучевой концентрации.

Кинематический возраст объекта оценивался исходя из предположения, что расширение происходит вследствие постоянного давления звездного ветра[175]. Радиусы ( $R_s$ ) компактной и протяженной компоненты ФДО оцениваются исходя из формы диаграммы позиция-скорость (см. ниже) и поканальных карт (см Рис. 5.24) и равнялись ~2 и ~4 пк, соответственно. Скорость расширения ( $v_{exp}$ ) оценивалась из диаграмм позиция-скорость и равнялась ~1.3 км с<sup>-1</sup>. Оценка кинематического возраста ( $t_{exp}$ ) была произведена по формуле ниже:

$$t_{exp} \approx 0.6^{-1-1} R_s v_{exp}^{-1}.$$
 (5.2)

Выражение взято из статьи[175]. Ошибка, вносимая неточностью оценки размера порядка 30-50%.

# 5.4.4 Обсуждение структуры S305

В данной работе впервые представлена структура и динамика газа области ФДО по линии С II. Газ, трассируемый в линии, хорошо соотносится с излучением 12 мкм WISE и имеет форму разорванной оболочки. Морфология структур хорошо соотносится с морфологией Н II зоны трассируемой в радиоконтинууме (с учетом эффекта проекции, см. Рис. 5.23 и 5.25). На меньшем сдвиге по скоростям и большим по расстоянию обнаруживается излучение изотопологов СО, что, в целом соответствует 1-мерной структуре областей ФДО[183]. Структура излучения на диаграммах позиция-скорость предполагает, что области излучения СО и С II перекрываются.

Диаграммы позиция-скорость (Рис 5.25) отлично иллюстрируют слоистую организацию Н II, ФДО и молекулярного газа, закрытого от УФ излучения. Очевидно, что компактная и протяженная оболочка разнесена по скорости (47 и 44 км с<sup>-1</sup>, соответственно). Очевидна идентификация оболочек с ионизирующей звездой. (VM2 и VM4, соответственно). Наблюдаются отличия от

сферической симметрии и для компактной и для протяженной оболочки. Необходимо отметить, что для отрицательных смещений по диаграмме молекулярная стенка за областью ФДО (С II) компактной структуры не обнаруживается. Это отсутствие на данный момент является единственным на данный момент признаком пересечения областей ФДО, и, вероятно, Н II зон.

Суммируя представленное в литературе[244], сценарий эволюции данного региона выглядит следующим образом:

- 1. Молодая звезда сформировала Н II зону, которую мы ассоциируем с протяженной оболочкой.
- Значительная масса газа в ФДО (~500 М<sub>☉</sub> на компактную и протяженную) предполагает аккумуляцию массы оболочкой и стимулированное образование звезды VM2.
- 3. VM2 сформировала свою Н II зону и область ФДО, которую мы идентифицируем с компактной структурой, что подтверждается оценками кинематических возрастов. Смещение по скоростям и отсутствие одной из молекулярных стенок предполагает пограничность с Н II от VM4.
- 4. Компактная оболочка также активно взаимодействует с молекулярным газом, как следует из диаграмм позиция-скорость, и набирает массу молекулярной части. Детальное изучение плотностей и химии требует наблюдения различных трассеров в молекулярных линиях.

Приведенные особенности морфологии и кинематики областей ФДО иллюстрируют связь между двумя оболочками Н II зон, демонстрируя одно из звеньев стимулированного звездообразования и является аргументом реализации сценария "collect and collapse"в данном источнике.

### 5.5 Основные результаты

– Показано, что высокоскоростное истечение из S255IR SMA1 и SMA2 оказывает сильное влияние на структуру ядра. Показано наличие полостей и стенок на масштабах до 0.4 пк, а также дифференциация скоростей газа истечения, предполагающая наличие механизмов эпизодической аккреции SMA2. Также, показаны признаки эпизодической аккреции в W42 MME.

- Обнаружен околозвездный тор, вращающийся вокруг S255N 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>. В центре тора находятся два сгустка, аккреция на них предполагается через тор.
- Показано, что газ ядер S255IR и S255N крайне неоднороден, в них отсутствуют признаки однородного коллапса. Структур, по которым происходит стекание газа к сгусткам на масштабах порядка ядра не наблюдается, что не согласуется со сценарием инерциальной аккреции. В то же время, сильная фрагментация газа хорошо согласуется со сценарием стимулированного звездообразования, что предполагалось в других работах.
- Показано, что в области S305 наблюдается пара Н II зон, идентифицирована область ФДО около них. Показано, что масса оболочек существенна (~500 M<sub>☉</sub>), что предполагает сценарий "collect and collapse"и стимулированное образование одной из Н II зон.
- Отсутствие зарегистрированного излучения в радиоконтинууме в направлении источника W42 MME сигнализирует об отсутствии UC H II зоны и раннем этапе эволюции протозвезды.



Рисунок 5.23 — (а) Композитное двухцветное изображение (красный: Spitzer 4.5 мкм, Зеленый: Spitzer 3.6 мкм) области S305. Континуум GMRT на частоте 1.28 ГГц отмечен синими контурами(0.4, 0.46, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.98) × 22 мЯн/луч при 1 $\sigma \sim 0.74$  мЯн/луч. Координаты[243] МЗО отмечены квадратиками. (b) Карта лучевой концентрации газа по данным Herschel перекрытая контурами NVSS 1.4 ГГц по уровням (0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.98) × 144 мЯн/луч. (c) Изофоты излучения FUGIN 12CO(1–0) ([39, 49] км с<sup>-1</sup>) на карте лучевой концентрации по данным обсерватории Herschel. Линии контуров соответствуют изофотам (0.2, 0.22, 0.25, 0.28, 0.3, 0.32, 0.35, 0.38, 0.4, 0.42, 0.45, 0.5, 0.53, 0.6) × 112.56 К км с<sup>-1</sup>. Координаты сгустков по излучению на 850мкм отмечены. (d) Карта кинетической температуры, рассчитанная на основе данных с обсерватории Herschel. На каждой панели координаты ранее известных звезд класса О отмечены звездой (и подписаны на (a)). Чертой отмечен характерный размер в 4 пк (на расстоянии 3.7 кпк)



Рисунок 5.24 — Поканальная карта в линии С II поверх изображения на 12 мкм WISE. Линии контуров соответствуют изофотам 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, и 35 К. Кругами представлена компактная и протяженная компонента оболочки. На каждой панели положение массивных протозвезд отмечено звездочками.



Рисунок 5.25 — Диаграммы позиция-скорость по срезу VM2->VM4 (сверху) и перпендикулярно ему (снизу). Излучение <sup>12</sup>CO изображено на фоне в градациях серого, <sup>13</sup>CO в разбитых контурах и С II в сплошных заполненных. Профиль излучения в континууме на частоте 1280 МГц изображён снизу и масштабирован

### Заключение

Основные результаты работы 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.
- 2. 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 газа 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 наименышая 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 ~1.1 M<sub>☉</sub>. Сумма масс фрагментов больше ~114 М<sub>☉</sub> 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 H 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 источников 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<sup>+</sup>(1–0), H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>(1–0), HCN(1–0) и H<sup>13</sup>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.

В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научному руководителю Зинченко И.И. за поддержку, помощь, обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит Пирогова Л.Е. за совместный труд, часть результатов которого вошла в диссертацию, а также помощь и поддержку при подготовке диссертации. Автор благодарит своего отца, Землянуху М.А. за помошь в вычитке текста.

Автор благодарен авторам \*Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template\* за публикацию шаблона диссертации в открытый доступ. Автор также благодарит всех за все.

#### Список литературы

- 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.
- 14. 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.
- 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.
- 20. 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.
- 21. 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.

- 23. 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. Н. Beuther, H. Linz, T. Henning. — 2008. — C. 338. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- 24. 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.
- 25. 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.
- 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.
- 26. Gorti, U. Photoevaporation of Clumps in Photodissociation Regions /
  U. Gorti, D. Hollenbach // The Astrophysical Journal. 2002. T. 573,
  № 1. C. 215-237.
- 27. 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.
- Speagle, J. S. A Conceptual Introduction to Markov Chain Monte Carlo Methods / J. S. Speagle // arXiv e-prints. — 2019. — arXiv:1909.12313.
- 29. emcee: The MCMC Hammer / D. Foreman-Mackey, D. W. Hogg, D. Lang,
   J. Goodman // PASP. 2013. T. 125, № 925. C. 306.
- 30. 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.

- 31. 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.
- 32. 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.
- 33. 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.
- 34. 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.
- 35. GASKAP-The Galactic ASKAP Survey / J. M. Dickey [et al.] // PASA. 2013. T. 30. e003.
- 36. 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.
- 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).
- Bao, Y. Two Novel SMOTE Methods for Solving Imbalanced Classification Problems / Y. Bao, S. Yang // IEEE Access. - 2023. - T. 11. -C. 5816-5823.
- 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.

- 39. 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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.
  - 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.
- 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.
- 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.
- Multiline observations of S255IR with ALMA / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, P. Zemlyanukha // IAU Symposium. — 2018. — Vol. 332. — P. 270—273.
- 40. Levenberg, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares / K. Levenberg // Quarterly of applied mathematics. 1944. T. 2, № 2. C. 164—168.
- 41. *Knuth, K. H.* Optimal Data-Based Binning for Histograms / K. H. Knuth // ArXiv Physics e-prints. 2006.
- 42. Studies in Astronomical Time Series Analysis. VI. Bayesian Block Representations / J. D. Scargle, J. P. Norris, B. Jackson, J. Chiang // The Astrophysical Journal. — 2013. — T. 764. — C. 167.
- 43. Astropy: A community Python package for astronomy / Astropy Collaboration [et al.] // A&A. -2013. T.558. A33.
- Altman, N. S. An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression / N. S. Altman // The American Statistician. – 1992. – T. 46, № 3. – C. 175–185. – URL: http://www.tandfonline.com/ doi/abs/10.1080/00031305.1992.10475879.
- LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python / M. Newville, T. Stensitzki, D. B. Allen, A. Ingargiola. – Bep. 0.8.0. – 2014. – URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.11813.
- Scikit-learn: Machine Learning in Python / F. Pedregosa [et al.] // Journal of Machine Learning Research. — 2011. — T. 12. — C. 2825—2830.
- 47. Schölkopf, B. Kernel principal component analysis / B. Schölkopf, A. Smola,
  K.-R. Müller // Artificial Neural Networks ICANN'97 / под ред.
  W. Gerstner, A. Germond, M. Hasler, J.-D. Nicoud. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1997. C. 583—588.

- 48. Smirnov, G. T. Computer Approximation of the Spectrograms of Radiosources / G. T. Smirnov, A. P. Tsivilev // Soviet Ast. - 1982. -T. 26. - C. 616-621.
- Brandt, S. Data analysis / S. Brandt. Springer, 1998. (Springer Series in Statistics).
- 50. Smirnov, G. T. Computer Approximation of the Spectrograms of Radiosources / G. T. Smirnov, A. P. Tsivilev // Soviet Ast. - 1982. -T. 26. - C. 616-621.
- 51. Cangelosi, R. Component retention in principal component analysis with application to cDNA microarray data / R. Cangelosi, A. Goriely // Biology Direct. 2007. T. 2, № 1. C. 2. URL: https://doi.org/10.1186/1745-6150-2-2.
- 52. Jolliffe, I. Principal Component Analysis / I. Jolliffe, Springer-Verlag. Springer, 2002. – (Springer Series in Statistics). – URL: https://books. google.ru/books?id=%5C\_olByCrhjwIC.
- 53. Dissecting the molecular structure of the Orion B cloud: insight from principal component analysis / P. Gratier [et al.] // A&A. 2017. T. 599. A100.
- 54. Clustering the Orion B giant molecular cloud based on its molecular emission / E. Bron [et al.] // A&A. -2018. T. 610. A12.
- Kislyakov, A. G. CO emission in directions of some millimeter wavelength continuum sources. / A. G. Kislyakov, M. A. Gordon // The Astrophysical Journal. — 1983. — T. 265. — C. 766—777.
- 56. HCN Co/ and Continuum Observations of Some Galactic Molecular Clouds at 2.6-MM and 3.4-MM / A. B. Burov, V. N. Voronov, I. I. Zinchenko, A. G. Kislyakov, A. A. Krasilnikov, E. P. Kukina, A. V. Lapinov, L. E. Pirogov, V. F. Vdovin, V. M. Demkin // Astronomicheskij Tsirkulyar. – 1985. – T. 1404. – C. 1.
- 57. Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 / D. K. Ojha, M. R. Samal, A. K. Pandey, B. C. Bhatt, S. K. Ghosh, S. Sharma, M. Tamura, V. Mohan, I. Zinchenko // The Astrophysical Journal. 2011. T. 738. C. 156.
- 58. A new 3 mm band receiver for the Onsala 20 m antenna / V. Belitsky [et al.] // A&A. -2015. T. 580. A29.

- 59. A 230 GHz heterodyne receiver array for the IRAM 30 m telescope / K. .-. Schuster [et al.] // A&A. 2004. T. 423. C. 1171-1177.
- 60. The Legacy of SCUPOL: 850 µm Imaging Polarimetry from 1997 to 2005 /
  B. C. Matthews, C. A. McPhee, L. M. Fissel, R. L. Curran // ApJS. 2009. T. 182, № 1. C. 143-204.
- Submillimeter Array Observations of Infrared Dark Clouds: A Tale of Two Cores / J. M. Rathborne, J. M. Jackson, Q. Zhang, R. Simon // The Astrophysical Journal. - 2008. - T. 689, № 2. - C. 1141-1149.
- 62. Sequential star formation in the Sh 254-258 molecular cloud: HHT maps of CO J=3-2 and 2-1 emission / J. H. Bieging, W. L. Peters, B. V. Vilaro, K. Schlottman, C. Kulesa // Triggered Star Formation in a Turbulent ISM. T. 237 / под ред. В. G. Elmegreen, J. Palous. 2007. C. 396. (IAU Symposium).
- 63. Marsh, K. A. Temperature as a third dimension in column-density mapping of dusty astrophysical structures associated with star formation / K. A. Marsh, A. P. Whitworth, O. Lomax // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2015. T. 454, № 4. C. 4282-4292.
- Massive Star Formation / J. C. Tan, M. T. Beltrán, P. Caselli, F. Fontani, A. Fuente, M. R. Krumholz, C. F. McKee, A. Stolte // Protostars and Planets VI / под ред. H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, T. Henning. — 2014. — C. 149.
- 65. From filamentary clouds to prestellar cores to the stellar IMF: Initial highlights from the Herschel Gould Belt Survey / P. André [et al.] // A&A. 2010. T. 518. C. L102.
- 66. From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation / P. André, J. Di Francesco, D. Ward-Thompson, S. .-. Inutsuka, R. E. Pudritz, J. E. Pineda // Protostars and Planets VI / под ред. Н. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, T. Henning. — 2014. — C. 27.
- 67. Cluster Formation Triggered by Filament Collisions in Serpens South /
  F. Nakamura [et al.] // ApJL. 2014. T. 791, № 2. C. L23.

- 68. Fragmentation in filamentary molecular clouds / Y. Contreras, G. Garay,
  J. M. Rathborne, P. Sanhueza // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. T. 456, № 2. C. 2041-2051.
- 69. Observational Signatures of End-dominated Collapse in the S242 Filamentary Structure / L. K. Dewangan, L. E. Pirogov, O. L. Ryabukhina, D. K. Ojha, I. Zinchenko // The Astrophysical Journal. 2019. T. 877, № 1. C. 1.
- 70. Shu, F. H. Self-similar collapse of isothermal spheres and star formation. /
  F. H. Shu // The Astrophysical Journal. 1977. T. 214. C. 488-497.
- Shu, F. H. Star formation in molecular clouds: observation and theory. /
  F. H. Shu, F. C. Adams, S. Lizano // ARA&A. 1987. T. 25. C. 23-81.
- 72. Zhang, Y. Radiation Transfer of Models of Massive Star Formation. IV. The Model Grid and Spectral Energy Distribution Fitting / Y. Zhang, J. C. Tan // The Astrophysical Journal. — 2018. — T. 853, № 1. — C. 18.
- McLaughlin, D. E. Gravitational Collapse and Star Formation in Logotropic and Nonisothermal Spheres / D. E. McLaughlin, R. E. Pudritz // The Astrophysical Journal. - 1997. - T. 476, № 2. - C. 750-765.
- 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.
- Larson, R. B. Numerical calculations of the dynamics of collapsing protostar / R. B. Larson // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1969. – T. 145. – C. 271.
- 76. Penston, M. V. Dynamics of self-gravitating gaseous spheres-III. Analytical results in the free-fall of isothermal cases / M. V. Penston // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 1969. - T. 144. - C. 425.
- Naranjo-Romero, R. Hierarchical Gravitational Fragmentation. I. Collapsing Cores within Collapsing Clouds / R. Naranjo-Romero, E. Vázquez-Semadeni, R. M. Loughnane // The Astrophysical Journal. — 2015. — T. 814, № 1. — C. 48.
- A Search for Infall Motions toward Nearby Young Stellar Objects /
  D. Mardones, P. C. Myers, M. Tafalla, D. J. Wilner, R. Bachiller, G. Garay //
  The Astrophysical Journal. 1997. T. 489, № 2. C. 719—733.

- 79. Evans Neal J., I. Physical Conditions in Regions of Star Formation /
  I. Evans Neal J. // ARA&A. 1999. T. 37. C. 311-362.
- 80. Molecular Emission Line Formation in Prestellar Cores / Y. Pavlyuchenkov,
  D. Wiebe, B. Shustov, T. Henning, R. Launhardt, D. Semenov // The Astrophysical Journal. 2008. T. 689, № 1. C. 335-350.
- A Simple Model of Spectral-Line Profiles from Contracting Clouds / P. C. Myers, D. Mardones, M. Tafalla, J. P. Williams, D. J. Wilner // ApJL. – 1996. – T. 465. – C. L133.
- Lee, C. W. A Survey for Infall Motions toward Starless Cores. II. CS (2-1) and N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (1-0) Mapping Observations / C. W. Lee, P. C. Myers, M. Tafalla // ApJS. - 2001. - T. 136, № 2. - C. 703-734.
- De Vries, C. H. Molecular Line Profile Fitting with Analytic Radiative Transfer Models / C. H. De Vries, P. C. Myers // The Astrophysical Journal. — 2005. — T. 620, № 2. — C. 800—815.
- 84. Contraction Signatures toward Dense Cores in the Perseus Molecular Cloud /
  J. L. Campbell, R. K. Friesen, P. G. Martin, P. Caselli, J. Kauffmann,
  J. E. Pineda // The Astrophysical Journal. 2016. T. 819, № 2. C. 143.
- 85. Evidence for Protostellar Collapse in B335 / S. Zhou, I. Evans Neal J.,
  C. Koempe, C. M. Walmsley // The Astrophysical Journal. 1993. T. 404. C. 232.
- 86. Walker, R. N. F. IRAS 0038+6312 viewed as the core of a CO llapsing cloud / R. N. F. Walker, M. R. W. Masheder // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1997. — T. 285, № 4. — C. 862—870.
- B7. Detection of Infall Signatures toward Serpens SMM4 / G. Narayanan,
  G. Moriarty-Schieven, C. K. Walker, H. M. Butner // The Astrophysical Journal. 2002. T. 565, № 1. C. 319-330.
- 88. Pavlyuchenkov, Y. N. A Method for Molecular-Line Radiative-Transfer Computations and Its Application to a Two-Dimensional Model for the Starless Core L1544 / Y. N. Pavlyuchenkov, B. M. Shustov // Astronomy Reports. - 2004. - T. 48, № 4. - C. 315-326.
- L1506: a prestellar core in the making / L. Pagani, I. Ristorcelli, N. Boudet,
   M. Giard, A. Abergel, J. .-. Bernard // A&A. 2010. T. 512. A3.

- 90. G305.136+0.068: A Massive and Dense Cold Core in an Early Stage of Evolution / G. Garay, D. Mardones, Y. Contreras, J. E. Pineda, E. Servajean, A. E. Guzmán // The Astrophysical Journal. 2015. T. 799, № 1. C. 75.
- 91. Opara, K. R. Differential Evolution: A survey of theoretical analyses / K. R. Opara, J. Arabas // Swarm and evolutionary computation. 2019. T. 44. C. 546—558.
- 92. Heyer, M. H. Application of Principal Component Analysis to Large-Scale Spectral Line Imaging Studies of the Interstellar Medium / M. H. Heyer, F. Peter Schloerb // The Astrophysical Journal. — 1997. — T. 475. — C. 173—187.
- 93. A Millimeter-Wave Line Study of L1287: A Case of Induced Star Formation by Stellar Wind Compression? / J. Yang, T. Umemoto, T. Iwata, Y. Fukui // The Astrophysical Journal. — 1991. — T. 373. — C. 137.
- 94. Klaassen, P. D. Looking for outflow and infall signatures in high-mass starforming regions / P. D. Klaassen, L. Testi, H. Beuther // A&A. - 2012. -T. 538. - A140.
- 95. Infall through the evolution of high-mass star-forming clumps / F. Wyrowski,
  R. Güsten, K. M. Menten, H. Wiesemeyer, T. Csengeri, S. Heyminck, B. Klein,
  C. König, J. S. Urquhart // A&A. 2016. T. 585. A149.
- 96. Properties of massive star-forming clumps with infall motions / Y.-X. He, J.-J. Zhou, J. Esimbek, W.-G. Ji, G. Wu, X.-D. Tang, T. Komesh, Y. Yuan, D.-L. Li, W. A. Baan // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2016. - T. 461, № 3. - C. 2288-2308.
- 97. Inflow Motions Associated with High-mass Protostellar Objects / H. Yoo,
  K.-T. Kim, J. Cho, M. Choi, J. Wu, I. Evans Neal J., L. M. Ziurys // ApJS. –
  2018. T. 235, № 2. C. 31.
- 98. Infall and outflow motions towards a sample of massive star-forming regions from the RMS survey / N. Cunningham, S. L. Lumsden, T. J. T. Moore, L. T. Maud, I. Mendigutía // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. T. 477, № 2. C. 2455-2469.
- 99. Turner, B. E. The Physics and Chemistry of Small Translucent Molecular Clouds. VIII. HCN and HNC / B. E. Turner, L. Pirogov, Y. C. Minh // The Astrophysical Journal. - 1997. - T. 483, № 1. - C. 235-261.

- 100. Pirogov, L. J=1-0 HCN toward bright far-infrared sources in the outer Galaxy / L. Pirogov // A&A. - 1999. - T. 348. - C. 600-613.
- 101. Trigonometric parallaxes of 6.7 GHz methanol masers / K. L. J. Rygl, A. Brunthaler, M. J. Reid, K. M. Menten, H. J. van Langevelde, Y. Xu // A&A. - 2010. - T. 511. - A2.
- 102. Clouds, filaments, and protostars: The Herschel Hi-GAL Milky Way /
  S. Molinari [et al.] // A&A. 2010. T. 518. C. L100.
- 103. Staude, H. J. RNO 1B a new FU<br/>or in Cassiopeia. / H. J. Staude, T. Neckel // A&A.<br/> 1991. T. 244. C. L13.
- McMuldroch, S. The FU Orionis Binary System RNO 1B/1C / S. McMuldroch, G. A. Blake, A. I. Sargent // AJ. - 1995. - T. 110. -C. 354.
- 105. Evolution of Dust and Ice Features around FU Orionis Objects /
  S. P. Quanz, T. Henning, J. Bouwman, R. van Boekel, A. Juhász, H. Linz,
  K. M. Pontoppidan, F. Lahuis // The Astrophysical Journal. 2007. T. 668, № 1. C. 359-383.
- 106. A Radio Candidate for the Exciting Source of the L1287 Bipolar Outflow /
  G. Anglada, L. F. Rodriguez, J. M. Girart, R. Estalella, J. M. Torrelles //
  ApJL. 1994. T. 420. C. L91.
- 107. The masing environment of star forming object IRAS00338+6312:
  Disk, outflow, or both ? / D. Fiebig, W. J. Duschl, K. M. Menten,
  W. M. Tscharnuter // A&A. 1996. T. 310. C. 199-210.
- 108. A Search for 95 GHz Class I Methanol Masers in Molecular Outflows / C.-G. Gan, X. Chen, Z.-Q. Shen, Y. Xu, B.-G. Ju // The Astrophysical Journal. - 2013. - T. 763, № 1. - C. 2.
- 109. Snell, R. L. Molecular Outflows Associated with a Flux-limited Sample of Bright Far-Infrared Sources / R. L. Snell, R. L. Dickman, Y. .-. Huang // The Astrophysical Journal. — 1990. — T. 352. — C. 139.
- Molecular Outflows around High-Mass Young Stellar Objects / Y. Xu,
  Z. .-. Shen, J. Yang, X. W. Zheng, A. Miyazaki, K. Sunada, H. J. Ma, J. J. Li,
  J. X. Sun, C. C. Pei // AJ. 2006. T. 132, № 1. C. 20-26.

- 111. A Rotating and Infalling Molecular Envelope around the H<sub>2</sub>O Maser in L1287 / T. Umemoto, M. Saito, J. Yang, N. Hirano // Star Formation 1999 / под ред. Т. Nakamoto. — 1999. — С. 227—228.
- 112. Interferometric view of the circumstellar envelopes of northern FU Orionistype stars / O. Fehér, Á. Kóspál, P. Ábrahám, M. R. Hogerheijde, C. Brinch // A&A. - 2017. - T. 607. - A39.
- 113. Extreme fragmentation and complex kinematics at the center of the L1287 cloud / C. Juárez, H. B. Liu, J. M. Girart, A. Palau, G. Busquet, R. Galván-Madrid, N. Hirano, Y. Lin // A&A. 2019. T. 621. A140.
- The Molecular Cores in the L1287, AFGL 5142, and IRAS 20126+4104 Regions / R. Estalella, R. Mauersberger, J. M. Torrelles, G. Anglada, J. F. Gomez, R. Lopez, D. Muders // The Astrophysical Journal. — 1993. — T. 419. — C. 698.
- 115. Dense gas and the nature of the outflows / I. Sepúlveda, G. Anglada,
  R. Estalella, R. López, J. M. Girart, J. Yang // A&A. 2011. T. 527. A41.
- 116. Sandell, G. On the Similarity of FU Orionis Stars to Class I Protostars:
  Evidence from the Submillimeter / G. Sandell, D. A. Weintraub // ApJS. –
  2001. T. 134, № 1. C. 115–132.
- 117. The Physical Conditions for Massive Star Formation: Dust Continuum Maps and Modeling / K. E. Mueller, Y. L. Shirley, I. Evans Neal J., H. R. Jacobson // ApJS. 2002. T. 143, № 2. C. 469-497.
- Williams, S. J. The circumstellar environments of high-mass protostellar objects. II. Dust continuum models / S. J. Williams, G. A. Fuller, T. K. Sridharan // A&A. 2005. T. 434, № 1. C. 257-274.
- 119. Pirogov, L. E. Density profiles in molecular cloud cores associated with high-mass star-forming regions / L. E. Pirogov // Astronomy Reports. 2009. T. 53, № 12. C. 1127-1135.
- 120. A Systematic TMRT Observational Study of Galactic <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C Ratios from Formaldehyde / Y. T. Yan [et al.] // The Astrophysical Journal. 2019. T. 877, № 2. C. 154.

- 121. Carbon gas in SMC low-metallicity star-forming regions / M. A. Requena-Torres, F. P. Israel, Y. Okada, R. Güsten, J. Stutzki, C. Risacher, R. Simon, H. Zinnecker // A&A. - 2016. - T. 589. - A28.
- 122. Velocity profiles of [C<sub>II</sub>], [C<sub>I</sub>], CO, and [O<sub>I</sub>] and physical conditions in four star-forming regions in the Large Magellanic Cloud / Y. Okada, R. Güsten, M. A. Requena-Torres, M. Röllig, J. Stutzki, U. U. Graf, A. Hughes // A&A. 2019. T. 621. A62.
- 123. Kinematics of the Horsehead Nebula and IC 434 Ionization Front in CO and C+ / J. Bally, E. Chambers, V. Guzman, E. Keto, B. Mookerjea, G. Sandell, T. Stanke, H. Zinnecker // AJ. 2018. T. 155, № 2. C. 80.
- Molecular envelope around the HII region RCW 120 / M. S. Kirsanova,
  Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, P. A. Boley, S. V. Salii, S. V. Kalenskii,
  A. M. Sobolev, L. D. Anderson // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2019. T. 488, № 4. C. 5641-5650.
- 125. H I-to-H<sub>2</sub> Transitions and H I Column Densities in Galaxy Star-forming Regions / A. Sternberg, F. Le Petit, E. Roueff, J. Le Bourlot // The Astrophysical Journal. — 2014. — T. 790, № 1. — C. 10.
- 126. Sharpless 170 and the surrounding interstellar medium / R. S. Roger,
  W. H. McCutcheon, C. R. Purton, P. E. Dewdney // A&A. 2004. T. 425. C. 553-567.
- 127. Unveiling the birth and evolution of the HII region Sh2-173 / S. Cichowolski,
  G. A. Romero, M. E. Ortega, C. E. Cappa, J. Vasquez // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. T. 394, № 2. C. 900—915.
- 128. Joncas, G. The Sharpless 187 Gas Complex: A Multifrequency Study / G. Joncas, D. Durand, R. S. Roger // The Astrophysical Journal. 1992. T. 387. C. 591.
- 129. Saha, P. On estimating the atomic hydrogen column density from the H I 21 cm emission spectra / P. Saha, N. Roy, M. Bhattacharya // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — T. 480, № 1. — C. L126—L130.
- 130. Exploring the Properties of Warm and Cold Atomic Hydrogen in the Taurus and Gemini Regions / H. Nguyen, J. R. Dawson, M.-Y. Lee, C. E. Murray, S. Stanimirović, C. Heiles, M. .-. Miville-Deschênes, A. Petzler // The Astrophysical Journal. 2019. T. 880, № 2. C. 141.

- 131. Russeil, D. Revised distances of Northern HII regions / D. Russeil, C. Adami,
  Y. M. Georgelin // A&A. 2007. T. 470, № 1. C. 161-171.
- 132. Distances to molecular clouds in the second Galactic quadrant / Q.-Z. Yan, J. Yang, Y. Sun, Y. Su, Y. Xu, H. Wang, X. Zhou, C. Wang // A&A. – 2021. – T. 645. – A129.
- 133. Arvidsson, K. Submillimeter and Molecular Views of Three Galactic Ring-like H II Regions / K. Arvidsson, C. R. Kerton // AJ. - 2011. - T. 141, № 5. -C. 153.
- 134. A Comparative Observational Study of YSO Classification in Four Small Star-forming H II Regions / S.-J. Kang, C. R. Kerton, M. Choi, M. Kang // The Astrophysical Journal. - 2017. - T. 845, № 1. - C. 21.
- 135. Multiwavelength Observations of Massive Stellar Cluster Candidates in the Galaxy / E. E. Richards, C. C. Lang, C. Trombley, D. F. Figer // AJ. – 2012. – T. 144, № 3. – C. 89.
- Engels, D. A database of circumstellar OH masers / D. Engels, F. Bunzel // A&A. - 2015. - T. 582. - A68.
- 137. The Arcetri Catalog of H<sub>2</sub>O maser sources: Update 2000 / R. Valdettaro [et al.] // A&A. 2001. T. 368. C. 845–865.
- 138. The Medicina survey of methanol masers at 6.7 GHz / V. I. Slysh, I. E. Valtts, S. V. Kalenskii, M. A. Voronkov, F. Palagi, G. Tofani, M. Catarzi // A&AS. – 1999. – T. 134. – C. 115–128.
- 139. Snell, R. L. Compact Radio Sources Associated with Molecular Outflows / R. L. Snell, J. Bally // The Astrophysical Journal. — 1986. — T. 303. — C. 683.
- 140. Israel, F. P. Aperture synthesis observations of galactic H II regions. VII. A "quick look" survey of galactic H II regions. / F. P. Israel // A&A. 1977. T. 61. C. 377.
- 141. Water Maser and Ammonia Survey toward IRAS Sources in the Galaxy I.
  H<sub>2</sub>O Maser Data / K. Sunada, T. Nakazato, N. Ikeda, S. Hongo, Y. Kitamura,
  J. Yang // PASJ. 2007. T. 59. C. 1185.

- 142. Zavagno, A. A new young stellar object in the S187 complex / A. Zavagno,
  L. Deharveng, J. Caplan // The Nature and Evolutionary Status of Herbig Ae/Be Stars. T. 62 / под ред. Р. S. The, M. R. Perez, E. P. J. van den Heuvel. 1994. C. 347. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- 143. Salas, L. S187 : SCP 1 (H2): A Curved Molecular Hydrogen Outflow /
  L. Salas, I. Cruz-González, A. Porras // The Astrophysical Journal. 1998. —
  T. 500, № 2. C. 853—861.
- 144. Henkel, C. H2 O maser emission from HH 6 and other star-forming regions. /
  C. Henkel, A. D. Haschick, R. Guesten // A&A. 1986. T. 165. C. 197-203.
- 145. An atlas of H2O maser observations on the 13.7m radio telescope of Purple Mountain Observatory. / F. Han [et al.] // Publications of the Purple Mountain Observatory. - 1995. - T. 14. - C. 185-221.
- 146. Classification and statistical properties of galactic H2O masers. / F. Palagi,
  R. Cesaroni, G. Comoretto, M. Felli, V. Natale // A&AS. 1993. T. 101. C. 153-193.
- 147. Zinchenko, I. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation
  II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects /
  I. Zinchenko, P. Caselli, L. Pirogov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. T. 395, № 431. C. 2234-2247.
- 148. CASA Architecture and Applications / J. P. McMullin, B. Waters, D. Schiebel, W. Young, K. Golap // Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI. T. 376 / под ред. R. A. Shaw, F. Hill, D. J. Bell. – 2007. — C. 127. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- 149. The Canadian Galactic Plane Survey / A. R. Taylor [et al.] // AJ. -2003. T. 125, Nº 6. C. 3145-3164.
- 150. Rau, U. A Joint Deconvolution Algorithm to Combine Single-dish and Interferometer Data for Wideband Multiterm and Mosaic Imaging / U. Rau, N. Naik, T. Braun // AJ. - 2019. - T. 158, № 1. - C. 3.
- 151. A new 3 mm band receiver for the Onsala 20 m antenna / V. Belitsky [et al.] // A&A. -2015. T. 580. A29.

- 152. Tody, D. The IRAF Data Reduction and Analysis System / D. Tody // Instrumentation in astronomy VI. T. 627 / под ред. D. L. Crawford. — 1986. — С. 733. — (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).
- 153. The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey / J. M. Jackson [et al.] // ApJS. — 2006. — T. 163, № 1. — C. 145—159.
- 154. 2MASS All Sky Catalog of point sources. / R. M. Cutri [et al.]. -2003.
- 155. Meisner, A. M. Deep Full-sky Coadds from Three Years of WISE and NEOWISE Observations / A. M. Meisner, D. Lang, D. J. Schlegel // AJ. – 2017. – T. 154, № 4. – C. 161.
- 156. Meisner, A. M. A Full-sky, High-resolution Atlas of Galactic 12 µm Dust Emission with WISE / A. M. Meisner, D. P. Finkbeiner // The Astrophysical Journal. - 2014. - T. 781, № 1. - C. 5.
- 157. Zinchenko, I. Studies of dense molecular cores in regions of massive star formation. VII. Core properties on the galactic scale / I. Zinchenko, L. Pirogov, M. Toriseva // A&AS. 1998. T. 133. C. 337-352.
- Berry, D. S. FellWalker-A clump identification algorithm / D. S. Berry // Astronomy and Computing. - 2015. - T. 10. - C. 22-31.
- 159. Wilson, T. L. Tools of Radio Astronomy, 5th edition / T. L. Wilson,
  K. Rohlfs, S. Huttemeister. 2012.
- 160. Physical Properties and Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic Ring Survey / J. Roman-Duval, J. M. Jackson, M. Heyer, J. Rathborne, R. Simon // The Astrophysical Journal. - 2010. - T. 723, № 1. - C. 492-507.
- 161. Larson, R. B. Turbulence and star formation in molecular clouds. /
  R. B. Larson // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. –
  1981. T. 194. C. 809–826.
- Mangum, J. G. How to Calculate Molecular Column Density / J. G. Mangum,
  Y. L. Shirley // PASP. 2015. T. 127, № 949. C. 266.

- 163. A Herschel [C ii] Galactic plane survey. I. The global distribution of ISM gas components / J. L. Pineda, W. D. Langer, T. Velusamy, P. F. Goldsmith // A&A. - 2013. - T. 554. - A103.
- 164. High CO depletion in southern infrared dark clouds / F. Fontani,
  A. Giannetti, M. T. Beltrán, R. Dodson, M. Rioja, J. Brand, P. Caselli,
  R. Cesaroni // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. T. 423, № 3. C. 2342-2358.
- 165. Koenig, X. P. A Classification Scheme for Young Stellar Objects Using the Wide-field Infrared Survey Explorer AllWISE Catalog: Revealing Low-density Star Formation in the Outer Galaxy / X. P. Koenig, D. T. Leisawitz // The Astrophysical Journal. — 2014. — T. 791, № 2. — C. 131.
- 166. Burton, W. B. Galactic Structure Derived from Neutral Hydrogen Observations Using Kinematic Models Based on the Density-wave Theory / W. B. Burton // A&A. - 1971. - T. 10. - C. 76.
- 167. Triggered star formation in a molecular shell created by a SNR? /
  S. Cichowolski, S. Pineault, R. Gamen, E. M. Arnal, L. A. Suad,
  M. E. Ortega // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. T. 438, № 2. C. 1089-1101.
- 168. Leahy, D. Radio observations and spectrum of the SNR G127.1+0.5 and its central source 0125+628 / D. Leahy, W. Tian // A&A. 2006. T. 451, № 1. C. 251-257.
- 169. Kirsanova, M. S. Merged H/H<sub>2</sub> and C<sup>+</sup>/C/CO transitions in the Orion Bar / M. S. Kirsanova, D. S. Wiebe // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2019. - T. 486, № 2. - C. 2525-2534.
- 170. Elmegreen, B. G. A Fractal Origin for the Mass Spectrum of Interstellar Clouds / B. G. Elmegreen, E. Falgarone // The Astrophysical Journal. – 1996. – T. 471. – C. 816.
- 171. Kritsuk, A. G. A supersonic turbulence origin of Larson's laws /
  A. G. Kritsuk, C. T. Lee, M. L. Norman // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2013. T. 436, № 4. C. 3247-3261.
- 172. Properties of the dense core population in Orion B as seen by the Herschel Gould Belt survey / V. Könyves [et al.] // A&A. - 2020. - T. 635. - A34.

- 173. Zinchenko, I. I. Correlations between Parameters of Massive Cores in Interstellar Molecular Clouds / I. I. Zinchenko // Astronomy Letters. – 2000. – T. 26. – C. 802–805.
- 174. Kauffmann, J. Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields / J. Kauffmann, T. Pillai, P. F. Goldsmith // The Astrophysical Journal. — 2013. — T. 779, № 2. — C. 185.
- 175. Interstellar bubbles. II. Structure and evolution. / R. Weaver, R. McCray,
  J. Castor, P. Shapiro, R. Moore // The Astrophysical Journal. 1977. T. 218. C. 377-395.
- 176. The Chandra Source Catalog A Billion X-ray Photons / I. N. Evans [et al.] // American Astronomical Society Meeting Abstracts #235. T. 235. – 2020. – C. 154.05. – (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
- 177. Deuterated Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons / E. Peeters,
  L. J. Allamandola, J. Bauschlicher C. W., D. M. Hudgins, S. A. Sandford,
  A. G. G. M. Tielens // The Astrophysical Journal. 2004. T. 604, № 1. C. 252-257.
- Stochastic grain heating and mid-infrared emission in protostellar cores /
  Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, V. V. Akimkin, M. S. Khramtsova,
  T. Henning // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. T. 421, № 3. C. 2430-2441.
- 179. Spitzer IRAC Color Diagnostics for Extended Emission in Star-forming Regions / J. E. Ybarra, M. Tapia, C. G. Román-Zúñiga, E. A. Lada // ApJL. - 2014. - T. 794, № 2. - C. L25.
- 180. Shirley, Y. L. The Critical Density and the Effective Excitation Density of Commonly Observed Molecular Dense Gas Tracers / Y. L. Shirley // PASP. – 2015. — T. 127, № 949. — C. 299.
- 181. The PDR structure and kinematics around the compact H II regions S235 A and S235 C with [C II], [<sup>13</sup>C II], [O I], and HCO<sup>+</sup> line profiles / M. S. Kirsanova [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. T. 497, № 3. C. 2651—2669.

- 182. The Aromatic Infrared Bands as seen by ISO-SWS: Probing the PAH model /
  L. Verstraete, C. Pech, C. Moutou, K. Sellgren, C. M. Wright, M. Giard,
  A. Léger, R. Timmermann, S. Drapatz // A&A. 2001. T. 372. C. 981-997.
- 183. Tielens, A. G. G. M. Photodissociation regions. I. Basic model. /
  A. G. G. M. Tielens, D. Hollenbach // The Astrophysical Journal. 1985. —
  T. 291. C. 722—746.
- 184. Sternberg, A. Chemistry in Dense Photon-dominated Regions / A. Sternberg,
  A. Dalgarno // ApJS. 1995. T. 99. C. 565.
- 185. H<sub>2</sub>O masers in a jet-driven bow shock: episodic ejection from a massive young stellar object / R. A. Burns, T. Handa, T. Nagayama, K. Sunada, T. Omodaka // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2016. — T. 460. — C. 283—290.
- 186. A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, S. Kurtz, D. K. Ojha, M. R. Samal, S. K. Ghosh // The Astrophysical Journal. - 2012. - T. 755. - C. 177.
- 187. Sequential Star Formation in the Sh 254-258 Molecular Cloud: Heinrich Hertz Telescope Maps of CO J = 2-1 and 3-2 Emission / J. H. Bieging, W. L. Peters, B. Vila Vilaro, K. Schlottman, C. Kulesa // AJ. 2009. T. 138, № 3. C. 975-985.
- Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258:
  Structure and Evolution / L. A. Chavarria, L. E. Allen, J. L. Hora, C. M. Brunt, G. G. Fazio // The Astrophysical Journal. 2008. T. 682, № 1. C. 445-462.
- 189. Mucciarelli, P. Revealing the missing low-mass stars in the S254-S258 star forming region by deep X-ray imaging / P. Mucciarelli, T. Preibisch, H. Zinnecker // A&A. 2011. T. 533. A121.
- 190. The link between gas and stars in the S254-S258 star-forming region / D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. M. Sobolev, M. Thomasson, V. Ossenkopf-Okada, M. Juvela, S. A. Khaibrakhmanov, E. A. Popova // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2021. - T. 506, № 3. -C. 4447-4464.

- 191. Infrared Polarization Images of Star-forming Regions. I. The Ubiquity of Bipolar Structure / M. Tamura, I. Gatley, R. R. Joyce, M. Ueno, H. Suto, M. Sekiguchi // The Astrophysical Journal. — 1991. — T. 378. — C. 611.
- 192. Howard, E. M. S255-2: The Formation of a Stellar Cluster / E. M. Howard,
  J. L. Pipher, W. J. Forrest // The Astrophysical Journal. 1997. T. 481,
  № 1. C. 327—342.
- 193. ALMA View of the Infalling Envelope around a Massive Protostar in S255IR SMA1 / S.-Y. Liu, Y.-N. Su, I. Zinchenko, K.-S. Wang, D. M. .-. Meyer, Y. Wang, I. .-. Hsieh // The Astrophysical Journal. — 2020. — T. 904, № 2. — C. 181.
- 194. A Submillimeter Burst of S255IR SMA1: The Rise and Fall of Its Luminosity / S.-Y. Liu, Y.-N. Su, I. Zinchenko, K.-S. Wang, Y. Wang // ApJL. - 2018. - T. 863, № 1. - C. L12.
- 195. Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations / I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, Y. Wang // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — T. 18, № 8. — C. 093.
- 196. Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation / I. I. Zinchenko, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, K.-S. Wang, Y. Wang // The Astrophysical Journal. — 2020. — T. 889, № 1. — C. 43.
- 197. Rau, U. A Joint Deconvolution Algorithm to Combine Single-dish and Interferometer Data for Wideband Multiterm and Mosaic Imaging / U. Rau, N. Naik, T. Braun // AJ. - 2019. - T. 158, № 1. - C. 3.
- 198. Different evolutionary stages in the massive star-forming region S255 complex / Y. Wang, H. Beuther, A. Bik, T. Vasyunina, Z. Jiang, E. Puga, H. Linz, J. A. Rodón, T. Henning, M. Tamura // A&A. 2011. T. 527. A32.
- 199. Extreme fragmentation and complex kinematics at the center of the L1287 cloud / C. Juárez, H. B. Liu, J. M. Girart, A. Palau, G. Busquet, R. Galván-Madrid, N. Hirano, Y. Lin // A&A. 2019. T. 621. A140.
- 200. Zinchenko, I. Chemical differentiation in regions of high-mass star formation
  II. Molecular multiline and dust continuum studies of selected objects /
  I. Zinchenko, P. Caselli, L. Pirogov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2009. T. 395. C. 2234-2247.

- 201. Submillimetre line and continuum observations of the S255 molecular cloud / K. J. Richardson, G. J. White, G. Gee, M. J. Griffin, C. T. Cunningham, P. A. R. Ade, L. W. Avery // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1985. T. 216. C. 713-733.
- 202. Kurtz, S. A Catalog of CH<sub>3</sub>OH 7<sub>0</sub>-6<sub>1</sub> A<sup>+</sup> Maser Sources in Massive Star-forming Regions / S. Kurtz, P. Hofner, C. V. Álvarez // ApJS. 2004. T. 155. C. 149-165.
- 203. Anatomy of the S255-S257 complex triggered high-mass star formation / V. Minier, N. Peretto, S. N. Longmore, M. G. Burton, R. Cesaroni, C. Goddi, M. R. Pestalozzi, P. André // Triggered Star Formation in a Turbulent ISM. T. 237 / под ред. В. G. Elmegreen, J. Palous. 2007. C. 160—164. (IAU Symposium).
- 204. Kurtz, S. Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images / S. Kurtz, E. Churchwell, D. O. S. Wood // ApJS. 1994. T. 91. C. 659-712.
- 205. Sault, R. J. A Retrospective View of MIRIAD / R. J. Sault, P. J. Teuben,
  M. C. H. Wright // Astronomical Data Analysis Software and Systems IV.
  T. 77 / под ред. R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes. 1995. С. 433. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
- 206. Schwab, F. R. Relaxing the isoplanatism assumption in self-calibration; applications to low-frequency radio interferometry / F. R. Schwab // AJ. 1984. T. 89. C. 1076-1081.
- 207. Mapelli, M. Rotation in young massive star clusters / M. Mapelli // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. -2017. T. 467. C. 3255-3267.
- 208. Discovery of Jets and HH-like Objects near the S255 IR Complex / M. P. Miralles, L. Salas, I. Cruz-González, S. Kurtz // The Astrophysical Journal. - 1997. - T. 488. - C. 749-759.
- 209. Spitzer Observations of the Massive Star-forming Complex S254-S258: Structure and Evolution / L. A. Chavarria, L. E. Allen, J. L. Hora, C. M. Brunt, G. G. Fazio // The Astrophysical Journal. - 2008. - T. 682. -C. 445-462.

- 210. Sgr B2(N): A Bipolar Outflow and Rotating Hot Core Revealed by ALMA /
  A. E. Higuchi, T. Hasegawa, K. Saigo, P. Sanhueza, J. O. Chibueze // The Astrophysical Journal. 2015. T. 815. C. 106.
- 211. Filamentary structure and Keplerian rotation in the high-mass star-forming region G35.03+0.35 imaged with ALMA / M. T. Beltrán [et al.] // A&A. 2014. T. 571. A52.
- 212. Interferometric Imaging of IRAS 04368+2557 in the L1527 Molecular Cloud Core: A Dynamically Infalling Envelope with Rotation / N. Ohashi, M. Hayashi, P. T. P. Ho, M. Momose // The Astrophysical Journal. 1997. T. 475. C. 211—223.
- 213. Val'tts, I. E. The unusual methanol maser 345.01+1.79 / I. E. Val'tts // Astronomy Letters. -1998. T. 24. C. 788-794.
- 214. Subarcsecond Imaging of the NGC 6334 I(N) Protocluster: Two Dozen Compact Sources and a Massive Disk Candidate / T. R. Hunter, C. L. Brogan, C. J. Cyganowski, K. H. Young // The Astrophysical Journal. — 2014. — T. 788. — C. 187.
- 215. ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: 278ÿGHz Class I Methanol Masers / T. Yanagida, T. Sakai, T. Hirota, N. Sakai, J. B. Foster, P. Sanhueza, J. M. Jackson, K. Furuya, Y. Aikawa, S. Yamamoto // The Astrophysical Journal Letters. 2014. T. 794, № 1. C. L10. URL: http://stacks.iop.org/2041-8205/794/i=1/a=L10.
- 216. Spatially resolved near-infrared spectroscopy of the massive star-forming region IRAS 19410+2336 / N. L. Martin-Hernandez, A. Bik, E. Puga, D. E. A. Nürnberger, L. Bronfman // A&A. 2008. T. 489. C. 229-243.
- 217. *Rohlfs, K.* Tools of radio astronomy / K. Rohlfs, T. L. Wilson. Springer, 2004.
- 218. Frerking, M. A. The relationship between carbon monoxide abundance and visual extinction in interstellar clouds / M. A. Frerking, W. D. Langer, R. W. Wilson // The Astrophysical Journal. 1982. T. 262. C. 590—605.
- 219. Fragmentation and disk formation in high-mass star formation: The ALMA view of G351.77-0.54 at 0.06" resolution / H. Beuther, A. J. Walsh, K. G. Johnston, T. Henning, R. Kuiper, S. N. Longmore, C. M. Walmsley // A&A. 2017. T. 603. A10.

- 220. Beltrán, M. T. Accretion disks in luminous young stellar objects /
  M. T. Beltrán, W. J. de Wit // A&A Rev. 2016. T. 24. C. 6.
- A Large, Massive, Rotating Disk Around an Isolated Young Stellar Object /
  S. P. Quanz, H. Beuther, J. Steinacker, H. Linz, S. M. Birkmann, O. Krause,
  T. Henning, Q. Zhang // The Astrophysical Journal. 2010. T. 717. C. 693-707.
- A Remnant Disk around a Young Massive Star / R. Chini, V. H. Hoffmeister,
  M. Nielbock, C. M. Scheyda, J. Steinacker, R. Siebenmorgen,
  D. Nürnberger // ApJL. 2006. T. 645. C. L61-L64.
- 223. No high-mass protostars in the silhouette young stellar object M17-SO1 /
  S. Sako [et al.] // Nature. 2005. T. 434. C. 995-998.
- 224. The VLTI/MIDI survey of massive young stellar objects . Sounding the inner regions around intermediate- and high-mass young stars using mid-infrared interferometry / P. A. Boley [et al.] // A&A. 2013. T. 558. A24.
- 225. An Infalling Torus of Molecular Gas around the Ultracompact H II Region G28.20-0.05 / P. K. Sollins, Q. Zhang, E. Keto, P. T. P. Ho // The Astrophysical Journal. - 2005. - T. 631. - C. 399-410.
- 226. Rotating toroids in G10.62-0.38, G19.61-0.23, and G29.96-0.02 /
  M. T. Beltrán, R. Cesaroni, R. Neri, C. Codella // A&A. 2011. T. 525. A151.
- Molecular outflows and hot molecular cores in G24.78+0.08 at sub-arcsecond angular resolution / M. T. Beltrán, R. Cesaroni, Q. Zhang, R. Galván-Madrid, H. Beuther, C. Fallscheer, R. Neri, C. Codella // A&A. 2011. T. 532. A91.
- Disks Around Young O-B (Proto)Stars: Observations and Theory / R. Cesaroni, D. Galli, G. Lodato, C. M. Walmsley, Q. Zhang // Protostars and Planets V. - 2007. - C. 197-212.
- 229. On the Role of Disks in the Formation of Stellar Systems: A Numerical Parameter Study of Rapid Accretion / K. M. Kratter, C. D. Matzner, M. R. Krumholz, R. I. Klein // The Astrophysical Journal. 2010. T. 708. C. 1585—1597.

- 230. Balbus, S. A. Instability, turbulence, and enhanced transport in accretion disks / S. A. Balbus, J. F. Hawley // Reviews of Modern Physics. 1998. T. 70. C. 1-53.
- 231. The Formation of Massive Star Systems by Accretion / M. R. Krumholz,
  R. I. Klein, C. F. McKee, S. S. R. Offner, A. J. Cunningham // Science. –
  2009. T. 323. C. 754.
- N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(1-0) survey of massive molecular cloud cores / L. Pirogov, I. Zinchenko,
  P. Caselli, L. E. B. Johansson, P. C. Myers // A&A. 2003. T. 405. C. 639-654.
- 233. Massive Young Stellar Object W42-MME: the Discovery of an Infrared Jet Using VLT/NACO Near-infrared Images / L. K. Dewangan, Y. D. Mayya, A. Luna, D. K. Ojha // The Astrophysical Journal. 2015. T. 803, № 2. C. 100.
- 234. The Torun catalogue of 6.7 GHz methanol masers / M. Szymczak, P. Wolak,
  A. Bartkiewicz, K. M. Borkowski // Astronomische Nachrichten. 2012. T. 333, № 7. C. 634.
- 235. Blum, R. D. The Stellar Content of Obscured Galactic Giant H II Regions. II. W42 / R. D. Blum, P. S. Conti, A. Damineli // AJ. 2000. T. 119, Nº 4. C. 1860–1871.
- Radio Recombination Lines in Galactic H II Regions / C. Quireza,
  R. T. Rood, D. S. Balser, T. M. Bania // ApJS. 2006. T. 165, № 1. C. 338-359.
- 237. The Molecular Properties of Galactic H II Regions / L. D. Anderson,
  T. M. Bania, J. M. Jackson, D. P. Clemens, M. Heyer, R. Simon, R. Y. Shah,
  J. M. Rathborne // ApJS. 2009. T. 181, № 1. C. 255-271.
- 238. The Physical Environment of the Massive Star-forming Region W42 /
  L. K. Dewangan, A. Luna, D. K. Ojha, B. G. Anandarao, K. K. Mallick,
  Y. D. Mayya // The Astrophysical Journal. 2015. T. 811, № 2. C. 79.
- Williams, P. K. G. Rapid Development of Interferometric Software Using MIRIAD and Python / P. K. G. Williams, C. J. Law, G. C. Bower // PASP. 2012. T. 124, № 916. C. 624.

- 240. Jones, T. J. Outflows from Luminous Young Stellar Objects: An Infrared Polarimetric Study / T. J. Jones, C. E. Woodward, M. S. Kelley // AJ. 2004. T. 128, № 5. C. 2448–2459.
- 241. Zhang, Y. Radiation Transfer of Models of Massive Star Formation. I. Dependence on Basic Core Properties / Y. Zhang, J. C. Tan // The Astrophysical Journal. — 2011. — T. 733, № 1. — C. 55.
- A global view on star formation: The GLOSTAR Galactic plane survey. VI.
  Radio Source Catalog II: 28° < ℓ < 36° and |b| < 1°, VLA B-configuration /</li>
  S. A. Dzib [et al.] // A&A. 2023. T. 670. A9.
- 243. Stellar Cores in the Sh 2-305 H II Region / R. Pandey, S. Sharma,
  N. Panwar, L. K. Dewangan, D. K. Ojha, D. P. Bisen, T. Sinha, A. Ghosh,
  A. K. Pandey // The Astrophysical Journal. 2020. T. 891, № 1. C. 81.
- Probing the Physical Conditions and Star Formation Processes in the Galactic H II Region S305 / L. K. Dewangan, S. Sharma, R. Pandey, S. d. Palacio, D. K. Ojha, P. Benaglia, T. Baug, S. R. Das // The Astrophysical Journal. 2020. T. 898, № 2. C. 172.
- 245. *Chini*, *R*. The galactic rotation outside the solar circle. / R. Chini, J. E. Wink // A&A. 1984. T. 139. C. L5-L8.
- 246. The NRAO VLA Sky Survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen,
  Q. F. Yin, R. A. Perley, G. B. Taylor, J. J. Broderick // AJ. 1998. T. 115, № 5. C. 1693-1716.
- FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). I. Project overview and initial results / T. Umemoto [et al.] // PASJ. 2017. T. 69, № 5. C. 78.
- 248. Cold Dust in Hot Regions / G. Sreenilayam [et al.] // AJ. 2014. T. 147, Nº 3. C. 53.
- 249. The Origin of [C II] 158 µm Emission toward the H II Region Complex S235 /
  L. D. Anderson [et al.] // The Astrophysical Journal. 2019. T. 882, № 1. C. 11.
- 250. FEEDBACK: a SOFIA Legacy Program to Study Stellar Feedback in Regions of Massive Star Formation / N. Schneider [et al.] // PASP. 2020. T. 132, № 1016. C. 104301.

251. Kaufman, M. J. [Si II], [Fe II], [C II], and H<sub>2</sub> Emission from Massive Starforming Regions / M. J. Kaufman, M. G. Wolfire, D. J. Hollenbach // The Astrophysical Journal. — 2006. — T. 644, № 1. — C. 283—299.

## Список рисунков

1.1	Пример гистограммы распределения интенсивности линии по	
	скорости с различным алгоритмом выбора ширины столбца для	
	данных NH <sub>3</sub> (1,1). Синим изображен метод байесовских блоков,	
	оранжевым – правило Кнута, зеленым – с разбиением по $0.2~{ m km/c.}$ .	18
1.2	Наблюдаемый спектр $N_2H^+$ (3—2) в точке (-7", 7") относительно	
	S225N-SMA1 (гистограмма), его аппроксимация методом	
	наименьших квадратов (красная сплошная линия) и 1-й ближайший	
	kБС сосед (голубой штриховой линией), вертикальными линиями	
	обозначены сверхтонкие компоненты перехода (3—2), длина	
	которых пропорциональна статистическим весам	21
1.3	Блок-схема алгоритма определения параметров при вписывании	
	модельных спектральных карт в наблюдаемые	25
1.4	Гистограмма распределения смещения индекса спадания плотности	
	после прямого и обратного преобразования ГК для источника G268	
	для некоторых параметров модели $(\pmb{\alpha}_{ys})$	30
1.5	Гистограмма распределения относительного отклонения между	
	величиной параметра индекса спадания плотности после прямого и	
	обратного преобразования и любой ближайшей из исходного	
	множества	32
2.1	Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в	
	объекте 121.28+0.65, наблюдавшийся в 2015г. в Онсала. Показана	
	часть полосы спектроанализатора, на участках с молекулярными	
	линиями	38
2.2	Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в	
	объекте 77.462+1.759, набл. 2015г. Онсала	39
2.3	Спектр в направлении позиции пика молекулярного излучения в	
	объекте 99.982+4.17, набл. 2015г. Онсала	44
2.4	Спектральная карта объекта G77.46+1.76 в линии HCN (1–0) с	
	вписанной моделью (красным) по методу, приведенному в Гл.1.3.	
	Изолинии и оттенки серого соответствуют излучению пыли на	
	длине волны 0.85 мм [60]	51

2.5	Спектральная карта объекта G121.30+0.66 в линии H <sup>13</sup> CN (1–0) с вписанной моделью (красным) по методу, приведенному в Гл.1.3.	
	Изолинии и оттенки серого соответствуют излучению пыли на	
	длине волны 0.85 мм [60]	52
2.6	Диаграмма позиция - скорость в линии молекулы CS в направлении	
	наибольшего градиента первого момента линии в объекте	
	G77.46+1.76. На левой панели приведена карта нулевого момента в	
	линии НСО <sup>+</sup> (1–0) и приведено направление среза. На правой	
	панели приведена диаграмма позиция-скорость в линии молекулы CS.	53
2.7	Спектр линии <sup>12</sup> СО (2–1), усреднённый по центральной области	
	(6:13:40, +17:54:40 радиус=60") и вписанные в него гауссовы	
	компоненты	54
2.8	Поканальная карта источника G192.76 интенсивности в линиях	
	$^{12}$ CO(2–1) (цветом), изофоты излучения в линии $^{13}$ CO(2–1)	
	представлены контурами белого	55
2.9	Кинетическая температура газа по оценке из линии CO(2–1)	56
2.10	Поточечное сравнение оценок температуры возбуждения по	
	данным в линии <sup>12</sup> CO (2–1) и оценки темпрературы пыли по	
	данным Гершеля из работы [63]	57
3.1	Карта темного облака L1287 на длине волны 500 µm по данным	
	наблюдений на телескопе Herschel. Изолинии интегральной	
	интенсивности линии НСО <sup>+</sup> (1–0) соответствуют значениям 20% и	
	50% от максимума (38.6 Ккм/с) [10]. Звездочкой показан источник	
	IRAS 00338+6312	62
3.2	График зависимости отношения суммы диагональных компонент	
	матрицы ковариации ГК к сумме диагональных компонент	
	матрицы ковариации физических параметров от количества	
	компонент (красные крестики). Зелеными кружками показан вклад	
	в относительную матрицу ковариации ГК отдельной компоненты.	
	Горизонтальная линия соответствует уровню отсечки 0.9	70

3.3	Проекции 8-мерной функции ошибки $(\chi^2)$ на плоскости различных пар	
	параметров, рассчитанные по данным вписывания модельных спектральных	
	карт в линиях HCN(1–0), HCO <sup>+</sup> (1–0), H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> (1–0) и H <sup>13</sup> CN(1–0) в	
	наблюдаемые карты в ядре L1287. Над каждым столбцом проекций приведены	
	графики зависимости функции ошибки от отдельного параметра. Красные	
	точки на диаграммах и красные вертикальные линии на верхних графиках	
	соответствуют глобальному минимуму функции ошибки, полученному из	
	метода kBC. Доверительные области для оптимальных значений параметров,	
	рассчитанные из сечения функции ошибки гиперплоскостью $\chi^2_\sigma,$ показаны	
	голубыми контурами и горизонтальными линиями на двумерных проекциях и	
	одномерных графиках, соответственно.	71
3.4	Результаты вписывания модельных спектров НСО <sup>+</sup> (1–0) и	
	HCN(1–0) (плавные кривые) в наблюдаемые (гистограммы) в	
	центральной части ядра L1287. По оси абсцисс отложены скорости	
	в диапазоне [-335] км/с	72
3.5	Результаты вписывания модельных спектров H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> (1–0) и	
	H <sup>13</sup> CN(1–0) (плавные кривые) в наблюдаемые (гистограммы) в	
	центральной части ядра L1287. По оси абсцисс отложены скорости	
	в диапазоне [-28.57] км/с	72
3.6	Модельные радиальные профили плотности и кинетической	
	температуры (левая панель), скорости сжатия и турбулентной	
	скорости (правая панель). Под цифрой 1 приведены профили,	
	полученные в настоящей работе, под цифрой 2 приведены профили,	
	использованные в работе [86]; радиус облака для этой модели	
	принят равным 1.4 пк, что соответствует расстоянию 0.93 кпк до	
	L1287. Под индексом 1А на правой панели показан профиль	
	скорости сжатия, полученный в модели с фиксированным	
	значением степенного индекса 0.5.	73
3.7	Наблюдаемые и модельные профили линий HCO <sup>+</sup> (1–0) и HCN(1–0)	
	в направлении позиции (60", 40") для моделей с различными	
	значениями степенного индекса радиального профиля скорости	
	сжатия.	73

4.1	Структура области S187 и его окружения. Излучение в континууме	
	на частоте 1420 МГц GMRT обозначено красным, которое отражает	
	распределение ионизированного газа. Яркие красные пятна	
	относятся к радиогалактикам (S187-1(a&b) и S187-2(a&b))	
	Излучение 12 мкм WSSA отмечено серым и представляет область	
	ФДО около ионизированной зоны. Белые контуры представляют	
	излучение SCUBA 850 мкм, которое связяно с холодной пылью в	
	молекулярном веществе. Мазеры паров воды [141] отмечены	
	треугольником, ОН – перевернутым треугольником [136]. Обьект	
	S187 Нα отмечен звездочкой	77
4.2	Изображение NVSS 012258+614815 (S187-1 a&b) в континууме	
	GMRT 1420 МГц. Диаграмма направленнгости показана в левом	
	нижнем углу. Шкала потока в логарифмических величинах	82
4.3	Спектр в линии Н I в направлении NVSS 012258+614815 (а и b).	
	Линия эмиссии взята из обзора CGPS в 1' радиусе около	
	радиогалактики. Профиль поглощения получен из данных GMRT.	
	Яркостная температура приведена в линейно-логарифмическом	
	масштабе: значения в 50 К в линейной шкале, выше – в	
	логарифмической	82
4.4	a) Различные особенности в направлении на комплекс S187. Фоновым	
	изображением отображено излучение Spitzer 5.8 мкм расположенное поверх	
	изображения WISE WSSA 12 мкм (в зелено-желтых цветах). Средняя	
	интенсивность в линии $C^{18}O$ ([-17.5,-12] км/с) показана в голубых заполненных	
	контурах. Черные контуры представляют излучение в линии 21 см в том же	
	диапазоне скоростей. Толщина контуров увеличивается к более ярким	
	областям. Диаграммы направленности (46, 8, 8 секунд дуги для $C^{18}O$ , H I и	
	1420 МГц континуума, соответственно) показаны в левом нижнем углу	
	изображения. Позиция S187 Hα отмечена звездочкой. Остальные маркеры	
	аналогичны Рис. 4.1. $b$ ) Увеличенное изображение S187 PDR2. Схема	
	изображения аналогична $a)$ , исключая диапазон скоростей [-13,-10] км/с для	
	линий. Светло-серые контуры представляют излучение в континууме на 1420	
	МН z по уровню в 7 К. Отметки склонения соответствуют углам в $+061^\circ 51'$ 24″	
	и +061°51′ 36″ . $c)$ Увеличенное изображение S187 PDR1. Схема изображения	
	аналогична $b),$ исключая диапазон скоростей [-17,-13] км/с для линий. Также,	
	вместо линии С <sup>18</sup> О нарисована линия HCO <sup>+</sup> (1–0) в желтых контурах	86

4.5	Профили линий C <sup>18</sup> O (1–0), $^{12}\mathrm{CO}(1–0),$ CS(2–1) и HCO+(1–0) в	
	направлении нескольких позиций. Интенсивность линии $^{12}{ m CO}(1-0)$	
	разделена на 7. Вертикальные линии соответствуют скорости пика	
	линии $C^{18}O$	89
4.6	Профили оптической толщины и спиновой температуры в	
	направлении на S187-1(a&b)	91
4.7	Карта оценки лучевая концентрация газа в направлении S187.	
	Белые контуры отражают излучение континуума на частоте 1420	
	МГц, что соответствует Н II зоне. Маркеры аналогично Рис. 4.4	93
4.8	Пространственное распределение фрагментов в линии Н I	
	идентифицированное с помощью CUPID Fellwalker. Эллипсами	
	отмечен размер фрагментов (стандартной девиации около	
	центроида). Карта на фоне отображает пиковую интенсивность в	
	линии Н I. Маркеры аналогично Рис. 4.4	95
4.9	Свойства фрагментов. Верхний левый: гистограмма распределения	
	масс фрагментов. Верхний правый: Гистограмма распределения	
	линейных размеров объекта. Левый нижний: гистограмма	
	распределения вириальных параметров объектов. Нижний правый:	
	Гистограмма объёмная плотности атомарного газа в фрагментах.	
	Основания ячеек гистограммы имеют логарифмический шаг,	
	исключая нижний левый рисунок	96
4.10	Соотношения между различными парами параметров фрагментов.	
	Верхний левый: линейного размера с доплеровской шириной.	
	Верхний правый: вириального параметра с линейным размером.	
	Левый нижний: Массы с линейным размером. Правый нижний:	
	объемной плотности с линейным размером. Линия регрессии	
	показана красным. Те же соотношения из «Physical Properties and	
	Galactic Distribution of Molecular Clouds Identified in the Galactic	
	Ring Survey» [160] и Larson [161] показаны штрих-пунктирной	
	линией	97
4.11	Расположение YSO около S187. Фоновое изображение отражает	
	усреднённое по скорости [-17.5,-12] км с $^{-1}$ излучение Н I . Голубые	
	контуры соответствуют излучению С <sup>18</sup> О усредненному по тому же	
	диапазону	98

4.12	Карта окрестностей области S187. Усреднённое излучение Н I (в	
	[-14 -17 км с <sup>-1</sup> ], CGPS) показано фоновым изображением.	
	Излучение ${}^{12}$ CO усреднено по диапазону [ $-5 - 17$ ] км с $^{-1}$ и показано	
	контурами. Прямоугольник обозначает область PV-среза (Рис. 4.13).	99
4.13	Диаграмма позиция-скорость атомарного и молекулярного газа	
	около области S187. Координаты среза показаны на Рис. 4.12.	
	Черные эллипсы отражают предполагаемое положение остатков	
	сверхновых	99
4.14	Диаграмма позиция-скорость атомарного и молекулярного газа в	
	оболочке. Нормированные профили радио и ИК излучения	
	приведены снизу. Эллипс изображает внутреннюю границу	
	радиально-расширяющийся оболочки. Направление среза	
	изображено на Рис. 4.18 красным квадратом	101
4.15	Соотношение между интенсивностями линий Н I и <sup>12</sup> СО. Цвет	
	соответствует различным каналам по скорости. Области с высокой	
	плотностью точек изображены контурами. Возможная	
	отрицательная корреляция на скорости в $[-15.1, -16.9]$ км с $^{-1}$	
	обозначена белой линией	102
4.16	Соотношение между потоком на 12 мкм WISE и лучевой	
	концентрацией Н I	102
4.17	Диаграммы позиция-скорость в направлении на различные области	
	оболочки (Рис. 4.17). а) Разрез через область S187 PDR1 (здесь и	
	далее положительные оффсеты в направлении S187B, звездному	
	скоплению, возбуждающему S187). b) Разрез в направлении, где не	
	наблюдается выделенной границы или стенки в молекулярном газе	
	и ИК данных. $c$ ) срез через S187 PDR2, $d$ ) срез через S187 SE	
	(S187-IRS). Нормированные графики интенсивности излучения в	
	континууме и интегрального излучения в линии <sup>13</sup> CO и C <sup>18</sup> O, а	
	также лучевой концентрации атомарного газа в направлении среза	
	нарисованы в нижней части каждой панели. (Нормировочные	
	коэффициенты: 8 мЯн, 7 ГЯн $cp^{-1}$ , 17 К км $c^{-1}$ , 2 К км $c^{-1}$ ,	
	6 К км с <sup>-1</sup> , $5 \times 10^{21}$ см <sup>-2</sup> для 1420 МГц континуум, 12 мкм WSSA	
	WISE, <sup>13</sup> CO, C <sup>18</sup> O, HCO <sup>+</sup> интегральной интенсивности, а также	
	лучевой концентрации H I, соответственно)	103

4.18 (Лево:) Направления срезов PV диаграмм (Рис. 4.17, белые квадраты, надписи соответствуют) и Рис. 4.14 (красный квадрат). Излучение 3.4 мкм WISE приведено на фоне. (Право:) Срез через е), Под-пузырь Н І. Шкалы и масштабы те же, что и на Рис. 4.17. . 107 4.19 Структура молекулярного газа в направлении на S187 SE. Интегральное излучение в линии C<sup>18</sup>O в голубых контурах, CS (2–1) - в пунктирных красных, сглаженное излучение континуума на 1420 МГц изображено белыми контурами (уровни: 1, 2 мЯн/луч) поверх изображения цвета [3.4]–[4.6]. Маркеры аналогичны Рис. 4.4. 108 4.20 Оболочка S187 в ИК континууме. Изображение WISE WSSA 12 мкм в красном. Лучевая концентрация атомарного газа изображена контурами. Соотношения потоков на 12, 22 и 160 мкм отмечены синим и зеленым цветом Маркеры аналогично Рис. 4.4 . . 109 5.1Трехцветное IRAC изображение Спицера области S255N и ее окружения. Композиция из изображений в диапазоне 8.0 µm (красный), 4.5 мкм (зеленый), и 3.6 мкм (голубой). S255N расположена в комплексе областей текущего и прошедшего Пространственный спектр в направлении источника S255IR NIRS3 5.2по данным SMA и 30м IRAM после относительной калибровки потока. Красные точки соответствуют 30м антенне, черные -Карта «красной» компоненты излучения линии CO(3-2). 5.3Контурами представлена интегральная интенсивность излучения в диапазоне, указанном на вставке. Изображение взято из «Dense Cores, Filaments, and Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation» [196] в той же линии и соответствует диапазону [20,90] км с<sup>-1</sup>, покрывает только часть карты. Маркерами отмечены координаты сгустков S255IR SMA1 (NIRS3) [57] и SMA2 [196]. Размеры синтезированных лучей телескопов приведены слева снизу. 124

5.4	Карта «синей» компоненты излучения в трех диапазонах линии	
	СО(3-2), аналогично Рис. 5.3, со смещением в отрицательные	
	значения. Изображение взято из «Dense Cores, Filaments, and	
	Outflows in the S255IR Region of High-mass Star Formation» [196] $_{\rm B}$	
	той же линии и соответствует диапазону $[-67, -16]$ км с <sup><math>-1</math></sup> , покрывает	
	только часть карты. Маркерами отмечены координаты сгустков	
	S255IR SMA1 (NIRS3) [57] и SMA2 [196]	25
5.5	Карта интегрального излучения в линии N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> (контуры в оттенках	
	зеленого). Красными и синими контурами отмечено интегральное	
	излучение в линии СО ([-36,-19] и [30,17] км с <sup><math>-1</math></sup> ). Фоном изображено	
	излучение в радиоконтинууме на частоте 1420 МГц. Размеры	
	синтезированных лучей телескопов приведены слева снизу 1	26
5.6	Аналогично Рис. 5.5, однако, контуры в оттенках зеленого	
	соответствуют излучению в линии молекулы CS	27
5.7	Аналогично Рис. 5.5, однако, контуры в оттенках зеленого	
	соответствуют излучению в линии молекулы SiO. Стрелочками	
	отмечена часть источников в радиоконтинууме и пик в излучении	
	ряда молекулярных линий	28
5.8	Карта первого момента линии СО(2—1)(фон). Контурами отмечены	
	изофоты пиковой интенсивности аммиака $(1,1)$ [4, 5.4, 6.8, 8, 9.5]К.	
	Звездочками отмечено положение сгустков по данным [186] 1	35
5.9	Зависимость второго момента (ширины) линии для СО (2—1) и	
	$N_2H^+$ (3-2) от первого (скорости)	36
5.10	Гистограмма распределения скоростей в разных линиях линиям:	
	цифрами и вертикальными пунктирными полосами обозначено	
	положение кинематических фрагментов ядра. Для построения	
	гистограммы скоростей СО использована карта 1-го момента, для	
	остальных - оценка скорости методом кNN. Звездочками отмечены	
	скорости сгустков по данным [186]	37

- 5.13 Карта доплеровской скорости по данным аппроксимации линии NH<sub>3</sub>(1,1) (в градациях цвета). Контурами изображена интегральная интенсивность в крыльях линии CO(2—1) [26.5,35.5] и [-18.5,-8] для непрерывных и штриховых контуров соответственно, ассоциируемые с биполярным истечением. В левой нижней части рисунка показан размер диаграммы направленности VLA (внешний эллипс) и SMA (внутренний). Звездочкой отмечено положение сгустка SMA1, знаками х и + — положение мазерных источников по данным [202](метанол, линия 1-го класса) и [24](H<sub>2</sub>O), соответственно.141

- 5.14 Пространственно-кинематическая структура сгустка SMA1 и его окрестностей. а) Карта пиковой интенсивности в линии С<sup>18</sup>О(2—1) (фон), в градациях желтого-фиолетового - карта скорости линии аммиака, черными контурами показана пиковая интенсивность в линии DCO<sup>+</sup>(4–3), [0.4,0.55,0.7,0.85,1] Ян/луч. Зелеными линиями - направление среза диаграммы позиция-скорость вдоль и поперек изменения скорости тора, b) и c) соответственно. Звездочками - положение сгустков. b,c) Диаграммы позиция-скорость вдоль и поперек тора. Фон -  $C^{18}O$ , черные сплошные контуры -  $DCO^+$ , оранжевый пунктир -  $NH_3(1,1)$ d) Карта пиковой интенсивности в линии С<sup>18</sup>О, красными сплошными линиями - красное крыло линии СО (бледное - [35,40], яркое - [16,26] км/с, штрихами -5.15 Диаграмма позиция - скорость CH<sub>3</sub>CN (12<sub>0</sub>-11<sub>0</sub>) вдоль направления SMA1 NE  $\longrightarrow$  SMA1 SW (контуры). На фоне представлена диаграмма в линии C<sup>18</sup>O (2—1). Контуры соответствуют уровням [ 0.07, 0.09, 0.12, 0.15, 0.2] Ян/луч. В левой нижней части рисунка показаны размер синтезированного луча диаграммы направленности SMA на частоте 220.74 ГГц и ширина
- переходов (1,1) и (2,2) аммиака. Градацией оранжевого изображена оценка величины температуры, фоном и контурами в градациях серого - пиковая интенсивность С<sup>18</sup>О, [0.2,0.4,0.6,0.8,1] Ян/луч, голубыми контурами - интегральная интенсивность ([-3:19]км/с) DCN. Линии контуров соответствуют [0.7,1.5,2.3,3]Ян/луч м/с. . . . 146

- 5.18 Срез спектрограммы вдоль пути, обозначенного на рис 5.11. Фон совмещенные данные IRAM+SMA в линии CO (2—1), красные контуры линия N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3—2), уровни [6,9,12,16,23,31,43,58] Ян/луч, синие разомкнутые контуры излучение в линии SO (6<sub>5</sub>—5<sub>4</sub>), [0.18,0.2,0.35,0.5,0.7,1] Ян/луч, заполненные контуры в градациях голубого-фиолетового изофоты линии C<sup>18</sup>O (2—1), [0.17,0.23,0.3,0.38,0.49] Ян/луч. Вертикальными штрих-пунктирными линиями и цифрами обозначены положения кинематических компонент, идентифицированных по Рис. 5.11.
- 5.19 а) Карта излучения в 7 мм радиоконтинуума VLA (49 ГГц) в контурах поверх линии H<sub>2</sub> (континуум вычтен). Синтезированый луч VLA на 7 мм отмечен эллипсом в левом нижнем углу. Направление магнитного поля (В) [взято из 240] (голубая стрелка). b) Композитная двухцветная карта (VLA 13 мм (красное) и Spitzer 5.8 мкм (голубой)). Изображение перекрыто контурами изофот радиоконтинуума VLA 13 мм (23 ГГц) в голубых и желтых линиях. (1.27 мЯн/луч и (3.38, 5.06, 6.75, 8.44, 10.97) × 14.35 мЯн/луч, соответственно). c) Kapta GPS 6 см в контурах поверх изображения SOFIA/FORCAST на 25.2 мкм. d) Карта SOFIA/FORCAST на 37.1 мкм. Большой круг отображает из 5.20 а) Изображение радиоконтинуума на 1.35 мм по архивным данным ALMA. Снтезированый луч равен  $1.'' 2 \times 1.'' 1$ , п.у = 80deg.2 (изображен в левом нижнем углу). Большой круг изображает область построения Рис. 5.20, (b). b) На рисунке изображена область, показанная окружностью на (а) в радиоконтинууме на длине волны 865 мкм по данным ALMA. Размер Д.Н. равен 0." 29  $\times 0.''$  23, П.У. = 83deg.2 (изображена в левом нижнем углу). Координаты мазерного излучения на 6.7 ГГц (ММЕ) отмечены

5.21 а) Карта распределения интегральной интенсивности излучения в линии молекулы  $H^{13}CO^+$  (ALMA, [60, 70] км c<sup>-1</sup>). Размер ДН равен 0." 31 × 0." 25, при П.У. = 83deg.2 (левый нижний угол). b) H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> карта первого момента. с) Контуры, соответствующие изофтотам интегрального излучения SiO и H<sub>2</sub> поверх карты первого момента H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>. Излучение SiO зарегистрированное SMA показано желтыми контурами, Н<sub>2</sub> - пурпурными (полная карта на Рис. 5.19(a)). Линии уровня ALMA SiO(8–7) (белым) соответствуют изофотам 24.16, 27.61, 30.20, 38.83, 43.14, 47.45, 86.28, 129.42, 172.56, 258.84, 345.12, 517.67, 690.23, 819.65 мЯн/луч км с<sup>-1</sup> (1 $\sigma \sim 4.2$ мЯн/луч км с<sup>-1</sup>). d) Карта второго момента Н<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> На (a) и (b), белый контур представляет уровень интегрального излучения 5.22 а) На панели показан спектр в линиях  $CH_3CN(12_K-11_K)$  K = 0-7(радиус усреднения  $\sim 1''$  около MME) из ALMA band-6. Наблюдаемый спектр ALMA CH<sub>3</sub>CN нарисован черной линией, модельный - красной. b) Вращательная диаграмма по CH<sub>3</sub>CN в направлении ММЕ. Прямой линией обозначена линия тренда, вписанная в оценки интенсивности линий переходов CH<sub>3</sub>CN 

- 5.23 (a) Композитное двухцветное изображение (красный: Spitzer 4.5 мкм, Зеленый: Spitzer 3.6 мкм) области S305. Континуум GMRT на частоте 1.28 ГГц отмечен синими контурами(0.4, 0.46, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.98) × 22 мЯн/луч при 1 $\sigma \sim 0.74$  мЯн/луч. Координаты[243] МЗО отмечены квадратиками. (b) Карта лучевой концентрации газа по данным Herschel перекрытая контурами NVSS 1.4 ГГц по уровням (0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.98) × 144 мЯн/луч. (с) Изофоты излучения FUGIN 12CO(1-0)  $([39, 49] \text{ км c}^{-1})$  на карте лучевой концентрации по данным обсерватории Herschel. Линии контуров соответствуют изофотам (0.2, 0.22, 0.25, 0.28, 0.3, 0.32, 0.35, 0.38, 0.4, 0.42, 0.45, 0.5, 0.53, 0.6) $\times$  112.56 К км с<sup>-1</sup>. Координаты сгустков по излучению на 850мкм отмечены. (d) Карта кинетической температуры, рассчитанная на основе данных с обсерватории Herschel. На каждой панели координаты ранее известных звезд класса О отмечены звездой (и подписаны на (a)). Чертой отмечен характерный размер в 4 пк (на 5.24 Поканальная карта в линии С II поверх изображения на 12 мкм WISE. Линии контуров соответствуют изофотам 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, и 35 К. Кругами представлена компактная и протяженная компонента оболочки. На каждой панели положение массивных

A.1	Поканальная карта области S187 и ее окружения. Излучение в $^{12}{ m CO}$	
	(1-0) изображено черными контурами. Комбинированные данные	
	GMRT+CGPS в линии Н I изображены на фоне, цветом. Размер ДН	
	показан в левом-нижнем углу первого рисунка. Диапазон скоростей	
	каналов отмечен справа и сверху. Последний рисунок представляет	
	интегральное излучение <sup>12</sup> CO (1–0). Координаты фрагментов	
	идентифицированных с помошью алгоритма Fellwalker(См. ч. 4.3.1)	
	обозначены белыми крестиками	220
A.2	Поканальная карта области S187 и ее окружения. Излучение в ${ m C}^{18}{ m O}$	
	(1-0) изображено черными контурами. Комбинированные данные	
	GMRT+CGPS в линии Н I изображены на фоне, цветом. Размер ДН	
	показан в левом-нижнем углу первого рисунка. Диапазон скоростей	
	каналов отмечен справа и сверху. Предпоследний рисунок	
	представляет интегральное излучение С <sup>18</sup> О (1–0). Последний -	
	интергральное излучение Н I	221
A.3	То же, что и для Рис. А.1, но для $^{13}$ CO (1–0)	222
A.4	Угловая диаграмма с нанесенными векторами главных компонент,	
	рассчитанная по данным анализа объекта G268 в линиях $\mathrm{HCO}^+,$	
	H <sup>13</sup> CO <sup>+</sup> и HCN. Линиями отмечен вклад каждой из 7-ми главых	
	компонент в каждый из параметров или в пару параметров	223
A.5	Поканальная карта источника S255IR в линии CO (3-2). Каналы	
	неэведистантны. Приведена карта интегральной интенсивности	224
A.6	Поканальная карта источника S255IR в линии CS (7-6). Приведена	
	карта интегральной интенсивности, а также первого и второго	
	момента линии	225
A.7	Поканальная карта источника S255IR в линии $N_2H^+(3-2)$ .	
	Приведена карта интегральной интенсивности, а также первого и	
	второго момента линии	226
A.8	Срез спектрограммы вдоль сгустков SMA3-1-2. Фоном изображена	
------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	
	интенсивность линии СО (2—1), заполненными контурами в	
	градациях синего-фиолетового излучение в линии C <sup>18</sup> O(2—1) с	
	уровнями [0.2,0.3,0.4,0.6,0.8] Ян/луч, синим пунктиром - в SO	
	(65—54), [0.1,0.14,0.18,0.2,0.28,0.35,0.44,0.55] Ян/луч, красными	
	контурами - DCO <sup>+</sup> (4—3), [0.37,0.41,0.45,0.49,0.53,0.57,0.62,0.68]	
	Ян/луч. Желтыми звездочками отмечены положение сгустков из	
	работы [186]	
A.9	Спектры линий N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> (3—2) (IRAM+SMA), DCO <sup>+</sup> (4—3) и CO(2–1).	
	в направлении пика излучения DCO <sup>+</sup> (-7",34") относительно	
	фазового центра	
A.10	Спектры линий метанола переходов (сверху вниз) 8 <sub>-1</sub> -7 <sub>0</sub> , 9 <sub>-1</sub> -8 <sub>0</sub> ,	
	смещенные на 8 Ян/луч, в направлении на точку с координатами	
	$06^{h}12^{m}53.69^{s}$ +18°00′25.0′ (J2000) (мазерное пятно, тонкая линия) и	
	$06^{h}12^{m}54.2^{s}$ +18°00′14.9′ (J2000) (биполярное истечение, толстая	
	линия)	
A.11	Диаграмма позиция-скорость вдоль биполярного истечения,	
	обозначенного голубой линией на Рис. <u>5.14</u> (а). Фоном изображены	
	комбинированные данные в линии СО (2—1), красными контурами	
	- интерферометрические в той же линии, прерывистыми синими -	
	комбинированные данные в линии SiO (5—4), заполненными	
	контурами в градациях синего-фиолетового - С <sup>18</sup> О. Желтыми	
	заполненными кругами - положение метанольных мазеро [3; 202],	
	заполненным желтым квадратом - водяной мазер, приведенный в [24] 230	

## Список таблиц

1	Наблюдаемые линии на телескопе OSO
2	Список источников, наблюдавшихся на телескопе OSO 41
3	Параметры зарегистрированных линий дейтерированных молекул.
	В скобках приведены среднеквадратичные погрешности для
	последних знаков
4	Параметры линий H <sup>13</sup> CN, HCO <sup>+</sup> и HC <sup>18</sup> O <sup>+</sup>
5	Полученные значения физических параметров
6	Координаты источников в континууме и их параметры оценённые с
	помощью вписывания двумерной гауссианы в САЅА
7	Параметры ИК источников и источников в молекулярных линиях
	оценённые с помощью вписывания двумерных гауссиан в CASA.
	Интегральное излучение в линиии $C^{18}O$ отмечено как $\int C^{18}O$ 84
8	Параметры восстановленных кубов данных
9	Список анализируемых линий. Символом * отмечены данные,
	полученные в протяженной и компактной конфигурации.
	SMA+IRAM и SMA*+IRAM – комбинированные данные 132
10	Параметры кинематических фрагментов ядра. Т,К указан диапазон
	кинетических температур во фрагментах, полученный из переходов
	(1,1) и (2,2) аммиака
11	Список зарегистрированных в диапазоне 216-290 ГГц линий
	метанола, использованных для получения оценок физических условий143
12	Координаты максимумов излучения в линии метанола
13	Физические параметры газа по данным аппроксимации. В скобках
	приведены диапазоны параметров на уровне 1 <i>б</i> . В положении (4)
	диапазон по плотности 3-9 - это диапазон сетки параметров в базе,
	то есть никаких ограничений модель не дает. ff - фактор
	заполнения диаграммы направленности В колонке "!"приведено
	количество линий с ненулевыми значениями интенсивностей в
	даннах положениях
14	Список спектральных линий. SMA <sup>c</sup> отмечена компактная
	конфигурация, $SMA^{c+e}$ - расширенная и компактная

## Приложение А. Аппендикс

## А.1 Дополнительные рисунки



Рисунок А.1 — Поканальная карта области S187 и ее окружения. Излучение в <sup>12</sup>CO (1-0) изображено черными контурами. Комбинированные данные GMRT+CGPS в линии Н I изображены на фоне, цветом. Размер ДН показан в левом-нижнем углу первого рисунка. Диапазон скоростей каналов отмечен справа и сверху. Последний рисунок представляет интегральное излучение <sup>12</sup>CO (1-0). Координаты фрагментов идентифицированных с помошью алгоритма Fellwalker(См. ч. 4.3.1) обозначены белыми крестиками.

справа и сверху. Предпоследний рисунок представляет интегральное излучение Ψ ние в С<sup>18</sup>О GMRT+CGPS Рисунок левом-нижнем углу первого A.2 (1-0)С<sup>18</sup>О (1–0). Последний - интергральное излучение Н I. Ψ линии Н1 изображены на фоне, цветом. изображено черными контурами. Поканальная рисунка. карта области Диапазон S187 скоростей каналов Комбинированные И ee окружения. Размер ДН отмечен показан Излучеданные











линии.

ведена карта интегральной интенсивности, Рисунок А.6 Поканальная карта источника S255IR в линии CS а также первого и второго момента (7-6). При-



линии.

ведена карта интегральной интенсивности, Рисунок А.7 Поканальная карта источника S255IR в лини<br/>и $\rm N_2H^+(3\mathchar`embed{2}).$  Приа также первого и второго момента





Рисунок А.8 — Срез спектрограммы вдоль сгустков SMA3-1-2. Фоном изображена интенсивность линии CO (2—1), заполненными контурами в градациях синего-фиолетового излучение в линии C<sup>18</sup>O(2—1) с уровнями [0.2,0.3,0.4,0.6,0.8] Ян/луч, синим пунктиром - в SO (6<sub>5</sub>—5<sub>4</sub>), [0.1,0.14,0.18,0.2,0.28,0.35,0.44,0.55] Ян/луч, красными контурами - DCO<sup>+</sup> (4—3), [0.37,0.41,0.45,0.49,0.53,0.57,0.62,0.68] Ян/луч. Желтыми звездочками отмечены положение сгустков из работы [186].



Рисунок А.9 — Спектры линий N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(3—2) (IRAM+SMA), DCO<sup>+</sup>(4—3) и CO(2–1). в направлении пика излучения DCO<sup>+</sup> (-7",34") относительно фазового центра.



Рисунок А.10 — Спектры линий метанола переходов (сверху вниз)  $8_{-1}$ -7<sub>0</sub>,  $9_{-1}$ -8<sub>0</sub>, смещенные на 8 Ян/луч, в направлении на точку с координатами  $06^{h}12^{m}53.69^{s}$  +18°00′25.0′ (J2000) (мазерное пятно, тонкая линия) и  $06^{h}12^{m}54.2^{s}$  +18°00′14.9′ (J2000) (биполярное истечение, толстая линия)



Рисунок А.11 — Диаграмма позиция-скорость вдоль биполярного истечения, обозначенного голубой линией на Рис. 5.14(а). Фоном изображены комбинированные данные в линии CO (2—1), красными контурами - интерферометрические в той же линии, прерывистыми синими - комбинированные данные в линии SiO (5—4), заполненными контурами в градациях синего-фиолетового - C<sup>18</sup>O. Желтыми заполненными кругами - положение метанольных мазеро [3; 202], заполненным желтым квадратом - водяной мазер, приведенный в [24]