

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Рябухина Ольга Леонидовна

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВОЛОКОН В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 1.3.1 —
«Физика космоса, астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук
Кирсанова Мария Сергеевна

Москва — 2023

Оглавление

	Стр.
Введение	4
 Глава 1. Наблюдения радиолиний молекул в волокнах WB 673	
и G351.78-0.54. Методы исследования	17
1.1 Исследуемые объекты	17
1.1.1 Волокно WB 673	17
1.1.2 Волокно G351.78-0.54	19
1.2 Наблюдения	22
1.2.1 Карты линий излучения молекул в волокне WB 673	22
1.2.2 Наблюдение радиолиний аммиака в направлении волокна WB 673	24
1.2.3 Наблюдения волокна G351.78-0.54	25
1.2.4 Архивные данные об излучении пыли	26
1.3 Методы исследования в диссертационной работе	27
1.3.1 Лучевая концентрация молекул	27
1.3.2 Анализ линий излучения аммиака	29
1.3.3 Вращательные диаграммы CH_3CCN	32
1.3.4 Анализ данных Bolocam	33
 Глава 2. Структура и физические условия в молекулярных	
сгустках	36
2.1 Карты излучения молекул в молекулярном волокне WB 673	36
2.1.1 Линии излучения молекул в центральном сгустке WB 673	40
2.2 Анализ излучения в линиях аммиака в волокне WB 673	45
2.2.1 Параметры излучения в линиях аммиака	45
2.2.2 Физические условия газа	49
2.2.3 Аномалии сверхтонкой структуры линий аммиака	51
2.3 Физические условия в волокне G351.78-0.54	52
2.3.1 Лучевая концентрация	52
2.3.2 Гравитационные свойства волокна G351.78-0.54	53

2.3.3	Плотные сгустки газа	55
2.3.4	Кинематика газа в волокне	57
2.3.5	Температура газа по линиям молекул CH_3CSH	59
Глава 3. Астрохимическое моделирование плотных сгустков		
	волокна WB 673	63
3.1	Моделирование химической эволюции плотных сгустков волокна WB 673	63
3.1.1	Описание модели	63
3.1.2	Результаты моделирования	65
3.1.3	Обсуждение результатов моделирования	69
	Заключение	73
	Список литературы	77
	Список рисунков	91
	Список таблиц	94

Введение

Межзвездная среда и гигантские молекулярные облака

Межзвездное пространство галактик состоит из нескольких компонентов: газ, пыль, магнитное поле, космические лучи и электромагнитное излучение. Из вещества межзвездной среды в галактиках образуются звезды. В процессе эволюции звезд благодаря термоядерным реакциям формируются элементы тяжелее водорода и гелия, которые впоследствии выбрасываются в межзвездную среду. Таким образом во Вселенной происходит гигантский круговорот вещества, в процессе которого межзвездная среда обогащается тяжелыми элементами [1].

Несмотря на постоянное пополнение межзвездной среды (МЗС) тяжелыми элементами, наиболее обильной составляющей является водород (90% по числу атомов [2]). Остальные элементы входят в МЗС в малом количестве, однако эти небольшие примеси существенны для теплового баланса межзвездного газа и пыли. Кроме того, знания о физических условиях в МЗС в значительной мере обязаны наблюдениям линий излучения и поглощения тяжелых элементов. Физические условия, описывающие межзвездный газ, варьируются в очень широких пределах; например, кинетическая температура меняется от ~ 5 К в плотных молекулярных облаках до $\sim 10^6$ К в галактическом корональном газе, а плотность от $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{12}$ частиц в см^3 [1]. Однако в большинстве случаев среду можно считать находящейся в динамическом равновесии. Наиболее низкая температура соответствует среде с наиболее высокой плотностью, так что давления в разных областях по порядку величины равны. Наиболее плотные и холодные части межзвездной среды называют молекулярными облаками, поскольку газ в них находится в молекулярном состоянии. В межзвездной среде постоянно происходят процессы, выводящие среду из состояния равновесия: столкновения облаков, прохождение облаков через спиральные волны плотности, ионизация среды во время вспышек сверхновых звезд.

В Галактике молекулярный газ сосредоточен в основном в спиральных ветвях. Основная масса газа собрана в обширные газово-пылевые комплексы,

называемые гигантскими молекулярными облаками. Это холодные (10 — 20 K) и плотные облака, состоящие, в основном, из молекулярного водорода. Масса гигантских молекулярных облаков может превышать $10^5 M_{\odot}$, а размеры достигают 40 пк [3]. Низкая температура поддерживается благодаря процессам охлаждения через излучение пыли в инфракрасном (ИК) диапазоне, а также излучения в линиях молекул, например, CO и OH. Вследствие этих процессов в широком диапазоне плотностей температура молекулярных облаков остается в пределах 5 — 50 K [4].

Волокна и звездообразование

Исследования последних лет показали, что плотные молекулярные облака состоят из волокон. В целом волокнообразная форма облаков известна давно, например, еще в 1979 году был составлен каталог из 23-х волокон, которые наблюдались в поглощении на оптических снимках [5]. Однако количество известных волокон было небольшим [4; 6]. Наблюдения областей звездообразования на телескопе им. Гершеля в далеком ИК диапазоне показали, что близлежащие молекулярные облака имеют форму волокон [7].

В работе [8] были систематизированы наблюдения волокон и на основе этого авторы сформулировали определение: «волокно» - это любая удлиненная структура межзвездной среды с соотношением сторон больше, чем $\sim 5:1$, которая значительно плотнее своего окружения. В среднем более 15% общей массы газа в облаках и более 80% массы плотного газа (с лучевой концентрацией водорода $N(\text{H}_2) > 7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$) находится в форме волокон [8]. Волокнистая структура выделяется и в облаках, где нет признаков активного звездообразования, что указывает на ее появление до начала процесса образования звезд [9]. Распространенность волокон предполагает, что они могут сохраняться в течение значительной части типичного времени жизни облака. Образование волокон может быть необходимой стадией эволюции молекулярных облаков на пути к образованию звезд, и именно образование волокон обуславливает вид начальной функции масс звезд [10]. Теоретические расчеты (напр., [11]), показывают, что формирование молекулярных волокон возможно после множественных сжа-

тий газа ударными волнами, источником которых являются расширяющиеся области ионизованного водорода H II, остатки сверхновых звезд и оболочки, выдутые звездным ветром. Другие модели показывают, что волокна формируются в результате аккумуляции вещества вдоль силовых линий магнитного поля [12]. Согласно [13], формирование волокон происходит вследствие фрагментации межзвездных «листов» - протяженных областей межзвездного газа.

Кроме того, ударные волны так же могут влиять на темп звездообразования. Согласно [14], формирование более чем 30% массивных звезд в Галактике может быть спровоцировано ударными волнами. По данным АРЕХ, 48% холодных молекулярных сгустков лежат на поверхности ударных волн [15]. Согласно динамическим моделям эволюции межзвездных молекулярных облаков, внешнее воздействие увеличивает темп аккреции вещества и уменьшает время холодной фазы сжатия плотного молекулярного сгустка, в котором еще не сформировались звезды [16—18].

Согласно наблюдательным данным обсерватории им. Гершеля, ближайшие к нам волокна имеют характерную ширину 0.1 пк. Однако последующие наблюдения на телескопе АРЕХ показали, что наблюдается значительный разброс ширины вплоть до 3 пк со средним значением 0.5 пк [19]. Последний обзор охватывает структуры на масштабах Галактики, в то время как телескоп им. Гершеля дал информацию только о ближайших облаках. Исследования с использованием интерферометра ALMA предоставляют информацию о самых минимальных масштабах, и в работе [20] показано волокно шириной 0.035 пк, расположенное в облаке Ориона.

Гравитационная устойчивость волокон определяется отношением величины массы на единицу длины, называемой «линейная масса» [19]. Если линейная масса превышает критическое значение, которое зависит от скорости звука в среде c_s и гравитационной постоянной G [7]:

$$M_{\text{line,cr}} = \frac{2c_s^2}{G}, \quad (1)$$

волокно становится неустойчивым и начинает сжиматься вдоль своей радиальной оси, то есть возникают движения газа вдоль волокна, что приводит к формированию плотных ($n \sim 10^4 - 10^6 \text{ см}^{-3}$) сгустков. При повышении плотности до таких значений охлаждение облаков через излучение становится существен-

ным, поскольку столкновения молекул и пылинок происходит чаще. В наиболее холодных и плотных сгустках возможно образование звезд [21]. Гравитационная неустойчивость возникает когда сила тяжести сгустка превышает силы газового давления, препятствующие сжатию. Предел устойчивости сгустка описывается массой Джинса (вириальной массой):

$$M_j \sim \rho \left(\frac{kT}{G\rho m} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

где T - температура газа, k - постоянная Больцмана, ρ - плотность газа, m - молекулярная масса. Гравитационно нестабильные сгустки с массой выше критической массы Джинса начинают сжиматься в шкале времени свободного падения, при этом температура в центре сгустка падает, потенциальная энергия высвечивается в ИК-диапазоне, что приводит к понижению критической массы - сгусток разбивается на фрагменты, каждый из которых сжимается отдельно [22]. Этот процесс приводит к образованию звезд и звездных скоплений.

Химические реакции в молекулярных облаках

Плотные молекулярные облака характеризуются низкими температурами вплоть до 5 — 10 К, столь низкие значения главным образом обусловлены ИК-излучением пыли. Плотность в таких облаках достигает значений $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$. Края молекулярных облаков подвержены облучению мощным УФ-излучением от ближайших ярких звезд, также молекулярные облака пронизаны космическими лучами. Водород в этих облаках находится в виде молекул H_2 . В холодных условиях молекулярных облаков водород не имеет вращательных переходов, так как молекула симметрична, поэтому он ненаблюдаем. Вторая по распространенности молекула в плотных облаках — это CO, углерод в основном входит в ее состав. Количество остальных молекул составляет малую долю от H_2 и CO, однако разнообразие их внушительно, на данный момент в межзвездной среде зарегистрировано более 200 молекул, согласно базе данных CDMS [23], и открытие новых происходит ежегодно. В условиях молекулярных обла-

ков реализуются различные химические реакции, происходящие в газовой фазе или на поверхности пылинок [24].

В межзвездной среде протекают следующие типы газофазных реакций:

1. Нейтраль-нейтральные реакции с химически активными радикалами;
2. Ион-молекулярные реакции (перераспределение или перезарядка);
3. Диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов (разрыв связей);
4. Реакции радиативной ассоциации (радиативный захват);
5. Ионизация и диссоциация космическими лучами и рентгеновским излучением;
6. Фотодиссоциация и фотоионизация УФ-излучением;
7. Фотопроцессы, индуцированные космическими лучами.

Нейтраль-нейтральные реакции в холодных межзвездных облаках маловероятны, так как молекула после образования в такой реакции обладает избыточной энергией и сразу распадется, для стабилизации она должна быстро (< 1 с.) столкнуться с третьей частицей, которая унесла бы избыточную энергию. Среднее время столкновения между частицами в газе плотностью $\sim 10^4$ см $^{-3}$ порядка млн секунд, поэтому нейтраль-нейтральные реакции не являются основным типом реакций. Ион-молекулярные реакции не обладают энергетическим барьером и эффективны даже при низких температурах. Но для протекания этих реакций нужен ионизирующий фактор, такой как УФ- или рентгеновское излучение или космические лучи. Реакции радиативной ассоциации происходят следующим образом: при сближении двух атомов они на короткое время пролета образуют молекулу в состоянии с положительной энергией. Если вероятность спонтанного перехода для такой молекулы в состояние с отрицательной энергией достаточно велика, то образуется молекула.

В центральных частях плотных молекулярных сгустков, куда не проникает УФ-излучение, цепочка реакций начинается с ионизации молекул водорода и атомов гелия космическими лучами [25]. Примерно с равными вероятностями образуются ионы H^+ , H_2^+ и He^+ . Ион H_2^+ вступает в реакцию с H_2 и образует ион H_3^+ , который способен вступить в реакции даже с такими инертными молекулами, как CO. Ионы H^+ и He^+ вступают в обменные реакции с другими простыми молекулами, которые в результате распадаются на ионы углерода, азота и кислорода. После этого становится возможной вся последовательность ионно-молекулярных реакций. Ион-молекулярные и другие газофазные реак-

ции в холодных молекулярных облаках позволяют образовывать главным образом двух-, трех- и четырехатомные молекулы [26].

Кроме того, в межзвездной среде существенны химические реакции на поверхности пылинок. Пылинка в этом случае выступает в качестве катализатора. Изначально в плотной среде происходит абсорбция молекул из газовой фазы на поверхность пылинок. Таким образом на пылинках образуется мантия — слой «загрязненного льда», состоящий из воды, аммиака, метана и других соединений с различными примесями. Равновесная температура пылинок определяется балансом между поглощением оптического и УФ-излучения и собственным ИК-излучением. Как правило, в плотных молекулярных облаках температура пылинок близка к 10 — 20 К. При этих характерных температурах атомы и молекулы на их поверхности достаточно быстро преодолевают потенциальные барьеры и мигрируют по поверхности. Вследствие этой миграции образуются молекулы. Таким образом, пылинка является химическим реактором в межзвездной среде. Если при образовании молекулы выделяется энергия, способная оторвать ее от пылинки, молекула переходит в газовую фазу. Таким образом формируется, например, наиболее распространенная молекула межзвездной среды H_2 [27; 28]. Так же на поверхности пылинок формируются сложные органические молекулы: H_2CO , CH_3OH и другие [29].

Химический состав молекулярных сгустков меняется с эволюцией облака. В холодных плотных сгустках молекулы постепенно вымерзают на пылинки, и в центральной части формируются области, обедненные молекулами. Наиболее обильная после H_2 молекула CO разрушает азотосодержащие молекулы NH_3 и N_2H^+ . Однако при уплотнении молекулярного облака температура в нем понижается, и CO вымораживается на пылинки. Вследствие этого обилие NH_3 и N_2H^+ повышается. Таким образом, молекулы условно делятся на индикаторы «ранней» (CO , CS) и «поздней» (NH_3 , N_2H^+) химии. Однако с формированием звезд ситуация меняется, так как происходит нагрев облака, ледяные мантии пылинок нагреваются и испаряются, молекулы возвращаются обратно в газовую среду. Поскольку на пылинках происходили химические реакции, химический состав облака также меняется. Таким образом, наблюдатели видят такие объекты уже не как обедненные молекулами области, а как горячие ядра с богатым химическим составом, окруженные плотным холодным газом. Таким образом, исследуя химический состав облака, можно определить его эво-

люционную стадию, разделить разные этапы формирования звезд и оценить их продолжительность. Многие молекулы межзвездной среды имеют вращательные переходы, излучающие в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне, наблюдение которых доступно с Земли. Исследование этих линий позволяет с высокой точностью изучить состав облака.

Для построения химической модели нужно знать начальный химический состав облака и реакции в нем. Современные модели включают в себя сотни и тысячи химических реакций, например, модель Presta включает в себя 582 компонента и 4524 газофазных реакции [30], модель MONACO - 662 компонента и 5693 химических реакций [31], модель Nautilus - 717 компонент и более чем 11500 реакций [32]. На скорость химических реакций влияют физические условия, такие как температура газа и пыли, плотность газа, интенсивность поля излучения (G_0), оптическая экстинкция (A_V) и скорость ионизации космическими лучами (ζ).

Цели и задачи диссертационной работы

Исследование молекулярных волокон необходимо для понимания условий формирования и эволюции звезд, а также химических и физических свойств межзвездной среды:

1. Молекулярные волокна — места образования новых звездных систем. Изучение волокон позволяет понимать процесс образования звезд и планет.
2. Межзвездный газ содержит большое количество различных молекул, в том числе органических. Изучение молекулярных волокон позволяет открывать новые молекулы и понимать астрохимические пути их образования в межзвездной среде.
3. Волокна образуются в результате взаимодействия нескольких факторов: гравитационное сжатие, турбулентность, магнитное поле, давление излучения. Изучение волокон необходимо для понимания процессов, управляющих эволюцией межзвездной среды и приводящих к образованию волокон.

На сегодняшний день были проведены обширные исследования молекулярных волокон по всей галактике [33; 34]. Получены статистические распределения основных физических параметров волокон. Тем не менее для лучшего понимания их физических свойств и процессов звездообразования необходимы детальные исследования отдельных объектов. В этом отношении особое внимание привлекают инфракрасные темные облака (IRDC). По крайней мере, некоторые из них могут представлять места рождения массивных звезд [35; 36]. Процесс формирования звезд большой массы до сих пор во многих отношениях не изучен и требует дополнительных исследований [37; 38]. Ударные волны в межзвездной среде ускоряют процесс звездообразования и создают условия для образования массивных звезд [15]. Одной из возможностей для оценки стадий процесса звездообразования в молекулярных облаках является использование обилий различных молекул и т.н. метод «химических часов». Этот метод требует определения обилий (содержаний относительно водорода) молекул-трассеров «ранней», например, CS, и «поздней», например, N_2H^+ , химии в сгустках, поскольку отношение этих двух молекул очень чувствительно к температуре и плотности [39].

Цель диссертации — изучить области образования массивных звезд в молекулярных волокнах. Для исследования были выбраны молекулярные волокна WB 673 и G351.78-0.54.

Задачи диссертационной работы:

1. Провести наблюдения молекулярного волокна WB 673 в линиях излучения молекул.
2. Определить физические параметры и химический состав волокна WB 673 по данным наблюдений.
3. Оценить возраст волокна WB 673 методом «химических часов».
4. Определить плотность и температуру газа волокна G351.78-0.54.
5. Выделить плотные сгустки в волокне G351.78-0.54.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. По результатам наблюдений получены карты излучения в линиях N_2H^+ (1–0), HNC (1–0), HCN (1–0), HNC (1–0) и NH_3 (1,1) в четырех плотных сгустках межзвездного волокна WB 673. Построены карты лучевых концентраций и относительных обилий молекул CS, CO, N_2H^+ ,

HNC, HCN, NH₃. Показано, что обилия молекул в центральных частях сгустков систематически ниже чем на периферии на 20–40%.

2. Определены физические условия, а именно: плотность и температура газа в плотных сгустках волокна WB 673 по линиям аммиака. Плотность водорода и температура достигают $\approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ и 30 К, соответственно. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линии излучения аммиака. Аномалии указывают на процесс сжатия центрального сгустка WB 673 и на мелкомасштабную структуру сгустка S233-IR, которая описывается наличием малых плотных компонентов, неразрешимых диаграммой направленности телескопа, окруженных менее плотным газом.
3. Оценены физические параметры волокна G351.78-0.54 по данным излучения молекул CO и его изотопологов, N₂H⁺ и CH₃CSH. Показано, что масса и линейная масса волокна близки к критическим вириальным значениям и происходит фрагментация волокна. Выделены шесть плотных сгустков волокна G351.78-0.54, получены их массы и вириальные массы. Показано, что все сгустки, кроме одного, являются гравитационно неустойчивыми. Высокая дисперсия скоростей в плотных частях сгустков связана с вращением или сжатием сгустков. Определена вращательная температура CH₃CSH в направлении первого и второго сгустков, температура составляет 120 ± 2 и 26 ± 5 К соответственно.
4. Определен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673. Впервые возраст волокна определен одновременно по обилиям четырех молекул. Показано, что возраст всех четырех сгустков составляет $t = (1 - 3) \cdot 10^5$ лет. Полученное значение возраста согласуется с парадигмой быстрого звездообразования в гравитационно-турбулентной модели межзвездной среды.

Научная новизна:

1. Впервые проведены наблюдения линий аммиака в волокне WB 673, получены карты линий излучения NH₃ (1,1) и (2,2).
2. Впервые построены карты лучевых концентраций и обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, NH₃ в направлении плотных сгустков волокна WB 673.

3. Впервые определены температура газа и объемная плотность водорода в направлении плотных сгустков волокна WB 673.
4. Впервые определена температура газа по линиям молекулы CH_3CSH волокне G351.78-0.54.
5. Впервые получен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673.

Научная и практическая значимость. Результаты диссертации представляют интерес для специалистов в области изучения межзвездной среды и процессов звездообразования. Оценка возраста молекулярных сгустков волокна WB 673 позволяет расширить парадигму знаний о звездообразовании.

Степень достоверности обусловлена обсуждением результатов диссертации на научных конференциях и семинарах, а так же публикацией их в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях:

- 48-я студенческая научная конференция «Физика космоса», 2019, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад «Исследование волокнообразного темного облака WB 673»;
- Конференция «Современная звездная астрономия — 2019», САО, Россия, устный доклад «Исследование структуры и физических параметров близкого межзвёздного волокна G351.78-0.54»;
- Конференция «Современная звездная астрономия — 2019», САО, Россия, устный доклад «Астрохимическое исследование межзвездного волокна WB 673»;
- 49-я студенческая научная конференция «Физика космоса», 2020, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад «Температура газа в молекулярном волокне WB 673»;
- «Звездообразование и планетообразование», 10 – 11 ноября 2020, ИС А РАН, Россия, устный доклад «Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака»;
- «Астрономия и исследование космического пространства», 1-5 февраля 2021, УрФУ, Екатеринбург, Россия, устный доклад «Исследование волокна WB 673 в радиолиниях аммиака»;

- «Всероссийская астрономическая конференция — 2021», 23-28 августа 2021, МГУ, Москва, Россия, устный доклад «Исследование волокнообразного инфракрасного темного облака G351.78-0.54»;
- «Всероссийская астрономическая конференция — 2021», 23-28 августа 2021, МГУ, Москва, Россия, устный доклад «Астрохимическое исследование плотных сгустков волокна WB 673»

Личный вклад. Автор проводил наблюдения на обсерватории в Эффельсберге (Германия), и обрабатывал все полученные данные. Автор определял физические параметры волокна WB 673 (температуру и плотность газа), лучевую концентрацию молекул. Кроме того, автор проводил химическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673 и сравнивал результаты с наблюдательными данными. Автором были определены физические параметры волокна G351.78-0.54 и выделены плотные фрагменты. Автор принимал активное участие в обсуждении результатов. Автором диссертации был написан основной текст всех совместных работ по теме диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 — в тезисах докладов.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Обзор линий излучения молекул в межзвездном волокне WB 673 // Астрономический журнал. — 2020. — Т. 64, № 5. — С. 394-405.
2. Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I. A multi-line study of the filamentary infrared dark cloud G351.78-0.54. // MNRAS. — 2021. — Vol. 505. — Issue 1. — P. 726-737.
3. Ryabukhina O. L., Kirsanova M. S., Henkel C. and Wiebe D. S. Star formation timescale in the molecular filament WB 673 // MNRAS. — 2022. — Vol. 517. — Issue 4. — P. 4669-4678.

Другие публикации автора по теме диссертации

1. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Обзор спектральных линий молекул в центральном ядре волокна WB 673 // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 11–15.

2. Рябухина О. Л., Зинченко И. И., Павлюченков Я. Н. Исследование структуры и кинематики межзвездного волокна G351.78-0.54 // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2019г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2019. — С. 4–10.
3. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокнообразного темного облака WB 673 // Физика Космоса: труды 48-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 28 - 01 февр. 2019г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2019. — Т. 1. — С. 194–195.
4. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С., Виенен М., Хенкель К. Аммиак в плотных сгустках волокна WB 673 // Сборник научных трудов ИНАСАН (Москва 2020г.). — Москва: Изд-во Янус-К. — 2020. — С. 207–209.
5. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Температура газа в молекулярном волокне WB 673 // Физика Космоса: труды 49-ой студенческой научной конференции (Екатеринбург, 27 - 31 янв. 2020г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2020 г. — Т. 1. — С. 200–201.
6. Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокна WB 673 в радиолниях аммиака // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой (Екатеринбург, 1 - 5 февр. 2021г.). — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. — 2021 г. — Т. 1. — С. 174–177.
7. Ryabukhina O.L., Kirsanova M.S., Wiebe D.S. Astrochemical study of a dense molecular clump of WB673 filament // Astronomy at the epoch of multimessenger studies. Proceedings of the VAK-2021 conference (Moscow, Aug 23–28, 2021). — Moscow — 2021 г. — Т. 1. — С. 180–182.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, трех Глав и Заключения. Полный объём диссертации составляет 95 страниц с 22 рисунками и 13 таблицами. Список литературы содержит 128 наименований.

Глава 1 посвящена описанию проведенных наблюдений на телескопах обсерваторий в Онсала (Швеция), Эффельсберг (Германия) и АРЕХ (Чили). Был получен массив наблюдательных данных, включающий в себя линии излучения молекул миллиметрового и сантиметрового диапазона. Выбраны методы дальнейших исследований.

В Главе 2 описаны полученные физические параметры и химическая структура плотных сгустков волокон WB 673 и G351.78-0.54. Получены карты лучевой концентрации молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, NH_3 и H_2 , а так же обилия молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, NH_3 относительно водорода; карты объемной плотности водорода и температуры газа волокна WB 673. Получены лучевые концентрации CO и N_2H^+ , выделены плотные сгустки и оценена их масса и вириальная масса, проведена оценка гравитационной устойчивости и кинематических свойств волокна G351.78-0.54.

В Главе 3 приводятся результаты химического моделирования плотных сгустков волокна. Для сгустков было проведено моделирование по радиальному профилю, результаты модели сравнивались с лучевой концентрацией молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN и NH_3 .

Глава 1. Наблюдения радиолиний молекул в волокнах WB 673 и G351.78-0.54. Методы исследования

1.1 Исследуемые объекты

1.1.1 Волокно WB 673

В диссертации исследовано волокно WB 673, расположенное в гигантском молекулярном облаке G174+2.5. Расстояние до облака составляет $1.56^{+0.09}_{-0.08}$ кпк по параллаксам мазерных пятен H_2O [40]. В работе [41] на основе данных об излучении в молекулярных линиях ^{13}CO были определены размеры, лучевые концентрации и массы плотных сгустков в G174+2.5. Вириальные параметры всех сгустков указывают на гравитационную неустойчивость. В работе [41] было показано, что сгустки группируются: 1) вблизи области Н II Sh2-235, 2) вдоль линии «юго-восток» - «северо-запад», частично примыкая к границе S231. В работе [42] было показано, что вторая группа плотных сгустков (G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668) образует молекулярное волокно, поскольку между сгустками есть плотный газ. Волокно содержит четыре плотных молекулярных сгустка WB 668, WB 673 [43], S233-IR [44; 45] и G173.57+2.43 [46] и названо по самому массивному из них WB 673. Волокно с западной стороны граничит с разреженной протяженной оболочкой, видимой в ИК-диапазоне. Полная картина расположения объектов в облаке показана на Рис. 1.1.

В направлении волокна обнаружены звездные скопления S233-IR [45; 47] и G173.57+2.43 [44; 46]. В работах [48; 49] показано, что молодые звездные скопления могут быть продуктом сценария «сбора и коллапса» («collect-and-collapse»), в котором образование звезд нового поколения вызвано расширением области Н II, которая сформирована массивной звездой предыдущего поколения. В направлении сгустка S233-IR находится IRAS 05358+3543 — протозвездный объект, детально исследованный за последние несколько лет [44; 47; 50; 51]. Он характеризуется квадрупольной системой истечений, где биполярная часть имеет длину ~ 1 пк. В миллиметровом континууме найдено 3 источника вблизи центра

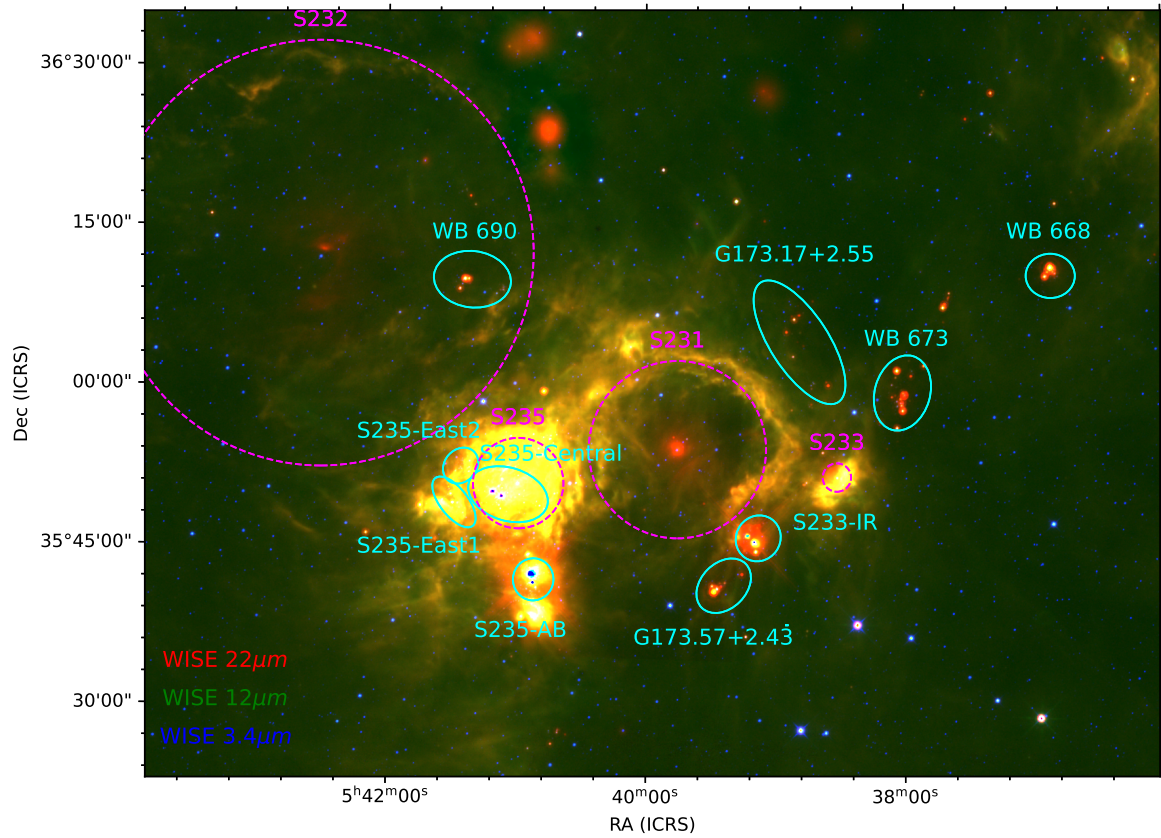


Рисунок 1.1 — Изображение гигантского молекулярного облака G174+2.5, составленное по ИК-данным WISE $22\ \mu\text{m}$ (красный), $12\ \mu\text{m}$ (зеленый) и $3.4\ \mu\text{m}$ (синий). Бирюзовые эллипсы - газовые сгустки, выделенные в работе [41] в линиях CO, фиолетовые окружности — области H II. Сгустки G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 образуют молекулярное волокно [42].

квадрупольного истечения, каждый с массой $75 - 100 M_{\odot}$ [50]. Общая светимость области и начальная функция масс указывает на раннюю стадию процесса образования массивных звезд [52]. Согласно работе [53], IRAS 05358+3543 ассоциирован с молодым скоплением возрастом ≤ 2 млн лет. Спектральный класс самого массивного объекта скопления, вероятно, находится между B2 и B1 ($10 M_{\odot} \leq M \leq 13 M_{\odot}$). Рядом расположено молодое скопление возрастом около 3 млн лет [53]. G173.57+2.34 находится к югу от S233-IR. В нем также есть истечения [54].

Во всех исследуемых сгустках наблюдаются точечные ИК-источники IRAS и MSX, а так же мазерные источники. Их список приведен в Таб. 1. Мазеры H_2O наблюдаются на частоте 22 ГГц, CH_3OH I-го класса – на 36–95 ГГц, CH_3OH II-го класса на 6.6 ГГц, OH – 1665, 1667 ГГц. Мазеры воды и CH_3OH I-го класса накачиваются столкновениями и указывают на истечения; мазеры CH_3OH II-го класса наблюдаются в областях образования массивных звезд. Таким образом, все исследуемые области показывают признаки активного звездообразования, в том числе образования массивных звезд.

1.1.2 Волокно G351.78-0.54

Также в работе было исследовано волокно G351.78–0.54. На Рис. 1.2 волокно показано в линиях ИК-диапазона $500 \mu m$ (Herschel) и $8 \mu m$ (Spitzer). В литературе для этого объекта используется несколько обозначений: G351.77-0.54 [65], G351.77–0.51 [66], G351.776-0.527 [67]. В средней части этого облака расположен яркий ИК-источник IRAS 17233–3606 ($\alpha(J2000) = 17^h 26^m 42^s.8$, $\delta(J2000) = -36^\circ 09' 17''$). Этот источник был исследован в работах [65; 68–73]. Расстояние до волокна G351.78–0.54 оценивается в диапазоне $0.7 - 1$ кпк [66; 74]. В данной работе принято расстояние 1 кпк. В работе [67] показано, что длина волокна составляет 4.6 пк, ширина 0.2 пк, масса превышает $1300 M_{\odot}$. В работе [66] были выделены двенадцать сгустков с помощью метода CLUMPFIND на основе излучения в континууме 870 мкм и в линиях изотопологов молекулы CO. Авторы делают вывод, что звездообразование происходит непрерывно на разных этапах эволюции. Широкие профили молекулярных линий в центре

Таблица 1 — IRAS-источники в направлении плотных сгустков волокна WB 673.

Сгусток	IRAS	MSX [55]	Мазеры и истечения
G173.57+2.34	05361+3539	G173.5826+02.4452	H ₂ O [56—59] CH ₃ OH I [41] CH ₃ OH II [60]
S233-IR	05358+3543	G173.4902+02.4577 G173.4956+02.4218 G173.4839+02.4317 G173.4815+02.4459	H ₂ O [61] OH [62] CH ₃ OH I [41] CH ₃ OH [63]
WB 668	05335+3609	G172.8742+02.2687	H ₂ O [56; 58; 59] CH ₃ OH I [41] CH ₃ OH II [60]
WB 673	05345+3556 05346+3559 05347+3556	G173.1862+02.3438 G173.1371+2.3855	H ₂ O [56; 58] CH ₃ OH I [41] CH ₃ OH II [64]

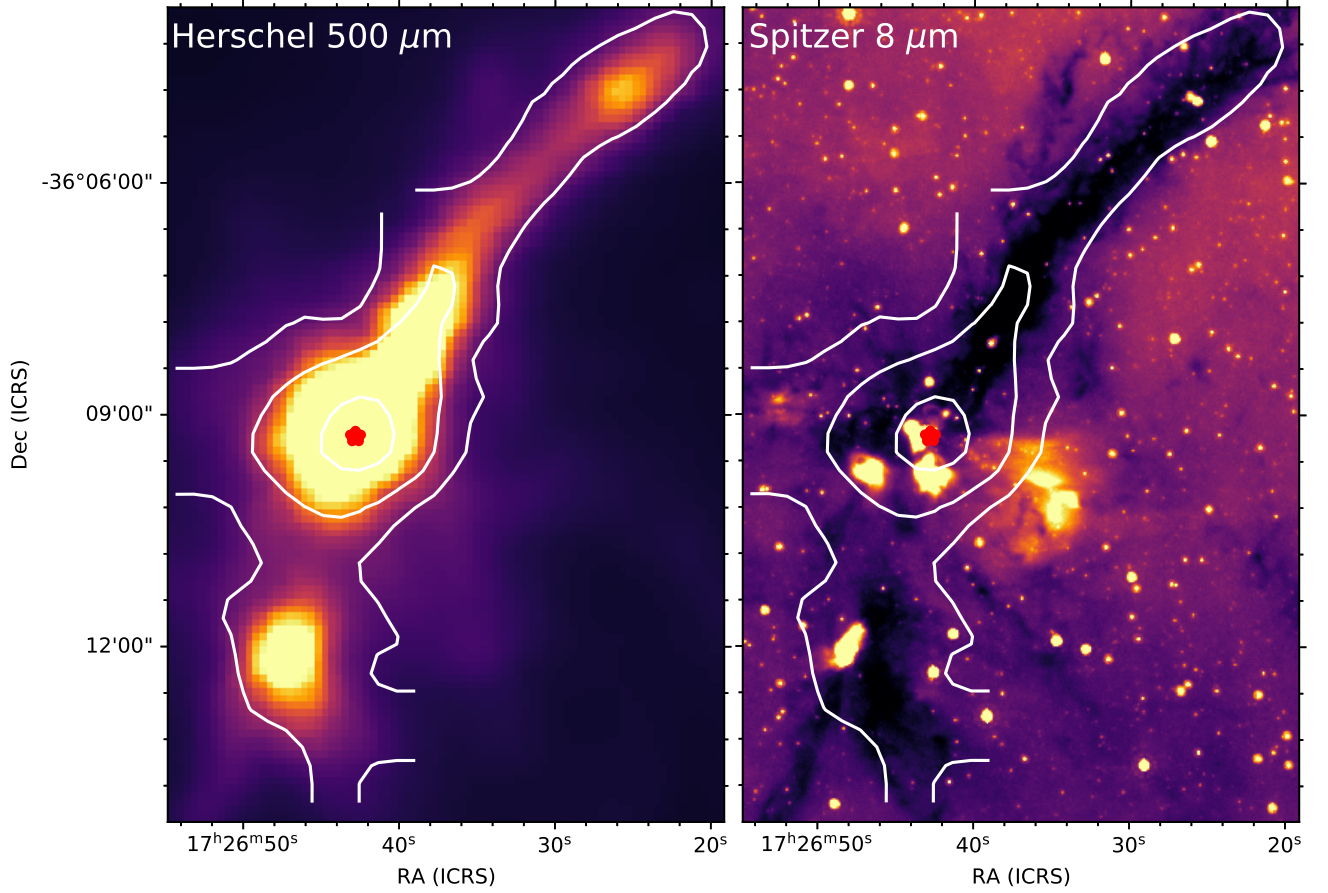


Рисунок 1.2 — Карта волокна G351.78–0.54 в ИК-диапазоне $\lambda = 500 \mu\text{m}$ (Herschel) и $8 \mu\text{m}$ (Spitzer). Белые контуры показывают интегральную интенсивность C^{18}O (2–1) по данным телескопа АРЕХ, представленным в диссертации. Уровни контуров – 5, 10, 30 К км/с. Позиция ИК-источника IRAS 17233–3606 отмечена красной звездочкой.

волокна могут быть следствием ударного сжатия за счет расширяющихся областей ионизированного водорода H II. Однако определить источник возбуждения не удалось [66].

Волокно содержит источники, находящиеся на разных стадиях эволюции. Центральный источник IRAS 17233–3606 считается наиболее развитым и, вероятно, представляет собой область массивного звездообразования [75]. Вдоль волокна распределены три протозвездных объекта: AGAL351.774-00.537, 351.784-00.514, 351.804-00.449. В южной части волокна находится область ионизированного водорода AGAL351.744-00.577 [76].

1.2 Наблюдения

1.2.1 Карты линий излучения молекул в волокне WB 673

В декабре 2016 и в феврале 2017 г. был проведен обзор линий излучения молекул в волокне WB 673 на 20-м телескопе обсерватории Онсала (Швеция). Для наблюдений использовался приемник на длине волны 3 мм (85–116 ГГц) [77], принимающий излучение в двух ортогональных поляризациях. Наблюдения велись одновременно в двух полосах приема, шириной по 2.5 ГГц каждая, середины спектральных интервалов которых разнесены на 12 ГГц. Шумовая температура системы находилась в интервале 160 – 340 К для наблюдений в высокочастотной полосе (USB) и 80 – 250 К в низкочастотной (LSB). Проверка точности наведения телескопа и фокусировки проводилась по мазерным линиям SiO (2–1) в источниках R Cas, U Ori, χ Cyg и TX Cam после восхода и заката. Точность фокусировки была в пределах 0.3–0.8 мм, точность наведения – в пределах 3'' по азимуту и высоте. Наблюдения проводились в режиме частотной модуляции с разницей частот 5 МГц. Наблюдения охватили всю площадь волокна в картинной плоскости WB 673 размером 10' $\times$ 50'. Обнаружены линии CO (1–0), N₂H⁺ (1–0), CS (2–1), HCN (1–0), HNC (1–0) и другие, показанные в Таб. 2. Значения частоты и энергии верхнего уровня E_u молекул взяты из базы данных CDMS [23]. Температура приводилась из шкалы антенной температуры T_A в шкалу температуры главного луча T_{mb} с помощью коэффициента эффективности главного лепестка η_{mb} :

$$T_{mb} = \frac{T_A}{\eta_{mb}} \quad (1.1)$$

Угловое разрешение полученных карт лежит в пределах 17-24''.

Таблица 2 — Список линий, обнаруженных на телескопе Онсала в 2016-2017 г. в направлении волокна WB 673.

Линия	Переход	Частота	E_u
-	-	МГц	К
HCN	1 - 0	88631.8	4.3
HCO ⁺	1 - 0	89188.5	4.3
HNC	1 - 0	90663.6	4.4
N ₂ H ⁺	1 - 0	93173.8	4.5
C ³⁴ S	2 - 1	96412.9	6.9
CH ₃ OH	2 - 1	96741.4	7.0
³⁴ SO	3.2 - 2.1	97715.4	9.1
CS	2 - 1	97980.9	7.1
H ₂ CS	3 - 2	104617.1	23.2
SO	3.2 - 2.1	109252.2	21.1
C ¹⁸ O	1 - 0	109782.2	5.3
¹³ CO	1 - 0	110201.4	5.3

1.2.2 Наблюдение радиолиний аммиака в направлении волокна WB 673

В 2019 году были проведены наблюдения инверсионных переходов аммиака NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) на 100-м телескопе в Эффельсберге (Германия) в направлении волокна WB 673. Частоты линий и соответствующие энергии верхнего уровня показаны в Таб. 3. Суммарное время наблюдений (ON+OFF) составило 60 часов. Наблюдения проводились в режиме непрерывного картирования с использованием вторично-фокусного приемника диаметром 1,3 см с полосой пропускания 500 МГц, обеспечивающей спектральное разрешение 0.2 км/с. Наблюдалась та же самая площадь волокна, что и в разделе 1.2.1. Полученные карты имеют угловое разрешение $\approx 42''$. Наблюдения проводились в режиме переключения положения с положением OFF при $\alpha(\text{J2000}) = 05^{\text{h}}37^{\text{m}}00^{\text{s}}$, $\delta(\text{J2000}) = +35^{\circ}30'00''$. Проверка точности наведения и фокусировка производились примерно каждый час. Температура системы T_{sys} лежала в диапазоне 100–120 К по шкале T_{A} . Однако в плохих погодных условиях она возрастала до 200 К. Калибровка проводилась с использованием сканирования радиоконтинуума в направлении на планетарную туманность NGC 7027 [78] сотрудниками обсерватории в Эффельсберг.

Таблица 3 — Частоты переходов, наблюдавшихся на телескопе в Эффельсберге в 2019 г. в направлении волокна WB 673.

Линия	Переход	Частота	E_{u}
-	-	МГц	К
NH_3	(1,1)	23694.5	23.4
	(2,2)	23722.6	64.9
	(3,3)	23870.1	124.5

1.2.3 Наблюдения волокна G351.78-0.54

Наблюдения проводились на радиотелескопе APEX [79] в 2010–2017 гг. в диапазонах длин волн 1.3 мм и 0.8 мм (проекты O-085.F-9323, O-086.F-9316, O-097.F-9303, O-098.F-9306) с использованием приемников SHeFI [80; 81]. Данные преобразуются в шкалу температуры главного луча с использованием эффективности (η_{mb}), представленной на веб-сайте APEX. В работе были приняты $\eta_{mb} = 0.75$ на 1.3 мм и $\eta_{mb} = 0.7$ на 0.8 мм, полученные по наблюдениям Юпитера, поскольку размер наблюдаемых компактных структур сравним с Юпитером.

Список наблюдаемых линий, проанализированных в работе, представлен в Таб. 4. Он включает CO (2–1), ^{13}CO (2–1), C^{18}O (2–1), ^{13}CO (3–2), C^{18}O (3–2), N_2H^+ (3–2), CH_3CCN ($13_K - 12_K$). Параметры линий взяты из базы данных CDMS [23]. Спектральное разрешение (ширина канала) составляло 244 кГц в диапазонах ^{13}CO (2–1), C^{18}O (2–1), N_2H^+ (3–2). В наблюдениях CO (2–1), ^{13}CO (3–2), C^{18}O (3–2) и CH_3CCN она составляла 76 кГц. Соответствующее разрешение по скорости составляет 0.1 км/с в CO (2–1) и CH_3CCN , 0.33 км/с в ^{13}CO (2–1) и C^{18}O (2–1), 0.07 км/с в ^{13}CO (3–2) и C^{18}O (3–2), 0.26 км/с в N_2H^+ (3–2).

Медианное значение среднеквадратичного шума при этом разрешении по шкале T_{mb} составляет 0.13 К в спектрах CO (2–1), ~ 0.1 К в спектрах ^{13}CO (2–1) и C^{18}O (2–1), ~ 0.6 К в спектрах ^{13}CO (3–2) и C^{18}O (3–2), ~ 0.1 К в спектрах N_2H^+ (3–2), 0.02–0.11 К в CH_3CCN .

Наблюдения проводились в режиме переключения положения. Референтные позиции были разными для разных наблюдений. В некоторых случаях в референтной позиции, по-видимому, присутствовало значительное излучение, что приводило к провалам в измеренных спектрах. В частности, это относится к наблюдениям ^{13}CO (2–1) и C^{18}O (2–1). По крайней мере часть этих данных содержит провал в линии на -3.6 км/с. Его ширина ~ 0.6 км/с в C^{18}O (2–1) и ~ 1 км/с в ^{13}CO (2–1). Интегральная интенсивность этого провала в усредненных спектрах составляет ~ 0.3 К км/с в C^{18}O (2–1) и ~ 2 К км/с в ^{13}CO (2–1). Для C^{18}O (2–1) провал составляет около 4% интегральной интенсивности среднего спектра и поэтому оказывает незначительное влияние на оценки лучевой концентрации C^{18}O . Однако эту особенность следует учитывать при

анализе профилей линий. В спектрах CO (2–1) имеется провал на скорости около -7 км/с амплитудой около 2.5 K, а также несколько провалов на -20 км/с. Все эти особенности далеки от системной скорости исследуемого объекта.

Таблица 4 — Список линий, наблюдавшихся на телескопе APEX для волокна G351.78-0.54.

Молекула	Переход	Частота (МГц)	E_u (K)
CO	2–1	230538.0	16.6
^{13}CO	2–1	220398.7	15.9
	3–2	330587.9	31.7
C^{18}O	2–1	219560.3	15.8
	3–2	329330.6	31.6
N_2H^+	3–2	279511.7	26.8
CH_3CCH	13 ₀ –12 ₀	222166.9	74.6
	13 ₁ –12 ₁	222162.7	81.9
	13 ₂ –12 ₂	222150.0	103.5
	13 ₃ –12 ₃	222128.8	139.7
	13 ₄ –12 ₄	222099.2	190.2
	13 ₅ –12 ₅	222061.0	255.2
	13 ₆ –12 ₆	222014.5	334.6

1.2.4 Архивные данные об излучении пыли

Поскольку пыль и газ в межзвездных молекулярных облаках равномерно перемешаны, анализ излучения пыли позволяет оценить лучевую концентрацию водорода. Были взяты из обзора галактической плоскости *Bolocam* данные об излучении пыли в непрерывном спектре на длине волны $\lambda = 1.1$ мм [82;

83]. Этот обзор охватывает практически всю галактическую плоскость с эффективным пространственным разрешением $\approx 33''$. Как показал анализ этих данных в работе [83], источники Волосат представляют собой относительно плотные ($\sim 10^{3.5} \text{ см}^{-3}$) структуры в молекулярных облаках с угловыми размерами $0.5'-2'$, поэтому они подходят для анализа плотности в молекулярных сгустках. Была использована версия 2.1 этого обзора.

1.3 Методы исследования в диссертационной работе

В диссертации для определения физических условий газа и обилий различных молекул молекул было использовано предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР), которое выполняется в плотных молекулярных облаках. В этом приближении предполагается, что на каждом маленьком объеме газа происходят быстрые процессы установления равновесия между всеми составляющими частями газа. Таким образом, характеристики газа, такие как температура и концентрации различных молекул, могут быть описаны с помощью уравнений состояния в локальном равновесии. Формулы, приведенные далее, соответствуют решению уравнений переноса и уравнений баланса населенности в предположении ЛТР.

1.3.1 Лучевая концентрация молекул

Обнаруженные линии молекул HCN, HNC, NH₃ и N₂H⁺ обладают сверхтонким расщеплением. Для них был использован стандартный пакет CLASS [84] для одновременного приближения сверхтонких компонент в спектрах этих линий в предположении, что ширины всех компонент одинаковы, и соотношение между интенсивностью компонент зависит только от оптической толщины τ . Для линий со сверхтонким расщеплением пакет CLASS так же позволяет определить температуру возбуждения линии T_{ex} .

Для линий молекул без сверхтонкого расщепления необходимо было определить оптическую толщину и температуру возбуждения из анализа интенсивностей изотопологов. Оптические толщины линий CS (2–1), SO (3–2) и ^{13}CO (1–0) были найдены из отношения интенсивностей линий с основными изотопами серы ^{32}S и кислорода ^{18}O и их менее обильными изотопологами, для которых линии предполагались оптически тонкими. Анализ был проведен для пар молекул CS и C^{34}S , SO и ^{34}SO , C^{18}O и ^{13}CO . Для каждой пары были определены интегральные интенсивности в одинаковом диапазоне скоростей для основного изотопомера W_m и для менее обильного W_{nm} . Таким образом, с использованием отношения обилий изотопов α :

$$\frac{W_m}{W_{nm}} = \frac{1 - \exp -\tau}{1 - \exp -\tau/\alpha}. \quad (1.2)$$

Уравнение решается методом итераций. Для волокна WB 673 использованы отношения обилий изотопов $\alpha = ^{32}\text{S}/^{34}\text{S} = 23$ [85], $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 80$ [86], $^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 557 \pm 30$. Так же отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 80$ [86] было использовано для получения карт $N(\text{CO})$ из $N(^{13}\text{CO})$.

Была получена температура возбуждения:

$$T_{\text{ex}} = \frac{T_{\text{mb}}}{1 - \exp(-\tau)} + T_{\text{bg}}, \quad (1.3)$$

где T_{mb} - интенсивность излучения линии, $T_{\text{bg}} = 2.73 \text{ K}$ - температура микроволнового фона.

Для определения лучевой концентрации в оптически тонком случае используется выражение [87]:

$$N^{\text{thin}} = \left(\frac{3h}{8\pi^3 S \mu^2} \right) \left(\frac{Q_{\text{rot}}}{g_J g_K g_I} \right) \frac{\exp\left(\frac{E_U}{kT_{\text{ex}}}\right)}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1} \frac{1}{J_\nu(T_{\text{ex}}) - J_\nu(T_{\text{bg}})} \int \frac{T_{\text{mb}} dv}{f}, \quad (1.4)$$

$$J_\nu(T) = \frac{h\nu/k}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) - 1}, \quad (1.5)$$

где $J_\nu(T)$ - эквивалентная температура Рэля-Джинса, h - постоянная Планка, $S = J_u/2J_u + 1$ - относительная сила линии, μ - дипольный матричный момент, Q_{rot} - статистическая сумма, $g_J = 2J + 1$ - статистический вес, g_K

- К-вырожденность, g_I - вырожденность ядерного спина, f - коэффициент заполнения диаграммы направленности телескопа. В работе было использовано значение $f = 1$, поскольку размеры источников больше чем диаграмма направленности. Для линейных молекул $g_K = g_I = 1$, $Q_{\text{rot}} = \frac{kT}{hB} + \frac{1}{3}$. Дипольные матричные моменты и вращательные постоянные для молекул взяты из базы данных CDMS [23] и приведены в Таб. 5.

Для волокна G351.78-0.54 лучевая концентрация C^{18}O соотносится с концентрацией H_2 через постоянное соотношение $2.0 \cdot 10^{-7}$ [88]. Была получена карта лучевой концентрации H_2 с использованием этого соотношения.

Таблица 5 — Константы для вычисления лучевой концентрации.

Молекула	В	μ	E_u
	МГц	Дб	К
^{13}CO (1–0)	55101.01	0.11	5.29
CS (2–1)	24495.56	1.96	7.05
N_2H^+ (1–0)	46586.88	3.37	4.47
HCN (1–0)	44315.97	2.98	4.25
HNC (1–0)	45331.98	3.05	4.35
C^{18}O (2–1)	54891.42	0.11	15.81
N_2H^+ (3–2)	46586.88	3.37	26.83

Для оптически толстых линий учет τ происходит следующим образом [87]:

$$N = N^{\text{thin}} \frac{\tau}{1 - \exp(-\tau)}. \quad (1.6)$$

1.3.2 Анализ линий излучения аммиака

Нижние метастабильные энергетические состояния аммиака возбуждаются только столкновениями, поэтому они широко используются для измерения температуры холодного газа в межзвездной среде. Для холодного плотного мо-

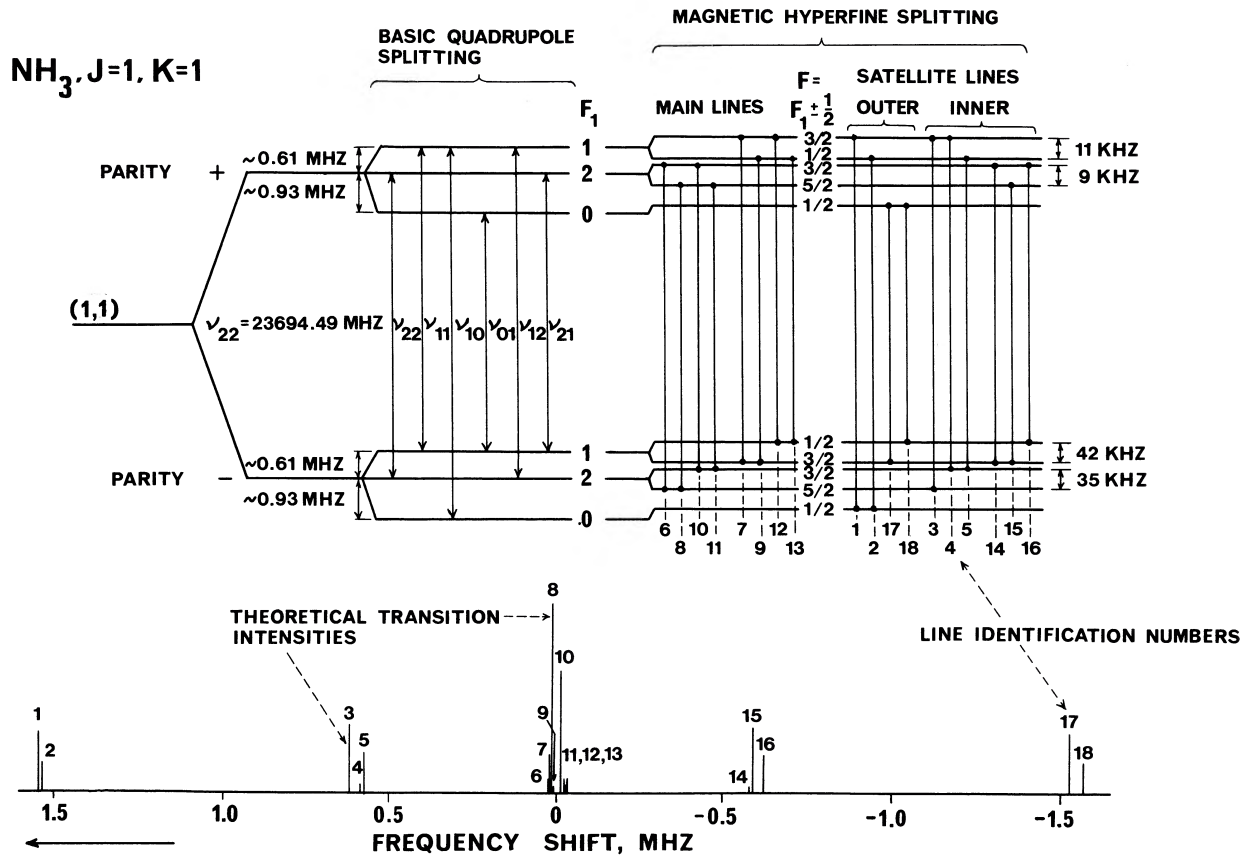


Рисунок 1.3 — Схема, показывающая квадрупольное и магнитное сверхтонкое расщепление спектра NH_3 $(1,1)$ (взято из работы [89]).

лекулярного газа возбуждение линий аммиака хорошо описывается ЛТР. Линия перехода $(1,1)$ молекулы NH_3 вследствие взаимодействия квадрупольного момента с электрическим полем электронов расщепляется на 18 сверхтонких компонент (см. Рис. 1.3), однако в областях образования массивных звезд они сливаются и образуют 5 групп.

Для оценки оптической толщины линии $(J,K) = (1,1)$ и температуры возбуждения T_{ex} был использован пакет CLASS. Этот метод предполагает гауссову форму линии в оптиически тонком случае и одинаковые температуры возбуждения для всех сверхтонких компонент. Для перехода $(1,1)$ оптическая толщина главной (центральной из пяти) группы сверхтонкой компоненты $\tau_{(1,1)m}$ связана с полной оптической толщиной всего мультиплета как $\tau_{(1,1)m} = \tau_{(1,1)}/2$ [90].

Используя формулу Больцмана для населенностей уровней $(1,1)$ и $(2,2)$ мы можем найти вращательную температуру, которая является показателем

относительной заселенности этих двух уровней [91]:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 \ln \left(\frac{-0.282}{\tau_{(1,1)\text{m}}} \ln \left(1 - \frac{T_{\text{mb}(2,2)}}{T_{\text{mb}(1,1)}} (1 - \exp(-\tau_{(1,1)\text{m}})) \right) \right)^{-1} (\text{K}), \quad (1.7)$$

где $T_{\text{mb}(1,1)}$ и $T_{\text{mb}(2,2)}$ – интенсивности главных компонент линий (1,1) и (2,2) соответственно. В тех пикселях, где интенсивность линии слишком слабая ($T_{\text{mb}(2,2)} < 3\sigma$), было использовано значение $T_{\text{rot}} = 10 \text{ K}$.

В тех направлениях, где $\tau_{(1,1)\text{m}} \ll 1$, либо сателлитные компоненты не видны, линия (1,1) принималась оптически тонкой. В этом случае T_{rot} и $N_{1,1}$ определяются в оптически тонком приближении:

$$T_{\text{rot}} = -41.5 / \ln \left(0.2 \frac{\int T_{\text{mb}(2,2)} dv}{\int T_{\text{mb}(1,1)} dv} \right) (\text{K}), \quad (1.8)$$

где $\int T_{\text{mb}(2,2)} dv$ и $\int T_{\text{mb}(1,1)} dv$ – интегральная интенсивность линий (2,2) и (1,1) соответственно. Значение лучевой концентрации аммиака, излучающего в линии (1,1) определяется согласно [90]:

$$N_{1,1} = 6.6 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \tau_{(1,1)\text{m}} dv_{(1,1)} (\text{cm}^{-2}), \quad (1.9)$$

где $\nu_{(1,1)}$ – частота перехода NH_3 (1,1) в ГГц, а $dv_{(1,1)}$ ширина линии в км/с. В оптически тонком приближении:

$$N_{1,1} = 3.3 \times 10^{14} \frac{T_{\text{rot}}}{\nu_{(1,1)}} \frac{\int T_{\text{mb}(1,1)} dv}{J(T_{\text{rot}}) - J(T_{\text{bg}})} (\text{cm}^{-2}). \quad (1.10)$$

Полная лучевая концентрация определяется по четырем самым низким метастабильным энергетическим уровням:

$$N_{\text{NH}_3} = N_{1,1} \left(\frac{\exp(21.3/T_{\text{rot}})}{3} + 1 + \frac{5 \exp(-41.5/T_{\text{rot}})}{3} + \frac{14 \exp(-99.4/T_{\text{rot}})}{3} \right) (\text{cm}^{-2}). \quad (1.11)$$

С помощью T_{rot} можно получить температуру газа [92; 93]:

$$T_{\text{kin}} = \frac{T_{\text{rot}}}{1 - \frac{T_{\text{rot}}}{41.5} \ln(1 + 1.1 \exp(\frac{-16}{T_{\text{rot}}}))} (\text{K}), \quad (1.12)$$

где 41.5 К – энергетическая щель между уровнями (1,1) и (2,2).

Используя полученные температуры T_{ex} и T_{kin} , мы можем получить плотность водорода $n(\text{H}_2)$ [91]:

$$n(\text{H}_2) = \frac{A}{C} \frac{J(T_{\text{ex}}) - J(T_{\text{bg}})}{J(T_{\text{kin}}) - J(T_{\text{ex}})} \left[1 + \frac{J(T_{\text{kin}})}{h\nu/k} \right] (\text{cm}^{-3}), \quad (1.13)$$

где A и C – коэффициент Эйнштейна и столкновительный коэффициент, соответственно. Согласно [94], для типичной для межзвездных молекулярных облаков $T_{\text{kin}} = 25$ К эти коэффициенты равны $A = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ и $C = 8.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$.

В условиях ЛТР и без градиента лучевой скорости две внутренние сателлитные линии и две внешние сателлитные линии (1,1) молекулы NH_3 имеют одинаковую интенсивность. Однако иногда в молекулярных облаках наблюдаются аномалии яркости сверхтонких компонент [95–97]. Обозначим внутренние (inner) компоненты красного и синего смещения как $T_{\text{in,r}}$ и $T_{\text{in,b}}$, а внешние (outer) $T_{\text{out,r}}$ и $T_{\text{out,b}}$. Тогда показатели аномалий для внутренних и внешних компонент будут рассчитываться как $A_{\text{IS}} = T_{\text{in,r}}/T_{\text{in,b}}$ и $A_{\text{OS}} = T_{\text{out,r}}/T_{\text{out,b}}$. Отношение $A_{\text{OS}} = A_{\text{IS}} = 1$ означает отсутствие аномалий. Случай $A_{\text{OS}} > 1$ и $A_{\text{IS}} < 1$, рассмотренный в работе [95], может быть описан моделью, в которой молекулярное облако может состоять из неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности телескопа, окруженных менее плотным газом. На градиент скорости по лучу зрения указывает комбинация аномалий $A_{\text{OS}} > 1$ и $A_{\text{IS}} > 1$ (расширение) или $A_{\text{OS}} < 1$ and $A_{\text{IS}} < 1$ (сжатие) [96; 98; 99].

1.3.3 Вращательные диаграммы CH_3CSH

В случае, когда проведены наблюдения нескольких линий одной и той же молекулы, возможно построить вращательную диаграмму [100]. Полная луче-

вая концентрация N_{tot} связана с лучевой концентрацией уровня u посредством статистической суммы Q_{rot} [87]:

$$\frac{N_u}{N_{\text{tot}}} = \frac{g_u g_{\text{I}g_{\text{K}}}}{Q_{\text{rot}}} \exp\left(-\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}}\right), \quad (1.14)$$

а лучевая концентрация N_u в оптически тонком случае определяется из интегральной интенсивности линий:

$$\frac{N_u}{g_u} = \frac{3k \int T_{\text{mb}(1,1)} dv}{8\pi^3 \nu S \mu^2 g_{\text{I}g_{\text{K}}}}. \quad (1.15)$$

Объединяя выражения 1.14 и 1.15, получаем главную формулу для вращательных диаграмм [101]:

$$\ln \frac{N_u}{g_u} = \ln \frac{g_u g_{\text{I}g_{\text{K}}}}{Q_{\text{rot}}} \exp\left(-\frac{E_u}{kT_{\text{ex}}}\right) = \ln \frac{N}{Q_{\text{rot}}} - \frac{E_u}{kT_{\text{rot}}}. \quad (1.16)$$

График зависимости величины $\ln \frac{N_u}{g_u}$ от $\frac{E_u}{k}$ называется вращательной диаграммой. Для графика точки, соответствующие разным линиям, должны ложиться на прямую, тангенс угла наклона которой обратно пропорционален вращательной температуре с отрицательным знаком ($\tan(\alpha) \sim -T_{\text{rot}}$), а ордината точки пересечения с осью Y равна значению $\ln(Q)$.

CH_3CSH является хорошим индикатором температуры газа в плотных молекулярных облаках [102]. В диссертации был использован пакет Cassis¹ для построения вращательных диаграмм.

1.3.4 Анализ данных Volcam

Для определения лучевой концентрации водорода $N(\text{H}_2)$ по данным Volcam был использован подход, предложенный в работе [103]: для каждого пикселя карты излучения пыли считалось, что излучение создается одинаковыми по размеру и свойствам пылинками с температурой T_d (см. также [82]).

¹<http://cassis.irap.omp.eu>

Излучение пыли на длине волны 1.1 мм является оптически тонким. Тогда для каждого пикселя масса пыли:

$$M = \frac{10^{-23} S_{1,1} D^2}{k_{1,1} B_{1,1}(T_d)} (\text{гр}^{-2}), \quad (1.17)$$

где $B_{1,1}(T_d)$ - функция Планка для принятой температуры пыли T_d в единицах СГС, $k_{1,1} = 0.0114 \text{ см}^2/\text{Г}$ - непрозрачность пыли, в этом значении уже учтено, что отношение массы газа к массе пыли в молекулярных облаках равно 100 [104—106], $S_{1,1}$ - плотность потока на длине волны 1.1 мм, D - расстояние до объекта в сантиметрах, соответствующее 1.6 кпк [40], коэффициент 10^{-23} используется для перевода плотности потока из единиц СГС в Янские для Volocam. Так как в архивных fits-файлах обзора Volocam данные записаны в единицах [Янские/диаграмма направленности], т.е. в каждом пикселе плотность потока $S_{1,1}$ проинтегрирована по всей площади диаграммы направленности телескопа, то и масса M является в этом смысле величиной интегральной. Для того, чтобы получить значение лучевой концентрации молекулярного водорода $N(\text{H}_2)$ в единицах $[\text{см}^{-2}]$, необходимо учесть: 1) среднюю молекулярную массу $\mu_{\text{H}_2} = 2.8$ в единицах массы атома водорода; также учесть вклад гелия и металлов (вклад атомарного водорода несущественный [107]), 2) массу атома водорода $m_{\text{H}} = 1.66053 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ и 3) площадь, которую охватывает диаграмма направленности в картинной плоскости на расстоянии объекта $S = \pi(\text{tg}(\text{FWHM}/4 \ln 2/206265)D)^2 \text{ см}^2$, где $\text{FWHM} = 33''$ - размер диаграммы направленности в угловых секундах:

$$N(\text{H}_2) = \frac{M}{S \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}}} (\text{см}^{-2}). \quad (1.18)$$

Неопределенности калибровки данных обзора Volocam лежат в пределах 20 – 30% [82].

Заключение по первой главе

Глава 1 посвящена описанию проведенных наблюдений на телескопах обсерваторий в Онсала (Швеция), Эффельсберг (Германия) и АРЕХ (Чили). Был получен большой массив наблюдательных данных, включающий в себя линии

излучения 13-ти молекул миллиметрового и сантиметрового диапазона для волокна WB 673 и 5-ти молекул для волокна G351.78-0.54. Определены методы дальнейших исследований.

Глава 2. Структура и физические условия в молекулярных сгустках

В Главе 1 были описаны карты в линиях молекул CS, CO, N_2H^+ , HCN, HNC и NH_3 для сгустков волокна WB 673, что позволяет получить полную картину распределения физических условий и химического состава. Так же были получены карты в линиях CO и его изотопологов, N_2H^+ и CH_3CSH в волокне G351.78-0.54.

С использованием этих данных в Главе 2 будут получены лучевые концентрации и относительные обилия различных молекул в волокне WB 673, температура газа и плотность водорода; физические и кинематические условия в волокне G351.78-0.54.

2.1 Карты излучения молекул в молекулярном волокне WB 673

Карты интегральной интенсивности линий CS (2–1), $C^{18}O$ (1–0), ^{13}CO (1–0), N_2H^+ (1–0), HNC (1–0) и HCN (1–0) показаны на Рис. 2.1, где черные контуры — уровни излучения пыли в полосе 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню отношения сигнал/шум ≈ 3 , а внутренние показывают $\sim 35\%$ и $\sim 65\%$ от уровня максимальной интенсивности в каждом из сгустков отдельно. В Таб. 6 приведены уровни лучевой концентрации водорода в сгустках. На уровне 3σ (Bolocam) лучевая концентрация водорода составляет $7.2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$. Видно, что пики излучения в линиях молекул, в основном, совпадают с пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Излучение линий $C^{18}O$ (1–0) и ^{13}CO (1–0) во всех сгустках распределено равномерно, без ярко выраженного контраста, например интегральная интенсивность ^{13}CO (1–0) в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 лежит в пределах 25–35 К км/с, а в центральных сгустках в пределах 30–55 К км/с. Интегральная интенсивность $C^{18}O$ (1–0) лежит в пределах 3–5 К км/с в периферийных сгустках и 3–7 К км/с в центральных. Это соответствует теории: линии $C^{18}O$ (1–0) и ^{13}CO (1–0) имеют низкую критическую плотность и переходят в насыщение в плотных регионах.

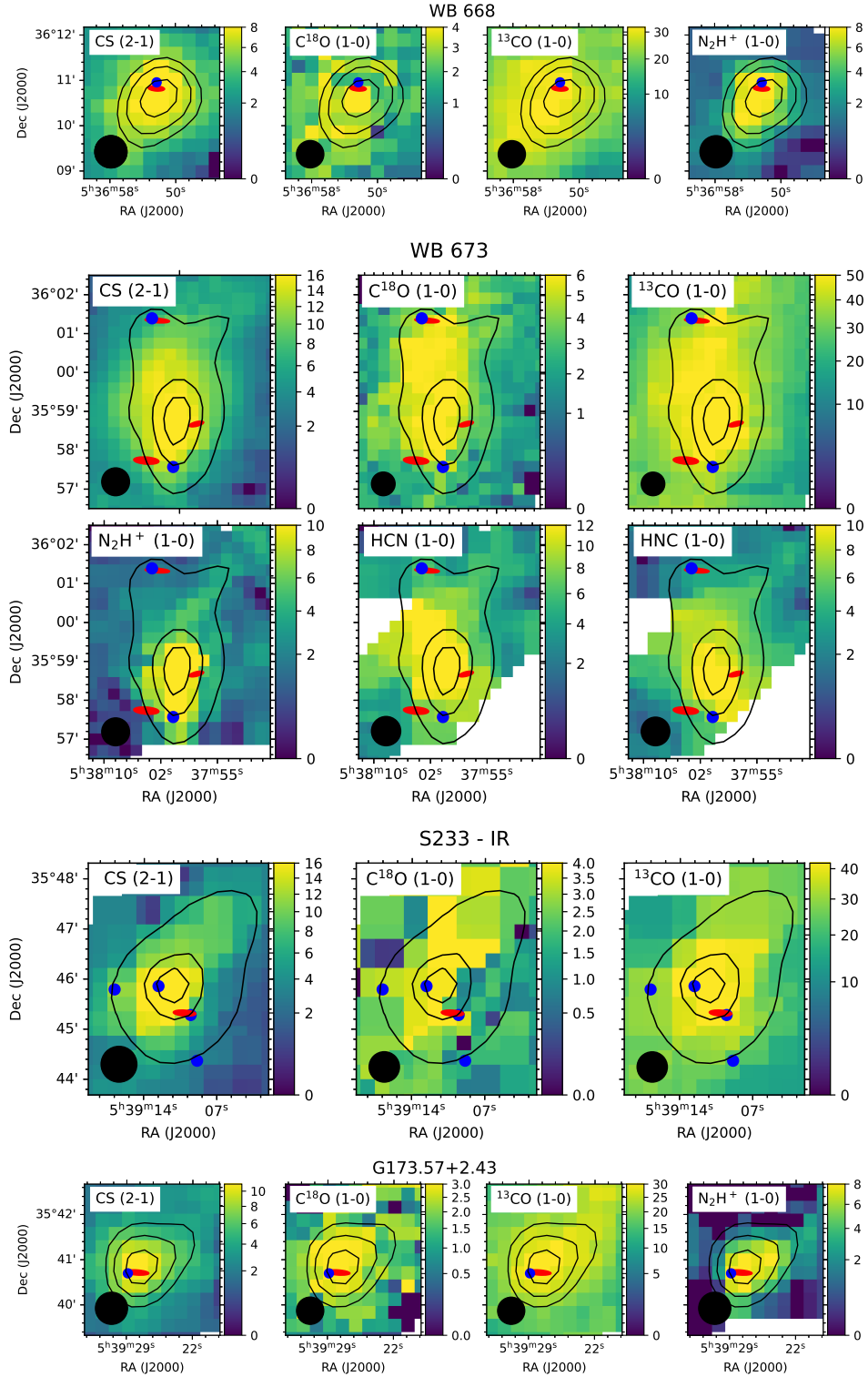


Рисунок 2.1 — Интегральная интенсивность линий молекул CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0) и HCN(1–0) в центральной сгустке WB 673 и трех крайних. Красные эллипсы - IRAS-источники (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки - MSX-источники, черные контуры - уровни излучения пыли на 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню отношения сигнал/шум ≈ 3 , а внутренние показывают $\sim 35\%$ и $\sim 65\%$ от максимальной интенсивности, черный круг в левом нижнем углу - диаграмма направленности телескопа.

Таблица 6 — Уровни лучевой концентрации водорода в сгустках волокна WB 673, см^{-2} .

Уровень	WB 668	WB 673	S233-IR	G173.57+2.43
35%	$1.9 \cdot 10^{22}$	$2.4 \cdot 10^{22}$	$6.4 \cdot 10^{22}$	$1.6 \cdot 10^{22}$
65%	$3.0 \cdot 10^{22}$	$4.0 \cdot 10^{22}$	$1.2 \cdot 10^{23}$	$2.4 \cdot 10^{22}$
Максимум	$4.4 \cdot 10^{22}$	$5.7 \cdot 10^{22}$	$2.0 \cdot 10^{23}$	$4.2 \cdot 10^{22}$

Методом, описанным в Главе 1, найдены лучевые концентрации молекул CS, CO, N_2H^+ , HCN, HNC в сгустках волокна WB 673. Так же были получены карты лучевой концентрации водорода ($N(\text{H}_2)$) по данным *Bolocam*.

Карты $N(\text{H}_2)$ вместе с лучевыми концентрациями других молекул показаны на Рис. 2.2. Для всех карт проведена процедура конволюции с функцией Гаусса для того, чтобы пространственное разрешение карт было одинаковым, таким же как для карты излучения в линии N_2H^+ (1–0). Также все карты лучевых концентраций были приведены к одной и той же координатной сетке.

В сгустке WB 673 пики $N(\text{CS})$, $N(\text{CO})$, $N(\text{N}_2\text{H}^+)$, $N(\text{HCN})$ и $N(\text{HNC})$ находятся в центральной части сгустка, также виден вторичный максимум $N(\text{CO})$ в северо-восточной части сгустка, где расположены ИК-источники. В остальных сгустках пики лучевой концентрации молекул совпадают с контурами *Bolocam*.

На Рис. 2.3 показаны карты относительных обилий молекул $X_i = N_i/N(\text{H}_2)$ в сгустках. Предварительно со всех карт излучения молекул и пыли были удалены пиксели, в которых отношение сигнал/шум было меньше 3, чтобы удалить ненадежные данные. Затем были получены обилия молекул путем деления лучевых концентраций молекул и $N(\text{H}_2)$ попиксельно. В табл. 7 приведены обилия молекул, усредненные по сгусткам. Средние обилия одних и тех же молекул сохраняются примерно равными во всех сгустках.

Во всех сгустках обилия молекул уменьшаются в направлении максимума величины $N(\text{H}_2)$, за исключением обилий N_2H^+ в центральном сгустке WB 673 и в южном G173.57+2.43. В них максимумы $X(\text{N}_2\text{H}^+)$ находятся в юго-западных частях сгустков, и виден плавный градиент величины $X(\text{N}_2\text{H}^+)$ в направлении с северо-востока к юго-западу, а в сгустке WB 668 наблюдается противоположный градиент величины $X(\text{N}_2\text{H}^+)$. Во всех сгустках максимум обилия N_2H^+ находится в области с пониженным обилием CO, что хорошо согласуется с тео-

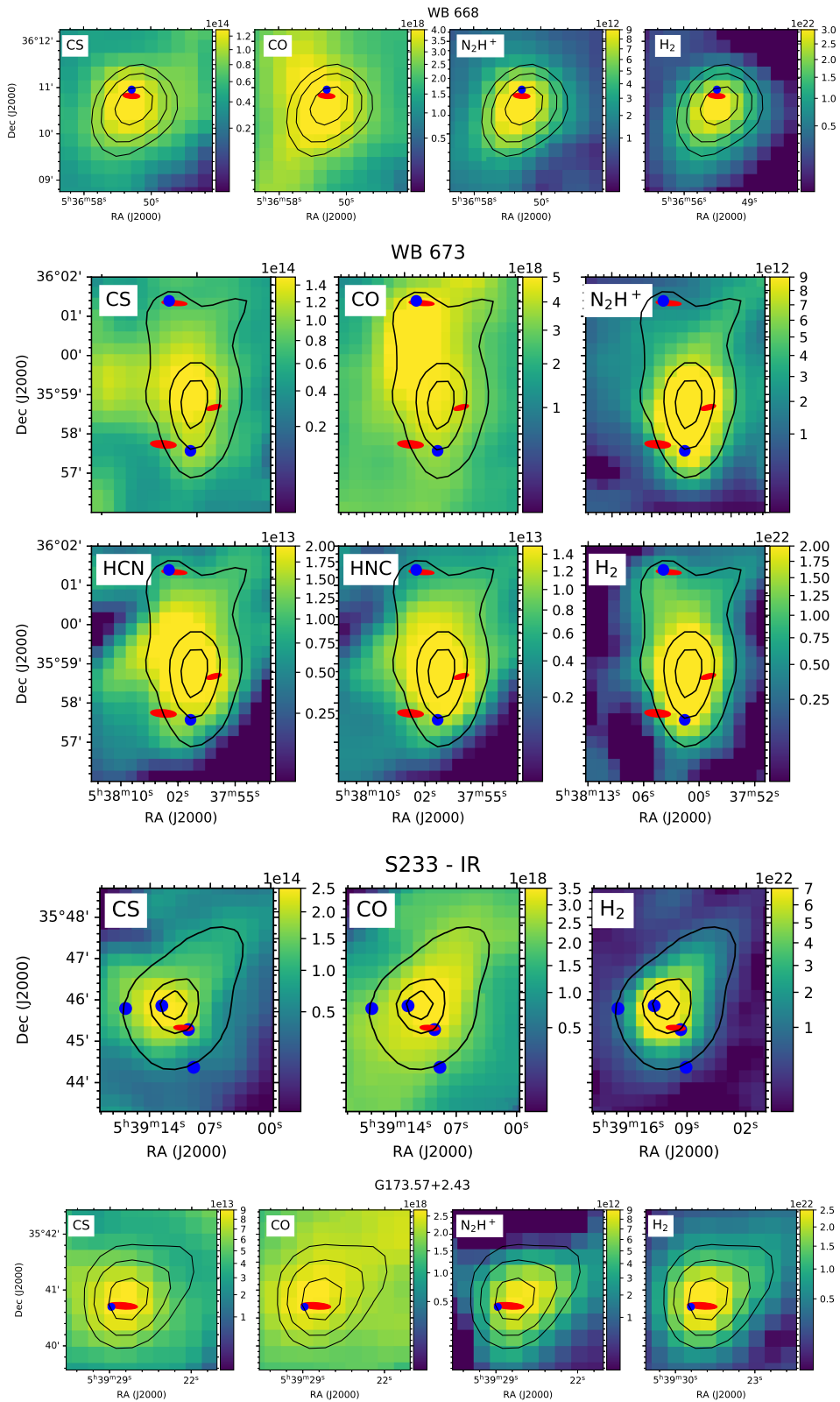


Рисунок 2.2 — Лучевая концентрация молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, H_2 в центральной сгустке WB 673 и трех крайних. Обозначения как на Рис. 2.2.

рией: молекулы CO быстро разрушают N_2H^+ , и после вымерзания CO на пыль повышается обилие N_2H^+ [39].

Чтобы сравнить результаты Главы 2 с результатами других работ, проведен сравнительный анализ наблюдений с данными излучения пыли на 30-м телескопе IRAM [108]. Максимальное значение лучевой концентрации водорода в направлении источника IRAS 05358+3543 в сгустке S233-IR составляет $5.8 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, для трех менее плотных пиков лучевая концентрация лежит в пределах $(1.1 - 1.8) \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Согласно расчетам по данным Bolocam, максимальная лучевая концентрация в сгустке S233-IR равна $2.0 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Также в работе [108] определена лучевая концентрация CS в направлении на пик плотности, $(1.7 - 10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, которая в пределах ошибок согласуется с концентрацией, полученной в диссертации ($3.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$).

Таблица 7 — Обилия молекул, усредненные по сгусткам волокна WB 673.

Молекула	WB 668	WB 673	S233-IR	G173.57+2.43
CS	$7.0 \cdot 10^{-9}$	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$6.6 \cdot 10^{-9}$	$4.8 \cdot 10^{-9}$
CO	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$
N_2H^+	$3.8 \cdot 10^{-10}$	$4.3 \cdot 10^{-10}$	-	$3.6 \cdot 10^{-10}$
HCN	-	$1.2 \cdot 10^{-9}$	-	-
HNC	-	$8.3 \cdot 10^{-10}$	-	-

2.1.1 Линии излучения молекул в центральном сгустке WB 673

Благодаря широкой полосе приема были зарегистрированы линии HCO^+ (1–0), $HCCCN$ (13–12), $C^{34}S$ (2–1), CH_3OH (2–1), SO (3,2–2,1) и ^{34}SO (3,2–2,1). Параметры линий в направлении на пик лучевой концентрации CS, найденный в работе [42] ($\alpha(J2000) = 05^h38^m00^s.0$, $\delta(J2000) = 35^\circ59'17.0''$) в центральном сгустке WB 673 показаны в Таб. 8, где W – интегральная интенсивность, T_{mb} – яркостная температура пика в шкале главного луча, ΔV – ширина линии, V_{LSR} – лучевая скорость пика спектральной линии. В скобках указана ошибка гауссова приближения. Спектры обнаруженных линий показаны на

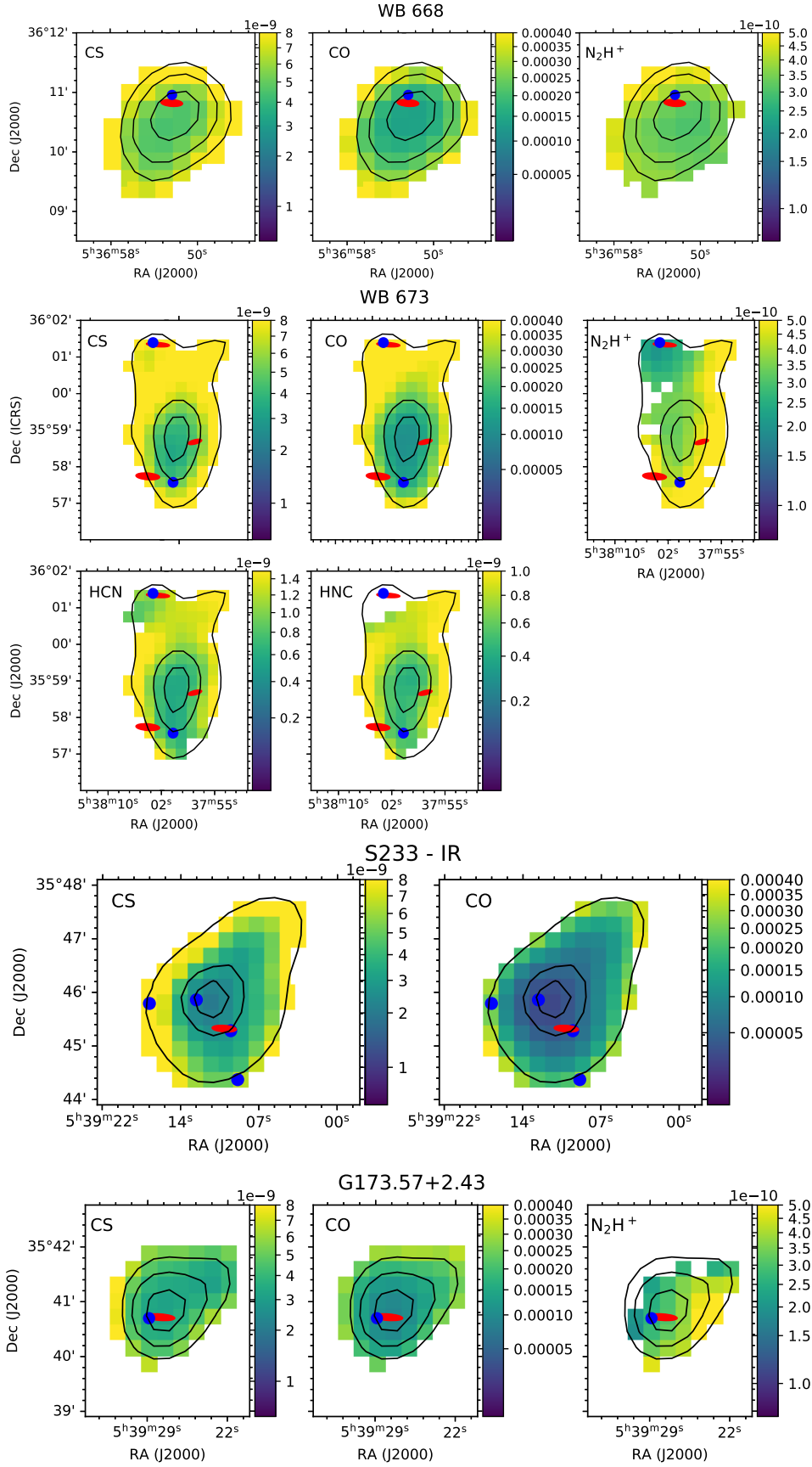


Рисунок 2.3 — Обилия молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.

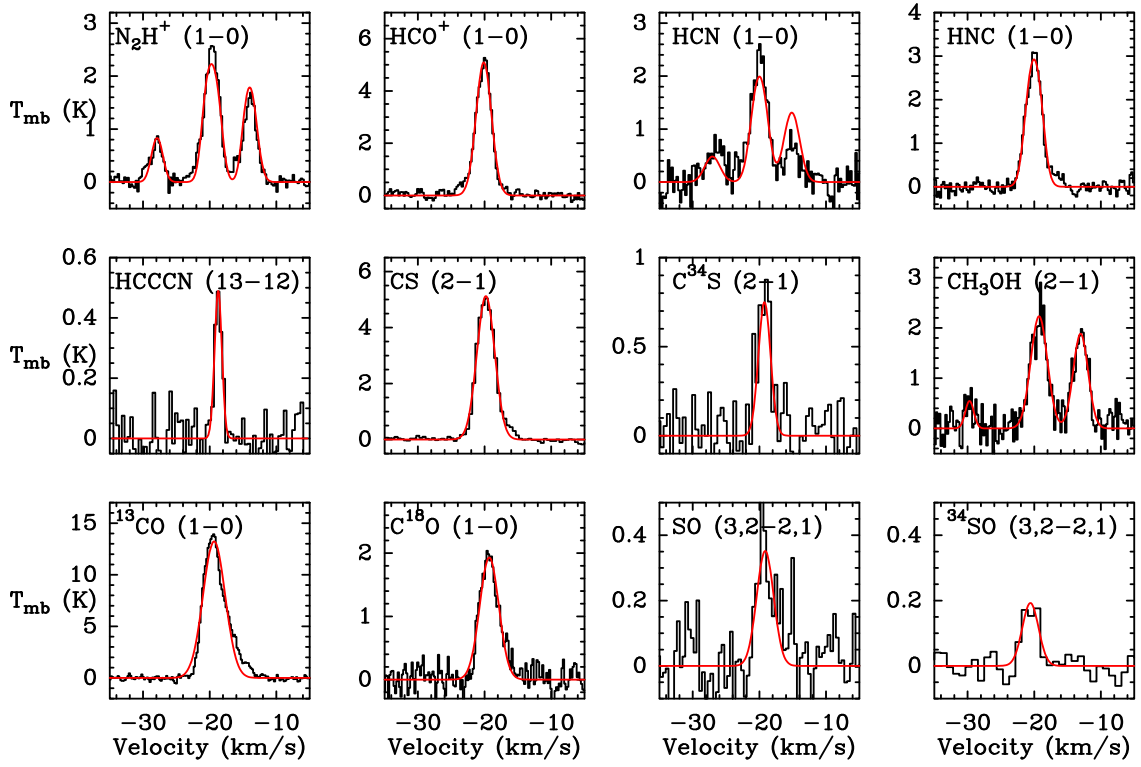


Рисунок 2.4 — Спектры линий излучения молекул в направлении центрального сгустка WB 673. Красной линией показано приближение спектров гауссовыми функциями.

Рис. 2.4. Для спектров $\text{SO} (3,2-2,1)$, $^{34}\text{SO} (3,2-2,1)$, $\text{HCCCN} (13-12)$, $\text{C}^{34}\text{S} (2-1)$ проведена процедура усреднения по 3 каналам чтобы улучшить сигнал/шум. В спектрах $^{13}\text{CO} (1-0)$, $\text{CS} (2-1)$ и $\text{HNC} (1-0)$ видно небольшое красное крыло, а в спектре $\text{HCO}^+ (1-0)$ — синее. Оптическая толщина линии $\text{CS} (2-1)$ составляет 3.4, линии $\text{SO} (3,2-2,1)$ — 17.6, линии $^{13}\text{CO} (1-0)$ — 0.4. Лучевые концентрации и относительные обилия в направлении пика излучения $\text{CS} (2-1)$ плотного сгустка WB 673 показаны в Таб. 9. Ошибка определения лучевых концентраций молекул не превышает 10%, ошибка определения обилий — 50%.

Резюме анализа карт излучения молекул в молекулярном волокне WB 673

По результатам наблюдений на телескопе в Онсала в 2016-2017 гг. были получены карты линий излучения молекул в волокне WB 673, для которых выделены следующие результаты:

Таблица 8 — Линии, отождествленные в центральной сгустке WB 673.

Линия	W	T_{mb}	ΔV	V_{LSR}
-	К км/с	К	км/с	км/с
	0.8 (0.2)	0.4 (0.2)	1.7 (0.4)	-26.3 (0.2)
HCN	6.0 (0.2)	2.3 (0.2)	2.6 (0.1)	-20.0 (0.1)
	1.0 (0.2)	0.6 (0.2)	1.7 (0.3)	-15.1 (0.1)
HCO ⁺	14.6 (0.4)	5.1 (0.1)	2.7 (0.1)	-20.1 (0.03)
HNC	9.0 (0.4)	3.0 (0.1)	2.8 (0.1)	-19.6 (0.02)
	1.5 (0.1)	0.7 (0.1)	2.3 (0.1)	-28.0 (0.1)
N ₂ H ⁺	6.9 (0.7)	2.5 (0.1)	2.7 (0.04)	-19.6 (0.02)
	3.7 (0.1)	1.5 (0.1)	2.3 (0.06)	-13.9 (0.03)
C ³⁴ S	1.7 (0.3)	0.7 (0.2)	2.1 (0.4)	-19.2 (0.2)
	0.6 (0.2)	0.5 (0.3)	1.2 (0.4)	-29.7 (0.1)
CH ₃ OH	5.8 (0.3)	2.1 (0.3)	2.6 (0.2)	-19.2 (0.1)
	4.0 (0.3)	1.7 (0.3)	2.2 (0.2)	-12.9 (0.04)
³⁴ SO	0.6 (0.1)	0.2 (0.03)	2.8 (0.3)	-21.0 (0.2)
CS	17.2 (0.2)	5.1 (0.1)	3.2 (0.03)	-19.8 (0.01)
H ₂ CS	0.8 (0.1)	0.4 (0.1)	1.9 (0.5)	-18.9 (0.2)
SO	1.2 (0.2)	0.4 (0.1)	3.2 (0.7)	-19.1 (0.3)
C ¹⁸ O	6.6 (0.2)	1.9 (0.2)	3.3 (0.1)	-19.3 (0.1)
HCCCN	0.7 (0.1)	0.5 (0.1)	1.3 (0.2)	-18.7 (0.1)
¹³ CO	54.2 (0.5)	13.2 (0.3)	3.9 (0.04)	-19.4 (0.03)

Таблица 9 — Лучевые концентрации и относительные обилия молекул CO, N_2H^+ , HCN, HNC, CS, SO, HCCCN в направлении пика излучения CS (2–1) в сгустке WB 673.

Молекула	N	$N/N(H_2)$
-	cm^{-2}	-
CO	$5.12 \cdot 10^{18}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
N_2H^+	$1.6 \cdot 10^{13}$	$3.4 \cdot 10^{-10}$
HCN	$1.7 \cdot 10^{13}$	$3.6 \cdot 10^{-10}$
HNC	$1.6 \cdot 10^{13}$	$3.4 \cdot 10^{-10}$
CS	$2.8 \cdot 10^{14}$	$2.9 \cdot 10^{-9}$
SO	$2.5 \cdot 10^{14}$	$5.3 \cdot 10^{-9}$
HCCCN	$5.8 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{-10}$

- Обнаружено 13 линий молекул, излучающих в миллиметровом диапазоне. Для этих линий определены интегральные интенсивности, яркостные температуры пика, уровень шума, ширины линий, лучевые скорости пика яркостной температуры. Для молекул со сверхтонким расщеплением (HCN, N_2H^+ , HNC) определены параметры всех видимых компонентов.
- Построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS (2–1), $C^{18}O$ (1–0), ^{13}CO (1–0), N_2H^+ (1–0), HNC (1–0) и HCN (1–0) в плотных сгустках WB 673, WB 668, S233–IR, G173.57+2.43, проведен анализ распределения газа. Пики излучения в линиях молекул совпадают с пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Также определены лучевые концентрации, обилия молекул относительно концентрации водорода.
- Построены карты распределения обилий молекул в плотных сгустках; показано, что обилия CO и CS во всех сгустках, а также HCN и HNC в центральной сгустке, уменьшаются в направлении наиболее плотной центральной части. Для распределения обилия молекулы N_2H^+ наблюдается градиент в направлении с северо-востока на юго-запад в сгустках WB 673 и G173.57+2.43, и противоположный — в сгустке WB 668.

2.2 Анализ излучения в линиях аммиака в волокне WB 673

2.2.1 Параметры излучения в линиях аммиака

Так же как и молекулы CS и N_2H^+ , излучение которых рассматривалось в разделе 2.1, аммиак является трассером плотного газа. Критическая плотность возбуждения линий аммиака составляет $n_{\text{crit}} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ для $T_{\text{kin}} = 20 \text{ K}$ [109]. Поэтому линии аммиака показывают наиболее плотные области сгустков. Кроме этого, аммиак является трассером температуры газа, поскольку нижние метастабильные уровни аммиака возбуждаются посредством столкновений [93]. В следующем разделе будут приведены результаты обработки наблюдений излучения в линиях аммиака.

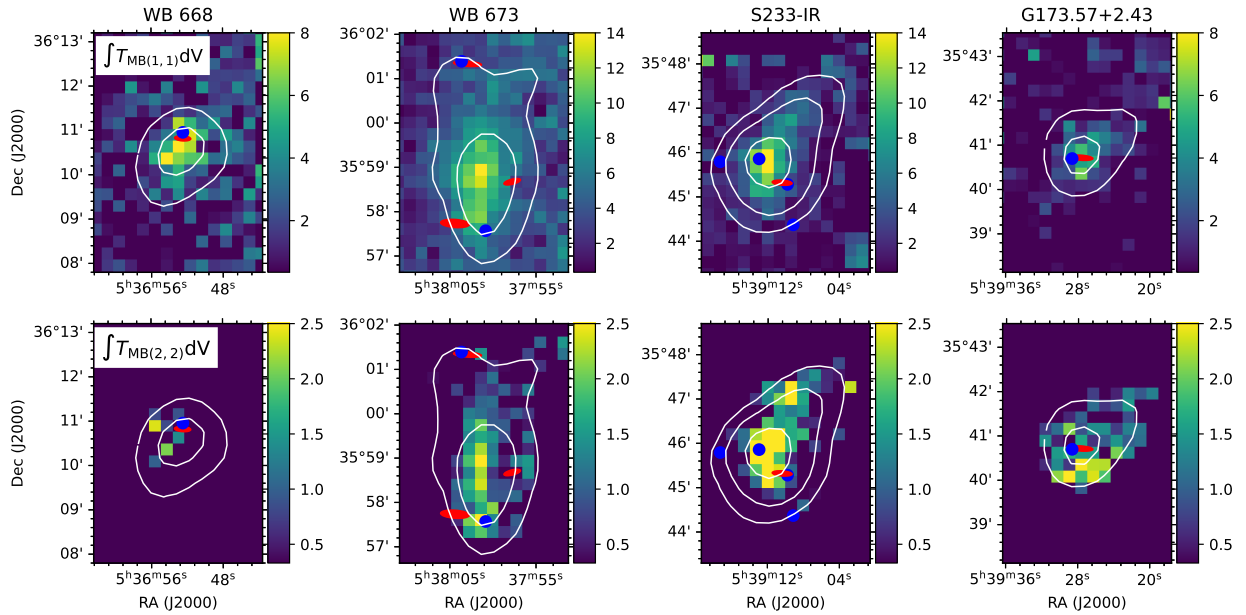


Рисунок 2.5 — Карты интегральной интенсивности линий NH_3 (1,1) и (2,2) в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 волокна WB 673.

Обозначения как на рис. 2.1.

Карты интегральной интенсивности линий NH_3 (1,1) и (2,2) в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 показаны на Рис. 2.5. Контуры, как и на предыдущих рисунках, показывают уровни излучения пыли по данным Волоса 1.1 мм. Интегральная интенсивность аммиака увеличивается в центрах сгустков. Наибольшая интенсивность достигается в сгустках WB 673 и

S233-IR, где пиковые интенсивности линий (1,1) и (2,2) достигают 18 К км/с и 5 К км/с, соответственно. В сгустках WB 668 и G173.57+2.43 линии аммиака слабее, с пиковыми интенсивностями 8 К км/с и 2.5 К км/с для линий (1,1) и (2,2) соответственно. Пики излучения аммиака совпадают с положением источников IRAS во всех наблюдаемых сгустках, кроме WB 673, где IRAS-источники расположены на периферии сгустка.

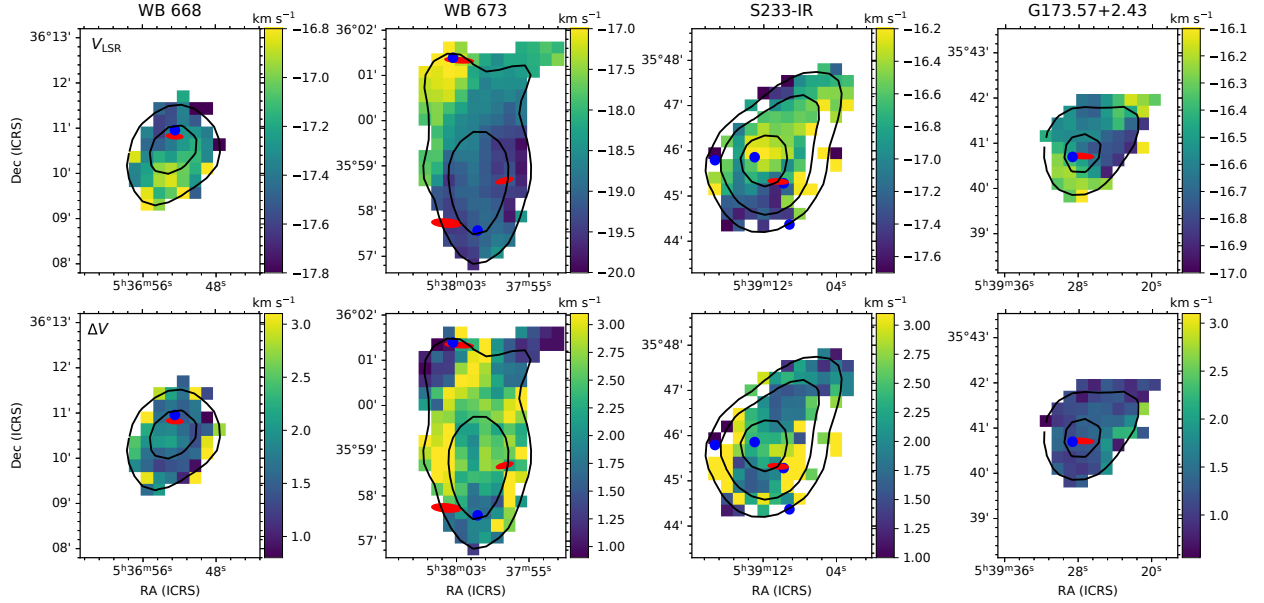


Рисунок 2.6 — Карта лучевой скорости V_{LSR} и ширины линии ΔV NH_3 (1,1) в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.

По сгусткам наблюдаются градиенты лучевой скорости V_{LSR} линии NH_3 (1,1). Карты V_{LSR} и ширины линии ΔV показаны на Рис. 2.6. На карте видно, что в сгустке WB 673 наблюдается значительный градиент скорости в направлении север-восток и запад-юг от более высоких значений (-17 км/с) к более низким (-20 км/с). Градиенты скорости в других сгустках менее существенны. Ширина линии повышается до значений ~ 3 км/с на периферии центральных сгустков WB 673 и S233-IR, в сгустках WB 668 и G173.57+2.43 ширина лежит в пределах 1.5–2 км/с.

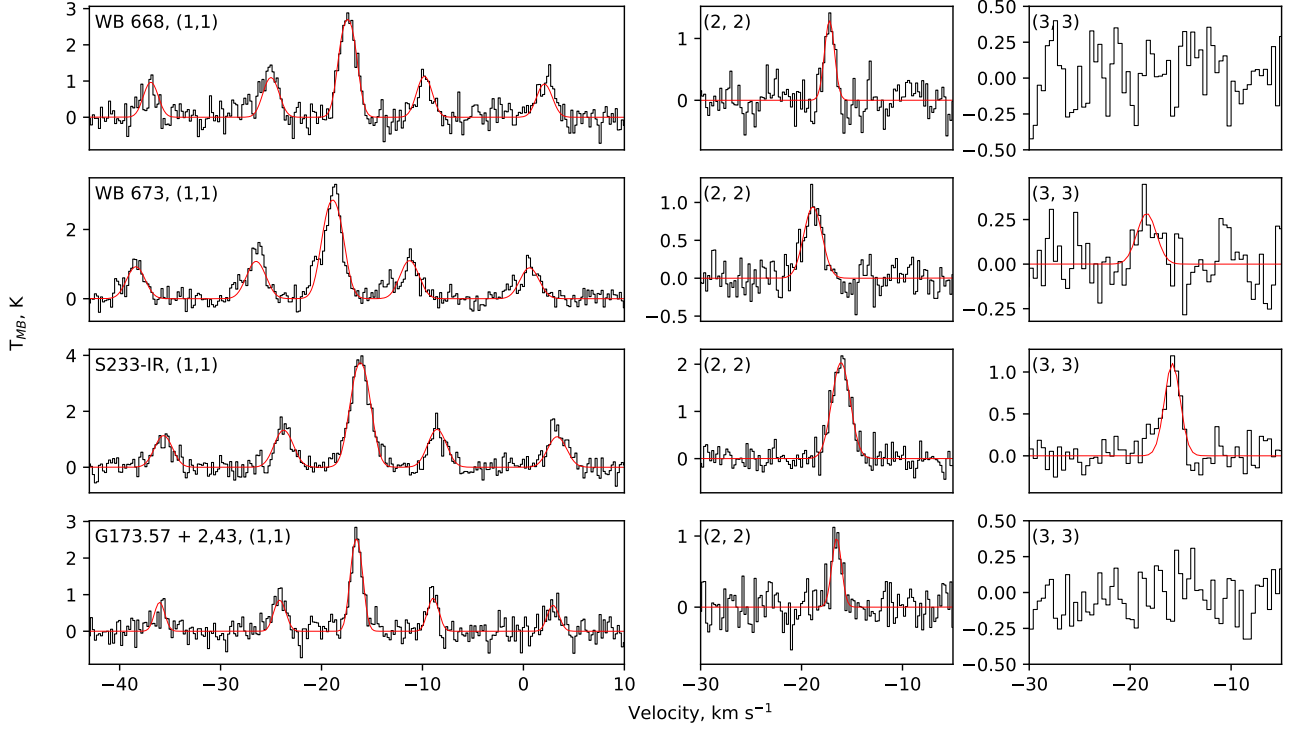


Рисунок 2.7 — Линии аммиака в пиках излучения плотных сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Красные линии показывают Гауссовы профили.

Примеры линий излучения NH_3 (1,1), (2,2) и (3,3) в пиках излучения линии NH_3 (1,1) показаны на Рис. 2.7. Спектральное разрешение линий (1,1) и (2,2) составляет 0.2 км/с, спектр линии (3,3) был сглажен до разрешения 0.4 км/с. Пять групп компонент сверхтонкой структуры видны в спектре линии (1,1), в линиях (2,2) и (3,3) сателлитные компоненты не обнаруживаются, а в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 не обнаруживается линия (3,3).

Параметры приближения линии Гауссовой функцией показаны в Таб. 10, где $\tau_{(1,1)}$ — общая оптическая толщина мультиплета (1,1), T_{MB} и ΔV — интенсивность излучения и ширина линий (1,1), (2,2) и (3,3). Ширина линии во всех направлениях включает тепловую и нетепловую составляющую. Тепловая ширина линии составляет 0.22 км/с для температуры газа $T = 20$ К (см. ниже), а наблюдаемая ширина линии составляет ~ 1.1 км/с в сгустке G173.57+2.43 и ≈ 2.0 км/с в остальных сгустках. Следовательно, присутствует нетепловая составляющая.

Оптическая толщина линии (1,1) во всех сгустках не превышает значения 2, средние значения по пикселям на картах составляют $\tau_{(1,1)} \approx 0.8$ в цен-

Таблица 10 — Параметры линий в направлении на пики интегральной интенсивности NH_3 (1,1).

Параметр	WB 668	WB 673	S233-IR	G173.57+2.43
α_{2000} , h m s	5 36 53	5 38 01	5 39 12	5 39 27
δ_{2000} , ° ' "	+36 10 37	+35 58 55	+35 45 53	+35 40 35
$\tau(1,1)$	1.4 (0.3)	1.1 (0.2)	0.8 (0.2)	0.8 (0.3)
$T_{\text{MB}}(1,1)$, K	2.7 (0.3)	2.8 (0.2)	3.7 (0.2)	2.5 (0.2)
$\Delta V(1,1)$, км/с	1.6 (0.1)	2.0 (0.1)	2.0 (0.1)	1.1 (0.2)
$T_{\text{MB}}(2,2)$, K	1.3 (0.3)	0.9 (0.2)	2.1 (0.2)	0.9 (0.2)
$\Delta V(2,2)$, км/с	1.1 (0.1)	2.1 (0.2)	2.1 (0.1)	1.9 (0.4)
$T_{\text{MB}}(3,3)$, K	-	0.3 (0.1)	1.1 (0.2)	-
$\Delta V(3,3)$, км/с	-	2.2 (0.6)	1.7 (0.2)	

тральных сгустках WB 673 и S233-IR и достигают $\tau_{(1,1)} \approx 1.8$ в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43.

2.2.2 Физические условия газа

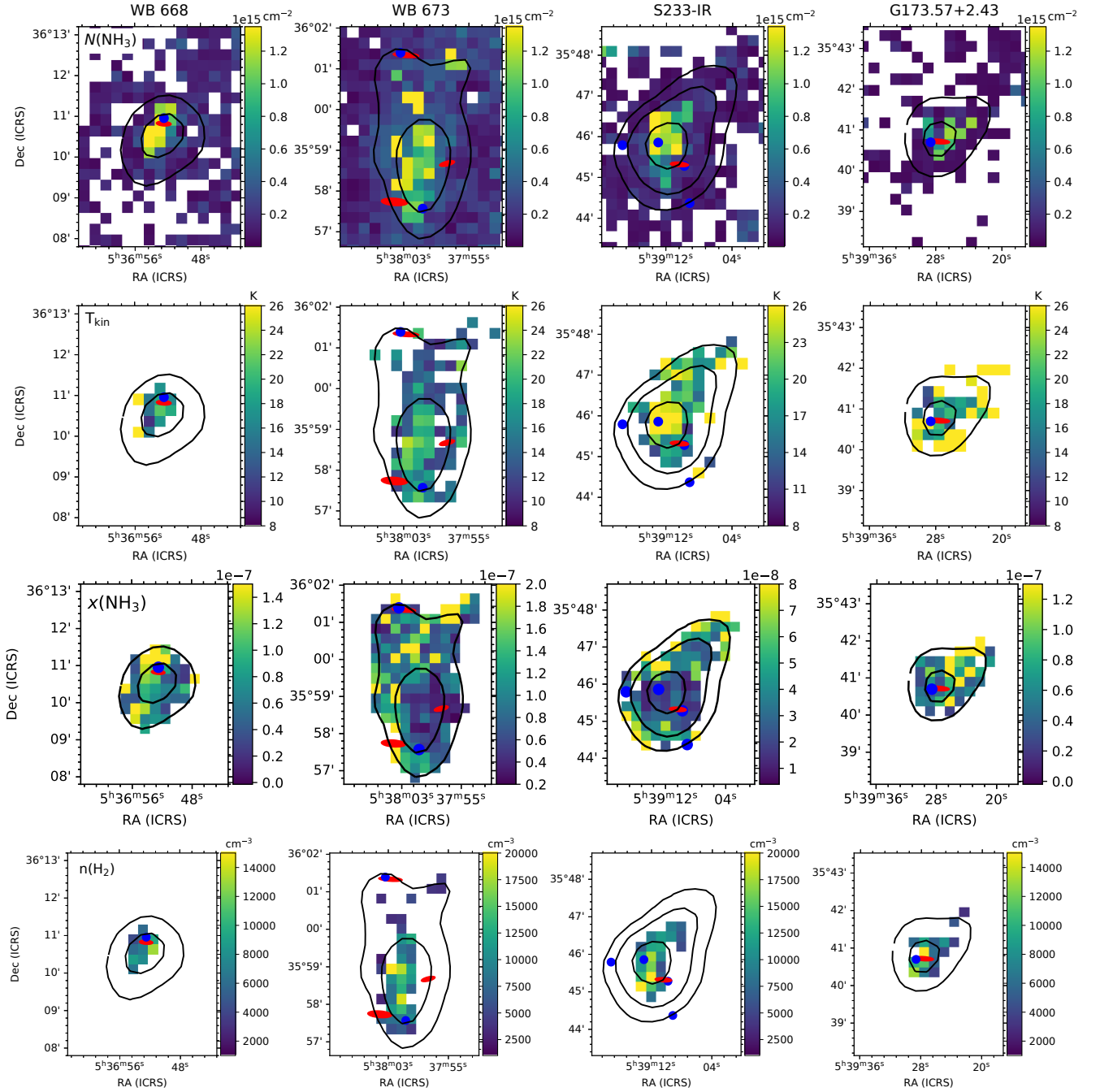


Рисунок 2.8 — Карты лучевой концентрации аммиака (сверху), кинетической температуры газа (середина сверху), обилия NH_3 (середина снизу) и плотности водорода (снизу) в сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.

Карты лучевой концентрации аммиака (N_{NH_3}), кинетической температуры газа (T_{kin}), относительного обилия аммиака (X_{NH_3}) и объемной плотности водорода (n_{H_2}) показаны на Рис. 2.8. Пик N_{NH_3} соответствует пику излучения

пыли на 1.1 мм. Максимальное значение $N_{\text{NH}_3} = (1 - 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в сгустках WB 668, WB 673 и S233-IR.

Температура газа лежит в пределах 20–30 К. Наиболее высокая температура $T_{\text{kin}} \approx 30 \text{ К}$ найдена в центральной части сгустка S233-IR. Температура $T_{\text{kin}} \approx 18 - 22 \text{ К}$ наблюдается по всей площади сгустков WB 668 и WB 673. В G173.57+2.43, умеренно холодная средняя часть $T_{\text{kin}} \approx 18 \text{ К}$ окружена более теплой оболочкой $T_{\text{kin}} \approx 26 \text{ К}$. Таким образом, в четырех исследованных сгустках обнаружены разные условия: холодное ядро с теплой оболочкой (G173.57+2.43), теплое ядро с холодной оболочкой (S233-IR) или примерно равное распределение температуры по поверхности сгустка в WB 668 и WB 673. Средние ошибки определения температуры составляют 12%, 6%, 10% и 16% в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 соответственно.

X_{NH_3} уменьшается на порядок величины в центральной наиболее плотной части сгустков WB 673 и S233-IR относительно их окраин. Максимальное значение $X_{\text{NH}_3} = 2 \cdot 10^{-7}$ найдено в северной части сгустка WB 673, где обилие уменьшается до $2 \cdot 10^{-8}$ в пике излучения пыли. Минимальное обилие $\approx (1 - 2) \cdot 10^{-8}$ в центре сгустка S233-IR, на периферии которого обилие достигает $8 \cdot 10^{-8}$. Обилие меняется по направлениям север-юг и запад-восток с 0.2 до $1 \cdot 10^{-7}$ в сгустках WB 668 и G173.57+2.43 без уменьшения в центральной части. Наиболее низкое значение X_{NH_3} найдено в наиболее теплой части сгустка S233-IR. Других значимых трендов соответствия между параметрами N_{NH_3} , T_{kin} и X_{NH_3} в исследуемых сгустках не наблюдается.

Плотность водорода достигает $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в двух центральных сгустках: WB 673 и S233-IR, в периферийных сгустках плотности ниже в 1.5–2 раза. Пик плотности в WB 673 соответствует максимуму излучения пыли *Volcam* 1.1 мм, а в сгустке S233-IR пик смещен к югу относительно пика излучения пыли на $\sim 36''$, что соответствует размеру диаграммы направленности. Пики плотности газа совпадают с пиками излучения пыли и расположением ИК-источников в двух периферийных сгустках.

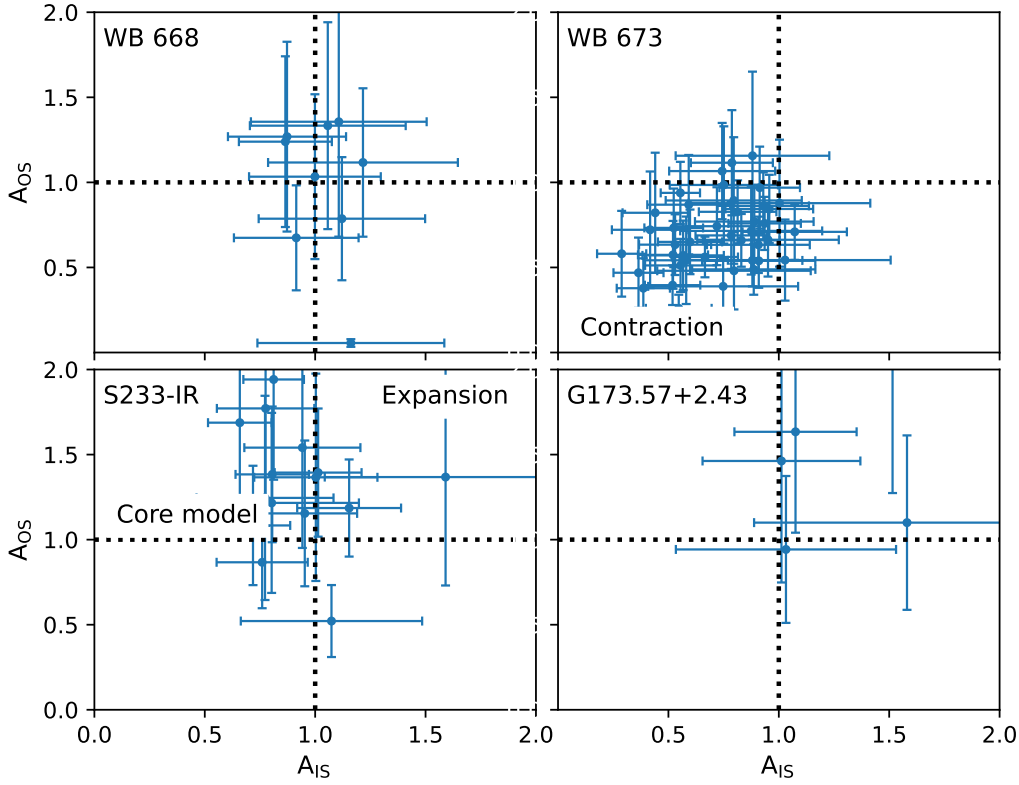


Рисунок 2.9 — Аномалии сверхтонкой структуры в плотных сгустках волокна WB 673.

2.2.3 Аномалии сверхтонкой структуры линий аммиака

Для анализа аномалий сверхтонкой структуры линий аммиака были построены диаграммы рассеяния A_{IS} и A_{OS} , см. Рис. 2.9. Прерывистые линии делят диаграмму на четыре отдельных квадранта, в которые соответствуют разным моделям (см. п. 1.3.2).

Большинство значений A_{IS} и A_{OS} сгустка WB 673 соответствуют модели локального градиента скорости, показывающей сжатие сгустка (левый нижний квадрант) [96]. Для сгустка S233-IR точки лежат в верхнем левом квадранте с $A_{IS} < 1$ и $A_{OS} > 1$, что соответствует модели молекулярного облака, состоящего из неразрешенных плотных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности телескопа, окруженных более разреженным газом [95]. Так же несколько точек лежат в квадранте, соответствующем расширению сгустка. Значения аномалий в периферийных сгустках WB 668 и G173.57+2.43 в

пределах ошибок ≈ 1 . Низкий уровень отношения сигнал-шум в не позволяет исследовать динамику газа в сгустках WB 668 и G173.57+2.43.

Резюме анализа излучения в линиях аммиака в волокне WB 673

В разделе проведен анализ линий излучения аммиака в плотных сгустках волокна WB 673. По результатам анализа получено:

- Пики излучения в линиях аммиака соответствуют пикам излучения пыли 1.1 мм. Линии аммиака обладают умеренной оптической толщиной с $0.8 \leq \tau_{(1,1)} \leq 1.8$ в пиках излучения.
- Определены лучевая концентрация и относительное обилие аммиака. Значения $N(\text{NH}_3)$ в наиболее плотных частях сгустков примерно равны и достигают $\approx (1 - 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.
- Определены температура газа и объемная плотность водорода. Плотность водорода достигает $\approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в центральных сгустках, $\approx 1.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в периферийных сгустках. Температура во всех сгустках не превышает 30 К.
- Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения $\text{NH}_3 (1,1)$. Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых сгустков размером меньше диаграммы направленности, окруженных менее плотным газом.

2.3 Физические условия в волокне G351.78-0.54

2.3.1 Лучевая концентрация

Для волокна G351.78-0.54 были получены лучевые концентрации молекул C^{18}O и N_2H^+ . Для определения лучевых концентраций было сделано предполо-

жение, что температура газа равна температуре пыли, и в расчетах использовалась температура пыли по данным излучения пыли в диапазоне 160–500 μm , полученным на телескопе им. Гершеля. Температура определена методом, описанным в работе [110]. Предположение $T_{\text{kin}} = T_{\text{dust}}$ верно в плотных регионах ($n(\text{H}_2) \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$), экранированных от жесткого ИК-излучения [111].

Была получена карта лучевой концентрации молекул H_2 из лучевой концентрации молекул C^{18}O с использованием постоянного соотношения $2.0 \cdot 10^{-7}$ [88]. Далее была получена карта обилия молекул N_2H^+ по отношению к H_2 . Видно, что в направлении яркого ИК-источника IRAS 17233–3606 обилие N_2H^+ падает.

С учетом неопределенностей температуры пыли и интегральной интенсивности линий молекулы C^{18}O получаем, что погрешность $N(\text{C}^{18}\text{O})$ не превышает 5%, а в направлении плотных сгустков с высоким отношением сигнал/шум снижается до 3%. Поскольку интегральная интенсивность провала составляет $\sim 0.3 \text{ К км/с}$, соответствующая лучевая концентрация составляет $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а медиана $N(\text{C}^{18}\text{O})$ составляет $6.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Следовательно, средняя недооценка не превышает 2%. Таким образом, наличие излучения в референтной позиции при наблюдениях, описанное в разделе 1.2.3, не оказывает значительного влияния на оценки плотности и массы газа.

2.3.2 Гравитационные свойства волокна G351.78-0.54

Путем суммирования значения $N(\text{H}_2)$ по поверхности карты излучения, была получена полная масса волокна $1800 \pm 50 M_{\odot}$. Область волокна в расчетах ограничена интегральной интенсивностью линии C^{18}O (2–1) равной 5 К км/с (рис. 1.2). Это примерно соответствует отношению сигнал/шум около 5 для наиболее зашумленных спектров C^{18}O (2–1).

Исследуемая часть волокна имеет длину 3.4 пк, линейная масса составляет $M_{\text{line}} = 529 M_{\odot}/\text{пк}$. Согласно [112], критическая линейная масса для волокна с нетепловыми движениями газа рассчитывается как:

$$M_{\text{line, vir}} = \left[1 + \left(\frac{\sigma_{\text{NT}}}{c_s} \right)^2 \right] \cdot \left[16 \text{ M}_\odot/\text{pc} \cdot \left(\frac{T}{10 \text{ K}} \right) \right], \quad (2.1)$$

где c_s – скорость звука, T – температура и σ_{NT} – дисперсия скорости, определяемая как:

$$\sigma_{\text{NT}} = \sqrt{\frac{\Delta V^2}{8 \ln 2} - \frac{kT}{30m_H}}, \quad (2.2)$$

где ΔV – ширина линии C^{18}O , k – константа Больцмана, m_H – масса атома водорода. Усредненная по волокну ширина линии C^{18}O (2–1) составляет 2.5 км/с, средняя температура – 18 К. Следовательно, критическая линейная масса составляет $M_{\text{line, vir}} = 512 \text{ M}_\odot/\text{pc}$.

С учетом неопределенностей линейная масса M_{line} практически равна критическому значению. Однако в условиях возможного сжатия вещества внутри волокна дисперсия скоростей показывает большие значения, чем при вириальном равновесии, поэтому линейная масса M_{vir} искусственно увеличивается [113]. Следовательно, приведенная оценка является верхним пределом линейной критической массы. С другой стороны, полученное отношение массы к длине также является верхним пределом, поскольку оно не учитывает возможный наклон волокна. В любом случае наблюдения показывают, что происходит процесс фрагментации.

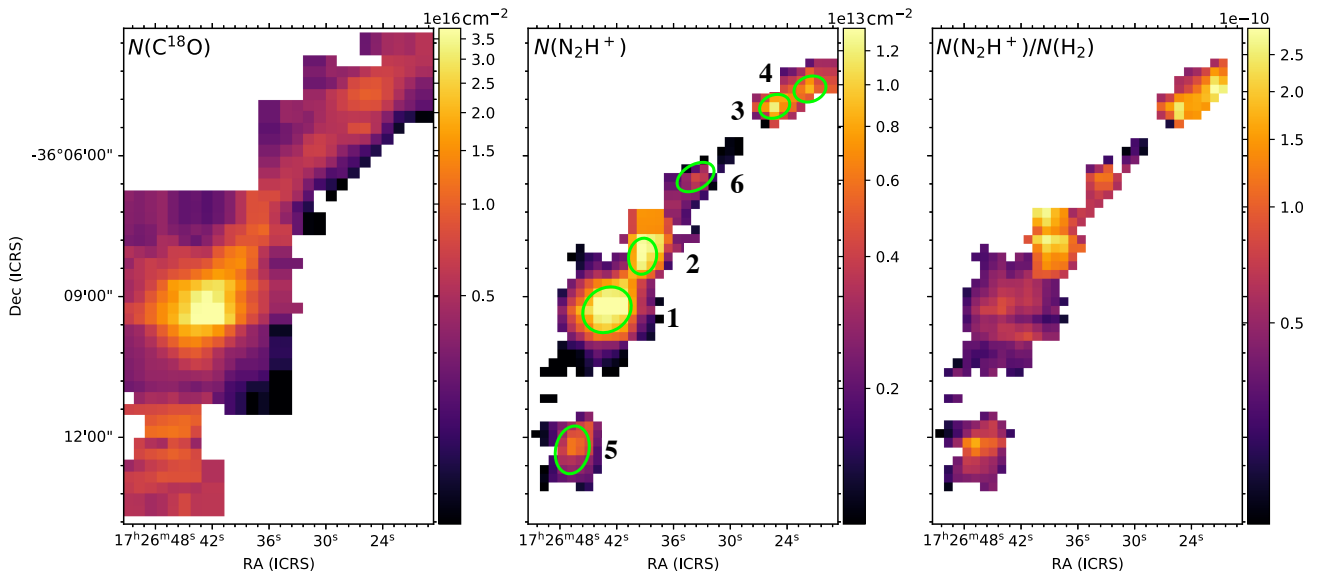


Рисунок 2.10 — Лучевая концентрация C^{18}O и N_2H^+ , обилие N_2H^+ в волокне G351.78-0.54. Эллипсы показывают плотные сгустки, выделенные методом GaussClumps (разд. 2.3.3).

2.3.3 Плотные сгустки газа

Для выделения плотных молекулярных сгустков использовался алгоритм GaussClumps, впервые предложенный в [114]. Алгоритм работает следующим образом: в кубе данных положение-положение-скорость выделяется абсолютный максимум излучения, затем в направлении этого максимума подгоняется трехмерная гауссиана, которая вычитается из исходного куба. После этого ищется следующий максимум с последующей записью и вычитанием. Это происходит до тех пор, пока не будет выполнен критерий завершения алгоритма.

В настоящей работе для идентификации сгустков использовалось излучение индикатора плотного газа N_2H^+ (3–2). Таким образом было найдено шесть сгустков, использовались следующие параметры завершения алгоритма: диаграммы направленности излучения на полувысоте в пикселях = 2.25, скорость на полувысоте 3.0 км/с. Размеры сгустков определяются как ширина на уровне половинной интенсивности абсолютного максимума излучения (FWHM). Визуализация сгустков показана на Рис. 2.10, параметры представлены в Таб. 11.

Таблица 11 — Параметры сгустков волокна G351.78-0.54.

Сгусток	D, пк	T, K	M, $M_\odot$	M_{vir} , $M_\odot$	α_{vir}
1	0.30×0.26	25	635 (25)	889	1.4
2	0.17×0.22	18	173 (13)	235	1.35
3	0.19×0.14	15	84 (9)	130	1.55
4	0.20×0.15	14	57 (8)	100	1.75
5	0.20×0.29	17	160 (13)	121	0.76
6	0.25×0.15	14	77 (9)	166	2.15

Масса газа получена путем суммирования значения лучевой концентрации $N(H_2)$ по поверхности сгустка dA , вириальный параметр сгустков $\alpha_{vir}=M_{vir}/M$ согласно определению в [115]. Для определения массы сгустков была взята температура пыли, полученная по данным телескопа им. Гершеля (разд. 2.3.1). Суммирование проводилось по областям с размерами в два раза больше, чем на рис. 2.10, чтобы проследить большую часть излучения сгустка, так как на

рисунке размеры показаны на уровне половинной интенсивности. Полученные массы представлены в Таб. 11, где D — размер сгустка, M — масса сгустка, M_{vir} — вириальная масса, α_{vir} — вириальный параметр.

Согласно [116], сгустки нестабильны и процессы звездообразования могут начаться, когда вириальный параметр $\alpha_{\text{vir}} \lesssim \alpha_{\text{crit}} \simeq 2$. Согласно полученным значениям, этому критерию удовлетворяют все сгустки, кроме шестого.

Спектры, усредненные по сгусткам, показаны на Рис. 2.11. Синие пунктирные линии показывают системную скорость каждого сгустка V_{LSR} в линии C^{18}O (3–2). Зеленые сплошные линии показывают скорость 3.5 км/с. Оптически толстая линия CO (2–1) имеет сложный широкий спектр с провалами. Максимальная ширина (до 10 км/с) наблюдается в направлении первого сгустка, и такая ширина может свидетельствовать об истечениях в этом направлении. Спектры ^{13}CO $J = 2-1$, 3–2 более узкие. Синяя асимметрия линии ^{13}CO (3–2), наблюдаемая во всех сгустках, указывает на сжатие [117]. На профили линии ^{13}CO (2–1) может влиять излучение в референтной позиции. Тем не менее, они также показывают реальные провалы самопоглощения, по крайней мере, в первом и втором сгустках (около –2 км/с). Оптически тонкая линия C^{18}O имеет еще меньшую ширину и меньшие провалы, а в N_2H^+ (3–2) в направлении первого сгустка провала нет вообще.

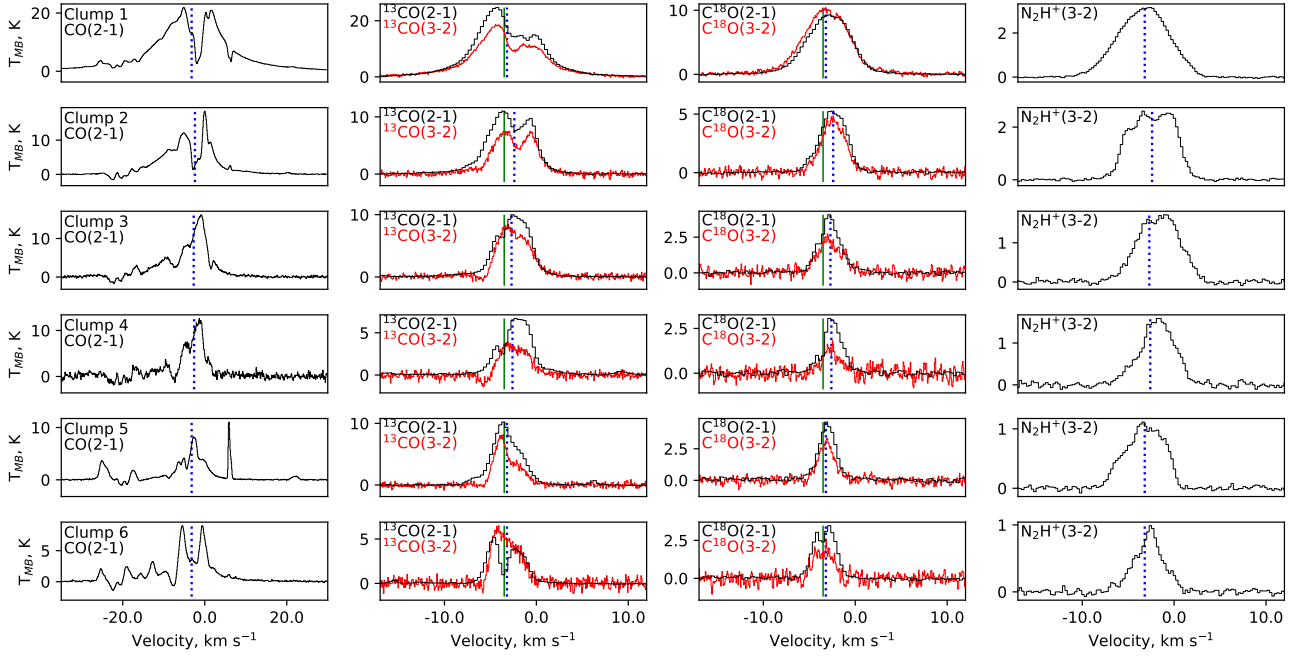


Рисунок 2.11 — Спектры линий CO (2–1), ^{13}CO (2–1), ^{13}CO (3–2), C^{18}O (2–1), C^{18}O (3–2) и N_2H^+ (3–2) в сгустках волокна G351.78-0.54. Прерывистая линия показывает скорость LSR для каждого сгустка согласно линии C^{18}O (3–2), зеленая сплошная линия показывает скорость – 3.5 км/с.

2.3.4 Кинематика газа в волокне

Чтобы изучить кинематику сгустков, были построены карты первого момента (которые соответствуют скорости движения вещества) и ширины линии (полученной в результате подгонки одной гауссианой) в линии N_2H^+ (3–2) для всех сгустков. Карты приведены на Рис. 2.12. В большинстве сгустков наблюдаются градиенты скорости. Ширина линии (ΔV) достигает максимума в центре сгустков, по всей поверхности ширина превышает скорость звука. Ширина линии N_2H^+ (3–2) в 1.2–2.1 раза превышает ширину линии молекулы C^{18}O во всех сгустках. Принимая во внимание тот факт, что критическая плотность перехода N_2H^+ (3–2) значительно превышает критическую плотность других рассмотренных здесь переходов, можно заключить, что дисперсия скоростей возрастает в центральных, наиболее плотных областях сгустков. Это увеличение вряд ли можно объяснить турбулентностью, так как у большинства сгустков отсутствуют мощные источники излучения. Предположительно ширина линий увеличи-

вается из-за вращения и/или сжатия в сгустках. Как упоминалось выше, сгустки связаны с точечными источниками, излучающими в среднем ИК-диапазоне, что указывает на их протозвездную природу. Карты первого момента в линии N_2H^+ (3–2) показывают градиенты скорости в сгустках, которые указывают вращение [70].

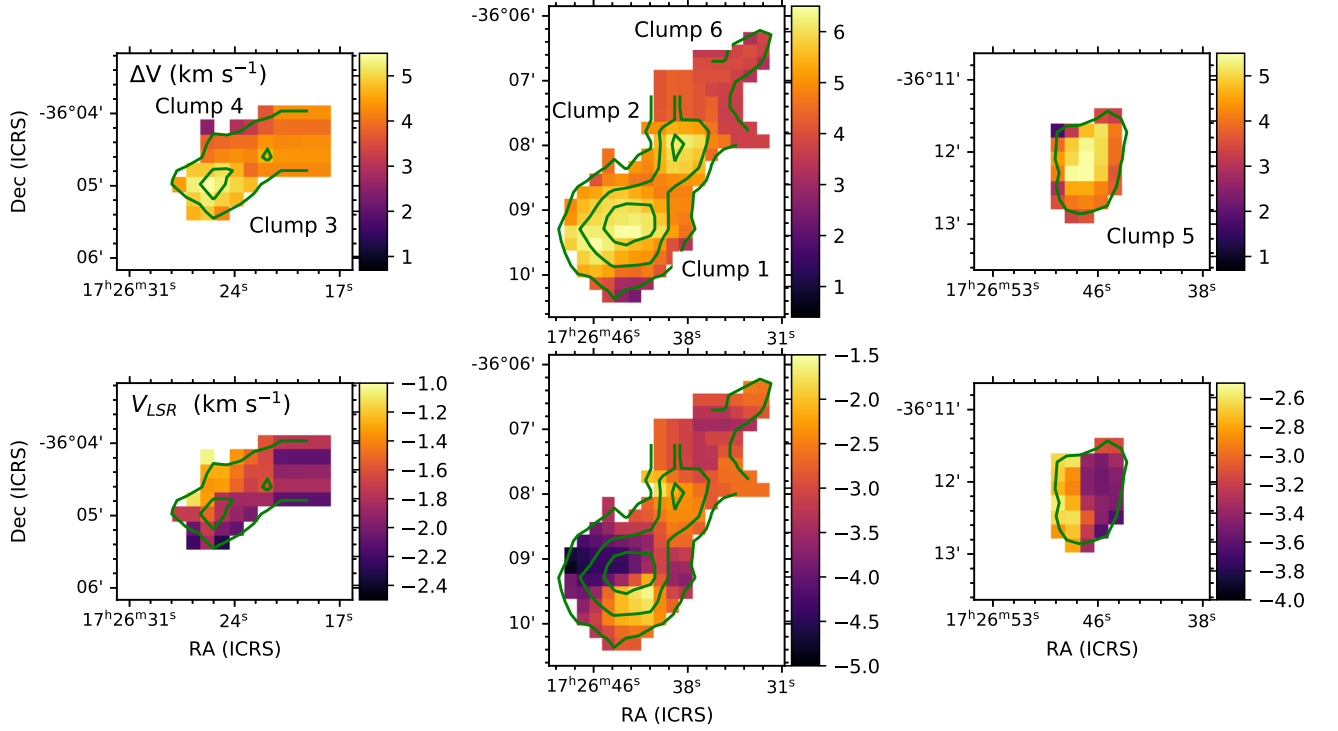


Рисунок 2.12 — Карты первого момента и ширины линии N_2H^+ (3–2) в сгустках волокна G351.78-0.54. Зеленые контуры показывают интегральную интенсивность N_2H^+ на уровнях 3, 10, 20 K км/с.

Следует отметить кажущийся сдвиг скоростей между линией N_2H^+ (3–2) и линиями изотопологов CO в некоторых сгустках. Он особенно заметен в третьем и четвертом сгустках, но также виден и в шестом сгустке. На Рис. 2.13 показано это смещение в третьем сгустке. Разница скоростей ~ 1 км/с. Это указывает на относительное движение плотного и более диффузного газа [66].

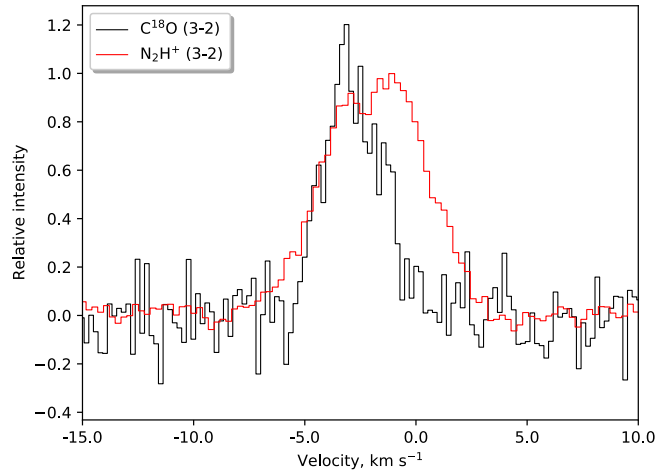


Рисунок 2.13 — Спектры линий C^{18}O (3–2) и N_2H^+ (3–2) в направлении на третий сгусток волокна G351.78–0.54.

2.3.5 Температура газа по линиям молекул CH_3CSH

Линии молекул CH_3CSH наблюдались вдоль всего волокна, однако достаточно яркое излучение зафиксировано только в направлении первого и второго сгустков. Пример вращательной диаграммы в направлении IRAS 17233–3606 показан на Рис. 2.14. В этом направлении обнаружено 7 линий CH_3CSH (13–12), однако первые две линии $J = 13_0 - 12_0$ и $13_1 - 12_1$ сливаются и для них невозможно достоверно определить интегральные интенсивности. Температура по линиям от 13_3-12_3 до 13_6-12_6 составляет 120 ± 2 К. В направлении второго сгустка линии наблюдаются от 13_0-12_0 до 13_3-12_3 , и температура составляет 26 ± 5 К.

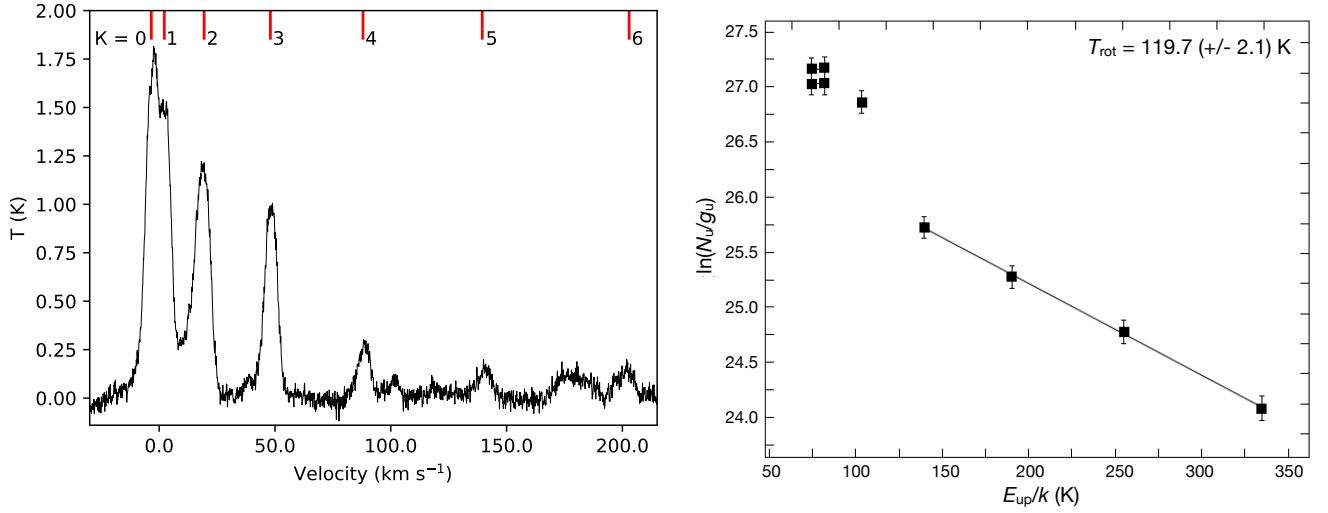


Рисунок 2.14 — Спектр линии CH_3CSH в направлении IRAS 17233–3606 и вращательная диаграмма для него.

Резюме исследования волокна G351.78-0.54

Было выполнено исследование волокна G351.78–0.54 с помощью радиотелескопа APEX. Были проанализированы карты линий CO (2–1), ^{13}CO (2–1), C^{18}O (2–1), ^{13}CO (3–2), C^{18}O (3–2), N_2H^+ (3–2), CH_3CSH ($13_K - 12_K$). Основные результаты следующие:

1. Построены карты лучевой концентрации молекул C^{18}O и N_2H^+ . Общая масса волокна оценивается в $\sim 1800 M_\odot$. Линейная масса ($M_{\text{line}} = 529 M_\odot/\text{pc}$) близка к критическому значению. Наличие нескольких плотных сгустков вдоль волокна свидетельствует о том, что идет процесс фрагментации.
2. По данным излучения N_2H^+ (3–2) выделены шесть плотных сгустков. Их массы и вириальные параметры были получены из данных C^{18}O (2–1) в предположении, что температура газа равна температуре пыли, полученной из данных, полученных на телескопе им. Гершеля. Все сгустки, кроме одного, являются гравитационно неустойчивыми. Для двух сгустков были получены оценки температуры газа по вращательным диаграммам CH_3CSH . Температура газа в направлении первого сгустка в 5 раз выше, чем температура пыли, в направлении второго сгустка температуры газа и пыли совпадают в пределах ошибок.

В первом сгустке, содержащем яркий ИК-источник IRAS 17233-3606, вращательная температура CH_3CSH составляет около 120 К.

3. Ширина линий N_2H^+ (3–2) значительно больше ширины линии C^{18}O (2–1), что указывает на более высокую дисперсию скоростей в более плотных частях сгустков, что, скорее всего, связано с вращением или сжатием сгустка. В некоторых сгустках наблюдается сдвиг скоростей ~ 1 км/с между N_2H^+ (3–2) и линиями изотопологов молекулы CO. Это указывает на относительное движение плотного и более диффузного газа.

Положения, выносимые на защиту по результатам первой и второй глав

В результате проделанной работы на защиту выносятся следующие положения:

1. По результатам наблюдений получены карты излучения в линиях N_2H^+ (1–0), HNC (1–0), HCN (1–0), HNC (1–0) и NH_3 (1,1) в четырех плотных сгустках межзвездного волокна WB 673. Построены карты лучевых концентраций и относительных обилий молекул CS, CO, N_2H^+ , HNC, HCN, NH_3 . Показано, что обилия молекул в центральных частях сгустков систематически ниже чем на периферии на 20–40%.
2. Определены физические условия, а именно: плотность и температура газа в плотных сгустках волокна WB 673 по линиям аммиака. Плотность водорода и температура достигают $\approx 2 \cdot 10^4$ см⁻³ и 30 К, соответственно. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линии излучения аммиака. Аномалии указывают на процесс сжатия центрального сгустка WB 673 и на мелкомасштабную структуру сгустка S233-IR, которая описывается наличием малых плотных компонентов, неразрешимых диаграммой направленности телескопа, окруженных менее плотным газом.
3. Оценены физические параметры волокна G351.78-0.54 по данным излучения молекул CO и его изотопологов, N_2H^+ и CH_3CSH . Показано,

что масса и линейная масса волокна близки к критическим вириальным значениям и происходит фрагментация волокна. Выделены шесть плотных сгустков волокна G351.78-0.54, получены их массы и вириальные массы. Показано, что все сгустки, кроме одного, являются гравитационно неустойчивыми. Высокая дисперсия скоростей в плотных частях сгустков связана с вращением или сжатием сгустков. Определена вращательная температура CH_3CSH в направлении первого и второго сгустков, температура составляет 120 ± 2 и 26 ± 5 К соответственно.

Глава 3. Астрохимическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673

В Главе 1 показаны результаты наблюдений волокна WB 673 в радиолиниях молекул CO, CS, N_2H^+ , HCN, HNC и NH_3 . По этим данным были построены карты физических параметров волокна, таких как температура газа, плотность водорода и лучевая концентрация молекул CO, CS, HCN, HNC, N_2H^+ и NH_3 , которые приведены в Главе 2. С полученным набором наблюдательных данных в Главе 3 проводится химическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673.

3.1 Моделирование химической эволюции плотных сгустков волокна WB 673

3.1.1 Описание модели

Для химического моделирования была использована модель Presta [30]. В диссертации модель включает как газофазные, так и твердофазные процессы, взятые из базы данных ALCHEMIC [118] с дополнениями, описанными в работе [119]. Для моделирования плотных сгустков волокна Presta включала в себя 582 компонента и 4524 газофазных реакции. Исходный химический состав газа был взят из работы [120] и представлен в таблице 12. Работа модели начинается с атомарного начального содержания, за исключением молекулярного водорода H_2 . Была смоделирована химическая эволюция плотных сгустков в течение 10^8 лет.

Одномерная модель представляет собой сферически-симметричные слои, где профили параметров задаются в зависимости от расстояния до центра сгустка. В результате модель дает радиальные профили обилий разных молекул в разные моменты времени. Однако из наблюдений известна лучевая концентрация молекул (см. разделы 2.1 и 2.2). Чтобы перейти от обилий к лучевым кон-

центрациям, обилия в модели были суммированы по радиальному профилю и умножены на лучевую концентрацию водорода.

Таблица 12 — Начальные обилия компонент химической модели по отношению к атомарному водороду.

Элемент	Обилие
H ₂	0.5
He	$9.0 \cdot 10^{-2}$
C	$7.3 \cdot 10^{-5}$
N	$2.1 \cdot 10^{-5}$
O	$1.7 \cdot 10^{-4}$
Cl	$1.0 \cdot 10^{-9}$
S	$8.0 \cdot 10^{-8}$
Si	$8.0 \cdot 10^{-9}$
Fe	$3.0 \cdot 10^{-9}$

Физические параметры сгустков для моделирования были заданы в предположении сферической симметрии, несмотря на более сложную структуру плотных ядер (см. разделы 2.1 и 2.2). Такой подход оправдан, так как все сгустки в наблюдениях представляются изолированными плотными ядрами, окруженными менее плотными оболочками, и в картинной плоскости напоминают проекции сферических оболочек. На карте плотности водорода (Рис. 2.8) были построены и затем усреднены по углу радиальные профили из точки наибольшей лучевой концентрации водорода. После чего усредненные профили плотности были приближены степенной функцией [7]:

$$n(r) = \frac{n_0}{(1 + (r/r_0)^2)^{p/2}}, \quad (3.1)$$

где n_0 — плотность в центре сгустка, r_0 — радиус плоской внутренней области, p — показатель степени при $r > r_0$. Плоская внутренняя область означает, что при радиусе меньше r_0 плотность равна n_0 . Получившиеся параметры приведены в таблице 13. Поскольку диапазон температур в сгустках невелик, для моделей была принята постоянная температура $T = 20$ К. Модель с плотностью, опи-

санной степенной функцией, и средней температурой $T = 20$ К принималась за эталонную, соответствующую наблюдениям.

Таблица 13 — Параметры радиального распределения плотности водорода в сгустках волокна WB 673.

Сгусток	n_0 10^3 см^{-3}	r_0 пк	p —
WB 668	7.4	0.126	0.20
WB 673	13.3	0.219	0.40
S233-IR	16.9	0.014	0.11
G173.57+2.43	12.8	0.040	0.35

3.1.2 Результаты моделирования

Профили плотности водорода $n(\text{H}_2)$ для сгустков WB 673, WB 668, S233-IR и G173.57+2.43 показаны на Рис. 3.1 – 3.4 соответственно. На Рис. 3.1 для сгустка WB 673 также показаны радиальные профили лучевых концентраций CO, CS, HCN, HNC, N_2H^+ и NH_3 , усредненные аналогично профилю $n(\text{H}_2)$. Бары ошибок по радиальным профилям показывают разброс неусредненных значений. Для остальных сгустков отсутствуют данные излучения в линиях HCN и HNC, поэтому в анализе они не используются.

В эталонной модели было принято, что УФ-поле внутри и снаружи облака несущественно, потому что в окрестностях волокна нет мощных источников УФ-излучения. Скорость ионизации космическими лучами составляла $\zeta = 1.3 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ [121] для каждого сгустка.

В результате моделирования были получены профили лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , HCN и HNC. На Рис. 3.1 – 3.4 показаны модельные лучевые концентрации цветными сине-зелено-желтыми линиями. Видно, что модельные лучевые концентрации CS и CO в основном ниже, чем наблюдательные (черные точки с барами ошибок), а модельные концентрации для HCN и HNC в основном выше на 2–3 порядка величины. При этом для моле-

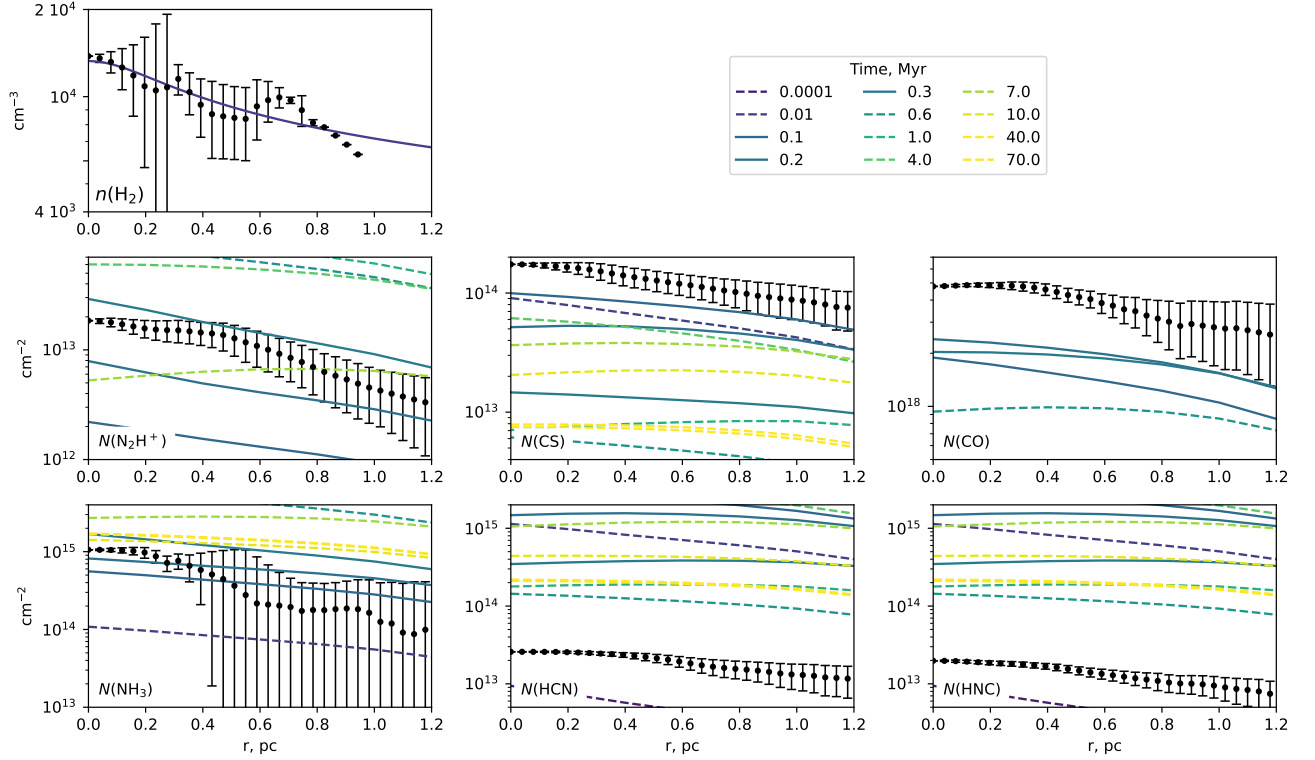


Рисунок 3.1 — Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO , CS , NH_3 , HCN и HNC в сгустке WB 673 (черные точки с барами ошибок). Панель с $n(\text{H}_2)$ так же показывает вписанную степенную функцию. Цветные сине-зелено-желтые линии на панелях с лучевыми концентрациями показывают результаты модели Presta в разные моменты времени.

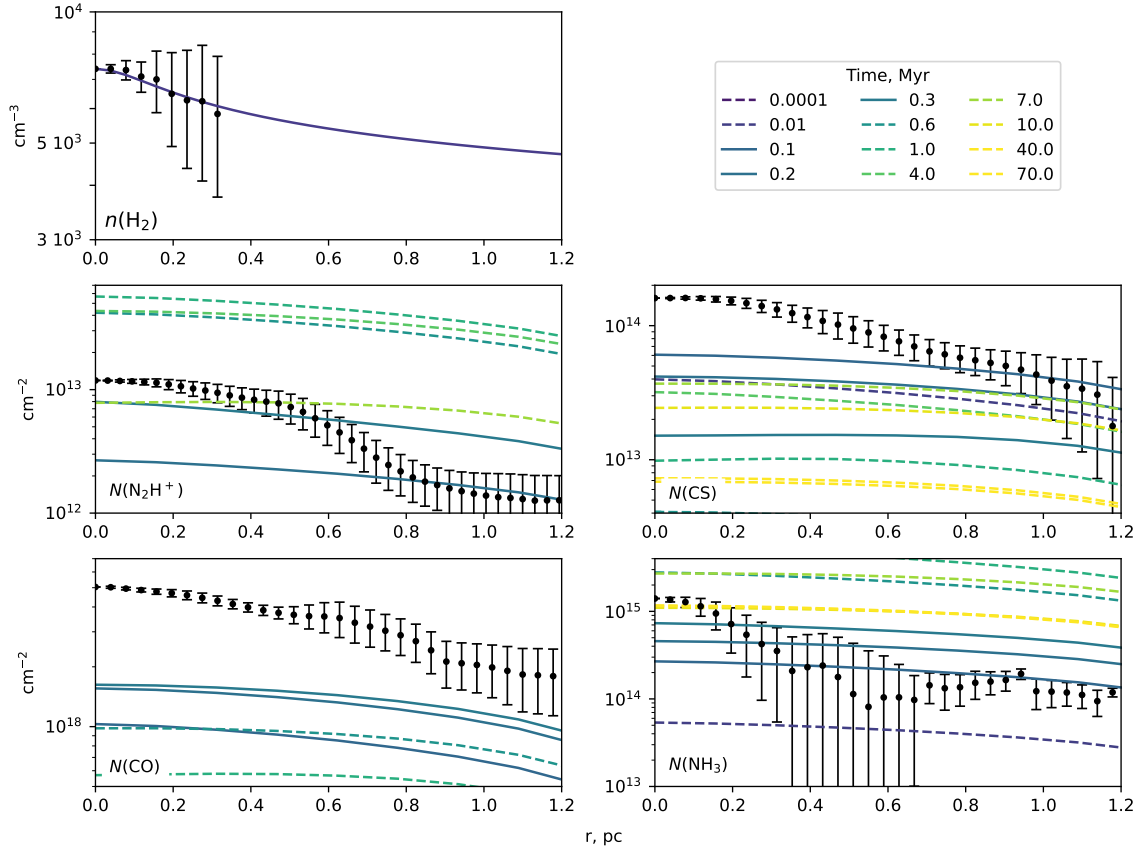


Рисунок 3.2 — Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , в сгустке WB 668. Обозначения как на Рис. 3.1.

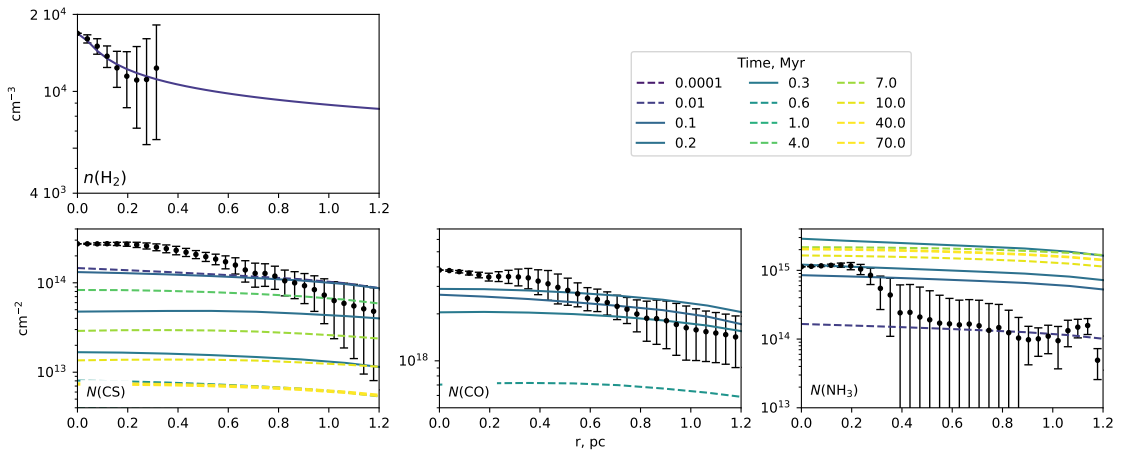


Рисунок 3.3 — Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул CO, CS и NH_3 в сгустке S233-IR. Обозначения как на Рис. 3.1.

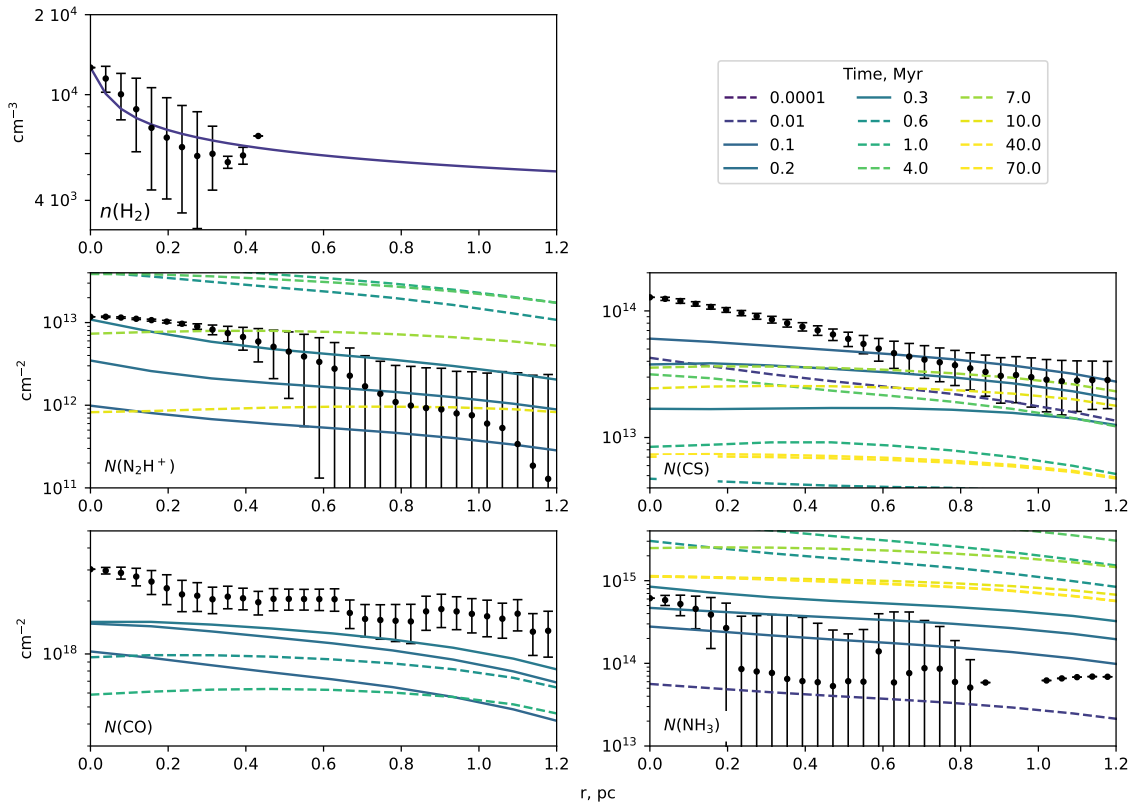


Рисунок 3.4 — Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS и NH_3 в сгустке G173.57+2.43. Обозначения как на Рис. 3.1.

кул N_2H^+ , CO, CS и NH_3 модельные лучевые концентрации, соответствующие модельному возрасту облака 100–300 тыс. лет (сплошные линии) наилучшим образом соответствуют наблюдательным данным.

Для проверки соответствия модельной лучевой концентрации молекул (N_{model}) с наблюдательными значениями (N_{obs}) был введен критерий соответствия Σ . Если отношение между значениями N_{obs} и N_{model} было меньше порядка величины во всех точках по радиусу сгустка, то модель и наблюдения считались согласованными и $\Sigma = 1$. В противном случае $\Sigma = 0$. Такой критерий вычислялся для каждой рассматриваемой молекулы для каждого момента времени. Таким образом, для определенного момента времени наибольшее значение Σ говорит о наилучшем соответствии между моделью и наблюдением.

Используя модель Presta и проверяя критерии соответствия на каждом временном шаге, был найден химический возраст, когда модельные и наблюдаемые лучевые концентрации молекул находятся в наилучшем согласии и Σ принимает наибольшее значение.

Моделирование проводилось для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к эталонной (с физическими параметрами, соответствующими наблюдениям) модели. А именно, в модели использовались более низкие и более высокие температуры (до ± 10 К в каждой расчетной ячейке), плотность (варьировалась до одного порядка), также были рассмотрены модели с дополнительной длительной ($5 \cdot 10^5$ лет) предшествующей холодной стадией при температуре $T = 10$ К, характерной для темных молекулярных облаков (например, [122]). Однако проведенное моделирование показало, что наилучшее соответствие достигается при эталонной модели, описанной выше.

3.1.3 Обсуждение результатов моделирования

Двухфазные (газо-пылевые) астрохимические модели молекулярных облаков показывают два режима эволюции межзвездного молекулярного облака, при которых доминируют различные химические соединения: «ранний» и «поздний» [39; 123; 124]. Такие молекулы, как CO и CS, быстро образуются в газовой фазе и становятся индикаторами «ранней» химии. «Поздние» молекулы

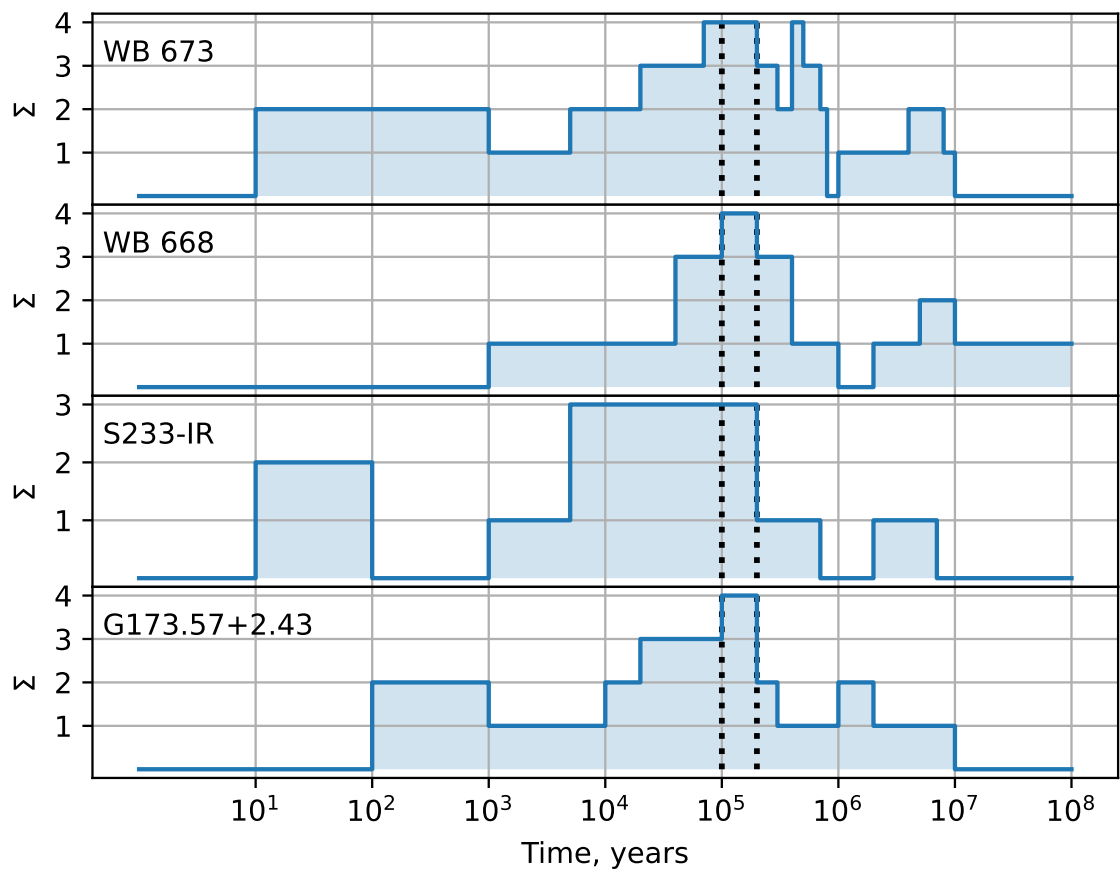


Рисунок 3.5 — Критерий соответствия моделей Σ для сгустков волокна WB 673.

N_2H^+ и NH_3 образуются после аккреции CO на холодные пылинки. Таким образом, стадия уменьшения «ранних» и увеличения «поздних» молекул, имеющая место в наших моделях в момент времени $t = (1 - 3) \cdot 10^5$ лет, представляет собой переход между двумя химическими режимами, см. Рис. 3.1.

Как видно на Рис. 2.3 и 2.8, обилия практически всех молекул уменьшаются в центральной части сгустков. Это может быть связано с их вымораживанием на поверхности пылинок и обычно наблюдается в темных беззвездных облаках. Однако плотные сгустки в этом исследовании демонстрируют признаки образования массивных звезд: водяные мазеры, мазеры CH_3OH , источники IRAS и MSX и молодые звездные скопления (см. пункт 1.1.1). Несоответствие между наличием признаков звездообразования и химией, типичной для холодных дозвездных ядер в сгустках, можно объяснить высокой плотностью молекулярного газа, окружающего молодые звездные объекты. Повышение температуры, связанное с активным звездообразованием, недостаточно для прогрева молекулярных сгустков.

Результат о быстром звездообразовании подтверждает идею образования волокон после многократного сжатия остатками сверхновых или областями Н II. Это соответствует гравитационной модели межзвездной среды. Согласно этой модели, плотные молекулярные облака образуются в результате турбулентных движений газа в межзвездной среде. Турбулентность может быть вызвана различными факторами, такими как взрывы сверхновых, звездный ветер, давление от расширяющихся областей Н II столкновения газовых потоков и т.д. Эти движения создают области повышенной плотности и давления, которые в свою очередь приводят к гравитационному сжатию плотных сгустков [125–127].

В работе [128] найден молодой остаток сверхновой в направлении G174+2.5, возраст которой составляет $\sim 3,3 \cdot 10^5$ лет. В работе [42] показано, что волокно расположено на границе протяженной слабой инфракрасной оболочки, происхождение которой до сих пор неизвестно. Химический возраст волокна аналогичен возрасту остатка сверхновой, поэтому нельзя исключить его влияние на формирование волокна. Область Н II S231 расположена на восточной стороне волокна. Отметим более плотное расположение областей звездообразования в тех частях волокна, которые граничат с областью Н II. Этот факт косвенно подтверждает влияние S231 на звездообразование в волокне.

Резюме моделирования химической эволюции плотных сгустков волокна WB 673

В Главе 3 приведены результаты астрохимического моделирования плотных сгустков волокна WB 673. Результаты модели сравнивались с наблюдательными лучевыми концентрациями молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , HCN и HNC. Моделирование проводилось для широкого диапазона входных параметров, варьируемых по отношению к эталонной (с физическими параметрами, соответствующими наблюдениям) модели. В результате моделирования определено, что химический возраст сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 одинаков и составляет $t = (1 - 3) \cdot 10^5$ лет.

Положение, выносимое на защиту по результатам третьей главы

В результате проделанной работы на защиту выносится следующее положение:

1. Определен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673. Впервые возраст волокна определен одновременно по обилиям четырех молекул. Показано, что возраст всех четырех сгустков составляет $t = (1 - 3) \cdot 10^5$ лет. Полученное значение возраста согласуется с парадигмой быстрого звездообразования в гравитационно-турбулентной модели межзвездной среды.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Проведены наблюдения на телескопе в Онсала (Швеция) и построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0) и HCN(1–0) в плотных сгустках WB 673, WB 668, S233-IR, G173.57+2.43, проведен анализ распределения газа. Пики излучения в линиях молекул совпадают в пиками излучения пыли на длине волны 1.1 мм. Также определены лучевые концентрации, обилия молекул относительно водорода. Построены карты лучевых концентраций молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, и H₂.
2. Построены карты распределения обилий молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC и HCN в плотных сгустках волокна WB 673; показано, что обилия CO и CS во всех сгустках, а также HCN и HNC в центральном сгустке, уменьшаются в направлении наиболее плотной центральной части. Для распределения обилия молекулы N₂H⁺ наблюдается градиент в направлении с северо-востока на юго-запад в сгустках WB 673 и G173.57+2.43, и противоположный — в сгустке WB 668.
3. Пики излучения в линиях аммиака соответствуют пикам излучения пыли на 1.1 мм. Линии аммиака обладают умеренной оптической толщиной с $0.8 \leq \tau_{(1,1)} \leq 1.8$ в пиках излучения.
4. С использованием подхода ЛТР определены лучевая концентрация и относительное обилие аммиака. Значения $N(\text{NH}_3)$ в наиболее плотных частях сгустков примерно равны и достигают $\approx (1 - 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.
5. Определены температура газа и объемная плотность водорода. Плотность водорода достигает $\approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в центральных сгустках, $\approx 1.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ в периферийных сгустках. Температура во всех сгустках не превышает 30 K.
6. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH₃(1,1). Аномалии указывают на сжатие сгустка WB 673 и на структуру S233-IR, которая описывается наличием неразрешенных малых

сгустков размером меньше диаграммы направленности ($42''$), окруженных менее плотным газом.

7. Построены карты лучевой концентрации молекул C^{18}O и N_2H^+ волокна G351.78-0.54. Общая масса волокна оценивается в $\sim 1800 M_\odot$. Линейная масса ($M_{\text{line}} = 529 M_\odot/\text{pc}$) близка к критическому значению. Наличие нескольких плотных сгустков вдоль волокна свидетельствует о том, что идет процесс фрагментации. Обилие N_2H^+ близко к типичным значениям, но падает в сторону яркого ИК-источника IRAS 17233–3606 в первом сгустке.
8. По линиям излучения N_2H^+ (3–2) волокна G351.78-0.54 выделены шесть плотных сгустков. Их массы и вириальные параметры были получены из данных C^{18}O (2–1) в предположении, что температура газа равна температуре пыли, полученной из данных телескопа им. Гершеля. Все сгустки, кроме одного, являются гравитационно неустойчивыми. Для двух сгустков были получены оценки температуры по вращательным диаграммам молекулы CH_3CCH . В первом сгустке, содержащем светящийся ИК-источник IRAS 17233-3606, вращательная температура CH_3CCH составляет около 120 K.
9. Ширина N_2H^+ (3–2) линий больше ширины линии N_2H^+ (1–0) и C^{18}O (2–1), что указывает на более высокую дисперсию скоростей в более плотных частях сгустков, что связано с вращением или сжатием. В некоторых сгустках волокна G351.78-0.54 наблюдается сдвиг скоростей ~ 1 км/с между линией N_2H^+ (3–2) и линиями изотопологов CO. Это указывает на относительное движение плотного и более диффузного газа и может быть вызвано внешним фактором.
10. Проведено астрохимическое моделирование плотных сгустков волокна WB 673. Результаты модели сравнивались с наблюдаемыми лучевыми концентрациями молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , HCN и HNC. В результате моделирования определено, что химический возраст сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 одинаков и составляет $t = 1 - 3 \cdot 10^5$ лет.

В дальнейшем планируется подробно исследовать плотные сгустки вблизи волокна WB 673, которые подвергаются воздействию расширяющихся областей ионизированного водорода и тех, что находятся вдали от источников ударных

волн и ионизирующего излучения. Это позволит сравнить химический возраст и химическую эволюцию сгустков, находящихся в различных физических условиях. Таким образом будет проведена оценка влияния внешних факторов на процессы звездообразования.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Кирсановой Марии Сергеевне за помощь и поддержку в процессе научных исследований. Ваша экспертиза и наставничество внесли неоценимый вклад в проделанную работу.

Так же автор благодарит других старших коллег и наставников, которые помогали в работе и делились опытом: Зинченко И. И., Вибе Д. З. и Павлюченкова Я. Н.

Хотелось бы выразить благодарность за полезные дискуссии коллегам из ЧелГУ и УрФУ: Хайбрахманову С. А., Ладейщикову Д. А. и Соболеву А. М. Огромная благодарность Винен М. и Хенкелю К. за помощь в проведении наблюдений на телескопе Эффельсберг, а так же ценные комментарии по текстам совместных статей.

Кроме того, автор выражает благодарность друзьям и коллегам из ИНАСАН: Сизовой М. С., Максимовой Л. А., Плакитиной К. В., Калининской Е. С. за поддержку в моменты неизбежных сложностей при работе.

Отдельно хотелось бы выразить благодарность моему учителю физики Сергееву Александру Анатольевичу из МБОУ Воротынской средней школы за то, что привил любовь к своему предмету и дал достаточно знаний и уверенности для дальнейшего образовательного процесса.

Список литературы

1. *Каплан С., Пикельнер С.* Физика межзвездной среды. — Москва : Наука, 1979.
2. *Draine B. T.* Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium. — 2011.
3. *Засов А., Постнов К.* Общая астрофизика. Издание 2-е, исправл. и дополн. — Фрязино : Век 2, 2011.
4. *Бисноватый-Коган Г.* Физические вопросы теории звездной эволюции. — Москва : Наука, 1989.
5. *Schneider S., Elmegreen B. G.* A catalog of dark globular filaments. // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1979. — Vol. 41. — P. 87–95.
6. Magnetically Dominated Strands of Cold Hydrogen in the Riegel-Crutcher Cloud / N. M. McClure-Griffiths, J. M. Dickey, B. M. Gaensler, A. J. Green, M. Haverkorn // Astrophysical Journal. — 2006. — T. 652, № 2. — С. 1339–1347.
7. 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.-I. Inutsuka, R. E. Pudritz, J. E. Pineda // Protostars and Planets VI. — 2014. — С. 27–51.
8. Characterizing the properties of nearby molecular filaments observed with Herschel / D. Arzoumanian, P. André, V. Könyves, P. Palmeirim, A. Roy, N. Schneider, M. Benedettini, P. Didelon, J. Di Francesco, J. Kirk, B. Ladjelate // Astronomy & Astrophysics. — 2019. — T. 621. — A42.
9. Filamentary structure and magnetic field orientation in Musca / N. L. J. Cox, D. Arzoumanian, P. André, K. L. J. Rygl, T. Prusti, A. Men'shchikov, P. Royer, Á. Kóspál, P. Palmeirim, A. Ribas, V. Könyves, J. -. Bernard, N. Schneider, S. Bontemps, B. Merin, R. Vavrek, C. Alves de Oliveira, P. Didelon, G. L. Pilbratt, C. Waelkens // Astronomy & Astrophysics. — 2016. — T. 590. — A110.

10. Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: High-resolution submillimeter imaging of the massive star-forming complex NGC 6334 with ArTéMiS / P. André, V. Revéret, V. Könyves, D. Arzoumanian, J. Tigé, P. Gallais, H. Roussel, J. Le Penneç, L. Rodriguez, E. Doumayrou, D. Dubreuil, M. Lortholary, J. Martignac, M. Talvard, C. Delisle, F. Visticot, L. Dumaye, C. De Breuck, Y. Shimajiri, F. Motte, S. Bontemps, M. Hennemann, A. Zavagno, D. Russeil, N. Schneider, P. Palmeirim, N. Peretto, T. Hill, V. Minier, A. Roy, K. L. J. Rygl // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — T. 592. — A54.
11. *Inutsuka S.-i., Miyama S. M.* A Production Mechanism for Clusters of Dense Cores // *Astrophysical Journal*. — 1997. — T. 480, № 2. — C. 681—693.
12. Lowering the Characteristic Mass of Cluster Stars by Magnetic Fields and Outflow Feedback / Z.-Y. Li, P. Wang, T. Abel, F. Nakamura // *Astrophysical Journal*. — 2010. — T. 720, № 1. — C. L26—L30.
13. *Hartmann L.* Flows, Fragmentation, and Star Formation. I. Low-Mass Stars in Taurus // *Astrophysical Journal*. — 2002. — T. 578, № 2. — C. 914—924.
14. The statistics of triggered star formation: an overdensity of massive young stellar objects around Spitzer bubbles / M. A. Thompson, J. S. Urquhart, T. J. T. Moore, L. K. Morgan // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — T. 421, № 1. — C. 408—418.
15. The Milky Way Project and ATLASGAL: The Distribution and Physical Properties of Cold Clumps Near Infrared Bubbles / S. Kendrew, H. Beuther, R. Simpson, T. Csengeri, M. Wienen, C. J. Lintott, M. S. Povich, C. Beaumont, F. Schuller // *Astrophysical Journal*. — 2016. — T. 825, № 2. — C. 142.
16. Protostars in Perseus: Outflow-induced Fragmentation / M. Barsony, D. Ward-Thompson, P. André, J. O’Linger // *Astrophysical Journal*. — 1998. — T. 509, № 2. — C. 733—748.
17. *Shematovich V. I., Shustov B. M., Wiebe D. S.* Self-consistent model of chemical and dynamical evolution of protostellar clouds // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1997. — T. 292, № 3. — C. 601—610.

18. *Krumholz M. R., Matzner C. D.* The Dynamics of Radiation-pressure-dominated H II Regions // *Astrophysical Journal*. — 2009. — T. 703, № 2. — C. 1352—1362.
19. *ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures / G.-X. Li, J. S. Urquhart, S. Leurini, T. Csengeri, F. Wyrowski, K. M. Menten, F. Schuller* // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — T. 591. — A5.
20. *An ALMA study of the Orion Integral Filament. I. Evidence for narrow fibers in a massive cloud / A. Hacar, M. Tafalla, J. Forbrich, J. Alves, S. Meingast, J. Grossschedl, P. S. Teixeira* // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — T. 610. — A77.
21. *Stahler S. W., Palla F.* The Formation of Stars. — 2004.
22. *Kauffmann J., Pillai T., Goldsmith P. F.* Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields // *Astrophysical Journal*. — 2013. — T. 779, № 2. — C. 185.
23. *The Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS, in the Virtual Atomic and Molecular Data Centre, VAMDC / C. P. Endres, S. Schlemmer, P. Schilke, J. Stutzki, H. S. P. Müller* // *Journal of Molecular Spectroscopy*. — 2016. — T. 327. — C. 95—104.
24. *Herbst E., Klemperer W.* The Formation and Depletion of Molecules in Dense Interstellar Clouds // *Astrophysical Journal*. — 1973. — Vol. 185. — P. 505—534.
25. *Caselli P.* Deuterated molecules as a probe of ionization fraction in dense interstellar clouds // *Planetary and Space Science*. — 2002. — Vol. 50, no. 12/13. — P. 1133—1144.
26. *Watson W. D.* Ion-Molecule Reactions, Molecule Formation, and Hydrogen-Isotope Exchange in Dense Interstellar Clouds // *Astrophysical Journal*. — 1974. — T. 188. — C. 35—42.
27. *H₂ formation on interstellar dust grains: The viewpoints of theory, experiments, models and observations / V. Wakelam, E. Bron, S. Cazaux, F. Dulieu, C. Gry, P. Guillard, E. Habart, L. Hornekær, S. Morisset, G. Nyman, V. Pirronello, S. D. Price, V. Valdivia, G. Vidali, N. Watanabe* // *Molecular Astrophysics*. — 2017. — T. 9. — C. 1—36.

28. *Watson W. D.* The Rate of Formation of Interstellar Molecules by Ion-Molecule Reactions // *Astrophysical Journal*. — 1973. — Vol. 183. — P. L17.
29. *Schutte W. A., Allamandola L. J., Sandford S. A.* Formaldehyde and Organic Molecule Production in Astrophysical Ices at Cryogenic Temperatures // *Science*. — 1993. — T. 259, № 5098. — C. 1143—1145.
30. Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects / O. V. Kochina, D. S. Wiebe, S. V. Kalenskii, A. I. Vasyunin // *Astronomy Reports*. — 2013. — T. 57, № 11. — C. 818—832.
31. *Vasyunin A. I., Herbst E.* A Unified Monte Carlo Treatment of Gas-Grain Chemistry for Large Reaction Networks. II. A Multiphase Gas-surface-layered Bulk Model // *Astrophysical Journal*. — 2013. — T. 762, № 2. — C. 86.
32. *Ruaud M., Wakelam V., Hersant F.* Gas and grain chemical composition in cold cores as predicted by the Nautilus three-phase model // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — T. 459, № 4. — C. 3756—3767.
33. ATLASGAL: A Galaxy-wide sample of dense filamentary structures / G.-X. Li, J. S. Urquhart, S. Leurini, T. Csengeri, F. Wyrowski, K. M. Menten, F. Schuller //. — 2016. — T. 591. — A5.
34. The Hi-GAL catalogue of dusty filamentary structures in the Galactic plane / E. Schisano, S. Molinari, D. Elia, M. Benedettini, L. Olmi, S. Pezzuto, A. Traficante, M. Brescia, S. Cuvuoti, A. M. di Giorgio, S. J. Liu, T. J. T. Moore, A. Noriega-Crespo, G. Riccio, A. Baldeschi, U. Becciani, N. Peretto, M. Merello, F. Vitello, A. Zavagno, M. T. Beltrán, L. Cambrésy, D. J. Eden, G. Li Causi, M. Molinaro, P. Palmeirim, E. Sciacca, L. Testi, G. Umana, A. P. Whitworth //. — 2020. — T. 492, № 4. — C. 5420—5456.
35. *Rathborne J. M., Jackson J. M., Simon R.* Infrared Dark Clouds: Precursors to Star Clusters //. — 2006. — T. 641. — C. 389—405.
36. *Kauffmann J., Pillai T.* How Many Infrared Dark Clouds Can form Massive Stars and Clusters? //. — 2010. — T. 723, № 1. — C. L7—L12.
37. 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*. — 2014. — C. 149—172.

38. *Motte F., Bontemps S., Louvet F.* High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way // . — 2018. — T. 56. — C. 41–82.
39. *Bergin E. A., Langer W. D.* Chemical Evolution in Preprotostellar and Protostellar Cores // *Astrophysical Journal*. — 1997. — T. 486, № 1. — C. 316–328.
40. A ‘water spout’ maser jet in S235AB-MIR / R. A. Burns, H. Imai, T. Handa, T. Omodaka, A. Nakagawa, T. Nagayama, Y. Ueno // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — T. 453, № 3. — C. 3163–3173.
41. Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions S231-S235 / D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsvilev, A. M. Sobolev // *Astrophysical Bulletin*. — 2016. — T. 71, № 2. — C. 208–224.
42. Molecular gas in high-mass filament WB673 / M. S. Kirsanova, S. V. Salii, A. M. Sobolev, A. O. H. Olofsson, D. A. Ladeyschikov, M. Thomasson // *Open Astronomy*. — 2017. — T. 26, № 1. — C. 99–105.
43. *Wouterloot J. G. A., Brand J.* IRAS sources beyond the solar circle. I. CO observations. // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1989. — T. 80. — C. 149–187.
44. Interferometric multi-wavelength (sub)millimeter continuum study of the young high-mass protocluster IRAS 05358+3543 / H. Beuther, S. Leurini, P. Schilke, F. Wyrowski, K. M. Menten, Q. Zhang // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — T. 466, № 3. — C. 1065–1076.
45. Multi-line (sub)millimetre observations of the high-mass proto cluster IRAS 05358+3543 / S. Leurini, H. Beuther, P. Schilke, F. Wyrowski, Q. Zhang, K. M. Menten // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — T. 475, № 3. — C. 925–939.
46. Massive and luminous YSO IRAS 05361+3539 and its environment. A study of star formation in the parent cloud - I / A. Chakraborty, D. K. Ojha, B. G. Anandarao, T. N. Rengarajan // *Astronomy & Astrophysics*. — 2000. — T. 364. — C. 683–688.
47. Outflows and Massive Stars in the Protocluster IRAS 05358+3543 / A. G. Ginsburg, J. Bally, C.-H. Yan, J. P. Williams // *Astrophysical Journal*. — 2009. — T. 707, № 1. — C. 310–327.

48. Star formation around the HII region Sh2-235 / M. S. Kirsanova, A. M. Sobolev, M. Thomasson, D. S. Wiebe, L. E. Johansson, A. F. Seleznev // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — T. 388, № 2. — C. 729—736.
49. *Camargo D., Bonatto C., Bica E.* A possible sequential star formation in the giant molecular cloud G174+2.5 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2011. — T. 416, № 2. — C. 1522—1534.
50. IRAS 05358+3543: Multiple outflows at the earliest stages of massive star formation / H. Beuther, P. Schilke, F. Gueth, M. McCaughrean, M. Andersen, T. K. Sridharan, K. M. Menten // Astronomy & Astrophysics. — 2002. — T. 387. — C. 931—943.
51. First interferometric study of enhanced N-fractionation in N_2H^+ : the high-mass star-forming region IRAS 05358+3543 / L. Colzi, F. Fontani, P. Caselli, S. Leurini, L. Bizzocchi, G. Quiaia // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — T. 485, № 4. — C. 5543—5558.
52. High-Mass Protostellar Candidates. I. The Sample and Initial Results / T. K. Sridharan, H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Wyrowski // Astrophysical Journal. — 2002. — T. 566, № 2. — C. 931—944.
53. *Porras A., Cruz-González I., Salas L.* Young stellar clusters and H₂ nebulosities in S233IR // Astronomy & Astrophysics. — 2000. — T. 361. — C. 660—670.
54. *Shepherd D. S., Churchwell E.* Bipolar Molecular Outflows in Massive Star Formation Regions // The Astrophysical Journal. — 1996. — T. 472, № 1. — C. 225—239.
55. VizieR Online Data Catalog: MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (October 2003) / M. P. Egan, S. D. Price, K. E. Kraemer, D. R. Mizuno, S. J. Carey, C. O. Wright, C. W. Engelke, M. Cohen, M. G. Gugliotti // VizieR Online Data Catalog. — 2003. — C. V/114.
56. *Wouterloot J. G. A., Brand J., Fiegle K.* IRAS sources beyond the solar circle. III. Observations of H₂O, OH, CH₃OH and CO. // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 1993. — T. 98. — C. 589—636.

57. Classification and statistical properties of galactic H₂O masers. / F. Palagi, R. Cesaroni, G. Comoretto, M. Felli, V. Natale // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1993. — T. 101. — C. 153—193.
58. Water Maser and Ammonia Survey toward IRAS Sources in the Galaxy I. H₂O Maser Data / K. Sunada, T. Nakazato, N. Ikeda, S. Hongo, Y. Kitamura, J. Yang // *Publications of the Astronomical Society of Japan*. — 2007. — T. 59. — C. 1185.
59. The Red MSX Source survey: ammonia and water maser analysis of massive star-forming regions / J. S. Urquhart, L. K. Morgan, C. C. Figura, T. J. T. Moore, S. L. Lumsden, M. G. Hoare, R. D. Oudmaijer, J. C. Mottram, B. Davies, M. K. Dunham // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2011. — T. 418, № 3. — C. 1689—1706.
60. A high-sensitivity 6.7 GHz methanol maser survey toward H₂O sources / Y. Xu, J. J. Li, K. Hachisuka, J. D. Pandian, K. M. Menten, C. Henkel // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — T. 485, № 3. — C. 729—734.
61. A catalogue of H₂O maser sources north of delta = -30. / R. Cesaroni, F. Palagi, M. Felli, M. Catarzi, G. Comoretto, S. Di Franco, C. Giovanardi, F. Palla // *Astronomy and Astrophysics Supplement*. — 1988. — T. 76. — C. 445—458.
62. The catalogues and mid-infrared environment of interstellar OH masers / H. Qiao, J. Li, Z. Shen, X. Chen, X. Zheng // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — T. 441, № 4. — C. 3137—3147.
63. *Vlemmings W. H. T.* A new probe of magnetic fields during high-mass star formation. Zeeman splitting of 6.7 GHz methanol masers // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — T. 484, № 3. — C. 773—781.
64. A search for 5₋₁-6₋₀ A⁺-methanol masers towards faint IRAS sources / D. J. van der Walt, S. J. P. Retief, M. J. Gaylard, G. C. MacLeod // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1996. — T. 282, № 3. — C. 1085—1095.
65. 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 // . — 2017. — T. 603. — A10.
66. The molecular distribution of the IRDC G351.77-0.51 / S. Leurini, T. Pillai, T. Stanke, F. Wyrowski, L. Testi, F. Schuller, K. M. Menten, S. Thorwirth // . — 2011. — T. 533. — A85.
 67. Characterising the high-mass star forming filament G351.776-0.527 with Herschel and APEX dust continuum and gas observations / S. Leurini, E. Schisano, T. Pillai, A. Giannetti, J. Urquhart, T. Csengeri, S. Casu, M. Cunningham, D. Elia, P. A. Jones, C. König, S. Molinari, T. Stanke, L. Testi, F. Wyrowski, K. M. Menten // . — 2019. — T. 621. — A130.
 68. High-mass star formation at sub-50 au scales / H. Beuther, A. Ahmadi, J. C. Mottram, H. Linz, L. T. Maud, T. Henning, R. Kuiper, A. J. Walsh, K. G. Johnston, S. N. Longmore // . — 2019. — T. 621. — A122.
 69. *Antyufeyev O. V., Shulga V. M., Zinchenko I. I.* Bipolar molecular outflow in IRAS 17233-3606 // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2016. — T. 32, № 6. — C. 276—282.
 70. The SiO outflow from IRAS 17233-3606 at high resolution / P. D. Klaassen, K. G. Johnston, S. Leurini, L. A. Zapata // . — 2015. — T. 575. — A54.
 71. High-mass star formation in the IRAS 17233-3606 region: a new nearby and bright hot core in the southern sky / S. Leurini, C. Hieret, S. Thorwirth, F. Wyrowski, P. Schilke, K. M. Menten, R. Güsten, L. Zapata // . — 2008. — T. 485, № 1. — C. 167—175.
 72. On the kinematics of massive star forming regions: the case of IRAS 17233-3606 / S. Leurini, C. Codella, L. Zapata, M. T. Beltrán, P. Schilke, R. Cesaroni // . — 2011. — T. 530. — A12.
 73. Water emission from the high-mass star-forming region IRAS 17233-3606 / S. Leurini, A. Gusdorf, F. Wyrowski, C. Codella, T. Csengeri, F. van der Tak, H. Beuther, D. R. Flower, C. Comito, P. Schilke // . — 2014. — T. 564. — C. L11.

74. ATLASGAL - Kinematic distances and the dense gas mass distribution of the inner Galaxy / M. Wienen, F. Wyrowski, K. M. Menten, J. S. Urquhart, T. Csengeri, C. M. Walmsley, S. Bontemps, D. Russeil, L. Bronfman, B. S. Koribalski, F. Schuller //. — 2015. — T. 579. — A91.
75. Chemical Evolution of N_2H^+ in Six Massive Star-forming Regions / N.-P. Yu, J.-L. Xu, J.-J. Wang, X.-L. Liu //. — 2018. — T. 865, № 2. — C. 135.
76. ATLASGAL - compact source catalogue: $330^\circ < \ell < 21^\circ$ / Y. Contreras, F. Schuller, J. S. Urquhart, T. Csengeri, F. Wyrowski, H. Beuther, S. Bontemps, L. Bronfman, T. Henning, K. M. Menten, P. Schilke, C. M. Walmsley, M. Wienen, J. Tackenberg, H. Linz //. — 2013. — T. 549. — A45.
77. A new 3 mm band receiver for the Onsala 20 m antenna / V. Belitsky, I. Lapkin, M. Fredrixon, E. Sundin, L. Helldner, L. Pettersson, S. -. Ferm, M. Pantaleev, B. Billade, P. Bergman, A. O. H. Olofsson, M. S. Lerner, M. Strandberg, M. Whale, A. Pavolotsky, J. Flygare, H. Olofsson, J. Conway // Astronomy & Astrophysics. — 2015. — T. 580. — A29.
78. An updated list of radio flux density calibrators. / M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, T. P. Krichbaum, K. J. Standke, C. J. Schalinski, C. A. Hummel // Astronomy & Astrophysics. — 1994. — T. 284. — C. 331–339.
79. The Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) - a new submillimeter facility for southern skies - / R. Güsten, L. Å. Nyman, P. Schilke, K. Menten, C. Cesarsky, R. Booth //. — 2006. — T. 454. — C. L13–L16.
80. A Swedish heterodyne facility instrument for the APEX telescope / V. Vassilev, D. Meledin, I. Lapkin, V. Belitsky, O. Nyström, D. Henke, A. Pavolotsky, R. Monje, C. Risacher, M. Olberg, M. Strandberg, E. Sundin, M. Fredrixon, S.-E. Ferm, V. Desmaris, D. Dochev, M. Pantaleev, P. Bergman, H. Olofsson //. — 2008. — T. 490. — C. 1157–1163.
81. Heterodyne single-pixel facility instrumentation for the APEX Telescope / V. Belitsky, I. Lapkin, R. Monje, V. Vassilev, C. Risacher, A. Pavolotsky, D. Meledin, M. Olberg, M. Pantaleev, R. Booth // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. T. 6275. — 2006. — 62750G. — ().

82. The Bolocam Galactic Plane Survey: $\lambda = 1.1$ and 0.35 mm Dust Continuum Emission in the Galactic Center Region / J. Bally, J. Aguirre, C. Battersby, E. T. Bradley, C. Cyganowski, D. Dowell, M. Drosback, M. K. Dunham, I. Evans Neal J., A. Ginsburg, J. Glenn, P. Harvey, E. Mills, M. Merello, E. Rosolowsky, W. Schlingman, Y. L. Shirley, G. S. Stringfellow, J. Walawender, J. Williams // *Astrophysical Journal*. — 2010. — T. 721, № 1. — C. 137–163.
83. The Bolocam Galactic Plane Survey. IX. Data Release 2 and Outer Galaxy Extension / A. Ginsburg, J. Glenn, E. Rosolowsky, T. P. Ellsworth-Bowers, C. Battersby, M. Dunham, M. Merello, Y. Shirley, J. Bally, N. J. Evans II [и др.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2013. — T. 208, № 2. — C. 14.
84. Weeds: a CLASS extension for the analysis of millimeter and sub-millimeter spectral surveys / S. Maret, P. Hily-Blant, J. Pety, S. Bardeau, E. Reynier //. — 2011. — T. 526. — A47.
85. *Wannier P. G.* Nuclear abundances and evolution of the interstellar medium // *Annual review of astronomy and astrophysics*. — 1980. — T. 18. — C. 399–437.
86. The Arizona Radio Observatory CO Mapping Survey of Galactic Molecular Clouds. V. The Sh2-235 Cloud in CO J=2-1, ^{13}CO J=2-1, and CO J=3-2 / J. H. Bieging, S. Patel, W. L. Peters, L. V. Toth, G. Marton, S. Zahorecz // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2016. — T. 226, № 1. — C. 13.
87. *Mangum J. G., Shirley Y. L.* How to Calculate Molecular Column Density // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2015. — T. 127, № 949. — C. 266.
88. *Liu T., Wu Y., Zhang H.* Gaseous CO Abundance—An Evolutionary Tracer for Molecular Clouds //. — 2013. — T. 775, № 1. — C. L2.
89. Hyperfine structure of interstellar ammonia in dark clouds. / O. E. H. Rydbeck, A. Sume, A. Hjalmarson, J. Ellder, B. O. Ronnang, E. Kollberg // *Astrophysical Journal*. — 1977. — T. 215. — C. L35–L40.

90. *Mangum J. G., Wootten A., Mundy L. G.* Synthesis Imaging of the DR 21 (OH) Cluster. II. Thermal Ammonia and Water Maser Emission // — 1992. — T. 388. — C. 467.
91. *Ho P. T. P., Townes C. H.* Interstellar ammonia. // — 1983. — T. 21. — C. 239—270.
92. *Walmsley C. M., Ungerechts H.* Ammonia as a molecular cloud thermometer. // — 1983. — T. 122. — C. 164—170.
93. On the internal structure of starless cores. I. Physical conditions and the distribution of CO, CS, N₂H⁺, and NH₃ in L1498 and L1517B / M. Tafalla, P. C. Myers, P. Caselli, C. M. Walmsley // *Astronomy & Astrophysics*. — 2004. — T. 416. — C. 191—212.
94. An atomic and molecular database for analysis of submillimetre line observations / F. L. Schöier, F. F. S. van der Tak, E. F. van Dishoeck, J. H. Black // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — T. 432, № 1. — C. 369—379.
95. *Stutzki J., Winnewisser G.* On the interpretation of hyperfine-structure intensity anomalies in the NH₃ (J, K) = (1,1) inversion transition. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1985. — T. 144. — C. 13—26.
96. *Park Y. .-.* Hyperfine anomalies in the ammonia (1,1) inversion transition: Can they be a tracer of systematic motion? // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — T. 376. — C. 348—355.
97. NH₃ (1,1) hyperfine intensity anomalies in the Orion A molecular cloud / D.-d. Zhou, G. Wu, J. Esimbek, C. Henkel, J.-j. Zhou, D.-l. Li, W.-g. Ji, X.-w. Zheng // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — T. 640. — A114.
98. *Troitsky N. R., Lapinov A. V., Zamostra S. N.* Radiation-Transfer Modeling of the Cloud L1544 in the HCO⁺ and HC¹⁸O⁺ Emission Lines // *Radiophysics and Quantum Electronics*. — 2004. — T. 47, № 2. — C. 77—84.
99. Molecular Emission Line Formation in Prestellar Cores / Y. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe, B. Shustov, T. Henning, R. Launhardt, D. Semenov // *Astrophysical Journal*. — 2008. — T. 689, № 1. — C. 335—350.
100. A 4-6 GHz Spectral Scan and 8-10 GHz Observations of the Dark Cloud TMC-1 / S. V. Kalenskii, V. I. Slysh, P. F. Goldsmith, L. E. B. Johansson // — 2004. — T. 610, № 1. — C. 329—338.

101. *Kalenskii S. V., Johansson L. E.* Spectral scan of the star-forming region DR21(OH). Observations and LTE analysis // *Astronomy Reports*. — 2010. — T. 54, № 4. — C. 295—316.
102. CH 3C 2H as a Temperature Probe in Dense Giant Molecular Cloud Cores / *E. A. Bergin, P. F. Goldsmith, R. L. Snell, H. Ungerechts* // *Astrophysical Journal*. — 1994. — T. 431. — C. 674.
103. *Hildebrand R. H.* The determination of cloud masses and dust characteristics from submillimetre thermal emission. // *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*. — 1983. — T. 24. — C. 267—282.
104. *Ossenkopf V., Henning T.* Dust opacities for protostellar cores. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1994. — T. 291. — C. 943—959.
105. Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains / *V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — T. 449, № 1. — C. 440—450.
106. Dust dynamics and evolution in H II regions - II. Effects of dynamical coupling between dust and gas / *V. V. Akimkin, M. S. Kirsanova, Y. N. Pavlyuchenkov, D. S. Wiebe* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — T. 469, № 1. — C. 630—638.
107. MAMBO mapping of Spitzer c2d small clouds and cores / *J. Kauffmann, F. Bertoldi, T. L. Bourke, I. Evans N. J., C. W. Lee* // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — T. 487, № 3. — C. 993—1017.
108. High-Mass Protostellar Candidates. II. Density Structure from Dust Continuum and CS Emission / *H. Beuther, P. Schilke, K. M. Menten, F. Motte, T. K. Sridharan, F. Wyrowski* // *Astrophysical Journal*. — 2002. — T. 566, № 2. — C. 945—965.
109. *Shirley Y. L.* The Critical Density and the Effective Excitation Density of Commonly Observed Molecular Dense Gas Tracers // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. — 2015. — T. 127, № 949. — C. 299.
110. Study of morphology and stellar content of the Galactic H II region IRAS 16148-5011 / *K. K. Mallick, D. K. Ojha, M. Tamura, H. Linz, M. R. Samal, S. K. Ghosh* //. — 2015. — T. 447, № 3. — C. 2307—2321.

111. Temperatures of dust and gas in S 140 / E. Koumpia, P. M. Harvey, V. Ossenkopf, F. F. S. van der Tak, B. Mookerjea, A. Fuente, C. Kramer //. — 2015. — T. 580. — A68.
112. Observational Signatures of End-dominated Collapse in the S242 Filamentary Structure / L. K. Dewangan, L. Pirogov, O. L. Ryabukhina, D. K. Ojha, I. Zinchenko // Astrophysical Journal. — 2019. — T. 877, № 1. — C. 1.
113. Gravity or turbulence? Velocity dispersion-size relation / J. Ballesteros-Paredes, L. W. Hartmann, E. Vázquez-Semadeni, F. Heitsch, M. A. Zamora-Avilés //. — 2011. — T. 411, № 1. — C. 65–70.
114. *Stutzki J., Guesten R.* High spatial resolution isotopic CO and CS observations of M17 SW - The clumpy structure of the molecular cloud core //. — 1990. — T. 356. — C. 513–533.
115. 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. — T. 18, № 8. — C. 095.
116. *Kauffmann J., Pillai T., Goldsmith P. F.* Low Virial Parameters in Molecular Clouds: Implications for High-mass Star Formation and Magnetic Fields //. — 2013. — T. 779. — C. 185.
117. *Snell R. L., Loren R. B.* Self-reversed CO profiles in collapsing molecular clouds. //. — 1977. — T. 211. — C. 122–127.
118. *Semenov D., Wiebe D. S.* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2011. — T. 196, № 2. — C. 25.
119. Luminosity outburst chemistry in protoplanetary discs: going beyond standard tracers / D. S. Wiebe, T. S. Molyarova, V. V. Akimkin, E. I. Vorobyov, D. Semenov // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — T. 485, № 2. — C. 1843–1863.
120. *Lee H. .-, Bettens R. P. A., Herbst E.* Fractional abundances of molecules in dense interstellar clouds: A compendium of recent model results. // Astronomy and Astrophysics Supplement. — 1996. — T. 119. — C. 111–114.

121. *Spitzer Lyman J., Tomasko M. G.* Heating of H i Regions by Energetic Particles // *Astrophysical Journal*. — 1968. — T. 152. — C. 971.
122. *Myers P. C., Benson P. J.* Dense cores in dark clouds. II. NH₃ observations and star formation. // *Astrophysical Journal*. — 1983. — T. 266. — C. 309—320.
123. Molecular Evolution in Collapsing Prestellar Cores / Y. Aikawa, N. Ohashi, S.-i. Inutsuka, E. Herbst, S. Takakuwa // *Astrophysical Journal*. — 2001. — T. 552, № 2. — C. 639—653.
124. A Coupled Dynamical and Chemical Model of Starless Cores of Magnetized Molecular Clouds. II. Chemical Differentiation / V. I. Shematovich, D. S. Wiebe, B. M. Shustov, Z.-Y. Li // *Astrophysical Journal*. — 2003. — T. 588, № 2. — C. 894—909.
125. *Larson R. B.* Turbulence and star formation in molecular clouds. //. — 1981. — T. 194. — C. 809—826.
126. *Federrath C., Klessen R. S.* The Star Formation Rate of Turbulent Magnetized Clouds: Comparing Theory, Simulations, and Observations //. — 2012. — T. 761, № 2. — C. 156.
127. *McKee C. F., Tan J. C.* Massive star formation in 100,000 years from turbulent and pressurized molecular clouds //. — 2002. — T. 416, № 6876. — C. 59—61.
128. *Kang J.-h., Koo B.-C., Salter C.* An Old Supernova Remnant within an H II Complex at $l \approx 173^\circ$: FVW 172.8+1.5 // *The Astronomical Journal*. — 2012. — T. 143, № 3. — C. 75.

Список рисунков

- 1.1 Изображение гигантского молекулярного облака G174+2.5, составленное по ИК-данным WISE 22 μm (красный), 12 μm (зеленый) и 3.4 μm (синий). Бирюзовые эллипсы - газовые сгустки, выделенные в работе [41] в линиях CO, фиолетовые окружности — области H II. Сгустки G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 образуют молекулярное волокно [42]. 18
- 1.2 Карта волокна G351.78–0.54 в ИК-диапазоне $\lambda = 500 \mu\text{m}$ (Herschel) и 8 μm (Spitzer). Белые контуры показывают интегральную интенсивность C¹⁸O (2–1) по данным телескопа APEX, представленным в диссертации. Уровни контуров – 5, 10, 30 K км/с. Позиция ИК-источника IRAS 17233–3606 отмечена красной звездочкой. 21
- 1.3 Схема, показывающая квадрупольное и магнитное сверхтонкое расщепление спектра NH₃ (1,1) (взято из работы [89]). 30
- 2.1 Интегральная интенсивность линий молекул CS(2–1), C¹⁸O(1–0), ¹³CO(1–0), N₂H⁺(1–0), HNC(1–0) и HCN(1–0) в центральном сгустке WB 673 и трех крайних. Красные эллипсы - IRAS-источники (эллипс показывает область неопределенности положения), синие кружки - MSX-источники, черные контуры - уровни излучения пыли на 1.1 мм (Bolocam), где внешний контур соответствует уровню отношения сигнал/шум ≈ 3 , а внутренние показывают $\sim 35\%$ и $\sim 65\%$ от максимальной интенсивности, черный круг в левом нижнем углу - диаграмма направленности телескопа. 37
- 2.2 Лучевая концентрация молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN, H₂ в центральном сгустке WB 673 и трех крайних. Обозначения как на Рис. 2.2. 39
- 2.3 Обилия молекул CS, CO, N₂H⁺, HNC, HCN в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1. 41

2.4	Спектры линий излучения молекул в направлении центрального сгустка WB 673. Красной линией показано приближение спектров гауссовыми функциями.	42
2.5	Карты интегральной интенсивности линий NH_3 (1,1) и (2,2) в сгустках WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43 волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.	45
2.6	Карта лучевой скорости V_{LSR} и ширины линии ΔV NH_3 (1,1) в плотных сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.	46
2.7	Линии аммиака в пиках излучения плотных сгустков WB 668, WB 673, S233-IR и G173.57+2.43. Красные линии показывают Гауссовы профили.	47
2.8	Карты лучевой концентрации аммиака (сверху), кинетической температуры газа (середина сверху), обилия NH_3 (середина снизу) и плотности водорода (снизу) в сгустках волокна WB 673. Обозначения как на рис. 2.1.	49
2.9	Аномалии сверхтонкой структуры в плотных сгустках волокна WB 673.	51
2.10	Лучевая концентрация C^{18}O и N_2H^+ , обилие N_2H^+ в волокне G351.78-0.54. Эллипсы показывают плотные сгустки, выделенные методом GaussClumps (разд. 2.3.3).	54
2.11	Спектры линий CO (2–1), ^{13}CO (2–1), ^{13}CO (3–2), C^{18}O (2–1), C^{18}O (3–2) и N_2H^+ (3–2) в сгустках волокна G351.78-0.54. Прерывистая линия показывает скорость LSR для каждого сгустка согласно линии C^{18}O (3–2), зеленая сплошная линия показывает скорость – 3.5 км/с.	57
2.12	Карты первого момента и ширины линии N_2H^+ (3–2) в сгустках волокна G351.78-0.54. Зеленые контуры показывают интегральную интенсивность N_2H^+ на уровнях 3, 10, 20 К км/с.	58
2.13	Спектры линий C^{18}O (3–2) и N_2H^+ (3–2) в направлении на третий сгусток волокна G351.78-0.54.	59
2.14	Спектр линии CH_3CSH в направлении IRAS 17233–3606 и вращательная диаграмма для него.	60

- 3.1 Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , HCN и HNC в сгустке WB 673 (черные точки с барами ошибок). Панель с $n(\text{H}_2)$ так же показывает вписанную степенную функцию. Цветные сине-зелено-желтые линии на панелях с лучевыми концентрациями показывают результаты модели Presta в разные моменты времени. 66
- 3.2 Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS, NH_3 , в сгустке WB 668. Обозначения как на Рис. 3.1. 67
- 3.3 Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул CO, CS и NH_3 в сгустке S233-IR. Обозначения как на Рис. 3.1. 67
- 3.4 Распределение плотности водорода $n(\text{H}_2)$ и лучевой концентрации молекул N_2H^+ , CO, CS и NH_3 в сгустке G173.57+2.43. Обозначения как на Рис. 3.1. 68
- 3.5 Критерий соответствия моделей Σ для сгустков волокна WB 673. 70

Список таблиц

1	IRAS-источники в направлении плотных сгустков волокна WB 673.	20
2	Список линий, обнаруженных на телескопе Онсала в 2016-2017 г. в направлении волокна WB 673.	23
3	Частоты переходов, наблюдавшихся на телескопе в Эффельсберге в 2019 г. в направлении волокна WB 673.	24
4	Список линий, наблюдавшихся на телескопе АРЕХ для волокна G351.78-0.54.	26
5	Константы для вычисления лучевой концентрации.	29
6	Уровни лучевой концентрации водорода в сгустках волокна WB 673, см^{-2}	38
7	Обилия молекул, усредненные по сгусткам волокна WB 673. . . .	40
8	Линии, отождествленные в центральном сгустке WB 673.	43
9	Лучевые концентрации и относительные обилия молекул CO, N_2H^+ , HCN, HNC, CS, SO, HCCCN в направлении пика излучения CS (2–1) в сгустке WB 673.	44
10	Параметры линий в направлении на пики интегральной интенсивности NH_3 (1,1).	48
11	Параметры сгустков волокна G351.78-0.54.	55
12	Начальные обилия компонент химической модели по отношению к атомарному водороду.	64
13	Параметры радиального распределения плотности водорода в сгустках волокна WB 673.	65