На правах рукописи

Рябухина Ольга Леонидовна

# ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ВОЛОКОН В ОБЛАСТЯХ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Специальность 1.3.1— «Физика космоса, астрономия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный руководитель:	канд. физмат. наук
	Кирсанова Мария Сергеевна
Официальные оппоненты:	Каленский Сергей Владимирович, д-р физмат. наук, ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебеде- ва Российской академии наук, Старший научный сотрудник
	Лехт Евгений Евгеньевич,
	д-р физмат. наук, Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга Московского государ- ственного университета им. М.В. Ломоносова, Ведущий научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное обра- зовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени пер- вого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екате- ринбург

Защита состоится 15 сентября 2023 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 на базе ФГБУН Института астрономии Российской академии наук по адресу: г. Москва ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНАСАН.

Автореферат разослан 15 июня 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.032.01, канд. физ.-мат. наук

Чупина Наталия Викторовна

## Общая характеристика работы

# 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, варыруются в очень широких пределах; например, кинетическая температура меняется от  $\sim 5~{\rm K}$  в плотных молекулярных облаках до  $\sim 10^6~{\rm K}$  в галактическом корональном газе, а плотность от  $\sim 10^{-4}$  до  $\sim 10^{12}$  частиц в см<sup>3</sup> [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 общирные 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  $10^5 \text{ M}_{\odot}$ , 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, СО и ОН. 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  $N({\rm H}_2) > 7 \cdot 10^{21} {\rm \ cm}^{-2}$ ) 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 обусловливает вид начальной функции масс звезд [10]. Теоретические расчеты (напр., [11]), показывают, что формирование молекулярных волокон возможно после множественных сжатий 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 APEX, 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 APEX 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  $c_{\rm s}$  и гравитационной постоянной G [7]:

$$M_{\rm line,cr} = \frac{2c_{\rm s}^2}{G},\tag{1}$$

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 существенным, 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):

$$M_{\rm j} \sim \rho \left(\frac{kT}{G\rho m}\right)^{3/2},$$
 (2)

где T - температура газа, k - постоянная Больцмана,  $\rho$  - 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 K, столь низкие значения главным образом обусловлены ИК-излучением пыли. Плотность в таких облаках достигает значений  $\sim 10^6 {\rm \ cm^{-3}}$ . 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<sub>2</sub>. 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 СО, углерод в основном входит в ее состав. Количество остальных молекул составляет малую долю от H<sub>2</sub> 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 облаков реализуются различные химические реакции, происходящие в газовой фазе или на поверхности пылинок [24]. Ион-молекулярные реакции являются основным типом реакций, проходящих в газовой фазе

в плотных молекулярных сгустках. Но для протекания этих реакций нужен ионизирующий фактор, такой как УФ- или рентгеновское излучение или космические лучи.

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 СО. 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 реакции 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<sub>2</sub> [27; 28]. Так же на поверхности пылинок формируются сложные органические молекулы: H<sub>2</sub>CO,  $CH_3OH$  и другие [29].

Химический состав молекулярных сгустков меняется с эволюцией облака. В холодных плотных сгустках молекулы постепенно вымерзают на пы-

7

линки, и в центральной части формируются области, обедненные молекулами. Наиболее обильная после Н<sub>2</sub> молекула СО разрушает азотосодержащие молекулы NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>. Однако при уплотнении молекулярного облака температура в нем понижается, и СО вымораживается на пылинки. Вследствие этого обилие NH<sub>3</sub> и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> повышается. Таким образом, молекулы условно делятся на индикаторы «ранней» (CO, CS) и «поздней» (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>) 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 эволюционную 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 MONAKO - 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 ( $\zeta$ ).

# Цели и задачи диссертационной работы

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

- Молекулярные волокна места образования новых звездных систем. Изучение волокон позволяет понимать процесс образования звезд и планет.
- 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.
- Волокна образуются в результате взаимодействия нескольких факторов: гравитационное сжатие, турбулентность, магнитное поле, давление излучения. Изучение волокон необходимо для понимания роцессов, 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 волокие G351.78-0.54.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

- По результатам наблюдений получены карты излучения в линиях N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (1–0), HNC (1–0), HCN (1–0), HNC (1–0) и NH<sub>3</sub> (1,1) в четырех плотных сгустках межзвездного волокна WB 673. Построены карты лучевых концентраций и относительных обилий молекул CS, CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNC, HCN, NH<sub>3</sub>. 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 ≈ 2 · 10<sup>4</sup> см<sup>-3</sup> 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 СО и его изотопологов, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и CH<sub>3</sub>CCH. 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 неустоичивыми. Высокая дисперсия скоростей в плотных частях сгустков связана с вращением или сжатием сгустков. Определена вращательная температура CH<sub>3</sub>CCH в

направлении первого и второго сгустков, температура составляет  $120 \pm 2$  и  $26 \pm 5$  K 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 гравотурбулентнои модели межзвездной среды.

#### Научная новизна:

- 1. Впервые проведены наблюдения линий аммиака в волокие WB 673, получены карты линий излучения NH<sub>3</sub> (1,1) и (2,2).
- Впервые построены карты лучевых концентраций и обилий молекул CS, CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNC, HCN, NH<sub>3</sub> 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<sub>3</sub>CCH волокне G351.78-0.54.
- 5. Впервые получен химический возраст плотных сгустков волокна WB 673.

**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, НСА 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»

<u>Личный вклад</u>. 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, N<sup>o</sup> 5. С. 394-405.
- 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.
- 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

- 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.
- 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.
- 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.
- Рябухина О. Л., Кирсанова М. С. Исследование волокна WB 673 в радиолиниях 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.

 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.

### Содержание работы

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

Первая глава посвящена описанию исследуемых объектов, проведенных наблюдений на телескопах обсерваторий в Онсала (Швеция), Эффельсберг (Германия) и APEX (Чили). Был получен большой массив наблюдательных данных, включающий в себя линии излучения молекул миллиметрового и сантиметрового диапазона. Выбраны методы дальнейших исследований.

Волокно WB 673 расположено в гигантском молекулярном облаке G174+2.5 (Рис. 1). Облако содержит несколько плотных сгустков, которые группируются: 1) вблизи области H II Sh2-235, 2) вдоль линии «юго-восток» - «северо-запад», частично примыкая к границе S231. В работе [40] было по-казано, что вторая группа плотных сгустков (G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668) образует молекулярное волокно, поскольку между сгустками есть плотный газ. Во всех исследуемых сгустках наблюдаются точечные ИК-источники IRAS и MSX, а так же мазерные источники.

Также в работе было исследовано волокно G351.78–0.54. На Рис. 2 волокно показано в линиях ИК-диапазона 500  $\mu$ m (Herschel) и 8  $\mu$ m (Spitzer). В средней части этого облака расположен яркий ИК-источник IRAS 17233–3606 ( $\alpha$ (J2000) = 17<sup>h</sup>26<sup>m</sup>42<sup>s</sup>8,  $\delta$ (J2000) = -36°09′17″). Волокно содержит источники, находящиеся на разных стадиях эволюции.

Для определения физических условий газа и обилий различных молекул молекул было использовано предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) которое выполняется в молекулярных облаках. Для определения температуры и плотности волокна WB 673 было использовано излучение нижних метастабильных уровней аммиака, поскольку они возбуждаются только столкновениями и являются надежными индикаторами физических параметров.

**Вторая глава** посвящена исследованию физических параметров и химической структуры плотных сгустков волокон WB 673 и G351.78-0.54.

Обнаружено 13 линий молекул, излучающих в миллиметровом диапазоне в центральном сгустке волокна WB 673. 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<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNC) определены параметры всех видимых компонентов.

Построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS (2–1), C<sup>18</sup>O (1–0), <sup>13</sup>CO (1–0), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (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 концентрации водорода.

Построены карты распределения обилий молекул в плотных сгустках; показано, что обилия СО и СЅ во всех сгустках, а также НСN и НNC в центральном 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. Получены карты лучевой концентрации молекул СЅ, СО,  $N_2H^+$ , HNC, HCN, NH<sub>3</sub> и H<sub>2</sub>, а так же обилия молекул СЅ, СО,  $N_2H^+$ , HNC, HCN, NH<sub>3</sub> относительно водорода; карты объемной плотности водорода и температуры газа волокна WB 673.

Проведен анализ линий излучения аммиака в плотных сгустках волокна WB 673. 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  $\approx (1-2) \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. 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 NH<sub>3</sub> (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.

Было выполнено исследование волокна G351.78–0.54 с помощью радиотелескопа APEX. Были проанализированы карты линий CO (2–1), <sup>13</sup>CO (2–1), C<sup>18</sup>O (2–1), <sup>13</sup>CO (3–2), C<sup>18</sup>O (3–2), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3–2), CH<sub>3</sub>CCH (13<sub>K</sub> – 12<sub>K</sub>). Построены карты лучевой концентрации молекул C<sup>18</sup>O и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>. Общая масса волокна оценивается в ~ 1800 M<sub>☉</sub>. Линейная масса ( $M_{\text{line}} = 529 \text{ M}_{\odot}/\text{pc}$ ) близка к критическому значению. Наличие нескольких плотных сгустков вдоль волокна свидетельствует о том, что идет процесс фрагментации.

По данным излучения  $N_2H^+$  (3–2) выделены шесть плотных сгустков в волокне G351.78–0.54. Их массы и вириальные параметры были получены из данных C<sup>18</sup>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<sub>3</sub>CCH. 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<sub>3</sub>CCH составляет около 120 К.

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 СО. Это указывает на относительное движение плотного и более диффузного газа.

<u>Третья глава</u> посвящена химическому моделированию плотных сгустков волокна WB 673. Для сгустков было проведено моделирование по радиальному профилю. Результаты модели сравнивались с наблюдательны-

ми лучевыми концентрациями молекул N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, CO, CS, NH<sub>3</sub>, 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.

Результат о быстром звездообразовании подтверждает идею образования волокон после многократного сжатия остатками сверхновых или областями Н II. Это соответствует гравотурбулентной модели межзвездной среды. Согласно этой модели, плотные молекулярные облака образуются 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 [42—44].

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

- 1. Проведены наблюдения на телескопе в Онсала (Швеция) и построены карты интегральных интенсивностей излучения молекул в линиях CS(2–1), C<sup>18</sup>O(1–0), <sup>13</sup>CO(1–0), N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>(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, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HNC, HCN, и H<sub>2</sub>.
- 2. Построены карты распределения обилий молекул CS, CO, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, 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 N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> 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.

- Пики излучения в линиях аммиака соответствуют пикам излучения пыли на 1.1 мм. Линии аммиака обладают умеренной оптической толщиной с 0.8 ≤ τ<sub>(1,1)</sub> ≤ 1.8 в пиках излучения.
- 4. С использованием подхода ЛТР определены лучевая концентрация и относительное обилие аммиака. Значения  $N(\rm NH_3)$  в наиболее плотных частях сгустков примерно равны и достигают  $\approx$  $(1-2) \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.
- 5. Определены температура газа и объемная плотность водорода. Плотность водорода достигает  $\approx 2 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> в центральных сгустках,  $\approx 1.4 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> в периферийных сгустках. Температура во всех сгустках не превышает 30 К.
- 6. Выделены аномалии в сверхтонкой структуре линий излучения NH<sub>3</sub>(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 С<sup>18</sup>О и N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> волокна G351.78-0.54. Общая масса волокна оценивается в ~ 1800 M<sub>☉</sub>. Линейная масса (M<sub>line</sub> = 529 M<sub>☉</sub>/pc) близка к критическому значению. Наличие нескольких плотных сгустков вдоль волокна свидетельствует о том, что идет процесс фрагментации. Обилие N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> близко к типичным значениям, но падает в сторону яркого ИК-источника IRAS 17233–3606 в первом сгустке.
- 8. По линиям излучения N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> (3–2) волокна G351.78-0.54 выделены шесть плотных сгустков. Их массы и вириальные параметры были получены из данных C<sup>18</sup>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 былли получены оценки температуры по вращательным диаграммам молекулы CH<sub>3</sub>CCH. В первом сгустке, содержащем светящийся ИК-источник IRAS 17233-3606, вращательная температура CH<sub>3</sub>CCH составляет около 120 К.

- 9. Ширина №2H<sup>+</sup> (3–2) линий больше ширины линии №2H<sup>+</sup> (1–0) и С<sup>18</sup>О (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 №2H<sup>+</sup> (3–2) и линиями изотопологов СО. 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<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, CO, CS, NH<sub>3</sub>, 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 ионизующего 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.

## 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.
- Schneider S., Elmegreen B. G. A catalog of dark globular filaments. // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1979. — Vol. 41. — P. 87–95.

- 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. — C. 1339— 1347.
- 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. - C. 27-51.
- 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.
- 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.
- Characterizing filaments in regions of high-mass star formation: High-resolution submilimeter 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 Pennec, 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.
- Inutsuka S.-i., Miyama S. M. A Production Mechanism for Clusters of Dense Cores // Astrophysical Journal. — 1997. — T. 480, № 2. — C. 681—693.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Krumholz M. R., Matzner C. D. The Dynamics of Radiation-pressuredominated H II Regions // Astrophysical Journal. — 2009. — T. 703, № 2. — C. 1352—1362.
- 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.
- 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.
- 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.
- Watson W. D. Ion-Molecule Reactions, Molecule Formation, and Hydrogen-Isotope Exchange in Dense Interstellar Clouds // Astrophysical Journal. – 1974. – T. 188. – C. 35–42.
- H<sub>2</sub> 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.
- Watson W. D. The Rate of Formation of Interstellar Molecules by Ion-Molecule Reactions // Astrophysical Journal. — 1973. — Vol. 183. — P. L17.
- 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.
- Vasyunin A. I., Herbst E. A Unified Monte Carlo Treatment of Gas-Grain Chemistry for Large Reaction Networks. II. A Multiphase Gas-surfacelayered 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.
- 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. Cavuoti, 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.
- 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.
- Bergin E. A., Langer W. D. Chemical Evolution in Preprotostellar and Protostellar Cores // Astrophysical Journal. - 1997. - T. 486, № 1. -C. 316-328.
- 40. 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.
- 41. Molecular emission in dense massive clumps from the star-forming regions
  S231-S235 / D. A. Ladeyschikov, M. S. Kirsanova, A. P. Tsivilev, A. M. Sobolev // Astrophysical Bulletin. 2016. T. 71, № 2. C. 208-224.

- 42. Larson R. B. Turbulence and star formation in molecular clouds. //. 1981. T. 194. C. 809–826.
- 43. Federrath C., Klessen R. S. The Star Formation Rate of Turbulent Magnetized Clouds: Comparing Theory, Simulations, and Observations //. -2012. T. 761, Nº 2. C. 156.
- 44. McKee C. F., Tan J. C. Massive star formation in 100,000 years from turbulent and pressurized molecular clouds //. 2002. T. 416, Nº 6876. C. 59–61.



Рис. 1 — Изображение гигантского молекулярного облака G174+2.5, составленное по ИК-данным WISE 22 μм (красный), 12 μм (зеленый) и 3.4 μм (синий). Бирюзовые эллипсы - газовые сгустки, выделенные в работе [41] в линиях СО, фиолетовые окружности — области Н II. Сгустки G173.57+2.43, S233-IR, WB 673, WB 668 образуют молекулярное волокно [40].



Рис. 2 — Карта волокна G351.78–0.54 в ИК-диапазоне  $\lambda = 500 \ \mu m$  (Herschel) и 8  $\mu m$  (Spitzer). Белые контуры показывают интегральную интенсивность C<sup>18</sup>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.