

На правах рукописи

Петрашкевич Игорь Вячеславович

**Исследование фракционирования дейтерия
в химических соединениях в областях
образования звезд малых масс**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель: к. ф.-м. н. **Васюнин Антон Иванович**,
заведующий научной лабораторией астрохимических исследований ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н. **Пирогов Лев Евгеньевич**,
ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

к. ф.-м. н. **Балашев Сергей Александрович**,
научный сотрудник ФГБНУ Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация: ФГБНУ Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 17 декабря 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

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

Автореферат разослан 30 октября 2026 года.

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

Чупина Наталия Викторовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Исследование процессов звездообразования является одной из фундаментальных тем в астрофизике и астрохимии. Исследования начальных стадий звездообразования помогают понять, как формировались планетарные системы и наша Солнечная система. Современные исследования показывают, что формирование химических соединений, содержащихся в планетарных системах, начинается на ранних стадиях звездообразования – в молекулярных облаках и холодных плотных ядрах. Это позволяет использовать наблюдения химического состава объектов для анализа физических условий, начиная с самых ранних стадий звездообразования.

Молекулярные облака — это холодные газопылевые структуры с температурой ~ 20 К и плотностью $100\text{--}1\,000\text{ см}^{-3}$. Молекулярные облака Персея и Змееносца [1, 2], благодаря своей относительной близости (130—300 пк), представляют собой удобные объекты для исследования химических процессов в межзвездной среде, поскольку позволяют с достаточным пространственным разрешением изучать структуру и физические условия в холодных плотных ядрах и протозвездах [3, 4]. Молекулярные облака состоят из 70 % водорода в атомарной, ионизированной или молекулярной форме, 28 % гелия и оставшиеся 2 % — более тяжелые элементы. Химические реакции протекают и при низкой плотности молекулярных облаков, на этой стадии уже формируются важнейшие молекулы, такие как CO и H₂O [4, 5]. Молекулярные облака содержат более плотные сгустки газа и пыли — холодные плотные ядра. Холодные плотные ядра имеют температуру ниже средней в молекулярных облаках ~ 10 К и плотность $10^3\text{--}10^6\text{ см}^{-3}$ [6, 7]. При такой плотности активно формируются различные соединения в газовой фазе и на поверхности пыли [8, 9]. При таких физических параметрах активно протекают процессы фракционирования изотопов в химических соединениях, наиболее выраженный из них — фракционирование дейтерия в химических соединениях (далее фракционирование дейтерия), так как дейтерий тяжелее протия в два раза, что ведет к значительному различию потенциалов взаимодействия в газовой фазе и на поверхности пылевых частиц для протия и дейтерия [10, 11].

Фракционирование дейтерия — это процесс изменения количества дейтерированных изотопологов относительно количества водородсодержащих (с протием) изотопологов в зависимости от физических параметров среды. В

диффузной среде Галактики наблюдается сравнительно низкая доля дейтерия относительно водорода ($D/H = 1.5 \times 10^{-5}$ [12, 13]). В областях звездообразования наблюдается повышенное содержание дейтерия в соединениях [10, 11, 14, 15, 16], что служит индикатором формирования и эволюции холодных плотных ядер (доля дейтерия по отношению к водороду в составе молекул и ионов доходит до 0.01–1). Доля дейтерия R_D в составе молекул и ионов (в соединениях) — отношение количества дейтерированных изотопологов к количеству водородсодержащих изотопологов. Согласно последним исследованиям [17, 18, 19, 20], доля дейтерия в соединениях достигает пика перед переходом от стадии холодного ядра к стадии протозвезды класса 0 [21, 22], в котором начинается нагрев, который запускает процесс фракционирования в обратную сторону. Поэтому фракционирование дейтерия становится инструментом изучения эволюции начальных стадий звездообразования. На данный момент большинство исследований направлено на измерение доли дейтерия в соединениях на разных этапах звездообразования в ближайших областях образования звезд [10, 11, 15, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Физические параметры газа и межзвездной среды напрямую влияют на скорость образования дейтерированных соединений.

Ключевую роль в эффективности образования дейтерированных соединений играют два фактора: отношение орто- и пара-водорода в соединениях и содержание CO в газовой фазе. Отношение орто- и пара-водорода в соединениях определяет эффективность реакции образования H_2D^+ из-за разницы в энергиях [11]: $H_3^+ + HD \rightleftharpoons H_2D^+ + H_2 + 230 \text{ K}$. Преобладание пара-водорода смещает равновесие этой реакции вправо, увеличивая содержание H_2D^+ . Вторым важным фактором является содержание CO в газе. Поскольку H_3^+ активнее реагирует с CO, чем с HD, наличие CO в газовой фазе конкурирует с реакцией образования H_2D^+ и снижает ее эффективность. Вымерзание CO на пыль, напротив, освобождает H_3^+ для реакции с HD и способствует росту содержания H_2D^+ . Для оценки содержания CO в газе используют степень вымерзания CO — отношение канонического суммарного содержания CO в газе и на пыли к содержанию наблюдаемого CO в газе [30, 31, 32]. Оба этих фактора зависят от плотности и температуры газа и пыли. Степень ионизации газа дополнительно определяет общее количество ионов, доступных для этих реакций. Астрохимические модели предсказывают, что доля дейтерия

в соединениях увеличивается с увеличением степени вымерзания CO и при низком соотношении орто- и пара-водорода [10, 11, 14, 33, 34]. Как доля дейтерия в соединениях зависит от различных физических параметров (например, температуры и степени вымерзания CO) на данный момент активно исследуется с помощью наблюдений. Фракционирование дейтерия происходит на протяжении всего времени эволюции холодного плотного ядра, при этом изменяется содержание разных молекул в газе. Азотсодержащие соединения могут содержать больше дейтерия при более низкой температуре газа и пыли, когда углеродсодержащие соединения активно вымерзают. Оценки пространственного распределения доли дейтерия в соединениях, связанные с другими физическими параметрами холодных плотных ядер, необходимы для более точного описания фракционирования дейтерия и для использования в качестве наблюдательных ограничений для астрохимических и астрофизических моделей.

Для решения этой задачи в данной работе был проведен анализ новых наблюдений с высоким пространственным разрешением низких вращательных переходов дейтерированных и водородсодержащих изотопологов в областях образования звезд малых масс L1688 и B5. Особое внимание в работе уделялось получению статистически значимых численных оценок и пространственного распределения доли дейтерия в трех соединениях, которые являются индикаторами разной плотности в газе в холодных плотных ядрах: $R_D(N_2D^+/N_2H^+)$, $R_D(DCO^+/HCO^+)$ и $R_D(NH_2D/NH_3)$. Полученные оценки доли дейтерия в соединениях сопоставлялись с физическими параметрами холодных плотных ядер: температурой пыли, температурой газа, лучевой концентрацией молекулярного водорода, дисперсией скорости в дейтерированных соединениях и степенью вымерзания CO. Также полученные пространственные распределения доли дейтерия в соединениях применялись для оценки химического возраста холодных плотных ядер. Полученные в этой работе результаты могут быть применены в различных астрохимических и астрофизических моделях для исследования эволюции начальных стадий звездообразования.

Целью работы является изучение фракционирования дейтерия в химических соединениях на начальных стадиях звездообразования в областях

образования звезд малых масс L1688 и B5 на основе наблюдательных данных в субмиллиметровом диапазоне.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Выполнить обработку спектров переходов сверхтонкой структуры спектроскопического уровня для картированных и точечных наблюдений линий $N_2H^+(1-0)$, $N_2H^+(2-1)$, $N_2D^+(2-1)$, $N_2D^+(1-0)$, $DCO^+(2-1)$, $HCO^+(1-0)$, $HCO^+(2-1)$, $p-NH_3(1_1, 1_1)$, $p-NH_3(2_1, 2_1)$, $p-NH_3(3_1, 3_1)$ и $p-NH_2D(1_{11}-1_{01})$. Наблюдения были получены на телескопе IRAM-30 м в направлении холодных плотных ядер в областях образования звезд малых масс L1688 и B5. Выполнить анализ наблюдений и определить параметры спектров: оптическую толщину, лучевую скорость и дисперсию скорости.
2. Определить лучевые концентрации и доли дейтерия в следующих соединениях в направлении плотных ядер областей образования звезд малых масс L1688 и волокна B5: $R_D(N_2D^+/N_2H^+)$, $R_D(DCO^+/HCO^+)$ и $R_D(NH_2D/NH_3)$, при условии единой температуры возбуждения для всех компонентов перехода сверхтонкого расщепления выбранного спектроскопического уровня каждого соединения.
3. Определить оптимальное каноническое содержание CO в направлении областей звездообразования Персея и Змееносца по данным наблюдений линий $^{13}CO(1-0)$ из обзора COMPLETE [35]. Определить верхний предел степени вымерзания CO в холодных плотных ядрах в L1688 по данным COMPLETE. Построить карту степени вымерзания CO в направлении B5 по наблюдениям линии $C^{18}O(2-1)$, полученным на телескопе IRAM-30 м. Лучевые концентрации молекул ^{13}CO и $C^{18}O$ определить в предположении о локальном термодинамическом равновесии.
4. Провести астрохимическое моделирование холодных плотных ядер в области звездообразования L1688, используя модель PyRate3 [33]. По результатам сравнения наблюдательных данных и результатов моделирования оценить химический возраст холодных плотных ядер.

5. Исследовать распределение доли дейтерия в соединениях в плотных ядрах в L1688 и B5 в выбранных соединениях; ее зависимость от лучевой концентрации молекулярного водорода, температуры газа, температуры пыли и степени вымерзания CO.
6. Исследовать, как доля дейтерия в соединениях, степень вымерзания CO и лучевая концентрация молекулярного водорода в волокне B5 меняются в направлении от протозвезды до холодного плотного ядра.

Методика исследования. Для решения поставленных задач выполнен анализ наблюдений субмиллиметровых переходов ряда соединений в плотных ядрах в L1688 и B5, наблюдения которых были получены на телескопе IRAM-30 м. Для анализа применялись методы приближения спектров сверхтонких структур переходов с предположением общей температуры возбуждения для всех компонентов сверхтонкого расщепления выбранного спектроскопического уровня. Для определения оптической толщины в данных наблюдений с низким отношением сигнал-шум (~ 3) использовалась наиболее вероятная температура возбуждения, полученная при исследовании пространства параметров оптической толщины и температуры возбуждения для каждой карты каждого перехода в направлении центра источника. Карты пространственного распределения наблюдений аммиака взяты из обзора GAS [16] и для их обработки использовался метод с приближением сверхтонких структур переходов $p\text{-NH}_3(1_1, 1_1)$, $p\text{-NH}_3(2_1, 2_1)$ и $p\text{-NH}_3(1_1, 1_1)$. Было проведено астрохимическое моделирование с помощью модели PyRate3. В модели проводится различие между спиновыми состояниями соединений, содержащих водород и дейтерий, где соотношения каналов реакции определяются путем применения правил селекции в соответствии с принципом сохранения ядерного спина.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В результате систематического анализа наблюдений плотных ядер в областях образования звезд малых масс L1688 и B5 были построены двадцать карт лучевых концентраций шести молекул в направлении пяти источников, которые использовались для построения

карт доли дейтерия в соединениях. Карты доли дейтерия в соединениях в плотных ядрах Oph-C-N, Oph-E-MM2, Oph-F, Oph-H-MM1 и волокне В5 и карта степени вымерзания CO в В5 были получены впервые. Доля дейтерия $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$ составила 0.014—0.094, а $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ и $R_D(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$ составили 0.15—0.81.

2. Показано, что доля дейтерия в соединениях увеличивается с увеличением плотности и уменьшением температуры холодных плотных ядер в L1688. Доля дейтерия во всех соединениях увеличивается к центру холодных плотных ядер, это связано с активным вымерзанием CO на пыль, особенно этот эффект заметен в картах $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$. Также это подтверждается разницей между индикаторами плотности (углеродсодержащими и азотсодержащими соединениями), доля дейтерия в азотсодержащих соединениях в 2–10 раз больше, чем в углеродсодержащих.
3. Впервые представлены радиальные профили доли дейтерия $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ и $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$, степени вымерзания CO, температуры пыли и степени ионизации между пиками излучения пыли теплого протозвездного ядра и холодного дозвездного ядра, погруженных в волокно В5. Продемонстрировано, что присутствие протозвезды IRAS 03445+3242 снижает долю дейтерированных изотопологов ионов N_2H^+ и HCO^+ в окружающем волокне В5. Доли дейтерия $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ и $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$ уменьшаются от 0.44 ± 0.11 и 0.09 ± 0.02 в направлении пика излучения пыли холодного дозвездного ядра до 0.15 ± 0.03 и 0.05 ± 0.01 в направлении протозвезды, соответственно. Полученное распределение согласуется с современными представлениями о механизме фракционирования дейтерия: повышение температуры и десорбция CO снижают долю дейтерия, тогда как в холодных плотных областях она возрастает.

Научная новизна:

1. Впервые представлены карты лучевых концентраций для соединений N_2D^+ , DCO^+ , HCO^+ и NH_2D в направлении Oph-C-N, Oph-E-MM2, Oph-F, Oph-H-MM1 холодных плотных ядер в L1688 и N_2H^+ , N_2D^+ , DCO^+ , HCO^+ для волокна В5. На основе этих лучевых

концентраций впервые получены карты доли дейтерия $R_D(N_2D^+/N_2H^+)$, $R_D(DCO^+/HCO^+)$ и $R_D(NH_2D/NH_3)$ для этих объектов. Дополнительно были впервые получены лучевые концентрации N_2D^+ и N_2H^+ и доля дейтерия $R_D(N_2D^+/N_2H^+)$ в направлениях Oph-H-MM2 и Oph-I-MM2.

2. Исследованы распределения доли дейтерия в соединениях в плотных ядрах в соединениях и их корреляции с температурой, лучевой концентрацией молекулярного водорода и степенью вымерзания CO в областях звездообразования L1688 и B5. Впервые было проведено сравнение значений доли дейтерия в азотсодержащих и углеродсодержащих соединениях L1688 и B5. Значения доли дейтерия в углеродсодержащих соединениях в 2—10 раз меньше, чем в азотсодержащих соединениях. Оценки этих отношений подтверждают предположения об увеличении доли дейтерия в соединениях с ростом плотности газа.
3. Впервые представлены радиальные профили доли дейтерия в соединениях, степени вымерзания CO и степени ионизации в направлении от горячего протозвездного ядра до пика излучения пыли холодного плотного ядра, погруженные в одном волокне B5.
4. На основе архивных данных обзора COMPLETE — наблюдений линии $^{13}CO(1-0)$ было выбрано наиболее подходящее каноническое содержание CO (количество CO в газе и на пыли) в молекулярных облаках Змееносца и Персея. Были получены карты степени вымерзания CO в волокне B5 по наблюдениям $C^{18}O(2-1)$.
5. Впервые был применен подход для поиска наиболее вероятной температуры возбуждения в данных с низким отношением сигнал-шум на основе исследования пространства таких параметров, как оптическая толщина и температура возбуждения при приближении спектров сверхтонких структур переходов $N_2H^+(1-0)$, $N_2D^+(2-1)$, $N_2D^+(1-0)$, $DCO^+(2-1)$, $p-NH_2D(1_{11}-1_{01})$, $H^{13}CO^+(1-0)$ и $H^{13}CO^+(2-1)$. Такой подход позволил включить данные с низкой чувствительностью в анализ.

Научная и практическая значимость. Научная значимость работы обусловлена результатами анализа данных наблюдений, которые подтвер-

ждают основные теоретические предположения об особенностях процесса фракционирования дейтерия на начальных стадиях звездообразования в областях образования звезд малых масс. Практическая значимость диссертации заключается в возможности использовать результаты как наблюдательные ограничения для астрохимических моделей и моделей эволюции дозвездных ядер. Разработанные методы обработки карт наблюдений линий могут быть применены при обработке других наблюдений в субмиллиметровом диапазоне. Пакет `rusreskit` был дополнен для анализа соединений N_2H^+ и HCO^+ новыми файлами параметров сверхтонкой структуры переходов, которые вошли в релиз. Все результаты наблюдений опубликованы в базе данных CDS.

Достоверность научных результатов обусловлена тем, что результаты анализа наблюдений и моделей согласуются между собой и с результатами других авторов. Основные результаты и выводы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и описаны в рецензируемых научных статьях.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на международных и всероссийских конференциях.

Устные доклады на международных конференциях:

1. Международная конференция «Fractionation of isotopes in space II: from the Solar System to galaxies» (Флоренция, Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics, 2024 г.).

Устные доклады на всероссийских конференциях:

1. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2021 г.)
2. Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2022 г.).
3. Всероссийская двенадцатая конференция из цикла «Современная звездная астрономия» (Кичи-Балык, КГО ГАИШ МГУ, 2022 г.)

Стендовые доклады на всероссийских конференциях:

1. Всероссийская десятая конференция из цикла «Современная звездная астрономия» (Нижний Архыз, САО РАН, 2019 г.)
2. Научная школа «Задачи и методы радиоастрономии» (Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2019 г.)
3. 49-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2020 г.)
4. 50-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2023 г.)
5. 51-я Международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, 2024 г.)
6. Всероссийская астрономическая конференция, ВАК-2024: «Современная астрономия: от ранней вселенной до экзопланет и черных дыр» (Нижний Архыз, САО РАН, 2024 г.)

Личный вклад. Автор самостоятельно обработал и провел анализ наблюдательных данных с телескопов IRAM-30 м, GBT-100 м и FCRAO-14 м. Автор выполнил приближение карт спектров и получил лучевые концентрации, доли дейтерия в соединениях и степени вымерзания CO. Автор провел астрохимическое моделирование холодных плотных ядер области звездообразования L1688 и сравнил результаты с наблюдательными данными. Автор выполнил анализ корреляций доли дейтерия в соединениях с физическими параметрами плотных ядер в L1688 и B5. Автор принимал активное участие в постановке задач, интерпретации и обсуждении результатов. Автором диссертации был написан основной текст всех совместных работ по теме диссертации.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в трех работах в списке изданий, рекомендованных ВАК [A1–A3], и шести работах [B1–B6] в материалах конференций.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

- A1 **Petrashkevich I. V.**, Punanova A. F., Caselli P. et al. Deuterium Fractionation in the Oph-H-MM1 Dense Core of the L1688 Low Mass

Star-Forming Region // Astronomy Reports. — 2020. — Vol. 64, № 8. — Pp. 637–640.

A2 **Petrashkevich I. V.**, Punanova A. F., Caselli P., Sipilä O., Pineda J. E., Friesen R. K., Korotaeva M. G., Vasyunin A. I. Deuterium fractionation in cold dense cores in the low-mass star-forming region L1688 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2024. — Vol. 528, № 2. — Pp. 1327–1353.

A3 **Petrashkevich I.**, Punanova A., Caselli P., Sipilä O., Pineda J. E., Vasyunin A. I. Deuterium Fractionation and CO Depletion in Barnard 5 // Astrophys. J. — 2026. — Vol. 997, № 2. — P. 296

Другие публикации автора по теме диссертации:

Б1 **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Фракционирование дейтерия в дозвездных ядрах в области звездообразования ρ Змееносца // Физика космоса: труды 49-й Международной студенческой научной конференции — 2020 — стр. 101–102.

Б2 **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Доля дейтерия в холодных плотных ядрах в области звездообразования L1688 // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой — 2021 — стр. 64–67.

Б3 Пунанова А. Ф., **Петрашкевич И. В.** Фракционирование дейтерия в областях маломассивного звездообразования // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой — 2021 — стр. 166–169.

Б4 **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф. Фракционирование дейтерия в Per-B5 // Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых — 2022 — стр. 66–68.

Б5 **Петрашкевич И. В.**, Пунанова А. Ф., Васюнин А. И. Моделирование доли дейтерия в области образования звезд малых масс L1688

// Физика космоса: труды 50-й Международной студенческой научной конференции — 2023 — стр. 271–273.

Б6 Петрашкевич И. В., Пунанова А. Ф., Васюнин А. И. Сравнение доли дейтерия из наблюдений и астрохимической модели для холодных плотных ядер // Физика космоса: труды 51-й Всероссийской с международным участием студенческой научной конференции — 2024 — стр. 310–313.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Диссертация содержит 41 рисунок и 11 таблиц, в полном объеме 146 страниц. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

Содержание работы

Во Введении обсуждается актуальность диссертационной работы, цели и задачи, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, методы, использованные в диссертации. Во Введении представлен список положений, выносимых на защиту и список публикаций автора по теме диссертации, а также апробация результатов и обозначен личный вклад автора.

Первая глава диссертации содержит описание и анализ современной картины звездообразования и содержания химических элементов на основе наблюдательных данных и астрохимических моделей. Рассмотрены процессы фракционирования изотопов в соединениях и детально описан процесс фракционирования дейтерия. Показано, какие факторы влияют на изменение доли дейтерия в соединениях в холодных плотных ядрах. Фракционирование дейтерия напрямую зависит от степени вымерзания СО и отношения орто- и пара-водорода, которые зависят от плотности и температуры газа и пыли. Поэтому ожидается, что доля дейтерия в соединениях увеличивается к центру холодных плотных ядер. Наблюдения разных индикаторов плотности показывают, как изменяется доля дейтерия в разных соединениях в различных частях холодных плотных ядер. Глава содержит описание исследуемых областей образования звезд малых масс L1688 и В5, а также холодных плотных ядер в них. В конце главы приводятся методы расчета лучевой концентрации,

доли дейтерия в соединениях, степени вымерзания CO, а также описание астрохимической модели PyRate3.

Вторая глава диссертационной работы посвящена обработке и анализу наблюдательных данных переходов сверхтонкой структуры спектроскопического уровня соединений в направлении плотных ядер в областях образования звезд малых масс L1688 и B5: N_2H^+ , N_2D^+ , NH_3 , NH_2D , $H^{13}CO^+$ и DCO^+ (пример спектров в направлении центра плотных ядер; рис. 1 и 2). Для увеличения покрытия карт наблюдений с низким отношением сигнал-шума, при приближении спектров фиксировалась температура возбуждения линии для всей карты, найденная при исследовании пространства параметров оптической толщины и температуры возбуждения. В главе на основе этих наблюдений получены карты лучевых концентраций для четырех холодных плотных ядер в L1688 и волокна B5 (рис. 3 и 4) и проведен анализ нетепловых компонент дисперсии скорости линий и лучевых скоростей. Показано, что дейтерированные соединения имеют дисперсию ниже, чем водородсодержащие, что согласуется с теорией фракционирования дейтерия. Также показано, что B5 имеет двойную структуру и дополнительную скоростную компоненту к востоку от холодного плотного ядра. Местоположение пиков интенсивности излучения линий и лучевых концентраций дейтерированных и водородсодержащих соединений заметно отличается в волокне B5. Пик дейтерированных соединений находится в пике излучения пыли холодного плотного ядра, а водородсодержащих в направлении на протозвезду.

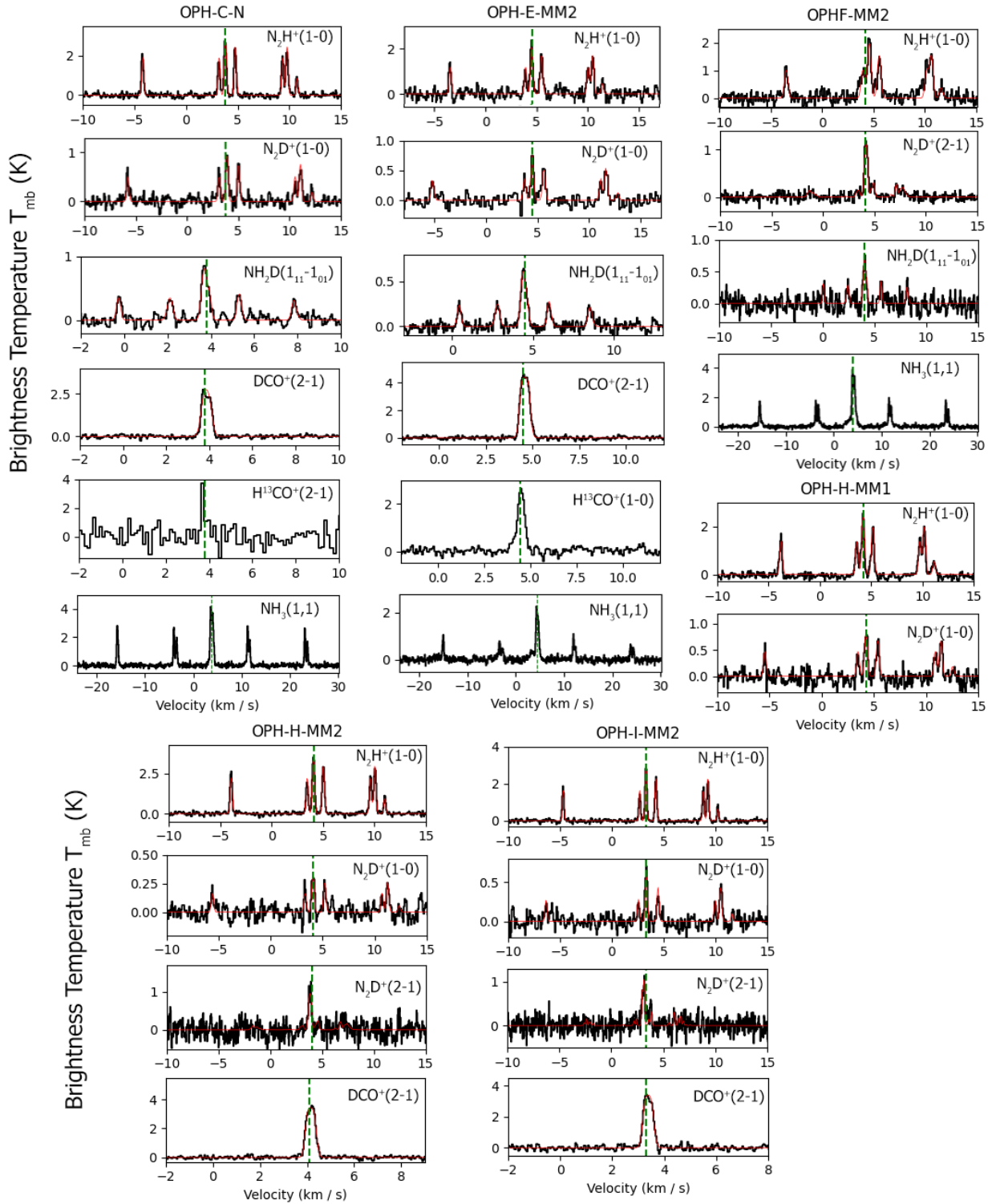


Рис. 1 — Примеры спектров наблюдаемых линий в направлении Orph-C-N, Orph-E-MM2, Orph-F, Orph-H-MM1, Orph-I-MM2 и Orph-H-MM2. Чёрные линии обозначают наблюдаемый спектр, а красные - синтетические спектры, полученные в результате приближения линий

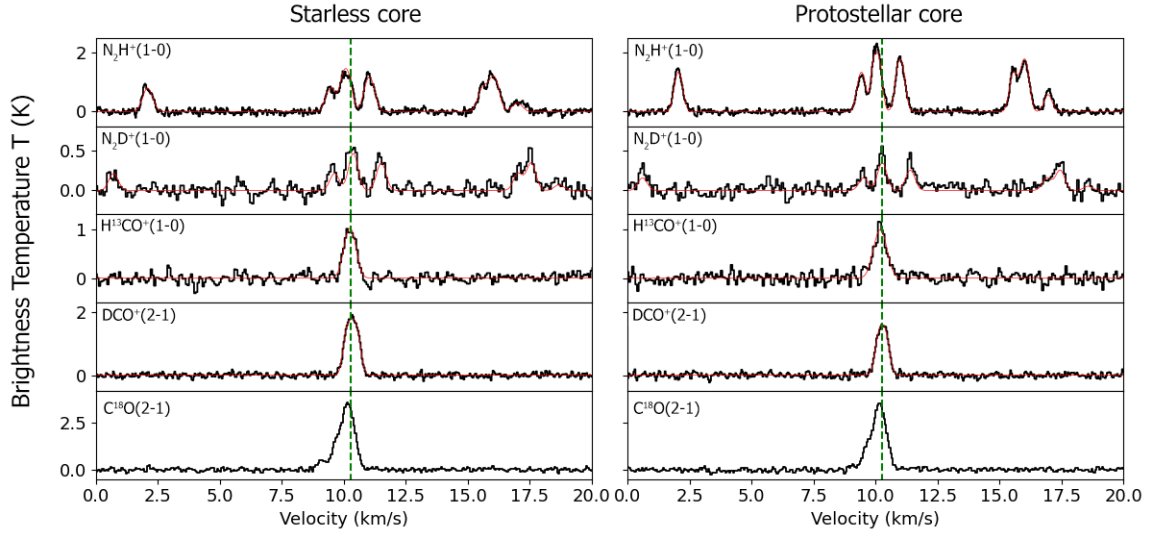


Рис. 2 — Спектры (черный цвет) и приближение (красный цвет) наблюдаемых линий в направлении пика интенсивности излучения пыли беззвездного ядра (слева) и протозвездного ядра (справа) в В5. Зеленые пунктирные вертикальные линии показывают значение V_{LSR} в направлении каждой из этих точек, усредненное по всем линиям

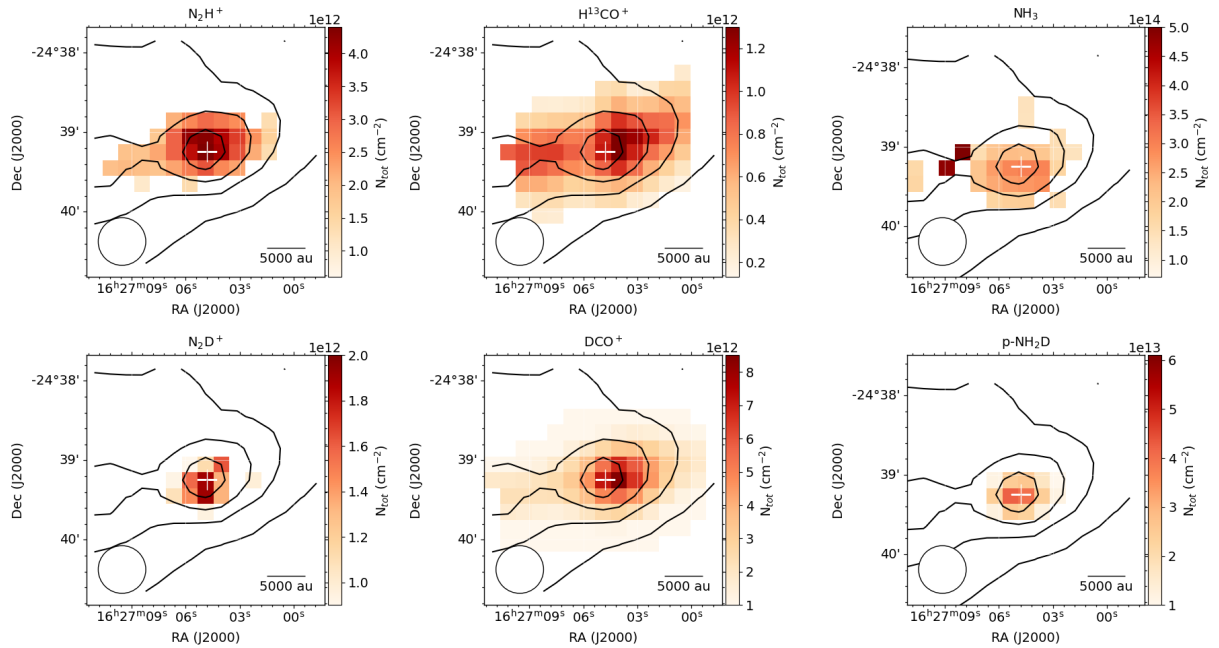


Рис. 3 — Карты лучевых концентраций N_2H^+ , N_2D^+ , $p\text{-NH}_2\text{D}$, NH_3 , DCO^+ и H^{13}CO^+ в направлении Oph-E-MM2. Лучевая концентрация молекулярного водорода обозначена черными контурами. Первый контур начинается с $1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ с шагом контура $0.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. Размер диаграммы направленности указан в левом нижнем углу каждой карты. Белый крестик показывает положение, наблюдаемое в работе [15]

Третья глава посвящена исследованию фракционирования дейтерия в области образования звезд малых масс L1688. В главе были получены доли дейтерия $R_D(N_2D^+/N_2H^+)$ для четырех ядер, $R_D(NH_2D/NH_3)$ для трех ядер и $R_D(DCO^+/HCO^+)$ для двух ядер (см. рис. 5). Полученные данные свидетельствуют об увеличении доли дейтерия в соединениях в центре холодных плотных ядер. Разница между углеродсодержащими соединениями и азотсодержащими соединениями дополнительно показывает возрастание доли дейтерия в соединениях с увеличением плотности (рис. 6). В главе представлено сравнение результатов астрохимического моделирования с наблюдательными данными. На основе этого сравнения был получен химический возраст холодных плотных ядер.

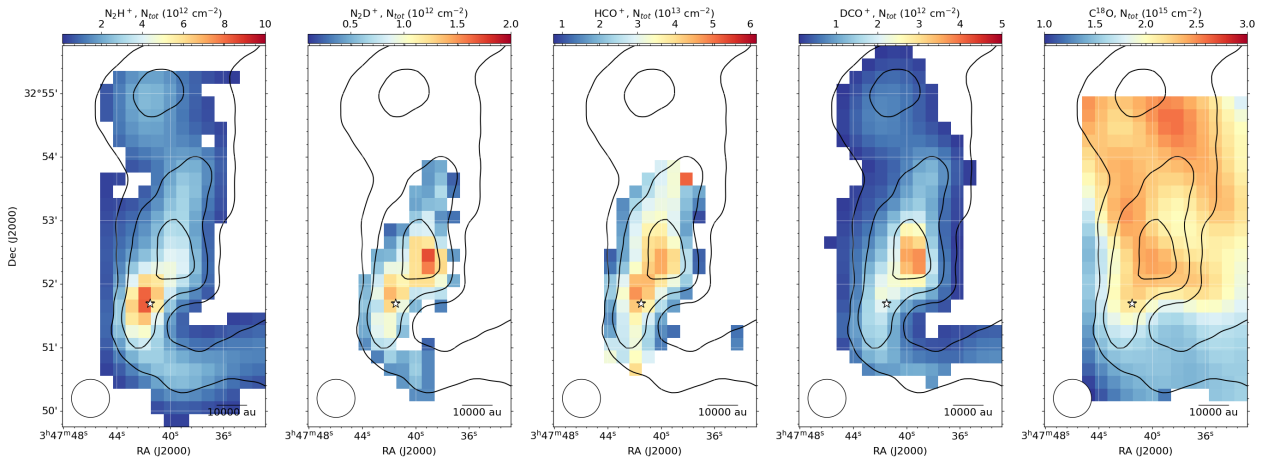


Рис. 4 — Карты лучевых концентраций N_2H^+ , N_2D^+ , DCO^+ , HCO^+ и $C^{18}O$ в направлении В5. Черный контур показывает лучевую концентрацию молекулярного водорода (первый контур начинается с $0.8 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ с шагом контура $0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Звездочка обозначает положение протозвезды [36]. Размер диаграммы направленности указан в левом нижнем углу каждой карты

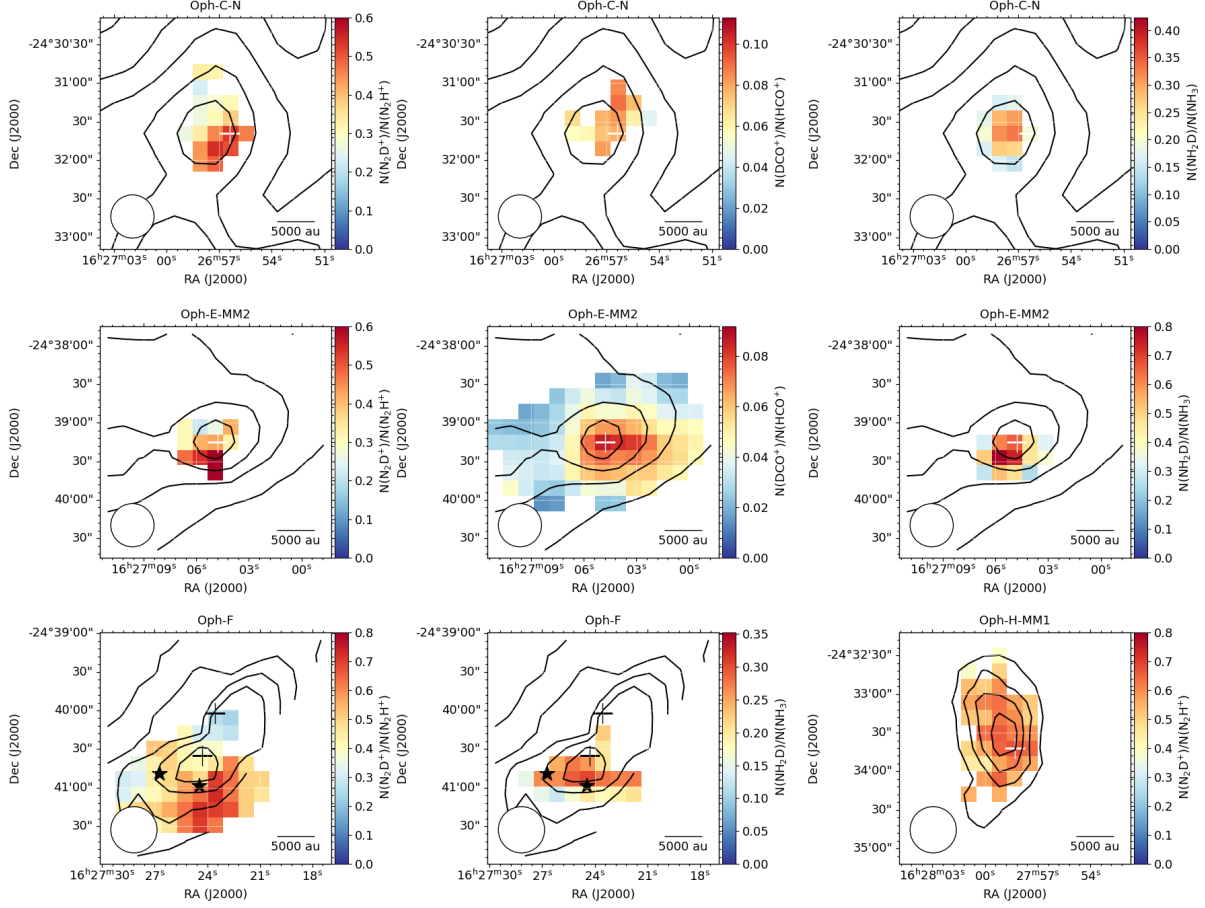


Рис. 5 — Карты доли дейтерия в соединениях для холодных плотных ядер Oph-C-N, Oph-E-MM2, Oph-F и Oph-H-MM1. Лучевая концентрация молекулярного водорода обозначена черными контурами. Первый контур начинается с $1.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ с шагом контура $0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. *Вверху*: Oph-C-N; *в центре*: Oph-E-MM2; *внизу*: Oph-F и Oph-H-MM1. Размер диаграммы направленно-сти показан в левом нижнем углу каждой карты. Крестики обозначают положения точечных наблюдений из работы [15]. Звезды показывают положения протозвезд (YLW15, Класс 0+I, CRBR 2422.8-3423, Класс I; [37, 38, 39, 40]) в Oph-F

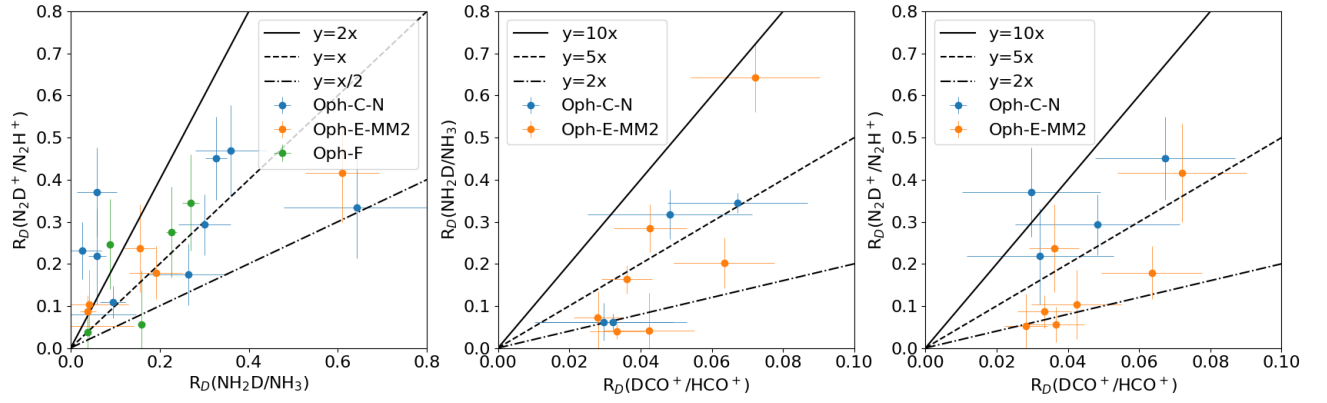


Рис. 6 — Сравнение доли дейтерия для трёх соединений: *слева*: $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ в сравнении с $R_D(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$; *в центре*: $R_D(\text{NH}_2\text{D}/\text{NH}_3)$ в сравнении с $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$; *справа*: $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ в сравнении с $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$. Линии показывают соотношение долей дейтерия в соединениях

В четвертой главе обсуждается исследование фракционирования дейтерия в волокне В5. Проведен поиск подходящего канонического содержания СО для областей образования звезд малых масс Змееносца и Персея. В главе получены доли дейтерия $R_D(\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+)$ и $R_D(\text{DCO}^+/\text{HCO}^+)$, степень вымерзания СО по наблюдательным данным C^{18}O , степень ионизации и зависимости доли дейтерия в соединениях от физических параметров (рис. 7 и 8). Также в главе обсуждается, как изменяется доля дейтерия в соединениях под воздействием протозвезды малой массы, расположенной рядом с холодным плотным ядром.

В Заключении формулируются основные результаты проведенных исследований.

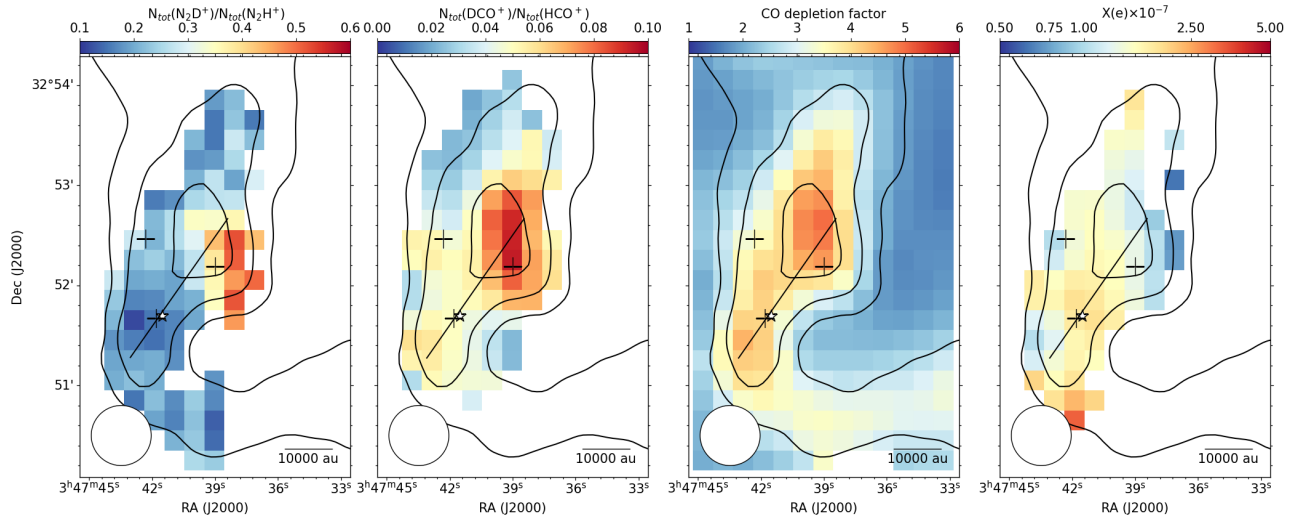


Рис. 7 — Карты доли дейтерия для N_2H^+ (крайний левый) и HCO^+ (в центре слева) в направлении В5. Степень вымерзания CO в направлении В5 (в центре справа). Степень ионизации, оцененная по сумме содержания ионов (N_2H^+ , N_2D^+ , HCO^+ и DCO^+ , *крайний правый*). Лучевая концентрация молекулярного водорода показана черными контурами (первый контур начинается с $0.8 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ с шагом контура $0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$). Крестики показывают положения точечных наблюдений в работе [41]. Звездочка показывает положение протозвезды [36]. Размер диаграммы направленности указан в левом нижнем углу каждой карты. Черная линия показывает направление профиля на рис. 8

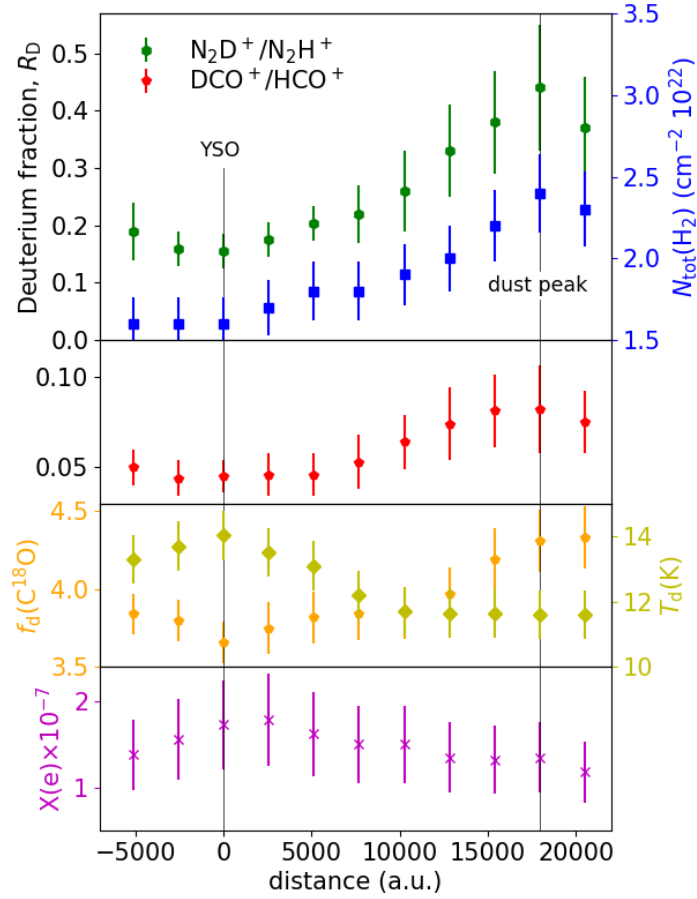


Рис. 8 — Профиль средних долей дейтерия в N_2H^+ и HCO^+ , лучевой концентрации молекулярного водорода, степени вымерзания CO, температуры пыли и степени ионизации в направлении от протозвезды к пику излучения пыли холодного плотного ядра в В5

Список литературы

- [1] *Lynds B. T.* Catalogue of Dark Nebulae. // . — 1962. — Vol. 7. — P. 1.
- [2] *Loren R. B., Wootten A., Wilking B. A.* Cold DCO + Cores and Protostars in the Warm rho Ophiuchi Cloud // Astrophysical Journal. — 1990. — Vol. 365. — P. 269.
- [3] *Pagani L., Lagache G., Bacmann A. et al.* L183 (L134N) Revisited. I. The very cold core and the ridge // Astronomy & Astrophysics. — 2003. — Vol. 406. — Pp. L59–L62.
- [4] *Snow T. P., McCall B. J.* Diffuse Atomic and Molecular Clouds // . — 2006. — Vol. 44, № 1. — Pp. 367–414.
- [5] *van Dishoeck E. F., Herbst E., Neufeld D. A.* Interstellar Water Chemistry: From Laboratory to Observations // Chemical Reviews. — 2013. — Vol. 113, № 12. — Pp. 9043–9085.
- [6] *Ward-Thompson D., Scott P. F., Hills R. E., André P.* A submillimetre continuum survey of pre-protostellar cores // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1994. — Vol. 268, № 1. — Pp. 276–290. <https://doi.org/10.1093/mnras/268.1.276>.
- [7] *Ward-Thompson D., Motte F., Andre P.* The initial conditions of isolated star formation - III. Millimetre continuum mapping of pre-stellar cores // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1999. — Vol. 305, № 1. — Pp. 143–150.
- [8] *Herbst E., van Dishoeck E. F.* Complex Organic Interstellar Molecules // . — 2009. — Vol. 47, № 1. — Pp. 427–480.
- [9] *Boogert A. C. A., Gerakines P. A., Whittet D. C. B.* Observations of the icy universe. // . — 2015. — Vol. 53. — Pp. 541–581.
- [10] *Caselli P., Walmsley C. M., Zucconi A. et al.* Molecular Ions in L1544. II. The Ionization Degree // Astrophysical Journal. — 2002. — Vol. 565, № 1. — Pp. 344–358.

- [11] *Pagani L., Bacmann A., Cabrit S., Vastel C.* Depletion and low gas temperature in the L183 (=L134N) prestellar core: the $\text{N}_2\text{H}^+/\text{N}_2\text{D}^+$ tool // *Astronomy & Astrophysics*. — 2007. — Vol. 467, № 1. — Pp. 179–186.
- [12] *Dalgarno A., Lepp S.* Deuterium fractionation mechanisms in interstellar clouds. // *Astrophysical Journal Letters*. — 1984. — Vol. 287. — Pp. L47–L50.
- [13] *Caselli P., Walmsley C. M., Tafalla M. et al.* CO Depletion in the Starless Cloud Core L1544 // *Astrophysical Journal Letters*. — 1999. — Vol. 523, № 2. — Pp. L165–L169.
- [14] *Pagani L., Daniel F., Dubernet M. L.* On the frequency of N_2H^+ and N_2D^+ // *Astron. and Astrophys.* — 2009. — Vol. 494, № 2. — Pp. 719–727.
- [15] *Punanova A., Caselli P., Pon A. et al.* Deuterium fractionation in the Ophiuchus molecular cloud // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — Vol. 587. — P. A118.
- [16] *Friesen R. K., Pineda J. E., co-PIs et al.* The Green Bank Ammonia Survey: First Results of NH_3 Mapping of the Gould Belt // *Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 843, № 1. — P. 63.
- [17] *Emprechtinger M., Caselli P., Volgenau N. H. et al.* The $\text{N}_2\text{D}^+/\text{N}_2\text{H}^+$ ratio as an evolutionary tracer of Class 0 protostars // *Astronomy & Astrophysics*. — 2009. — Vol. 493, № 1. — Pp. 89–105.
- [18] *Pineda J. E., Goodman A. A., Arce H. G. et al.* Direct Observation of a Sharp Transition to Coherence in Dense Cores // *Astrophysical Journal Letters*. — 2010. — Vol. 712, № 1. — Pp. L116–L121.
- [19] *Huang J., Öberg K. I.* Detection of N_2D^+ in a Protoplanetary Disk // *Astrophysical Journal Letters*. — 2015. — Vol. 809, № 2. — P. L26.
- [20] *Imai M., Sakai N., López-Sepulcre A. et al.* Deuterium Fractionation Survey Toward Protostellar Sources in the Perseus Molecular Cloud: HNC Case // *Astrophysical Journal*. — 2018. — Vol. 869, № 1. — P. 51.

- [21] *Shu F. H., Adams F. C., Lizano S.* Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1987. — Vol. 25, № Volume 25, 1987. — Pp. 23–81.
<https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.aa.25.090187.000323>.
- [22] *Andre P., Ward-Thompson D., Barsony M.* Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps // Astrophysical Journal. — 1993. — Vol. 406. — P. 122.
- [23] *Tafalla M., Santiago-García J., Myers P. C. et al.* On the internal structure of starless cores. II. A molecular survey of L1498 and L1517B // Astronomy & Astrophysics. — 2006. — Vol. 455, № 2. — Pp. 577–593.
- [24] *Bergman P., Parise B., Liseau R., Larsson B.* Deuterated formaldehyde in ρ Ophiuchi A // Astronomy & Astrophysics. — 2011. — Vol. 527. — P. A39.
- [25] *Chacón-Tanarro A., Caselli P., Bizzocchi L. et al.* Mapping deuterated methanol toward L1544. I. Deuterium fraction and comparison with modeling // Astronomy & Astrophysics. — 2019. — Vol. 622. — P. A141.
- [26] *Redaelli E., Bizzocchi L., Caselli P. et al.* High-sensitivity maps of molecular ions in L1544. I. Deuteration of N_2H^+ and HCO^+ and primary evidence of N_2D^+ depletion // Astronomy & Astrophysics. — 2019. — Vol. 629. — P. A15.
- [27] *Ambrose H. E., Shirley Y. L., Scibelli S.* A survey of CH_2DOH towards starless and pre-stellar cores in the Taurus molecular cloud // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2021. — Vol. 501, № 1. — Pp. 347–355.
- [28] *Crapsi A., Caselli P., Walmsley C. M. et al.* Probing the Evolutionary Status of Starless Cores through N_2H^+ and N_2D^+ Observations // Astrophysical Journal. — 2005. — Vol. 619, № 1. — Pp. 379–406.
- [29] *Harju J., Daniel F., Sipilä O. et al.* Deuteration of ammonia in the starless core Ophiuchus/H-MM1 // Astronomy & Astrophysics. — 2017. — Vol. 600. — P. A61.

- [30] *Bacmann A., Lefloch B., Ceccarelli C. et al.* CO Depletion and Deuterium Fractionation in Prestellar Cores // *Astrophysical Journal Letters*. — 2003. — Vol. 585, № 1. — Pp. L55–L58.
- [31] *Caselli P., Vastel C., Ceccarelli C. et al.* Survey of ortho-H₂D⁺ (1_{1,0}-1_{1,1}) in dense cloud cores // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — Vol. 492, № 3. — Pp. 703–718.
- [32] *Kong S., Caselli P., Tan J. C. et al.* The Deuterium Fractionation Timescale in Dense Cloud Cores: A Parameter Space Exploration // *Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 804, № 2. — P. 98.
- [33] *Sipilä O., Caselli P., Harju J.* Benchmarking spin-state chemistry in starless core models // *Astronomy & Astrophysics*. — 2015. — Vol. 578. — P. A55.
- [34] *Sipilä O., Harju J., Caselli P., Schlemmer S.* Spin-state chemistry of deuterated ammonia // *Astronomy & Astrophysics*. — 2015. — Vol. 581. — P. A122.
- [35] *Ridge N. A., Di Francesco J., Kirk H. et al.* The COMPLETE Survey of Star-Forming Regions: Phase I Data // . — 2006. — Vol. 131, № 6. — Pp. 2921–2933.
- [36] *Yu K. C., Billawala Y., Bally J.* Parsec-Scale CO Outflow and H₂ Jets in Barnard 5 // . — 1999. — Vol. 118, № 6. — Pp. 2940–2961.
- [37] *Young E. T., Lada C. J., Wilking B. A.* High-Resolution IRAS Observations of the Rho Ophiuchi Cloud Core // *Astrophysical Journal Letters*. — 1986. — Vol. 304. — P. L45.
- [38] *Kirk H., Dunham M. M., Di Francesco J. et al.* ALMA Observations of Starless Core Substructure in Ophiuchus // *Astrophysical Journal*. — 2017. — Vol. 838, № 2. — P. 114.
- [39] *Comeron F., Rieke G. H., Burrows A., Rieke M. J.* The Stellar Population in the rho Ophiuchi Cluster // *Astrophysical Journal*. — 1993. — Vol. 416. — P. 185.
- [40] *Bontemps S., André P., Kaas A. A. et al.* ISOCAM observations of the rho Ophiuchi cloud: Luminosity and mass functions of the pre-main sequence

embedded cluster // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — Vol. 372. — Pp. 173–194.

- [41] *Friesen R. K., Kirk H. M., Shirley Y. L.* An Analysis of the Deuterium Fractionation of Star-forming Cores in the Perseus Molecular Cloud // *Astrophysical Journal*. — 2013. — Vol. 765, № 1. — P. 59.