ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертационную работу Петрашкевича Игоря Вячеславовича «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 — физика космоса, астрономия

Диссертация Игоря Вячеславовича Петрашкевича посвящена исследованию содержаний дейтерированных и водородсодержащих соединений в плотных ядрах молекулярных облаков, связанных с областями образования звезд малых масс на ранних стадиях эволюции. Это важно как для задач астрохимии, так и для разработки общего сценария образования звезд типа Солнца, что является одной из ключевых проблем современной астрофизики.

Плотные ядра молекулярных облаков, связанные с областями образования звезд малых масс, представляют собой уникальные химические лаборатории, в которых как в газовой фазе, так и на поверхности пылинок образуются различные соединения. При низких температурах и высоких плотностях, характерных для этих объектов, активно протекают процессы фракционирования изотопов химических элементов, входящих в соединения. Особое внимание привлекает процесс фракционирования дейтерия, который может зависеть от различных параметров. Наблюдения показывают, что в плотных ядрах содержание дейтерия в соединениях на порядки выше, чем в диффузной межзвездной среде. Среди физических параметров, влияющих на образование дейтерированных соединений, выделяют соотношение орто- и пара- водорода и содержание молекул CO в газовой фазе. Оба этих фактора зависят от плотности и температуры газа и пыли. Увеличение плотности и понижение температуры в беззвездном ядре приводит к увеличению эффективно-

сти производства дейтерированных соединений, а нагрев газа и пыли в ядре с внутренним источником вызывает обратный процесс. Кроме того, общее количество ионов (степень ионизации) может служить фактором, влияющим на фракционирование дейтерия. Для исследования процесса фракционирования дейтерия в ядрах, находящихся на различных стадиях эволюции, необходимы оценки содержаний дейтерированных молекул и ионов и их водородсодержащих аналогов, которые получают из наблюдений. Сравнение с физическими условиями в ядрах и с результатами расчетов астрохимических моделей позволяет связать воедино физические и химические характеристики объектов и определить, на какой эволюционной стадии они находятся, что необходимо в конечном итоге для построения согласованного сценария образования звезд малых масс.

Указанные выше задачи определяют актуальность диссертационной работы И. В. Петрашкевича, в которой проведен анализ новых данных наблюдений низких вращательных переходов дейтерированных и водородсодержащих изотопологов в областях образования звезд малых масс L1688 и B5, получены оценки содержаний, проведено сравнение с различными физическими параметрами, включая степень вымерзания CO, а также сделано сравнение с результатами расчетов астрохимической модели для определения химического возраста ядер.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы составляет 145 страниц, включая 40 рисунков и 12 таблиц.

В первой главе дается описание процесса образования звезд малых масс в плотных ядрах молекулярных облаков. Описан процесс фракционирования дейтерия и результаты измерений долей дейтерия в различных соединениях в ядрах. Приводятся данные об областях L1688 и B5, содержащих ядра, связанных с областями образования звезд малых масс. Дается краткий обзор результатов предыдущих наблюдений этих областей (в основном, точечных) в линиях различных дейте-

рированных соединений, которые указали на повышенные значения доли дейтерия и при этом низкую степень вымерзания CO. В главе дано описание методов расчета лучевых концентраций, долей дейтерия в соединениях, степени вымерзания молекул CO, а также описана двухфазная астрохимическая модель PyRate3, с помощью которой рассчитывается эволюция химического состава ядер с учетом взаимодействия орто- и пара- изомеров дейтерия и водорода.

Во второй главе приведены результаты анализа полученных на телескопе IRAM-30m карт плотных ядер в области L1688, и волокна B5 в линиях нижних вращательных переходов молекул N_2H^+, N_2D^+, $H^{13}CO^+$, DCO^+, NH_2D, $C^{18}O$, а также данных наблюдений в линиях молекул NH_3 и ^{13}CO, взятых из литературы. При обработке линий со сверхтонкими компонентами определялись температура возбуждения компонент и оптическая толщина. Для увеличения числа анализируемых пикселей на картах был проведен анализ пространств значений оптической толщины и температуры возбуждения для каждого ядра и определена наиболее вероятная температура возбуждения. В главе приводятся карты интегральных интенсивностей наблюдавшихся линий, оптических толщин, лучевых скоростей, дисперсий скоростей, а также карты лучевых концентраций дейтерированных и водородсодержащих молекул.

В третьей главе приводятся результаты анализа отношений содержаний дейтерированных и водородсодержащих молекул (RD) в ядрах L1688, а также результаты сравнения с результатами расчетов астрохимической модели. Полученные значения RD для азотсодержащих молекул оказались в несколько раз выше соответствующих значений для углеродсодержащих молекул, что может быть связано с тем, что азотсодержащие соединения являются индикаторами газа с более высокой плотностью. Корреляций между RD и такими физическими параметрами, как лучевая концентрация водорода, температуры газа и пыли, уровнем турбулентности обнаружено не было. Получены оценки верхнего предела степени вымерзания молекулы CO в четырех ядрах и степени ионизации для одного ядра. Показано, что наибольшее влияние на результаты расчетов астрохимической модели

PyRate3 оказывают принятые значения содержания азота. Из сравнения наблюдаемых значений RD с модельными зависимостями сделаны оценки химических возрастов четырех ядер.

Четвертая глава посвящена анализу отношений RD в волокне B5, где есть ядро с протозвездой и беззвездное ядро. Как и в случае L1688 значения RD для азотсодержащих соединений оказались в несколько раз выше, чем для углеродсодержащих. Оценки степени вымерзания CO для отдельных позиций выше полученных ранее значений, что связано, в основном, с использованием более высокого канонического значения содержания CO. Сравнение радиальных профилей RD с профилями различных физических параметров вдоль пути, соединяющего протозвезду и центр беззвездного ядра, выявило положительные корреляции между RD, лучевой концентрацией водорода и степенью вымерзания CO, а также отрицательные корреляции между RD, температурой пыли и степенью ионизации.

Диссертация И. В. Петрашкевича является серьезным научным трудом, в полной мере соответствующим требованиям, необходимым для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Цели и задачи четко сформулированы. В качестве научной новизны следует отметить впервые полученные карты областей L1688 и B5 в линиях различных дейтерированных и водородсодержащих молекул, пространственные распределения лучевых концентраций и отношений содержаний дейтерированных и водородсодержащих молекул, дисперсий скоростей линий и степени вымерзания CO, результаты сравнения отношений RD азотсодержащих и углеродсодержащих молекул, результаты сравнения с физическими параметрами ядер, а также результаты расчетов химической модели и оценки химических возрастов ядер.

Оценки содержаний дейтерированных молекул и их водородсодержащих аналогов, оценки степени вымерзания молекулы CO в плотных ядрах, связанных с областями образования звезд малых масс, имеют большую практическую значимость и безусловно будут использованы специалистами в области астрохимии и

физики областей звездообразования. Использованный метод анализа карт линий со сверхтонкой структурой для оценки температуры возбуждения и оптической толщины может применяться в дальнейшем для анализа карт аналогичных линий с невысоким отношением сигнала к шуму.

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются качеством использованных наблюдательных данных, полученных на лучших мировых радиотелескопах (IRAM-30m, FCRAO, GBT), детальным анализом данных с помощью общепринятых в астрономическом сообществе программных пакетов (CLASS, PYSPECKIT), сопоставлением с имеющимися данными и независимыми оценками и использованием апробированной астрохимической модели. Степень обоснованности научных положений и выводов заслуживает высокой оценки.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих астрономических журналах, включая статью в Астрономическом Журнале, статью в журнале Astrophysical Journal и статью в журнале Monthly Notices RAS.

По содержанию есть ряд замечаний и вопросов:

– В положении 2, выносимом на защиту, сказано: «Показано, что доля дейтерия в соединениях увеличивается с увеличением плотности и уменьшением температуры холодных плотных ядер L1688». В выводах к 3-й главе в пункте 3 сказано: «… выполнен анализ корреляций между долями дейтерия и физическими параметрами ядер – лучевая концентрация молекулярного водорода, температура газа и пыли… Не обнаружено значимой корреляции ни с одним из параметров». Как согласуются эти два утверждения?

– Необходимо указать, индикаторами каких плотностей являются анализировавшиеся линии азотсодержащих и углеродсодержащих соединений.

– Следует привести значения оптической толщины хотя бы для центральных позиций каждого ядра вместе с погрешностями, поскольку они вносят основной вклад в погрешности рассчитанных лучевых концентраций.

– В Табл. 2.2 и 2.3 приведены значения температуры возбуждения, выбранные в качестве оптимальных в результате исследования пространств параметров. Однако, судя по Рис. 2.5 и 2.6, некоторые значения температуры возбуждения выходят за рамки доверительных диапазонов (например, 7.0 K DCO^+(2-1) C-N; 8.0K DCO^+(2-1) E-MM2; 4.5 K NH_2D E-MM2; 5.5 K N_2H^+(1-0) B5). С чем это связано?

– На стр. 68 перечислены значения лучевых концентраций ядер L1688, округленные до порядка величины. Они повторяются в выводах ко второй главе и в списке основных результатов в заключении. Что это за значения?

– Нет рисунков с зависимостями долей дейтерия от физических параметров в L1688. Анализ, изложенный в Разд. 3.2, был бы нагляднее. Нет рисунка с зависимостями долей дейтерия от кинетической температуры в B5.

– Какова болометрическая светимость источника B5 IRS1 (IRAS03434+3242) и какой стадии эволюции она соответствует?

– Спектры $H^{13}CO^+$(2-1) в ядре C-N, полученные с большой шумовой температурой, были сглажены (стр. 46), так что результирующий спектр стал, по-видимому, занимать всего один канал (Рис. 2.7). Как проводилась обработка таких спектров и как оценивалась дисперсия скоростей (Рис. 2.11)?

– При обсуждении рисунка 2.14 сказано, что «NH_2D показывает самые узкие линии, что может указывать на их происхождение из еще более холодного газа в центрах ядер» (стр. 63). Однако на рисунке сравниваются нетепловые дисперсии скоростей соединений. Следует найти другое объяснение.

– На стр. 43 сказано: «наблюдения имеют … сигнал-шум 0.1—0.2 K». Указанные значения не являются отношением сигнал/шум. Что это за величины?

В тексте есть ошибки:

– В задачах работы (стр. 8) в списке наблюдавшихся линий указаны такие, которые не наблюдались и не анализировались: N_2H^+(2-1), HCO^+(1-0), HCO^+(2-1), NH_3(3,3).

– В тексте, включая название раздела 1.5, неоднократно используется определение «субмиллиметровый диапазон». Наблюдения, результаты которых анализируются, проводились в миллиметровом диапазоне.

– Примечание к Табл. 2.2 и 2.3: «HPBWobs — полуширина на полувысоте наблюдаемой линии». На самом деле это полная ширина на половинном уровне.

– $\Delta\sigma_NT$, $\Delta\sigma_obs$ в формуле 2.2 (стр. 62) есть на самом деле σ_NT, σ_obs.

– Таблица на стр. 67 не пронумерована.

– На стр. 111 сказано, что доля дейтерия в углеродсодержащих соединениях на порядок меньше, чем в азотсодержащих. В первом выводе к главе 4 сказано, что доля дейтерия в азотсодержащем ионе в пять раз выше, чем в углеродсодержащем. Приведенные диапазоны значений одни и те же.

В тексте встречаются довольно размытые, неконкретные формулировки и неудачная терминология, что приводит к трудности понимания. Вот некоторые примеры неудачных терминов:

– Неоднократно говорится о «приближении» спектров, переходов, линий, о параметрах «приближения», где под «приближением» имеется в виду «аппроксимация». Хотя термин «аппроксимация» тоже встречается.

– «с автокорреляционным спектрометром в качестве фона» (стр. 43),

– вместо «луч» в тексте неоднократно встречается «пучок». На стр. 117 сказано про «разницу, вызванную разбавлением пучка»,

– «эмиссия … является наименее загрязненной эмиссией окружающего облачного газа» (стр. 62),

– «Линия ^{13}CO(1-0) обладает высокой разрешающей способностью» (стр. 71),

– «несколько размеров лучей зрения» (стр. 78),

– «плотности колонок» (стр. 92),

– «представлены первые карты» (стр. 121, 125). Неудачный перевод с английского, следовало бы сказать «впервые представлены карты»,

В тексте много грамматических ошибок, есть несогласованности в падежах, несогласованности в числе существительных и соответствующих определений, пропуски слов, ошибки в пунктуации, орфографии и просто опечатки, что порой весьма затрудняет чтение.

Указанные недочеты не снижают общей положительной оценки работы.

Диссертация Петрашкевича Игоря Вячеславовича «Исследование фракционирования дейтерия в химических соединениях в областях образования звезд малых масс» является законченным научным квалификационным трудом, выполненным под руководством кандидата физико-математических наук А. И. Васюнина. В нем содержатся новые астрономические данные и результаты анализа, полученные с помощью современных методов и программ. Результаты диссертации доложены на международной и нескольких российских конференциях, опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия, а ее автор, Петрашкевич Игорь Вячеславович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук. Результаты диссертационной работы представляют интерес для специалистов в области астрохимии и физики областей звездообразования. Они могут быть использованы в ИНАСАН, АКЦ ФИАН, ГАИШ МГУ, УрФУ, ФТИ РАН, ИПФ РАН и других организациях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником отдела радиоприемной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии Института прикладной физики РАН, доктором физико-математических наук Львом Евгеньевичем Пироговым.



В.н.с., д.ф.-м.н. Л. Е. Пирогов

подпись Л. Е. Пирогова заверяю

ученый секретарь ИПФ РАН, к.ф.-м. И. В. Корюкин

603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

тел. +7(831)4[illegible], email: pirogov.a[illegible].ru