

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по науке ФГАОУ ВО  
«Уральский федеральный университет

имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина», кандидат физико-  
математических наук

В.В. Кружаков

2021 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе Моляровой Тамары Сергеевны «Химическая структура протопланетных дисков со стационарной и вспышечной аккрецией», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия.

Диссертация Т. С. Моляровой «Химическая структура протопланетных дисков со стационарной и вспышечной аккрецией», выполненная в Институте астрономии РАН, посвящена изучению особенностей химического состава протопланетных дисков методом моделирования химических и динамических процессов в них, что является крайне актуальной задачей в свете появления большого количества принципиально новых наблюдательных данных о протопланетных дисках. Новые сверхмощные телескопы — ALMA, NOEMA, SMA, VLA — дали возможность на новом уровне наблюдательно изучать протопланетные диски, пространственно их разрешить, классифицировать по возрасту, измерить их массы и химический состав. Новые возможности наблюдений требуют более детального и точного моделирования процессов в дисках для более обоснованной интерпретации наблюдательных данных. В частности, особый интерес представляет нахождение, моделирование и изучение так называемых снежевых линий или линий льдов, которые связывают с образованием планет. Моделирование льда на поверхности пыли в дисках важно в свете предстоящих космических миссий JWST, Миллиметрон и Origins ST, которые будут изучать состав межзвездного льда с помощью наблюдений в дальнем инфракрасном диапазоне, недоступном для наблюдений с Земли.

В диссертации получены новые результаты; их достоверность подтверждается сравнением с другими теоретическими работами и с результатами независимых наблюдений, некоторые из которых были опубликованы позже опубликования работ по диссертации. По материалам диссертации Т. С. Моляровой опубликованы 9 статей и тезисов докладов, из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых международных журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы многократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

Диссертация Т. С. Моляровой состоит из введения, 3 глав, заключения, списка цитируемой литературы (193 источника) и 2 приложений, общий объем работы 168 страниц, содержащих 29 рисунков и 7 таблиц.

Во Введении диссертации обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели и задачи, приведено краткое содержание работы, отмечены новизна полученных результатов, научная и практическая ценность работы, перечислены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе с помощью химического моделирования проводится оценка молекулы CO как индикатора массы протопланетного диска. CO, вторая по распространенности молекула в областях звездообразования, обладает дипольным моментом и простым спектром излучения, поэтому давно применяется астрономами для оценки массы молекулярного газа. Однако, в протопланетных дисках содержание CO относительно H<sub>2</sub> существенно отличается от того, что есть в молекулярных облаках. Чтобы изучить поведение CO в диске, автор рассматривает сразу несколько моделей с разными начальными параметрами — масса протозвезды, масса и размер диска, индекс поверхностной плотности. В настоящее время наблюдательно точно не измерено элементное соотношение C:O в областях звездообразования. Автор также рассматривает два предельных отношения C:O, 0.4 и 2, и анализирует, как меняется химический состав в зависимости от этого параметра. Автор количественно оценила, насколько CO хорош как прокси массы диска по сравнению с другими молекулами и показала, что это не зависит от начального отношения C:O. Однако автор обращает внимание на химическое разрушение CO — в случае C:O = 0.4 большая часть углерода оказывается связанной в CO<sub>2</sub> льде — и приходит к важному выводу, что пренебрежение химическим разрушением CO в моделях может привести к трехкратной недооценке массы диска.

Во второй главе автор с помощью моделирования диска со вспышечной аккрецией анализирует влияние вспышки на химический состав диска и рассматривает различные соединения как индикаторы имеющей место сейчас или в прошлом вспышечной аккреции. Для анализа взяты восемь моделей с разной массой, размером диска и размером пыли. Автор показывает, что в зависимости от параметров диска надежными индикаторами вспышечной аккреции могут быть разные соединения, в первую очередь формальдегид. Содержание формальдегида и других выявленных индикаторов вследствие вспышки возрастает на несколько порядков величины и остается повышенным до нескольких тысяч лет после вспышки. С одной стороны, это значит, что благодаря вспышке становится возможным зарегистрировать многие соединения, содержание которых обычно очень низко. С другой стороны, наблюдая эти соединения можно найти больше дисков, в истории которых была вспышка. Однако, применимость индикаторов также зависит от стадии эволюции диска. Автор нашла три разных эффекта вспышки на химический состав газа и ледяных мантий: десорбция с пыли, синтез на пыли, уравновешенный фотодиссоциацией в газе, и химическая диссоциация на пыли. Автор сравнивает результаты своей модели с другой моделью химии в диске со вспышечной аккрецией. Здесь стоило больший акцент сместить на сравнение именно влияния вспышки. Поскольку в модели, взятой для сравнения, моделируют диск вокруг МЗО более раннего класса, разница в содержании соединений за счет наличия/отсутствия плотной оболочки становится слишком заметна. Стоит отметить, однако, что автор сравнила результаты своей уже опубликованной работы с независимыми наблюдательными исследованиями МЗО V883 Ориона с помощью ALMA, опубликованными впоследствии.

В третьей главе автор рассматривает динамику важных для образования планет летучих соединений в диске. В зависимости от параметров и динамического состояния диска линии льдов могут смещаться по радиусу и принимать сложные формы, наследуя динамику диска. В отличие от первых двух глав, здесь модель предполагает постоянный молекулярный состав без разрушения и образования новых соединений, только фазовые переходы газ — лед за счет тепловой и фотодесорбции и адсорбции, и динамику внутри диска. В расчет взято и влияние вспышек аккреции на состояние летучих соединений. Зато физическая модель более сложная и включает в себя гидродинамику. Автор рассмотрела разный уровень турбулентности в диске и проанализировала динамику соединений и рост пыли в зависимости от турбулентности. Также рассмотрены разные начальные состояния летучих соединений: все в газе, все на пыли, а также и в газе, и на пыли. Однако из текста

неочевидно, в чем состоит разница начального состава трех моделей, описанных в тексте и представленных на рисунках 3.3 и 3.4. В основной рассматриваемой модели все летучие соединения находятся в виде льда на пыли. Важным и интересным результатом является вывод о том, как ледяные мантии меняют свойства пыли в окрестности снеговой линии воды при высокой турбулентности в диске.

В Заключении излагаются основные результаты диссертации. В приложениях содержатся вспомогательные материалы к двум первым главам.

В диссертации впервые проведён систематический поиск индикаторов массы протопланетных дисков на основе моделирования химии в них, даны оценки содержания в дисках газофазного CO, описаны особенности вариаций содержания CO в дисках. Впервые проведён систематический анализ влияния вспышечной акреции у объектов типа FU Oriона на содержание в протопланетном диске различных соединений с помощью детального моделирования химии в диске, приведены соединения-индикаторы дисков, испытывающих и испытывавших в прошлом вспышки светимости. В рамках численной модели впервые описана динамика летучих соединений в самогравитирующем протопланетном диске с эволюцией пыли. Проанализировано влияние ледяных мантий на эволюцию пыли в дисках с высокой и низкой турбулентностью.

Диссертация написана простым и грамотным языком, изложение материала логичное и понятное, в тексте есть единобразие терминов. Есть незначительное количество опечаток и стилистических ошибок (приведены ниже). Стоит отметить большую работу с литературой, автор ссылается на 193 источника. Актуальность, новизна, научная и практическая ценность работы несомненны. Особенно хочется отметить большое количество статей, опубликованных по материалам диссертации в международных астрономических журналах. Ценно и то, что в числе соавторов диссидентки зарубежные коллеги, что говорит о включенности и признании ее работ в астрохимическом сообществе.

По диссертации можно высказать следующие замечания. Замечания по главе 1. Из текста работы складывается впечатление, что в первой главе использована не самая новая химическая модель Semenov & Wiebe 2011, где не включены некоторые важные реакции, эффективность реактивной десорбции одинаковая для всех соединений. Химическая модель могла бы быть описана более подробно. Замечания по главе 2. Влияние вспышек на химию сложных органических молекул в дисках также рассматривается в работе Taquet et al. 2016, которая не была процитирована в диссертации. В частности, в работе Taquet et al. 2016 добавлены газофазные реакции переноса протона, не ведущие к диссоциации протонированного соединения, которые существенно влияют на химию сложной органики в дисках. Недостаточно обсуждается, какие из индикаторов вспышечной активности успешно наблюдаются в межзвездной среде. Хочется видеть в теоретической работе больше параллелей с существующими наблюдениями. Общее замечание: было бы хорошо обозначить в тексте логическую связь между главами.

Замечания по стилю изложения.

1. Страница 8: «Для её определения часто применяется излучение в линиях молекул.» Применяют обычно инструменты и методы, которые можно контролировать. Излучение скорее используют.
2. Страница 22: «...химические соединения в общем смысле: молекулы, ионы, атомы, электроны и радикалы.» Электроны не химические соединения, а все перечисленное можно назвать одним словом — частицы.
3. Страница 23: «Во-вторых, в холодных и плотных физических условиях...» Холодной и плотной может быть среда, а условия — низкая температура и высокая плотность.

Опечатки.

1. Страница 27: «Выше  $z_q$  температура падает, поскольку уменьшается расстояние до звезды; ниже  $z_q$  температура падает из-за поглощения.» В первом случае температура растет.
2. Страница 93: «...которые в условиях протопланетного диска могут находиться как \* газовой, так и в ледяной фазе...» Пропущен предлог «в».

В целом диссертация Т. С. Моляровой выполнена на высоком научном уровне и производит хорошее впечатление. Результаты работы могут быть использованы при планировании наблюдательных исследований протопланетных дисков, в частности, снежевых линий, построении более сложных или детальных моделей дисков. Диссертационную работу Т. С. Моляровой можно квалифицировать как новый вклад в развитие моделирования протопланетных дисков.

Результаты диссертации могут быть использованы во всех организациях, занимающихся исследованием звездообразования в целом и протопланетных дисков в частности: в УрФУ, ЮФУ, АКЦ ФИАН, ИНАСАН, ИПФ РАН, ЧелГУ, ГАИШ МГУ, СПбГУ, других астрономических институтах и обсерваториях. Основные результаты диссертации опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, прошла апробацию докладами на многих конференциях.

Таким образом, диссертация Т. С. Моляровой «Химическая структура протопланетных дисков со стационарной и вспышечной аккрецией» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, а автор работы заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

Отзыв рассмотрен и одобрен на объединенном научном семинаре кафедры астрономии, геодезии, экологии и мониторинга окружающей среды и Коуровской астрономической обсерватории Института естественных наук и математики УрФУ (протокол № 2 от 31 августа 2021 г.).

Руководитель объединенного научного семинара,  
доктор физико-математических наук, доцент

Э.Д.Кузнецов

Рецензент:

старший научный сотрудник  
научной лаборатории астрохимических исследований  
кафедры астрономии, геодезии, экологии  
и мониторинга окружающей среды  
Института естественных наук и математики  
Уральского федерального университета,  
Dr. rer. nat.

Пунанова Анна Фёдоровна

e-mail: [anna.punanova@urfu.ru](mailto:anna.punanova@urfu.ru)  
адрес: 620083, г. Екатеринбург,  
пр. Ленина 51, УрФУ,  
кафедра астрономии, геодезии,  
экологии и мониторинга окружающей среды  
телефон: +7 (343) 261-74-45