

## ОТЗЫВ

официального оппонента Зинченко Игоря Ивановича, заведующего отделом, отдел № 180 «Радиоприёмной аппаратуры и миллиметровой радиоастрономии» Отделения «Физики плазмы и электроники больших мощностей» Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук», на диссертацию Моляровой Тамары Сергеевны на тему «Химическая структура протопланетных дисков со стационарной и вспышечной аккрецией», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Изучение протопланетных дисков является одним из важнейших и наиболее актуальных направлений астрофизических исследований. Актуальность этих работ в значительной мере обусловлена недавними впечатляющими результатами наблюдений таких объектов на новых инструментах, прежде всего на миллиметровой/субмиллиметровой антенной решётке ALMA. Эти результаты дали новые сведения и о химическом составе протопланетных дисков, моделированию которого посвящена диссертационная работа Т.С. Моляровой. Новые важные сведения будут получены с помощью космического телескопа JWST, запуск которого планируется в ближайшее время. Таким образом, тема данной работы, несомненно, актуальна и перспективна. Она актуальна и в вопросе изучения вспышек светимости звёзд, обусловленных эпизодической аккрецией вещества. В работе анализируется влияние таких вспышек на химический состав диска.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений, списка публикаций автора и литературы. Первая глава посвящена выбору наиболее подходящих молекул для оценки массы протопланетного диска. Такой систематический поиск выполнен впервые. Рассматривается набор моделей дисков, параметры которых случайным образом распределены в некоторых диапазонах, характерных для таких объектов. Для каждой из этих моделей с помощью отработанного кода рассчитывается содержание ряда широко распространенных в межзвёздных облаках молекул и атомов. Далее анализируется корреляция их количества с полной массой диска. Среди легко наблюдаемых молекул наилучшую корреляцию демонстрирует монооксид углерода CO. Анализируется также влияние параметров модели на содержание CO в диске. Для этого рассматривается набор моделей на сетке параметров с фиксированными узлами. Обсуждается также зависимость результатов от начального отношения содержаний углерода и кислорода в среде C/O. В целом основным результатом этой главы является вывод о том, что CO представляет собой наиболее адекватный молекулярный индикатор полной массы протопланетного диска.

Вторая глава диссертации посвящена анализу влияния вспышек звёзд типа фуоров на химический состав диска. Впервые решаются задачи поиска, во-первых, молекул, содержание которых сильно возрастает во время вспышки, и, во-вторых, молекул, содержание которых остаётся заметно повышенным долгое время после вспышки. Последнее особенно интересно, так как позволяет в принципе идентифицировать объекты, в которых такие события происходили в недалёком прошлом. Для решения этих задач использовалась та же химическая модель, что и в первой главе, с некоторыми модификациями. Обе задачи успешно решены. Найдены молекулы, содержание которых возрастает на несколько порядков во время вспышки (таких довольно много), а также молекулы, содержание которых остаётся повышенным от десятков до тысяч лет после окончания вспышки. Стоит отметить, что предсказанные содержания молекул  $\text{CH}_3\text{CHO}$  и  $\text{HCOOCH}_3$  во время вспышки хорошо согласуются с результатами недавних наблюдений одного из фуоров на ALMA.

В третьей главе рассматривается поведение летучих соединений в протопланетных дисках. Такие соединения могут находиться как в газовой фазе, так и в составе ледяных мантий пылинок. Впервые подробно рассматривается динамика фазовых переходов летучих соединений с учётом разных видов пыли и её эволюции, вариаций параметров диска и пр. Анализируется также влияние вспышек светимости. Построены двумерные распределения летучих соединений в разных фазах в диске. Найдено, что ледяные мантии заметно изменяют свойства пыли в определённых областях. Сделаны выводы о механизме формирования ледяных мантий для пылинок разного размера. Показано, что происходит значительное накопление газофазных и ледяных летучих соединений вдоль линий льдов.

В целом диссертационная работа Т.С. Моляровой производит очень благоприятное впечатление. Стоит отметить чёткость и последовательность изложения, детальное обоснование применяемых подходов и выводов. Практически отсутствуют технические погрешности и опечатки. В работе получен ряд новых важных для астрофизики результатов. К ним относится следующее.

1. Показано, что молекула CO является наиболее адекватным молекулярным индикатором массы протопланетных дисков. Определено относительное содержание CO в дисках, которое оказалось на порядок ниже, чем в молекулярных облаках.

2. Определены молекулы, содержание которых значительно повышается во время вспышки флуора, а также молекулы, содержание которых остается заметно повышенным долгое время после такой вспышки.

3. Разработана модель поведения летучих соединений в протопланетных дисках для случая многокомпонентной пыли. Найдено что при высокой турбулентности ледяные мантии вызывают заметное изменение свойств пыли в окрестности линии льдов воды. Показано, что льды попадают на крупную пыль, главным образом, в результате коагуляции обледеневших мелких пылинок. Вдоль линий льдов происходит накопление газофазных и ледяных летучих соединений.

Достоверность результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается сопоставлением результатов моделирования с наблюдениями и с результатами других подобных работ. Также стоит отметить, что все основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых астрономических журналах.

Существенных недостатков в диссертационной работе Т.С. Моляровой указать не могу. Можно отметить ряд неточностей, которые, однако, никак не влияют на результаты работы, поскольку не связаны с её основным содержанием. К ним можно отнести следующее.

1. Не очень понятно, почему оценка массы по наблюдениям линий молекул считается более прямым методом по сравнению с оценкой по наблюдениям излучения пыли. В обоих случаях оценки основаны на ряде допущений.

2. Неопределённость оценки массы дисков по наблюдениям HD связана не с фракционированием дейтерия (чего для HD нет), а с другими факторами.

3. Непонятно, на чем основано утверждение о том, что вращательная линия  $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$  может наблюдаться на волне 4.34 мкм. Вращательная постоянная  $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$  близка к таковой для CO (J. Bendtsen, 1974, Journal of Raman Spectroscopy 2, 133), так что и частоты их вращательных переходов близки.

В качестве пожеланий на будущее в рамках развития данной тематики хотелось бы предложить следующее:

1. Было бы полезно включить по крайней мере некоторые изотопологи в схему химических реакций. В первую очередь это относится к молекуле HD, которая представляется весьма полезным индикатором массы дисков.

2. Стоило бы более подробно обсудить в качестве индикатора вспышки не только рост содержания некоторых молекул во время и после вспышки, но и их уменьшение, о чем в работе в общем-то говорится и в таблице 2.1 такие случаи представлены ( $\text{HCO}^+$ ,  $\text{N}_2\text{H}^+$ ).

3. Было бы интересно распространить подобный анализ на диски вокруг молодых массивных звёзд.

В целом диссертационная работа Т.С. Моляровой является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Т.С. Молярова, безусловно, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Зав. отделом ИПФ РАН  
доктор физ.-мат. наук  
тел.: +7-831-4367253  
Email: [zin@ipfran.ru](mailto:zin@ipfran.ru)  
Адрес: 603950 Нижний Новгород,  
ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН

И.И. Зинченко

Подпись И.И. Зинченко заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

И.В. Корюкин