

На правах рукописи

Парфёнов Сергей Юрьевич

**Об излучении метанола в дисках вокруг
молодых звездных объектов**

Специальность 01.03.02 — астрофизика и звездная
астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Коуровская астрономическая обсерватория,
г. Екатеринбург / заведующий отделом астрофизики и физики Солнца,
Соболев Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: **Павлюченков Ярослав Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
Институт астрономии Российской академии наук,
г. Москва / старший научный сотрудник

Гринин Владимир Павлович,
доктор физико-математических наук,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург / заведующий лабораторией звездообразования

Ведущая организация: **Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук**, г. Москва.

Защита состоится 7 июня 2017 года в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.280.01 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 Института астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.280.01, к.ф.-м.н.

Н. В. Чупина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Планеты образуются из газа и пыли в дисках, окружающих молодые звезды. Физические свойства и химический состав дисков определяют структуру формирующейся планетной системы и состав первичных атмосфер планет. Богатство различных органических соединений, в том числе аминокислот, найденных в углеродистых метеоритах и кометной пыли в нашей Солнечной системе [1–4], указывает на то, что в дисках, в которых формируются планеты, есть органические (пребиотические) молекулы. Одной из наиболее важных проблем теории образования планет является понимание того, как протекают химические реакции с участием органических молекул в этих дисках, и того, какая доля этой органики может достигать поверхности планет. Одну из основных ролей в решении этой проблемы играют наблюдения дисков в линиях сложных молекул. Нужно отметить, что данные наблюдения могут быть весьма осложнены, особенно в дисках вокруг звезд малой массы. Сложности могут быть связаны с относительно низким обилием сложных молекул в газовой фазе, большим числом уровней энергии в молекулах, малыми угловыми размерами дисков и ограниченной чувствительностью наблюдательных инструментов. Введение в строй таких инструментов, как радиоинтерферометр Atacama Large Millimeter Array (ALMA) в некоторой степени позволяет решить эти проблемы. В частности, согласно оценкам, например Walsh et al. [5], становится возможным обнаружение вращательных линий метанола (CH_3OH) в ближайших дисках вокруг звезд малой массы. Метанол является важным звеном в образовании более сложных органических молекул, таких как этил эфир ($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_3$) и этил формат ($\text{HCOOCH}_2\text{CH}_3$), в газовой фазе и на поверхности пылинок (см., например, [6–9]). Для повышения вероятности обнаружения излучения в линиях сложных молекул, таких как метанол, и для интерпретации данных наблюдений большое значение имеет моделирование химических процессов и переноса излучения в линиях сложных молекул в дисках вокруг звезд типа Т Тельца и Ae/Ve звезд Хербига.

Метанол наблюдается в направлении на области образования массивных звезд. При этом, помимо теплового, наблюдается также мазерное

излучение. Наблюдения мазеров метанола I и II класса играют важную роль в исследовании физических условий и кинематической структуры этих областей (см., например, [10, 11]). Согласно одной из гипотез, мазеры CH_3OH II класса могут образовываться в аккреционных дисках вокруг массивных молодых звездных объектов (см., например, Norris et al. [12]).

У значительной части наблюдаемых мазерных источников наблюдается переменность плотности потока излучения со временем (см., например, Niezurawska et al. [13]). Мазеры образуются при определенных физических условиях, и переменность мазеров может свидетельствовать об изменениях условий в областях формирования мазеров и/или в областях, которые влияют на накачку мазеров. Некоторые мазеры метанола II класса, ассоциирующиеся с массивными молодыми звездными объектами, демонстрируют периодическую переменность (см., например, Goedhart et al. [14]). Для объяснения периодической переменности этих мазеров было предложено несколько гипотез, согласно которым переменность мазеров может быть связана с вариациями фонового излучения усиленного мазерами (van der Walt [15]) или с изменениями условий накачки мазеров (Araya et al. [16], Inayoshi et al. [17]). Однако ни одна из гипотез не позволяет полностью интерпретировать все данные наблюдений во всех мазерных источниках с подтвержденной периодической переменностью (см., например, Szymczak et al. [18]).

Среди мазеров метанола II класса, которые демонстрируют нерегулярную переменность, можно выделить мазеры, ассоциирующиеся с объектом V645 Cyg. По различным данным наблюдений можно предположить, что V645 Cyg представляет собой довольно редкий класс очень молодых В-звезд, которые ещё не совсем освободились от плотного газа в своем ближайшем окружении (см., например, Мирошниченко и др. [19]). Из-за плотных окружающих оболочек газа и пыли наблюдения подобных объектов и в целом объектов, с которыми ассоциируются переменные мазеры, в оптическом диапазоне могут быть затруднены или невозможны. Но V645 Cyg в некотором роде является уникальным источником, так как его блеск в оптическом диапазоне относительно велик ($m_V \sim 13$). Это открывает возможность одновременного мониторинга этого объекта в оптическом диапазоне и в радиолиниях метанола. Подобные наблюдения могут

играть важную роль в исследованиях механизмов переменности мазеров метанола II класса.

Цели и задачи исследования

Основными задачами исследования являются:

- 1) Выполнить расчеты переноса излучения в линиях метанола с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР) на основе модели протопланетного диска вокруг звезды типа DM Тельца. Оценить время, необходимое для обнаружения линий метанола в (суб-)мм диапазоне длин волн при наблюдениях на ALMA.

- 2) С целью объяснения периодической переменности мазеров метанола II класса рассмотреть модель аккреционного диска вокруг двойной звезды, включающей массивный компонент и компонент промежуточной массы, с учетом наличия вращающейся спирале-видной ударной волны в центральной области диска. Рассчитать физические условия – температуру газа и пыли, поле излучения – в некоторой области диска в момент, когда на луче между этой областью и массивным компонентом есть газ нагретый ударной волной (далее, момент покрытия массивного компонента), и в момент, когда на луче этого газа нет (далее, момент после покрытия). Исследовать влияние покрытия массивного компонента двойной системы горячим газом, нагретым спиральной ударной волной в центральной области диска, на яркость метанольных мазеров II класса, образующихся в аккреционном диске.

- 3) Представить и проанализировать предварительные результаты мониторинга объекта V645 Cyg, который проводился в оптическом диапазоне в фильтрах V и R и в мазерной радиолинии метанола на 6.7 ГГц.

Основные результаты, выносимые на защиту

- 1) Плотности потоков излучения метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца в ЛТР и не-ЛТР приближении могут отличаться на два порядка величины. Отношение наиболее интенсивных линий метанола чувствительно к физическим условиям в диске. Излучение метанола может быть обнаружено при наблюдениях на ALMA в течение трех часов. В рассмотренной модели диска вокруг DM Тельца не образуется мазеров метанола в (суб-)мм диапазоне длин волн.
- 2) В модели аккреционного диска вокруг массивной двойной звезды физические условия в диске в момент покрытия массивного компонента горячим газом за спиральной ударной волной отличаются от условий в момент после покрытия. Изменения физических условий в момент покрытия приводят к изменению оптической толщины в мазерных линиях, формирующихся в диске. Величина изменения оптической толщины во время покрытия зависит от вязкости диска, а также от места формирования мазеров в диске. Во время покрытия мазерное усиление в некоторых мазерных переходах может сменяться поглощением.

Научная новизна результатов

- 1) Впервые проведены не-ЛТР расчеты переноса излучения в линиях метанола в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца с использованием схемы уровней метанола, включающей вращательные уровни нижних возбужденных крутильных состояний. Впервые не-ЛТР расчеты переноса излучения в линиях метанола выполнены для модели протопланетного диска, учитывающей перенос вещества за счет турбулентности.
- 2) Впервые были рассчитаны физические условия в аккреционном диске вокруг массивной двойной при вариациях засветки диска, связанных с наличием вращающейся спиральной ударной волны в центре диска. На основе этих расчетов предложена модель для объяснения периодической переменности мазеров метанола II класса.

- 3) Впервые исследована переменность мазерного источника излучения одновременно в оптическом диапазоне и в радиолинии метанола на 6.7 ГГц. *Данный результат на защиту не выносится.*

Практическая значимость

Одним из основных источников неопределенности в значениях плотности потока излучения в линиях CH_3OH , предсказываемых на основе моделей протопланетных дисков вокруг звезд малой массы, является неопределенность в оценках обилия метанола. Неопределенность в обилии во многом связана с неопределенностью в скоростях химических реакций на поверхности пыли (см., например, Vasyunin et al. [20]). В результате расчетов переноса излучения CH_3OH в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца в данной работе показано, что интенсивности линий метанола в ЛТР приближении могут на два порядка величины отличаться от интенсивностей в не-ЛТР приближении. Такое отличие сопоставимо с неопределенностью в оценках обилия метанола в протопланетных дисках, предсказываемых современными химическими моделями. Таким образом, показано, что при расчетах переноса излучения CH_3OH в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца важно учитывать эффекты отклонения от ЛТР.

На основе расчетов переноса излучения CH_3OH в протопланетных дисках вокруг звезды типа DM Тельца были получены оценки времени, которое необходимо для обнаружения излучения метанола при наблюдениях на радиоинтерферометре ALMA. Данные оценки могут использоваться при планировании наблюдений ближайших протопланетных дисков в линиях метанола на ALMA.

В ходе расчетов переноса излучения в линиях метанола в протопланетном диске вокруг маломассивной звезды были применены различные схемы уровней метанола, включающие различное число энергетических вращательных уровней самого нижнего колебательного состояния. В частности, были рассмотрены схемы уровней, которые: не включают вращательные уровни возбужденных крутильных состояний, включают вращательные уровни первого и второго возбужденных крутильных состояний. Было получено, что учет уровней возбужденных крутильных состояний не влияет на оценки плотности потоков излучения в линиях метанола. Таким

образом, показано, что для получения точной оценки плотности потока излучения в линиях CH_3OH в протопланетных дисках вокруг звезд типа DM Тельца при не-ЛТТ расчетах достаточно использовать схему без уровней возбужденных крутильных состояний. Это позволяет существенно (в разы) уменьшить машинное время, необходимое для не-ЛТТ расчетов переноса излучения по сравнению со случаями, когда применяются схемы уровней, включающие уровни возбужденных крутильных состояний.

Расчеты интенсивности мазерного излучения CH_3OH на основе модели аккреционного диска вокруг массивной молодой двойной системы важны для исследований механизмов мазерной переменности. Результаты этих расчетов могут быть использованы при интерпретации и планировании наблюдений периодических мазерных источников. В частности, в результате расчетов на основе модели, предложенной в данной работе для объяснения периодической переменности мазеров, можно предположить, что вариации интенсивности мазерного излучения со временем зависят от места формирования мазеров в диске. Вариации интенсивности мазерного излучения в различных переходах могут быть существенно различными. Эти предсказания возможно проверить при наблюдениях.

Достоверность результатов

Расчеты переноса излучения CH_3OH на основе физико-химической модели диска вокруг звезды типа DM Тельца выполнены методом Монте-Карло с использованием различных схем энергетических уровней метанола. Используемая физико-химическая модель диска была рассчитана с использованием одной из наиболее обширных сеток химических реакций, включающей реакции в газовой фазе и на поверхности пылинок (см. описание в работе Семенова и Вибе [21]). Сходимость расчетов методом Монте-Карло обеспечена большим числом фотонов, запускаемых в модель. При не-ЛТТ расчетах переноса излучения использовались наиболее современные данные о скоростях столкновительных переходов метанола из работы Rabli & Flower [22]. Было показано, что учет возбужденных крутильных состояний метанола не влияет на результаты расчетов переноса излучения для диска вокруг звезды типа DM Тельца. Для моделирования наблюдений диска вокруг звезды типа DM Тельца и оценки времени, необходимого для обнаружения излучения CH_3OH ,

использовался программный пакет CASA (Common Astronomy Software Applications) [23], который разработан для планирования наблюдений и обработки результатов наблюдений на радиоинтерферометрах, в том числе, на ALMA.

Расчеты интенсивности мазерного излучения CH_3OH в модели аккреционного диска вокруг массивной двойной системы выполнены с использованием схемы уровней, которая была апробирована в работе Stagg et al. [24] для расчетов мазерного излучения в схожих физических условиях. Параметры диска соответствуют оценкам, полученным из наблюдений. Физические условия в диске были рассчитаны с помощью программного кода CLOUDY (Ferland et al. [25]), предназначенного для точных расчетов ионизационного и теплового баланса в стационарном приближении.

При анализе данных мониторинга V645 Cyg в оптическом диапазоне использовались три звезды сравнения. Для оценки погрешности измерений оптического блеска V645 Cyg использовалась дисперсия разностей блеска звезд сравнения. При мониторинге V645 Cyg в радиолинии метанола на 6.7 ГГц регулярно проводилась калибровка по плотности потока излучения. *Данные мониторинга V645 Cyg на защиту не выносятся.*

Личный вклад автора в совместные работы

Основные результаты диссертации опубликованы в 2 статьях [A1,A2] в рецензируемом зарубежном журнале (MNRAS). Обе публикации [A1,A2], лежащие в основе настоящей работы, написаны в соавторстве, причем вклад диссертанта в работы [A1,A2] является определяющим.

Автор диссертации лично провел следующие работы:

- В работе [A1] автор выполнил расчеты переноса излучения в линиях метанола на основе предоставленной физико-химической модели протопланетного диска вокруг звезды типа DM Тельца, автор выполнил моделирование наблюдений диска на ALMA и написал основной текст работы.
- В работе [A2] автор выполнил модификацию программного кода CLOUDY, выполнил расчеты физических условий в аккреционном диске вокруг массивной двойной системы и на их основе выполнил

расчеты переноса излучения в мазерных линиях метанола, написал основной текст работы.

Апробация результатов

Все основные результаты и положения, выносимые на защиту, докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- 1) 43-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 03 – 07 февраля 2014 г., Екатеринбург.
- 2) Международная конференция «Star Formation Across Space and Time», 11 – 14 ноября 2014 г., Нордвайк, Нидерланды.
- 3) 44-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 02 – 06 февраля 2015 г., Екатеринбург.
- 4) 45-я международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», 01 – 05 февраля 2016 г., Екатеринбург.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключения и двух приложений. Объем работы: 113 страниц, 28 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 182 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлена общая характеристика диссертационной работы и ее актуальность.

Глава 1 посвящена моделированию (суб-)миллиметрового излучения газофазного A - и E - CH_3OH в протопланетном диске вокруг звезды типа DM Тельца с учетом отклонений от ЛТР. Для расчетов используется стационарная физическая α -модель диска вокруг звезды типа DM Тельца, описанная в разделе 1.2.1. На основе данной физической модели в работе Семенова и Вибе [21] была рассчитана химическая эволюция диска. Химическая модель диска учитывает большое число реакций, в том числе, реакций синтеза сложных органических молекул на поверхности пылинок

(см. разделы 1.2.2–1.2.3). Также при расчетах химической структуры диска учитывался турбулентный перенос вещества диска (см. раздел 1.2.4). Турбулентный перенос вещества рассчитывался в диффузионном приближении, с коэффициентом диффузии, задаваемым параметром Шмидта, Sc . Физическая и химическая структура диска в модели без переноса вещества ($Sc=\infty$) и в «турбулентной» модели с переносом вещества ($Sc=1$) были адаптированы для расчетов переноса излучения в линиях газофазного метанола (см. раздел 1.2.4). Трехмерные расчёты переноса излучения методом Монте-Карло выполнены с помощью программного кода LIME (Brinch & Hogerheijde [26]). При этом использовалась схема уровней CH_3OH , включающая вращательные уровни основного и возбужденных крутильных состояний (см. раздел 1.2.5). Данная схема включает подмножество уровней из более полной схемы, представленной в работе Cragg et al. [24], которая использовалась для моделирования мазеров метанола II класса в областях звездообразования. Для не-ЛТР расчетов переноса излучения использовалась пространственная сетка, в которой положения точек были получены случайным образом с учетом распределений плотности вещества диска и обилия метанола (см. раздел 1.2.6). Оценка неопределенности потоков излучения в линиях метанола, связанной с конечным разрешением пространственной стеки и случайностью положений точек в сетке, дана в **приложении А**. В результате расчетов переноса излучения получено, что не-ЛТР интенсивности линий CH_3OH в подавляющем большинстве ниже рассчитанных в ЛТР-приближении. Отличия ЛТР и не-ЛТР интенсивностей могут достигать двух порядков величины. Возникающая в модели инверсия населенностей уровней CH_3OH не ведет к сильному мазерному усилению (см. раздел 1.3.1). Плотности потоков излучения в модели диска без переноса вещества на порядок величины меньше, чем в модели с переносом вещества. В результате, согласно расчетам с моделью без переноса вещества, линии метанола не могут быть обнаружены при наблюдениях диска на ALMA. По результатам расчетов переноса излучения в модели диска с турбулентным переносом вещества были выделены две интенсивные линии, которые могут быть зарегистрированы при наблюдениях ближайших крупных дисков на радиointерферометре ALMA: $5_0 - 4_0 A^+$ (241.791 ГГц) и $5_{-1} - 4_{-1} E$ (241.767 ГГц). Эти линии могут быть зарегистрированы в течение 3-х часов при наблюдении

ях на всех 50 антеннах радиоинтерферометра ALMA (см. раздел 1.3.2). Результаты расчетов, представленные в данной главе и опубликованные в работе [A1], отличаются от результатов ЛТР расчетов излучения метанола в протопланетном диске в работе Walsh et al. [5]. В разделе 1.4 обсуждаются возможные причины данных отличий. Основными причинами являются различие химической модели диска, представленной в главе 1, от той, которая использовалась Walsh et al. [5], а также существенное влияние не-ЛТР эффектов на интенсивности линий метанола, которое не учитывалось Walsh et al. [5]. В разделе 1.5 суммируются основные результаты расчетов переноса излучения на основе модели диска вокруг звезды типа DM Тельца.

В **Главе 2** представлена модель аккреционного диска вокруг двойной звезды, включающей массивный компонент, которая используется для объяснения периодической переменности мазеров метанола II класса. Модель диска учитывает наличие спиралевидной ударной волны в центральной области диска, которая возникает из-за сверхзвукового движения компонент двойной относительно окружающей оболочки газа, аналогично модели вокруг маломассивной двойной из работ [27, 28]. В модели предполагается, что нагретый газ за ударной волной поблизости от массивного компонента имеет относительно высокую светимость и влияет на засветку аккреционного диска. Вращение ударной волны приводит к переменности засветки диска (см. раздел 2.2.1). Предполагается, что в момент, когда между некоторой областью диска и массивным компонентом двойной находится вещество в основании ударной волны с максимальной температурой и плотностью, засветка этой области диска максимальна. Этот момент времени далее обозначается как момент покрытия массивного компонента веществом за ударной волной. В момент времени, когда между некоторой областью диска и массивным компонентом вещество за ударной волной практически отсутствует, подсветка этой области минимальна. Этот момент далее обозначается как момент после покрытия массивного компонента. Согласно данной модели, периодические вариации засветки диска из-за вращения спиралевидных ударных волн приводят к вариациям физических условий – поля излучения, температуры пыли и газа – в диске, что в свою очередь приводит к вариациям накачки и, как следствие, интенсивности мазеров метанола II класса, формирующихся в

аккреционном диске. Для двух моментов - во время покрытия и после покрытия - были рассчитаны физические условия в диске. Расчеты проведены с помощью программного кода CLOUDY (см. раздел 2.2.2). Технические детали этих расчетов приведены в **приложении Б**. При расчетах полагалось, что в момент после покрытия диск подсвечивается только массивным компонентом двойной, а в момент покрытия - массивным компонентом и слоем газа за ударной волной поблизости от поверхности массивного компонента. В результате расчетов получено, что в момент покрытия температура газа и пыли в диске повышается по сравнению с моментом после покрытия. В зависимости от вязкости вещества диска и плотности газа за ударной волной в момент покрытия в диске может появляться область, где температура газа ниже температуры пыли более чем на 100 К (см. раздел 2.2.3). Согласно работе Cragg et al. [24], такие условия могут приводить к появлению ярких мазеров метанола II класса. С использованием рассчитанных физических условий в диске были проведены оценки вероятности формирования мазеров метанола в диске в моменты покрытия и после покрытия. Для этого в приближении большого градиента скорости были получены оценки оптической толщины и температуры возбуждения в мазерных переходах на 6.7, 12.1, 107 и 9.9 ГГц для различных прицельных параметров, p , при наблюдениях диска с ребра (см. раздел 2.3). Согласно этим оценкам, опубликованным в работе [A2], покрытие массивного компонента веществом за ударной волной значительно влияет на вероятность формирования мазеров в аккреционном диске. В момент после покрытия мазеры на 107 ГГц в диске не формируются, область формирования мазеров на 6.7 и 12.1 ГГц соответствует $p = 12\text{--}50$ а.е, а мазеров на 9.9 ГГц - $p = 50\text{--}400$ а.е. В момент покрытия увеличение засветки диска приводит к возникновению мазеров на 107 ГГц и увеличению области формирования мазеров на 6.7 и 12.1 ГГц. Область формирования мазеров на 9.9 ГГц в момент покрытия сокращается. Яркость мазеров в момент покрытия увеличивается. Увеличение яркости в зависимости от плотности вещества за ударной волной, которое подсвечивает диск, и от вязкости вещества диска может достигать четырех порядков величины для мазеров на 6.7 и 12.1 ГГц. В разделе 2.4 делаются выводы о том, что представленная модель может объяснить периодическую переменность яркости мазеров метанола II класса. Также

делается предположение, что модель может объяснить форму мазерных вспышек, наблюдаемых в направлении некоторых источников, а именно резкое увеличение яркости, за которым следует относительно медленный спад.

В **Главе 3** представлены предварительные данные мониторинга источника V645 Cyg в оптическом диапазоне и мазерной радиолинии на 6.7 ГГц. V645 Cyg демонстрирует характеристики объектов различных классов. В направлении на V645 Cyg наблюдается переменность в различных диапазонах длин волн и на различных масштабах времени (от дней до десятков лет). В разделе 3.1 приводятся различные данные наблюдений V645 Cyg из литературы и делается заключение, что V645 Cyg представляет собой редкий класс очень молодых В-звезд, которые ещё не совсем освободились от плотного газа в своем ближайшем окружении. В разделе 3.2 представлены данные мониторинга V645 Cyg, который проводился одновременно в течение 2.5 лет в оптических фильтрах V и R и мазерной радиолинии на 6.7 ГГц. Мониторинг в оптическом диапазоне проводился на телескопе АЗТ-3 Коуровской астрономической обсерватории. Мониторинг на 6.7 ГГц проводился группой М. Щымчака на 32-м радиотелескопе в Торунь (Польша). По результатам мониторинга получено, что увеличение и уменьшение плотности потока излучения в мазерной линии соответствуют увеличению и уменьшению блеска в оптике в ближайшую дату. В разделе 3 дается обсуждение и интерпретация результатов мониторинга и их представление в контексте других данных наблюдений. Для интерпретации данных мониторинга важным является вопрос об области формирования мазеров метанола, ассоциирующихся с V645 Cyg. В разделе 3.1 по различным данным наблюдений делается предположение, что мазеры метанола на 6.7 ГГц формируются в диске вокруг центральной звезды V645 Cyg, который виден «плашмя». В разделе 3.2 на основании этого предположения и данных мониторинга делается вывод, что переменность мазеров метанола на 6.7 ГГц и оптического блеска на временных масштабах порядка месяца имеют одну и ту же причину. Эта переменность не может быть связана с изменениями поглощения в направлении на V645 Cyg. Также переменность не может быть связана с неоднородностями в диске, которые, например, могут возникать из-за ударных волн. В результате делается предположение, что переменность

мазеров метанола на 6.7 ГГц и оптического блеска может быть связана с переменным темпом аккреции на центральную звезду. Вариации темпа аккреции приводят к вариациям засветки диска, которые, в свою очередь, согласно результатам, представленным в главе 2, могут приводить к вариациям яркости мазеров в диске.

В **Заключении** суммируются основные результаты работы и отмечены направления дальнейшей работы по теме диссертации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

A1. **Parfenov S.Yu.**, Semenov D.A., Sobolev A.M., Gray M.D. Towards detecting methanol emission in low-mass protoplanetary discs with ALMA: The role of non-LTE excitation // MNRAS– 2016. – Vol. 460, 3. – P. 2648-2663.

A2. **Parfenov S.Yu.**, Sobolev A.M. On the Class II methanol maser periodic variability due to the rotating spiral shocks in the gaps of discs around young binary stars // MNRAS– 2014. – Vol. 444, 1. – P. 620-628.

Другие публикации автора по теме диссертации

B1. **Парфенов С.Ю.**, Соболев А.М. О периодической переменности мазеров метанола II класса // Физика Космоса: Тр. 43-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 3 – 7 февр. 2014 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 205.

B2. **Parfenov S.Yu.**, Sobolev A.M. On the Class II Methanol Maser Periodic Variability due to the Rotating Spiral Shocks in the Gaps of Disks Around Young Binary Stars // Star formation across space and time, ESA/ESTEC, 11-14 november 2014, Noordwijk, The Netherlands. http://herschel.esac.esa.int/SFaxz2014/Posters/115_ParfenovS.pdf

B3. **Парфенов С.Ю.**, Горда С.Ю., Szymczak M., Соболев А.М. Исследование переменности источника V645 Cyg в оптике и мазерной линии

метанола на 6.7 ГГц // Физика Космоса: Тр. 44-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 2 – 6 февр. 2015 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – С. 189.

В4. Парфенов С.Ю., Семенов Д.А., Соболев А.М. На пути к регистрации излучения СНЗОН в маломассивных протопланетных дисках на ALMA: роль не-ЛТР возбуждения // Физика Космоса: Тр. 45-й Международ. студ. науч. конф., Екатеринбург, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – С. 205.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

1. *Elsila J. E., Glavin D. P., Dworkin J. P.* Cometary glycine detected in samples returned by Stardust // *Meteoritics and Planetary Science.* – 2009. – Vol. 44. – P. 1323–1330.
2. *Caselli P., Ceccarelli C.* Our astrochemical heritage // *A&A Rev.* – 2012. – Vol. 20. – P. 56. 1210.6368.
3. *Henning T., Semenov D.* Chemistry in Protoplanetary Disks // *Chemical Reviews.* – 2013. – Vol. 113. – P. 9016–9042. 1310.3151.
4. *Pontoppidan K. M., Salyk C., Bergin E. A. et al.* Volatiles in Protoplanetary Disks // *Protostars and Planets VI.* – 2014. – P. 363–385. 1401.2423.
5. *Walsh C., Millar T. J., Nomura H. et al.* Complex organic molecules in protoplanetary disks // *A&A.* – 2014. – Vol. 563. – P. A33. 1403.0390.
6. *Charnley S. B., Tielens A. G. G. M., Millar T. J.* On the molecular complexity of the hot cores in Orion A - Grain surface chemistry as 'The last refuge of the scoundrel' // *ApJ.* – 1992. – Vol. 399. – P. L71–L74.
7. *Bennett C. J., Chen S.-H., Sun B.-J. et al.* Mechanistical Studies on the Irradiation of Methanol in Extraterrestrial Ices // *ApJ.* – 2007. – Vol. 660. – P. 1588–1608.
8. *Öberg K. I., Garrod R. T., van Dishoeck E. F., Linnartz H.* Formation rates of complex organics in UV irradiated CH₃OH-rich ices. I. Experiments // *A&A.* – 2009. – Vol. 504. – P. 891–913. 0908.1169.

9. *Bacmann A., Taquet V., Faure A. et al.* Detection of complex organic molecules in a prestellar core: a new challenge for astrochemical models // *A&A.* — 2012. — Vol. 541. — P. L12.
10. *Bartkiewicz A., van Langevelde H. J.* Masers in star forming regions // *Cosmic Masers - from OH to H0* / Ed. by R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, E. M. L. Humphreys: IAU Symposium. — Vol. 287. — 2012. — P. 117–126. 1204.1059.
11. *Sanna A., Surcis G., Moscadelli L. et al.* Velocity and magnetic fields within 1000 AU of a massive YSO // *A&A.* — 2015. — Vol. 583. — P. L3. 1509.05428.
12. *Norris R. P., Byleveld S. E., Diamond P. J. et al.* Methanol Masers as Tracers of Circumstellar Disks // *ApJ.* — 1998. — Vol. 508. — P. 275–285. astro-ph/9806284.
13. *Niezurawska A., Szymczak M., Hrynek G., Kus A. J.* Statistics of the 6.7 GHz methanol maser variability from the Toruń survey // *Cosmic Masers: From Proto-Stars to Black Holes* / Ed. by V. Migenes, M. J. Reid: IAU Symposium. — Vol. 206. — 2002. — P. 135.
14. *Goedhart S., Gaylard M. J., Walt D. J.* Long-Term Monitoring of 6.7- and 12.2-GHz Methanol Masers // *Ap&SS.* — 2005. — Vol. 295. — P. 197–202.
15. *van der Walt D. J.* On the Methanol Masers in G9.62+0.20E and G188.95+0.89 // *AJ.* — 2011. — Vol. 141. — P. 152. 1102.3966.
16. *Araya E. D., Hofner P., Goss W. M. et al.* Quasi-periodic Formaldehyde Maser Flares in the Massive Protostellar Object IRAS 18566+0408 // *ApJ.* — 2010. — Vol. 717. — P. L133–L137. 1006.2164.
17. *Inayoshi K., Sugiyama K., Hosokawa T. et al.* Direct Diagnostics of Forming Massive Stars: Stellar Pulsation and Periodic Variability of Maser Sources // *ApJ.* — 2013. — Vol. 769. — P. L20. 1304.5241.
18. *Szymczak M., Wolak P., Bartkiewicz A.* Discovery of four periodic methanol masers and updated light curve for a further one // *MNRAS.* — 2015. — Vol. 448. — P. 2284–2293. 1502.03373.

19. *Miroshnichenko A. S., Hofmann K.-H., Schertl D. et al.* A new spectroscopic and interferometric study of the young stellar object V645 Cygni // *A&A.* — 2009. — Vol. 498. — P. 115–126. 0904.1822.
20. *Vasyunin A. I., Semenov D., Henning T. et al.* Chemistry in Protoplanetary Disks: A Sensitivity Analysis // *ApJ.* — 2008. — Vol. 672. — P. 629–641. 0709.3323.
21. *Semenov D., Wiebe D.* Chemical Evolution of Turbulent Protoplanetary Disks and the Solar Nebula // *ApJS.* — 2011. — Vol. 196. — P. 25. 1104.4358.
22. *Rabli D., Flower D. R.* The rotational excitation of methanol by molecular hydrogen // *MNRAS.* — 2010. — Vol. 406. — P. 95–101.
23. *McMullin J. P., Waters B., Schiebel D. et al.* CASA Architecture and Applications // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI* / Ed. by R. A. Shaw, F. Hill, D. J. Bell: *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — Vol. 376. — 2007. — P. 127.
24. *Cragg D. M., Sobolev A. M., Godfrey P. D.* Models of class II methanol masers based on improved molecular data // *MNRAS.* — 2005. — Vol. 360. — P. 533–545. astro-ph/0504194.
25. *Ferland G. J., Porter R. L., van Hoof P. A. M. et al.* The 2013 Release of Cloudy // *Rev. Mex. Astron. Astrofis.* — 2013. — Vol. 49. — P. 137–163. 1302.4485.
26. *Brinch C., Hogerheijde M. R.* LIME - a flexible, non-LTE line excitation and radiation transfer method for millimeter and far-infrared wavelengths // *A&A.* — 2010. — Vol. 523. — P. A25. 1008.1492.
27. *Sytov A. Y., Kaigorodov P. V., Fateeva A. M., Bisikalo D. V.* Structure of the circumbinary envelopes of young binary stars with elliptical orbits // *Astronomy Reports.* — 2011. — Vol. 55. — P. 793–800.
28. *Gómez de Castro A. I., López-Santiago J., Talavera A. et al.* XMM-Newton Monitoring of the Close Pre-main-sequence Binary AK Sco. Evidence of Tide-driven Filling of the Inner Gap in the Circumbinary Disk // *ApJ.* — 2013. — Vol. 766. — P. 62. 1301.6966.