

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

Павлюченков Ярослав Николаевич

**Излучение молекул и пыли в дозвездных и
протозвездных объектах**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук

Научный консультант: **Шустов Борис Михайлович**,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН,
научный руководитель Института
астрономии РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: **Зинченко Игорь Иванович**,
д.ф.-м.н., зав. отделом радиоприемной
аппаратуры и миллиметровой
астрономии Института прикладной
физики РАН, г. Нижний Новгород

Ламзин Сергей Анатольевич,
д.ф.-м.н., зам. директора
Государственного астрономического
института им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гринин Владимир Павлович,
д.ф.-м.н., зав. лабораторией
звездообразования Главной (Пулковской)
астрономической обсерватории РАН,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Волгоградский государственный
университет, г. Волгоград

Защита состоится 14 сентября 2016 года в 12:00 на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53. Автореферат и диссертация в электронном виде представлена на сайте ФИАН <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет". Автореферат разослан « » 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю.А. Ковалев

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Образование звезд из межзвездного газа и пыли является одним из фундаментальных процессов во Вселенной. Благодаря усилиям наблюдателей и теоретиков к настоящему времени достигнут значительный прогресс в построении теории образования звезд. О современном состоянии теории образования звезд и ее наблюдательных успехах можно узнать, например, из сборников конференций [1, 2], а также из монографий [3, 4]. Хорошее научно-популярное описание процесса образования звезд изложено в книгах [5, 6]. В целом, общая картина звездообразования чрезвычайно богата физическими процессами, но вкратце ее можно описать следующим образом. Звезды образуются в результате гравитационного сжатия протозвездных облаков — наиболее плотных и холодных сгустков молекулярных облаков. Поскольку родительское протозвездное облако обладает, как правило, ненулевым угловым моментом, его гравитационное сжатие ведет к формированию не только протозвезды, но и аккреционного газопылевого диска вокруг нее. Избыток углового момента может также приводить к фрагментации протозвездного облака и к образованию двойной или кратной системы звезд. Формирование и эволюция аккреционных дисков сопровождается образованием широких низкоскоростных молекулярных истечений (outflows) и/или коллимированных высокоскоростных струй (jets), что связывают с влиянием остаточного магнитного поля. Эволюция газа и пыли в околозвездном диске может приводить к формированию планетной системы, в связи с чем такие аккреционные диски называют протопланетными. Финальными процессами образования маломассивных звезд являются диссипация протозвездной оболочки и протопланетного диска. Только что образовавшиеся массивные звезды формируют вокруг себя области ионизованного (НИ) водорода. Развитие зоны НИ в конечном итоге приводит не только к фотоиспарению протопланетного диска и родительского молекулярного облака, но и оказывает существенное влияние на окружающую межзвездную среду. Зоны НИ вокруг молодых массивных звезд наряду со вспышками сверхновых звезд и истечениями являются одним из основных поставщиков механической энергии, обеспечивающей поддержание турбулентности в межзвездной среде. Межзвездная турбулентность в свою очередь во многом определяет структуру межзвездной среды и условия формирования последующего поколения звезд. Отметим, что протозвездное облако принято называть дозвездным ядром

(prestellar core) или протозвездным ядром (protostellar core) в зависимости от того, на какой эволюционной фазе оно находится и как наблюдательно проявляется. В дальнейшем мы будем называть дозвездными объектами системы, находящиеся на фазе эволюции до образования звезд, такие как молекулярные облака и ядра молекулярных облаков. Под протозвездными объектами мы будем понимать объекты, возникающие в процессе превращения родительского молекулярного облака в звезду: протозвездные ядра, протопланетные диски, истечения из протопланетных дисков.

Несмотря на разработанные теоретические концепции, до сих пор остаются нерешенными некоторые принципиальные вопросы теории звездообразования. Одним из них является вопрос о начальных условиях эволюции молекулярных облаков, т.е. о том, как формируются молекулярные облака и как они становятся гравитационно неустойчивыми. Происходит ли это в быстрой динамической шкале времени в результате фрагментации турбулентной межзвездной среды или в более медленной шкале диссипативных квазиравновесных процессов, обусловленных диффузией магнитного поля? С теоретической стороны неизвестны детали формирования протозвездного диска и его взаимодействие с аккрецирующей оболочкой, а также механизмы генерации молекулярных истечений и струй и их роль в отводе углового момента. Нерешенной фундаментальной проблемой астрофизики до сих пор остается вопрос о механизмах переноса углового момента в аккреционных, в частности, протопланетных дисках. Открытым является также вопрос о доминантном сценарии формирования планет. Происходит ли образование планет быстро в результате гравитационной неустойчивости на ранних фазах эволюции газопылевого диска? Или формирование планет происходит относительно медленно в результате ряда процессов, происходящих с пылью? Таковыми процессами является осаждение пыли к экваториальной плоскости диска, рост и разрушение пылинок в результате их столкновений, дрейф пыли во внутренние части диска, а также турбулентное/меридианальное перемешивание пыли. Разрабатываются и более экзотические модели формирования планет, включающие самые разнообразные физические факторы, в частности, зарождение планетезималей в турбулентных вихрях, захват пыли в зонах с пониженной степенью ионизации, дестабилизация диска аккрецирующей оболочкой. Другой принципиальной теоретической проблемой является разработка сценария образования массивных звезд. Ключевой вопрос здесь: формируются ли массивные звезды аналогично маломассивным звездам или сценарии их формирования кардинально различаются?

Во многом, проблемы разрешения этих и других вопросов теории связаны с недостатком наблюдательных данных об областях звездообразования. Самая распространенная молекула в областях звездообразования — молекулярный водород — в силу отсутствия дипольного момента лишена переходов, в которых в условиях протозвездных объектов могло бы эффективно генерироваться излучение. Поэтому о физической и химической структуре областей звездообразования и об эволюционном статусе отдельных дозвездных и протозвездных объектов мы судим, главным образом, по наблюдениям непрерывного теплового излучения пыли и линий примесных молекул, таких как CO , CS , HCO^+ , N_2H^+ , NH_3 и др. Поскольку температура внутри дозвездных и протозвездных объектов сравнительно мала (десятки — сотни кельвинов) тепловое излучение пыли и излучение молекул приходится на миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны. Для наблюдений в этих низкоэнергетических диапазонах необходимы чувствительные радиотелескопы и радиоинтерферометры, построение которых является серьезной технической проблемой. Однако технологии быстро развиваются, что ведет к бурному прогрессу в радиоастрономии. Введение в строй современных радиоинтерферометров с высокой чувствительностью и хорошим угловым разрешением, таких как *SMA*, *NOEMA*, и наконец, *ALMA*, позволяет напрямую исследовать распределение холодной пыли и содержание молекул в ядрах протозвездных облаков, в протопланетных дисках и в других протозвездных объектах. Профили линий излучения молекул, получаемые с помощью данных инструментов, имеют также высокое частотное разрешение и несут информацию о лучевой скорости газа. Это дает возможность исследовать кинематическую структуру дозвездных и протозвездных объектов.

В последние годы благодаря работе космических телескопов *Spitzer* и *Herschel* стало возможным проводить исследования и в инфракрасном диапазоне, недоступном с поверхности Земли. Инфракрасное излучение несет информацию о распределении более теплого газа и пыли (с температурой до нескольких сотен кельвинов) в областях звездообразования, в окрестностях молодых звезд и в целом по Галактике. В совокупности, все эти наблюдательные данные привели к новому этапу в изучении структуры и физических процессов в межзвездной среде.

Однако интерпретация инфракрасных и радионаблюдений чрезвычайно сложна. С математической стороны это обратная задача восстановления структуры объекта по его наблюдательным проявлениям. Прямое решение данной обратной задачи в силу ее нелинейности и плохой обусловленности представляет большие проблемы. Поэтому ее ре-

шение, как правило, ищется с помощью последовательности решения прямых задач. При этом структура и кинематика объекта описывается определенной физической моделью. Результатом решения прямой задачи является построение теоретических распределений интенсивности, спектров излучения и других величин для заданной физической модели. По результатам их сравнения с наблюдаемыми величинами проводится коррекция параметров физической модели и поиск оптимальных параметров. Такой расчет требует моделирования не только физической структуры объекта, но и решения задачи переноса излучения.

Моделирование переноса излучения в условиях дозвездных и протозвездных объектов само по себе является сложной задачей. При моделировании переноса излучения в линиях молекул необходимо учитывать, что молекулярное излучение может формироваться в отсутствие локального термодинамического равновесия (ЛТР), что существенно усложняет модель переноса излучения. Ключевой проблемой при расчете теоретических спектров молекул является учет неоднородной химической структуры дозвездных и протозвездных объектов. Результаты анализа наблюдательных данных показывают, что относительные концентрации некоторых примесных молекул сильно зависят от положения в объекте. В частности, в дозвездных ядрах молекулярных облаков наблюдается дефицит молекул во внутренних частях облака, что связывают с осаждением молекул на пыль. Сильная химическая стратификация предполагается и в протопланетных дисках, где градиенты интенсивности излучения, температуры и плотности достигают нескольких порядков величин, что и определяет разное относительное содержание излучающих молекул. В целом, диагностика дозвездных и протозвездных объектов по линиям излучения и поглощения молекул тесно связана с астрохимией — сравнительно новым направлением астрономии. Предметом астрохимии является объяснение химической структуры межзвездной среды в целом и областей звездообразования в частности в рамках моделей химической эволюции. Значение астрохимии трудно переоценить — она предоставляет не только базис для интерпретации радионаблюдений, но и предсказывает химическую эволюцию вещества, в том числе, эволюцию органических соединений.

Моделирование теплового радио- и инфракрасного излучения пыли, в свою очередь, тесно связано с рассмотрением физических процессов, происходящих с межзвездной пылью. Межзвездная пыль — важный компонент межзвездной среды, во многом определяющий ее физические свойства. Хотя массовая доля пыли в молекулярных облаках и протозвездных объектах составляет около одного процента от массы га-

за, именно пыль является основным источником непрозрачности в этих объектах. Поглощая излучение в видимом и ультрафиолетовом диапазоне, пыль нагревается и переизлучает тепловую энергию в радио- и инфракрасном диапазонах. Обмениваясь энергией с газом, пыль таким образом контролирует тепловую структуру межзвездной среды и в конечном итоге определяет ее эволюцию. В ходе сжатия протозвездного облака плотность вещества в нем достигает значений, когда вещество становится непрозрачным к собственному тепловому излучению, в результате чего эволюция этих объектов на поздних фазах сжатия происходит в неизотермическом режиме. Неизотермический режим эволюции протозвездного облака кардинально меняет динамику облака, приводя к формированию квазигидростатического объекта — газопылевой протозвезды, последующая эволюция которой ведет к формированию молодой звезды. Пыль является важным элементом в химическом балансе межзвездной среды. Многие химические реакции протекают на поверхности пылинок. В частности, образование молекулярного водорода происходит в основном на пыли. При низких температурах и высоких плотностях процессы осаждения молекул (в частности CO и H₂O) на пылинки играют важную роль и определяют химическую структуру межзвездной среды. В конечном счете, именно из пыли образуются протопланетные диски и планеты, в том числе, образовалась и наша Земля.

Анализ наблюдательных данных показывает, что межзвездная пыль — сложная субстанция, состоящая из пылинок с разными размерами, физической структурой и химическим составом. В частности, наряду с относительно хорошо изученными крупными силикатными и углеродными пылинками в составе межзвездной среды присутствуют мелкие углеродные пылинки и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ-частицы). Эти пылинки/частицы настолько малы, что их средняя тепловая энергия сопоставима с энергией фотонов в видимой и ультрафиолетовой части спектра. В результате, мелкая пыль испытывает значительные флуктуации температуры, что существенно изменяет ее спектр излучения по сравнению с крупной пылью.

Как и любой другой компонент межзвездной среды, пыль эволюционирует. Ее свойства меняются в зависимости от физических условий. Ключевыми процессами эволюции пыли являются ее разрушение, формирование и рост. Наиболее активно эти процессы происходят на поздних фазах звездообразования и в окрестностях уже образовавшихся звезд. Причем, характер эволюции пыли зависит от массы образовавшейся звезды. В протопланетных дисках вокруг звезд малой массы происходят осаждение пыли к экваториальной плоскости диска и столк-

новительная коагуляция пылинок, ведущие в конечном счете к формированию планетезималей. В областях ионизованного водорода (областях НII) вокруг молодых массивных звезд, в свою очередь, пыль испаряется/разрушается. Разрушение пыли может происходить с образованием более мелких пылинок и ПАУ-частиц.

Таким образом, наблюдения теплового излучения пыли и излучения в линиях молекул их интерпретация становятся все более тесно связанными с эволюционными физическими моделями дозвездных и протозвездных объектов. В рамках таких моделей необходимо самосогласованно рассматривать динамическую, химическую и пылевую структуру, а также перенос теплового и молекулярного излучения в газопылевой среде. С их помощью становится возможным не только исследовать роль различных физических процессов в эволюции протозвездного объекта, но и напрямую сравнивать результаты теоретических моделей с наблюдениями. Все это подчеркивает актуальность темы диссертации, в которой преследовались следующие основные цели.

Цели диссертационной работы

1. Разработка и усовершенствование методов расчета переноса излучения на пыли и в линиях молекул, а также методов анализа результатов численного моделирования переноса излучения, оптимальных для исследования дозвездных и протозвездных объектов: ядер молекулярных облаков, протопланетных дисков, а также областей НII вокруг молодых звезд.
2. Разработка методов диагностики тепловой, химической и кинематической структуры протозвездных объектов, т.е. систематическое исследование факторов, определяющих характеристики теплового излучения пыли и профилей линий излучения молекул в условиях, характерных для дозвездных и протозвездных объектов.
3. Изучение индивидуальных дозвездных и протозвездных объектов на базе самосогласованного моделирования их химико-динамической и тепловой эволюции и расчета теоретических профилей линий излучения молекул, спектральных распределений энергии и распределений интенсивности излучения пыли.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методы моделирования переноса излучения, адаптированные для расчета профилей линий излучения молекул в дозвездных и протозвездных объектах, а также инструменты анализа результатов такого моделирования.
2. Системный анализ факторов, определяющих наблюдательные проявления протозвездных облаков в линиях молекул, ключевыми из которых являются неоднородное распределение плотности, особенности тепловой и химической структуры и кинематика облака.
3. Методика восстановления параметров дозвездных ядер молекулярных облаков, основанная на синтезе феноменологической модели сжатия с расчетом химической эволюции и карт профилей линий излучения молекул.
4. Результаты изучения дозвездного ядра СВ 17. Это пример одного из самых полных и детальных исследований подобных объектов на базе химико-динамической модели и количественном сравнении с высококачественными наблюдаемыми картами линий излучения молекул.
5. Физически согласованная и одновременно быстрая модель для расчета структуры протопланетного диска, находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии.
6. Результаты исследования условий возбуждения молекулярных линий в протопланетных дисках и особенностей спектральных карт дисков, связанных с их сложной тепловой и химической структурой.
7. Открытие вращающегося истечения из протопланетного диска СВ 26 с помощью анализа и моделирования спектральных карт в линиях излучения молекул.
8. Физически согласованный метод восстановления распределений плотности и температуры в наблюдаемых протозвездных облаках на основе моделирования распределений интенсивности и использования эвристического алгоритма оптимизации параметров.

9. Объяснение и количественное воспроизведение наблюдательных распределений интенсивности ИК-излучения в областях НП вокруг молодых звезд на примере объекта RCW 120 в рамках самосогласованного химико-динамического моделирования областей НП с детальным расчетом переноса излучения.
10. Сбалансированный по точности и скорости метод расчета тепловой структуры протозвездного облака для химико-динамических моделей. Будучи нестационарной, модель одновременно обладает достаточной точностью для непосредственного сравнения результатов расчетов с наблюдательными данными.

Научная новизна

1. Проведен системный анализ условий возбуждения линий излучения молекул и формирования их профилей в дозвездных ядрах молекулярных облаков и протопланетных дисках. Исследована роль неоднородного распределения плотности, особенностей тепловой, химической и кинематической структуры данных объектов на их спектральные карты. Данный анализ является не только ценным методическим материалом, но и основой для интерпретации наблюдений.
2. Разработаны методы расчета переноса излучения в линиях молекул, оптимизированные для численного моделирования протозвездных объектов. Новые методы включают в себя алгоритмы ускорения существующих подходов, а также модификации приближенных методов, позволяющие в десятки раз ускорить вычисления при сохранении точности.
3. Разработана химико-динамическая модель эволюции дозвездного ядра, ориентированная на прямое сопоставление теоретических и наблюдаемых спектральных карт. С помощью данной модели изучены основные физические факторы, влияющие на форму профилей, распределение интенсивности и сдвиг линий излучения молекул. На ее основе проведено моделирование дозвездного ядра CB 17 и восстановление его параметров. Впервые сравнение модели с наблюдениями проведено на таком высоком уровне детализации: учитывались как оптически-тонкие, так и оптически-толстые линии различных молекул и молекул-изотопомеров по направлению на все доступные позиции в спектральных картах.

4. Исследованы спектральные проявления протопланетных дисков в линиях молекул, связанные с их сложной тепловой и химической структурой. Данные особенности приводят к специфической морфологии распределения интенсивности излучения как функции смещения по скорости. Предсказанные морфологические особенности спектральных карт протопланетных дисков независимо подтверждены при наблюдениях на ALMA.
5. Проведен детальный анализ и моделирование спектральных карт в линиях CO(2–1) для протопланетного диска в системе CV 26. Сделан вывод о наличии у данного диска широкого протяженного истечения, вращающегося в том же направлении, что и диск. Это является одним из первых надежных свидетельств вращения истечений, что имеет важное значение для теории их образования и проблемы перераспределения углового момента.
6. Разработана самосогласованная химико-динамическая модель области НП с детальным расчетом переноса излучения и распределений интенсивности теплового излучения пыли в ИК- и радиодиапазоне. С помощью данной модели, учитывающей стохастический нагрев мелких пылинок, получены теоретические распределения интенсивности излучения, находящиеся в хорошем соответствии с наблюдательными распределениями для туманности RCW 120. Количественное воспроизведение и объяснение наблюдательных распределений ИК- и мм-излучения на базе самосогласованной модели для области НП проведено впервые.
7. Разработан сбалансированный по точности и скорости метод расчета тепловой структуры протозвездного облака, обладающий достаточной точностью для непосредственного сравнения результатов расчетов с современными наблюдательными данными. Впервые в рамках динамической модели протозвездного облака температура газа и пыли не предполагаются одинаковыми, а рассчитываются совместно.

Научная и практическая значимость

Основные результаты опубликованы в авторитетных научных журналах и используются как в нашей стране, так и за рубежом. В частности, разработанные методы расчета переноса излучения используются несколькими международными группами для моделирования излучения

молекул и пыли в протопланетных дисках. Результаты исследования индивидуальных протозвездных объектов — дозвездного ядра СВ 17, протопланетного диска СВ 26, области ионизованного водорода RCW 120 — существенно расширили наши представления о структуре и наблюдаемых проявлениях таких объектов. Предложенные методы исследования протозвездных объектов могут быть использованы для восстановления параметров других индивидуальных источников. Работы по теме диссертации получили международное признание, о чем говорит высокая цитируемость опубликованных статей, выступления автора диссертации на престижных международных конференциях и его периодическая работа в ведущих астрономических институтах в качестве приглашенного ученого.

Личный вклад автора

В большинстве совместных работ роль автора является либо ведущей, либо равной. В список положений, выносимых на защиту, включены лишь те результаты и выводы, в которых вклад автора был основным.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Института астрономии РАН (Москва, Россия), Института астрономии Общества им. Макса Планка (Гейдельберг, Германия), Института теоретической астрофизики (Гейдельберг, Германия), Института теоретической физики и астрофизики (Киль, Германия), Лейденской обсерватории (Лейден, Голландия), Института астрономии им. Коперника (Горунь, Польша) и на следующих конференциях и симпозиумах:

- «Механизмы излучения космических объектов: классика и современность», Санкт-Петербург, Россия, 21–25 сентября 2015;
- «OSSF 2014: The Olympian Symposium on Star Formation», Паралия-Катерини, Греция, 26–30 мая 2014;
- «Protostar and Planets VI», Гейдельберг, Германия, 15–20 июля 2013;
- Семинар памяти Ю.И. Глушкова, ГАИШ, Москва, Россия, 16 сентября 2013;
- IAUS 270: International Astronomical Union Symposium «Computational Star Formation», Барселона, Испания, 31 мая–4 июня 2010;

- Nagoya University International Workshop «Multi-Phase Interstellar Medium and Dynamics of Star Formation», Нагойя, Япония, 28 февраля–2 марта 2010;
- «EPOS: Early Stages of Star Formation 2010», Тегернзее, Германия, 14–18 июня 2010;
- 39-ая студенческая конференция «Физика Космоса», Уральский государственный университет, Коуровка, Россия, 1–5 февраля 2010;
- «Галактические и аккреционные диски», Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия, 21–26 сентября 2009;
- «Cosmic dust and Radiative transfer», Гейдельберг, Германия, 15–17 сентября 2008;
- «From numerical simulations to molecular lines», Тайпей, Тайвань, 7–11 июля 2008;
- «The Molecular Universe: An International Meeting on the Physics and Chemistry of the Interstellar Medium», Аркашон, Франция, 5–8 мая 2008;
- «Molecules in Space and Laboratory», Париж, Франция, 14–18 мая 2007;
- «Звездообразование в Галактике и за ее пределами», Москва, 17–18 апреля 2006.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации 270 страниц, включая 88 рисунков, 11 таблиц и список цитируемой литературы из 204 наименований.

Содержание работы

В **Главе 1** описаны основные уравнения теории переноса излучения в линиях молекул и используемый для их решения универсальный численный метод, разработанный автором в ходе подготовки диссертации. В основе метода лежит алгоритм ускоренных лямбда-итераций с вычислением интенсивности излучения вдоль выделенных направлений. Данный метод хорошо адаптирован для задач любой размерности и используется нами в дальнейшем в качестве базового для моделирования переноса излучения в протозвездных облаках и протопланетных дисках. С помощью данного метода построены диаграммы термализации, наглядно демонстрирующие условия возбуждения линий молекул в протозвездных облаках. Проанализирована проблема нелокальности задачи переноса излучения в линиях молекул и отмечены основные недостатки метода — большие вычислительные затраты в многомерных задачах и необходимость использования ускоренных или приближенных методов. На основе концепции выделения радиативно-связанных областей предложен алгоритм ускорения метода трассировки для расчета средней интенсивности излучения. В условиях сильных регулярных градиентов скорости, в частности, в протопланетных дисках, данный алгоритм позволяет на порядок уменьшить время моделирования. Описаны основные приближенные методы моделирования переноса молекулярного излучения. Предложена модификация приближенного метода больших градиентов скорости для кеплеровских дисков. На примере модели протопланетного диска проиллюстрирована применимость данных методов для расчета переноса излучения в линиях молекулы HCO^+ . Разработана диаграмма формирования профиля линии, центральным элементом которой является спектральная функция вклада. Данная диаграмма является мощным инструментом для анализа результатов моделирования переноса излучения и объяснения формы спектральной линии, полученной в результате моделирования.

Глава 2 посвящена анализу основных факторов, ответственных за формирование линий излучения молекул в протозвездных облаках. На основе модели однородного сферически-симметричного облака проиллюстрировано влияние плотности, температуры газа и лучевой молекулярной концентрации на параметры профиля линии HCO^+ (3–2): максимальную интенсивность, ширину линии и глубину центральной впадины. Данную модель предлагается использовать в методических целях и для предварительной оценки интенсивности и других параметров линий излучения молекул в условиях протозвездных облаков. Для иссле-

дования влияния неоднородного распределения плотности и различной кинематической структуры облака на профили линий излучения предложена феноменологическая модель сжатия протозвездного облака. В этой кинематической модели отслеживается движение индивидуальных объемов облака, что позволило органично объединить ее с эволюционной моделью расчета химической структуры. С помощью этой химико-динамической модели рассчитана химическая эволюция протозвездного облака. Продемонстрировано влияние интенсивности фонового ультрафиолетового (УФ) излучения и плотности потока космических лучей на распределение концентрации молекулы HCO^+ . В рамках данной модели исследовано влияние коллапса и вращения облака на форму профилей линий излучения и особенности его спектральных карт. Для каждой из рассмотренных моделей было проведено моделирование переноса излучения и построены диаграммы формирования профилей линий. Разработанный формализм использован для изучения дозвездного ядра СВ 17. Это пример одного из самых полных и детальных исследований подобных объектов на базе химико-динамической модели и количественного сравнения с высококачественными наблюдаемыми картами линий излучения молекул. Результатами выполненного нами данного исследования является детальное количественное описание химической структуры, физических свойств и эволюционного статуса (т.е. полного описания природы) этого интересного объекта, подтверждаемое воспроизведением наблюдаемых спектральных карт СВ 17 как в оптически тонких, так и в оптически толстых линиях молекул.

В **Главе 3** описаны основные этапы моделирования линий излучения молекул в протопланетных дисках: построение физической модели диска, расчет его химической структуры, моделирование переноса излучения и расчет теоретических распределений интенсивности. Предложена двухдиапазонная модель для расчета распределений плотности и температуры в диске, находящемся в гидростатическом и тепловом равновесии. Особенностью данной модели является ее сбалансированность между полнотой описания и скоростью расчета физической структуры диска, что позволяет использовать ее в самых различных приложениях, в том числе для изучения спектральных проявлений протопланетных дисков. Представлены результаты анализа спектральных проявлений протопланетных дисков, связанных с их сложной тепловой и химической структурой, и предсказаны характерные морфологические особенности наблюдаемых спектральных карт. С помощью разработанных нами методик проведено детальное моделирование молекулярного истечения из протозвездного диска в системе СВ 26. Модель истечения СВ 26 вклю-

чает в себя описание его физической структуры и расчет спектральной карты в линии CO(2–1). По результатам сравнения теоретических спектральных карт с наблюдаемыми картами определены параметры истечения. Фундаментальным результатом данного исследования является вывод о вращении истечения в СВ 26, что имеет важное значение для решения проблемы перераспределения углового момента при образовании звезд.

Глава 4 посвящена моделированию переноса теплового излучения пыли в протозвездных и молодых звездных объектах. Расчет переноса излучения — важный компонент современных самосогласованных моделей окрестностей молодых звезд, в рамках которых можно не только описать физическую структуру данных объектов, но и получить теоретические карты в радио- и инфракрасном (ИК) диапазоне и сопоставить их с наблюдаемыми картами. Для решения этих задач реализован метод расчета тепловой структуры с учетом стохастического нагрева и излучения мелких пылинок и ПАУ-частиц. В модели учтено, что крупные пылинки имеют разную температуру в зависимости от их размера, а мелкие пылинки имеют флуктуирующую температуру и описываются с помощью функции плотности вероятности для температуры. Разработанный программный комплекс использован для решения двух астрофизических задач. В рамках первой задачи проводится восстановление распределений плотности и температуры в наблюдаемых массивных протозвездных облаках. В основе метода восстановления лежит моделирование распределений интенсивности ИК-излучения и использование эвристического алгоритма оптимизации параметров модели. Метод использован для определения параметров темных инфракрасных облаков IRDC 320 и IRDC 321 по их наблюдениям в радио- и ИК-диапазоне. В рамках этой задачи исследован вопрос о влиянии стохастического нагрева мелких пылинок на распределения интенсивности излучения. Вторая задача посвящена объяснению и воспроизведению наблюдательных распределений интенсивности ИК-излучения в областях НП вокруг молодых звезд. Эта задача решается в рамках самосогласованного химико-динамического моделирования областей НП с детальным расчетом переноса излучения. Для рассчитанных моделей зоны НП проведено моделирование нагрева пыли и получены распределения температуры больших пылинок и распределения плотности вероятности температуры мелких пылинок и ПАУ-частиц. На основе этих результатов построены теоретические спектры излучения и распределения интенсивности излучения пыли в ИК-диапазоне. Разработанная модель применена для анализа наблюдений зоны ионизованного водорода RCW 120, для которой до-

ступны наблюдательные карты, полученные космическими телескопами *Spitzer* и *Herschel*. В RCW 120 распределение инфракрасного излучения имеет типичную для таких объектов морфологию. На длине волны 24 мкм наблюдается свечение всей зоны ионизации водорода с максимумом по направлению на центр облака, где находится массивная звезда. В то же время на длине волны 8 мкм наблюдается яркое кольцо, совпадающее с границей зоны ионизации водорода. Нами показано, что модель без учета разрушения ПАУ-частиц не позволяет воспроизвести наблюдаемое распределение ИК-излучения и предсказывает значительный центральный пик излучения на длине волны 8 мкм. Для объяснения реальной морфологии требуется предположение о разрушении ПАУ-частиц излучением центральной звезды.

В **Главе 5** представлена модель для расчета тепловой эволюции протозвездных облаков. В ней температуры пыли и газа рассматриваются раздельно, что позволяет более точно описывать начальные стадии сжатия облаков и исследовать процессы инициализации их сжатия. Ключевой особенностью модели является ее сбалансированность: будучи достаточно быстрой для использования в гидродинамических эволюционных расчетах, она одновременно обладает достаточной точностью для того, чтобы результаты моделирования могли быть непосредственно сопоставлены с наиболее качественными наблюдениями. Такое сопоставление подразумевает расчет теоретических спектральных карт, как правило, чувствительных к деталям тепловой структуры. В качестве приложений модели рассмотрены задачи о сжатии протозвездного облака в сферически-симметричном и аксиально-симметричном приближениях. В ходе решения этих задач показано, что метод расчета тепловой структуры хорошо работает как на ранних, оптически-тонких фазах эволюции облака, так и на стадии формирования непрозрачного ядра. Разработанные методы и соответствующие программные комплексы предлагается использовать для моделирования и интерпретации наблюдений индивидуальных протозвездных облаков.

В **Заключении** отмечены направления дальнейшей работы по теме диссертации.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- [A1] *Павлюченков Я. Н., Шустов Б. М.* Метод расчета переноса излучения в линиях молекул в приложении к двумерной модели дозвездного ядра L1544 // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. №4. С. 348–359.
- [A2] *Pavlyuchenkov Ya., Semenov D., Henning Th., Launhardt R., Guilloteau St., Dutrey A., Pietu V.* Molecular line radiative transfer in protoplanetary disks: Monte Carlo simulations versus approximate methods // *Astrophys. J.* 2007. V. 669. С. 1262–1278.
- [A3] *Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Launhardt R., Semenov D., Wiebe D., Shustov B.* Molecular emission line formation in prestellar cores // *Astrophys. J.* 2008. V. 689. P. 335–350.
- [A4] *Павлюченков Я. Н., Шустов Б. М., Шематович В. И., Вубе Д. З., Лу Ж. Ю.* Химико-динамическая модель дозвездного ядра L1544: сравнение модельных и наблюдаемых спектров излучения $C^{18}O$, $HC^{18}O^+$ и CS // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. №3. С. 202–211.
- [A5] *Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Wiebe D.* Do we need to know the temperature in prestellar cores? // *Astrophys. J.* 2007. V. 669. L101–L104.
- [A6] *Pavlyuchenkov Ya., Launhardt R., Henning Th., Wiebe D.* CB 17: Inferring the dynamical history of a prestellar core with chemodynamical models // *Astrophys. J.* 2006. V. 645. P. 1212 – 1226.
- [A7] *Hennemann M., Birkmann S. M., Krause O., Lemke D., Pavlyuchenkov Ya., More S., Henning, Th.* Star-forming cores embedded in a massive cold clump: fragmentation, collapse, and energetic outflows // *Astrophys. J.* 2009. V. 693. P. 1379–1391.
- [A8] *Lippok N., Launhardt R., Semenov D., Stutz A. M., Balog Z., Henning Th., Krause O., Linz H., Nielbock M., Pavlyuchenkov Ya. N., Schmalzl M., Schmiedeke A., Bieging J. H.* Gas-phase CO depletion and N_2H^+ abundances in starless cores // *Astron. and Astrophys.* 2013. V. 560, article id. A41.

- [A9] *Вибе Д. З., Кирсанова М. С., Шустов Б. М., Павлюченков Я. Н.* Проблемы теории звездообразования и перспективы наблюдений в субмиллиметровом диапазоне // *Астрон. журн.* 2008. Т. 85. №12. С. 1086–1095.
- [A10] *Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н., Лаунхардт Р., Бурке Т.* Восстановление параметров протопланетного диска СВ 26 по наблюдательным картам в миллиметровом диапазоне // *Астрон. журн.* 2012. Т. 89. №12. С. 1008–1023.
- [A11] *Воробьев Э. И., Павлюченков Я. Н., Тринкл П.* Влияние вспышек светимости на свойства протозвездных дисков // *Астрон. журн.* 2014. Т. 91. №8. С. 610–625.
- [A12] *Semenov D., Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Wolf S., Launhardt R.* Chemical and thermal structure of protoplanetary disks as observed with ALMA // *Astrophys. J.* 2008. V. 673. L195–L198.
- [A13] *Semenov D., Pavlyuchenkov Y., Schreyer K., Henning Th., Dullemond C., Bacmann A.* Millimeter Observations and Modeling of the AB Aurigae System // *Astrophys. J.* 2005. V. 621. P. 853–874.
- [A14] *Semenov D., Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Herbst E., van Dishoeck E.* On the Feasibility of Chemical Modeling of a Protoplanetary Disk // *Balt. Astron.* 2004. V. 13. №3. P. 454–458.
- [A15] *Akimkin V. V., Pavlyuchenkov Y. N., Vasyunin A. I., Wiebe D. S., Kirsanova M. S., Henning T.* UV-controlled physical and chemical structure of protoplanetary disks // *Astrophys. and Space Science.* 2011. V. 335. P. 33–38.
- [A16] *Carmona A., van den Ancker M. E., Henning Th., Pavlyuchenkov Ya., Dullemond C. P., Goto M., Thi W. F., Bouwman J., Waters L. B. F. M.* A search for mid-infrared molecular hydrogen emission from protoplanetary disks // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 477. P. 839–852.
- [A17] *Dutrey A., Guilloteau S., Pietu V., Chapillon E., Gueth F., Henning T., Launhardt R., Pavlyuchenkov Y., Schreyer K., Semenov D.* Cavities in inner disks: the GM Aurigae case // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 490. L15–L18.

- [A18] *Тутуков А. В., Павлюченков Я. Н. Модели астрофизических диффузионных декреционно-аккреционных дисков // Астрон. журн. 2004. Т. 81. №10. С. 881–894.*
- [A19] *Pavlyuchenkov Ya., Dullemond C. P. Dust crystallinity in protoplanetary disks: the effect of diffusion/viscosity ratio // Astron. and Astrophys. 2007. V. 471. P. 833–840.*
- [A20] *Akimkin V., Zhukovska S., Wiebe D., Semenov D., Pavlyuchenkov Ya., Vasyunin A., Birnstiel T., Henning Th. Protoplanetary disk structure with grain evolution: the ANDES model // Astrophys. J. 2013. V. 766, article id. 8.*
- [A21] *Launhardt R., Pavlyuchenkov Ya., Chen X., Henning Th., Semenov D., Gueth F., Pietu V., Dutrey A., Guilloteau S., Schreyer K. Rotating molecular outflows: the young T Tauri star in CB 26 // Astron. and Astrophys. 2009. V. 494. P. 147–156.*
- [A22] *Павлюченков Я. Н., Виле Д. З., Фатеева А. М., Васюнина Т. С. Определение параметров массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения // Астрон. журн. 2011. Т. 88. №1. С. 3–15.*
- [A23] *Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe D. S., Akimkin V. V., Khrantsova M. S., Henning Th. Stochastic grain heating and mid-infrared emission in protostellar cores // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2012. V. 421, P. 2430–2441.*
- [A24] *Павлюченков Я. Н., Кирсанова М. С., Виле Д. З. Инфракрасное излучение и разрушение пыли в зонах III // Астрон. журн. 2013. Т. 90. №8. С. 625–638.*
- [A25] *Akimkin V. V., Kirsanova M. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Wiebe, D. S. Dust dynamics and evolution in expanding H II regions. I. Radiative drift of neutral and charged grains // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2015. V. 449. P. 440–450.*
- [A26] *Khrantsova M. S., Wiebe D. S., Boley P. A., Pavlyuchenkov Ya. N. Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 2013. V. 431. P. 2006–2016.*

- [A27] *Жилкин А. Г., Павлюченков Я. Н., Замоздра С. Н.* Моделирование протозвездных облаков и их наблюдательных проявлений // Астрон. журн. 2009. Т. 86. №7. С. 638–653.
- [A28] *Павлюченков Я. Н., Жилкин А. Г.* Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры коллапсирующего протозвездного облака // Астрон. журн. 2013. Т. 90. №9. С. 699–715.
- [A29] *Павлюченков Я. Н., Жилкин А. Г., Воробьев Э. И., Фатеева А. М.* Тепловая структура протозвездной оболочки // Астрон. журн. 2015. Т. 92. №2. С. 154–167.

Другие публикации автора по теме диссертации

- [B1] *Shematovich V. I., Shustov B. M., Wiebe D. S., Pavlyuchenkov Ya. N., Li Zhi-Yun.* Self-consistent theoretical models of collapsing pre-stellar cores // Труды симпозиума МАС №231 «Astrochemistry: Recent Successes and Current Challenges». Ред. D. C. Lis, G. A. Blake, E. Herbst. 2005. P. 37–46.
- [B2] *Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З., Шустов Б. М., Хеннинг Т.* Линии излучения молекул в дозвездных ядрах // Сборник трудов конференции «Звездообразование в Галактике и за ее пределами». Ред. Д. З. Вибе, М. С. Кирсанова. 2006. Москва. Изд. Янус-К. С. 93–100.
- [B3] *Dullemond C., Pavlyuchenkov Ya., Apai, D., Pontoppidan, K.* Structure and evolution of protoplanetary disks // Труды конференции «The Universe Under the Microscope — Astrophysics at High Angular Resolution». Journal of Physics: Conference Series. V. 131. 2008. Ред. R. Schoedel, A. Eckart, S. Pfalzner, E. Ros.
- [B4] *Carmona A, van den Ancker M. E., Henning Th., Pavlyuchenkov Ya., Dullemond C. P, Goto M., Fedele D., Stecklum B., Thi W.-F., Bouwman J., Waters L. B. F. M.* Searching for H₂ emission from protoplanetary disks using near- and mid-infrared high-resolution spectroscopy // Труды конференции МАС №249 «Exoplanets: Detection, Formation and Dynamics». 2008. P. 359–368.
- [B5] *Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З.* Моделирование физико-химической структуры протопланетных дисков // Труды 40-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2011. С. 288.

- [B6] *Павлюченков Я. Н., Вибе Д. З.* Спектральная диагностика протозвездных облаков в ИК диапазоне // Труды 40-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2011. С. 359.
- [B7] *Pavlyuchenkov Ya., Wiebe D., Fateeva A., Vasyunina T.* Radiative transfer simulations of Infrared Dark Clouds // Труды симпозиума МАС №270 «Computational Star Formation». Ред. J. Alves, B. Elmegreen, V. Trimble. 2011. P. 455–458.
- [B8] *Вибе Д. З., Храмцова М. С., Павлюченков Я. Н.* Полициклические ароматические углеводороды // Труды 41-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. С. 43–55.
- [B9] *Павлюченков Я. Н., Жилкин А. Г.*, Моделирование тепловой структуры при гидродинамических расчетах эволюции протозвездного облака // Труды 40-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2011. С. 344–345.

Цитируемая литература

- [1] Труды симпозиума МАС №270 «Computational Star Formation» / Ред. J. Alves, B. G. Elmegreen, J. M. Girart, V. Trimble. Изд. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [2] Труды конференции «Protostars and Planets VI» / Ред. Beuther H., Klessen R. S., Dullemond, Henning Th. Изд. Tucson: University of Arizona Press, 2014.
- [3] *Bodenheimer, P. H.* Principles of Star Formation / Изд. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Astronomy and Astrophysics Library, 2011.
- [4] *Ward-Thompson, D., & Whitworth, A. P.* An Introduction to Star Formation / Изд. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [5] *Сурдин В. Г., Ламзин С. А.* Протозвёзды. Где, как и из чего формируются звёзды. Изд. Москва: Наука, 1992.
- [6] *Сурдин В. Г.* Рождение звезд. / Изд. Москва: Едиториал УРСС, 1999.