

Отзыв официального оппонента В.П. Гринина на диссертацию Я.Н. Павлюченкова «Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация Ярослава Николаевича Павлюченкова посвящена исследованию термодинамического состояния и спектров излучения объектов, находящихся на ранних стадиях звездообразования. Благодаря интенсивному развитию астрономической техники, работающей в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах длин волн, этот важный раздел современной астрофизики вступил в последние годы в новую фазу развития, требующую разработки новых, более совершенных методов моделирования спектров излучения таких объектов. Поэтому тема диссертации, посвященная развитию и практическому применению таких методов, весьма актуальна.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Во Введении дан краткий обзор работ по теме диссертации, сформулированы цели диссертации и результаты, выносимые на защиту, а также отмечена их новизна и практическая значимость. Первая глава посвящена разработке и адаптации алгоритмов решения уравнения переноса излучения в частотах молекулярных линий применительно к условиям протозвездных объектов и протопланетных дисков. Рассмотрев существующие методы решения таких задач, автор останавливается на методе ускоренных Lambda-итераций, модифицировав его для сред с большими градиентами скорости. Для иллюстрации работы данного метода решены две задачи о формировании линий молекулы  $\text{HCO}^+$  в однородном сферически-симметричном облаке и в протопланетном диске, температурные условия в котором контролируются излучением звезды. В последнем разделе главы рассмотрена спектральная функция вклада, позволяющая локализовать в протяженном объекте зоны, ответственные за формирование излучения на любой частоте профиля спектральной линии. Использование этой функции в диагностике протозвездных облаков сильно упрощает интерпретацию наблюдений.

Разработанные в первой главе алгоритмы решения уравнения переноса излучения используются во второй главе для расчета молекулярных спектров дозвездных и протозвездных облаков, находящихся в стадии гравитационного сжатия. Сначала решена достаточно простая задача: рассчитано свечение однородного сферически-симметричного облака в линиях молекулы  $\text{HCO}^+$  при фиксированных значениях температуры и лучевой концентрации молекул. Возбуждение молекулярных уровней происходит в результате столкновений молекул  $\text{HCO}^+$  с молекулами  $\text{H}_2$ . На примере этой задачи продемонстрировано влияние модельных параметров на параметры профиля линии. В следующем разделе рассмотрена более реалистичная модель неоднородного стационарного облака с распределением плотности, выбранным с учетом существующих моделей дозвездных облаков и их химической эволюции. При расчете химической структуры облака учтены наряду с химическими реакциями в газовой фазе, столкновения с частицами пыли и ионизации межзвездным ультрафиолетовым (УФ) излучением и космическими лучами. За основу принята модель дозвездного ядра L1544. Для упрощения анализа облако считается изотермическим. На примере этой задачи диссертант исследует влияние исходных параметров на профиль линии  $\text{HCO}^+$ . Этот профиль имеет разную форму при наблюдениях в центре и на краях облака, что отражает уменьшение температуры возбуждения молекулярных уровней от центра облака к его границе. В следующих разделах главы исследуется влияние поля скоростей в протозвездном облаке на пространственно-частотные характеристики моделей. Отдельно рассмотрены случаи чисто радиальных и чисто вращательных движений.

Итогом этой работы является химико-динамическая модель протозвезды CB 17, являющаяся комбинацией рассмотренных выше моделей. Ее наблюдательную основу составляют наблюдения линий молекул  $\text{CS}$ ,  $\text{HCO}^+$  и  $\text{CO}$  в источнике CB 17, полученные с помощью телескопа IRAM. С учетом многопараметрической структуры модели, эта задача решена в три этапа. В каждом из них рассматривается и локализуется путем подгонки теории к наблюдениям определенная группа параметров. Эта работа выполнена весьма тщательно с помощью карт соответствия теоретических и наблюдаемых спектральных данных. Определены основные параметры CB 17, включая его возраст ( $\sim 2 \text{ Myr}$ ). Продемонстрирована важная роль ионизаций фоновым УФ излучением. Показано, что с точки зрения химической структуры этот объект похож на протозвезду L1544, исследованную другой группой астрофизиков. Другим важным общим свойством этих двух объектов являются их

кинематические характеристики: в обоих случаях поле скоростей в них представляет собой суперпозицию радиального движения (коллапаса) и вращения.

К этой главе есть два замечания: 1) В главе, где рассматриваются процессы взаимодействия молекул с частицами пыли, ничего не сказано о том, какая это пыль и как она распределена. Можно только догадываться, что пыль, по-видимому, близка по своим характеристикам к межзвездной пыли и хорошо перемешана с газом в пропорции 1:100 (по массе). 2) Во введении к этой главе следовало бы упомянуть пионерскую работу японских теоретиков Дегучи и Фукуи (S. Deguchi and Y. Fukui, Publ. Astron. Soc. Jpn., 29, 683, 1977), в которой задача о расчете молекулярного спектра коллапсирующего протозвездного облака была впервые решена с учетом эффектов нелокальности радиационного взаимодействия в частотах молекулярных линий.

Третья глава посвящена расчетам молекулярных спектров протопланетных дисков и биконических молекулярных истечений. Автором предложен сравнительно простой и достаточно быстрый метод решения задачи о температурном балансе в диске, нагреваемом как излучением звезды, так и за счет энергии турбулентных движений. Следующим шагом является определение молекулярного состава в диске и решение уравнений статистического равновесия для населенностей молекулярных уровней. Основную трудность на последнем этапе представляет решение задачи в докритическом режиме, когда скорости возбуждения и деактивации уровней существенным образом зависят от параметров поля излучения в диске. Для решения этой задачи диссертант использует модель диска из статьи D'Alessio et al. (1998). На основе этой модели рассчитана химическая структура диска. Для расчета спектральных характеристик диска выбрана молекула  $\text{HCO}^+$ . Населенности уровней и температура возбуждения для рассматриваемого перехода  $\text{HCO}^+$  (4-3) рассчитаны на основе алгоритма, разработанного в первой главе диссертации. Результатом этой работы являются теоретические изображения диска на частоте молекулярной линии. Из них следует, что эти изображения весьма чувствительны к параметрам модели, определяющим температурную и химическую структуру диска. С помощью симулятора интерферометра ALMA показано, что детали этих изображений, рассчитанные для ряда молекулярных линий, могут быть разрешены при наблюдениях на этом интерферометре.

В качестве примера, демонстрирующего возможности этого метода, выполнено сравнение модельных спектральных изображений в частотах линии молекулы  $\text{CO}(3-2)$  протопланетного диска Ae звезды Хербига HD 163296, с результатами наблюдений этого объекта с помощью интерферометра ALMA. Согласие между теорией и наблюдениями весьма убедительное. Это открывает новые возможности для крупномасштабной диагностики протопланетных дисков.

В последнем разделе главы 3 рассчитана модель молекулярного истечения из молодого протопланетного диска CB 26, наблюдения которого в линиях молекулы  $\text{CO}(2-1)$  получены с помощью радиотелескопа IRAM. Особенность этого объекта состоит в том, что ось протопланетного диска почти совпадает с картинной плоскостью. В результате центральная звезда экранируется собственным диском и практически не видна. Но зато при такой ориентации сильно упрощается моделирование кинематической структуры истечения. Главным результатом, полученным путем моделирования спектральных наблюдений этого объекта, является обнаружение вращательных движений в биконическом истечении. Наличие вращения в молекулярном ветре свидетельствует о том, что это дисковый ветер, стартующий с поверхности аккреционного диска. Найденные путем моделирования параметры истечения, такие как радиус запуска ветра и угол его раскрытия, представляют большой интерес для теоретиков, занимающихся теорией МГД истечений из аккреционных дисков молодых звезд. В частности, большой интерес представляет близость радиуса запуска ветра (около 30 а.е.) к радиусу внутренней полости в диске (около 45 а.е), свидетельствующую о наличии в системе компаньона.

В четвертой главе исследуется термодинамическое состояние пыли в протопланетных дисках и рассчитывается спектр ее излучения. Для решения этой задачи диссертантом разработан алгоритм решения уравнений переноса излучения и теплового баланса в пылевой среде, в котором предполагается равенство температуры пылевых частиц разных размеров. Предполагается, что пылевая смесь состоит из сферических силикатных частиц, размеры которых распределены по закону:  $n(a) \sim a^{-3.5}$ ,  $0.001 < a < 10$  мкм. Кроме них учитываются также мелкие углеродные пылинки и полициклические ароматические углеводородные частицы (ПАУ-частицы). В силу малых размеров таких частиц их внутренняя энергия может

быть сравнима с энергией взаимодействующих с ними фотонов. Поэтому их излучение сильно флуктуирует и для его расчета требуется специальная методика, учитывающая стохастический характер этого процесса. Этот вопрос детально рассмотрен в первом разделе главы. В следующем разделе рассчитаны модели темных инфракрасных облаков, из которых (предположительно) рождаются массивные звезды. Эти облака могут наблюдаться как в излучении, так и в поглощении на фоне излучения Галактики. Автором диссертации выбраны два таких объекта в источниках IRDC 320 и IRDC 321, для которых существуют данные об инфракрасном и субмиллиметровом излучении. Для каждого объекта рассчитаны модели неоднородного газопылевого облака, в центре которого находится протозвезда, с заданными температурой и светимостью. Учтено также фоновое излучение галактики. Анализ полученных решений показал, что наличие наблюдений в ИК и субмиллиметровом диапазонах является очень важным для локализации параметров облаков. В обоих случаях подгонка модельного решения к наблюдениям требует существования в центре облака протозвезды. В следующем разделе обсуждается влияние на распределение энергии в спектре облаков различий в температуре пылинок, имеющих разные размеры. Особое внимание уделено ПАУ-частицам. Показано, что их излучение играет важную роль при повышенной интенсивности фонового УФ излучения. В этом случае на длине волны 24 мкм вместо облака должно наблюдаться яркое кольцо. Отсутствие этой детали на изображениях облаков IRDC говорит о пренебрежимо малой роли ПАУ-частиц в их термодинамике. Последний раздел главы посвящен моделированию ИК излучения, наблюдаемого в направлении на зоны Н II вокруг молодых горячих звезд. В качестве примера выбран инфракрасный объект RCW 120, морфология которого типична для молодых зон Н II. В начале рассмотрена простая модель однородного сферического облака с горячей звездой в центре и зонами Н II и НI. Рассчитан ряд моделей такого облака, в предположении, что пылевая смесь включает крупные частицы из силиката, мелкие графитовые и ПАУ частицы. Показано, что стохастический нагрев последних определяется в основном ультрафиолетовым излучением звезды. Сравнение модельных распределений энергии с наблюдениями показало, что мелкие графитовые и ПАУ частицы дают основной вклад в наблюдаемое ИК излучение в области длин волн 1-10 мкм. В следующей группе моделей учтены процессы разрушения ПАУ-частиц излучением звезды. Это существенно улучшило согласие теории и наблюдений. Однако осталось расхождение модельных и наблюдаемых потоков в центральной части изображения RCW 120, которое не удалось преодолеть ни в одной из рассмотренных моделей. Автор диссертации предполагает, что причиной этого расхождения может быть принятая при расчетах радиально-симметричная модель туманности.

Заключительная пятая глава диссертации посвящена моделированию тепловой структуры протозвездного облака в процессе гравитационного сжатия. При решении этой сложной задачи принято во внимание возможное отличие температуры газовой и пылевой компонент диска. Кроме теплового излучения облака учитывается также фоновое ультрафиолетовое излучение Галактики, и ионизация космическими лучами. Диссертантом разработаны эффективные методы решения задачи о тепловом балансе в пылевой и газовой компонентах для двух пространственно-кинематических моделей сжимающегося облака: сферически-симметричной и аксиально-симметричной, с участием вращения. Учтены основные механизмы нагрева и охлаждения газа и пыли. Уравнение переноса излучения решается в диффузионном приближении. Для решения уравнений теплового баланса в газопылевой среде разработан численный алгоритм, с помощью которого решена тестовая задача о температурной релаксации газовой и пылевой компонент неподвижного облака. Дальнейшее усложнение алгоритма связано с учетом динамики гравитационного сжатия облака. На первом этапе рассмотрен сферически-симметричный коллапс. Затем задача сформулирована для более общего случая аксиально-симметричного сжатия. В качестве примера применения разработанных в этой главе вычислительных алгоритмов диссертантом рассчитана спектральная карта коллапсирующего облака в лучах линии молекулы  $\text{HCO}^+$  (1-0).

В Заключении автором диссертации сформулированы основные направления применения и развития разработанных им моделей и численных алгоритмов.

Оценивая диссертацию в целом, необходимо подчеркнуть, что термодинамика протозвездных облаков и протопланетных дисков, и моделирование спектров их излучения относятся к числу наиболее сложных задач современной астрофизики, над решением которых

работают группы теоретиков в разных странах. Результаты, полученные диссертантом и вынесенные им на защиту, надежно обоснованы и вносят крупный вклад в развитие этой области астрофизики. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты, полученные диссертантом, могут быть рекомендованы для включения в учебники по астрофизике и научные пособия для студентов и аспирантов, изучающих процессы звездообразования, а также для использования в научных исследованиях по этой тематике, проводимых в астрономических институтах и обсерваториях РФ. Считаю, что Ярослав Николаевич Павлюченков безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв подготовлен доктором физ.-мат. наук,  
зав. лаб. звездообразования ГАО РАН В.П. Грининым,  
Адрес: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65/1  
Тел. 8 (812) 3637345  
эл. адрес: [vgcrao@mail.ru](mailto:vgcrao@mail.ru)

Подпись В.П. Гринина заверяю .....

*Ученый секретарь ГАО РАН*

