

Российская академия наук
Институт астрономии

Излучение молекул и пыли в дозвездных и протозвездных объектах

Павлюченков Ярослав Николаевич

01.02.03 – астрофизика и звездная астрономия

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
д.ф.-м.н. Б.М. Шустов

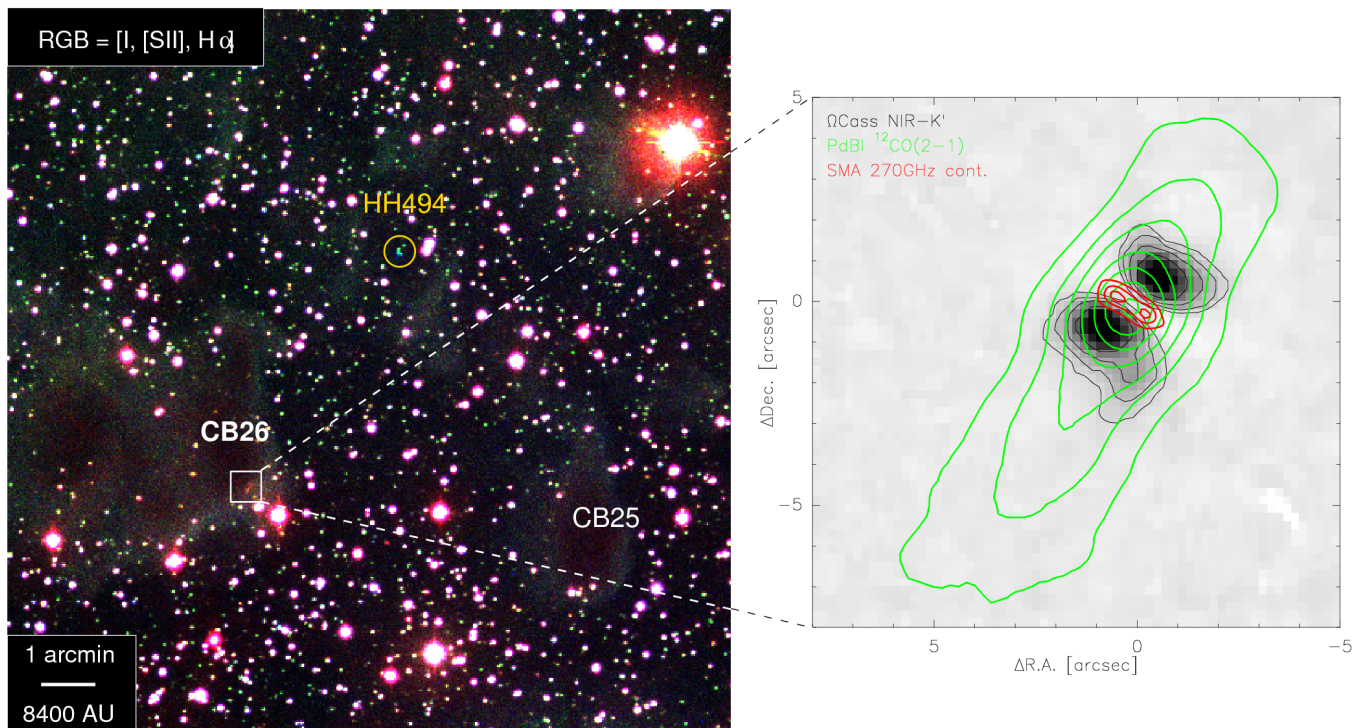
Москва, 2016

Структура диссертации

- **Введение**
- **Глава 1.** Перенос излучения в линиях молекул в протозвездных облаках и протопланетных дисках
- **Глава 2.** Спектральная диагностика протозвездных облаков
- **Глава 3.** Линии излучения молекул в протопланетных дисках
- **Глава 4.** Инфракрасное излучение дозвездных и протозвездных объектов
- **Глава 5.** Тепловая структура эволюционирующего протозвездного облака
- **Заключение**

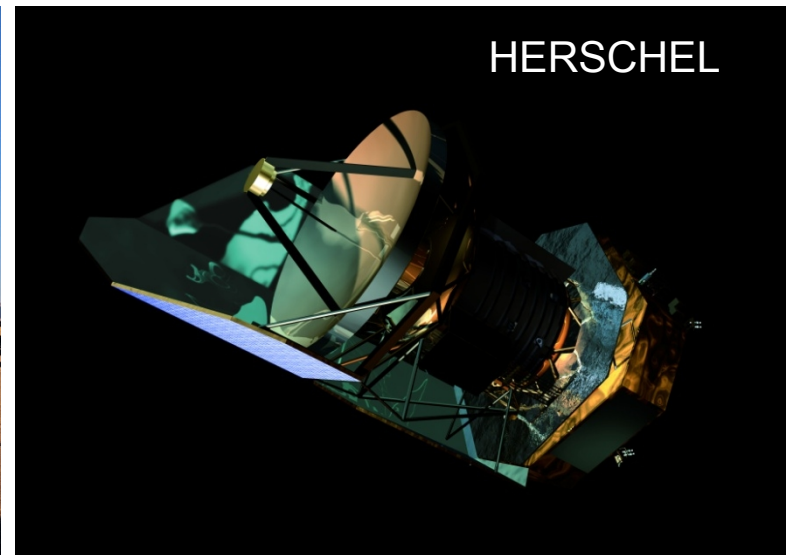
Введение

Излучение пыли и молекул – важнейший источник информации о протозвездных объектах: дозвездных и протозвездных облаках, протопланетных дисках, областей HII вокруг молодых звезд.

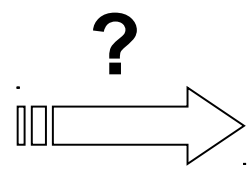
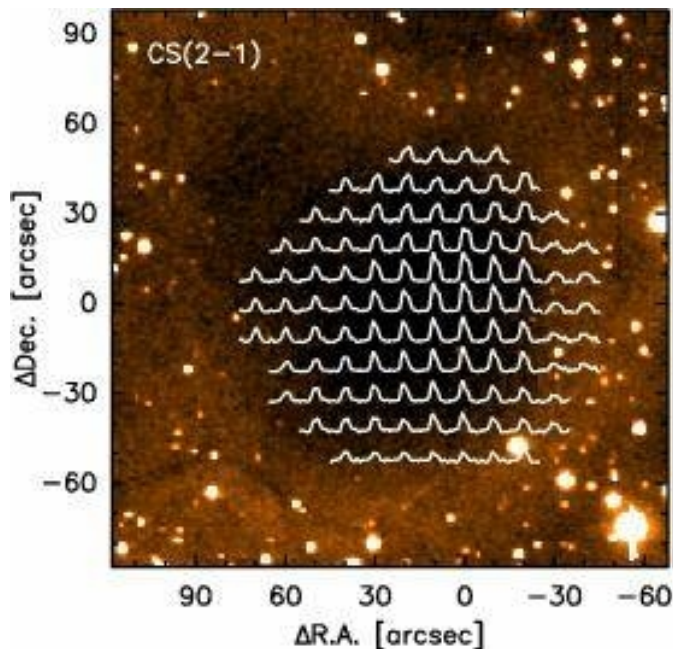


Система CB26 в разных длинах волн.
[Launhardt, Pavlyuchenkov et al., A&A \(2009\)](#)

Введение в строй современных радиоинтерферометров с высокой чувствительностью и хорошим угловым разрешением, таких как SMA, NOEMA, ALMA позволяет наблюдать распределения молекул и холодной пыли. Наблюдения с космических телескопов Spitzer и Herschel несут информацию о распределении теплой пыли в областях звездообразования.



Извлечение информации о структуре, физических и химических свойствах протозвездных объектов из наблюдений линий молекул и излучения пыли – обратная задача, осложненная большим количеством физических факторов, влияющих на спектры излучения.



плотность
температура
скорость
хим. состав

Фундаментальный путь решения этой задачи – разработка самосогласованных моделей, включающих расчет физической структуры данных объектов и их наблюдательных проявлений. Расчет переноса излучения – один из основных элементов таких моделей.

Основными задачами диссертации являются:

- Разработка и усовершенствование методов расчета переноса излучения на пыли и в линиях молекул, а также методов анализа результатов численного моделирования переноса излучения, оптимизированных для исследования дозвездных и протозвездных объектов: ядер молекулярных облаков, протопланетных дисков, а также областей HII вокруг молодых звезд.
- 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.
- 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.

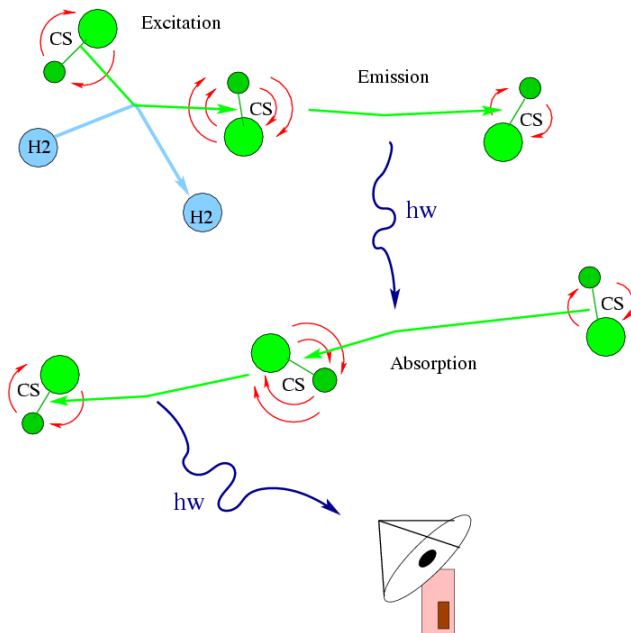
Глава 1.

Перенос излучения в линиях молекул в протозвездных облаках и протопланетных дисках

- 1.1 Уравнение переноса излучения и метод его решения
- 1.2 Возбуждение энергетических уровней молекул и диаграмма термализации
- 1.3 Нелокальность задачи переноса излучения и карта связанных областей
- 1.4 Приближенные методы моделирования переноса излучения
- 1.5 Диаграмма формирования профиля линии

1.1 Уравнение переноса излучения

Задача переноса излучения в линиях молекул состоит в определении самосогласованных распределений интенсивности излучения и населенностей энергетических уровней молекул.



$$\vec{n} \cdot \nabla I_\nu = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu$$

$I_\nu(\vec{r}, \vec{n})$ - интенсивность излучения

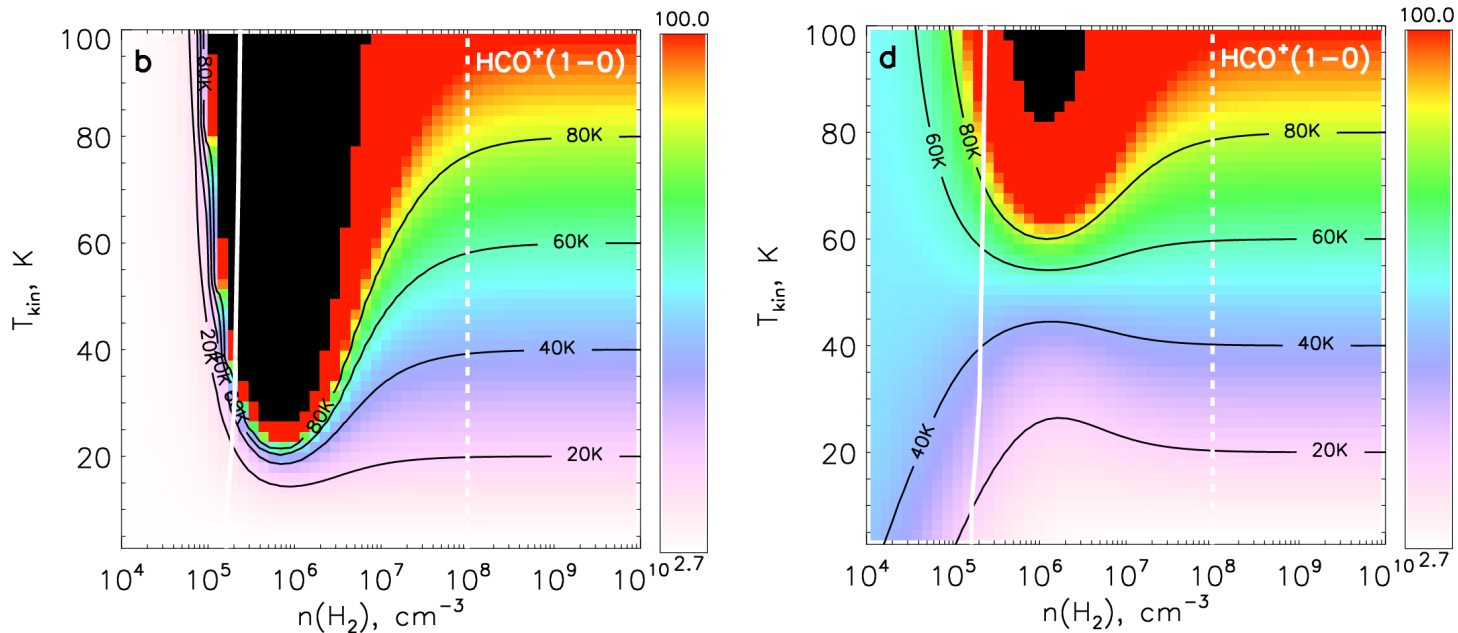
$\alpha_\nu(\vec{r})$ - коэффициент поглощения

$j_\nu(\vec{r})$ - коэффициент излучения

Перенос излучения является сложной физической и математической проблемой!

1.2 Возбуждение энергетических уровней молекул и диаграмма термализации

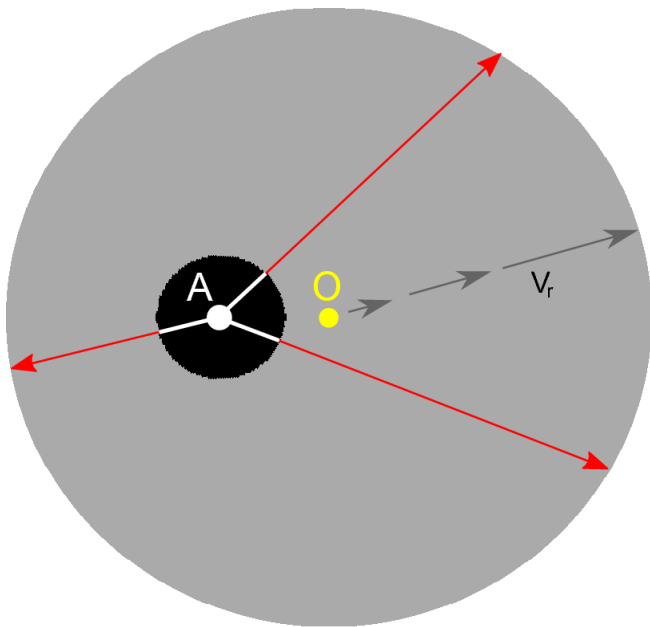
Возбуждение линий излучения молекул в протозвездных объектах часто происходит в не-ЛТР условиях.



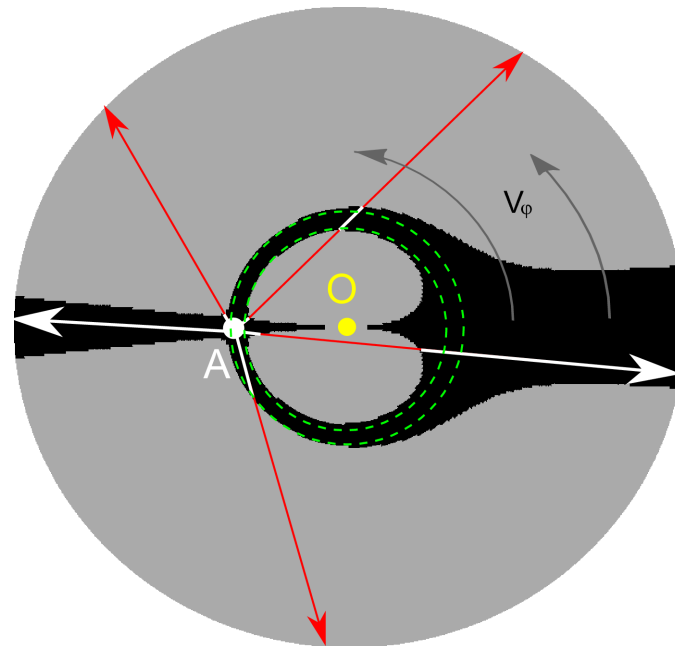
Температура возбуждения линии $\text{HCO}^+(1-0)$ в оптически-тонкой среде. Слева: температура фонового излучения $T_{\text{bg}}=2.73\text{K}$, справа: $T_{\text{bg}}=50\text{K}$.

1.3 Нелокальность задачи переноса излучения и карта связанных областей

Карта связанных областей для сферически-симметричного облака, расширяющегося (сжимающегося) по хаббловскому закону

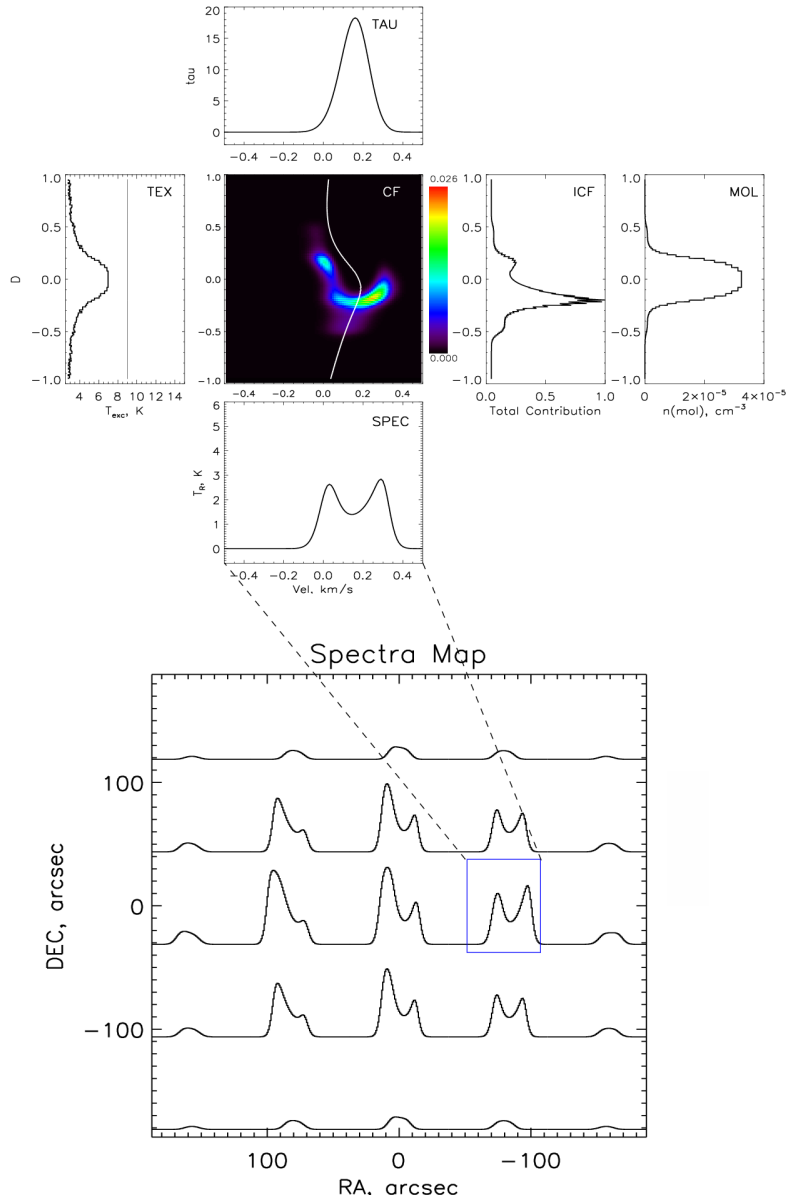


Карта связанных областей для экваториальной плоскости кеплеровского диска



Выделение связанных областей позволяет в десятки раз ускорить точный метод переноса излучения, а также создать очень быстрый приближенный метод для протопланетных дисков. [Pavlyuchenkov et al., ApJ \(2007\)](#)

1.5 Диаграмма формирования профиля линии



Анализ результатов моделирования переноса излучения необходим для контроля метода и понимания самих результатов.

Интегральная функция вклада (ICF):
Tafalla et al., ApJ (2006)

Спектральная функция вклада (CF):

$$CF(l, \nu) = e^{-\tau(l, \nu)} (1 - e^{-\Delta\tau_\nu}) S(l, \nu)$$

Предложенная нами диаграмма формирования профиля линии объясняет форму спектральной линии и определяет вклад каждого элемента облака.
Pavlyuchenkov et al., ApJ (2008)

Программный комплекс “URANIA”



Характеристики:

- Аксиальная симметрия, сферические координаты
- Метод ускоренных Λ -итераций
- Интегрирование вдоль заданных/случайных направлений
- Модуль для расчета теплового баланса
- Адаптированные для различных задач приближенные методы
- Использование Лейденовской базы данных молекулярных констант
- Средства визуализации для построения спектральных карт, распределений интенсивности и т.д.
- Инструменты анализа результатов моделирования

- Павлюченков & Шустов АЖ (2004)
- Pavlyuchenkov et al. ApJ (2008)

Результаты, выносимые на защиту по Главе 1:

- Методы моделирования переноса излучения, адаптированные для расчета профилей линий излучения молекул в дозвездных и протозвездных объектах, а также инструменты анализа результатов такого моделирования.

Глава 2.

Спектральная диагностика протозвездных облаков

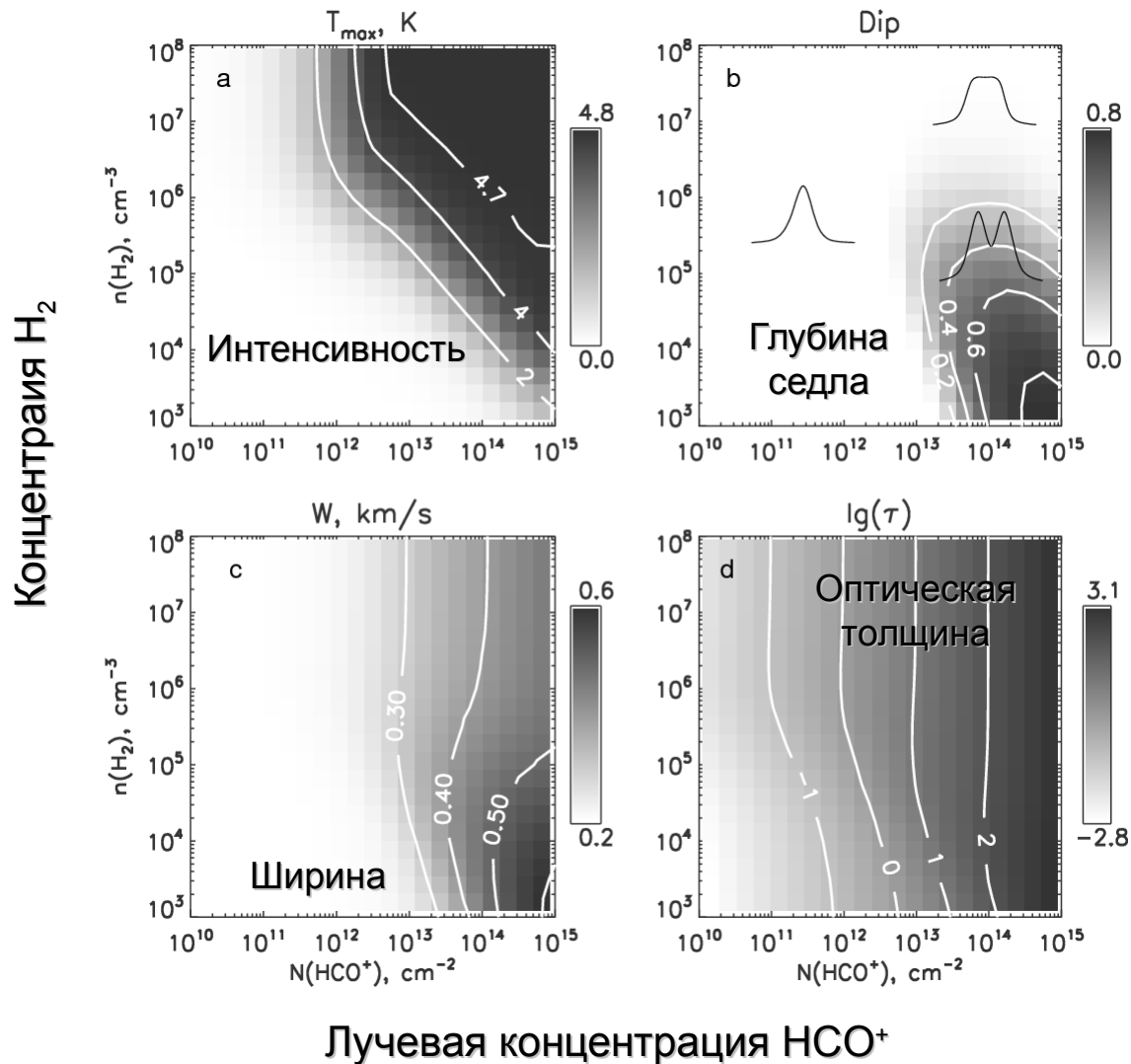
2.1 Профили линий излучения для однородных облаков

2.2 Влияние неоднородной структуры облака на профили
линий излучения молекул

2.3 Химико-динамическая модель дозвездного ядра СВ 17

2.1 Профили линий излучения для однородных облаков

Параметры профиля $\text{HCO}^+(3-2)$ по направлению на центр облака



Фиксированные параметры облака:

$$T_{\text{kin}} = 10 \text{ K}$$

$$V_{\text{turb}} = 0.1 \text{ км/с}$$

Данные диаграммы можно использовать для анализа условий формирования профилей линий и предварительной оценки параметров облаков.

Pavlyuchenkov et al.,
ApJ (2008)

2.2 Влияние неоднородной структуры облака на профили линий излучения молекул: кинематическая модель сжатия облака

1. Однородная начальная и неоднородная конечная конфигурация:

$$n(H_2) = \frac{n_0}{1 + (r/r_0)^p}$$

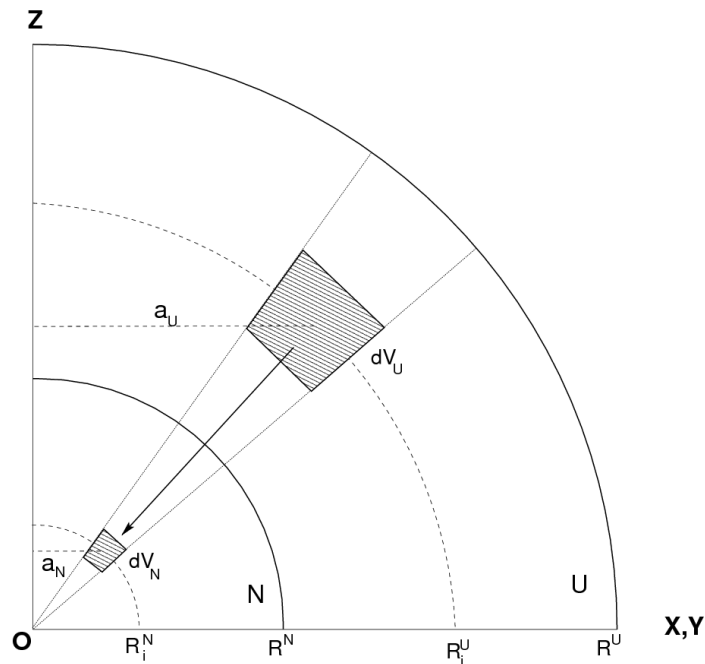
2. Феноменологический закон сжатия:

$$R_i(t) = R_i^U - W_i \left(\frac{t}{t_0} \right)^\delta,$$

$$V_i(t_0) = -\delta \frac{W_i}{t_0}$$

3. Закон сохранения локального углового момента

$$V_\phi = \frac{\Omega a_U^2}{a_N}$$

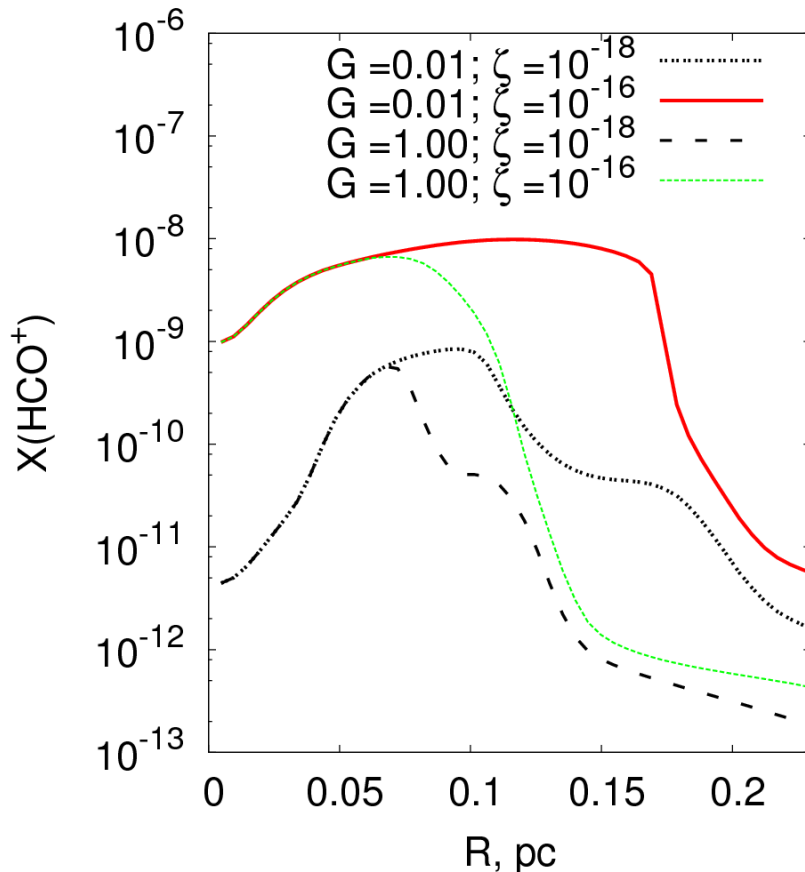


Параметры:

- Время эволюции t_0
- Показатель закона сжатия δ
- Угловая скорость Ω_0

2.2 Влияние неоднородной структуры облака на профили линий излучения молекул: химическая структура облака

Распределения содержания HCO^+ при различных значениях интенсивности УФ-излучения и космических лучей

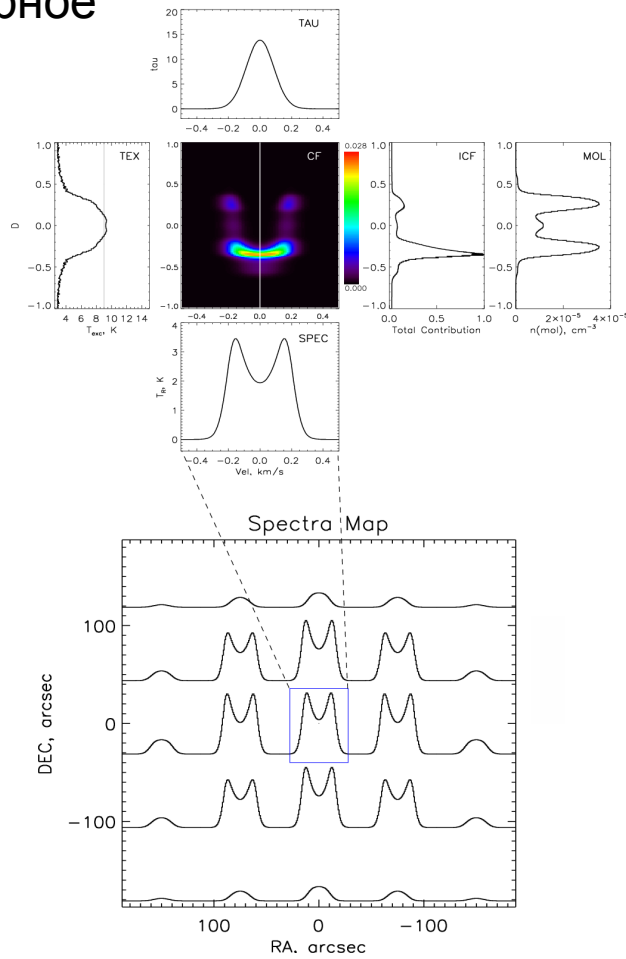


Исследованы факторы:

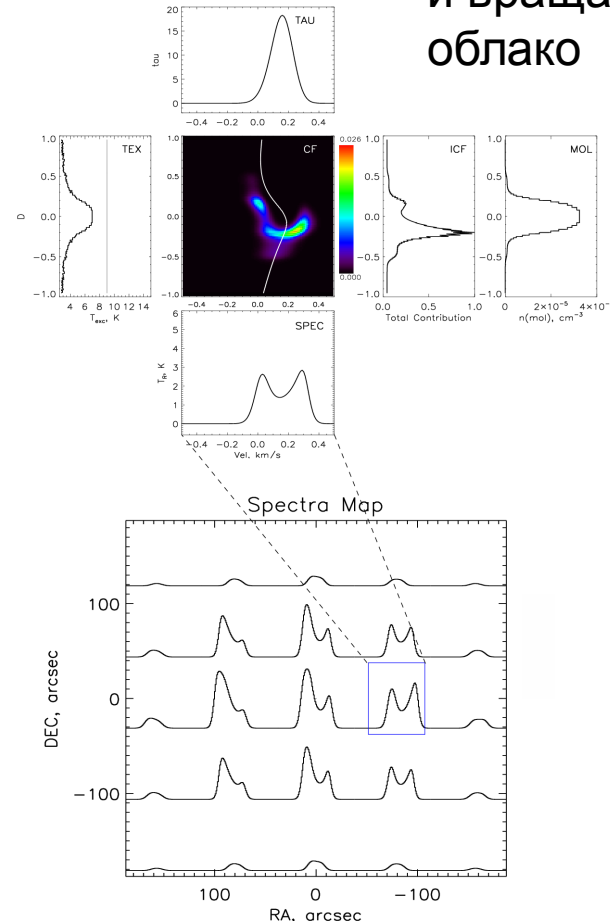
- Интенсивность фонового УФ излучения
- Интенсивность космических лучей
- Время эволюции, закон сжатия облака
- Коэффициент прилипания молекул к пылинкам

2.2 Влияние неоднородной структуры облака на профили линий излучения молекул: спектральные карты

Стационарное облако



Сжимающееся и вращающееся облако

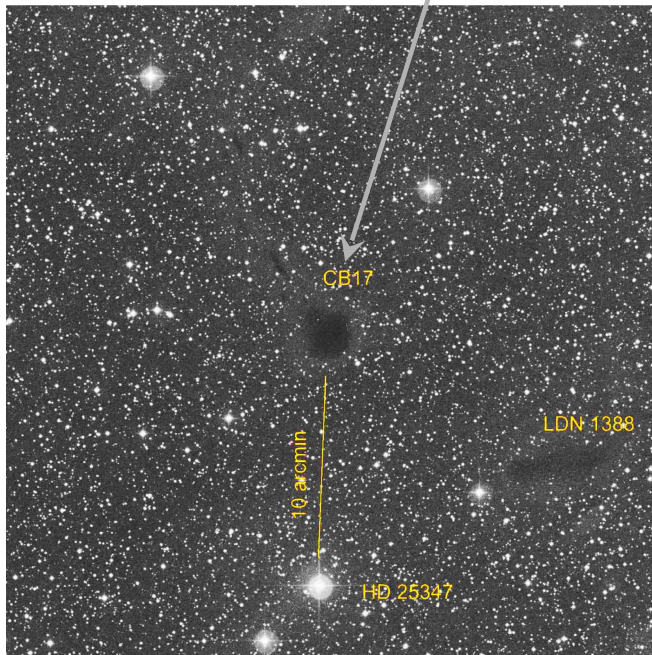


Симметрия индивидуальных профилей и карты в целом определяются кинематической структурой облака

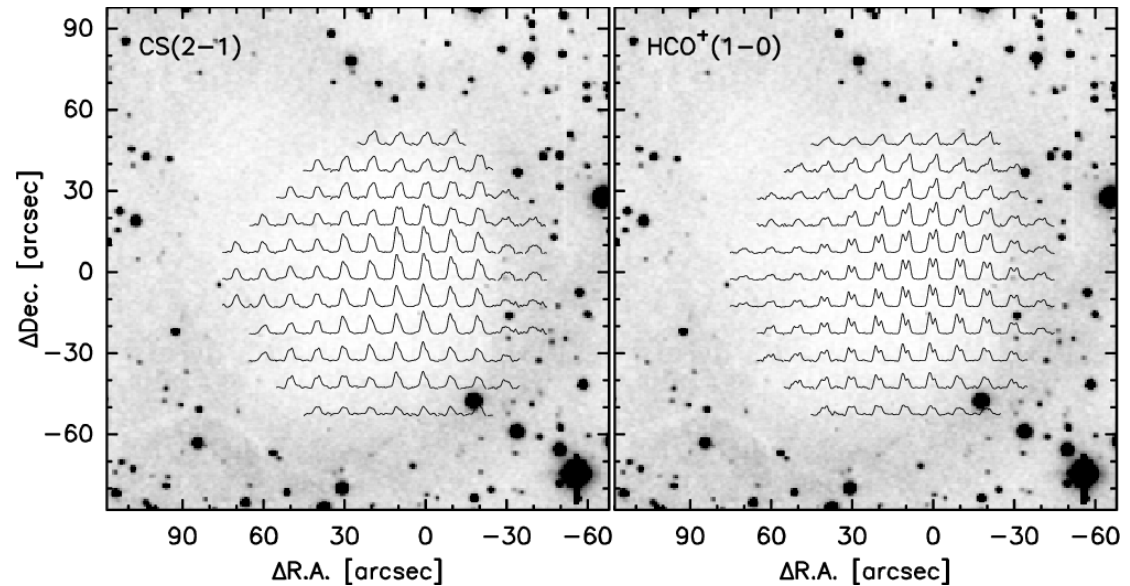
2.3 Химико-динамическая модель дозвездного ядра СВ 17

Глобула Бока СВ 17: изолированное маломассивное дозвездное ядро, для которого нами получены спектральные карты в линиях молекул и в излучении пыли.

СВ17 в видимом свете



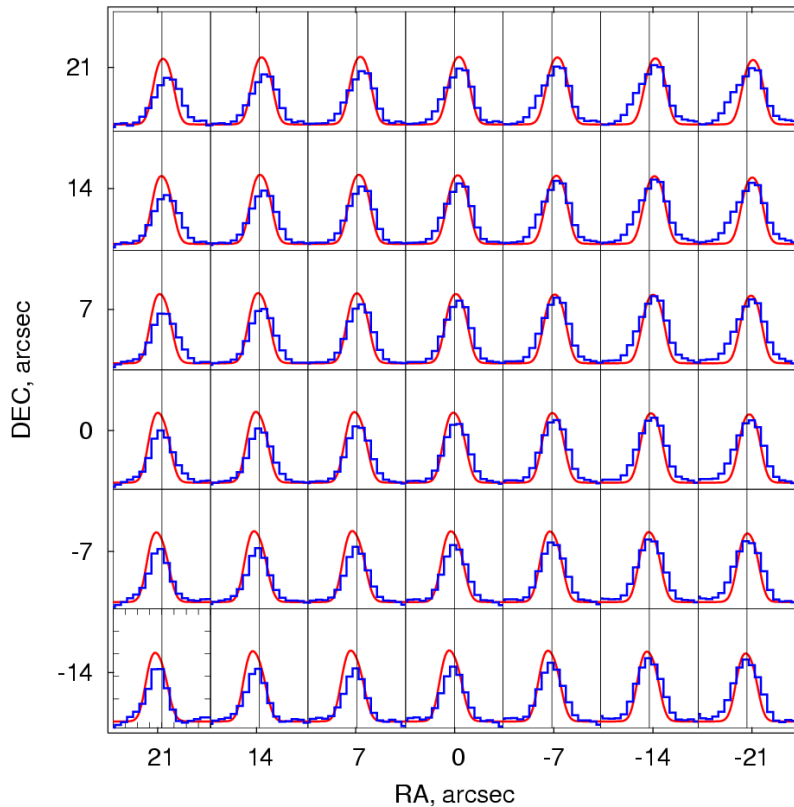
СВ17 в молекулярных линиях



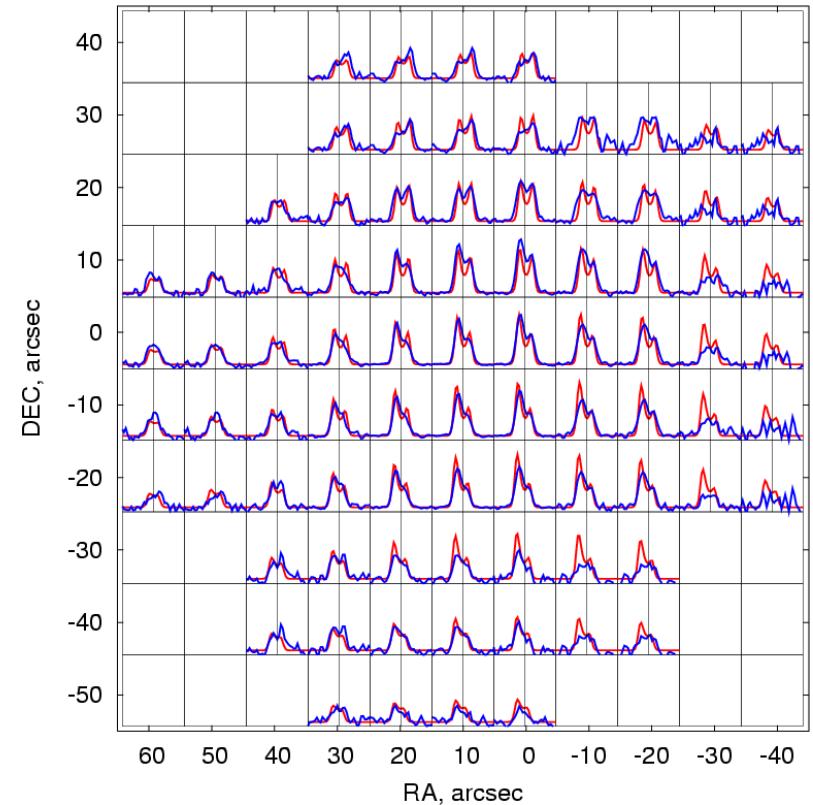
Спектральные карты СВ 17 в линиях CS(2-1) и HCO⁺(1-0), полученные телескопом IRAM 30м, из работы [Pavlyuchenkov et al., ApJ \(2006\)](#). Оттенками серого показана карта в видимом диапазоне.

2.3 Химико-динамическая модель дозвездного ядра СВ 17

Спектральные карты для наилучшей модели описывают основные особенности наблюдаемых карт как в оптически-тонких, как и оптически-толстых линиях.



Наблюдаемые и теоретические профили линий $C^{18}O(2-1)$.



Наблюдаемые и теоретические профили линий $CS(2-1)$.

2.3 Химико-динамическая модель дозвездного ядра CB 17: результаты для модели с наилучшим согласием

- Скорость сжатия: $V_r = 50$ м/с
Слишком мала для свободного коллапса
- Скорость вращения: $V_\varphi = 100$ м/с
Существенный вклад в кинематику облака
- Угловой момент: $J = 1.6 \times 10^{21}$ см²/с
Слишком велик для формирования одиночной звезды
- Интенсивность УФ фона: $0.1 G_0$
Критический параметр, влияющий на профили
- Возраст: 2 миллиона лет
Превышает время свободного падения

Pavlyuchenkov et al., ApJ (2006)

Результаты, выносимые на защиту по Главе 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.
- Методика восстановления параметров дозвездных ядер молекулярных облаков, основанная на синтезе феноменологической модели сжатия с расчетом химической эволюции и карт профилей линий излучения молекул.
- 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.

Глава 3.

Линии излучения молекул в протопланетных дисках

3.1 Влияние температурного градиента и химической стратификации на изображения протопланетных дисков

3.2 Спектральная диагностика биполярного истечения в протопланетном диске CV 26

3.1 Влияние температурного градиента и химической стратификации на спектральные карты протопланетных дисков

Метод расчета тепловой структуры протопланетного диска

$$J_{uv} = J_{uv}^0 \exp(-\tau_{uv}/\mu)$$

$$\frac{dF_{ir}}{d\Sigma} = c\kappa_P^{ir}(E_{ir} - aT^4)$$

$$F_{ir} = -\frac{c}{3\kappa_R^{ir}} \frac{dE_{ir}}{d\Sigma}$$

$$\frac{dF_{ir}}{d\Sigma} = 4\pi\kappa_P^{uv} J_{uv} + S_{hd}$$

$$\frac{dz}{d\Sigma} = \frac{1}{\rho}$$

$$R \frac{d(\rho T)}{\mu d\Sigma} = -\frac{GM}{R^3} z - 4\pi G\Sigma$$

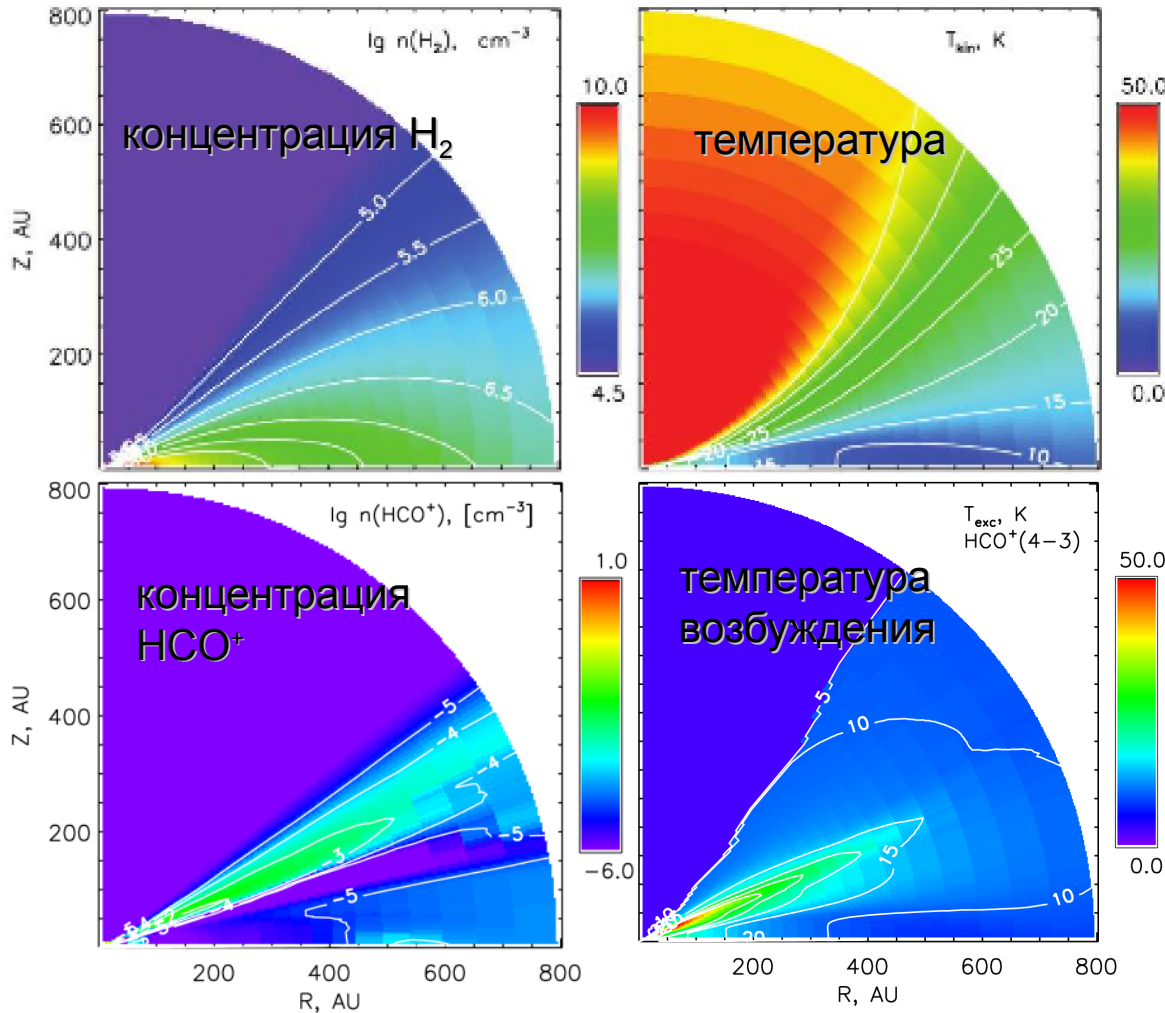
Аксиально-симметричный диск находится в гидростатическом и тепловом равновесии по вертикали, источником нагрева является излучение звезды, пыль и газ хорошо перемешаны, температура газ и пыли равны, распределение поверхностной плотности задано.

Расщепление системы уравнений на независимые подсистемы позволяет построить быстрый и эффективный метод решения.

Воробьев, Павлюченков, Тринкл, АЖ (2014)

3.1 Влияние температурного градиента и химической стратификации на спектральные карты протопланетных дисков

Модель протопланетного диска



Распределение плотности и температуры из модели D'Alessio et al., ApJ (1998)

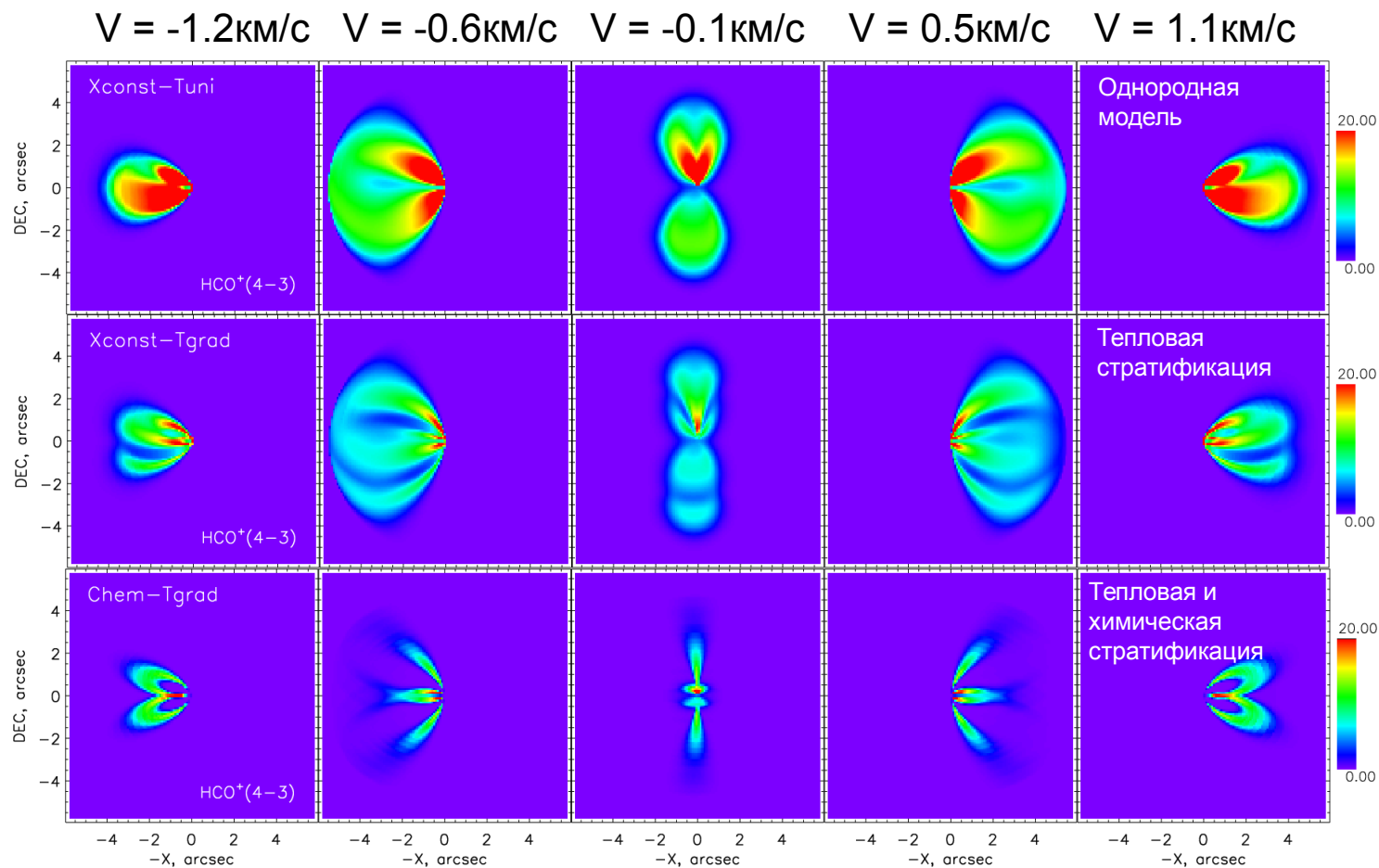
Химическая структура диска рассчитана с помощью модели Vasyunin et al., ApJ (2008)

Распределение температуры возбуждения получено с помощью URAN(IA)

Semenov, Pavlyuchenkov et al., ApJ (2009)

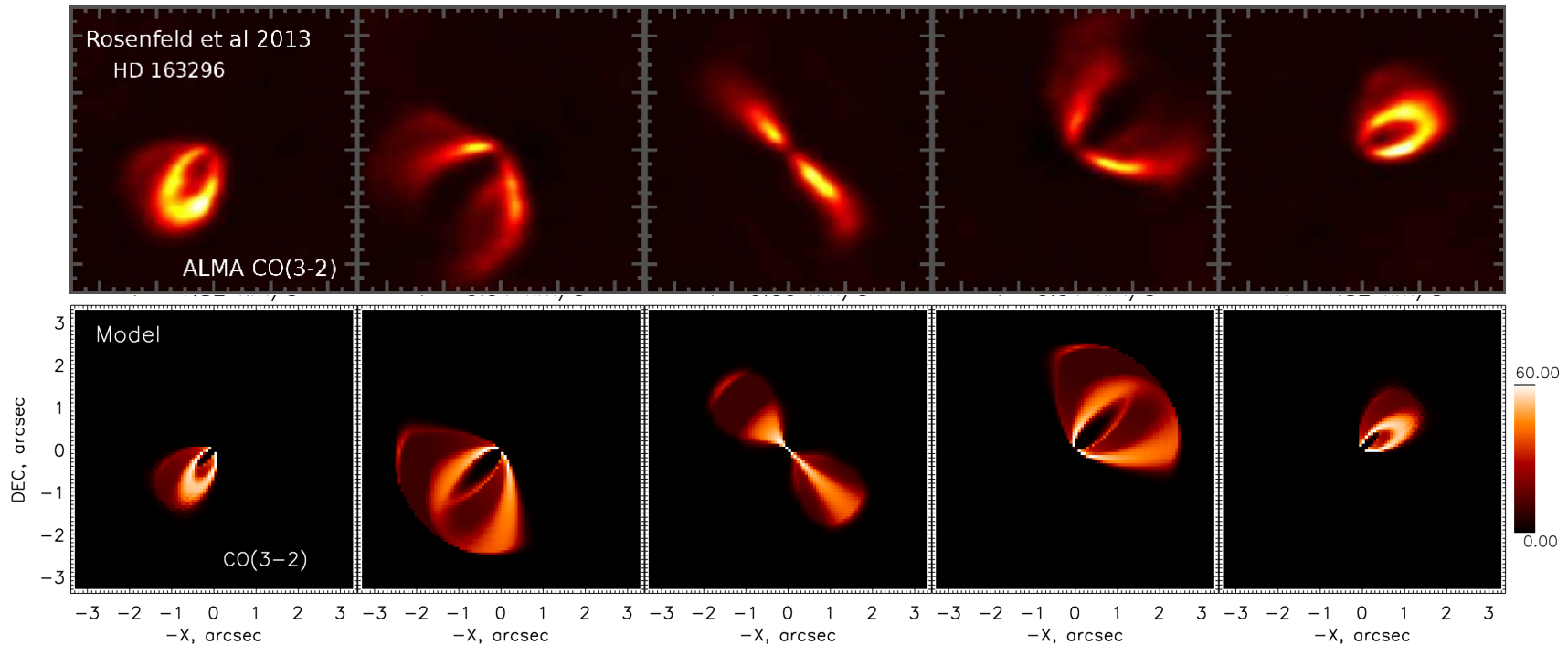
3.1 Влияние температурного градиента и химической стратификации на спектральные карты протопланетных дисков

Спектральные карты протопланетного диска сильно зависят от моделей тепловой и химической структуры.



3.1 Влияние температурного градиента и химической стратификации на спектральные карты протопланетных дисков

Предсказанные в 2008 году особенности спектральных карт обнаружены ALMA в 2013 году.

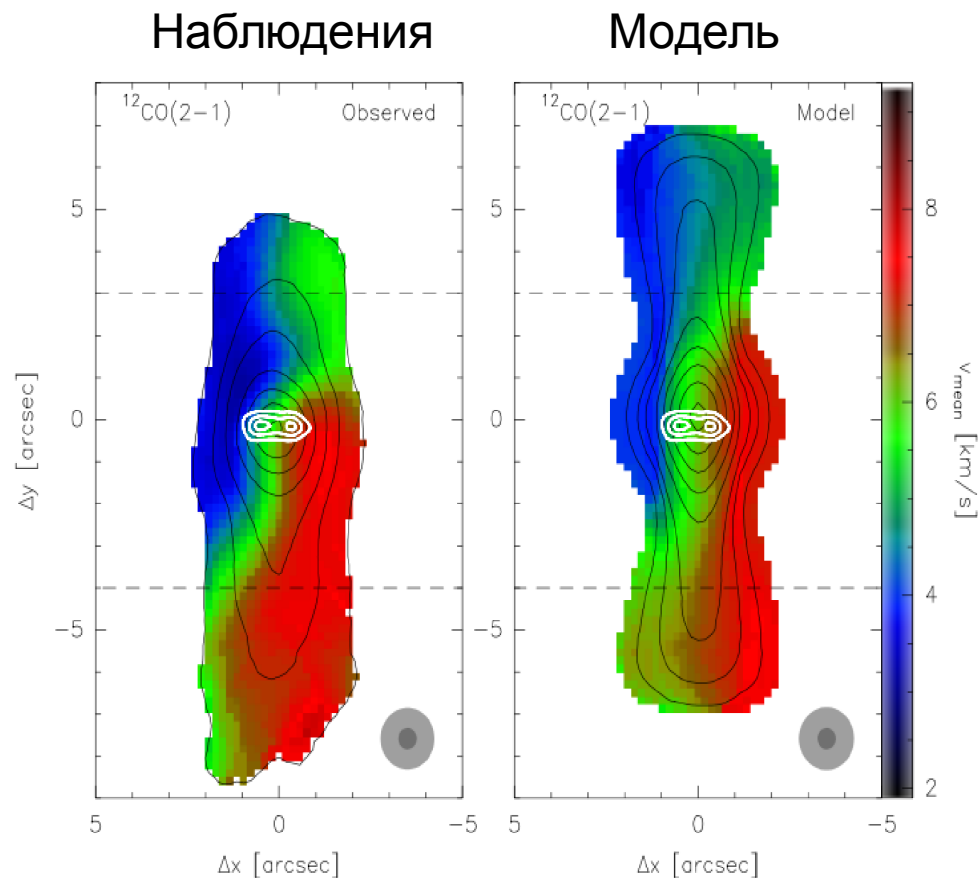
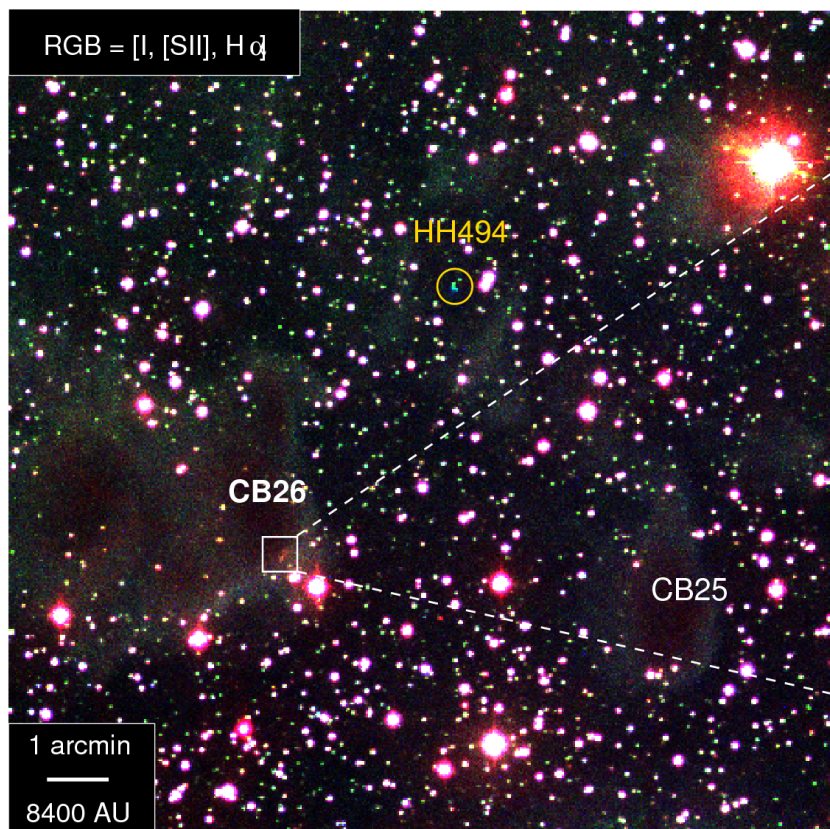


Сверху: протопланетный диск HD163296 в линии CO(3-2) по наблюдениям ALMA, Rosenfeld et al., A&A (2013).

Снизу: модельные карты для параметров, соответствующих HD163296, (расчеты по модели из статьи [Semenov, Pavlyuchenkov et al., ApJ \(2008\)](#)).

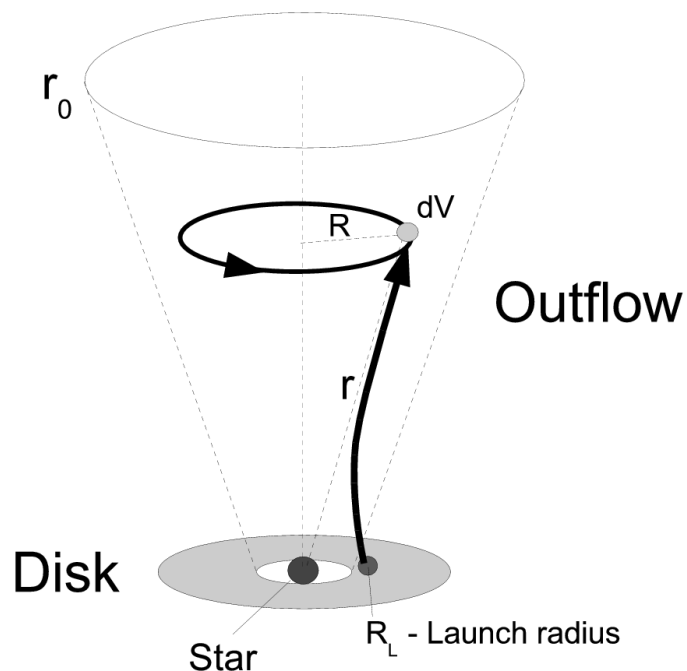
3.2 Спектральная диагностика биполярного истечения в протопланетном диске CB 26

Первое надежное отождествление вращения широких истечений из протопланетных дисков

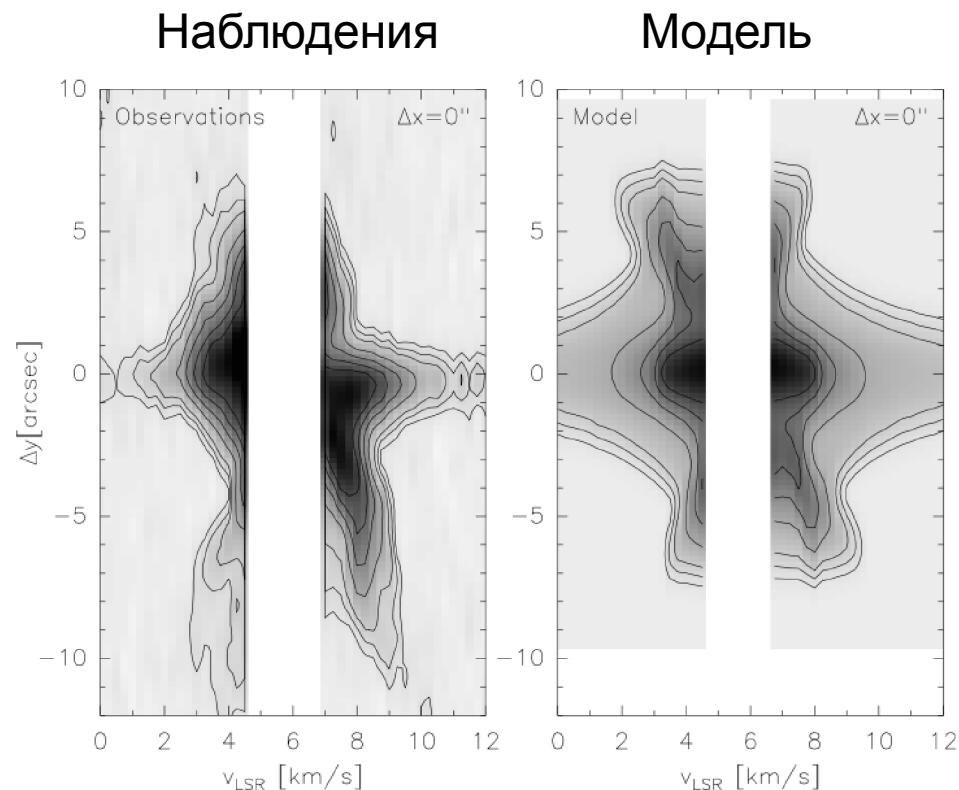


Launhardt, Pavlyuchenkov et al., A&A (2009).

3.2 Спектральная диагностика биполярного истечения в протопланетном диске CB 26



Схематическое представление истечения в CB 26



Диаграммы позиция-скорость вдоль проекции оси вращения для наблюдаемой и модельной карты CO(2-1). Модельная карта построена по результатам моделирования переноса излучения на базе феноменологической модели истечения.

Результаты, выносимые на защиту по Главе 3:

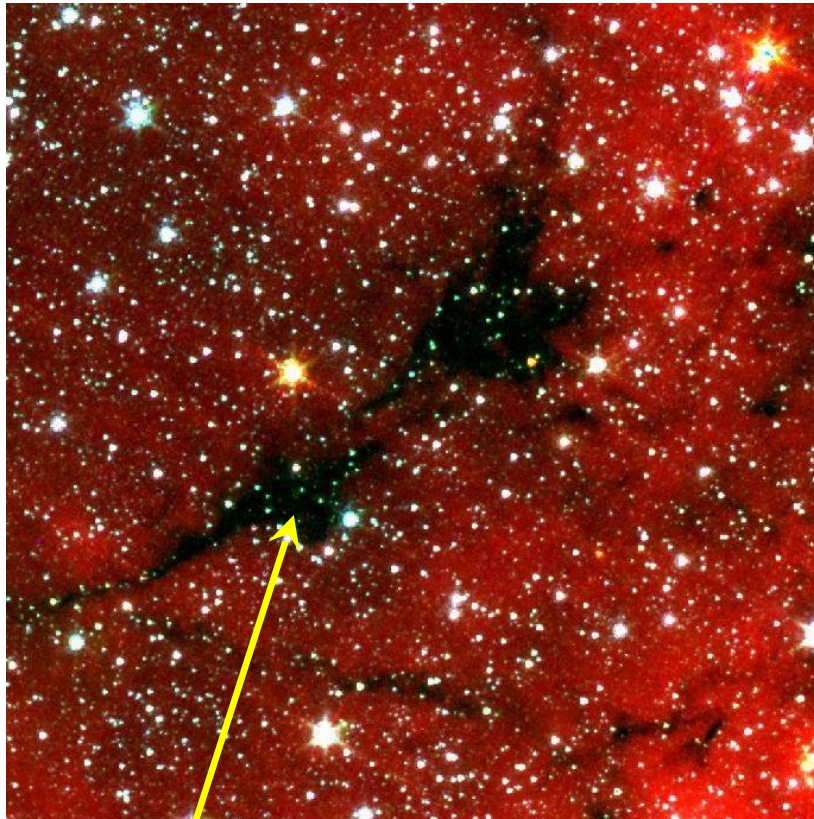
- Физически согласованная и одновременно быстрая модель для расчета структуры протопланетного диска, находящегося в гидростатическом и тепловом равновесии.
- Результаты исследования условий возбуждения молекулярных линий в протопланетных дисках и особенностей спектральных карт дисков, связанных с их сложной тепловой и химической структурой.
- Открытие вращающегося истечения из протопланетного диска CB26 с помощью анализа спектральных карт в линиях излучения молекул.

Глава 4.

Инфракрасное излучение дозвездных и протозвездных объектов

- 4.1 Методы моделирования теплового излучения пыли
- 4.2 Определение свойств массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения
- 4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

4.2 Определение свойств массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения



Изображение облака IRDC 321(P2) в ИК-диапазоне, полученное космическим телескопом SPITZER

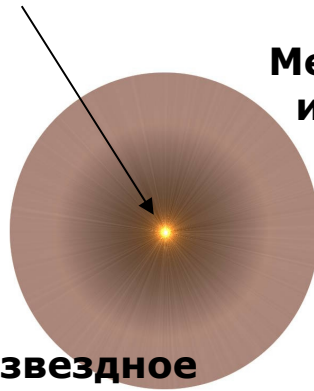
Infrared Dark Clouds (IRDC)

– кандидаты в массивные протозвездные ядра, прекурсоры массивных звезд.

Цель: определить распределения температуры и плотности в IRDC, используя наблюдаемые распределения интенсивности излучения одновременно в мм- и ИК-диапазонах

4.2 Определение свойств массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения

Гипотететическая протозвезда

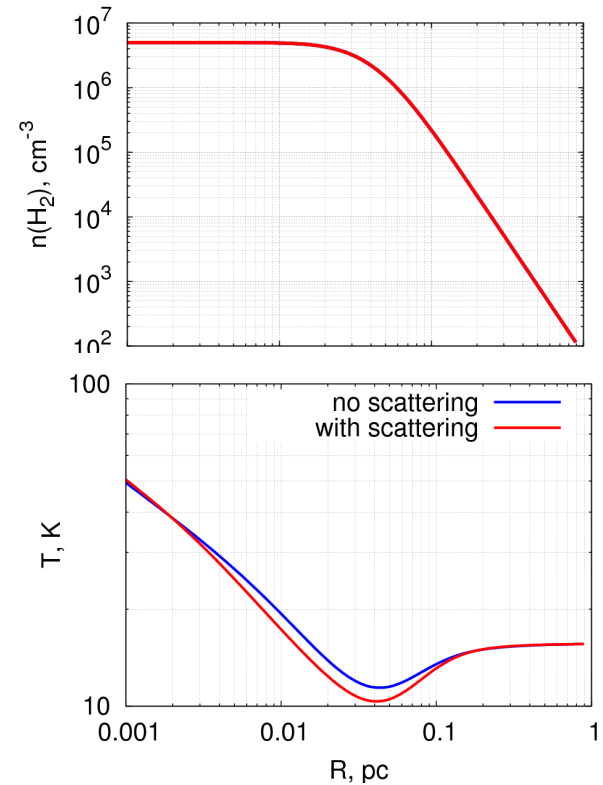


Межзвездное излучение

Протозвездное облако

Распределение температуры и профили интенсивности определяются результате моделирования переноса излучения для заданного распределения плотности облака и параметров звезды

Распределение плотности и температуры для репрезентативной модели



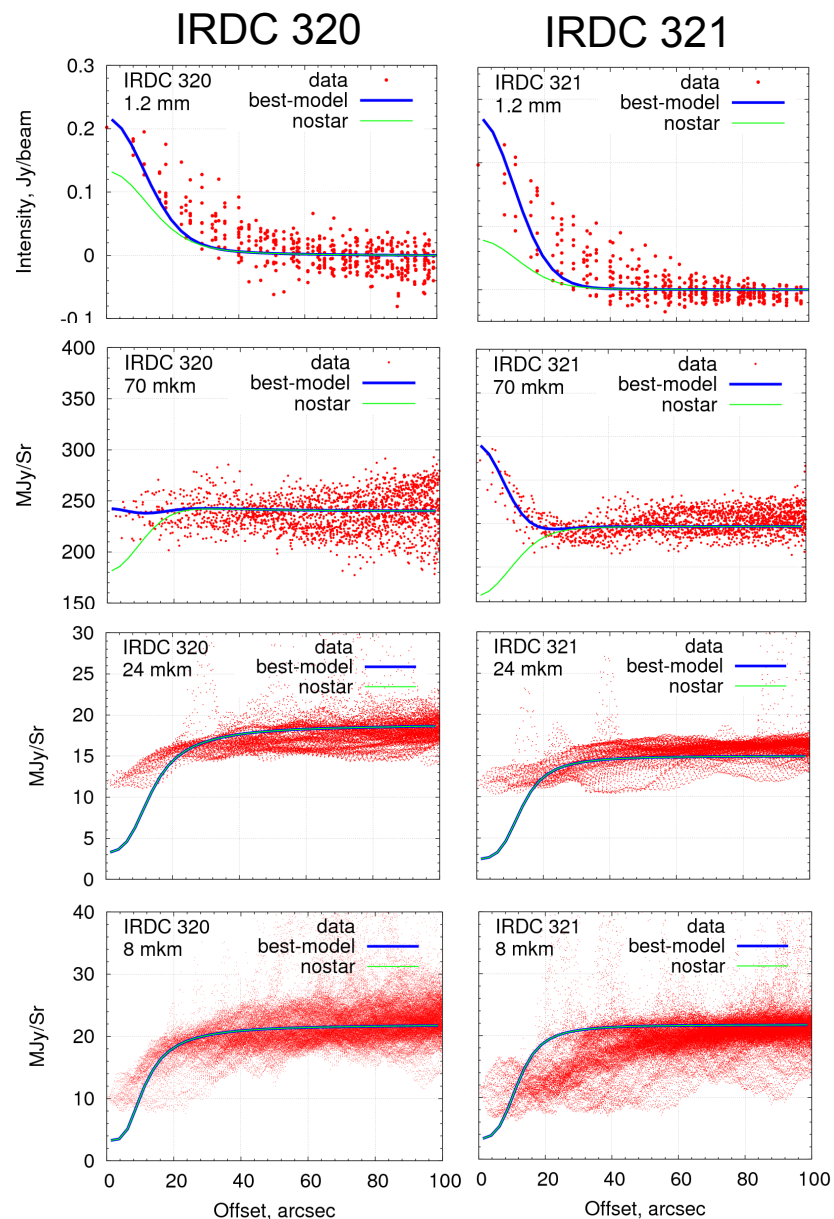
4.2 Определение свойств массивных протозвездных облаков при помощи моделирования переноса излучения

Теоретические и наблюдаемые распределения интенсивностей для IRDC 320 и IRDC 321

Свободные параметры модели найдены с помощью генетического алгоритма минимизации χ^2

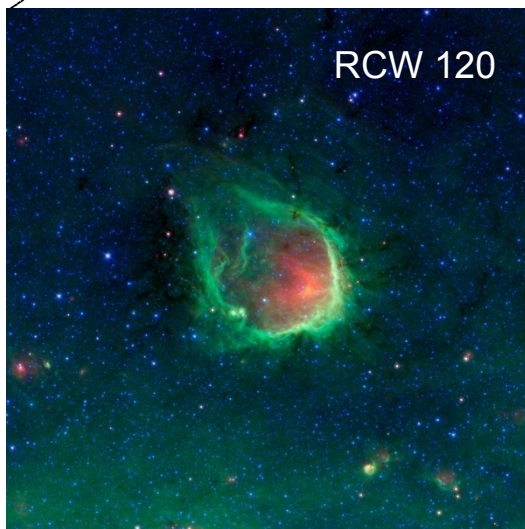
Определенные параметры модели свидетельствуют о наличии звезд внутри исследованных облаков

Параметр	IRDC 320	IRDC 321
Масса облака, M_{\odot}	170	230
Светимость звезды, L_{\odot}	60	160

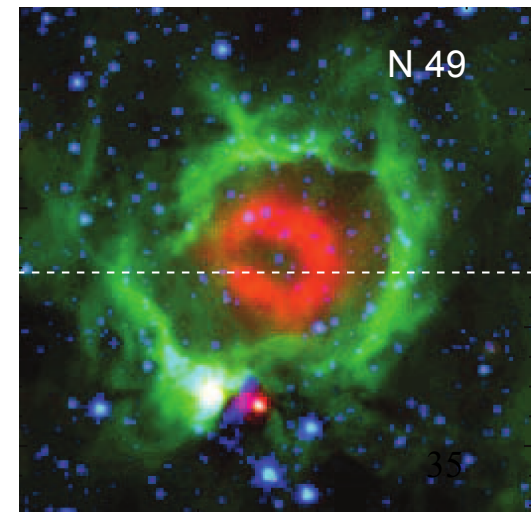


4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

По наблюдениям космических телескопов «Спитцер» и «Гершель» идентифицировано и занесено в каталог более 5000 инфракрасных пузырей, большая часть которых ассоциируется с областями HII возле молодых звезд.

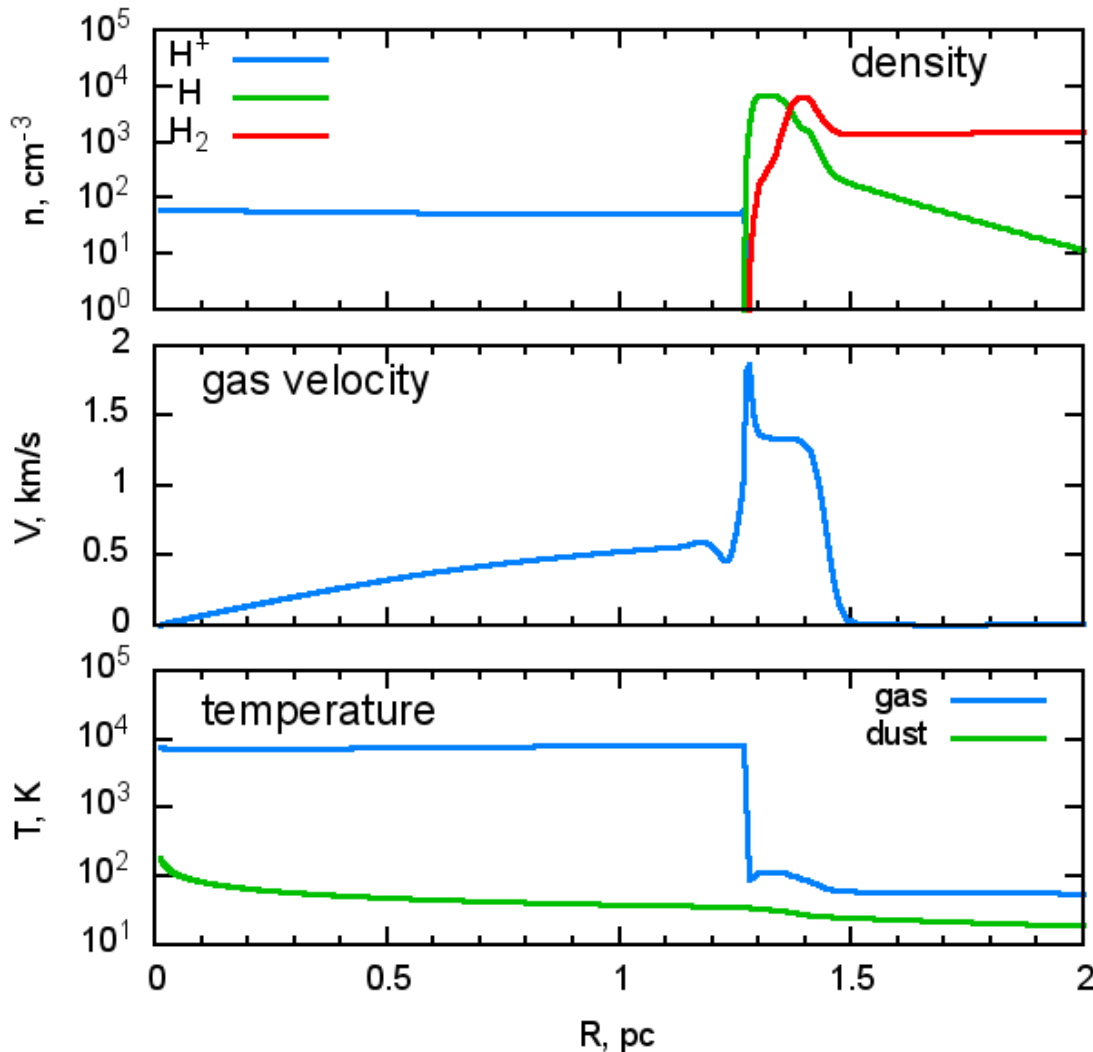


Для ИК пузырей наблюдается «необычная» морфология распределений излучения в ближнем, среднем и дальнем ИК диапазоне, в частности, «обратный порядок» колец на 8 и 24 микронах



4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

Результаты гидродинамического моделирования RCW 120



Численная модель MARION на базе программного комплекса ZEUS.
Кирсанова и др., АЖ (2009),
Павлюченков и др., АЖ (2013)

Учитываемые процессы:

- Гидродинамика
- Перенос УФ излучения
- Ионизация, диссоциация
- Нагрев и охлаждение
- Химические реакции

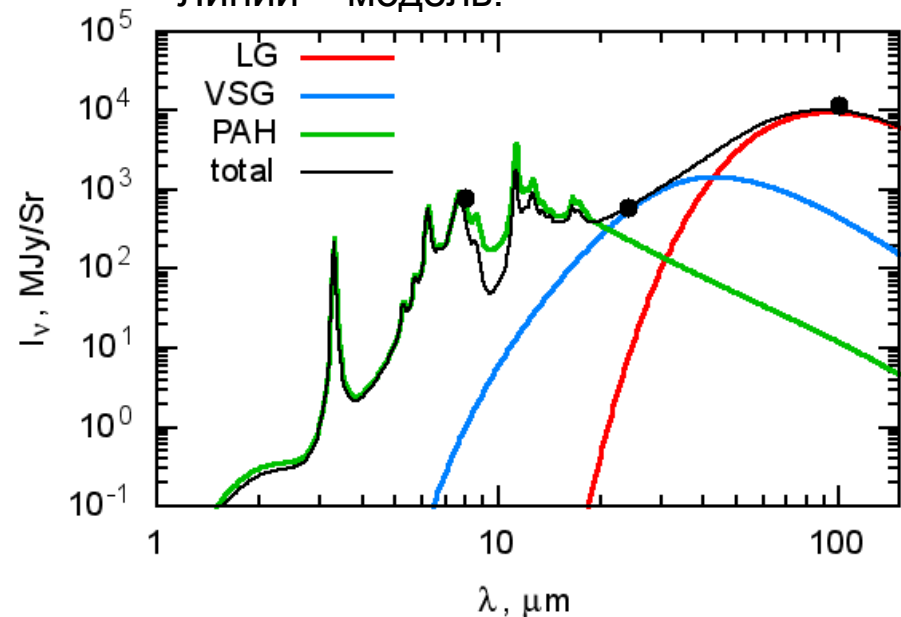
4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

А) Спектр ИК-излучения невозможно объяснить в рамках однокомпонентной модели пыли. Пыль многокомпонентна. Нужно учитывать, что пылинки разных размеров имеют различные температуры и излучают в различном режиме.

Параметры пылинок в трехкомпонентной модели пыли.

	Состав	Радиус, см	пыль/газ
БП (LG)	силикат	$1e-5$	$8e-3$
ОМП (VSG)	графит	$3e-7$	$2e-5$
ПАУ (PAH)	графит	$7e-8$	$3e-4$

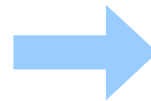
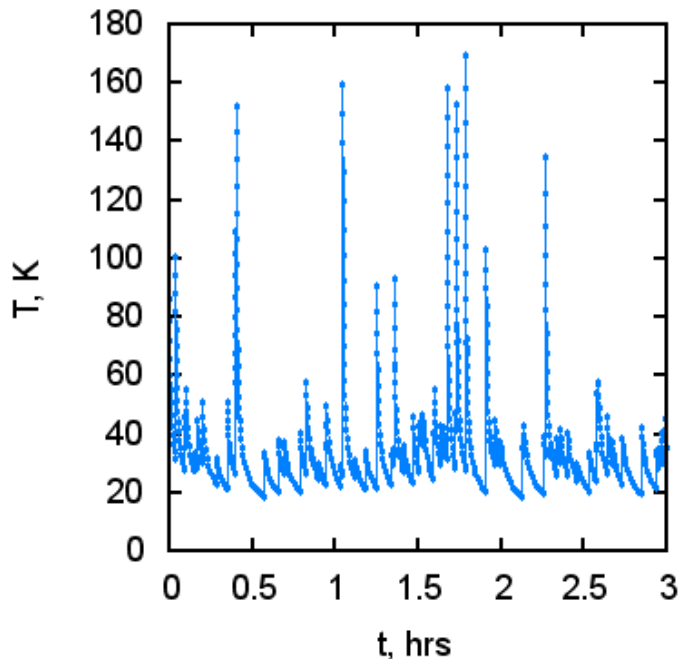
Спектр по направлению на центр облака. Точки – наблюдения. Линии – модель.



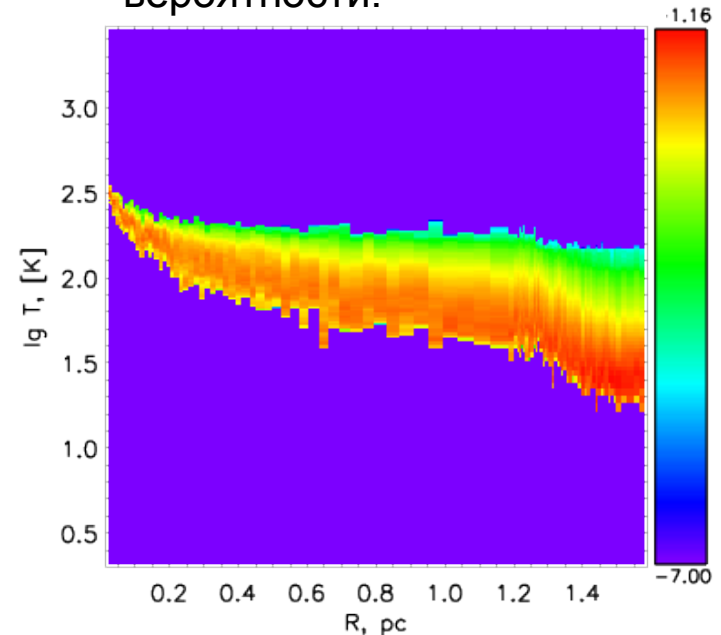
4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

Б) Температура мелких пылинок и частиц ПАУ флуктуирует и определяется корпускулярными свойствами излучения. Для расчета спектров необходим специальный подход.

Флуктуация температуры маленькой (0.01 мкм) пылинки в межзвездном поле излучения.



Распределение температурной плотности вероятности.



Для расчета использован численный код NATALY.
[Pavlyuchenkov et al., MNRAS \(2012\)](#)

4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

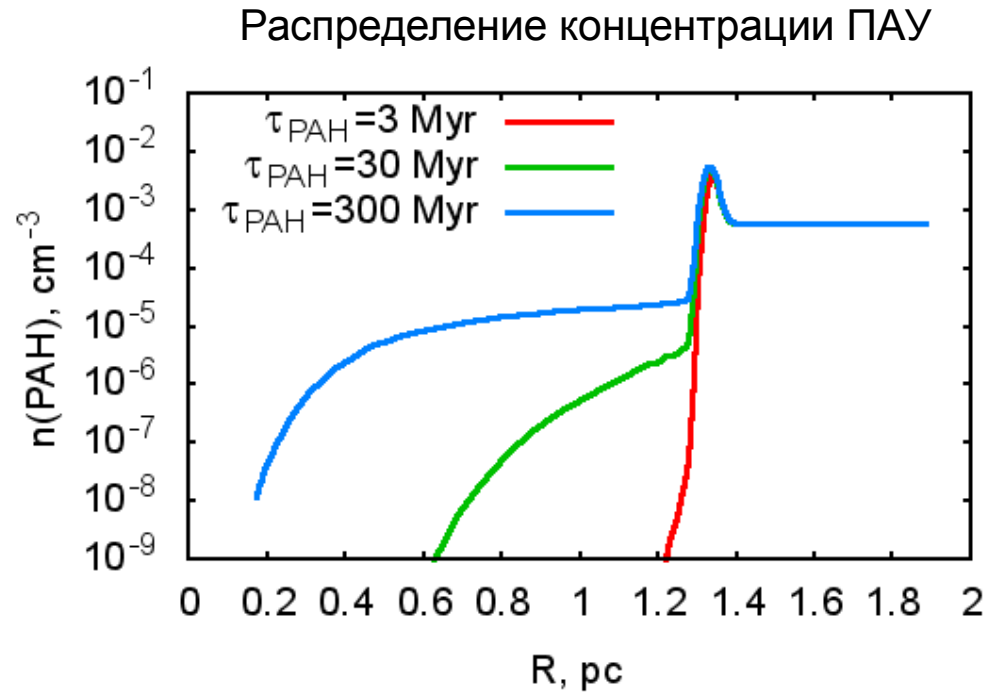
В) Феноменологическое описание фоторазрушения частиц ПАУ в области ионизированного водорода:

$$\frac{\partial x_{\text{PAH}}}{\partial t} = -G \frac{x_{\text{PAH}}}{\tau_{\text{PAH}}}$$

x_{PAH} – относительная концентрация ПАУ.

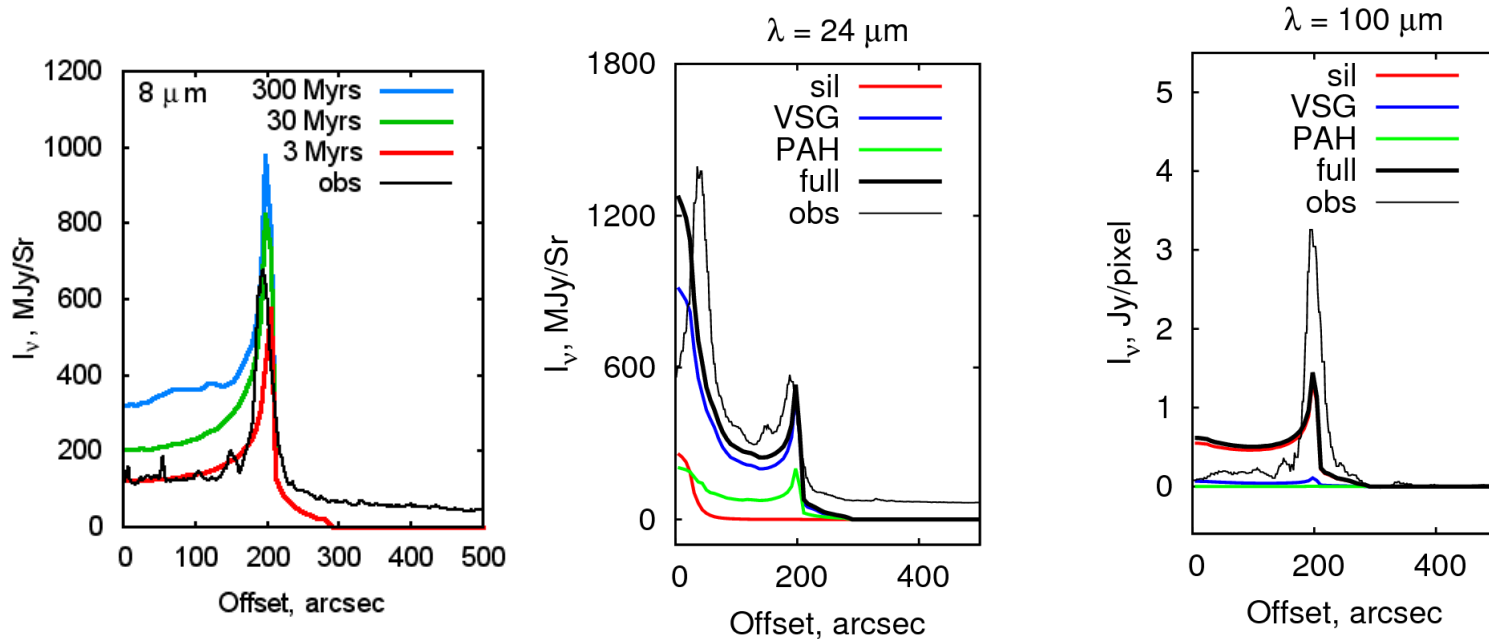
G – интенсивность поля излучения.

τ_{PAH} – время разрушения пылинки в стандартном поле излучения.



4.3 Моделирование распределений интенсивности ИК-излучения в областях ионизованного водорода вокруг молодых звезд

Теоретические и наблюдаемые распределения интенсивности ИК-излучения для RCW 120



Модельные профили воспроизводят основные особенности наблюдаемых распределений интенсивности.

Павлюченков и др., АЖ (2013)

Результаты, выносимые на защиту по Главе 4:

- Физически согласованный метод восстановления распределений плотности и температуры в наблюдаемых протозвездных облаках на основе моделирования распределений интенсивности и использования эвристического алгоритма оптимизации параметров.
- Объяснение и количественное воспроизведение наблюдательных распределений интенсивности ИК-излучения в областях HII вокруг молодых звезд на примере объекта RCW 120 в рамках самосогласованного химико-динамического моделирования областей HII с детальным расчетом переноса излучения.

Глава 5.

Тепловая структура эволюционирующего протозвездного облака

5.1 Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры протозвездного облака

5.2 Тепловая эволюция сферически-симметричного облака

5.3 Эволюция протозвездного облака в аксиально-симметричном приближении

5.1 Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры протозвездного облака

Моделирование тепловой эволюции протозвездных облаков в общем случае требует построения нестационарной тепловой модели.

Нестационарная тепловая модель должна быть согласована с общей (гидро)динамической моделью, что накладывает дополнительные ограничения на скорость метода расчета.

Нестационарная тепловая модель должна быть достаточно точной для возможности непосредственного сопоставления результатов моделирования с наблюдательными картами.

5.1 Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры протозвездного облака

Описание физической модели

$$c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -\Lambda_0 \sqrt{T_g} (T_g - T_d) + \Gamma_g - \Lambda_g$$

$$c_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \Lambda_0 \sqrt{T_g} (T_g - T_d) - \sigma_P (aT_d^4 - E_r) + S_{uv}$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial t} - \nabla \left(\frac{1}{\sigma_R} \nabla E_r \right) = \sigma_P (aT_d^4 - E_r)$$

T_d – температура пыли.

T_g – температура газа.

E_r – энергия ИК излучения.

S_{uv} – нагрев УФ излучением.

Павлюченков и Жилкин, АЖ (2013)

Ключевые особенности:

1. Многокомпонентность: УФ излучение, ИК излучение, пыль и газ.
2. Основные процессы нагрева и охлаждения пыли и газа: космические лучи, фотоэффект, охлаждение в линиях молекул, обмен энергии м/у пылью и газом, перенос ИК и УФ излучения.
3. Неявная устойчивая схема, быстрый итерационный метод решения системы уравнений.

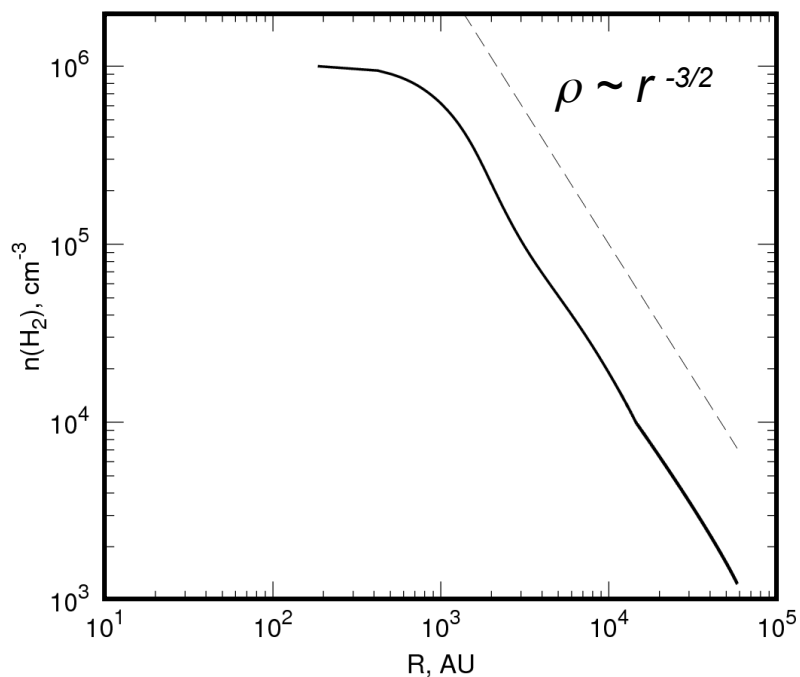
5.1 Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры протозвездного облака

Облако в гидростатическом и тепловом равновесии

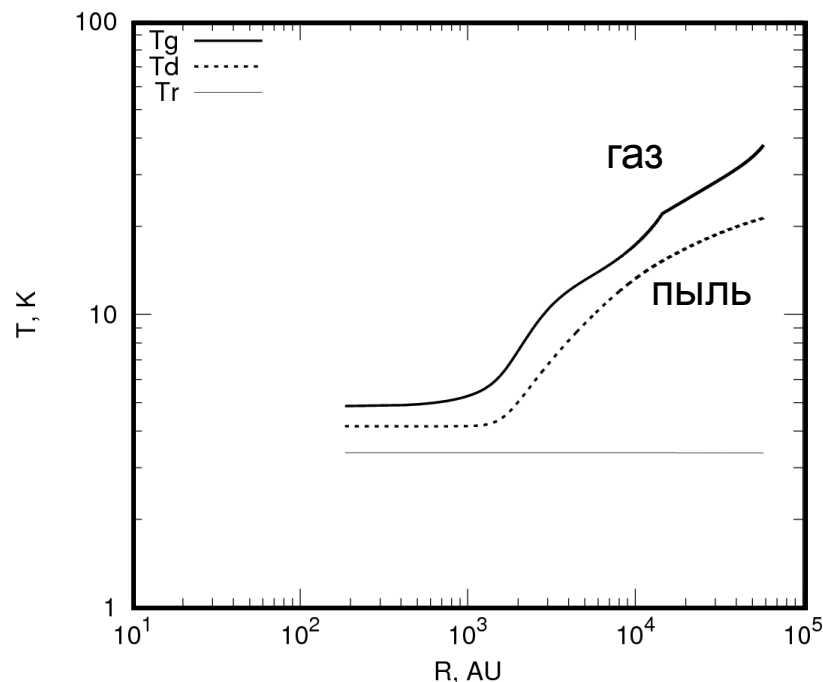
Параметры:

- центральная плотность, $n=10^6 \text{ см}^{-3}$.
- радиус, $R=0.3 \text{ пк}$.
- интенсивность фонового излучения, $G=1G_0$.

Распределение плотности



Распределение температуры

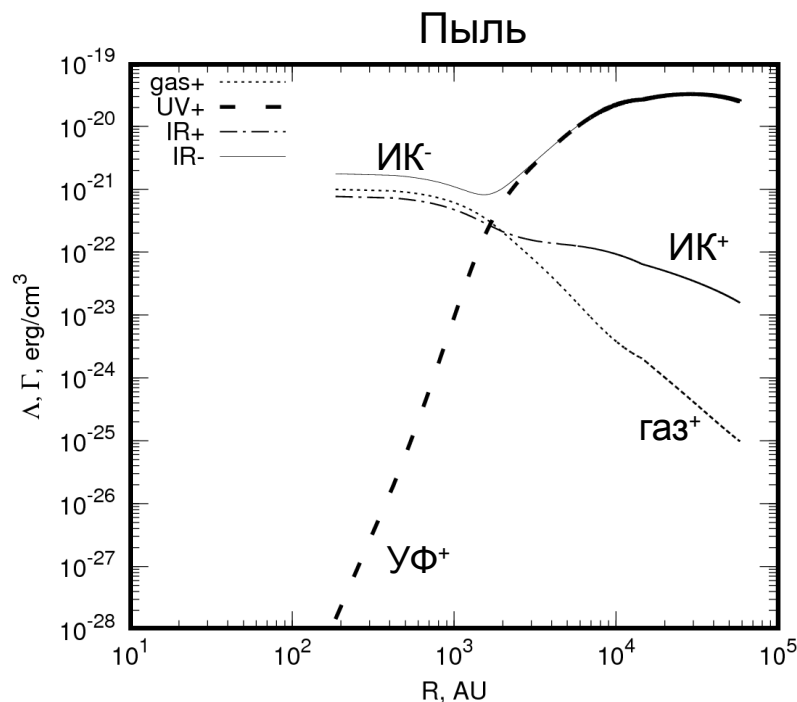
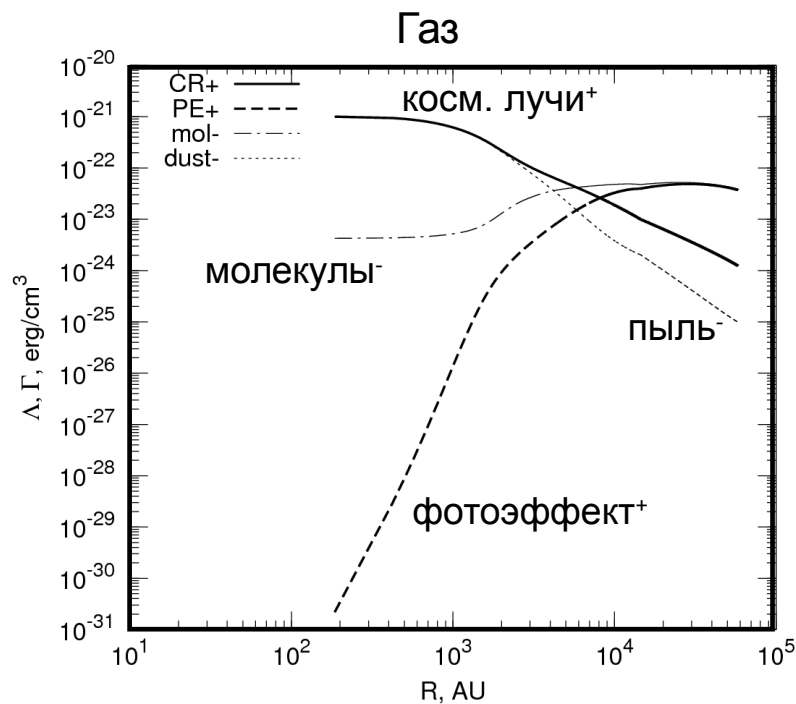


Температуры пыли и газа отличаются и неоднородны во всем облаке.

5.1 Многокомпонентная модель для расчета тепловой структуры протозвездного облака

Облако в гидростатическом и тепловом равновесии

Распределение функций нагрева и охлаждения:

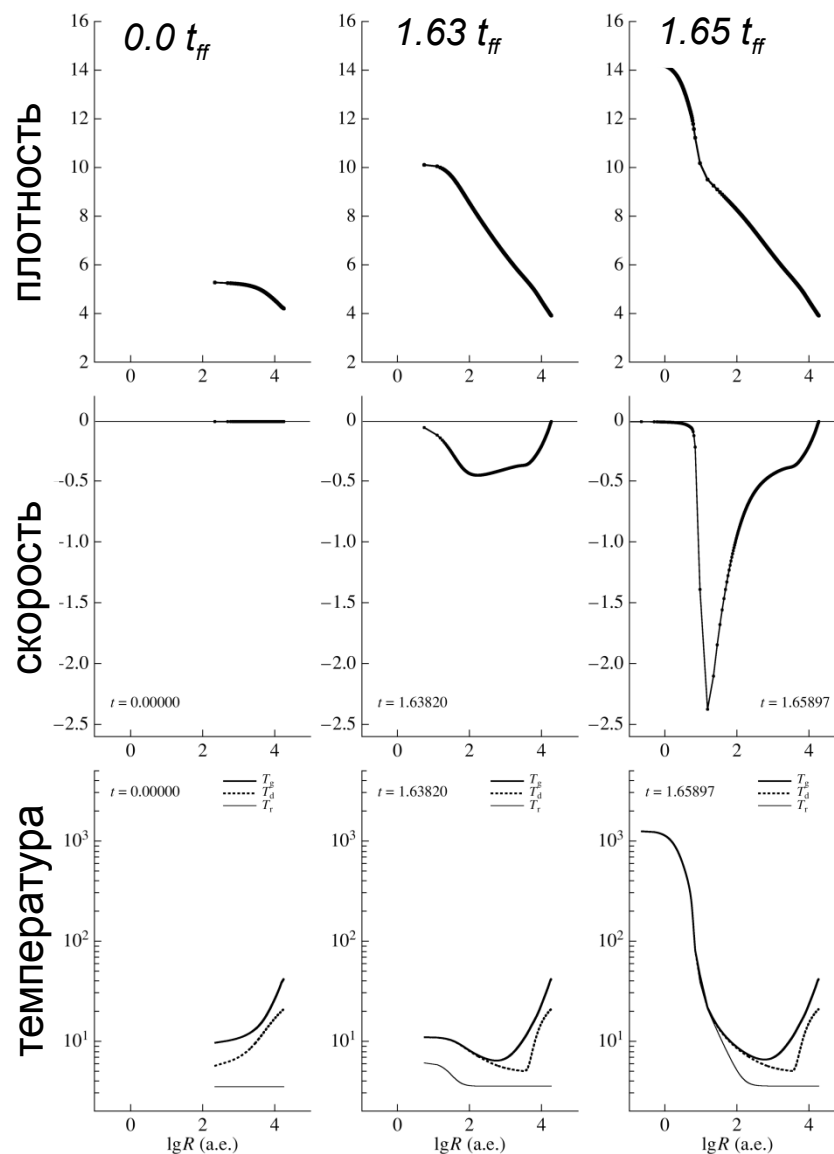


Взаимоотношение процессов нагрева и охлаждения в оболочке и во внутренних областях облака существенно различны.

5.2 Тепловая эволюция сферически-симметричного облака

Результаты расчетов сжатия протозвездного облака из состояния, близкого к равновесию:

- Параметры первого гидростатического ядра находятся в хорошем согласии с результатами других авторов.
- Температуры газа и пыли большей части облака существенно отличаются вплоть до формирования первого гидростатического ядра.



Павлюченков и Жилкин, АЖ (2013),
Павлюченков и др., АЖ(2015)

Результаты, выносимые на защиту по Главе 5:

- 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.

Публикации в журналах ВАК по теме диссертации:

Всего: 29

в том числе:

Астрономический Журнал: 11

ApJ + A&A + MNRAS: 15

ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА ПРОТОЗВЕЗДНОЙ ОБОЛОЧКИ, Павлюченков Я.Н., Жилкин А.Г., Воробьев Э.И., Фатеева А.М., АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2015, том 92, №2, с. 1-13

ВЛИЯНИЕ ВСПЫШЕК СВЕТИМОСТИ НА СВОЙСТВА ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ,
Воробьев Э.И., Павлюченков Я.Н., Тринкл П., Астрономический журнал. 2014. Т. 91. № 8. С. 610.

МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОЙ СТРУКТУРЫ КОЛЛАПСИРУЮЩЕГО
ПРОТОЗВЕЗДНОГО ОБЛАКА, Павлюченков Я.Н., Жилкин А.Г., Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 9. С. 699.

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ПЫЛИ В ЗОНАХ HII, Павлюченков Я.Н., Кирсанова М.С., Вибе Д.З.,
Астрономический журнал. 2013. Т. 90. № 8. С. 625.

Gas-phase CO depletion and N₂H⁺ abundances in starless cores, 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., Astronomy & Astrophysics, 2013, Volume 560, id.A41, 24 pp.

Polycyclic aromatic hydrocarbons in spatially resolved extragalactic star-forming complexes, Khramtsova, M. S.; Wiebe, D. S.; Boley, P. A.; Pavlyuchenkov, Ya. N., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, Volume 431, Issue 2, p.2006-2016

Protoplanetary Disk Structure with Grain Evolution: The ANDES Model, Akimkin, V.; Zhukovska, S.; Wiebe, D.; Semenov, D.; Pavlyuchenkov, Ya.; Vasyunin, A.; Birnstiel, T.; Henning, Th., The Astrophysical Journal, 2013, Volume 766, Issue 1, article id. 8, 24 pp.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОПЛАНЕТНОГО ДИСКА СВ 26 ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ КАРТАМ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ, Акимкин В.В., Павлюченков Я.Н., Лаунхардт Р., Бурке Т., Астрономический журнал. 2012. Т. 89. № 12. С. 1008.

Stochastic grain heating and mid-infrared emission in protostellar cores, Pavlyuchenkov, Ya. N.; Wiebe, D. S.; Akimkin, V. V.; Khramtsova, M. S.; Henning, Th., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, Volume 421, Issue 3, pp. 2430-2441.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАССИВНЫХ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ, Павлюченков Я.Н., Вибе Д.З., Фатеева А.М., Васюнина Т.С., Астрономический журнал. 2011. Т. 88. № 1. С. 3-15.

Radiative Transfer Simulations of Infrared Dark Clouds, Pavlyuchenkov, Ya.; Wiebe, D.; Fateeva, A.; Vasyunina, T., Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, 2011, Volume 270, p. 455-458

UV-controlled physical and chemical structure of protoplanetary disks, Akimkin, V. V.; Pavlyuchenkov, Y. N.; Vasyunin, A. I.; Wiebe, D. S.; Kirsanova, M. S.; Henning, T., Astrophysics and Space Science, 2011, Vol. 335, No. 1, p. 33-38

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ И ИХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ, Жилкин А.Г., Павлюченков Я.Н., Замоздра С.Н., Астрономический журнал. 2009. Т. 86. № 7. С. 638-653.

Star-Forming Cores Embedded in a Massive Cold Clump: Fragmentation, Collapse, and Energetic Outflows, Hennemann, M.; Birkmann, S. M.; Krause, O.; Lemke, D.; Pavlyuchenkov, Ya.; More, S.; Henning, Th., The Astrophysical Journal, 2009, Volume 693, Issue 2, pp. 1379-1391

ROTATING MOLECULAR OUTFLOWS: THE YOUNG T TAURI STAR IN CB 26, Launhardt R., Pavlyuchenkov Ya., Chen X., Henning Th., Semenov D., Gueth F., Piétu V., Dutrey A., Guilloteau S., Schreyer K., Astronomy and Astrophysics. 2009. Т. 494. № 1. С. 147-156.

ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАБЛЮДЕНИЙ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ, Вибе Д.З., Кирсанова М.С., Шустов Б.М., Павлюченков Я.Н., *Астрономический журнал*. 2008. Т. 85. № 12. С. 1086-1095.

MOLECULAR EMISSION LINE FORMATION IN PRESTELLAR CORES, Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Launhardt R., Semenov D., Wiebe D., Shustov B., *The Astrophysical Journal*, 2008, Т. 689. № 1. С. 335-350.

CHEMICAL AND THERMAL STRUCTURE OF PROTOPLANETARY DISKS AS OBSERVED WITH ALMA, Semenov D., Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Wolf S., Launhardt R., *The Astrophysical Journal*, 2008, Т. 673. № 2 PART 2.

Cavities in inner disks: the GM Aurigae case, Dutrey, A.; Guilloteau, S.; Piétu, V.; Chapillon, E.; Gueth, F.; Henning, T.; Launhardt, R.; Pavlyuchenkov, Y.; Schreyer, K.; Semenov, D., *Astronomy and Astrophysics*, 2008, Volume 490, Issue 2, pp.L15-L18

A search for mid-infrared molecular hydrogen emission from protoplanetary disks, 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., *Astronomy and Astrophysics*, 2008, Volume 477, Issue 3, pp.839-852

DO WE NEED TO KNOW THE TEMPERATURE IN PRESTELLAR CORES?, Pavlyuchenkov Ya., Henning Th., Wiebe D., *The Astrophysical Journal*. 2007. Т. 669. № 2 PART 2.

DUST CRYSTALLINITY IN PROTOPLANETARY DISKS: THE EFFECT OF DIFFUSION/VISCOSITY RATIO, Pavlyuchenkov Ya., Dullemond C.P., *Astronomy and Astrophysics*. 2007. Т. 471. № 3. С. 833-840.

MOLECULAR LINE RADIATIVE TRANSFER IN PROTOPLANETARY DISKS: MONTE CARLO SIMULATIONS VERSUS APPROXIMATE METHODS, Pavlyuchenkov Ya., Semenov D., Henning Th., Launhardt R., Guilloteau St., Dutrey A., Piétu V., *The Astrophysical Journal*, 2007, Т. 669. № 2. С. 1262-1278.

CB 17: INFERRING THE DYNAMICAL HISTORY OF A PRESTELLAR CORE WITH CHEMODYNAMICAL MODELS, Pavlyuchenkov Ya., Launhardt R., Henning Th., Wiebe D., *The Astrophysical Journal*, 2006, Т. 645. № 2 I. С. 1212-1226.

Millimeter Observations and Modeling of the AB Aurigae System, Semenov, D.; Pavlyuchenkov, Ya.; Schreyer, K.; Henning, Th.; Dullemond, C.; Bacmann, A., The Astrophysical Journal, 2005, Volume 621, Issue 2, pp. 853-874.

МОДЕЛИ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ДИФФУЗИОННЫХ ДЕКРЕЦИОННО-АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ, Тутуков А.В., Павлюченков Я.Н., *Астрономический журнал*. 2004. Т. 81. № 10. С. 881-894.

МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИЯХ МОЛЕКУЛ В ПРИЛОЖЕНИИ К ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДОЗВЕЗДНОГО ЯДРА L1544, Павлюченков Я.Н., Шустов Б.М., *Астрономический журнал*. 2004. Т. 81. № 4. С. 348.

On the Feasibility of Chemical Modeling of a Proplanetary Disk, Semenov, D.; Pavlyuchenkov, Ya.; Henning, Th.; Herbst, E.; van Dishoeck, E., *Baltic Astronomy*, 2004, Vol. 13, No. 3 p. 454-458

ХИМИКО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОЗВЕЗДНОГО ЯДРА L1544: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ И НАБЛЮДАЕМЫХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ C₁₈O, NCO⁺ И CS, Павлюченков Я.Н., Шустов Б.М., Шематович В.И., Вибе Д.З., Ли Ж.Ю., *Астрономический журнал*. 2003. Т. 80. № 3. С. 202-211.

Основные результаты представлены:

На астрофизических семинарах:

- Института астрономии РАН, Москва, Россия
- Института астрономии общества им. Макса Планка, Гейдельберг, Германия
- Института теоретической астрофизики при Университете г. Гейдельберг, Германия
- Института теоретической физики и астрофизики при Университете г. Киль, Германия
- Лейденской обсерватории, Лейден, Голландия
- Института астрономии им. Коперника, Торунь, Польша

Основные результаты представлены:

на российских и международных конференциях:

- “OSSF 2014: The Olympian Symposium on Star Formation”, Греция, 26-30 мая 2014
- “Protostar and Planets VI”, Гейдельберг, Германия, 15-20 июля 2013
- Семинар памяти Ю.И. Глушкова, ГАИШ, Москва, 16 сентября 2013
- “IAUS 270: International Astronomical Union Symposium "Computational Star Formation", 31 мая - 4 июня 2010, Барселона, Испания
- Nagoya University International Workshop "Multi-Phase Interstellar Medium and Dynamics of Star Formation", 28 февраля - 2 марта 2010, Нагойя, Япония
- “EPOS: Early Stages of Star Formation 2010”, Тегернзее, 14-18 июня 2010, Германия
- 39-ая студенческая конференция "Физика Космоса", Уральский Государственный Университет, Коуровка, Россия, 1-5 февраля 2010
- “Галактические и аккреционные диски”, Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 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 & Laboratory”, Париж, Франция, 14-18 мая 2007
- “Звездообразование в Галактике и за ее пределами”, Москва, 17-18 апреля 2006

Результаты, 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 CB17. 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.

Результаты, выносимые на защиту:

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 CB 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 HII вокруг молодых звезд на примере объекта RCW 120 в рамках самосогласованного химико-динамического моделирования областей HII 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.

Ответы на замечания и вопросы оппонентов и ведущей организации

Ведущая организация:

Вопрос 1. Диссертант основное внимание уделяет подробному решению задач оптики, но привлекая кинематику или гидростатику, в гораздо меньшей степени следит за самосогласованностью используемых динамических моделей. Например, в модели протопланетного диска, предполагаемого находящимся в гидростатическом равновесии в вертикальном направлении и физические свойства которого описаны в п.3.1.1, задается распределение с радиусом поверхностной плотности $\Sigma(R) = \Sigma_0(R/R_{in})^{-3/2}$ (стр.105), откуда из закона сохранения потока массы в условиях стационарного диска должно вытекать $u_r = \dot{M} (R/R_{in})^{1/2} / (\Sigma_0 R_{in})$, где u_r – радиальная скорость аккрецирующего вещества, т.е. u_r растет с удалением от центра как $u_r \sim R^{1/2}$. Для принятых в работе значений параметров диска $\Sigma_0 = 100 \text{ г/см}^3$, $R_{in} = 1 \text{ а.е.}$ и темпа аккреции $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot \text{ год}^{-1}$ (там же на стр.105) на радиусе $R = 100 \text{ а.е.}$ имеем $u_r \sim 4 \text{ км/с}$, тогда как тепловая скорость, судя по рис. 3.1, в этой области диска соответствует величине $\sim 0.3 \text{ км/с}$, причем разница в скоростях только увеличивается к внешнему краю диска вплоть до $R = 1000 \text{ а.е.}$ Если принять на веру утверждение диссертанта, что аккреция в его модели обусловлена аккреционной вязкостью (стр.99), то тогда радиальная скорость u_r должна определяться турбулентной вязкостью, $u_r \approx \nu / R$, где ν – кинематический коэффициент вязкости. Характерная скорость турбулентных пульсаций v_{turb} может быть оценена снизу как $v_{turb} \approx v/H$, где H – толщина диска. Для принятой в работе геометрии диска $H \approx R$ имеем в результате $v_{turb} \approx u_r$, т.е. Уже на радиусе $R = 100 \text{ а.е.}$ турбулентность должна быть существенно сверхзвуковой с характерными числами Маха $\sim 4/0.3 > 10$ и должна расти к периферии диска. Даже если предположить, что сверхзвуковая турбулентность генерируется и поддерживается в большей части диска некими неизвестными источниками, это должно приводить к росту вязкой диссипации к периферии, что не согласуется с принятым в работе ее распределением как убывающей функции радиуса $S_{hd} \sim R^{-3}$ (стр.102).

Ответ: К сожалению, добиться полной согласованности зачастую бывает трудно, с учетом сложности и многообразия рассматриваемых физических процессов. Использование упрощенных кинематических моделей в этом случае является компромиссом, позволяющим решить поставленную задачу. Что касается приведенного примера, корректная подстановка параметров приводит к значению скорости $u_r \approx 10 \text{ м/с}$ на 100 а.е. , а не указанное в вопросе 4 км/с , т.е. радиальное течение в данной модели существенно дозвуковое. Функция нагрева:

$$S_{hd} = 3GM\dot{M}/4\pi R^3$$

для модели стационарного вязкого диска не зависит от закона распределения вязкости в диске, см. например, J. E. Pringle, "Accretion disks in astrophysics", ARA&A 1981, V.19 P. 137.

Вопрос 2. Большие сверхзвуковые скорости (более 10 чисел Маха), которые появляются в расчетах коллапса облака (рис. 5.6, 5.7), обусловлены выбором сильно неравновесных начальных условий. Почему нельзя было в расчетах «включать» эволюцию облака адиабатически медленно?

Ответ: в расчете изотермического и адиабатического коллапса неравновесные начальные условия задавались исключительно для тестирования гидродинамического метода. Такие условия хороши тем, что позволяют сравнить результаты численного моделирования с аналитическими (в частности, автомодельными) решениями. При расчете коллапса с использованием тепловой модели начальные условия были близки к равновесным.

Вопрос 3. При записи уравнений переноса для молекул (1.1) учитываются излучение и поглощение только в этих молекулах. Однако в процессе распространения электромагнитной волны, имеющей сформированную линию излучения, она проходит через различные среды (неоднородные) и в результате профиль линии может существенно измениться. Насколько это может повлиять на результат?

Ответ: на профили линий излучения может влиять излучение и поглощение пылью, однако для рассмотренных примеров и переходов молекул вклад пыли в формирование линий пренебрежимо мал. Пылевой континуум необходимо учитывать для более высоких переходов, например, для CO(7-6), возбуждаемых в плотных и горячих областях протозвездных объектов. Учет такого влияния предусмотрен в разработанном программном комплексе.

Вопрос 4. Стр.26. В уравнениях (1.4-1.5) автор рассматривает интенсивность излучения с учетом спонтанных и вынужденных переходов, описываемых с помощью коэффициентов Эйнштейна. Эти коэффициенты связаны между собой с помощью частотно-зависящего множителя, пропорционального кубу частоты:

$$A_{i,j} = \frac{2h\nu_{i,j}^3}{c^2} \cdot B_{i,j}$$

В радиодиапазоне роль спонтанных переходов в силу малости частоты сравнительно мала, однако, автор сохраняет коэффициент спонтанных переходов при расчете поглощения. Тогда почему не учтена описанная выше частотная зависимость между коэффициентами Эйнштейна?

Ответ: в условиях межзвездной среды роль спонтанных переходов молекул сравнима с вынужденными переходами. В конечном счете именно благодаря спонтанным переходам формируется наблюдаемое излучение. Малость множителя, связывающего коэффициенты Эйнштейна, не означает малой роли спонтанных переходов. Этот множитель определяет интенсивность излучения при термодинамическом равновесии:

$$J_\nu = \frac{2h\nu_{i,j}^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Отмеченная в вопросе частотная зависимость между коэффициентами Эйнштейна является неотъемлемой частью модели.

Вопрос 5. С какой точностью известны параметры, входящие в уравнения переноса излучения в среде? В этой связи, какова точность результатов, получаемых в результате численных расчетов?

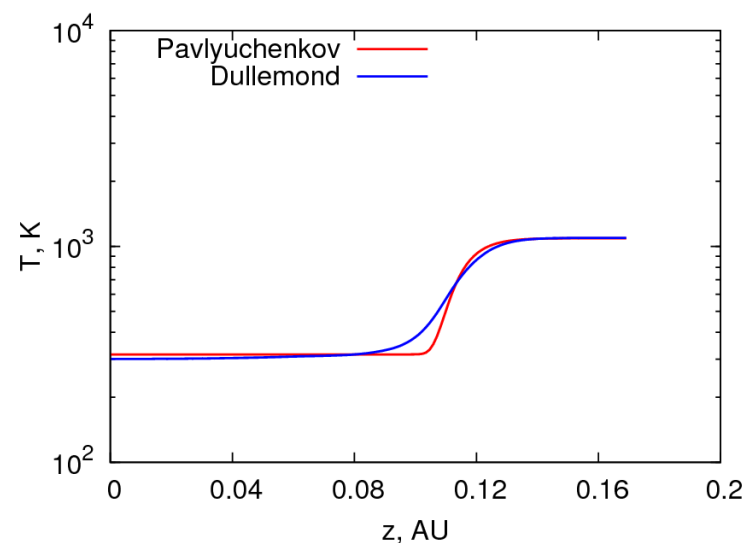
Ответ: Некоторые из этих параметров, такие как уровни энергии и коэффициенты Эйнштейна для рассмотренных молекулярных линий известны с очень хорошей точностью. Другие параметры известны с меньшей точностью, в частности, погрешности коэффициентов столкновительного возбуждения молекул с водородом, гелием и электронами могут составлять десятки процентов. Еще более неопределенная ситуация имеет место с коэффициентами поглощения и рассеяния пылинок, что связано с недостатком данных о структуре, форме и химическом составе межзвездных пылинок. Изучение влияния неопределенностей, связанных с этими данными – сложная задача, не затронутая в диссертации и требующая отдельного рассмотрения. Основной целью диссертации было исследование различных физических процессов и выделения их ключевых, играющих важную роль при формировании спектров излучения.

Вопрос 6. Автор отмечает существенную роль нелокальности в процессе переноса излучения через неоднородную среду. Как известно (Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967), нелокальность фактически означает необходимость учета пространственной дисперсии при рассмотрении распространения волны (Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005). Такой учет существенно влияет на прошедшую через среду волну. Насколько оправдано принятое автором описание процесса переноса, не учитывающее эффекты пространственной дисперсии?

Ответ: об эффектах пространственной дисперсии принято говорить при распространении электромагнитного излучения в плазме. Данные эффекты в работе не исследовались. Однако можно предположить, что эффекты пространственной дисперсии в рассмотренном спектральном диапазоне будут пренебрежимо малы, поскольку частота излучения в линиях рассматриваемых молекул (сотни ГГц) существенно больше плазменной (Ленгмюровской) частоты для условий в протозвездных объектах и межзвездной среде (не более десятков МГц).

Вопрос 7. В Гл. 3 при рассмотрении линий излучения в протопланетных дисках используется закон Стефана-Больцмана с учетом усредненных по Планку и Росселанду коэффициентов непрозрачности среды. Однако сама непрозрачность может зависеть от температуры, кроме того усреднение по Планку предусматривает абсолютно черное тело, которое поглощает все частоты одинаково. В рассматриваемом же случае поглощение существенно зависит от частоты. Насколько справедливо такое рассмотрение?

Ответ: представленная в Гл.3. модель для расчета тепловой структуры протопланетного диска основана на двухдиапазонном приближении, т.е. в модели фигурируют непрозрачности для УФ- и ИК-диапазона. Внутри каждого диапазона усредненные непрозрачности вычисляются в соответствии со стандартным алгоритмом сведения моментных уравнений переноса излучения к усредненным по частоте уравнениям (см. D.Mihalas & B.Mihalas, *Foundation of Radiation Hydrodynamics: New York 1984*). Усредненные по Росселанду и по Планку непрозрачности действительно зависят от температуры (см. Рис. 5.2 в диссертации) и это учитывается в численном методе. Надежность разработанного метода тщательно проверена при сравнении с результатами точных методов, учитывающих полную зависимость от частоты.



Распределения температуры вдоль вертикального направления для тестовой модели протопланетного диска. Красный профиль: двухдиапазонное приближение, описанное в диссертации. Синий профиль: метод с полной зависимостью коэффициента поглощения от частоты (разработчик С. Dullemond код DISTRUCT)

Вопрос 8. Какова точность используемого повсюду в диссертации приближения вмерзновенности пыли в газ? Каковы характерные длины динамической релаксации пылинок за счет трения по сравнению с минимально разрешимыми в рассмотренных моделях масштабами ~ 1 а.е.?

Ответ: условие вмерзновенности пыли в газ в дозвездных и протозвездных объектах может не выполняться. В частности, наши расчеты по моделированию динамики пыли в областях HII (Akimkin et al., MNRAS 2015) показывают существенную роль дрейфа пыли относительно газа под действием давления излучения. Важное значение имеет также осаждение и дрейф пыли в протопланетных дисках, особенно на поздних фазах эволюции дисков (Akimkin et al. ApJ 2013) Эти процессы подробно не описаны в диссертации, будучи следующим шагом в развитии моделей, и являются предметом нашего текущего изучения.

Вопрос 9. В Положении 5, выносимом на защиту, утверждается, что представлена модель протопланетного диска, «находящегося в *гидростатическом* и тепловом *равновесии*». Диск потому и имеет сплюснутую форму, что основными силами, определяющими его баланс, являются центробежная и гравитационная, т.е. диск в первую очередь находится в *динамическом равновесии* или близком к нему.

Ответ: Согласен. Следовало бы использовать формулировку «находящегося в *гидростатическом* и тепловом *равновесии* в *вертикальном направлении*».

Оппонент С.А. Ламзин:

Единственное мое критическое замечание по научной сути диссертации связано с моделью термической структуры протопланетных дисков. Во-первых, из раздела 3.1.1 следует, что температура газа и пыли в модели принимается одинаковой, что является слишком грубым приближением. Кстати, при расчете тепловой эволюции протозвездных облаков такое упрощение не делается. Во-вторых, считается, что угол падения излучения звезды на диск не зависит от расстояния до звезды – стр.101. В-третьих, предполагается, что газ и пыль хорошо перемешаны и распределение пылинок по размерам не зависит от высоты над плоскостью диска, т.е. в модели совсем не учитывается возможность оседания пыли к центральной плоскости. Все три фактора влияют на распределение температуры в диске, а, последний еще и на распределение молекул по высоте что должно сказаться на интенсивности излучения молекулярного газа. Впрочем, в диссертации эта модель использовалась только для изучения возможности диагностики протопланетных дисков на основе излучения молекул с помощью интерферометра ALMA. Однако коль скоро автор предполагает использовать свою модель для интерпретации реальных наблюдений, вышеперечисленные факторы следует принять во внимание. Так что мое замечание следует рассматривать, скорее, как пожелание на будущее.

Ответ: Согласен. В будущих работах мы постараемся учесть эти факторы.

Оппонент В.П. Гринин:

- 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).

Ответ: Да. К сожалению этот момент не описан в тексте.

- 2) Во введении к этой главе следовало бы упомянуть пионерскую работу Дугучи и Фукуи (S. Deguchi and Y. Fukui, Publ. Astro. 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.

Ответ: Согласен.

Оппонент И. И. Зинченко:

1. Как часто бывает для обратных задач, возникает вопрос об однозначности решения. Оно ведь ищется в рамках некоторой модели, путем оптимизации ее параметров. Автор как отмечено выше, учитывает много разных факторов и в большинстве случаев использует хорошо обоснованные модели. Тем не менее не факт, что нельзя получить столь же хорошее или, может быть, лучшее решение в рамках несколько отличающихся моделей. Например, автор совсем не учитывает мелкомасштабную фрагментарность в облаках, которая может существенно повлиять на перенос излучения (да и на химию тоже). В некоторых случаях, как например, для биполярного истечения в СВ 26, модель выглядит довольно упрощенной. Существует ведь немало хорошо разработанных физических моделей таких истечений. Конечно, для вывода о вращении истечения это не очень существенно, но для понимания физических процессов может быть весьма важно.

Ответ: Совершенно согласен. Могу только добавить, что в будущих исследованиях мы будем отдавать приоритет использованию конкретных физических моделей, и стараться избегать феноменологического описания каких-либо процессов (хотя такое описание зачастую и позволяет быстрее ответить на интересующие вопросы).

2. К сожалению, автор ограничивается рассмотрением излучения только линейных молекул, хотя существует немало более сложных соединений, очень важных для диагностики межзвездных облаков (например, аммиак, метанол, молекулы воды и пр.) Понятно, что основная проблема здесь в большинстве случаев – расчет их возбуждения и переноса излучения с гораздо большего количества энергетических уровней.

Ответ: При рассмотрении излучения более сложных молекул необходимо учитывать специфику строения их энергетических уровней, их расщепление, дополнительные механизмы возбуждения, перекрытие линий и т.д. Интерпретация наблюдений излучения таких молекул безусловно очень важна и требует развития соответствующих моделей. Однако, в своих исследованиях мы приняли решение сосредоточиться на решении других проблем и использовать наиболее простые, и вместе с тем также важные для наблюдений линейные молекулы.

3. Структура диссертации в целом логична и последовательна за исключением того, что глава 5 находится в конце. В принципе ее результаты могли бы быть использованы в ряде предыдущих разделов. Очевидно, что такое расположение обусловлено хронологией работ автора. Еще небольшое замечание по структуре заключается в том, что некоторые громоздкие вычисления (например, разделы 5.1.3, 5.2.2) можно было бы вынести в приложение.

Ответ: Согласен.