

Уральский Федеральный Университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина

Ладейщиков Дмитрий Антонович

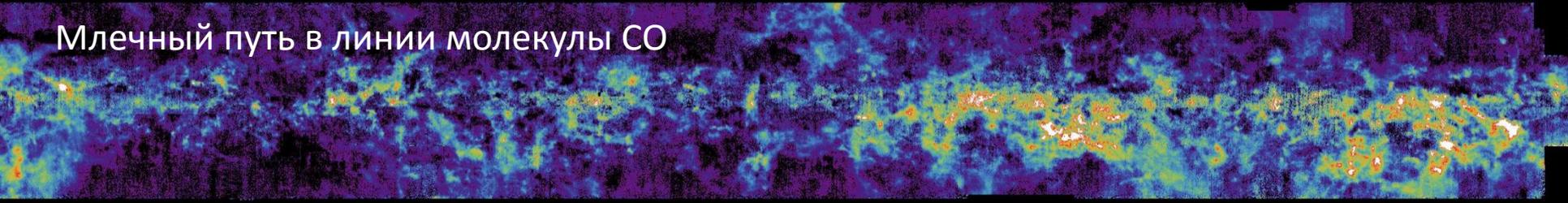
Исследование пространственно-
кинематической структуры гигантских
молекулярных облаков

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Соболев А.М.

Москва – 2016

Актуальность

Млечный путь в линии молекулы CO



- Основная часть звезд во Вселенной рождается в гигантских молекулярных облаках (ГМО).
- Процессы звездообразования происходят в первую очередь в местах повышенной концентрации газа, главная компонента которого – молекулярный водород (H_2).
- Молекулярный газ распределён в Галактике неравномерно, причём он организован в различные иерархические структуры – гигантские молекулярные облака, волокна, молекулярные сгустки, ядра и др.

Цели работы

- Рассмотрение методов анализа пространственно-кинематической структуры ГМО.
- Применение различных методик анализа для результатов моделирования и наблюдений ГМО.
- Исследование основных физических характеристик ГМО по моделям и наблюдениям.
- Исследование физического состояния ГМО по излучению в различных линиях молекул межзвездной среды (CO , NH_3 , CH_3OH , HC_3N и др.).
- Исследование особенностей индуцированного звездообразования в ГМО.

Структура и объем

Структура:

Введение.

1 Способы изучения молекулярных облаков.

2 Звёздообразование в области S233.

3 Обзор молекулярных линий в направлении на области звёздообразования S231-S235.

4 Структурные соотношения для молекулярных облаков.

Заключение.

Полный объем: 162 страницы, 34 рисунка, 11 таблиц.

Публикации

В рецензируемых изданиях:

1. Ladeyshchikov D.A., Sobolev A.M., Parfenov S.Ju., Alexeeva S.A., Bieging J.H. *Star formation in the S233 region // MNRAS.* – 2015. – Vol. 452. – Issue 3. – P.2306-2317.
2. Khoperskov S.A., Vasiliev E.O., Ladeyschikov D.A., Sobolev A.M., Khoperskov A.V. *GMCs scaling relations: role of the cloud definition // MNRAS.* – 2015. – Vol. 455. – Issue 2. – P.1782-1795.
3. Ladeyschikov D.A., Kirsanova M.S., Tsvilev A.P., Sobolev A.M. *Molecular Emission in Dense Massive Clumps from the Star-Forming Regions S231-S235 // Astrophys. Bull.* – 2016. – Vol. 71, 2. – P. 208-224.

В трудах российских и международных конференций: 8 публикаций

1 Глава

Способы изучения молекулярных облаков

Цели:

- Привести общие сведения о молекулах, которые используются для исследования ГМО.
- Описать современные методики для выделения структур в молекулярных облаках
- Привести основные физические характеристики ГМО и их взаимосвязь.
- Обсудить связь ГМО с областями звездообразования и процессом индуцированного звездообразования.

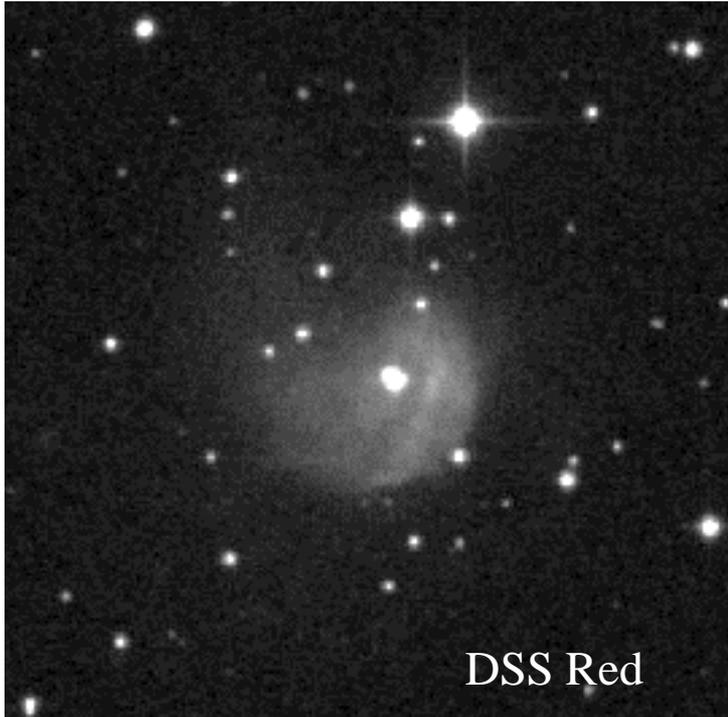
2 Глава

Область звездообразования S 233

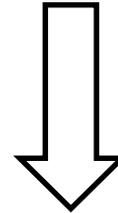
Цели:

- Исследовать структуру гигантского молекулярного облака в области S233 по собственным данным об излучении в линиях CO.
- Исследовать особенности звездообразования в области S233 по имеющимся архивным данным.

Область S233

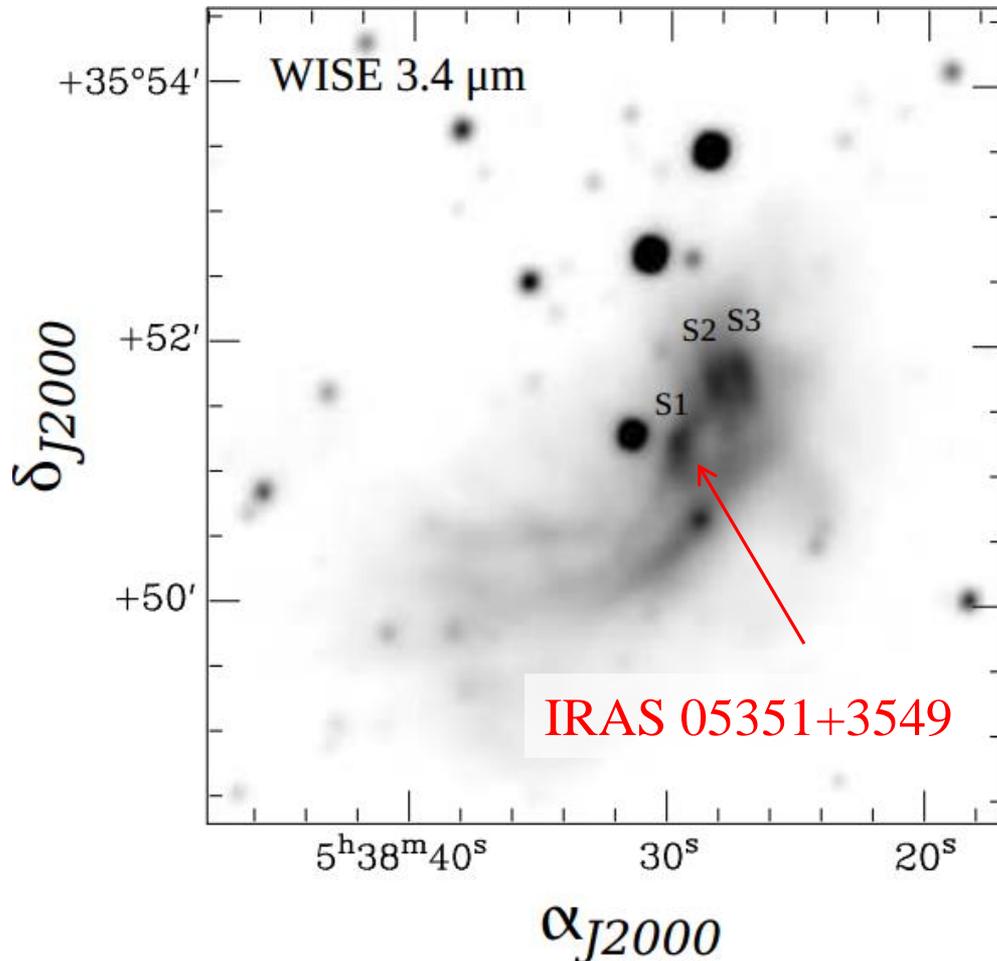


- Содержит центральную звезду и окружающую ее туманность (зону HII)
- Звезда: B1.5V
- Скорость звезды: -17.5 ± 1.4 км/с
- Скорости основной массы молекулярного газа:
от -21.6 км/с до -13.8 км/с



Звезда скорее всего образовалась в родительском молекулярном облаке

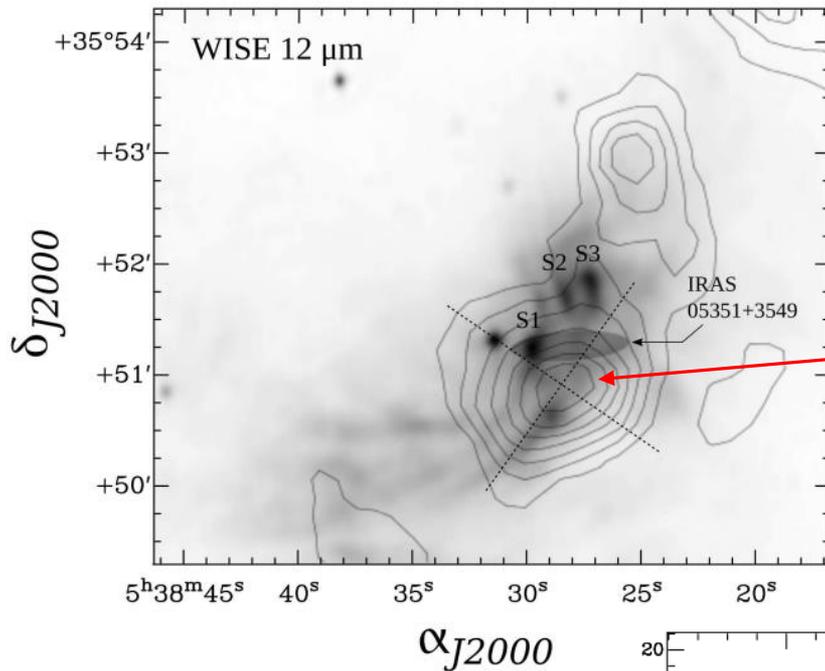
Инфракрасное поярчение S1



В окрестности области S233 располагается IRAS-источник 05351+3549.

- Плотность потока возрастает с длиной волны, что характерно для молодых звездных объектов (Connelley et al., 2007)
- Массы излучающей пыли в источнике IRAS 05351+3549 составляет $70 M_{\odot}$ при использовании отношения масс пыли и газа 0.01 (Draine et al., 2007).

Молекулярный сгусток



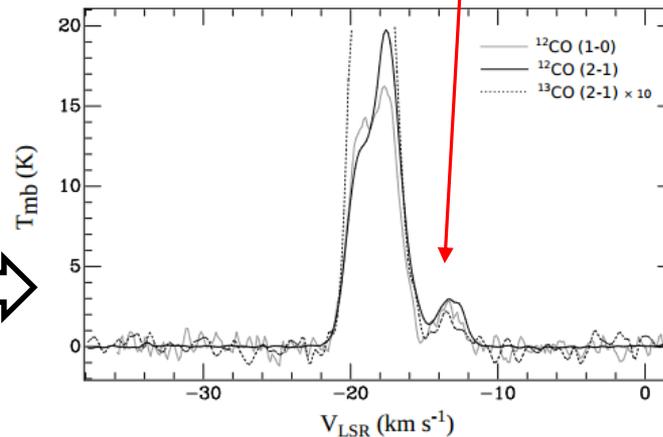
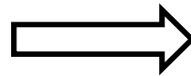
Фоновое излучение:
ИК 12 мкм (WISE)

Контурь:
¹²CO (2-1) SMT

Диаметр сгустка:
~ 70 уг. сек. (~0.8 пк)

Диаграмма телескопа:
32 уг. сек. (~ 0.3 пк)

Показаны спектры
линий CO(1-0),
CO(2-1), ¹³CO(2-1)
в направлении на
S233



Зарегистрирован
сгусток излучения на
скорости -13.5 км/с,
отличной от системной
скорости газа

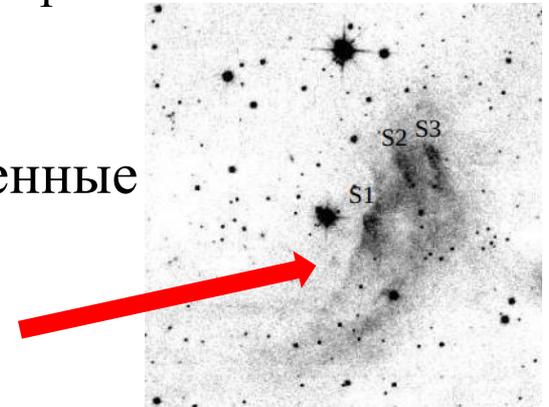
Особенности звездообразования

- Соотношение параметров области S233 рассмотрена в рамках одномерной модели, описанной в работе Whitworth et al., 1994. типа «сжатие-и-коллапс». Данный сценарий скорее всего не реализуем в области S233.
- Наиболее правдоподобный сценарий индуцированного звездообразования в S233 – «сжатие существующего сгустка».

Особенности:

- случайное распределение молекулярных сгустков вокруг зоны НП (Lefloch et al., 1994; Kessel-Deynet et al., 2003; Miao et al., 2006)
- наличие ярких инфракрасных оболочек рядом с глобулами и поярчениями (Thompson et al., 2004). Звездообразование может происходить внутри этих глобул.

Вокруг области S233 имеются многочисленные сгустки. В области имеются характерные поярчения и оболочечные структуры.



Выводы 2 главы

В области S233 найдены следующие свидетельства звездообразования:

1. ИК пик излучения S1 на изображении в ближнем (UKIDSS) и среднем ИК-диапазоне (WISE 24 мкм), находящийся в непосредственной близости от ионизирующей звезды, и характерные для звездообразующих глобул оболочечные структуры.
2. IRAS источник 05351+3549. Плотность потока источника увеличивается с длиной волны.
3. Сгусток молекулярного газа со скоростью -13.7 км/с

Наиболее характерный сценарий звёздообразования в области S233 – «сжатие существующего сгустка».

3 Глава.

Обзор молекулярных линий в направлении на области звездообразования S231-S235

Цели:

- Исследовать области звездообразования S231-S235 в ГМО G174+2.5 в линиях молекул метанола, цианоацетилена и аммиака на РТ-22 ФИАН.
- Определить физические параметры молекулярных сгустков по линиям CO и NH₃ и исследовать признаки звёздообразования в них.
- Для эффективного проведения наблюдений разработать и внедрить программный комплекс для системы автоматизации 2-х канального радиометра РТ-22 ФИАН.

Наблюдения на двухканальном радиометре

Файл Параметры наблюдений Частота Юстировка Справка

ГШ: 0 из 5

Правым: 0 из 5

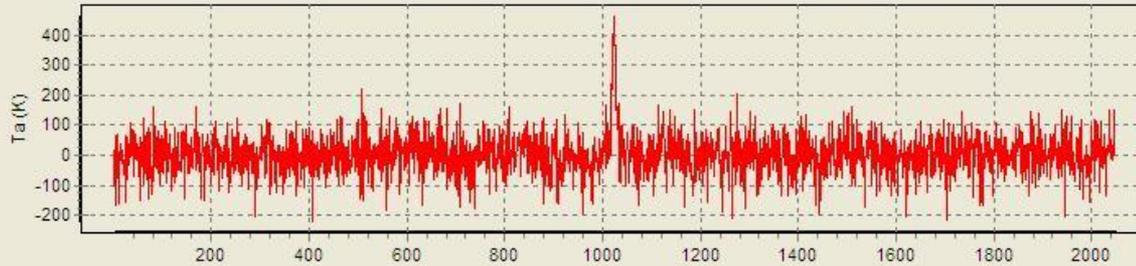
Левым: 0 из 5

Амплитудно-частотная характеристика

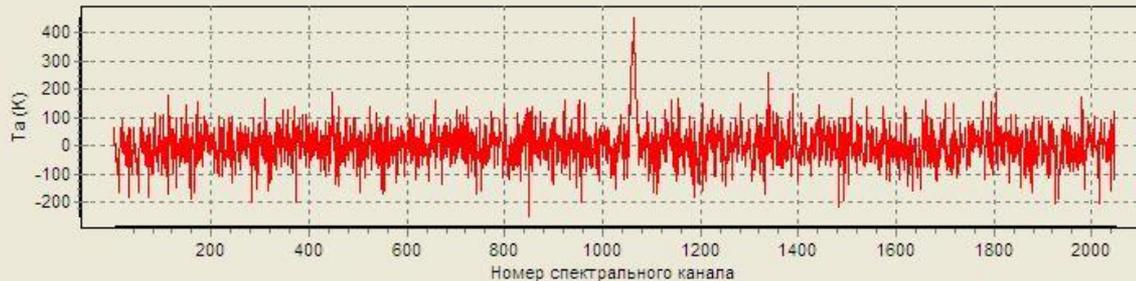
Калиброванный спектр

Отладка

— Текущий спектр — Среднее по 1 циклу



— Текущий спектр — Средний спектр



Накопление

Запустить

Остановить

Показать АЧХ

Останов. АЧХ

Накопление АЧХ: 5 сек

Шумы

Tsys 1	257.2	Continuum 1	0.019
Tsys 2	258.3	Continuum 2	0.033
RMS theory 1	1.472	RMS obs 1	1.049
RMS theory 2	1.479	RMS obs 2	1.054

Вывод результата

Выводить в папку C:\developer\Core_as50\Sym

Имена сл. файлов 020912_002a, 020912_002b

Формат: SYM

Изменить директорию

Выводить промежут. рез-ты Отключить вывод

8:54:49

Связь с сервером телескопа

Координаты телескопа

Азимут

Угол

Ареал: 0гр 0м 0с

Нреал: 0гр 0м 0с

Арасч: 0гр 0м 0с

Нрасч: 0гр 0м 0с

ошибка: 0гр 0м 0с

ошибка: 0гр 0м 0с

Фиксированный масштаб

АЧХ

Спектр

Xmax 1100

Ymax 2

1

Xmin 950

Ymin -2

-1

использовать

Вывод АЧХ

Левый и правый рупор

Разность рупоров

Вывод спектра

Текущий спектр

Средний спектр

Sigma 3*Sigma

Сигма спектра

Текущего

Среднего

Быстрый доступ

F8-остановить в конце цикла

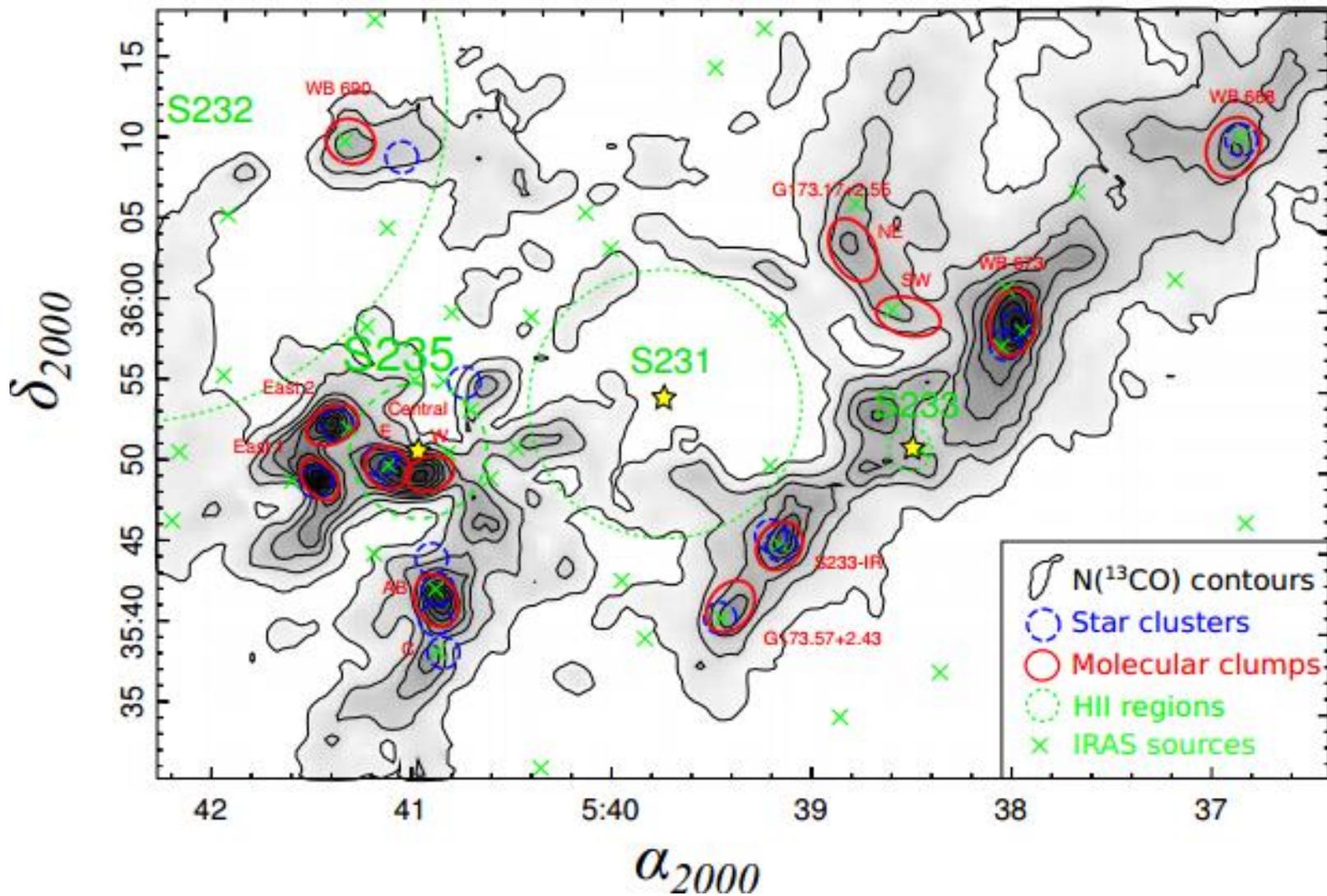
F9-обнулить среднее

F7-прервать накопление

F10-запустить накопление

Esc - выход

Выбор источников для наблюдений



Результаты выделения молекулярных сгустков

Определены **физические параметры** молекулярных сгустков по линиям CO(1-0)

Название	α_{J2000} (h m s)	δ_{J2000} (° ' ")	θ_{FWHM} (')	R (пк)	V_{LSR} (км с ⁻¹)	ΔV (км с ⁻¹)	T_{ex} (K)	$N(\text{H}_2)$ (10 ²² см ⁻²)	$M(\text{H}_2)$ (M _⊙)	$\tau(^{13}\text{CO})$	α_{vir}
WB89 690	5 41 21.6	+36 10 00	3.1 × 2.7	0.87	-21.0	1.83	16.5	1.45	733	0.65	0.86
WB89 668	5 36 54.3	+36 10 16	3.9 × 3.1	1.06	-17.2	2.70	14.1	1.60	1199	0.85	1.40
WB89 673	5 38 00.6	+35 59 17	4.1 × 2.8	1.04	-19.5	3.16	20.8	2.90	2112	0.74	1.07
G173.17+2.55 NE	5 38 49.0	+36 03 41	4.1 × 2.6	0.99	-17.9	2.44	16.4	1.66	1095	0.69	1.18
G173.57+2.43	5 39 24.7	+35 41 28	3.5 × 2.6	0.90	-16.8	2.38	17.2	1.70	932	0.65	1.20
S233-IR	5 39 10.2	+35 45 15	3.1 × 2.6	0.83	-16.9	2.76	22.1	2.29	1048	0.55	1.31
S235 Central E	5 41 08.8	+35 49 47	2.9 × 2.5	0.83	-19.6	1.92	35.6	3.67	1683	0.35	0.39
S235 Central W	5 40 55.8	+35 49 27	3.0 × 2.1	0.74	-21.5	1.93	31.6	3.65	1347	0.49	0.45
S235 East 1	5 41 29.0	+35 48 58	2.9 × 1.9	0.74	-18.9	1.80	32.7	4.31	1591	0.51	0.33
S235 East 2	5 41 25.6	+35 52 21	3.4 × 2.2	0.87	-20.8	1.78	29.4	3.62	1822	0.55	0.33
S235-AB	5 40 53.3	+35 41 35	3.4 × 2.5	0.90	-16.5	2.30	27.0	3.53	1935	0.59	0.54

Результаты:

Массы сгустков – от 700 до 2000 M_⊙

Лучевые концентрации H₂ – от 1.4 до 4.3 10²² см⁻²

Вириальный параметр α_{vir} – от 0.39 до 1.31 < $\alpha_{\text{crit}} \approx 2 \Rightarrow$ **Все сгустки являются гравитационно нестабильными (McKee et al., 1992)**

Наблюдения молекулярных сгустков на РТ-22 ФИАН

Все выделенные сгустки были исследованы на РТ-22 в линиях

- Аммиака (NH_3) на ~ 23 ГГц в переходах (1,1) и (2,2)
- Цианоацетилена (HC_3N) на 36.4 ГГц
- Метанола (CH_3OH) мазер I класса на 36.2 ГГц

В результате наблюдений установлено:

- В линии NH_3 излучение зарегистрировано в направлении на 6 сгустков: WB89 668 (впервые), WB89 673 (впервые), S233-IR, G173.57+2.43, S235 AB и S235 Central.
- Линия HC_3N зарегистрирована в направлении на 3 молекулярных сгустка: WB89 668 (впервые), WB89 673 (впервые) и S233-IR.
- Линия CH_3OH зарегистрирована в направлении на 3 сгустка: WB89 673 (впервые), S233-IR и S235-AB.

Результаты наблюдений линии NH_3 на 23.7 ГГц

Источник	(J, K)	T_{mb} (К)	T_{B} (К)	V (км с $^{-1}$)	ΔV (км с $^{-1}$)	$\tau_{(1,1)\text{m}}$	$\frac{\Theta_{\text{beam}}^2}{\Theta_{\text{maj}}\Theta_{\text{min}}}$	T_{kin} (К)	$N(\text{NH}_3)$ (10^{14} см $^{-2}$)	$n(\text{H}_2)$ (10^3 см $^{-3}$)
WB89 668	(1,1)	0.24 (0.01)	1.3 (0.1)	-17.1 (0.1)	1.7 (0.1)	1.4 (0.3)	4.3	16.5 (1.9)	7.3 (1.5)	4.2
	(2,2)	0.09 (0.01)	0.5 (0.1)	-17.1 (0.1)	1.5 (0.3)					
WB89 673	(1,1)	0.25 (0.01)	1.1 (0.1)	-18.6 (0.1)	3.1 (0.1)	1.2 (0.3)	3.5	15.9 (1.5)	12.4 (2.2)	4.1
	(2,2)	0.08 (0.01)	0.4 (0.1)	-18.2 (0.2)	2.9 (0.6)					
S233-IR	(1,1)	0.28 (0.03)	2.2 (0.2)	-16.5 (0.1)	2.0 (0.1)	1.2 (0.4)	6.9	29.4 (11.8)	9.9 (1.9)	7.2
	(2,2)	0.21 (0.04)	1.7 (0.3)	-16.2 (0.1)	2.6 (0.3)					
G173.57+2.43	(1,1)	0.23 (0.03)	1.4 (0.2)	-16.3 (0.1)	1.2 (0.1)	1.2 (0.5)	5.1	14.4 (5.2)	5.1 (1.0)	5.6
	(2,2)	0.06 (0.01)	0.4 (0.1)	-16.5 (0.3)	2.3 (0.5)					
S235-AB	(1,1)	0.11 (0.03)	0.6 (0.2)	-16.4 (0.1)	1.6 (0.3)	0.6 (0.9)	4.4	27.4 (59.7)	2.2 (1.7)	2.8
	(2,2)	0.07 (0.04)	0.4 (0.2)	-15.7 (0.3)	2.1 (0.6)					

По линиям NH_3 (1,1) и (2,2) определены параметры молекулярных сгустков:

- Кинетические температуры: от 16 до 30 К
- Лучевые концентрации NH_3 : от 2.2 до 12.4×10^{14} см $^{-2}$
- Концентрации молекулярного газа: от 2.8 до 7.2×10^3 см $^{-3}$

Полученные оценки физических параметров характерны для областей звездообразования (например, см. работу Зинченко и др., 1997)

Выводы 3 главы

- Определены физические параметры молекулярных сгустков:
 - Массы сгустков – от 700 до 2000 M_{\odot} (по данным CO)
 - Температуры сгустков – $\sim 15 - 30$ К (по данным NH_3)
 - Концентрации мол. газа – $\sim (3-7) \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ (по данным NH_3)
- Все сгустки являются гравитационно нестабильными ($\alpha_{\text{crit}} < 2$) на основании их излучения в линии CO
- Регистрация линий метанола указывает на наличие ударных волн
- Регистрация линий цианоацетилена и аммиака указывает на присутствие вещества с высокой плотностью
- В направлении на большинство сгустков обнаружены скопления звёзд и водяные мазеры в архивных данных

4 Глава.

Структурные соотношения для молекулярных облаков

Ларсон (1981) в своей работе предложил три эмпирических соотношения для ближайших молекулярных облаков Млечного Пути:

- Первое соотношение: размер сгустка (R_{cl}) – дисперсия на луче зрения (σ_v).

$$\sigma_v \propto R^{\beta 1} \quad (1.1)$$

- Второе соотношение: Вириальная масса сгустка (M_{vir}) – светимость (L_{CO}).

$$M_{vir} \propto L_{CO}^{\beta 2} \quad (1.2)$$

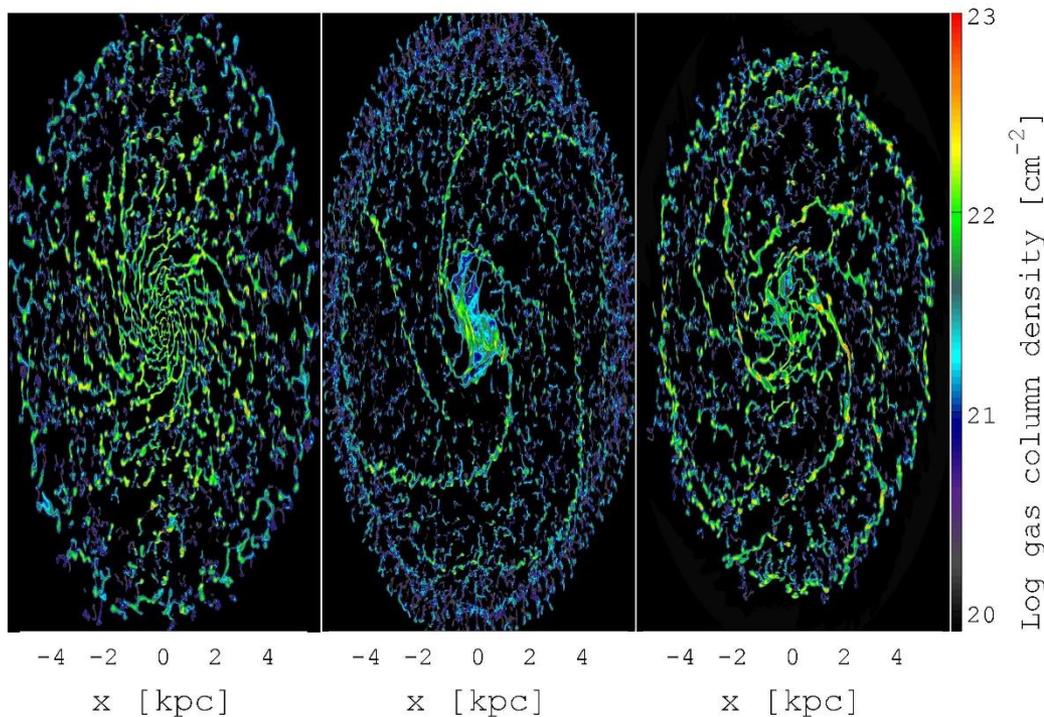
- Третье соотношение: Масса сгустка (или светимость) – размер.

$$L_{CO} \propto R^{\beta 3} \quad (1.3)$$

Цель 4 главы – исследовать влияние методов выделения облаков на структурные соотношения для ГМО.

Исходные данные для анализа

Гидродинамическая модель галактики (4096 x 4096 x 512 пикс., 40 x 40 x 3 кпк) в трех различных вариантах морфологии: без спиралей, спиральное и нерегулярное.

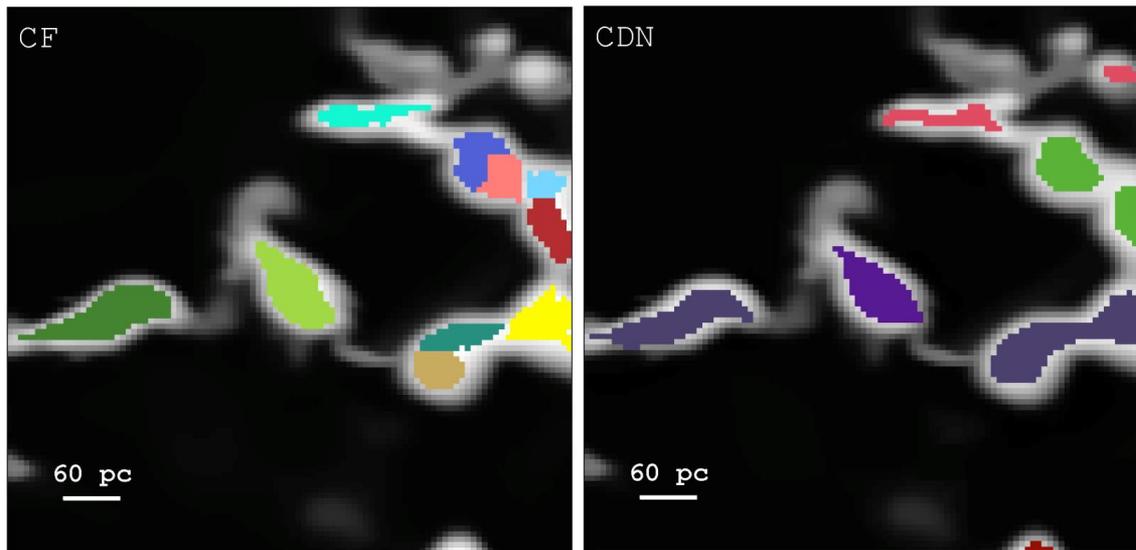


В гидродинамической модели учитываются следующие факторы:

- Самогравитация
- Звздообразование
- Обратная связь от звёзд
- Перенос УФ-излучения
- Неравновесная химическая кинетика молекул CO и H_2 .

Методы выделения облаков

- Первый метод – на основании анализа плоских карт лучевой концентрации водорода ($\text{HI}+\text{H}_2$) по пороговому значению лучевой концентрации N_{th} (CDN).
- Второй метод – на основании анализа кубов данных излучения в линии CO методом Clumpfind (CF)



Метод CF

Метод CDN

Физические параметры выделенных облаков

- Число пространственно разрешенных молекулярных облаков составляет $\approx 10^3$ и в некоторой степени зависит от типа галактики.
- Размеры, массы, светимости и другие физические характеристики ГМО по данным модели близки к данным наблюдений ГМО в нашей Галактике и ближайших дисковых галактиках.
- Физические параметры зависят от способа выделения облаков.

Выводы 4 главы

- При использовании метода **Cloud Definition N (CDN)**, основанного на пороге лучевой концентрации N_{tot} , диффузный (межоблачный) газ может значительно влиять на структуру выделенных облаков, в результате чего происходит завышение значений дисперсии скорости и других параметров облаков.
- При использовании метода **Clumpfind (CF)**, основанного на анализе «кубов данных» излучения CO, ГМО имеют более компактные размеры, меньшие значения массы и дисперсии скорости по сравнению с методом (CDN). Физические параметры облаков лучше соответствуют наблюдаемым характеристикам облаков Млечного Пути.
- Заключение: для сравнения моделей и наблюдений нужно использовать один и тот же метод выделения облаков. Разные методы дают разные значения физических параметров.

Положения, выносимые на защиту

1. Анализ пространственно-кинематической структуры молекулярного облака в области S233 и сценария звездообразования в данной области.
2. Оценки физических параметров молекулярных сгустков в гигантском молекулярном облаке G174+2.5 по линиям молекул CO и NH₃.
3. Наблюдения на радиотелескопе РТ-22 гигантского молекулярного облака G174+2.5 в линиях CH₃OH, HC₃N и NH₃ в направлении на сгустки, наиболее яркие в линии молекулы CO.
4. Статистические закономерности гигантских молекулярных облаков в различных теоретических моделях галактик при использовании метода выделения облаков по излучению CO методом CLUMPFIND.

Спасибо всем за внимание!

Благодарности

- Андрею Михайловичу Соболеву
- Цивилёву Александру Прокопьевичу, Смирнову Григорию Тимофеевичу, Гусеву Виктору Алексеевичу, Логвиненко Сергею Викторовичу и всем сотрудникам ПРАО АКЦ ФИАН
- Юрию Андреевичу Ковалёву
- Алексею Валерьевичу Алакозу
- Дмитрию Зигфридовичу Вибе
- Георгию Михайловичу Рудницкому
- Полине Евгеньевне Захаровой, Светлане Викторовне Салий и всем сотрудникам Коуровской астрономической обсерватории УрФУ
- Игорю Ивановичу Зинченко
- Сергею Парфёнову, Софье Алексеевой и Антону Ивановичу Васюнину
- Александру Борисовичу Меньщикову
- Chris Brunt & John Bieging
- Всем, кто помогал в работе и не только

Большое Вам спасибо!