

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи
УДК 524.527; 524-7



Каспарова Анастасия Владиленовна

Содержание молекулярного газа в дисковых галактиках

Специальность: 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в отделе внегалактической астрономии Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ

Научные руководители:

- доктор физико-математических наук, профессор Засов Анатолий Владимирович, зав. отделом внегалактической астрономии ГАИШ МГУ
- доктор физико-математических наук Чилингарян Игорь Владимирович, ведущий научный сотрудник отдела физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук Решетников Владимир Петрович, профессор кафедры астрофизики математико-механического факультета Санкт-Петербургского университета
- кандидат физико-математических наук Макаров Дмитрий Игоревич, заведующий лабораторией внегалактической астрофизики и космологии Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Ведущая организация:

Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится 22 мая 2014 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский пр-т, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский пр-т., д.27, Фундаментальная библиотека)

и на сайте <http://sai.msu.ru/dissovet/2014.html>.

Автореферат разослан 21 марта 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

С. О. Алексеев



Общая характеристика работы

Настоящая работа посвящена изучению содержания молекулярного газа в галактических дисках. Ключевым понятием в этом исследовании будет *баланс компонентов межзвездной среды* $\text{HI} \longleftrightarrow \text{H}_2$, под которым подразумевается количественное соотношение молекулярной и атомарной газовых составляющих, сильно меняющееся как в пределах одной галактики, так и от одного объекта к другому. Данная тема тесно связана со звездообразованием, первой ступенью которого и является образование молекул из HI. Мы будем касаться фактов *видимого* нарушения баланса компонентов межзвездной среды с целью диагностики условий формирования молекулярного газа в разных областях дисков галактик.

Актуальность работы

В условиях большого количества исследований, направленных на изучение межзвездной среды, необходимо четкое понимание принятых упрощающих предположений, используемых для анализа и интерпретации численных и наблюдательных данных. К настоящему моменту все еще не существует достаточно полных моделей, способных объяснить все доступные наблюдаемые явления в межзвездном газе. Видимые противоречия затрудняют построение согласованной картины как эволюции галактик вообще, так и межзвездной среды в частности. Так, одним из известных наблюдательных фактов, трудно объяснимых в широко применяемой сейчас турбулентной модели образования короткоживущих молекулярных облаков, является наличие звездообразования в областях с экстремально низкими средними плотностями газа, не достаточными для крупномасштабной гравитационной неустойчивости, и обнаружение CO-излучения вне дисков галактик. Удивительно также существование достаточно обширных областей в дисках галактик, где доля молекулярного газа по отношению к атомарному многократно превышает средние значения. В свете этого актуальными задачами являются выявление причин, приводящих к наблюдаемому избытку молекулярного газа, и исследование баланса газовых компонентов $\text{HI} \longleftrightarrow \text{H}_2$ в областях низкой плотности меж-

звездной среды: на перифериях дисков обычных галактик и в галактиках низкой поверхностной яркости (LSB), где звездообразование продолжается, хотя и на слабом уровне.

Отдельной темой, представляющей сейчас большой интерес, является исследование эволюции галактик в космологическом контексте. Знаковыми объектами здесь являются галактики низкой поверхностной яркости. Причина этого — в предполагаемом определяющем вкладе темного гало на всех расстояниях от центра, что дает возможность *непосредственного* изучения профиля темной материи, поэтому актуальнейшей темой является исследование происхождения и эволюции подобных объектов. Причем в отношении образования маломассивных LSB галактик в слабонаселенных регионах Вселенной (*войдах*) исследователи пришли к относительному согласию, однако существуют и гигантские LSB галактики, для которых обсуждается одновременно несколько альтернативных сценариев происхождения.

Цель работы

Главной целью работы является исследование баланса между атомарным и молекулярным компонентами межзвездной среды в дисковых галактиках и выявление причин, отвечающих за нарушение равновесия между процессами перехода от H_2 к HI и обратно и приводящих к наблюдаемому избытку молекулярного газа. Это подразумевало решение ряда конкретных задач:

- В первую очередь были необходимы анализ статистических данных по интегральным характеристикам межзвездной среды для представительной выборки галактик и выделение объектов, демонстрирующих нетипично высокие относительные содержания молекулярного газа. Это позволило ограничить круг возможных причин нарушения газового баланса.
- В целях исследования особенностей радиальных распределений относительного содержания компонентов HI и H_2 в газовых дисках галактик необходимо было разработать метод оценки газового турбулентного давления (значимость которого периодически упоминается в литературе), учитывающих такие важные факторы, как самогравитация газа и влия-

ние гало темной материи. Задача подразумевала тестирование полученного метода и анализ чувствительности результатов к входящим параметрам на примере выборки хорошо изученных объектов ближней Вселенной.

- Поставленная цель предполагала поиск галактик с измеренными радиальными профилями газовых плотностей, выделяющихся высоким относительным содержанием молекулярного водорода, к которым можно было применить разработанную нами методику оценки давления для анализа причин аномалий.
- Выполнение перечисленных выше этапов позволило приступить к ключевому вопросу: изучению факторов, влияющих на баланс газовых компонентов межзвездной среды, внешних, связанных с эффектом окружения галактик, и внутренних, таких как особенность структуры молекулярной составляющей дисков.

Новизна

- В ходе исследования впервые был проведен подробный статистический анализ имеющихся наблюдательных данных по содержанию газа и другим характеристикам для выборки галактик с аномально высоким содержанием молекулярного водорода.
- Создан новый пакет программ в среде MATLAB для получения самосогласованной оценки профилей газового турбулентного давления межзвездной среды в галактиках с учетом изменения толщины звездного диска, самогравитации газа и влияния гало темной материи.
- Впервые показана значимость влияния на баланс газовых компонентов на периферии дисков галактик скопления не только динамического (лобового) давления межгалактического газа, но и его статического давления.
- Было показано, что модель Крумхольца и др. [1], объясняющая резкое падение относительного содержания H_2 к HI на периферии дисков галактик недостаточным экранированием молекул от UV излучения, не работает

для ряда галактик скопления Virgo с дефицитом HI и гигантской LSB галактики Malin 2.

- Впервые обоснована некатастрофическая модель происхождения и эволюции уникальной гигантской галактики низкой поверхностной яркости Malin 2, включающая в себя объяснение *видимого* нарушения баланса газовых компонентов в ее диске.

Практическая и научная значимость работы:

- Результаты исследования показали, что для объяснения относительно содержания газовых компонентов межзвездной среды в галактиках скопления Virgo более информативно работать в терминах газового турбулентного давления. Такой подход дает возможность оценивать влияние лобового и статического давления межгалактической среды на периферию газового диска.
- Разработанный пакет программ по расчету газового турбулентного давления позволит в будущем делать оценки этой величины для больших выборок галактик в полуавтоматическом режиме, в том числе и при использовании карт наблюдаемых дисперсий скоростей звезд и газа.
- Предложенное объяснение высокой доли молекул в диске галактики Malin 2, связанное с возможным присутствием большого количества так называемого *темного газа*, может быть также использовано для анализа условий звездообразования на перифериях дисков обычных галактик и в дисках низкой яркости.
- Модель некатастрофического происхождения одной из гигантских галактик низкой поверхностной яркости приводит к необходимости постановки вопроса о разработке нового подхода к эволюции LSB галактик.

Положения, выносимые на защиту:

1. На основе анализа свойств спиральных галактик с высоким интегральным отношением масс молекулярного и атомарного компонентов межзвездной среды $M_{\text{H}_2}/M_{\text{HI}} > 2$ показано, что аномально высокое содержание молекулярного газа в них может быть объяснено эффективным процессом перехода $\text{HI} \rightarrow \text{H}_2$ и более длительной продолжительностью существования газа в молекулярной форме.
2. Впервые выполнен расчет азимутально усредненных радиальных профилей объемных плотностей в плоскости диска, шкал высот звездного, атомарного и молекулярного компонентов и турбулентного давления межзвездной среды для представительной выборки из 37 спиральных галактик, в том числе для 18 членов скопления Virgo и нашей Галактики в рамках самосогласованной осесимметричной модели равновесного диска с учетом гравитации темного гало и самогравитации газа. Подтверждено существование связи турбулентного газового давления с относительной плотностью молекулярного газа.
3. Получен вывод о том, что степень молекуляризации газа на периферии дисков галактик скопления Virgo не может быть объяснена наблюдаемой суммарной газовой плотностью и повышенной металличностью: необходимо принимать во внимание лобовое и статическое давление межгалактического газа и низкую эффективность перехода $\text{H}_2 \rightarrow \text{HI}$, приводящие к росту молекуляризации газа.
4. Аргументирован вывод о том, что облака молекулярного газа, в первую очередь в областях пониженной плотности межзвездной среды, при определенных условиях должны иметь продолжительность существования не менее 10^8 лет, что на порядок и более превышает обычно принимаемые значения для гигантских молекулярных облаков.
5. На основе анализа спектральных наблюдений и данных о содержании молекулярного газа в уникальной гигантской галактике низкой поверхностной яркости Malin 2 сделан вывод об особенностях структуры ее газовой

среды и о вероятном наличии ненаблюдаемого *темного газа* в диске. Аргументирована некатастрофическая модель образования и эволюции этой галактики.

Апробация работы

- Доклады на международных конференциях:
 1. XXVIII General Assembly IAU, 20–31 aug 2012, Beijing, China, *On the general structure of giant low surface brightness galaxy Malin 2*, Saburova A., Kasparova A., Katkov I., Chilingarian I. and Bizyaev D. (постер);
 2. Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies of the Sky. Conference of Young Scientists of CIS Countries, 21-25 Nov 2011, Yerevan, Armenia, *Atomic and molecular gas components in spiral galaxies of the Virgo cluster*, Kasparova A. (устный доклад);
 3. JENAM-2011: European week of astronomy and space science, Saint Petersburg, Russia, July 4-8, 2011, *The features of gas component in spiral galaxies of the Virgo cluster*, Kasparova A. V. (постер);
 4. JENAM-2011: European week of astronomy and space science, Saint Petersburg, Russia, July 4-8, 2011, *The giant low surface brightness galaxy Malin2: general structure and molecular gas content*, A. Saburova, A. Kasparova, I. Katkov and I. Chilingarian (постер);
 5. “Dynamics and evolution of disc galaxies”, Moscow-Pushchino, Russia, May 31-June 04, 2010, *The features of gas components in spiral galaxies of the Virgo cluster*, Kasparova A. V. (постер).

- Доклады на всероссийских конференциях:
 1. Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, Москва, 23–26 декабря 2013, *Портрет Malin 2*, Каспарова А. В., Сабурова А. В., Катков И. Ю., Чилингарян И. В. и Бизяев Д. В. (постер);
 2. Конференция “Галактики привычные и неожиданные”, Ростов-на-Дону, 6–8 мая 2013, *О структуре Malin 2*, Каспарова А. В., Сабурова А. В.,

- Катков И. Ю., Чилингарян И. В. и Бизяев Д. В. (доклад);
3. Мини-симпозиум “Научная программа миссии Миллиметрон”, 10 апреля 2013, Пущино, *Холодный газ и пыль в далеких от центра областях галактических дисков*, Засов А. В., Каспарова А. В. (доклад);
 4. XXIX конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, 17–19 апреля 2012, *Атомарная и молекулярная газовые компоненты в спиральных галактиках скопления Virgo*, Каспарова А. (доклад);
 5. Конференция “Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы”, Москва, 28.05–01.06.2012, *О возможности большого времени жизни молекулярных облаков*, Каспарова А. В., Засов А. В. (доклад);
 6. XXV конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, 22–24 апреля 2008 г., *Давление равновесной межзвездной среды в галактических дисках*, Каспарова А. В. (доклад);
 7. Всероссийская астрономическая конференция “Космические рубежи XXI века”, Казань, 17–22 сентября 2007, *Давление равновесной межзвездной среды в галактических дисках*, Каспарова А. В., Засов А. В. (доклад);
 8. Конференция “Субпарсековые структуры в МЗС”, Москва, 4–5 июля 2007 г., *Равновесное давление и относительная масса молекулярного газа в дисках галактик*, Засов А. В., Каспарова А. В. (доклад);
 9. XXII конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, 16–18 июля 2005 г., *Свойства галактик с преобладанием молекулярного газа*, Каспарова А. В., Засов А. В. (доклад).
- Выступления на астрофизических семинарах: отдела внегалактической астрономии (СОВА) ГАИШ МГУ (06.04.2012, 15.11.2012, 19.11.2012 и др.), ВолГУ, НИВЦ МГУ, молодежных научных семинарах ИНАСАН и ГАИШ МГУ.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах:

1. Kasparova A., Saburova A., Katkov I., Chilingarian, I. and Bizyaev D., *The portrait of Malin 2: a case study of a giant low surface brightness galaxy*, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 2014, Vol. 437, Issue 4, pp. 3072–3086;
2. Каспарова А. В., *Атомарная и молекулярная газовые компоненты в спиральных галактиках скопления Девы*, **Письма в астрономический журнал**, 2012, том 38, No 2, с. 83–94;
3. Каспарова А. В. и Засов А. В., *Давление равновесной межзвездной среды в галактических дисках*, **Письма в астрономический журнал**, 2008, том 34, No 3, с. 174–184;
4. Каспарова А. В. и Засов А. В., *Галактики с аномально высоким содержанием молекулярного водорода*, **Астрономический журнал**, 2006, том 83, No 8, с. 703–715.

Статья, выложенная в архив препринтов astro-ph:

11. Kasparova A., Zasov A., *On the possibility of the long lifetime of molecular clouds*, arXiv:1210.5738;

Статьи в сборниках трудов конференций:

5. Каспарова А., Сабурова А., Катков А., Чилингарян И., Бизяев Д., *Портрет Malin 2*, HEA–2013: Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, 23–26 декабря 2013, ИКИ РАН;
6. Saburova A. S., Kasparova A. V., Katkov I. Y. et al., *On the general structure of giant low surface brightness galaxy Malin 2*, IAU Symposium Ed. by D. Thomas, A. Pasquali, I. Ferreras., vol. 295 of IAU Symposium, 2013, p. 236;
7. Kasparova A., *Atomic and molecular gas components in spiral galaxies of the Virgo cluster*, Fifty years of Cosmic Era: Real and Virtual Studies

- of the Sky. Conference of Young Scientists of CIS Countries, Ed. by A. M. Mickaelian, O. Y. Malkov, N. N. Samus, 2012, pp. 175–180;
8. Kasparova. A. V., *The features of gas component in spiral galaxies of the Virgo cluster*, JENAM-2011: European week of astronomy and space science, Saint Petersburg, Russia, July 4–8, 2011, p. 140;
 9. Засов А. В., Каспарова А. В., *Равновесное давление и относительная масса молекулярного газа в дисках галактик*, труды конф. Субпарсекковые структуры в МЗС, изд. РСЭИ, 2010, под ред. Н. Г. Бочкарева и Ю. А. Щекинова, стр. 23–37;
 10. Каспарова А. В., Засов А. В., *Давление равновесной межзвездной среды в галактических дисках*, труды Всероссийской астрономической конференции “ВАК-2007”, изд. Казанского государственного университета, 2007, под ред. Сахибуллина Н. А., Нефедьева Ю. А., Ишмухаметова М. Г., стр. 407–408;

Вклад автора в совместных работах

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач и формулировке выводов из проделанной работы. Автором диссертации был проведен статистический анализ характеристик галактик выборки с аномально высоким содержанием молекулярного газа. Соискатель самостоятельно разработал пакет программ, используемый для исследования баланса газовых составляющих, позволяющий оценивать толщины, объемные плотности компонентов дисков галактик и газовое давление. Исследование межзвездной среды галактик скопления Virgo целиком проведено автором диссертации. В работе, посвященной гигантской галактике Malin 2 автору принадлежит анализ причин видимого нарушения баланса газовых компонентов, особенностей звездообразования и вероятной эволюционной модели галактики. Идея о возможности долгого времени жизни молекулярных облаков принадлежит А. В. Засову, работа над доказательной базой и приведенные в диссертации оценки сделаны нами совместно. Подготовка к публикации полученных результатов всех статей проводилась совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 150 страниц, включая 24 рисунка и 8 таблиц. Список используемой литературы включает 241 наименование на 17 страницах.

Во **введении** приведен обзор научных источников по рассматриваемой проблеме, обсуждаются актуальность работы, цели и задачи исследования, новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются положения, выносимые на защиту, и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена исследованию баланса газовых компонентов в межзвездной среде и разделена на три смысловые части.

В первой части этой главы рассматривается выборка галактик из каталога межзвездной среды Беттони с соавторами (CISM) [2] с аномально высокими оценками соотношения масс газовых компонентов $M_{\text{H}_2}/M_{\text{HI}} > 2$. Анализ данных показал, что объекты выборки не имеют больших систематических отличий от других галактик каталога тех же морфологических типов по фотометрическим характеристикам, по скорости вращения и содержанию пыли, а также по интегральной массе газа для галактик с тем же угловым моментом диска. Последнее говорит о том, что избыток H_2 связан с молекуляризацией HI , а не с потерей HI или аккрецией дополнительного холодного газа извне. Среди галактик, имеющих оценки M_{H_2} в CISM, чаще встречаются объекты с барами и активными ядрами. Для нескольких объектов выборки высокое значение $M_{\text{H}_2}/M_{\text{HI}}$ связано с переоценкой M_{H_2} , возможно, из-за низкого фактора конверсии. В этом разделе первой главы аргументируется предположение о том, что причинами молекуляризации основной массы газа могут являться повышенная сконцентрированность газа во внутренних областях галактических дисков и связанные с этим факторы: высокое давление газа и относительно низкая эффективность звездообразования $M_{\text{H}_2}/L_{\text{FIR}}$, которая может свидетельствовать о более длительном нахождении газа в молекулярной форме. Показана необходимость изучения локальных (не усредненных по всему диску галактики) характеристик межзвездной среды для объяснения

нарушения газового баланса.

Во второй части первой главы приводится методика оценки профилей газового турбулентного давления в рамках трехкомпонентной осесимметричной модели (звезды, HI и H₂) для ряда хорошо изученных близких галактик. Для этой цели решается самосогласованная система уравнений с учетом собственной гравитации газа и наличия псевдоизотермического гало темной материи, при этом на выходе получаются профили объемных плотностей и толщин дисков всех компонентов. Входными данными модели являются параметры гало, радиальные профили поверхностных плотностей компонентов диска и дисперсии турбулентных скоростей, которые для HI и H₂ считаются фиксированными, а для звездного диска — соответствующими его граничной гравитационной устойчивости. В качестве альтернативы рассматривается также модель с постоянной толщиной звездного диска. Проводится сравнение с широко используемым упрощенным способом оценки давления. Исследование чувствительности полученного метода к входящим параметрам на примере галактики M 33 показало, что результат сильнее всего реагирует на вариации звездной дисперсии скоростей.

Отдельный интерес представляло применение описанной выше методики для галактик скопления, поскольку учет влияния самогравитации газа и темного гало особо заметен на периферии дисков, наиболее подверженной влиянию окружения. В третьей части этой главы в рамках двух подходов [3,1] исследовалось соотношение молекулярного и атомарного газа в 18 галактиках скопления Virgo в сравнении с 12 галактиками поля. Члены скопления обладают, в среднем, более высокой долей молекулярного газа по отношению к атомарному $\eta \equiv \Sigma_{\text{H}_2}/\Sigma_{\text{HI}}$ для данных значений равновесного турбулентного давления P , которая не может быть объяснена наблюдаемой низкой суммарной поверхностной газовой плотностью и несколько повышенной металличностью в их дисках.

Было показано, что для большей части галактик Virgo наблюдаемую повышенную долю H₂ на периферии дисков можно объяснить тем, что молекулярный газ образовался тогда, когда HI еще не был выметен лобовым (динамическим) давлением межгалактической среды скопления. Причем избыток H₂

по сравнению с HI означает, что временная шкала разрушения/расходования молекулярных облаков не меньше характерного времени движения галактики сквозь плотную область скопления. Было также аргументировано, что для четырех галактик Virgo вероятными причинами высокой доли H_2 в центрах их дисков могут являться либо лобовое давление при специфических параметрах их траектории движения, либо наличие бара, приводящие к сильному сжатию газа и его молекуляризации. Только для этих объектов высокая относительная доля молекулярного газа может быть связана с низкими темпами звездообразования. Также показано, что несколько галактик, помимо лобового, могли испытывать и действие статического давления межгалактической среды, приведшее к наблюдаемому резкому возрастанию доли H_2 на самой периферии их дисков.

Глава 2 посвящена исследованию галактики низкой поверхностной яркости (LSB) Malin 2, являющейся своеобразным вызовом *стандартной* теории эволюции галактик, поскольку огромная масса $\sim 2 \cdot 10^{12} M_\odot$ этой *дисковой* галактики должна была сформироваться без каких-либо больших слияний (major merging) в прошлом. Идея исследования состоит в создании согласованной картины этой экзотической галактики с использованием новых оптических мультиволновых фотометрических и спектроскопических наблюдений на обсерватории Апач Пойнт (Apache Point observatory), архивных данных Gemini и фотометрических обзоров. Для этой цели была построена модель распределения массы Malin 2, оценены вклад темного гало и его свойства (крайне низкая центральная плотность $\simeq 0.003 M_\odot/\text{пк}^3$ и огромный радиус ядра 27.3 кпк в модели псевдоизотермической сферы), приобретенные еще до формирования дисковой подсистемы этой галактики. Еще одним из уникальных свойств этой гигантской галактики является *видимое* нарушение баланса в межзвездной среде, а именно: избыток молекулярного газа по отношению к атомарному для данных величин газового турбулентного давления. Этот факт можно объяснить наличием значительной доли *темного газа*, ненаблюдаемого в линиях CO и 21 см. Также мы не нашли оснований считать для этой галактики звездную начальную функцию масс нестандартной. Результа-

ты проведенного нами анализа данных говорят о том, что особенности галактики Malin 2 можно объяснить ее массивным и разреженным темным гало и нет необходимости привлекать дополнительные катастрофические сценарии, часто рассматриваемые для объяснения природы гигантских LSB галактик.

В **Главе 3** приведены аргументы в пользу того, что существенная доля молекулярных облаков может избегать разрушения по крайней мере 10^8 лет или даже дольше, хотя обычно предполагается, что время жизни молекулярных облаков не превышает $3 \cdot 10^7$ лет вследствие отклика на звездообразование (stellar feedback). Факты, это поддерживающие, включают в себя присутствие молекулярного газа в на перифериях дисков при низкой плотности газа и звездообразование в приливных структурах и межгалактическом пространстве. Было показано, что молекулярное облако может быть долгоживущим в случае низкой вероятности рождения массивных звезд, если облако имеет небольшую массу или нестандартную (top-light) начальную функцию масс звезд. Еще одна возможность объяснения долгоживучести — это замедление фазы сжатия облака магнитным полем, держащим его в докритическом состоянии до тех пор, пока амбиполярная диффузия не ослабит магнитный поток. Было показано, что магнитное поле может играть существенную роль для облаков разреженного *темного газа*, невидимого в линиях CO.

В **заключении** обсуждаются основные результаты диссертации и дальнейшие перспективы исследований.

Цитированная литература

1. Krumholz M. R., McKee C. F., Tumlinson J. *The Atomic-to-Molecular Transition in Galaxies. II: HI and H₂ Column Densities*, *Astrophys. J.* 2009. Vol. 693, p. 216—235;
2. Bettoni D., Galletta G., Garcia-Burillo S. *A new catalogue of ISM content of normal galaxies*, *Astron. and Astrophys.*, 2003, Vol. 405, p. 5—14;
3. Blitz L., Rosolowsky E. *The Role of Pressure in GMC Formation II: The H₂ — Pressure Relation*, *Astrophys. J.*, 2006, Vol. 650, p. 933—944.