

УДК: 524.726

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ОБЛАКОВ В ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

Е. В. ВОЛКОВ

Поступила 5 декабря 2003

Принята к печати 19 мая 2004

Рассмотрены ограничения, накладываемые сдвиговой неустойчивостью на образование гигантских молекулярных облаков в центральных областях спиральных галактик. Полученные критерии проиллюстрированы на примере шести галактик, для которых известны детальные кривые вращения. Сделан вывод о различных механизмах образования молекулярных облаков, действующих в центральной и периферийной областях дисковых галактик.

1. *Введение.* В настоящее время в астрофизике общепризнанным является тот факт, что звездообразование в спиральных галактиках тесно связано с холодными областями с высокой плотностью газа - гигантскими молекулярными облаками (ГМО). Вместе с тем, выводы относительно механизмов, приводящих к образованию подобных объектов, не столь однозначны. Нет единого мнения и по вопросу о времени жизни ГМО, а также по деталям тех процессов, благодаря которым в конечном итоге на месте родительского облака возникают со временем звездные скопления и группы скоплений.

Другой, не менее интересной задачей является разрешение многочисленных вопросов, связанных с радиальным распределением молекулярного газа в дисках различных спиральных галактик. Совершенно очевидна важность понимания закономерностей, приводящих к тому или иному распределению холодного газа вдоль радиуса хотя бы потому, что именно оно и определяет радиальное распределение вновь возникающих звезд в галактиках. В начале 80-х годов наблюдения, проведенные при помощи радиотелескопов с диаметром порядка 10 метров, показали, что у ряда спиральных галактик, в основном позднего типа, наблюдается пик излучения в центральной области и дальнейшее экспоненциальное уменьшение поверхностной плотности молекулярного газа [1-4]. В то же время, у некоторых галактик наблюдался, наоборот, провал в распределении такого газа в центре [5]. Наконец, у других спиральных галактик, помимо центрального, наблюдался еще один пик в распределении молекулярного газа по радиусу на некотором расстоянии от центра [6,7] (следует отметить,

что подобная закономерность характерна и для нашей Галактики - см., например, [8]). В обзорах появились первые классификации галактик по типу наблюдаемого в них распределения молекулярного газа [9].

За последние 20 лет предпринимались многократные попытки объяснить как кольцевое распределение ГМО в Галактике, так и различные распределения молекулярного газа в других галактиках. Среди предлагавшихся механизмов перестройки структуры холодного компонента дисков галактик предлагались: динамическое трение [10,11], вязкость [12-14], одновременное действие динамического трения и вязкости [15,16], исчерпание газа во внутренних областях галактик на образование балджа [2]. Несмотря на интересные результаты, полученные в рамках перечисленных моделей, основной вопрос - о природе наблюдаемого распределения ГМО в спиральных галактиках - остался пока без ответа.

Картина несколько прояснилась (хотя вместе с тем и усложнилась) благодаря новым наблюдениям, проведенным на 45-м радиотелескопе NRO японскими астрофизиками [17,18]. Как совершенно справедливо было подчеркнуто в этих работах, полноценное исследование пространственного распределения молекулярного газа в спиральных галактиках, расположенных вне пределов Местной группы, и построение более-менее надежной классификации, основанной на подобных наблюдениях, невозможно на инструментах с диаметром порядка 10 метров. Дело в том, что они имеют угловое разрешение около  $1'$ , что для расстояний 10 Мпк дает пространственное разрешение примерно 3 клк. Разрешение же, достигаемое в [17,18], примерно в 4 раза выше, поэтому результаты, полученные в этих работах, по сути, дают нам впервые возможность полноценного анализа распределения холодного газа в дисках спиральных галактик. Что не менее важно, законы пространственного распределения молекулярного газа в галактиках в [17,18] сопоставляются с кривыми вращения этих галактик. Основной вывод, сделанный в [18], состоит в том, что главным фактором, определяющим тот или иной профиль распределения  $H_2$  в спиральных галактиках, является наличие или отсутствие у дисковой галактики бара.

В настоящей работе мы проанализируем некоторые важные ограничения, накладываемые формой кривой вращения спиральной галактики на структуру ГМО и на саму возможность формирования облаков тех или иных масс в различных областях галактики. В конце статьи мы обсудим следствия этих ограничений и результатов упомянутых выше работ на закон распределения молекулярного газа в дисках спиральных галактик.

**2. Влияние сдвиговой неустойчивости на образование ГМО.** Сдвиговая неустойчивость, непосредственно связанная с видом кривой вращения в галактике и возникающая только при наличии дифференциального вращения, заметным образом влияет на возможность существования

ГМО как когерентных структур. Если силы, вызванные наличием дифференциального вращения, на характерных пространственных масштабах порядка размеров облака превосходят гравитационные силы, удерживающие облако как единое целое, то облака таких размеров (и соответствующих масс) не выживают. Это может существенным образом сказаться на спектре масс ГМО и в конечном счете на интенсивности звездообразования.

Условие устойчивости облака по отношению к сдвигу можно записать следующим образом (см., например, [19]):

$$\frac{GM_{cl}}{R^2} > 2\omega R \left[ \omega - \left( \frac{dv}{dr} \right) \right], \quad (1)$$

здесь  $R$  - радиус облака,  $r$  - расстояние от центра галактики до центра облака,  $\omega$  - угловая скорость,  $v$  - линейная скорость вращения на расстоянии  $r$  от центра галактики,  $M_{cl}$  - масса облака. Данный критерий применялся ранее при оценке значимости сдвиговой неустойчивости в спиральных галактиках. Однако следует заметить, что переход к поверхностной плотности межзвездного газа с использованием критерия (1), как это сделано в работе [20], недопустим: поверхностная плотность оперирует с интегральными характеристиками газа вдоль луча зрения независимо от того, облака каких размеров и масс при этом вносят в нее вклад. Критерий же должен применяться к отдельным облакам, а не к межзвездной среде в целом.

Нетрудно видеть, что в предположении о независимости плотности облака  $\rho_{cl}$  от его массы из приведенного выше критерия исчезает радиус облака:

$$\rho_{cl} > \frac{3\omega}{2\pi G} \left[ \omega - \left( \frac{dv}{dr} \right) \right]. \quad (2)$$

В этом случае получается, что облака любой массы (размера), для которых это неравенство выполняется, устойчивы по отношению к галактическому сдвигу. Наблюдательные данные [21-24], однако, говорят о том, что в молекулярных облаках разных масс постоянной является не пространственная плотность, а лучевая концентрация:  $\rho_{cl} R = C$ , где  $C = \text{const}$ . В этом случае получаем следующее ограничение:

$$C > \frac{3\omega R}{2\pi G} \left[ \omega - \left( \frac{dv}{dr} \right) \right], \quad (3)$$

или

$$R < \frac{2\pi GC}{3\omega} \left[ \omega - \left( \frac{dv}{dr} \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Для оценки значимости полученного ограничения рассмотрим весьма упрощенную кривую вращения галактики, состоящую из двух участков: участка твердотельного вращения, а затем - участка постоянной линейной

скорости вращения ( $v = v_p = \text{const}$ ). Кривые вращения реальных галактик очень схематично могут быть представлены в виде последовательности двух указанных участков. Очевидно, что на первом из них ограничение (4) будет выглядеть так:  $R < \infty$ . Иными словами, на участке твердотельного вращения выживают все облака. Этого, естественно, следовало ожидать, так как на этом участке сдвиг просто отсутствует. Для второго участка получаем неравенство:

$$R < \frac{2\pi GC}{3\omega^2} \quad (5)$$

или

$$R < \frac{2\pi GC r^2}{3v_p^2}. \quad (6)$$

Посмотрим на частном примере к чему приводит выполнение данного неравенства. Пусть при  $R = 50$  пк,  $n_{cl} = 50 \text{ см}^{-3}$  ( $n_{cl}$  - концентрация частиц в облаке). Эти параметры соответствуют массе облака порядка  $10^6 M_\odot$ . Если для скорости вращения принять значение  $v_p = 250 \text{ км/с}$ , то получим ограничение сверху на радиус облака:

$$R < 10 r_1^2 \text{ пк}, \quad (7)$$

где  $r_1$  - расстояние от центра галактики в килопарсеках. Таким образом, в приближении постоянной лучевой концентрации для ГМО на расстоянии в 1 кпк от центра галактики при выбранных значениях параметров под действием галактического сдвига не выживают облака с массой  $M > 3 \cdot 10^4 M_\odot$ . Облака же с массой  $10^6 M_\odot$  - наиболее массивные в ансамбле ГМО - могут существовать только начиная, примерно, с расстояния в 2 кпк. Следует принять во внимание, что найденное ограничение в действительности является еще более строгим, так как гравитационная энергия облака "тратится" еще и на удержание облака как единого целого.

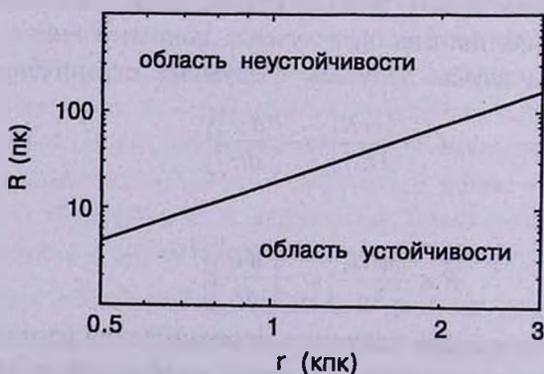


Рис. 1. Зависимость величины предельного радиуса облака от расстояния до центра галактики в предположении постоянной линейной скорости вращения галактики.

Для того, чтобы наглядно продемонстрировать рост максимально возможных с точки зрения устойчивости размера и массы облака с удалением от центра галактики, на рис. 1, 2 представлены графики предельных значений  $R$  и соответствующих им  $M_d$  в зависимости от  $r$ . При этом выбраны следующие значения параметров:  $R = 30$  пк,  $n_d = 100 \text{ см}^{-3}$ ,  $v_p = 250 \text{ км/с}$ . На каждом из графиков области устойчивости расположены под прямой.

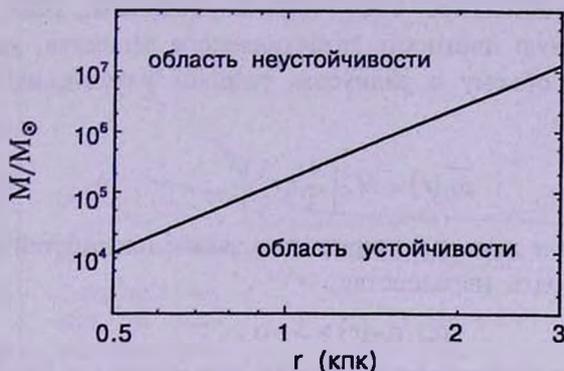


Рис. 2. Зависимость величины предельной массы облака от расстояния до центра галактики в предположении постоянной линейной скорости вращения галактики.

Приведем несколько интересных соотношений, вытекающих из обсуждаемого критерия и позволяющих немного по-иному взглянуть на суть механизма сдвиговой неустойчивости. Воспользуемся для этого исходным соотношением (2). При этом, конечно, будем учитывать то, что плотность молекулярного газа может меняться в зависимости от массы облака. Предположим также, что полная масса галактики возрастает с удалением от центра по закону:

$$M_G \propto r^{\alpha}. \quad (8)$$

Значению параметра  $\alpha = 3$  соответствует зона твердотельного вращения и не меняющейся с  $r$  плотности галактического вещества  $\rho_G$ , а значению  $\alpha = 1$  - зона постоянной линейной скорости вращения и плотности, убывающей по закону  $r^{-2}$ . Последнее приближенное соотношение позволяет нам получить связь между минимальной плотностью все еще устойчивого облака и линейной скоростью вращения в галактике на расстоянии  $r$  от центра:

$$\rho_{cl} > \frac{3(3 - \alpha) v^2}{4\pi G r^2} \quad (9)$$

или, приводя все к характерным для рассматриваемой задачи величинам,

$$n_{cl} > 10(3 - \alpha) \frac{v_{100}^2}{r^2}, \quad (10)$$

где  $n_d$  - концентрация частиц в облаке,  $v_{100}$  - скорость вращения в единицах 100 км/с,  $r_1$  - расстояние от центра, выраженное в килопарсеках. Из последнего неравенства явно видно, что чем ближе к центру галактики, чем выше скорость вращения и чем сильнее отличие локального закона вращения от твердотельного, тем более жесткие требования неустойчивость накладывает на параметры облака.

Еще одно любопытное соотношение получим, если введем в рассмотрение полную плотность галактического вещества, усредненную по сферическому объему с радиусом, равным расстоянию облака от центра галактики:

$$\overline{\rho_G}(r) = M_G \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right)^{-1}. \quad (11)$$

Тогда отношение двух характеристик в задаче плотностей  $\rho_{cl}$  и  $\overline{\rho_G}(r)$  должно удовлетворять неравенству:

$$\rho_{cl} / \overline{\rho_G}(r) > 3 - \alpha, \quad (12)$$

или, переходя к концентрациям и считая, что частица в ГМО в среднем вдвое тяжелее частицы галактического вещества, получим:

$$2 n_{cl} / \overline{n_G}(r) > 3 - \alpha. \quad (13)$$

Еще раз подчеркнем, что в последнем соотношении величина  $n_{cl}$  относится к отдельному облаку, а  $\overline{n_G}(r)$  - характеризует усредненную по объему  $\propto r^3$  концентрацию вещества галактики.

**3. Критерий устойчивости на примере нескольких конкретных галактик.** Неравенства (5)-(7) и (9)-(13), приведенные в предыдущем разделе, используют то или иное предположение относительно вида кривой вращения  $v(r)$ . Вместе с тем, было бы интересно посмотреть, как критерий устойчивости (4) ограничивает параметры ГМО в реальных галактиках, для которых есть данные по кривым вращения, в особенности в центральных областях. В последние годы радионаблюдения позволили построить такие кривые для нескольких десятков относительно близких объектов. Так, например, в [25,26] приведены подробные кривые вращения для 52 спиральных галактик. Авторы этих работ особое внимание обращают на то, что в подавляющем большинстве галактик, которые они проанализировали, кривая вращения резко поднимается уже в самой центральной области галактики (100-500 пк), достигает максимума, а после этого часто имеет либо локальный минимум, либо выходит на плато.

Подобное поведение кривой вращения в области, непосредственно примыкающей к центру галактики, создает весьма благоприятные условия для развития сдвиговой неустойчивости. В качестве примера нами были выбраны 6 объектов (включая и нашу Галактику), для которых были

построены кривые, выделяющие по массе облака области устойчивости в зависимости от расстояния до центра галактики. При этом считалось, что ГМО с массой  $10^6 M_{\odot}$  имеют концентрацию  $30 \text{ см}^{-3}$  и у облаков разных масс постоянна лучевая концентрация. Кривые вращения для выбранных галактик приведены на рис.3, а результаты расчета с использованием критерия (4) - на рис.4.

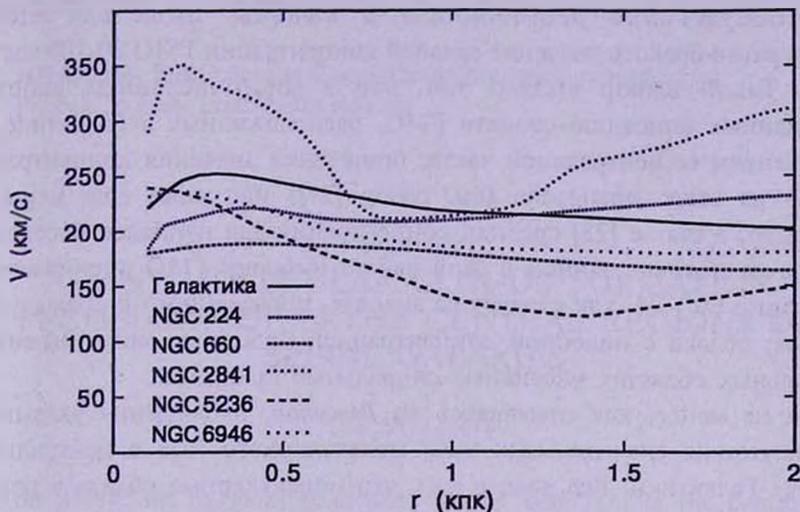


Рис.3. Кривые вращения галактик из используемой выборки по данным работы [26].

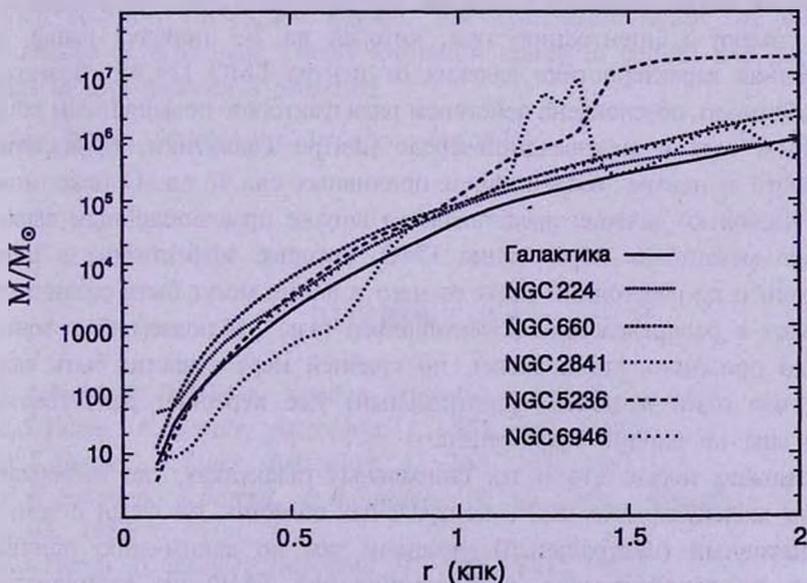


Рис.4. Зависимость величины предельной массы облака от расстояния до центров галактик из используемой выборки.

Мы видим, что для выбранного нами значения концентрации наиболее массивных ГМО, в пределах области с размером в 1 кпк от центра для всех галактик из нашей выборки не могут существовать облака с массами  $10^5 M_{\odot}$  и более, а облака с массами  $10^6 M_{\odot}$  не выживают в области с размером примерно 2 кпк вокруг центра для пяти из шести использованных в качестве примера галактик.

4. *Обсуждение результатов и выводы.* Выше для оценок неоднократно бралось значение средней концентрации ГМО 30-100 частиц в  $\text{см}^3$ . Такой выбор вызван тем, что в многочисленных работах, посвященных описанию свойств ГМО, расположенных в Галактике, за исключением ее центральной части, приводятся значения концентрации именно из этого диапазона (см. обзор [27]) или даже еще меньшие (например, в статье [28] средняя концентрация для наиболее массивных облаков из использованной в этой работе выборки ГМО оценивается в 18 частиц в  $\text{см}^3$ ). И, как следует из анализа, проведенного в предыдущих разделах, облака с подобной концентрацией просто не могут выжить в центральных областях массивных спиральных галактик.

Тем не менее, как отмечалось во *Введении*, наблюдения указывают на присутствие значительных масс молекулярного газа в центральных областях Галактики. Все дело в том, что молекулярные облака в центре Галактики по своим свойствам заметно отличаются от облаков молекулярного газа, расположенных в основном теле Галактики. Главное отличие, на которое мы хотим обратить внимание, заключается в том, что центральные облака имеют концентрацию газа, которая на 2-3 порядка выше, чем аналогичная характеристика далеких от центра ГМО [29,30]. Возможно, эта особенность обусловлена действием ряда факторов: повышенным общим давлением газа в межзвездной среде центра Галактики, проявлением активности в центре, воздействием приливных сил и т.д. Однако можно пойти несколько дальше: представляется вполне правдоподобным вывод о том, что механизмы образования ГМО, которые эффективны в центре Галактики и на расстоянии 2 кпк от него и далее, могут быть различными. И провал в распределении молекулярного газа, наблюдаемый в зоне от 2 кпк до примерно 4 кпк, может, по крайней мере отчасти, быть связан с тем, что один механизм (центральный) уже перестает действовать, а другой еще не вполне эффективен.

Возможно также, что в тех спиральных галактиках, где наблюдается дефицит молекулярного газа в центральных областях, он связан с тем, что альтернативный (центральный) механизм там по каким-либо причинам вообще не задействован, а формирование ГМО по стандартному (характерному для периферийных областей) сценарию подавлено под влиянием сдвиговой неустойчивости. Как бы там ни было, проведенный

анализ позволяет сделать вывод о том, что существование крупномасштабных когерентных структур (ГМО и газо-пылевые комплексы, окруженные оболочкой нейтрального водорода), характерных для нецентральных областей дисков галактик, существенно ограничивается действием сдвиговой неустойчивости в центрах массивных спиральных галактик.

Работа выполнена при частичной финансовой помощи гранта президента РФ по поддержке Ведущих научных школ НШ-1088.2003.2.

НИАИ им. В.В.Соболева Санкт-Петербургского университета,  
Россия, e-mail: evolk@astro.spbu.ru

## GIANT MOLECULAR CLOUDS FORMATION PECULIARITIES IN THE CENTRAL REGIONS OF SPIRAL GALAXIES

E.V.VOLKOV

The limitations on giant molecular clouds formation in the central parts of spiral galaxies induced by the shear instability are considered. The obtained criteria are illustrated on the example of six galaxies for which the detailed rotation curves are known. The conclusion about the different mechanisms of molecular clouds formation acting in central and periphery regions of disk galaxies is proposed.

Key words: *molecular clouds: shear instability*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *L.J.Rickard, P.Palmer*, *Astron. Astrophys.*, **102**, L13, 1981.
2. *J.S.Young, N.Scoville*, *Astrophys. J.*, **258**, 467, 1982.
3. *N.Z.Scoville, J.Young*, *Astrophys. J.*, **265**, 148, 1983.
4. *P.M.Solomon, J.Barrett, D.B.Sanders, R. de Zafra*, *Astrophys. J.*, **266**, L103, 1983.
5. *J.S.Young, N.Scoville*, *Astrophys. J.*, **260**, L41, 1982.
6. *F.Verter*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **57**, 261, 1985.
7. *N.Nakai*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, L27, 1992.

8. *W.B.Burton, M.A.Gordon, T.M.Bania, F.J.Lockman*, *Astrophys. J.*, **202**, 30, 1975.
9. *M.Morris, L.J.Rickard*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **20**, 517, 1982.
10. *В.Г.Сурдин*, *Астрон. циркуляр*, N1113, 3, 1980.
11. *В.М.Липунов*, *Астрон. ж.*, **59**, 286, 1982.
12. *V.Icke*, *Astron. Astrophys.*, **78**, 21, 1979.
13. *В.Г.Горбацкий, В.М.Сербин*, *Астрофизика*, **19**, 79, 1983.
14. *M.Fukunaga*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **35**, 173, 1983.
15. *О.К.Сильченко, В.М.Липунов*, *Астрофизика*, **26**, 363, 1987.
16. *О.К.Сильченко, В.М.Липунов*, *Астрофизика*, **26**, 443, 1987.
17. *K.Nishiyama, N.Nakai*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **53**, 713, 2001.
18. *K.Nishiyama, N.Nakai, N.Kuno*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **53**, 757, 2001.
19. *D.Mihalas, P.M.Routly*, "Galactic Astronomy", Freeman, San Francisco, 1968.
20. *J.D.P.Kenney, J.E.Carlstrom, J.S.Young*, *Astrophys. J.*, **418**, 687, 1993.
21. *R.B.Larson*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **194**, 809, 1981.
22. *P.C.Myers*, *Astrophys. J.*, **270**, 105, 1983.
23. *T.Dame, B.G.Elmegreen, R.Cohen, P.Thaddeus*, *Astrophys. J.*, **305**, 892, 1986.
24. *P.M.Solomon, A.R.Rivolo, J.Barrett, A.Yahil*, *Astrophys. J.*, **319**, 730, 1987.
25. *Y.Sofue*, *Astrophys. J.*, **458**, 120, 1996.
26. *Y.Sofue, Y.Tutui, M.Honma et al.*, *Astrophys. J.*, **523**, 136, 1999.
27. *L.Blitz, J.P.Williams*, in "The Origin of Stars and Planetary Systems", Kluwer Academic Publ., 1999, p.3.
28. *P.C.Myers, T.M.Dame, P.Thaddeus et al.*, *Astrophys. J.*, **301**, 398, 1986.
29. *A.Miyazaki, M.Tsuboi*, *Astrophys. J.*, **536**, 357, 2000.
30. *T.Oka, T.Hasegawa, F.Sato et al.*, *Astrophys. J.*, **562**, 348, 2001.