

УДК: 527.7

О ДИНАМИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГАЗА В ГАЛАКТИКЕ

Ю.А.ЩЕКИНОВ

Поступила 25 августа 2003

Принята к печати 10 февраля 2004

Наблюдаемые корреляции ширины линий и характерного размера излучающей области молекулярных облаков, а также чрезвычайно слабая зависимость их поверхностной плотности от размера облака интерпретируется обычно в пользу того, что молекулярные облака в Галактике находятся в вириальном состоянии. В настоящей работе мы приводим аргументы в пользу того, что в вириальном равновесии может находиться не более 30% молекулярного газа, присутствующего в Галактике. Обсуждаются возможные альтернативные причины, обуславливающие наблюдаемые корреляции. Приводятся аргументы в пользу того, что масса молекулярного газа, не пришедшего в вириальное равновесие, может быть сильно недооценена из-за его низкой поверхностной плотности и заниженной концентрации молекул CO.

1. *Введение.* Ларсон [1] впервые обратил внимание на то, что ширина эмиссионных линий молекулярных облаков (МО) коррелирует с размером излучающей области $\sigma(\text{км с}^{-1}) = L(\text{пк})^{0.38}$, а также, что лучевая концентрация водорода для различных облаков остается примерно постоянной $\langle N(\text{H}_2) \rangle = 10^{22} L(\text{пк})^{-0.1} \text{см}^{-2}$. Более поздние исследования подтвердили наличие корреляции $\sigma \propto L^p$ с показателем p , принимаемым в настоящее время равным $p \approx 0.5$ [2,3] (см. также обзор [4]). Естественным предположением, объясняющим наблюдаемые корреляции, было предположение о том, что МО находятся в состоянии вириального равновесия $\sigma^2 = 2GM/R$, где G - гравитационная константа, M - масса облака, R - его радиус, из которого следовало, что при $\sigma \propto L^{0.5}$ его поверхностная плотность $M/R^2 = \text{const}$. В самом деле, при средней плотности в облаках $n_{\text{H}_2} \sim 100 \text{см}^{-3}$ время гравитационного сжатия составляет всего $t_{\text{ff}} \approx 7 \text{Муг}$, что для типичной шкалы времени жизни облака в 10^2Муг является достаточно коротким временем, за которое облако может прийти в состояние динамического равновесия. В настоящее время эта интерпретация широко принята (см. обсуждение в [4]), хотя не может быть признана доминирующей. Вместе с тем при таком подходе остается в стороне одно важное обстоятельство, связанное с эволюционностью МО, т.е. с немгновенностью превращения диффузного (преимущественно атомарного) газа в плотные молекулярные образования. Учет этого обстоятельства может качественно изменить

представление о динамическом статусе молекулярных облаков.

Молекулярное облако с массой $M \sim 10^6 M_{\odot}$ требует для своего образования аккумуляцию диффузного межзвездного газа со средней плотностью $n_0 \sim 1 \text{ см}^{-3}$ [5] из объема с характерным радиусом $R_0 \sim 200 \text{ пк}$. Характерное динамическое время такой области при типичной скорости сжатия $u \sim 10 \text{ км с}^{-1}$ составляет $\sim 200 \text{ Муг}$. Это может рассматриваться как характерное время образования молекулярного облака. Характерное время гравитационного сжатия, соответствующее средней плотности диффузного газа, в 3 раза меньше, однако межзвездный газ в масштабах $L \sim 200 \text{ пк}$ является гравитационно-устойчивым, поэтому в формировании МО принимают участие более медленные течения, такие как неустойчивость Паркера, время которой имеет порядок сотен млн. лет [6]. При последующем сжатии газ проходит две принципиально разные эволюционные фазы: 1) превращение основной части газа в молекулярную форму, и 2) установление вириального равновесия. Поскольку эти фазы определяются существенно разными процессами (первая - соотношением между скоростью образования молекулярного водорода на частицах пыли и разрушением внешним ультрафиолетовым излучением, вторая - соотношением между кинетической энергией тепловых и нетепловых движений и гравитационной энергией), очевидно, что эти фазы требуют разного времени. Таким образом, вопрос о том, являются ли наблюдаемые молекулярные облака вириальными или нет, зависит от того, что происходит быстрее: молекуляризация сжимающего газа или его вириализация. В настоящей работе мы утверждаем, что при типичных условиях в межзвездной среде нашей Галактики газ превращается в молекулярную форму прежде, чем он оказывается в состоянии прийти в вириальное равновесие. Заметим, что при аккумуляции газа в МО ударным сжатием картина принципиально не изменяется, поскольку при этом соотношения между временами молекуляризации газа и его вириализации остаются теми же. При этом, однако, следует иметь в виду, что механизм образования молекулярных облаков ударным обжатием диффузного газа в настоящее время может быть, по-видимому, отвергнут (см. обсуждение в [6]). В следующем разделе мы оцениваем параметры облаков на тех стадиях, когда в них становится возможным образование молекул H_2 ; в разделе 3 кратко обсуждаются возможные причины наблюдаемой корреляции ширина линии-размер для МО; в разделе 4 сформулированы выводы.

2. *Характер молекуляризации газа.* Элмегрин [7] обратил внимание на то, что превращение атомарного газа в молекулярную форму чрезвычайно чувствительно к внешним условиям, таким как давление окружающего газа, поток ультрафиолетового излучения и др. Зависимость доли газа, перешедшего в молекулярную форму от внешних условий,

определяется фактором экранирования, который в нормализованном виде записывается следующим образом [7]

$$S = \left(\frac{Z/\phi_e}{Z_\odot \phi_\odot} \right) \left(\frac{n_e}{n_{c,\odot}} \right)^{5/3} \left(\frac{R_e}{R_{c,\odot}} \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где Z - массовая концентрация металлов в облаке, ϕ_e - поток диссоциирующего излучения на границе облака, n_e - плотность частиц вблизи границы облака (для диффузных облаков, удерживаемых внешним давлением, она совпадает с плотностью газа внутри облака), R_e - радиус облака, $Z_\odot, \phi_\odot, n_{c,\odot} = 60 \text{ см}^{-3}, R_{c,\odot} = 4.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ - соответствующие величины, измеренные для диффузных облаков и межзвездной среды в окрестности Солнца. Доля массы облака, перешедшая в молекулярную форму в предположении о том, что облако поддерживается в равновесии внешним давлением и распределение плотности в нем однородно, определяется выражением [7]

$$\delta_m = \left(\frac{R_M}{R_e} \right)^3 = 1 - \frac{3}{S^{3/2}}, \quad (2)$$

при условии, что $S > 3^{2/3}$. В дальнейшем мы будем понимать под моментом молекуляризации облака состояние, при котором $\delta \geq 0.5$.

Независимо от механизмов, ответственных за аккумуляцию диффузного газа в молекулярные облака, образование МО начинается из состояния со средней плотностью, равной плотности диффузного газа $n_0 \sim 1 \text{ см}^{-3}$ (см. [5]), при этом его текущая плотность и радиус связаны с начальным соотношением $n_0 R_0^3 = n R^3$. Подставляя эти значения в (1), получим условие перехода газа в молекулярную форму в виде

$$\delta_m = 1 - 3.6 \cdot 10^3 \zeta^{-3/2} R^{13/2} M^{-5/2} \geq 0.5, \quad (3)$$

где радиус облака и его масса выражены в пк и M_\odot , соответственно; мы не будем останавливаться здесь на зависимости свойств молекулярных облаков от распространенности тяжелых элементов в них и внешнего поля излучения, т.е. от параметра ζ , которые могут испытывать существенные вариации в диске Галактики, но вместе с тем в последующем обсуждении мы оставляем в явном виде эту зависимость от ζ . Из выражения (3) видно, что момент перехода сжимающегося облака в молекулярную фазу, т.е. такое состояние, когда δ_m становится больше 0.5, зависит от текущего радиуса облака чрезвычайно сильно - рис.1 иллюстрирует эту зависимость. Столь сильная зависимость является отражением чувствительности процесса превращения межзвездного газа в молекулярную форму к поверхностной плотности облака, отмеченной в [7]. Здесь же, на рис.1, тонкими вертикальными отрезками указаны значения вириальных радиусов, соответствующих наблюдаемому соотношению [2]

$$R_v = 4 \cdot 10^{-2} M^{1/2}. \quad (4)$$

Из рис.1 видно, что газ превращается в молекулярную форму задолго до того, как облако достигает вириального равновесия, когда радиус облака в несколько раз превышает вириальное значение. На рис.2 показана

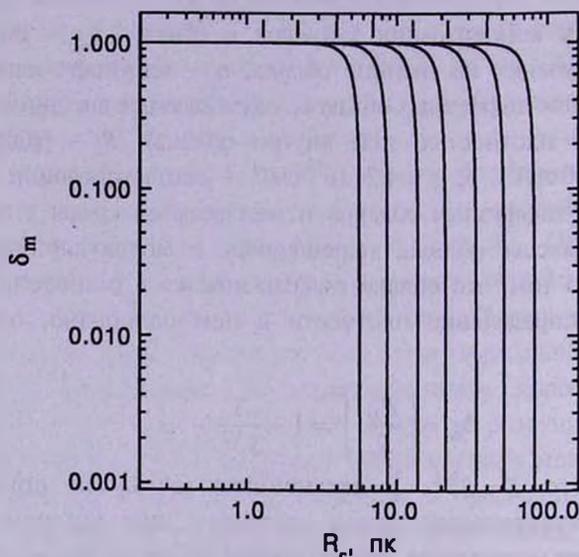


Рис.1. Зависимость фактора молекуляризации облака δ_m от его текущего радиуса, приведенная для нескольких значений массы облака: $M = 10^3, 3 \cdot 10^3, 10^4, 3 \cdot 10^4, 10^5, 3 \cdot 10^5, 10^6 M_\odot$ слева направо; короткими тонкими отрезками в верхней части рисунка показаны значения вириальных радиусов для облака заданной массы, даваемые уравнением (4).

зависимость доли массы облака, перешедшей в молекулярную форму δ_m к тому моменту, когда радиус облака достигает удвоенного вириального радиуса $R_c = 2R_v$. Видно, что в облаках с массами $M < 10^5 M_\odot$ степень молекуляризации газа составляет более 80%. Если процесс образования облаков стационарен, то долю массы газа, почти достигшего вириального состояния (в котором радиусы облаков находятся уже в пределах $R \leq 2R_v$) и все еще не перешедшего в молекулярную форму, можно оценить как

$$\Delta_a = \frac{\int_{M_1}^{M_u} (1 - f_m) M \Phi(M) dM}{\int_{M_1}^{M_u} M \Phi(M) dM} \approx 0.33, \quad (5)$$

где $\Phi(M) = dN/dM$ - спектр масс облаков, $f_m = f_m(2R_v)$. В приведенной оценке мы принимали для $\Phi(M)$ степенную зависимость $\Phi(M) \propto M^{-1.73}$, полученную в [8] для рукава в Персее. Для более пологой, ранее принимаемой, функции масс $\propto M^{-1.5}$ эта величина будет в 1.2 раза выше из-за большего вклада массивных облаков, для которых δ_m к моменту $R_c \sim 2R_v$ меньше. Для нижнего и верхнего пределов интегрирования принимались значения $M_1 = 100 M_\odot$, $M_u = 10^6 M_\odot$. Основной вклад

(90%) в величину Δ_0 вносят массивные облака с $M \geq 3 \cdot 10^5 M_\odot$. Из этих соображений следует, что основная масса (около 70%) молекулярного

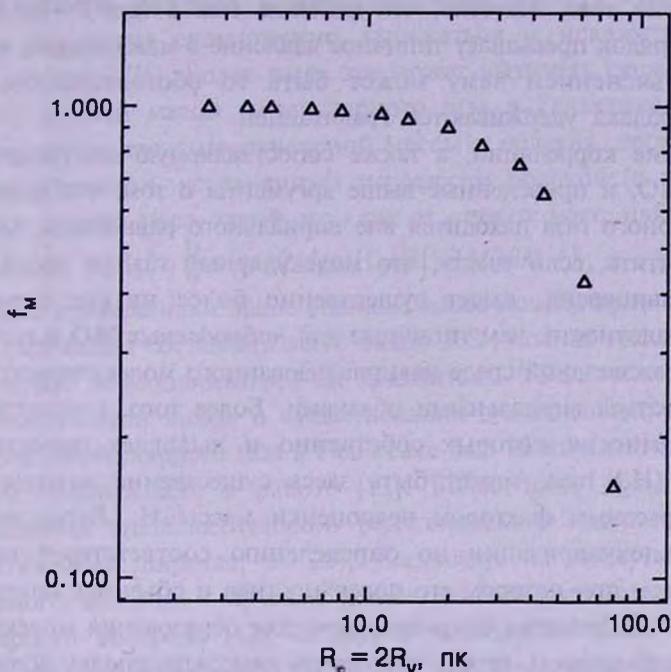


Рис.2. Для молекуляризованного газа к моменту достижения облаком радиуса, равного удвоенному вириальному радиусу (4). Треугольники соответствуют удвоенным радиусам для облаков с массами $M = 10^3, 2 \cdot 10^3, 6 \cdot 10^3, 10^4, \dots, 10^6 M_\odot$.

газа находится вдали от вириального равновесия, т.е. имеет радиус $R > 2R_v$. Характерный радиус облака на момент молекуляризации равен

$$R_m \approx 0.36 \zeta^{3/13} M^{5/13} \text{ пк}, \quad (6)$$

его поверхностная плотность

$$N_m \approx 1.8 \cdot 10^{20} \zeta^{-6/13} M^{3/13} \text{ см}^{-2}, \quad (7)$$

и объемная плотность

$$n_m \approx 173 \zeta^{-9/13} M^{-3/13} \text{ см}^{-3}, \quad (8)$$

которые зависят, хотя и достаточно слабо, от массы облака: для массы $M = 10^6 M_\odot$ дает $N(\text{H}_2) = 4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$, а для $M = 10^3 M_\odot$ - $N(\text{H}_2) = 9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$. Вместе с тем, как отмечалось выше, существующая совокупность данных интерпретируется обычно в пользу того, что *наблюдаемый* молекулярный газ находится в вириальном состоянии. Аргументация этого утверждения основывается на корреляции дисперсии скоростей облаков и их размера $\sigma \propto L^{0.5}$ и практически независимой от размера облака поверхностной плотности $N(\text{H}) \approx 1.5 \cdot 10^{22} L^{0.0 \pm 0.1} \text{ см}^{-2}$ [2]. Предположение о вириальности МО кажется естественным и из общих соображений, поскольку в

подавляющем большинстве молекулярные облака содержат области звездообразования, и, следовательно, должны быть гравитационно связанными. Более того, известно, что давление газа в них $P \sim 10^5 \text{ К см}^{-3}$ более чем на порядок превышает типичное давление в межзвездной среде, возможным объяснением чему может быть то обстоятельство, что молекулярные облака удерживаются гравитацией.

Существующие корреляции, а также сопоставляемую им гипотезу о вириальности МО, и приведенные выше аргументы о том, что основная масса молекулярного газа находится вне вириального равновесия, можно было бы совместить, если учесть, что молекулярный газ, не достигший вириального равновесия, имеет существенно более низкие значения поверхностной плотности, чем типичные для *наблюдаемых* МО и поэтому присутствие в межзвездной среде невириализованного молекулярного газа может маскироваться вириальными облаками. Более того, концентрация молекул CO, эмиссия которых собственно и выявляет присутствие молекулярного (H_2) газа, может быть здесь существенно меньше, что может быть серьезным фактором недооценки массы H_2 . Легко видеть, что момент молекуляризации по определению соответствует такому состоянию облака, при котором его поверхностная и объемная плотности оказываются в соотношении благоприятном для образования молекул H_2 в количестве необходимом, чтобы обеспечить самоэкранировку облака от разрушающего ультрафиолетового излучения. Однако при этом условия для образования молекул CO (как правило более жесткие) не обязательно удовлетворяются. Действительно, расчеты молекулярного равновесия в поверхностных слоях МО показывают, что толщина слоя, экранирующего облако от излучения, разрушающего CO, заметно больше, чем слоя самоэкранировки H_2 [9,10]. Зависимость относительной концентрации молекул CO $X(\text{CO}) = n(\text{CO})/n(\text{H}_2)$ в недрах облака от поверхностной и объемной плотностей может быть представлена следующим аппроксимационным выражением, основанным на расчетах [9,10]:

$$X(\text{CO}) \approx X(\text{CO})_{\infty} \left[1 - \exp \left(- \tau_v \sqrt{\frac{n}{1000}} \right) \right], \quad (9)$$

где τ_v - оптическая толщина в видимой области, $X(\text{CO})_{\infty}$ - значение, соответствующее $\tau \rightarrow \infty$. Очевидно, что для параметров облаков вблизи момента молекуляризации можно воспользоваться разложением экспоненты, что дает $X(\text{CO}) \sim \tau \sqrt{n/1000}$. Таким образом, молекулы CO, наблюдаемые в облаке на момент молекуляризации, представляют лишь малую долю присутствующего в нем водорода

$$\mu(\text{H}_2) \approx \frac{N_m}{2 \cdot 10^{21}} \sqrt{\frac{n_m}{1000}} \approx 0.04 \zeta^{-0.8} M^{2/13}. \quad (10)$$

Это обстоятельство означает, что при наблюдении таких облаков в линиях CO и последующем пересчете массы CO в массу H_2 с использованием стандартного фактора конверсии $N(H_2)/I(CO) = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ с}$, масса H_2 может существенно занижаться и искажать наблюдаемое постоянство $N(H)$. Более того, это может вызывать существенную недооценку полной массы молекулярного газа в Галактике. В самом деле фактор недооценки молекулярной массы в облаках, достигших момента молекуляризации, усредненный по массам облаков (в предположении, что их спектр масс такой же, как и спектр масс наблюдаемых MO) составляет $f(H_2) = \frac{\int \Phi(M) dM / \mu(H_2)}{\int \Phi(M) dM} \approx 5$, а с учетом того, что согласно приведенным выше оценкам масса молекулярного вириализованного газа может составлять всего около 30%, полная масса молекулярного газа может недооцениваться на множитель ≈ 3.5 .

Аналогичный вывод о существовании значительной массы ненаблюдаемого молекулярного газа в Галактике был независимо сделан на основе других соображений в работе [11]. Более того, прямые наблюдения поглощения внегалактического рентгеновского излучения на больших галактических широтах, $b > 25^\circ$, указывают на присутствие там молекулярного водорода с лучевой концентрацией того же порядка, что и у атомарного водорода [12]. В других галактиках, таких как M51, M83, также существуют указания на то, что при втекании в спиральный рукав, где согласно общепринятому пониманию происходит превращение атомарного водорода в молекулярный, газ уже является молекулярным [13,14], хотя его присутствие между рукавами не обнаруживается непосредственными наблюдениями CO. Если так, то в соответствии с приведенными выше оценками - это газ, прошедший стадию молекуляризации и эволюционирующий к состоянию с более высокой плотностью, и возможно к вириальному равновесию.

3. *Обсуждение.* Существующие наблюдательные данные все еще оставляют возможность того, что соотношение ширина линии-линейный размер определяется не вириальным состоянием молекулярных облаков, а целым рядом других причин, связанных как с особенностями наблюдения молекулярного газа в Галактике (см. детальное обсуждение в обзоре [15]), так и с динамическими свойствами облаков как таковых, в частности, характером турбулентных движений в них. Ширина наблюдаемой линии определяется одномерной дисперсией скоростей, квадрат которой находится интегрированием по массе облака (см. [4])

$$\sigma^2 = \frac{1}{M} \int \left(c_s^2 + \frac{1}{3} v^2 \right) dM, \quad (11)$$

где $dM = 2\pi m q d q dN(H)$ включает интегрирование вдоль заданного луча

зрения по лучевой концентрации и по поверхности облака в картинной плоскости, q - прицельный параметр, соответствующий лучу зрения, вдоль которого выполняется усреднение по $N(H)$, m - средняя масса частиц газа, c_s - локальная скорость звука, v - локальная скорость нетепловых движений. Как правило, нетепловые движения в молекулярных облаках существенно сверхзвуковые, поэтому основной вклад в σ вносит второе слагаемое в (11). Если предположить, что спектр турбулентных движений имеет степенной закон $v \sim l^\alpha$ (для несжимаемой жидкости $\alpha = 1/3$), то очевидно, что наибольший вклад в интеграл будут вносить возмущения, размер которых близок к локальному значению радиуса облака, поэтому из (11) следует $\sigma \propto (R/l_d)^\alpha$, где l_d - масштаб диссипации турбулентных движений. В недавней работе [16] показано, что в замагниченных молекулярных облаках альфвеновская турбулентность демонстрирует такие же статистические свойства и масштабные преобразования, что и турбулентность в несжимаемой жидкости, поэтому для молекулярных облаков можно принять $\alpha = 1/3$. С другой стороны, если диссипация определяется вязкими эффектами, то $l_d \propto \rho^{-1}$ и поэтому для облака со стратифицированной плотностью $\rho \propto r^{-\beta}$ выражение (11) дает $\sigma \propto R^{\alpha+\beta/2}$, так что наблюдаемая корреляция (σ, R) может в принципе быть обусловлена только турбулентными движениями.

В последнее время справедливость предположения о вириальности облаков обсуждается и с другой точки зрения. Теорема вириала основана на постоянстве момента инерции $I_{ik} = \int r_i r_k dm : \ddot{I}_{ik} = 0$, что подразумевает отсутствие несимметричных движений, вызывающих перераспределение вещества. В случае турбулентных молекулярных облаков обычно предполагается (см. обсуждение в [4]), что на характерных временах жизни облака величина \ddot{I}_{ik} претерпевает достаточно быстрые осцилляции в ту и другую сторону, что в среднем зануляется. Однако численные эксперименты последнего времени показали, что характерное время перераспределения массы в турбулентных молекулярных облаках сравнимо с характерным временем жизни всего облака, поэтому само исходное предположение о вириальном состоянии к ним неприменимо [17-19].

4. *Заключение.* Выводы, которые могут быть сделаны из приведенного выше рассмотрения состоят в следующем:

Основная часть молекулярного газа Галактики (70% по массе) не входит в состав вириально равновесных облаков. Около 90% такого газа приходится на массивные облака с массами $M > 3 \cdot 10^5 M_\odot$. Поверхностные и объемные плотности молекулярных облаков, не пришедших в вириальное равновесие таковы, что облака способны сформировать самоэкранирующий слой, защищающий молекулы H_2 от разрушения. Однако образование молекул CO в этих условиях все еще затруднено, так что полная масса

H_2 может в таких облаках существенно недооцениваться. В целом по Галактике масса молекулярного газа может в 3.5 раза превосходить массу, наблюдаемую в МО.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект N 02-02-17642), INTAS (проект N 99-1667) и немецким научным обществом, DFG (проект SFB N591, TP A6). При выполнении работы была использована база данных NASA's Astrophysics Data System Abstract Service.

Ростовский государственный университет, Ростовское отделение Чилийского института И.Ньютона, Россия
Астрономический институт Рурского университета, Бохум, Германия, e-mail: yus@phys.rsu.ru

ON DYNAMICAL STATE OF MOLECULAR GAS IN THE GALAXY

Yu.A.SHCHEKINOV

Observational correlation between the line-width and the size of the emitting region in molecular clouds, as well as a weak dependence of their column densities on the size, is commonly considered as the evidence that molecular clouds in the Galaxy are in virial state. In this paper we argue that only about 30% of molecular gas in our Galaxy may have settled onto virial equilibrium. Possible alternatives for explanation of the observational correlations are discussed. It is argued that most likely the mass of molecular gas far from virial equilibrium may be greatly underestimated because of too low column densities and low concentration of CO molecules.

Key words: *Galaxy:molecular gas*

ЛИТЕРАТУРА

1. *R.B.Larson*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **194**, 809, 1981.
2. *P.M.Solomon, A.R.Rivolo, J.W.Burton, A.Yahil*, Astrophys. J., **319**, 730, 1987.
3. *P.Caselli, P.C.Myers*, Astrophys. J., **446**, 665, 1995.
4. *C.F.McKee*, in: The Origin of Stars and Planetary Systems, eds. C.J.Lada, N.D.Kylafys, Kluwer Acad. Publ., p.29, 1999.

5. *P.M.W.Kalberla*, *Astrophys. J.*, **588**, 805, 2003.
6. *Ю.А.Щекинов, И.И.Зинченко*, *Астрон. ж.*, в печати, 2003.
7. *B.G.Elmegreen*, *Astrophys. J.*, **411**, 170, 1993.
8. *M.H.Heyer, S.Terebey*, *Astrophys. J.*, **502**, 265, 1998.
9. *A.E.Glassgold, P.J.Huggins, W.D.Langer*, *Astrophys. J.*, **290**, 615, 1985.
10. *P.Maloney, J.H.Black*, *Astrophys. J.*, **325**, 389, 1988.
11. *J.E.Pringle, R.J.Allen, S.H.Lubow*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **327**, 663, 2001.
12. *J.S.Arabadjis, J.N.Bregman*, *Astrophys. J.*, **510**, 806, 1999.
13. *R.P.J.Tilanus, R.J.Allen, J.M. van der Hulst et al.*, *Astrophys. J.*, **330**, 667, 1988.
14. *R.P.J.Tilanus, R.J.Allen*, *Astrophys. J.*, **339**, L57, 1989.
15. *F.Combes*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **29**, 195, 1991.
16. *J.Cho, A.Lazarian*, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 245001, 2002.
17. *J.Ballesteros-Paredes, E.Vazquez-Semadeni, J.Scalo*, *Astrophys. J.*, **515**, 286, 1999.
18. *E.Vazquez-Semadeni*, in: *New Perspectives in the Interstellar Medium*, ASP Conf. Ser. 168, eds. A.R.Taylor, T.L.Landecker, G.Joncas, 1999, p.345.
19. *R.S.Klessen*, *Rev. Mod. Astron.*, **16**, 2003.