

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

МАЙ 1974

ВЫПУСК 2

КОНВЕКТИВНО-ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЛАКОВ НІ

А. А. СУЧКОВ, Ю. А. ЩЕКИНОВ

Поступила 19 ноября 1973

Предлагается механизм образования высокоскоростных облаков НІ, падающих на плоскость Галактики. При прохождении в межзвездном газе спиральной ударной волны возникают условия, при которых газ переходит в двухфазное состояние (тепловая неустойчивость). Во внешнем гравитационном поле (в данном случае — в поле диска Галактики) тепловая неустойчивость приводит к конвекции — более холодный газ опускается вниз. На нелинейной стадии происходит обособление холодных облаков, которые продолжают падать к плоскости Галактики. При этом скорости облаков достигают наблюдаемых значений порядка 70 км/сек.

В последнее время значительное внимание привлекли к себе высокоширотные ($b > 10 - 20^\circ$) облака межзвездного водорода, падающего с большой скоростью к плоскости Галактики. Выяснение их происхождения, возможно, даст интересную информацию об образовании галактик [1], о природе спиральной структуры [2, 4], о свойствах межгалактической среды [1] (см. также указанные в [1] более ранние ссылки). Падающие облака делят обычно на высокоскоростные (HVC) с $|v| \geq 70$ км/сек и облака с промежуточными скоростями (IVC), для которых $30 \text{ км/сек} \leq |v| \leq 70 \text{ км/сек}$. Сейчас имеются достаточные основания полагать, что IVC локализованы в основном в области $\sim 600 - 1000$ пс над плоскостью Галактики (см., например, [1]). HVC, как правило, находятся выше, на высотах $z \sim 1 - 3$ кпс и больше [2, 5]. Вряд ли вызывает сомнение тот факт, что кинематика IVC в целом соответствует картине течения высокоширотного газа НІ на плоскость Галактики [1, 6], а не есть наложение отдельных облаков НІ с $v < 0$ на покоящийся в целом газ. Это обстоятельство было отчетливо продемонстрировано в [6].

К настоящему времени не существует общепринятой точки зрения на происхождение IVС и НVС. Одна из первых гипотез о происхождении высокоскоростных облаков была предложена Оортом (см. [1] и ссылки в [1]), согласно которой НVС обязаны своим происхождением межгалактическому газу, падающему на плоскость Галактики. Оорт предположил, что газ в результате сверхвзрыва в плоскости Галактики выбрасывается на высоты $\sim 1-3$ клс и затем падает на плоскость, ускоряемый гравитационным полем и межгалактическим ветром. Плотность последнего при этом должна быть $2-3 \cdot 10^{-4}$ H/cm^3 . Другая схема, связывающая образование IVС и НVС со взаимодействием Галактики и межгалактического газа, была предложена в [7]. Согласно ей IVС и НVС образуются на фронте стоячей ударной волны в галактическом гало, возникающей при взаимодействии гало с межгалактическим ветром, плотность которого $\sim 10^{-3}$ H/cm^3 и температура $T \sim 10^8 K$. Аналогичная гипотеза предложена в [8]. Здесь считается, что падающие облака образуются в ударных волнах, возникающих при столкновении межгалактических газовых облаков с межзвездным газом. Все эти гипотезы требуют слишком большого значения плотности межгалактического водорода, которое необходимо для того, чтобы предлагаемые механизмы приводили к образованию IVС и НVС. На это указывают сами авторы (см., например, [1]). Существуют также гипотезы [9], согласно которым IVС ускоряются под действием расширяющихся оболочек Сверхновых. Впрочем, Бейкер показал [6], что эти гипотезы не согласуются со слишком большой скоростью диссипации энергии облаков ($\sim 3 \cdot 10^{-26}$ эрг/ cm^3 сек — это примерно в 10 раз больше, чем поступает от Сверхновых).

Недавние результаты наблюдений заставляют думать, что, по крайней мере, IVС являются объектами галактического происхождения и, более того, тесно связаны со спиральными ветвями Галактики, являясь фактически их продолжением на высотах порядка 1 клс [2, 3, 5, 10]. В связи с этим можно попытаться объяснить существование IVС на основе общих представлений о природе спиральной структуры. Такая попытка предпринята в настоящей работе.

Мы будем исходить из представлений о спиральной структуре как о волнах плотности. Спиральная волна даже малой амплитуды в звездной составляющей галактического диска приводит к ударной волне в межзвездном газе [11]. Как показал Пикельнер [12], такое сжатие межзвездного газа сопровождается фазовым переходом — вследствие тепловой неустойчивости газ распадается на холодные плотные облака и горячий разреженный межоблачный газ. Детально возмож-

ность тепловой неустойчивости под действием спиральной волны рассматривалась в [13], где было показано, что переход горячей системы в двухфазное состояние может произойти за время $\sim 10^6$ лет. Тепловая неустойчивость без учета сжатия газа ударной волной рассматривалась в [14]. Здесь было показано, что развитие неустойчивости происходит за $1-5 \cdot 10^7$ лет. Таким образом, в Галактике, по-видимому, существуют условия, позволяющие горячему межзвездному газу быстро перейти в двухфазное состояние.

В указанных работах [13, 14] не учитывалось влияние гравитационного поля галактического диска на развитие тепловой неустойчивости. Оказывается, что во внешнем гравитационном поле тепловая неустойчивость может приводить к конвекции [15]. При этом плотные холодные облака опускаются вниз, а горячий газ выталкивается вверх. Этот эффект позволяет нам предложить следующую картину происхождения, по крайней мере, IVС. Ударная спиральная волна, распространяющаяся по галактическому диску, создает благоприятные условия для развития тепловой неустойчивости в газе вплоть до высот $z \sim 1$ кпс и больше. В гравитационном поле галактического диска выполняется более общий критерий конвективно-тепловой неустойчивости. Области газа с повышенной плотностью начинают двигаться вниз, а горячие, разреженные — вверх. На нелинейной стадии происходит обособление холодных облаков и образование двухфазной системы. При этом облака продолжают погружаться во внешнее гравитационное поле диска к плоскости Галактики, выталкивая легкий горячий газ. Эти облака мы и наблюдаем как IVС.

Рассмотрим подробнее эту картину. В [15] было показано, что в газе, находящемся во внешнем гравитационном поле и подверженном тепловой неустойчивости возмущения, z -компоненты скорости элемента объема газа меняются по закону $V \sim e^{nt}$, где

$$n = -\frac{1}{2c_p} \left(L_T - \frac{\rho}{T} L_p \right) \pm \left| \frac{1}{4c_p^2} \left(L_T - \frac{\rho}{T} L_p \right)^2 - (\beta - \beta_{ad}) \right| \frac{g}{T} \Bigg|^{1/2}, \quad (1)$$

$L(\rho, T)$ — функция потерь тепла; ρ , p , T — плотность, давление и температура газа, соответственно; $L_T = \partial L / \partial T$, $L_p = \partial L / \partial \rho$, $\beta = dT/dz$, $\beta_{ad} = (\gamma - 1)/\gamma (dp/dz) T/p$; g — ускорение свободного падения, γ — показатель адиабаты. Будем считать, что газовый диск является изотермическим, т. е. $\beta = 0$ (при существующей неопределенности наблюдательных данных не имеет смысла вводить иное распределение $T(z)$) и что плотность меняется с высотой экспоненциально: $p \sim \rho = \rho_0 \exp(-|z|/z_0)$ (в [16] показано, что распределение горячего межоблачного газа в окрестности Солнца хорошо описывается законом

$n(z) = n_0 \exp(-|z|/z_0)^*$, где $z = 0.94$, $z_0 = 210$ пс, $n_0 = 0.2$ Н/см³). Тогда (1) можно переписать в виде

$$n = \frac{1}{2} \gamma_T = \left(\frac{1}{4} \gamma_T^2 - \gamma_g^2 \right)^{1/2}. \quad (2)$$

где $\gamma_T = -1/c_s (L_T - (z/T) L_z)$ — инкремент тепловой неустойчивости ($\gamma_T > 0$), $\gamma_g^2 = -\beta_{ad} (g/T) \approx ((\gamma - 1)/\gamma g z_0^{-1})$. Отсюда видно, что при $\gamma_T > \gamma_g$ неустойчивость будет аperiодической с инкрементом $n > (1/2) \gamma_T$, а при $\gamma_T < \gamma_g$ — неустойчивость колебательная с инкрементом $n = (1/2) \gamma_T$. На расстоянии $z \sim 1$ клс, $g \approx 4\pi G \sigma_0$, где σ_0 — поверхностная плотность. В окрестности Солнца $\sigma_0 \approx 10^2 M_\odot/\text{пс}^2$. Используя приведенные выше числовые значения и $\gamma = 5/3$, получим $\gamma_g \approx (10^7 \text{ лет})^{-1}$. Таким образом, конвективно-тепловая неустойчивость будет аperiодической, если тепловая неустойчивость, рассчитанная без учета гравитационного поля, имеет инкремент больше, чем $(10^7 \text{ лет})^{-1}$.

В настоящее время имеются доказательства, что облака межзвездного газа разрушаются за время порядка $1-3 \cdot 10^7 \text{ лет}$ [17, 18]. Таким образом, должен существовать механизм, регулярно воспопняющий межзвездное пространство облаками HI. С другой стороны, наблюдения свидетельствуют об отсутствии облаков в области между спиральными ветвями [19]. Поэтому можно предположить, что механизм рождения облаков действует только в спиральных ветвях. В моделях спиральной структуры Галактики, построенных на основе теории волн плотности в работах [20, 21] (см. также [22]), время прохождения элементом газа области спиральной ветви оказывается также порядка нескольких десятков миллионов лет. Значит, если облака рождаются вследствие тепловой неустойчивости, то последняя должна развиваться за время меньше, чем 10^7 лет, что согласуется также с теоретическими расчетами [13, 14]. Но тогда, согласно (1), (2), за такое же время нарастают вертикальные движения газа.

На начальной стадии развития неустойчивости скорость движения холодных облаков вниз, а горячих — вверх меняется по закону $v \sim e^{n t}$. Но после того, как произойдет разделение на две фазы [23], облака, плотность которых примерно в 10 раз больше плотности межоблачного газа, будут практически свободно падать в поле диска. При этом скорость около 70 км/сек облако приобретает, пройдя расстояние ~ 300 пс, падая на высоте ~ 1 клс. Этой скорости соответствует время падения $\sim 10^7$ лет. Падение можно рассматривать как свободное примерно до высот 200—300 пс над плоскостью Галактики. Действительно, оценки показывают, что характерное время торможения облака за счет возбуждения им ударных волн в межоблачном

газе на больших высотах ($x \sim 1$ клс) $\sim 6 \cdot 10^5$ лет, что значительно больше времени свободного падения (время торможения можно оценить как время, за которое облако „выметает“ при своем движении в окружающем газе массу порядка собственной массы [7]:

$$t \approx \frac{M}{R^2 \rho_i v} \approx \left(\frac{M}{\rho_i} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right)^{2/3} \frac{1}{v},$$

где M — масса облака, R — его размер, ρ_i и ρ_e — плотности межоблачного газа и облака, соответственно. Для приведенной оценки было принято $M = 10 M_\odot$, $\rho_e = 10$ H/см³, ρ_i взято из экспоненциального распределения для $z = 1$ клс, $v = 50$ км/сек. Непосредственно же дисковая часть газа имеет толщину больше длины свободного пробега облака в нем, поэтому, пролетая через плоскость Галактики, IVC интенсивно тормозятся. Это объясняет незначительное число облаков с положительными скоростями. Падающий газ должен оказывать давление на газ, находящийся в плоскости Галактики. Последний может растекаться вследствие этого в плоскости. Такой эффект действительно наблюдается и связывается с давлением, обусловленным падающими облаками [6].

Выше не были учтены эффекты, связанные с наличием в Галактике магнитного поля. Вообще говоря, поле, будучи замороженным в газ, препятствует движению поперек силовых линий. Однако сам факт существования падающих облаков позволяет думать, что на больших высотах, где рождаются эти облака, магнитное поле достаточно слабое, чтобы не сказываться на динамике облаков. Возможно также, что конвективно-тепловая неустойчивость развивается совместно с релейтейлоровской неустойчивостью системы, состоящей из газа, магнитного поля и космических лучей, в поле диска [24]. В этом случае поле прогибается к плоскости и конвективное движение начинается вдоль силовых линий, так что поле не препятствует конвекции.

В работе [4] происхождение IVC связывалось с магнитной теорией спиральной структуры галактик. В ней предполагалось, что магнитное поле имеет значительную составляющую вдоль z -координаты. Спиральные ветви образуются, согласно [4], в результате конденсации газа, который затем соскальзывает вдоль магнитного поля на плоскость. При этом утверждалось, что существование IVC противоречит теории волн плотности и подтверждает теорию автора [4]. Однако мы видели, что существует ряд гипотез о происхождении IVC, не связанных вообще с той или иной теорией спиральной структуры. С другой стороны, в рамках волновой теории IVC хорошо объясняются моделью, предложенной выше. Таким образом, нельзя признать

беспорным утверждение Пиддингтона [4] о противоречии явления IVС выводам волновой теории. Недоразумение заключалось в том, что в [4] рассматривалось движение газа к плоскости, обусловленное нарушением гидростатического равновесия газового слоя при прохождении волны гравитационного потенциала. Действительно, гравитационное поле волны ускоряет газ вдоль z -координаты лишь до скоростей ~ 2 км/сек. Однако вертикальное движение газа возникает не только за счет этого эффекта. При прохождении волны появляется целый ряд сопутствующих процессов в газе и, в частности, конвективно-тепловая неустойчивость, которая приводит к образованию IVС.

Ростовский государственный
университет

THERMAL-CONVECTIVE INSTABILITY OF THE INTERSTELLAR GAS AND THE ORIGIN OF THE HIGH-VELOCITY HI CLOUDS

A. A. SUCHKOV, YU. A. SHEKINOV

The mechanism of formation of high-velocity HI clouds falling towards Galaxy of the plane is proposed. The conditions favourable for the transition of the interstellar gas into the two-phase state (thermal instability) appear by passing of the spiral shock wave through interstellar gas. In the gravitational field of the galaxy the thermal instability brings rise to the convection, i. e. the cooler gas descends. During the nonlinear stage the separation of the cool clouds takes place and they continue to fall down towards the plane of the Galaxy and velocities of the falling clouds reach the observable values of about 70 km/sec.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. H. Oort, *Astron. Astrophys.*, 7, 381, 1970.
2. G. L. Verschuur, *Astron. Astrophys.*, 22, 139, 1973.
3. R. D. Davies, *M. N.*, 160, 384, 1972.
4. J. H. Piddington, *M. N.*, 162, 73, 1973.
5. M. Kepner, *Astron. Astrophys.*, 5, 444, 1970.
6. Problems of Galactic Spiral Structure, ed H. F. Weaver, *Steward Obs., Univ. Arisona, Tucson*, 1972, p. 31.
7. M. Tosa, T. Kato, *Astrophys. Space Sci.*, 18, 504, 1972.
8. T. L. Chow, M. P. Savedoff, *Nuovo cimento*, B8, 130, 1972.
9. G. L. Verschuur, *Ap. J.*, 176, 1389, 1971.
10. N. H. Dieter, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 5, 21, 1972.
11. W. W. Roberts, *Ap. J.*, 158, 123, 1969.

12. *C. Б. Ликельнер*, IAU Sump. No. 39, ed. G. B. Field, 1970.
13. *P. Biermann, R. Kipferhahn, W. Tscharnuter, H. Yorke*, *Astron. Astrophys.*, 19, 113, 1972.
14. *D. W. Goldsmith*, *Ap. J.*, 161, 41, 1970.
15. *R. Defouw*, *Ap. J.*, 160, 659, 1970.
16. *U. Mebold*, *Astron. Astrophys.*, 19, 73, 1972.
17. *M. Quirk*, *Ap. J.*, 180, 25, 1973.
18. *P. Mézaros*, *Ap. J.*, 180, 381, 1973.
19. *K. Rohlf*, *Astron. Astrophys.*, 13, 45, 1973.
20. *C. C. Lin, C. Juan, F. H. Shu*, *Ap. J.*, 155, 721, 1969.
21. *L. S. Marohnick, Yu. N. Mishurov, A. A. Suchkov*, *Astrophys. Space Sci.*, 22, 285, 1973.
22. *Л. С. Марочник, А. А. Сучков*, *УФН*, 112, 275, 1974.
23. *С. Б. Ликельнер*, *Астрон. ж.*, 44, 915, 1967.
24. *Е. Н. Паркер*, в кн. „Космическая газодинамика“, Мир, М., 1972. стр. 198 (см. здесь также ссылки на более ранние работы).