

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

МАЙ, 1980

ВЫПУСК 2

УДК 524.5

ЯВЛЯЮТСЯ ЛИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОБЛАКА НІ ГАЛАКТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ?

Ю. А. ЦЕКИНОВ

Поступила 25 июня 1979

Показано, что существующих наблюдательных данных недостаточно для однозначного выбора между галактическими и внегалактическими гипотезами о происхождении высокоскоростных облаков НІ: наличие резких границ в распределении НІ, а также разбиение высокоскоростных облаков на мелкие конденсации с узкими линиями в 21 см ($T < 500$ К) могут быть объяснены как в галактических, так и во внегалактических моделях. Пока только корреляция поверхностной плотности НІ и лучевой скорости этих объектов $N_H(v_r)$ не нашла объяснения в рамках внегалактической концепции.

Сделаны оценки величины магнитного поля в высокоскоростных облаках в случае их движения в межзвездном газе на высоте $z \sim 1$ кпс. Величина B может достигать значений $10^{-5} \div 10^{-4}$ Гс в зависимости от распределения межзвездного газа по z и от скорости облака. Обнаружение зеемановского расщепления линии 21 см в эмиссии, соответствующего таким величинам B , свидетельствовало бы в пользу галактической природы высокоскоростных облаков.

Введение. Основная трудность в интерпретации явления высокоскоростных облаков НІ (HVC), $|v_r| > 70$ км/с, связана с неопределенностью расстояний до них. В настоящее время не вполне ясно даже принадлежат ли эти объекты Галактике, или являются внегалактическими? По-видимому, наиболее достоверный способ, позволяющий выявить принадлежность HVC Галактике, состоит в наблюдении в спектрах звезд, лежащих на одном луче зрения с HVC, линий поглощения тяжелыми элементами. Однако на сегодняшний день этим способом оценены лишь нижние пределы расстояний всего для двух высокоскоростных облаков: 400 и 1700 пс [1]. Кроме этого обнаружены линии поглощения Ca II, соответствующие облакам НІ с промежуточными скоростями (IVC) — $|v_r| < 70$ км/с, в спектрах шести звезд с $b > 30^\circ$ [2]. Отсюда определены верхние пределы расстояний до этих облаков $z \approx 300-1000$ пс, чем и доказана принадлежность их Галактике.

Различные косвенные аргументы в пользу той или иной гипотезы не всегда допускают однозначную интерпретацию, а иногда, как будет показано ниже, могут найти объяснение и в рамках альтернативной гипотезы. В последнее время, в частности, в качестве таких аргументов приверженцы галактической интерпретации HVC приводят следующие факты: корреляция плотности водорода на луче зрения N_H для HVC и лучевой скорости v_r [3, 4]; резкие границы высокоскоростных облаков HI [1, 5]; наблюдения тонкой структуры HVC с узкими компонентами в 21 см [6, 7]. Остановимся на них подробнее.

Корреляция $N_H(v_r)$. Наблюдаемую корреляцию $N_H(v_r)$ [3] можно объяснить предположив, что HVC движутся в достаточно плотной межзвездной среде [4]. При этом увеличение плотности на луче зрения N_H , связанное с „нагреванием“ окружающего газа, будет сопровождаться уменьшением скорости HVC — это согласуется с наблюдаемой зависимостью $N_H \approx A/(-v_r)^n + B$, [3] (A и $B = \text{const}$, $1 < n < 5$). В рамках внегалактической гипотезы этот факт пока не получил объяснения.

Резкие границы HVC. Наблюдаемые резкие границы HVC на первый взгляд также свидетельствуют в пользу того, что высокоскоростные облака взаимодействуют с достаточно плотным газом, на основании чего и делается обычно вывод о принадлежности HVC Галактике [1, 5]. Действительно, если HVC локализованы достаточно далеко от Галактики, на расстояниях $\sim 0.1 \div 5$ Мпс [5, 8], где плотность окружающего газа ρ_i мала и, следовательно, мало динамическое давление $P_d = \rho_i v^2$, вызванное натеканием окружающего газа на облако, границы облаков должны быть размытыми. Однако при этом не учитывалось влияние на структуру облака фонового ионизирующего излучения.

Наличие резкого обрыва в распределении поверхностной плотности нейтрального водорода в галактиках позволило Бочкареву и Сюняеву [9] установить верхний предел интенсивности фонового ионизирующего излучения с $100 \text{ \AA} < \lambda < 912 \text{ \AA}$, $I_\nu \leq (0.5 + 5) \cdot 10^{-23} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1}$. Это излучение должно приводить и к резкому обрыву N_H для HVC. Действительно, среднее значение N_H для HVC $\approx 1.4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, т. е. оптическая толщина типичного облака к ионизирующему излучению $\tau \sim 500$, а это означает, что размер переходной зоны HII—HI для HVC будет составлять по порядку величины $2 \div 4 \cdot 10^{-3}$ от размера всего облака. Таким образом, и внегалактические облака должны обладать резкими границами в 21 см, и наличие таковых не позволяет отдать предпочтение галактической модели HVC.

Заметим, что наличие фонового излучения с длинами волн $100 \text{ \AA} < \lambda < 912 \text{ \AA}$ может приводить к тому, что действительная масса высоко-

скоростных облаков НІ, если они находятся вне Галактики, может превосходить массу HVC, видимую в линии 21 см в $2 \div 3$ раза. Действительно, внегалактическая модель HVC подразумевает, что облака находятся на достаточно больших расстояниях от Галактики, чтобы быть гравитационно-связанными. В противном случае внутренние движения в облаках ($W \approx 23$ км/с) разваливают их за время $\sim 10^6$ лет. Среднее значение расстояния до HVC, на котором они являются гравитационно-связанными $D_v \sim 5$ Мпс — это соответствует средней плотности частиц в облаках $n \sim 2 \cdot 10^{-4}$ см $^{-3}$ [5]. Фоновое излучение с $I_\nu \approx 10^{-23}$ эрг·см $^{-2}$ × × с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$ ·Гц $^{-1}$ в интервале длин волн $100 \text{ \AA} < \lambda < 912 \text{ \AA}$, при температуре и плотности в облаке $T \sim 10^4$ К и $n \sim 2 \cdot 10^{-4}$ см $^{-3}$ сможет ионизовать массу газа $M \sim 10^{11} M_\odot$, что близко к характерной массе облака из списка HVC [5], $M \sim 4.4 \cdot 10^{10} D_v^2 M_\odot$ (D_v в Мпс).

Тонкая структура HVC. Остановимся теперь на интерпретации наблюдаемой тонкой структуры HVC. Недавние наблюдения [6, 7] показали, что высокоскоростные облака состоят из мелких конденсаций, которые являются либо результатом взаимодействия HVC с неоднородностями межзвездного газа, как считает Оорт [1], либо тепловой неустойчивости в самих облаках. В частности, Дорошкевич и Шандарин [8] связывают образование таких конденсаций с тепловой неустойчивостью, которая развивается на ранних стадиях эволюции протоскоплений галактик. Однако существенным является тот факт, что температура газа в конденсациях существенно меньше 10^4 К — согласно [7] ограничение сверху на температуру конденсаций составляет около 500 К. Именно это обстоятельство Джованелли [7] считает решающим против внегалактической интерпретации явления HVC. Тем не менее, в рамках адиабатической теории происхождения галактик можно, по-видимому, ожидать столь низких температур.

Во-первых, на ранних стадиях эволюции протогалактик возможно образование молекул водорода в количествах, достаточных для охлаждения первоначально горячего ($T \sim 10^4$ К) газа до температур $T \sim 10^2$ К. Правда это возможно лишь при специальных начальных условиях — начальная плотность $n_0 \gtrsim 10$ см $^{-3}$ и достаточно высокая начальная степень ионизации $x \sim 10^{-3}$ и больше [10]. Заметим, что вывод Джованелли [7] о неэффективности охлаждения газа HVC молекулами H_2 связан с переоценкой им роли излучения звезд и субкосмических лучей, интенсивность которых на расстояниях ~ 1 Мпс от Галактики* вероятно мала, в разрушении H_2 и H . К тому же разбиение высокоскоростных облаков

* Именно такие расстояния характерны для внегалактической модели HVC.

на конденсации возможно на дозвездной стадии эволюции протогалактики, когда этих источников вообще не было.

Во-вторых, даже если молекулы H_2 на ранних стадиях эволюции протоскоплений галактик не образуются и в результате тепловой неустойчивости формируются горячие ($T \sim 10^4$ К) конденсации, то значительное падение внешнего давления, например из-за охлаждения окружающего газа, может привести к адиабатическому охлаждению конденсаций вплоть до температур $T \sim 500$ К. Приведенные соображения показывают, что разбиение высокоскоростных облаков на холодные конденсации можно объяснить и в рамках внегалактической гипотезы.

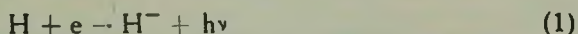
Тяжелые элементы в HVC. Обнаружение металлов в HVC могло бы свидетельствовать в пользу их галактической природы. В этой связи Джура [11] предложил наблюдать HVC в линии H_α в эмиссии. Он предположил, что концентрация пылинок в высокоскоростных облаках пропорциональна содержанию металлов, при этом, если HVC локализованы в окрестности Галактики на высотах меньших 10 кпс так, что интенсивность излучения звезд, падающего на них, достаточно велика, то они должны проявлять себя как отражательные туманности. Поэтому наблюдения HVC в линии H_α с доплеровским смещением, равным удвоенной скорости облака, а также измерения поляризации этого излучения свидетельствовали бы в пользу галактического происхождения HVC. Заметим, что собственная эмиссия в H_α для HVC незначительна — по нашим оценкам мера эмиссии для отдельного высокоскоростного облака, движущегося на высоте $z \sim 1$ кпс со скоростью $v \sim 100$ км/с, имеет порядок $3 \cdot 10^{-2}$ см $^{-6}$ пс.

Однако, по-видимому, лишь самые низкоширотные HVC могут быть видны в отраженном H_α -излучении, поскольку концентрация пылинок с увеличением высоты над плоскостью Галактики быстро падает. Об этом свидетельствуют, во-первых, наблюдения на «Копернике» [12, 13] и, во-вторых, исследования избытков цвета для звезд спектрального класса K III [14]. В частности, Секи [14] приводит для полутолщины пылевого слоя в Галактике значение 100 пс.

Свечение в линиях тонкой структуры тяжелых элементов очень слабо для того, чтобы их можно было бы видеть. Например, интенсивность в наиболее яркой линии 63 мкм нейтрального кислорода для облака, движущегося на высоте ~ 1 кпс со скоростью ~ 100 км/с, при нормальном обилии кислорода составляет всего около $5 \cdot 10^{-11}$ эрг·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$.

Образование молекул, содержащих тяжелые элементы (например, CO и OH), которые можно было бы наблюдать в линиях вращательных переходов, в этих условиях также неэффективно. Действительно, в отсутствии пыли для образования молекул, содержащих тяжелые элементы, не-

обходим молекулярный водород (см., например, [15]). Молекулярный водород образуется и разрушается в следующих реакциях:



При этом

$$\frac{n(\text{H}_2)}{n(e)} = \frac{k_1 k_2 n_{\text{H}}^2}{(k_2 n_{\text{H}} + k_3)(k_3 n_{\text{H}} + k_4)}, \quad (6)$$

здесь n_{H} , $n(e)$, $n(\text{H}_2)$ — плотности, соответственно, нейтрального водорода, электронов и молекул водорода; k_i — коэффициенты соответствующих реакций: $k_1 = 1.1 \cdot 10^{-18} T \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $k_2 = 1.3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $k_3 \ll 10^{-20} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ в области HVC, где $T \sim 10^4 \text{ К}$; используя данные Генри [16] для интенсивности излучения с $\lambda = 975 \text{ \AA}$ на больших широтах ($b \approx 20^\circ$), получим оценку для скорости реакции (4) $k_4 \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ с}^{-1}$; значение k_3 , из-за неопределенности интенсивности излучения с энергией $\varepsilon > 0.75 \text{ эВ}$ на больших широтах, положим равным нулю — это будет соответствовать верхнему пределу для $n(\text{H}_2)$.

С учетом этого из (6) получим $n(\text{H}_2)/n(e) \leq 4 \cdot 10^{-5} T_{n\text{H}}$. Величина $T_{n\text{H}}$ за фронтом ударной волны, возникающей при движении HVC в межзвездном газе, остается постоянной, равной примерно $\rho_i v^2/k$, где ρ_i — плотность межзвездного газа, v — скорость облака, k — постоянная Больцмана. Для облака с $v \sim 100 \text{ км/с}$, движущегося на высоте $z \sim 1 \text{ кпс}$, $T_{n\text{H}} \sim 10^3 \div 10^4 \text{ К} \cdot \text{см}^{-3}$ в зависимости от распределения $\rho_i(z)$. Таким образом $n(\text{H}_2)/n(e) \leq 0.04 \div 0.4$. Очевидно, столь малое содержание молекул H_2 затрудняет образование CO и OH.

Магнитные поля в HVC. Если высокоскоростные облака H I принадлежат Галактике, то существенным должно быть взаимодействие их с галактическим магнитным полем. Поэтому наблюдательные проявления такого взаимодействия могли бы подтвердить галактическую природу этих объектов. Впервые на это обстоятельство обратил внимание Верскер (см., например, [17]). Он собрал данные о восьми облаках H I с промежуточными скоростями ($|v_r| < 70 \text{ км/с}$) и о десяти высокоскоростных облаках ($|v_r| > 70 \text{ км/с}$) и показал, что все облака с промежуточными ско-

ростями и 6 из 10 высокоскоростных облаков вытянуты вдоль магнитного поля, измеренного по поляризации излучения фона в окрестности облаков.

Другая возможность состоит в измерении зеемановского расщепления линии 21 см в эмиссии. При движении облаков на высоте $z \sim 1$ кпс они «нагребают» межзвездный газ и увлекают за собой магнитное поле. Считая, что регулярная компонента галактического магнитного поля направлена параллельно плоскости Галактики и что отрицательные скорости HVC есть результат падения их на плоскость, получим $B_c \propto \rho_c$, где ρ_c — плотность газа в облаке. Из-за высвечивания плотность газа в облаке равна $\rho_c = M^2 \rho_i$, ρ_i — плотность окружающего газа, M — число Маха. Для облаков со скоростями $|V| \approx 100 - 300$ км/с и с температурой $T < 500$ К [7], $M > 30 \div 100$. Однако быстрое увеличение магнитного давления будет препятствовать значительному сжатию газа. Поэтому значение магнитного поля, которое может быть достигнуто в облаках, будет определяться из условия $B_c^2/8\pi \approx \rho_i v^2$, т. е. $B_c \approx (8\pi \rho_i)^{1/2} v$. Точное значение B_c зависит от высоты, на которой локализованы облака, и от распределения $\rho_i(z)$. В частности, если принять распределение межзвездного газа по модели Фукса и Тильхайма [18], то на высотах $z \sim 1$ кпс $\rho_i \sim 0.01 \cdot m_H$ г/см³ (здесь учитываются облака и межоблачный газ, m_H — масса атома водорода). При этом $B_c \sim 10^{-12} (v/\text{см/с})$ Гс. Если учитывать только межоблачный газ, для которого при $z \sim 1$ кпс следует ожидать плотности $\sim 10^{-3}$ см⁻³ [19], то получится в три раза меньшее значение B_c .

Наблюдаются облака с лучевыми скоростями вплоть до $v_r \approx -200$ км/с. Однако, если считать, что HVC падают на плоскость Галактики так, что вектор скорости направлен параллельно оси вращения Галактики, то скорости v облаков могут быть значительно выше: $v = v_r / \sin b$. С этой точки зрения наибольших значений B_c можно ожидать для низкоширотной группы облаков — цепочка А [1]. В этой группе существует пять облаков с $|v = v_r / \sin b| > 500$ км/с, для которых согласно оценке $B_c > 5 \cdot 10^{-5}$ Гс. Это HVC 119.5 $\pm$ 10.5 — 160, 118 $\pm$ 12.5 — 141, 118 $\pm$ 10 — 132, 131.6 $\pm$ 23.3 — 204, 131.7 $\pm$ 23.5 — 204 (первое число — l , второе — b , третье — v_r). Для HVC 119.5 $\pm$ 10.5 — 160 $B_c \approx 10^{-4}$ Гс. Для распределения межоблачного газа по Мейбольду [19] ожидаемое значение B_c будет в три раза меньше.

Согласно недавним наблюдениям радиоизлучения Галактики в направлении на галактический полюс [20] магнитное поле уменьшается с удалением от плоскости Галактики медленно, так, что высоте $z \approx 5$ кпс

соответствует $B \approx 10^{-6}$ Гс. К аналогичному выводу приходят и авторы [21], которые принимают $B \approx (4 \div 6) \cdot 10^{-6}$ Гс вплоть до высот $z \sim 10$ кпс. Этих значений вполне достаточно, чтобы обеспечить поле в облаках $B_c \sim 10^{-4}$ Гс.

Поскольку плотность межгалактического газа значительно меньше чем $10^{-2} \div 10^{-3}$ см $^{-3}$, величина B_c во внегалактических моделях HVC будет очень малой. Например, для плотности межгалактического газа $\sim 10^{-6}$ см $^{-3}$ получим $B_c \leq 10^{-6}$ Гс. Поэтому обнаружение зеемановского расщепления в линии 21 см, соответствующего полям $B_c \sim 10^{-5} \div 10^{-4}$ Гс, будет решающим аргументом в пользу галактической природы HVC.

Институт физики Ростовского
государственного университета

ARE HIGH-VELOCITY HI CLOUDS GALACTIC OBJECTS ?

Yu. A. SHCHEKINOV

It has been shown that available observational data is not sufficient to say whether high-velocity HI clouds are galactic or extragalactic. Namely, observational sharp edges and fine structure of high-velocity clouds can be explained both by galactic and extragalactic models. At present only the correlation between column density of HI and corresponding radial velocity v_r has not met an explanation within the framework of extragalactic conception. It has been proposed to measure the Zeeman effect of 21-cm emission line for high-velocity clouds. In the case of clouds moving across the interstellar gas at $z \sim 1$ kpc their magnetic field can reach a value of $10^{-5} \div 10^{-4}$ Gs for several laws of $\rho(z)$ — distribution of interstellar gas and velocity of clouds. The finding of Zeeman splitting of 21-cm line could be a sufficient argument for galactic interpretation of high-velocity HI clouds.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Х. Оорт, в сб. «Вопросы физики и эволюции космоса», Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1978, стр. 271.
2. J. H. Oort, A. N. M. Hulsbosch, in "Astronomical Papers Dedicated to B. Ström-gren", eds. A. Rayz, T. Andersen, Copenhagen, 1978, p. 409.
3. J. Silk, R. S. Silk, Astrophys. Lett., 13, 143, 1973.
4. Ю. А. Щекинов, Астрофизика, 13, 711, 1977.

5. *A. N. M. Hulsbosch*, *Astron. Astrophys.*, 40, 1, 1975.
6. *T. R. Cram, R. Giovanelli*, *Astron. Astrophys.*, 48, 39, 1976.
7. *R. Giovanelli*, *Astron. Astrophys.*, 55, 395, 1977.
8. *А. Г. Дорошкевич, С. Ф. Шандарин*, ИПМ АН СССР, препринт № 84, 1977.
9. *Н. Г. Бочкарев, Р. А. Сюняев*, *Астрон. ж.*, 54, 957, 1977.
10. *Ю. А. Цекинов, М. А. Эдельман*, *Астрон. ж.*, 1980 (в печати).
11. *M. Jura*, *Ap. J.*, 227, 798, 1979.
12. *J. M. Shull, D. J. York*, *Ap. J.*, 211, 803, 1977.
13. *J. M. Shull*, *Ap. J.*, 212, 102, 1977.
14. *M. Seki*, *Science Repts., Tohoku Univ.*, 1st ser., 60, 200, 1978.
15. *W. D. Langer*, *Ap. J.*, 210, 328, 1976.
16. *R. C. Henry*, *Ap. J., Suppl. ser.*, 33, 451, 1977.
17. *Дж. Л. Верскер*, в кн. «Космическая газодинамика», ред. Х. Хабинг, Мир. М., 1972, стр. 175.
18. *B. Fuchs, K. O. Thielheim*, *Ap. J.*, 227, 801, 1979.
19. *U. Mebold*, *Astron. Astrophys.*, 19, 73, 1972.
20. *S. A. Stephens, G. D. Badhwar*, *Ap. J.*, 212, 494, 1977.
21. *С. В. Буланов, В. А. Дозель, С. И. Сыроватский*, *Космические исследования*, 13, 787, 1975.