

УДК: 524.68:524.52

О СВОЙСТВАХ ГАЗА В ГАЛАКТИЧЕСКОМ ГАЛО

А. А. СУЧКОВ, Ю. А. ЩЕКИНОВ

Поступила 21 декабря 1984

Принята к печати 20 августа 1985

Рассмотрены возможные механизмы образования ионов C IV и Si IV, линии поглощения которых наблюдаются в спектрах звезд в галактическом гало на $z \sim 1 \div 3$ кпк. Показано, что наблюдаемые количества этих ионов можно объяснить в модели поглощающей области в гало с температурой газа $T = 10^4$ K, плотностью числа частиц $n \leq 0.01 \text{ см}^{-3}$ и при доминирующей роли фонового ультрафиолетового излучения в ионизации.

1. Одна из задач, выполнявшихся с помощью ультрафиолетового спектрометра на спутнике IUE, состояла в исследовании межзвездного газа на высоких галактических широтах. Были изучены спектры 24-х высокоширотных ОВ-звезд, принадлежащих гало Галактики. В 15-и из них были обнаружены линии поглощения, соответствующие межзвездным ионам C IV и Si IV, и в двух случаях — линии NV [1].

Основные наблюдательные данные состоят в следующем: а) типичное значение плотности ионов C IV на луче зрения $N(\text{C IV}) \sim 10^{13.5} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$; б) отношение концентраций ионов C IV и Si IV, $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) \sim 3$; при нормальном* (солнечном) содержании C и Si этому соответствует $\frac{x(\text{C IV})}{x(\text{Si IV})} = \frac{N(\text{C IV})/N(\text{C})}{N(\text{Si IV})/N(\text{Si})} \sim 0.3$; в) протяженность поглощающей области в направлении, перпендикулярном диску Галактики $L \sim 1 \div 3$ кпк — эта оценка получена из наблюдаемой зависимости величины $N(\sin b)$ от z (N — плотность числа ионов на луче зрения, b — галактическая широта, z — расстояние от плоскости Галактики до наблюдаемой звезды); г) в тех случаях, когда наблюдались линии поглощения NV, количество этих ионов не превышало десяти процентов от количества C IV (при нормальном обилии $\frac{x(\text{NV})}{x(\text{C IV})} =$

* C: Si: N: H = $3 \cdot 10^{-4}$: $3 \cdot 10^{-5}$: $9 \cdot 10^{-5}$: 1.

$= \frac{N(\text{N V})/N(\text{N})}{N(\text{C IV})/N(\text{C})} < 0.3$) [1]. Ниже мы приводим оценки параметров газа в гало, которые можно сделать на основе этих данных.

2. Очевидно, что этот газ не может быть связан с зонами H II, возбуждаемыми массивными звездами, поскольку при солнечном обилии элементов в горячей фазе для них следует ожидать $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) < 0.3$, если возбуждающая звезда имеет эффективную температуру $T_{\text{eff}} < 45\,000\text{ K}$ [2, 3]. Наблюдаемые на IUE звезды удовлетворяют этому условию.

Отношение $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV})$ в зонах H II может быть повышено, если содержание углерода и кремния там уменьшено по сравнению со средним космическим за счет вымерзания на частицах пыли. В самом деле, известно, что эффект истощения для кремния всегда сильнее, чем для углерода [4], поэтому, если этот эффект проявляется в газе гало, то за счет него отношение $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV})$ будет увеличиваться. Однако для того, чтобы происхождение ионов C IV и Si IV в гало можно было связывать с зонами H II, необходимо предположить, что содержание кремния в газовой фазе уменьшено по сравнению с содержанием углерода более чем на порядок. В то же время существующие данные по дефициту тяжелых элементов в межзвездной среде показывают, что максимальная степень обеднения кремния по сравнению с углеродом характеризуется фактором ~ 10 только для достаточно плотных областей в плоскости Галактики [4]. В разреженном газе гало эффекты истощения должны быть слабее.

Если предположить, что производство ионов C IV и Si IV в газовом гало Галактики обеспечивается тепловыми электронами и известным фоновым излучением в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, то в этом случае в условиях ионизационного равновесия наблюдаемому отношению $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) \simeq 3$ соответствует температура $T \simeq 10^{4.7}\text{ K}$, причем $x(\text{C IV}) = n(\text{C IV})/n(\text{C}) \simeq 3 \cdot 10^{-3}$ [5]*. Отсюда следует, что наблюдаемому значению $N(\text{C IV}) \simeq 10^{13.5} \div 10^{14}\text{ см}^{-2}$ соответствует $N(\text{C}) \sim (1 \div 3) \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$. При нормальном обилии углерода это дает $N(\text{H}) \sim (0.3 \div 1) \cdot 10^{20}\text{ см}^{-2}$. Таким образом, если это предположение верно, то средняя концентрация газа в высокоширотных областях C IV — Si IV должна составлять $n \sim 10^{-2}\text{ см}^{-3}$.

Однако при температуре $T \simeq 10^{4.7}\text{ K}$ межзвездный газ характеризуется значительными потерями: $\Lambda \sim 10^{-22}\text{ эрг см}^3\text{ с}^{-1}$. Это требует

* В работе [5] приводятся результаты расчетов ионизационного равновесия межзвездного газа, пронизываемого ультрафиолетовым и рентгеновским излучением с потоком, равным наблюдаемому в направлении на галактический полюс.

для поддержания стационарного состояния очень мощных источников нагрева: $\Gamma = \Lambda n \sim 10^{-24}$ эрг с⁻¹. Для сравнения укажем, что если бы нагрев осуществлялся субкосмическими лучами, то соответствующее значение скорости первичной ионизации должно было бы превысить величину $\dot{\epsilon} \sim 10^{-13}$ с⁻¹. Недавно Хартквистом [6] предложена модель, в которой тепловой баланс в газе гало на уровне $T \simeq 10^{4.7}$ К обеспечивается диссипацией магнитогиродинамических волн. Эта модель предсказывает увеличение плотности газа с удалением от плоскости Галактики.

3. Альтернативная модель газового гало, удовлетворяющая совокупности данных о распространенности многозарядных ионов на высоких галактических широтах, может быть построена, если принять во внимание, что характеристики ионизирующего излучения на расстояниях $z \sim 3$ кпк от плоскости Галактики отличаются от тех, которые регистрируются на Земле. В спектре этого излучения должны присутствовать кванты с длинами волн $\lambda = 100 \div 912$ А, обеспечивающие поддержание вокруг Галактики зоны Н II [7, 8]. На основе данных о распределении нейтрального водорода во внешних частях Галактики Бочкарев и Сюняев [8] получили для потока энергии фонового межгалактического излучения в интервале длин волн $\lambda = 100 \div 912$ А оценку сверху: $I_{\lambda} \lesssim (0.5 \div 5) \cdot 10^{-23}$ эрг/(см² с ср Гц). По оценкам Йорка [9] на высоте $z = 10$ кпк суммарный поток энергии от всех квазаров на длине волны $\lambda = 500$ А составляет $2 \cdot 10^{-23}$ эрг/(см² с ср Гц). Заметим, что если спектр коротковолнового электромагнитного излучения ($\lambda = 100$ А), наблюдаемого в направлении на галактический полюс, $F(E) = 11/E^{0.4}$ кэВ/(см² с ср кэВ), распространить в область более длинных волн (т. е. $\lambda > 100$ А), то $F(E)$ при $\lambda = 500$ А будет соответствовать $I_{\lambda} = 3 \cdot 10^{-25}$ эрг/(см² с ср Гц), т. е. на два порядка меньше верхней оценки.

На рис. 1 мы приводим результаты расчета ионного состава газа, находящегося в поле излучения со спектром*.

$$\left. \begin{aligned} F(E) &= A \cdot f/E^2 \text{ кэВ}/(\text{см}^2 \text{ с ср кэВ}), \quad E \geq E_0 \\ &= 0, \quad E < E_0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Сплошные линии на рис. 1 соответствуют $A = 1000$, $\alpha = 0.4$ и $E_0 = 13.6$ эВ. Множителем $f \leq 1$ учитываются ограничения на поток ионизирующего излучения, приведенные в [8, 9]. Для температуры газа мы принимали значение, типичное для зон Н II: $T = 10^4$ К — близкое к этому

* В направлении на галактический полюс спектр излучения характеризуется константами $A = 11$, $f = 1$, $\alpha = 0.4$ и $E_0 = 100$ эВ.

значение устанавливается в газе гало под действием фонового излучения (1) при концентрациях $n \sim 10^{-4} + 10^{-2} \text{ см}^{-3}$. В этих условиях относительные концентрации нейтрального водорода и гелия $n(\text{H I})/n(\text{H}) \gtrsim 10^{-3}$ и $n(\text{He I})/n(\text{He}) \gtrsim 0.03$ оказываются достаточными для того, чтобы основным механизмом, обеспечивающим уменьшение концентраций многозарядных ионов, оказывались реакции перезарядок. Производство многозарядных ионов при $T = 10^4 \text{ К}$ связано с ионизацией атомов и ионов тяжелых элементов ультрафиолетовым и рентгеновским излучением (эффект Оже также учтен в наших расчетах). С уменьшением плотности газа частота рекомбинаций водорода и гелия падает, их степень ионизации увеличивается, в результате чего уменьшается эффективность процессов перезарядок и ионизационное равновесие смещается в сторону увеличения концентраций многозарядных ионов. Уравнения баланса ионизации содержат скорость ионизации ξ и концентрацию газа n только в виде отношения ξ/n (см. [5]) — ионный состав остается неизменным, если увеличение частоты ионизаций компенсируется увеличением частоты рекомбинаций.

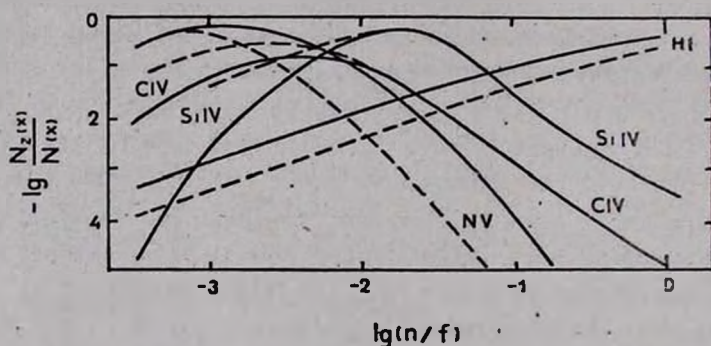


Рис. 1. Зависимость относительных концентраций ионов от физических условий в газе.

При нормальном содержании углерода и кремния отношение концентраций ионов CIV и Si IV будет равняться наблюдаемому при $n = 10^{-2} \text{ ф см}^{-3}$, при этом $x(\text{C IV}) = 0.1$. Однако в этом случае $N(\text{NV})/N(\text{C IV}) \approx 0.3$. Ионы NV производятся за счет ионизаций ионов N IV (потенциал ионизации 78 эВ) и ионизаций К-оболочек ионов N III с последующим Оже-переходом с выбросом еще одного электрона (потенциал ионизации К-оболочки 430 эВ). Поэтому понизить концентрации ионов NV можно, используя более круто спадающий в области $\lambda < 160 \text{ А}$ спектр ионизирующего излучения. На рис. 1 пунктирные линии соответствуют спектру с $A = 10$, $\alpha = 1.65$, $E_0 = 13.6 \text{ эВ}$. При $\Phi = 1$ поток энергии на $\lambda = 500 \text{ А}$ находится в рамках оценок, приве-

денных в [8, 9], а количество квантов с энергией 1 кэВ равно наблюдаемому в окрестности Земли на высоких галактических широтах. В этом случае, при $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) = 3$, $N(\text{N V}) < 0.1 \cdot N(\text{C IV})$ (см. рис. 1, пунктир), в согласии с наблюдениями [1] (при этом $n/f \approx \approx 10^{-2} \text{ см}^{-3}$).

Поверхностная плотность ионов C IV для поглощающего слоя толщиной $L \approx 3$ кпк оказывается близкой к наблюдаемому значению $N(\text{C IV}) \approx 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при $n \approx 10^{-4} \text{ см}^{-3}$. С другой стороны, из ограничений на поток ионизирующего излучения $f \leq 1$ имеем оценку сверху для плотности газа в поглощающей области: $n \leq 0.01 \text{ см}^{-3}$ (см. рис. 1). В принятой нами модели наибольший вклад в наблюдаемые поверхностные плотности ионов C IV и Si IV вносят верхние слои газа гало. Действительно, с приближением к плоскости Галактики следует ожидать существенного увеличения параметра n/f . В самом деле, средняя концентрация частиц вблизи диска ($n \sim 0.1 \text{ см}^{-3}$) по крайней мере на порядок превышает концентрацию в гало. В этом случае $x(\text{C IV})$ и $x(\text{Si IV})$ быстро уменьшаются и, кроме того, уменьшается отношение $x(\text{C IV})/x(\text{Si IV})$.

4. Отношение концентраций ионов $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV})$ пропорционально отношению распространенностей этих элементов в газовой фазе. Таким образом, выводы о физическом состоянии газа в гало зависят от предположения о химическом составе его вещества.

В масштабах $L \sim 1 \div 3$ кпк перемешивание газа макроскопическими хаотическими движениями со скоростями $v \sim 10$ км/с осуществляется за время $t \sim (1 \div 3) \cdot 10^8$ лет, поэтому следует ожидать, что газ в гало имеет химический состав, мало отличающийся от химического состава в диске Галактики. Вариации содержания различных элементов в плоскости Галактики и гало могут быть связаны, по-видимому, только с возможным оседанием их на частицах межзвездной пыли. При этом, поскольку температура конденсации кремния на пыли почти на порядок превышает температуру конденсации углерода, обеднение газа кремнием должно быть более сильным, чем обеднение углеродом. Для газа в плоскости Галактики это подтверждено наблюдениями на спутнике «Коперник» [4]. Отсюда следует, что если бы за счет эффекта оседания на пылинках обилия углерода и кремния в газе гало отличались от среднего космического обилия, т. е. $N(\text{C})/N(\text{Si}) > 10$, то наблюдаемое соотношение $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) \sim \sim 3$ достигалось бы при больших значениях концентрации n : $n > 10^{-2} f$. Но так как согласно нашим расчетам $x(\text{C IV}) \propto n^{-2}$ (см. рис. 1), то количество ионов C IV на луче зрения при фиксированном значении размера поглощающей области уменьшается с увеличением плотности:

$N(\text{C IV}) \propto n^{-1}$. Поэтому уменьшение содержания Si по отношению к содержанию C в газовой фазе должно сопровождаться в рассматриваемой модели увеличением более чем в 3 раза потока ионизирующего излучения f . Действительно, если $n(\text{Si})/n(\text{C}) \sim 0.03$, то выполнение соотношения $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) \sim 3$ возможно только при $n/f > 2 \cdot 10^{-1} \text{ см}^{-3}$. Если $n(\text{Si})/n(\text{C}) < 0.03$, то всегда $N(\text{C IV})/N(\text{Si IV}) > 3$ (см. рис. 1).

5. Остановимся кратко на нестационарной модели газового гало. Газ галактического гало может находиться в динамическом равновесии, если его температура будет порядка $10^{5.5} \div 10^6 \text{ К}$ — это значение определяется гравитационным потенциалом звездной составляющей диска галактики. Если источники нагрева, способные обеспечить поддержание температуры на таком уровне, отсутствуют, то газ будет охлаждаться и падать на плоскость Галактики. Будет ли ионный состав такого охлаждающегося газа соответствовать данным, полученным на спутнике IUE?

Процесс релаксации ионного состава охлаждающегося рекомбинирующего газа характеризуется двумя этапами [10]: первый — это сравнительно медленная эволюция со временем $\Delta t_1 \sim 3 \cdot 10^{13}/n(\text{H II}) \text{ с}$, обусловленная фото- и диэлектронными рекомбинациями; второй — быстрая релаксация со временем $\Delta t_2 \sim 3 \cdot 10^{10}/n(\text{H I}) \text{ с}$, связанная с перезарядками ионов с атомами H и He. На всем интервале времени Δt_1 относительные концентрации ионов NV и C IV соотносятся как $x(\text{NV}) = (3 \div 10) \cdot x(\text{C IV})$, в то время как по данным спутника IUE $x(\text{NV}) < 0.3 \cdot x(\text{C IV})$ при нормальном содержании элементов N и C. Если считать, что распространенность азота на высоких широтах не меньше, чем в галактической плоскости*, то отсюда следует, что такой газ не может давать заметного вклада в поверхностные плотности ионов, наблюдавшихся на спутнике IUE.

На втором этапе, спустя время $\sim (2 \div 3) \cdot \Delta t_2$, $x(\text{NV})$ уменьшается от величины $\sim 3 \cdot x(\text{C IV})$ до $\sim 10^{-4} \cdot x(\text{C IV})$ и поэтому, в среднем, $x(\text{NV}) < x(\text{C IV})$. Однако длительность этого этапа слишком мала, так что его вклад в поверхностные плотности ионов C IV и Si IV ничтожен. В самом деле, если принять, как это следует из наблюдений, что скорость макроскопических движений в гало не превышает $\sim 30 \text{ км/с}$, то промежутку времени $\sim 3 \cdot \Delta t_2$ будет соответствовать область протяженностью $\Delta L \sim 3 \cdot 10^{17}/n(\text{H I}) \text{ см}$. На этой стадии в рекомбинирующем газе $n(\text{H I}) \geq 0.3 \cdot n(\text{H})$, а $x(\text{C IV}) < 10^{-2}$ [10], поэтому поверхностная плотность ионов C IV для этого слоя оценивается ве-

* Температуры конденсации азота и углерода на пылинках примерно одинаковы, поэтому нет оснований считать, что за счет вымерзания газ в гало будет обеднен азотом сильнее, чем углеродом.

личиною $N(\text{CIV}) = n(\text{CIV}) \cdot \Delta L \lesssim 10^{12.5} \text{ см}^{-2}$, по крайней мере на порядок меньше наблюдаемого значения.

6. Таким образом, наблюдательные данные о распространенностях ионов CIV , SiIV и NV на высоких галактических широтах могут быть объяснены только в рамках предположения об установившемся ионном составе, соответствующем равновесию между процессами ионизации и рекомбинации в межзвездном газе. Это означает, что характерный временной масштаб нестационарности в газе гало должен превышать время релаксации ионного состава газа $\sim 3 \cdot 10^{13} / n(\text{HII}) \text{ с}$ ($\sim 10^7 + 10^8$ лет).

Производство многозарядных ионов в газовом гало может обеспечиваться столкновениями с тепловыми электронами при температуре $T \simeq 10^{4.7} \text{ К}$, однако для поддержания такой температуры требуются мощные источники энергии. Вместе с тем, учет вклада в ионизацию фонового внегалактического ультрафиолетового и рентгеновского излучений с потоком $F(E)$, не выходящим за пределы существующих ограничений, позволяет построить удовлетворительную модель формирования ионного состава газа гало с температурой $T \simeq 10^4 \text{ К}$. При этом не возникает необходимости в привлечении дополнительных источников энергии, поскольку фоновое излучение с принятым нами потоком в состоянии обеспечить нагрев газа до $T = 10^4 \text{ К}$. Остается открытым вопрос о динамическом равновесии газового гало, поскольку температура газа как в модели с тепловой ионизацией ($T \simeq 10^{4.7} \text{ К}$), так и в модели с ионизацией излучением ($T = 10^4 \text{ К}$) слишком мала, чтобы обеспечить такое равновесие. Возможно, что оно поддерживается макроскопическими хаотическими движениями, хотя разброс лучевых скоростей CIV , составляющий по данным IUE величину $\sim 20 \div 25 \text{ км/с}$ [1], достаточен лишь для того, чтобы полутолщина равновесного слоя газа достигала $\sim 0.3 \text{ кпк}$.

Ростовский государственный
университет

Волгоградский государственный
университет

ON THE PROPERTIES OF THE GALACTIC HALO GAS

AL. A. SUCHKOV, YU. A. SHCHEKINOV

The possible mechanisms of creating ions CIV and SiIV , absorption lines of which are seen in the spectra of stars in the galactic halo at $z \sim 1 \div 3 \text{ kpc}$, have been considered. It has been shown that observed quantities of these ions can be explained in the model of the absorbing

region in halo with gas temperature $T' = 10^4$ K, number density $n \lesssim 0.01 \text{ cm}^{-3}$, and ionization of elements by ultraviolet background radiation.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. A. West, M. Pettini, in "Proc. 3-rd European IUE Conference", Madrid, 1982, p. 435.
2. J. H. Black, A. K. Dupres, L. W. Hartman, J. C. Raymond, *Astrophys. J.*, 239, 502, 1980.
3. L. L. Cowie, W. Taylor, D. York, *Astrophys. J.*, 248, 528, 1981.
4. L. Spitzer, E. Jenkins, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 13, 133, 1975.
5. Ал. А. Сучков, Ю. А. Щекинов, *Астрон. ж.*, 60, 883, 1983.
6. T. W. Hartquist, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 203, 117, 1983.
7. Р. А. Сюняев, *Астрон. ж.*, 46, 929, 1969.
8. Н. Г. Бочкарев, Р. А. Сюняев, *Астрон. ж.*, 54, 957, 1977.
9. D. York, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 20, 221, 1982.
10. Ал. А. Сучков, Ю. А. Щекинов, *Письма в Астрон. ж.*, 10, 35, 1984.