

УДК: 524.78

ОБОГАЩЕНИЕ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
ТЯЖЕЛЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ БОЛЬШИХ
КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ

М. В. КОСТИНА

Поступила 15 апреля 2003

Принята к печати 27 августа 2003

Рассмотрена простая модель обогащения межгалактической среды (МГС) тяжелыми элементами. Исследована зависимость содержания тяжелых элементов в МГС от особенностей процессов звездообразования в первичных галактиках. Полученные результаты согласуются с наблюдательными данными о содержании тяжелых элементов в " L_{α} -облаках"

1. *Введение.* Проблема эволюции химического состава межгалактической среды (МГС), тесно связанная с до сих пор не решенной проблемой формирования галактик первого поколения, обсуждается в течение последних десятилетий. Лишь в 1980-е годы появились первые наблюдательные свидетельства того, что в МГС содержатся тяжелые элементы: рентгеновские наблюдения горячего межгалактического газа в близких скоплениях галактик, показавшие наличие там железа [1]. С тех пор принято считать, что газ в скоплениях, по крайней мере частично, является вторичным, то есть побывавшим в звездах галактик и обогащенным тяжелыми элементами.

В середине 1990-х были получены первые данные о содержании тяжелых элементов в L_{α} -облаках - составной части МГС: L_{α} -облака были обнаружены в 1971г. по линиям поглощения в спектрах квазаров (так называемому " L_{α} -лесу") [2]. Было показано, что система L_{α} -облаков является эволюционирующей [3,4]. Массы облаков в результате их слияния возрастают со временем, и к $z \sim 1$ образуются облака с массой порядка галактической. Поэтому массивные L_{α} -облака, так называемые "damped L_{α} systems" (облака с большой лучевой концентрацией HI ($N(\text{HI}) \geq 10^{20} \text{ см}^{-2}$)), рассматриваются сейчас как предшественники галактик [5]. Поскольку "damped L_{α} systems" содержат тяжелые элементы [6], они образуются из вещества, выброшенного ранее образовавшимися галактиками. Формирующиеся из них галактики - галактики второго поколения [7].

Ход химической эволюции L_{α} -облаков определяется целым рядом факторов, в том числе особенностями процесса образования галактик, скоростью звездообразования в них, интенсивностью потери вещества

галактиками и многими другими. Почти все они известны недостаточно хорошо, поэтому проводить детальное моделирование эволюции не очень целесообразно. В данной работе будет рассмотрена простая модель обогащения межгалактической среды тяжелыми элементами.

2. *Модель.* Будем считать, что все галактики образовались одновременно (и мгновенно) при $z = z_0$. На их образование ушла преобладающая доля догалактической среды, не содержащей тяжелых элементов. Под "рождением" галактики понимаем начало звездообразования в сжимающемся догалактическом облаке. Рассматриваем только одну мгновенную вспышку звездообразования. Зависимость хода эволюции МГС от спектра масс и типа галактик не исследуется.

В формирующихся звездах образуются тяжелые элементы. Примем, что железо производится, главным образом, в массивных звездах ($M \geq 10 M_\odot$, M - масса звезды в массах Солнца), быстро эволюционирующих и вспыхивающих как сверхновые II типа. Это предположение может быть обосновано тем, что предшественники сверхновых типа Ia, рассматриваемые сейчас в качестве основных поставщиков железа в МЗС, эволюционируют очень медленно и не должны играть существенной роли на ранних стадиях эволюции галактик. Большая часть других тяжелых элементов поставляется в МЗС менее массивными, сравнительно медленно эволюционирующими звездами, теряющими массу в виде звездного ветра.

Тяжелые элементы попадают в межзвездную среду, затем посредством галактического ветра обогащенное вещество выносится из галактик в МГС, где формирует L_α -облака. Возможное втекание небогатенного газа в галактики из межгалактической среды не учитывается.

Эволюция плотности и содержания железа в межзвездной среде (МЗС) галактик может быть описана уравнениями

$$\begin{cases} \frac{d\rho_{МЗС}}{dt} = E - q, \\ \rho_{МЗС} \frac{dZ_{МЗС}^{(1)}}{dt} = E(K^{(1)} - Z_{МЗС}^{(1)}), \\ \rho_{МЗС} \frac{dZ_{МЗС}^{(2)}}{dt} = E(K^{(2)} - Z_{МЗС}^{(2)}), \end{cases} \quad (1)$$

где $Z_{МЗС}^{(i)}$ ($i=1, 2$) - относительное содержание в МЗС тяжелых элементов; $K^{(i)}$ ($i=1, 2$) - доля тяжелых элементов в газе, теряемом звездами; $E = [a_1(r)r_1(r) + a_2(r)r_2(r)]\rho_{МЗС}^{(2)}$ - скорость притока газа от звезд; $q = b(r)\rho_{МЗС}^{(3)}$ - скорость потери газа галактикой при истечении его в межгалактическое пространство посредством галактического ветра. Здесь и везде далее индекс (1) относится к железу, (2) - к остальным элементам.

В уравнении, описывающем эволюцию плотности МЗС, не учиты-

вается сток газа в звезды, так как рассматривается лишь одна вспышка звездообразования.

Содержание тяжелых элементов в МГС (при условии $q > 0$ и мгновенном перемешивании по всему объему МГС) определяется из соотношений

$$Z_{MGC}^{(1)}(t) = \frac{\int_0^t Z_{MGC}^{(1)} q dt}{\int_0^t q dt}; \quad Z_{MGC}^{(2)}(t) = \frac{\int_0^t Z_{MGC}^{(2)} q dt}{\int_0^t q dt}. \quad (2)$$

Начальная плотность МГС принимается равной нулю.

В рамках сделанных предположений можно полагать, что

$$a_1(t) = s_1 \delta(t); \quad a_2(t) = s_2 \delta(t). \quad (3)$$

Коэффициенты пропорциональности зависят от начальной функции масс (НФМ) звезд $\phi(M)$ следующим образом:

$$s_1 = \frac{\int_{10}^{50} \phi(M) dM}{\int_{0.4}^{50} \phi(M) dM}; \quad s_2 = \frac{\int_2^{10} \phi(M) dM}{\int_{0.4}^{50} \phi(M) dM}.$$

Использовались НФМ Солпитера

$$\phi(M) \propto M^{-\mu} \quad \text{при} \quad 0.05 \leq M \leq 50$$

с различными показателями μ и НФМ Скало

$$\phi(M) = \begin{cases} 1.00 M^{-0.25}, & 0.4 < M \leq 1.0 \\ 1.00 M^{-1.0}, & 1.0 < M \leq 2.0 \\ 1.23 M^{-1.3}, & 2.0 < M \leq 10 \\ 12.3 M^{-2.3}, & 10 < M \leq 50. \end{cases}$$

Для функций, выражающих зависимость скорости поступления газа из звезд от времени, примем

$$r_1(t) = 0.9(1 - e^{-\alpha_1 t}); \quad r_2(t) = 0.5(1 - e^{-\alpha_2 t}). \quad (4)$$

Коэффициенты в (4) выбраны с учетом данных о массах "остатков" звезд, приведенных в [8], а α_1, α_2 - параметры, которые подбираются, исходя из имеющихся данных о времени жизни соответствующих звезд. Согласно [9], время жизни звезды с массой M (в годах)

$$\log \tau_M = 10.02 - 3.5 \log M + 0.90 (\log M)^2.$$

Для звезд, вспыхивающих как сверхновые II типа и производящих железо, характерное время жизни $\tau_1 \sim 10^7$ лет, для менее массивных звезд, вырабатывающих большую долю других тяжелых элементов, - $\tau_2 \sim 10^9$ лет. Таковы же (в предположении об однократной вспышке звездообразования) и характерные времена, через которые соответствующие элементы поступают из звезд в межзвездную среду (считаем, что выброс вещества из звезд мгновенный).

Примем, что при $t < \tau_1$ галактического ветра нет, а в промежутке времени $[\tau_1, \tau_2]$ его мощность обратно пропорциональна t (если ветер объясняется ускорением вещества МЗС при вспышках сверхновых, то это оправдано, так как со временем частота вспышек убывает). Считаем, что из галактик выметается весь газ, выбрасываемый из звезд, с задержкой η относительно времени выбрасывания (это время, необходимое для того, чтобы облако газа, выброшенное из звезды, покинуло галактику). Тогда

$$b = \begin{cases} 0, & \text{при } t < \tau_1, \\ (t + \eta)^{-1}, & \text{при } t > \tau_1, \end{cases} \quad (5)$$

где $\eta \sim 10^7$ лет.

3. *Результаты и выводы.* В начальный момент $t_0 = 0$, соответствующий $z_0 = 5$, плотность МЗС $\rho_{\text{МЗС}} = 10^{-26} \text{ г см}^{-3}$ и содержание тяжелых элементов в ней $Z_{\text{МЗС}}^{(1)} = 0$ и $Z_{\text{МЗС}}^{(2)} = 0$.

Варьировались параметры α_1, α_2 (см. соотношения (4)) и μ (показатель степени в НФМ Солпитера).

Результаты расчетов представлены на рис.1-4. Если не оговорено особо, то $\alpha_1 = 5, \alpha_2 = 0.57$ и $\mu = 1.35$.

На рис.1 приведены зависимости содержания тяжелых элементов (кроме железа) в МГС от времени и красного смещения для двух НФМ: Солпитера и Скало.

На рис.2 приведено отношение содержания всех тяжелых элементов,

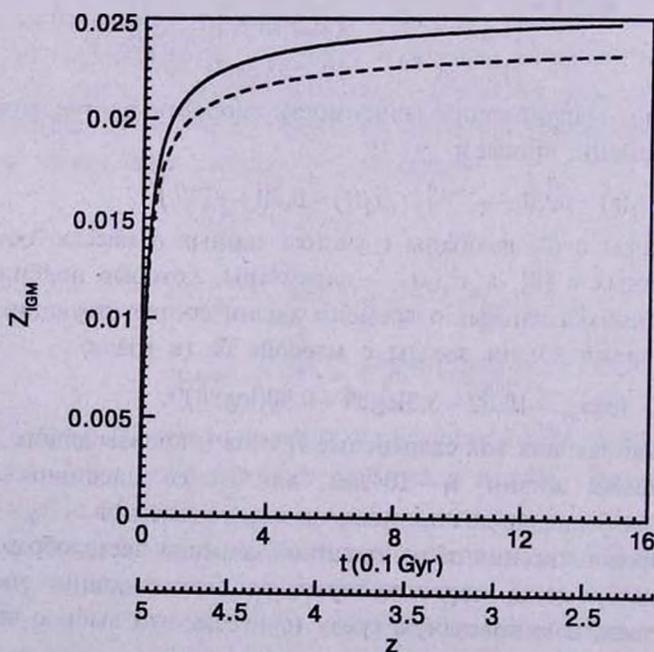


Рис.1. Зависимость от времени содержания в МГС тяжелых элементов (кроме железа). Сплошная линия: НФМ Скало; пунктирная: НФМ Солпитера с $\mu = 1.35$.

кроме железа, к содержанию железа в МГС ($[Z/Fe]_{\text{МГС}}$) в зависимости от времени и красного смещения. Используется НФМ Солпитера с различными показателями μ . Это отношение возрастает с увеличением μ , что легко объяснимо. С увеличением показателя степени в НФМ становится большей доля звезд малой массы по отношению к массивным, то есть возрастает отношение параметров s_2/s_1 , поэтому возрастает и производство менее тяжелых элементов по отношению к производству железа.

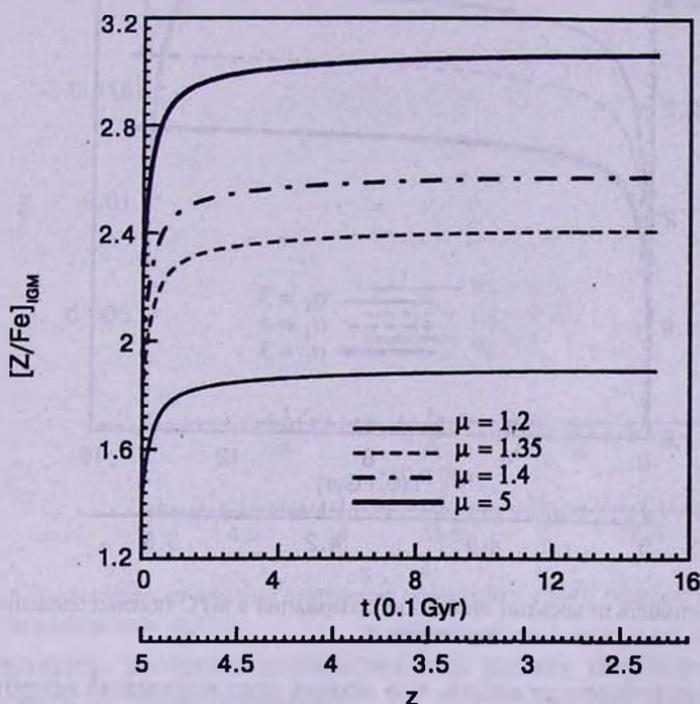


Рис.2. Зависимость от времени отношения содержания в МГС тяжелых элементов (кроме железа) к содержанию железа. Использовалась НФМ Солпитера с различными μ .

На рис.3 приведено отношение $[Z/Fe]_{\text{МГС}}$ в зависимости от времени и красного смещения, полученное при варьировании параметра α_1 - показателя экспоненты в первом из соотношений (4). Этот параметр определяет характерное время, за которое синтезируется железо в массивных звездах. Чем больше α_1 , тем характерное время синтеза меньше, то есть тем быстрее прекращается поступление железа в МЗС (а, следовательно, и в МГС), поэтому отношение $[Z/Fe]_{\text{МГС}}$ возрастает быстрее.

И, наконец, на рис.4 приведено содержание тяжелых элементов (кроме железа) от времени и красного смещения, полученное при варьировании параметра α_2 - показателя экспоненты во втором из соотношений (4). К ним можно применить те же выводы, что и к

рис.3, слабая же зависимость от параметра объясняется малостью времен, на которых рассматривается эволюция. Существенные различия будут наблюдаться на временах, в несколько раз больших характерного времени эволюции звезд небольших масс.

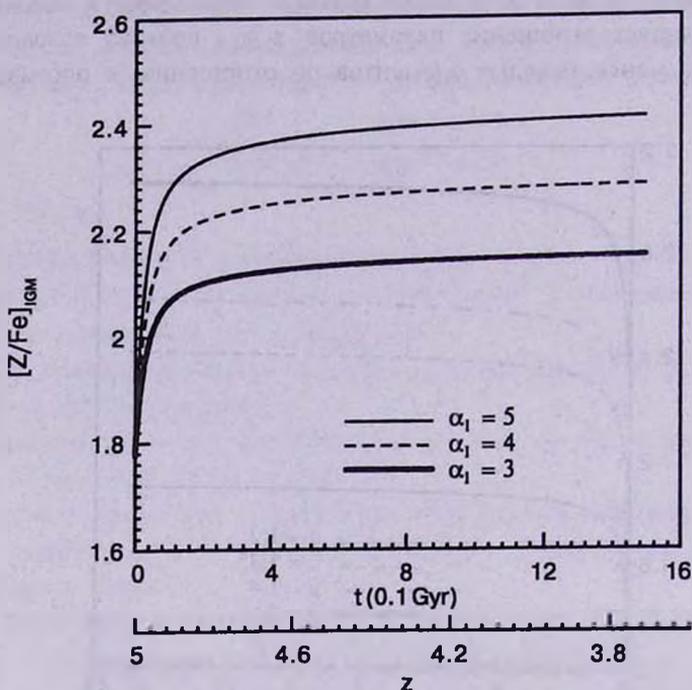


Рис.3. Зависимость от времени отношения содержания в МГС тяжелых элементов (кроме железа) к содержанию железа для различных α_1 .

Из вышеизложенного видно, что модель дает внутренне непротиворечивые результаты, однако сравнение их с данными наблюдений затруднено, поскольку данные о содержании тяжелых элементов в L_{α} -облаках весьма скудны.

Наблюдательные данные о содержании железа в "обычных" L_{α} -облаках отсутствуют. Что касается остальных тяжелых элементов, то для L_{α} -облаков есть данные о содержании углерода, который приходится считать в данном случае "типичным представителем" всех тяжелых элементов, кроме железа. К сожалению, для облаков L_{α} -леса только о величине $[CIV/H]$ имеются надежные наблюдательные данные [10,11], поэтому результаты определения содержания углерода в облаках по ним сильно зависят от предположений о степени ионизации газа. Так, при соответствующих предположениях в [10] получено, что для облаков на $z \approx 2.6$ среднее содержание углерода

$$[C/H] \sim -2, \quad (6)$$

а в работе [11] найдено, что в интервале $2.2 \leq z \leq 3$ около половины всех

облаков имеют

$$[C/H] > -2.5, \quad (7)$$

причем для некоторых из них значения $[C/H]$ достигают -1 .

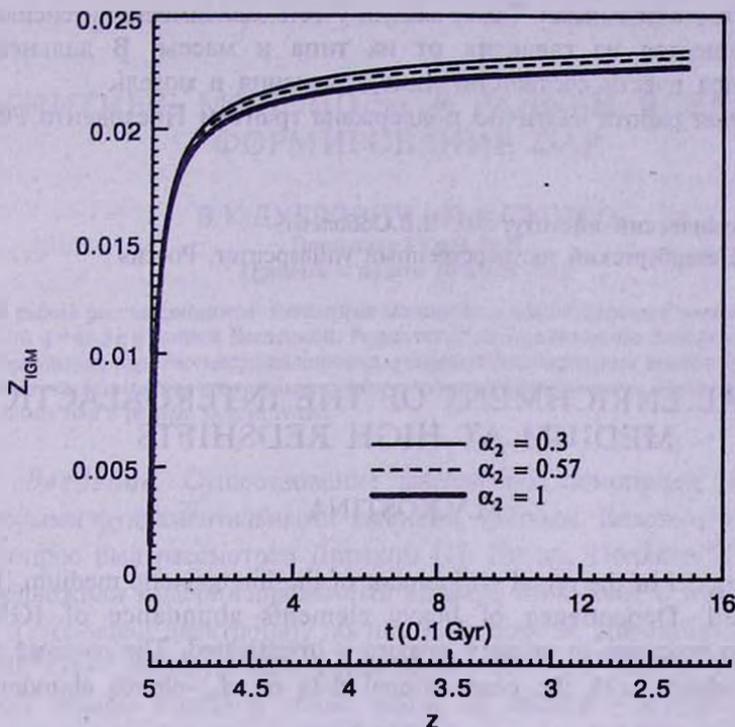


Рис.4. Зависимость от времени отношения содержания в МГС тяжелых элементов (кроме железа) для различных α_2 .

Результаты расчетов, выполненных в рамках обсуждаемой модели, согласуются с этими данными.

Наиболее часто публикуются работы, посвященные определению из наблюдений содержания тяжелых элементов в "damped L_α systems" - поскольку это облака с большой лучевой концентрацией, то наблюдать их легче. Однако, по-видимому, модель, описанная выше, для них неприменима, так как нельзя воспользоваться приближением мгновенного перемешивания.

Имеются наблюдательные данные о содержании элементов в L_α -облаках с меньшими красными смещениями [12]. При $z = 0.5$

$$[C/H] > -1.6 \pm 0.1, \quad (8)$$

то есть на порядок больше, чем при $z \sim 3$.

Предлагаемая модель не позволяет объяснить возрастание величины $[C/H]$ на порядок от $z \sim 3$ до $z = 0.5$. Это легко объясняется тем, что предположения, заложенные в модель, по-видимому, нельзя применять для расчета эволюции до малых z . Скорее всего, нужно отказаться от

предположения об однократной вспышке звездообразования и одновременном происхождении всех галактик. Неизвестны и характерные времена процессов, влияющих на химическую эволюцию МГС, поэтому предположения о мгновенном перемешивании и мгновенном выбросе газа из звезд могут оказаться несостоятельными. Также следует учесть зависимость интенсивности выброса вещества из галактик от их типа и массы. В дальнейшем предполагается внести соответствующие изменения в модель.

Настоящая работа частично поддержана грантом Президента РФ 00-15-96607.

Астрономический институт им. В.В.Соболева,
Санкт-Петербургский государственный университет, Россия

METAL ENRICHMENT OF THE INTERGALACTIC MEDIUM AT HIGH REDSHIFTS

M.V.KOSTINA

Simple model of the metal enrichment of the intergalactic medium (IGM) is considered. Dependence of heavy elements abundance of IGM on starformation processes in primary galaxies is investigated. The received results are in accordance with the observational data on L_{α} -clouds abundance.

Key words: *IGM:abundances - IGM:clouds*

ЛИТЕРАТУРА

1. *R.Rothenflug, L.Vigroux, R.F.Mushotzky, S.S.Holt*, *Astrophys. J.*, **279**, 53, 1984.
2. *R.Lynds*, *Astrophys. J. Lett.*, **164**, L73, 1971.
3. *В.Г.Горбацкий, А.Б.Кириенко, С.П.Прохоров*, *Астрон. ж.*, **73**, 499, 1996.
4. *А.С.Соколов*, *Астрофизика*, **40**, 535, 1997.
5. *A.M.Wolfe*, in "QSO Absorption Lines", ed. G.Meylan, Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 1995, p.13.
6. *L.Lu, W.L.W.Sargent, T.A.Barlow et al*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **107**, 475, 1996.
7. *В.Г.Горбацкий*, *Астрофизика*, **43**, 5, 2000.
8. *J.Köppen, N.Arimoto*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **87**, 109, 1991.
9. *R.B.Larson*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **166**, 585, 1974.
10. *L.L.Cowie, A.Songaila, T.-S.Kim, E.M.Hu*, *Astron. J.*, **109**, 1522, 1995.
11. *D.Tytler, X.-M.Fan, S.Burles et al*, in "QSO Absorption Lines", ed. G.Meylan, Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 1995, p.289.
12. *T.Barlow, D.Tytler*, *Astron. J.*, **115**, 1725, 1998.