

УДК 524.726

ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКИ

Б. В. ВАЙНЕР, А. Ю. ГЛУХОВ, В. В. ЧУВЕНКОВ

Поступила 21 февраля 1991

Принята к печати 23 сентября 1991

Представлены результаты численных расчетов эволюции диска спиральной галактики и радиальных градиентов содержания химических элементов (D, ^4He , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O , Fe). Показано, что наличие аккреции на галактику приводит к уменьшению величин радиальных градиентов на заключительном этапе эволюции. Сделан вывод, что хорошее согласие с наблюдениями гелия обнаруживается, если его первичное обилие составляет $Y_0 = 0.25$. Незначительное уменьшение содержания дейтерия за время эволюции Галактики подтверждает заключение о низкой плотности барьонной Вселенной: $^2_1\text{H}^1_{50} < 0.1$.

1. Введение. Исследование изменений химического состава вещества в галактиках позволяет определить обилие изотопов водорода, гелия и лития в первичном космологическом субстрате и, следовательно, сделать более адекватными реальности заключения о физических условиях в ранней Вселенной. Качество моделей эволюции галактики улучшается по мере увеличения количества включаемых в расчеты характеристик, численные значения которых можно непосредственно сопоставлять с наблюдениями. Естественно, что в этом аспекте наиболее полно изучена наша Галактика, и именно она использована в настоящей работе в качестве эмпирической основы рассмотренных моделей. Если ранее в цикле работ [1—3] мы рассматривали каждую галактику как единое целое, усредняя распространенности элементов по всему объему, то здесь предпринята попытка согласовать с наблюдениями радиальные градиенты химсостава вещества, плотности газа и звезд, сделать сколь угодно уверенные заключения о распределении плотности аккреционного потока.

В результате расчетов обилий легких элементов, элементов CNO-группы и железа удалось установить следующее:

- 1) Уменьшение обилия дейтерия не превышает фактора ~ 2 .
- 2) Первичное обилие гелия $V_0 = 0.25$.

3) Аккреция сильно сглаживает радиальные градиенты химсостава. В целом, эти выводы еще раз подтверждают заключение о низкой средней плотности вещества во Вселенной ($\Omega_b \leq 0.1$) и о небарионной природе скрытой массы.

2. *Модель галактики.* Рассмотрим эволюцию диска спиральной галактики, в которой происходит звездообразование и идет обмен веществом между диском и межгалактическим газом. Будем считать, что изначально масса диска равна массе межгалактического газа, приходящейся на одну галактику в скоплении [4]. Тогда эволюция радиального распределения поверхностной плотности газа в галактике описывается уравнением:

$$\frac{d}{dt} G(R, t) = -\psi(R, t) + J(R, t) - E(R, t) + A(R, t), \quad (1)$$

где $\psi(R, t)$ —скорость звездообразования, $E(R, t)$ —темп эжекции вещества в межгалактическую среду, $A(R, t)$ —темп аккреции на галактику, $J(R, t)$ —скорость возврата звездного вещества в межзвездную среду:

$$J(R, t) = \int_0^{\infty} E_*(m) \cdot \psi(R, t - \tau(m)) \cdot \Phi(m, t - \tau(m)) dm, \quad (2)$$

где $E_*(m)$ —доля массы звезды с начальной массой m , возвращаемая в межзвездную среду по окончании эволюции, $\tau(m)$ —время жизни звезды с массой m , $\Phi(m, t - \tau(m))$ —начальная функция масс звезд (m выражена в ед. M_{\odot}).

Соответственно, изменение со временем поверхностной плотности звезд на расстоянии R от центра галактики задается уравнением:

$$\frac{d}{dt} S(R, t) = \psi(R, t) - J(R, t). \quad (3)$$

Эволюция массовой концентрации i -го химического элемента определяется следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [G(R, t) \cdot X_i(R, t)] = & -\psi(R, t) \cdot x_i(R, t) + J_i(R, t) - \\ & - E(R, t) \cdot X_i(R, t) + A(R, t) \cdot X'_i(t). \end{aligned} \quad (4)$$

где $X'_i(t)$ —обилие соответствующего элемента в межгалактической среде; $J_i(R, t)$ —скорость возврата звездами i -го элемента в межзвездную.

среду, которая получается из равенства (2) заменой величины $E_*(m)$ на $E_i(R, m, t)$, представляющую собой долю начальной массы звезды на расстоянии R от центра галактики, эжектируемую в межзвездную среду в виде i -го элемента. Величина $X_i(t)$ есть результат усреднения радиального распределения межгалактического обилия $X_i(R, t)$, эволюция которого описывается уравнением

$$\frac{d}{dt} [G'(R, t) \cdot X_i(R, t)] = E(R, t) \cdot X_i(R, t) - A(R, t) \cdot X_i(R, t), \quad (5)$$

где $G'(R, t)$ — поверхностная плотность межгалактического газа в цилиндре, перпендикулярном галактической плоскости; причем

$$\frac{d}{dt} G'(R, t) = E(R, t) - A(R, t). \quad (6)$$

Система уравнений (1) — (6) полностью определяет эволюцию газа и химических элементов в диске спиральной галактики. Все величины в этих уравнениях и далее нормированы на начальную массу диска M_0 с фиксированным радиусом R_g , а время измеряется в ед. 10^9 лет.

Скорость звездообразования предполагается пропорциональной плотности галактического газа:

$$\psi(R, t) = \alpha(t) \cdot G^n(R, t), \quad 1 < R \leq 16 \text{ кпк}, \quad (7)$$

причем рассмотрены модели с $n=1$, а зависимость коэффициента α от времени определяет общую переменность ψ на различных этапах эволюции спиральной галактики. Действительно, согласно «двухфазной» модели образования галактик [5], формирование диска происходит в результате вспышки звездообразования через $\sim (5 \div 8) 10^9$ лет после гало; в то же время, при образовании гало вещество диска в результате взаимодействия обогащается тяжелыми элементами [6], что ведет к необходимости учета соответствующей вспышки звездообразования и при рассмотрении эволюции диска. Соответственно, коэффициент $\alpha(t)$ в нашей модели имеет следующий вид [1]:

$$\alpha(t) = \begin{cases} -h_1 \cdot (t - t_1 + \Delta t)(t - t_1 - \Delta t) + a_0, & t_1 - \Delta t \leq t < t_1 + \Delta t \\ -h_2 (t - t_2 + \Delta t)(t - t_2 - \Delta t) + a_0, & t_2 - \Delta t \leq t \leq t_2 + \Delta t \\ a_0, & t_1 + \Delta t < t < t_2 - \Delta t, \quad t > t_2 + \Delta t. \end{cases} \quad (8)$$

Величины h_1 и h_2 представляют собой амплитуды вспышек звездообразования во время формирования гало $0 \leq t \leq 2$ и диска $4 \leq t \leq 6$, а вели-

чина α_0 — темп звездообразования по окончании вспышек. В результате расчета большого числа модельных вариантов оказалось, что наилучшее согласование с современными наблюдениями обнаруживается, если $h_1 = 0.4$, $h_2 = 0.8$ и $a_0 = 0.5$. Соответственно, все представленные ниже результаты получены в модели с такими параметрами. Функция $\psi(t)$, задаваемая равенствами (7), (8), представлена на рис. 1.

Начальное распределение газа, согласно [7], представляется в виде:

$$G(R, t = 0) = \beta \cdot R^p, \quad 1 \leq R \leq 16 \text{ кпк}, \quad (9)$$

где значение показателя $p = -1$, а $\beta = 0.576$ определяет выполнение условия равенства масс вещества в межгалактической среде и галактике с радиусом $R_g = 16$ кпк.

Далее кратко опишем основные модельные параметры, использованные в расчетах (подробное описание см. в работе [3]).

Начальная функция масс Φ не зависит от галактоцентрического расстояния, но зависит от времени таким образом, что ее максимум экспоненциально смещается от значения $m = 10$ при $t = 0$ до $m = 0.008$ в настоящий момент $t_g = 13.5$. Исследованное приближение отражает факт уменьшения джинсовской, массы при обогащении среды тяжелыми элементами [8, 9], а выбранное значение t_g соответствует возрасту Вселенной при постоянной Хаббла $h_{50} = H_0 / (50 \text{ км/с/Мпк}) = 1$. Тогда НФМ имеет вид:

$$\varphi(m, t) = 7.54 \cdot 10^{-2} \cdot m^{-1} \cdot \exp[-1.09(\lg m + f(t))^2 + 2.3 \cdot f(t)], \quad (10)$$

где функция $f(t)$ определяет закон смещения максимума:

$$f(t) = -3.076 \exp(-2t) + 1.02, \quad (11)$$

а коэффициенты в (10), (11) определяются из нормировочного соотношения

$$\int_0^{\infty} m \varphi(m, t) dm = 1.$$

Темп эжекции вещества из галактики пропорционален частоте вспышек сверхновых II типа:

$$E(R, t) = k \int_3^{\infty} E_s(m) \cdot \psi(R, t) \cdot \varphi(m, t) dm, \quad (12)$$

где $k = 3$.

Следует отметить, что закон радиальной зависимости коэффициентов в правой части системы (1)–(6), описанных выше, определяется

только равенством (9). В расчетах были использованы также зависимости $G(R, 0)$ с другими значениями ρ . Однако при этом конечные результаты обнаруживают значительные расхождения с наблюдениями, поэтому следует подчеркнуть, что значение $\rho = -1$ в наибольшей степени соответствует действительности, и представленные ниже результаты получены при $\rho = -1$.

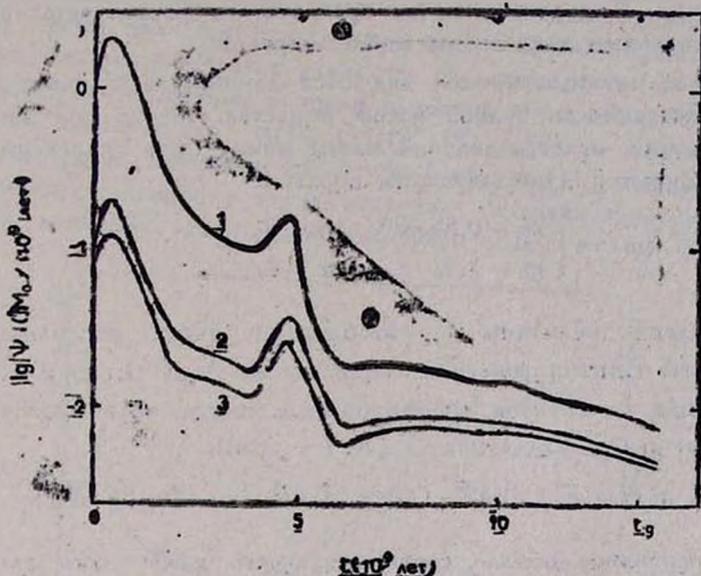


Рис. 1. Зависимость скорости звездообразования ϕ от времени: 1—для $R=1$ кпк; 2—для $R=10$ кпк; 3—для $R=16$ кпк.

Темп аккреции на галактику предполагается экспоненциально убывающим со временем независимо от галактоцентрического расстояния:

$$A(t) = A_0 \exp(-\omega t/t_g), \tag{13}$$

где $A_0 = 0.03$, $\omega = \ln 3$; хотя, возможно, A также является функцией от R [10].

Кроме того, мы пренебрегаем радиальными потоками вещества, возникающими вследствие закона сохранения момента импульса, если вещество натекает на вращающуюся галактику перпендикулярно к ее плоскости. В этом случае газ на расстоянии R от центра галактики приобретает скорость, направленную к центру:

$$v_R = \frac{A \cdot R}{2 \cdot G} = 0.5 \left(\frac{A}{0.01} \right) \left(\frac{G}{0.1} \right)^{-1} \left(\frac{R}{10} \right) \text{ [кпк/} 10^9 \text{ лет]}. \tag{14}$$

Характерное время радиальной диффузии в галактике с $R_g = 15$ кпк составляет $\sim 3 \cdot 10^{10}$ лет, что больше t_g и значительно превышает характерное время изменения химсостава $\sim 10^9$ лет. Поэтому пренебрежение радиальными потоками в (1), (4) незначительно меняет конечные результаты.

Использованные приближения позволяют более четко определить эффекты, обусловленные только радиальной зависимостью скорости звездообразования. В дальнейшем мы предполагаем рассмотреть также модели с радиальным градиентом темпа аккреции.

Наиболее неопределенными являются данные, касающиеся звездной эжекции. Зависимость полной массы вещества, сброшенной звездой за время эволюции, от ее начальной массы может быть аппроксимирована, с учетом данных [11], следующим образом:

$$E_*(m) = \begin{cases} m - 0.55 m^{1/2}, & m \leq 8, \\ m - 1.4, & m > 8. \end{cases} \quad (15)$$

При нахождении величины E_{i_s} необходимо учесть не только обилие i -го элемента, синтезируемого в самой звезде $X_{i_s}(m)$, но и его содержание в среде, из которой сформировалась звезда, находящаяся на расстоянии R от центра Галактики $X_i(R, t - \tau(m))$:

$$E_{i_s}(R, m, t) = E_*(m) \cdot [X_{i_s}(m) + (X_i(R, t - \tau(m)) - X_{i_0})], \quad (16)$$

где X_{i_0} — первичное обилие соответствующего химического элемента.

Зависимости $X_{i_s}(m)$ были аппроксимированы для ${}^4\text{He}$ и CNO-элементов с учетом данных работ [12—14]; для железа — с учетом данных [12, 15] и для лития — исходя из данных [16, 17] (т. к. дейтерий полностью выгорает в звездах, для этого элемента $E_{i_s}(m) = 0$). Первичные обилия рассмотренных химических элементов соответствуют их производству в стандартной модели с параметром $\Omega_b = 0.08$; т. е. $X_0(D) = 8 \cdot 10^{-5}$; $X_0({}^4\text{He}) = 0.25$; $X_0({}^7\text{Li}) = 2 \cdot 10^{-10}$, начальные обилия остальных элементов предполагаются равными нулю. Кроме того, один модельный вариант был рассчитан с первичным обилием гелия $X_0({}^4\text{He}) = 0.23$ [18, 19].

3. *Результаты.* Результаты представлены на рис. 2—6. Рис. 2 иллюстрирует современные радиальные распределения галактического содержания газа и скорости звездообразования в Галактике. Видно, что начальное распределение плотности, пропорциональное R^{-1} , к настоящему времени практически полностью нивелируется и сейчас близко к постоянной величине $G \sim 10^{-3}$ для $R > 3$ кпк. Для галактики с массой

$M = 10^{11} M_{\odot}$ это соответствует $\psi \sim 0.5 M_{\odot}/\text{год}$, что находится в хорошем согласии с наблюдательными данными для нашей Галактики [20, 21]. В окооядерной области звездообразование и сегодня идет интенсивнее, здесь $\psi \sim (0.8 \div 1) \cdot 10^{-2}$ ($\sim 0.8 \div 1 M_{\odot}/\text{год}$). Соответственно, доля образовавшихся звезд уменьшается от центра к краю дисковой подсистемы галактики, чем объясняется полученный положительный градиент содержания газа. Радиальное распределение поверхностной плотности газа в настоящее время является практически плоским, что хорошо согласуется с наблюдениями. Следует отметить, что этот результат практически не зависит от начальных условий и получается в моделях с большим набором зависимостей $\omega(t)$ и $G(R, 0)$. Детали зависимости $G(R, t_g)$, в частности, максимум на $R \sim 3-5$ кпк, могут быть получены только с учетом зависимости темпа аккреции от галактоцентрического расстояния и, возможно, радиальной диффузии газа.

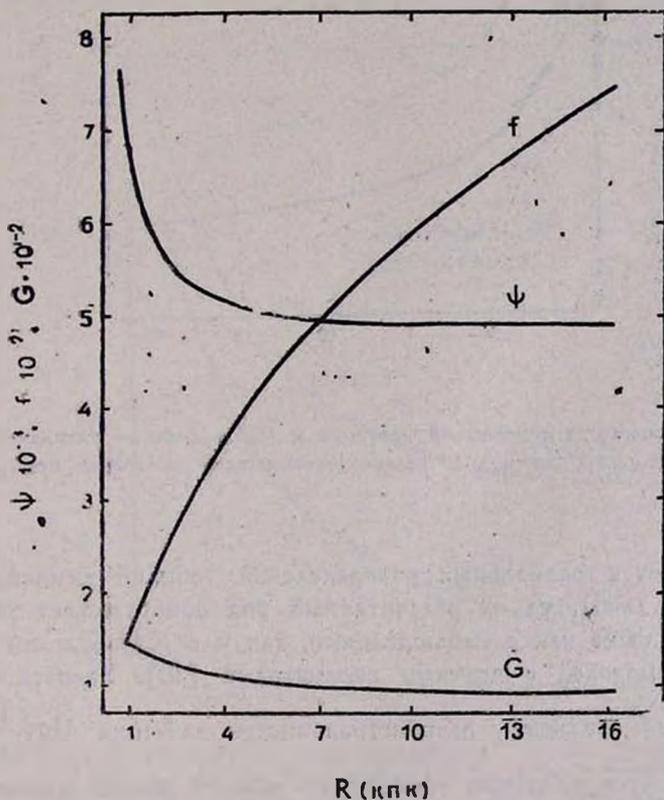


Рис. 2. Зависимости поверхностной плотности газа G (в ед. M_0), скорости звездообразования ψ (в ед. $M_0 / 10^9$ лет) и относительного содержания газа $f = G/(G + S)$ от галактоцентрического расстояния в момент времени $t_g = 13.5 \cdot 10^9$ лет.

Следует еще раз подчеркнуть, что конечные результаты определяются соотношением между временными интегралами скорости звездообразования и аккреции и слабо зависят от дифференциального вида этих функций, причем на заключительном этапе (при $t > 6$), когда $\psi \sim A \sim 10^{-2}$, эволюция определяется в первую очередь аккрецией вещества из межгалактической среды, и содержание газа в течение этого периода изменяется слабо [1—3].

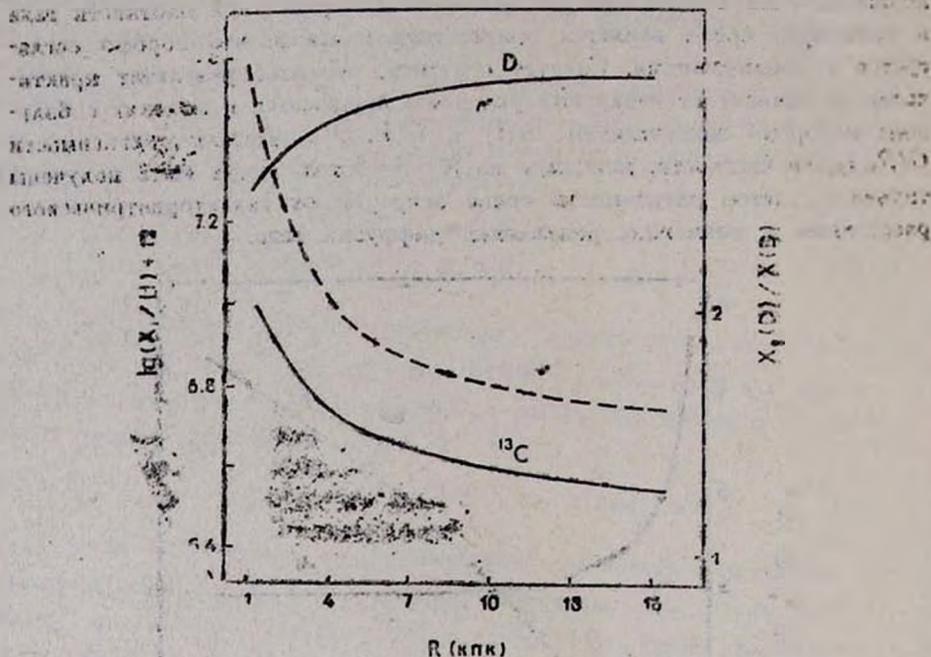


Рис. 3. Зависимости содержаний дейтерия и ^{13}C и фактора уменьшения первичного обилия дейтерия (цифр) от галактоцентрического расстояния при $t_g = 13.5 \cdot 10^9$ лет.

Что касается радиальных распределений обилий химических элементов (рис. 3—6), то их рассчитанный вид обнаруживает удовлетворительное согласие как с наблюдениями, так и с результатами расчетов аналогичных моделей с другими параметрами [10]. Удастся получить положительный градиент распространенности дейтерия $\Delta \lg \left(\frac{D}{H} \right) / \Delta R = 0.02 \text{ кпк}^{-1}$ и отрицательные градиенты обилий других рассмотренных элементов. Так, для кислорода эта величина составляет $\Delta \lg \left(\frac{^{16}\text{O}}{H} \right) / \Delta R =$

—0.03 клк⁻¹, причем соотношение $\frac{^{14}\text{N}}{^{16}\text{O}}$ не зависит от радиуса и близко к солнечному $\lg\left(\frac{^{14}\text{N}}{^{16}\text{O}}\right) = -0.7$. Эти значения хорошо согласуются с наблюдательными результатами [22]. Несколько меньший градиент обилия кислорода по-прежнему обусловлен постоянством темпа аккреции в рассмотренной модели. Фактор уменьшения галактического содержания дейтерия, как и в предыдущих работах [1—3], является малым $X_0(D)/X^{об}(D) \leq 2$, что оставляет в силе сделанный ранее вывод о величине Ω_b . Анализируя полученное радиальное распределение обилия гелия, следует отметить, что значение $Y_0 = 0.25$ в большей степени согласуется с наблюдениями этого элемента в околосолнечной окрестности, нежели $Y_0 = 0.23$. Однако, если достоверность последнего значения подтвердится, то в современные представления о эволюции ^4He в Галактике необходимо будет внести изменения.

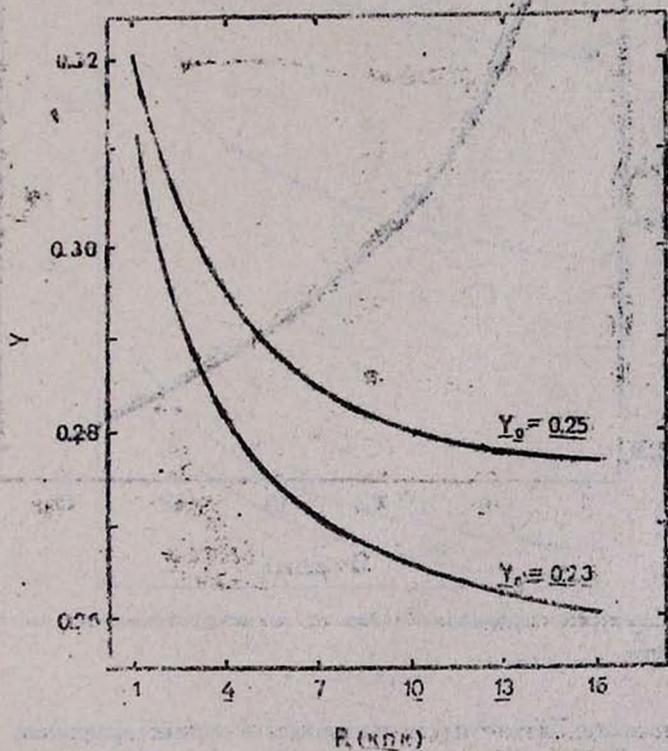


Рис. 4. Зависимость массовой концентрации ^4He от галактоцентрического расстояния при различных значениях его первичного обилия Y_0 .

Наконец, полученная распространенность лития также хорошо соответствует наблюдениям этого элемента в диске Галактики [23, 24], хотя удовлетворительно точных данных о радиальном градиенте обилия этого элемента в Галактике пока нет, и их получение во многом связано с предстоящими наблюдениями.

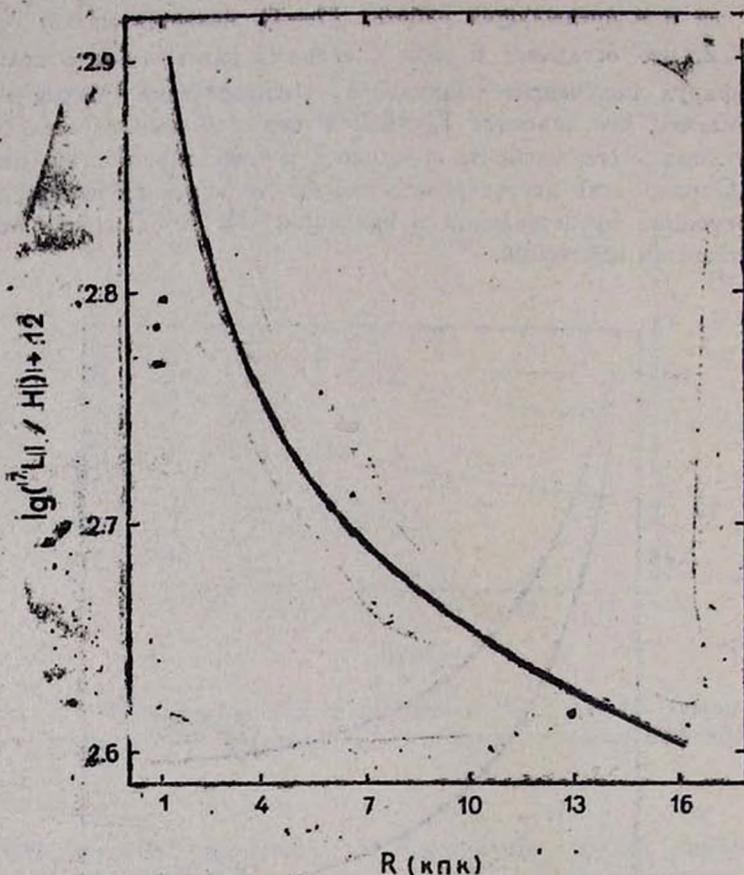


Рис. 5. Зависимость содержания лития от галактоцентрического расстояния при $t_g = 13.5 \cdot 10^9$ лет.

4. *Заключение.* Как следует из представленных графиков, конечные результаты расчетов химической эволюции диска спиральной галактики в рассмотренных моделях удовлетворительно согласуются с совокупностью современных наблюдательных данных о составе диска нашей Галактики. Это позволяет подтвердить правильность основных выводов

работ [1—3], касающихся галактической химической эволюции. Главным из них является утверждение о доминировании аккреции вещества на галактику на заключительном этапе эволюции, при $t > 6 \cdot 10^9$ лет. Это явление, приводящее к практическому постоянству химического состава диска в это время [25, 26], определяющее малую степень уменьшения первичного обилия дейтерия ≤ 2 [1—3] и, возможно, вызывающее уменьшение галактической металличности при красных смещениях $z < 1$ [27, 28], обуславливает также сглаживание распределений химических элементов по радиусу галактики. Вместе с тем, для улучшения согласования с наблюдениями в дальнейшем необходимо рассмотрение

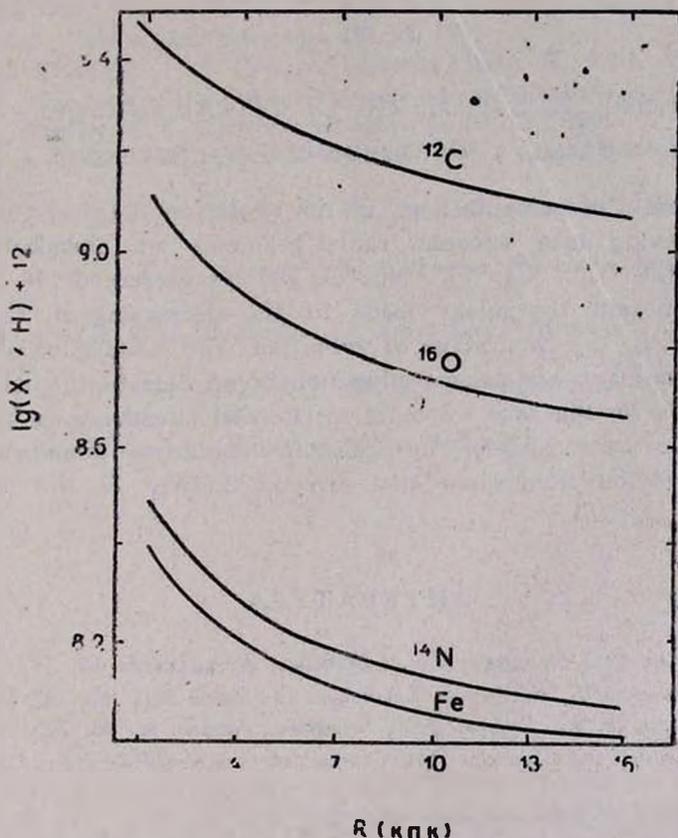


Рис. 6. Зависимости содержания элементов групп CNO и железа от галактоцентрического расстояния при $t = 13.5 \cdot 10^9$ лет.

более детализированных моделей. В частности, необходим учет зависимости плотности аккреционного потока от радиуса галактики, а также,

возможно, наличие его радиальной составляющей и отличия показателя n в (7) от единицы [10, 29]. Однако основной космологический вывод, следующий из представленных результатов, совпадает с выводами работ [1—3]: наилучшее согласование между наблюдаемыми сегодня и произведенными в ранней Вселенной обилиями химических элементов (с учетом галактической эволюции) проявляется в стандартной модели горячей Вселенной с параметром барионной плотности $\Omega_b h_{50}^2 = 0.1$, что говорит о небарионной природе скрытой массы.

Ростовский государственный
университет

CHEMICAL EVOLUTION OF SPIRAL GALAXY

B. V. VAINER, A. YU. GLUKHOV, V. V. CHUVENKOV

The results of computations of the evolution of spiral galaxy flat subsystem taking into account radial gradients of chemical element abundances (D, ^4He , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O , Fe) are presented. It is shown that accretion onto the galaxy leads to the decreasing of the radial gradients during the final stage of evolution. The conclusion about the best agreement between calculated and observed data on the helium evolution is made for the case when its primordial abundance is $Y_0 = 0.25$. Small factor of decreasing of the primordial deuterium abundance confirms the previous conclusion that baryon density in the Universe is small: $\Omega_b h_{50}^2 \leq 0.1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Вайнер, В. В. Чувенков, Ю. А. Щекинов, *Астрофизика*, 30, 437, 1989.
2. V. V. Chuvankov, B. V. Vainer, *Astrophys. and Space Sci.*, 154, 287, 1989.
3. Б. В. Вайнер, А. Ю. Глухов, В. В. Чувенков, *Астрон. ж.*, 68, 225, 1991.
4. C. L. Sarazin, *X-ray Emissions from Clusters of Galaxies*, Cambridge Univ. Press, 1988.
5. А. А. Сучков, *Астрон. циркуляр*, № 1423, 1986, стр. 3.
6. Y. Kamai, Y. Sabano, M. Tosa, *Astrophys. and Space Sci.*, 143, 257, 1988.
7. J.-M. Alimi, F. R. Bouchat, R. Pellat, J.-F. Sygnet, F. Moutarde, *Astrophys. J.*, 354, 3, 1990.
8. А. Г. Дорошкевич, И. Г. Колесник, *Астрон. ж.*, 53, 10, 1976.
9. J. Silk, *Astrophys. J.*, 211, 638, 1977.
10. F. Matteucci, J. Franco, P. Francois, M. A. Tregler, *Rev. Mexican Astron. Astrofiz.*, 18, 145, 1989.
11. I. J. Iben, J. W. Truran, *Astrophys. J.*, 220, 933, 1973.

12. *A. Renzini, M. Volt, Astron and Astrophys., 94, 175, 1981.*
13. *S. E. Woosley, T. S. Axelrod, T. A. Weaver, Stellar Nucleosynth. Proc. 3-rd Workshop Adv. Sch. Astron., Erice, 1983, Dordrecht e. a.: Reidel, 263, 1984.*
14. *N. Prantzos, C. Doom, M. Arnould, C. de Loore, Astrophys. J., 304, 695, 1986.*
15. *А. В. Тулуков, Науч. информ. Астрон. Совета АН СССР, 304, 695, 1983.*
16. *F. D'Antona, Astrophys. and Space Sci., 112, 351, 1985.*
17. *C. P. Deliyannis, P. Demarque, S.D. Kawaler, Prepr. Center Solar and Space Res., Yale Univ., 1989.*
18. *J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, A. Serrano, S. Torres-Peimbert, Astron. and Astrophys., 80, 155, 1979.*
19. *Ю. И. Изотов, В. А. Липовецкий, И. Г. Гусева, А. Ю. Князев, Астрон. ж., 67, 682, 1990.*
20. *M. Tosi., Astron. and Astrophys., 197, 33, 1988.*
21. *А. С. Марочник, А. А. Сучков, Галактика, Наука, М., 1984, стр. 392.*
22. *D. R. Garnett, G. A. Shields, Astrophys. J., 317, 82, 1987.*
23. *D. L. Lambert, S. R. Sawyer, Astrophys. J., 283, 192, 1984.*
24. *R. Cayrel, G. C. de Strobel, B. Campbell, W. Dappen, Astrophys. J., 283, 205 1984.*
25. *R. G. Calberg, P. C. Dawson, T. Hsu, D. A. VandenBergh. Astrophys. J., 294, 674, 1985.*
26. *В. Г. Клочкова, Т. Б. Мишенина, В. Е. Панчук, Письма в Астрон. ж., 15, 315, 1989.*
27. *C. C. Steidel, W. L. W.Sargent, A. Boksenberg, Astrophys. J., Lett. 333, L5 1988.*
28. *U. Fritze—V. Alvensleben, K. J. Fricks, H. Kruger, H.-H. Loose, Astron. and Astrophys., 224, L1, 1989.*
29. *R. C. Jr. Kennicutt, Astrophys. J., 344, 685, 1989.*