

УДК: 524.6—36—54

О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ ДОГАЛАКТИЧЕСКОГО
ВЕЩЕСТВА

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

Поступила 12 января 1988

Принята к печати 8 мая 1988

Представлены результаты численных расчетов химической эволюции Галактики с учетом обмена веществом с межгалактической средой. Из условия согласования результатов расчетов со всей совокупностью имеющихся наблюдений, установлена малая степень уменьшения первичного обилия дейтерия вследствие его ядерной переработки в звездах. Это позволяет использовать его наблюдаемую распространенность в качестве теста для отбора параметров космологических моделей.

1. *Введение.* Сопоставление результатов расчетов космологического нуклеосинтеза легких элементов с наблюдаемыми сегодня их распространенностями позволяет восстановить картину эволюции Вселенной в первые несколько минут ее расширения. Однако прямой реализации этой программы препятствует значительная неопределенность в степени изменения содержания элементов в течение жизни Галактики. Существенный прогресс в решении проблемы может быть достигнут на пути построения так называемых формализованных теорий химической эволюции (см., например, [1]).

В настоящее время имеется ряд достаточно точных наблюдательных данных, относящихся к распространенностям элементов в нашей и других галактиках, измерено содержание железа в горячем межгалактическом газе более чем двадцати скоплений, известна масса межзвездного газа и звезд нашей Галактики, не вызывает сомнений наличие обмена веществом между галактиками и межгалактической средой. Значительно большие неопределенности существуют в наших представлениях о химическом составе сбрасываемого звездами вещества, о темпе образования звезд, и совсем плохо известны количественные характеристики процессов эжекции и аккреции газа Галактикой. Тем не менее, можно рассчитать химический состав первичного догалактического вещества с хорошей точностью, если включить в подлежащие определению характеристики модели все величины, которые можно сравнить с наблюдаемыми.

С точки зрения реконструкции условий в ранней Вселенной наибольший интерес представляет исследование эволюции содержания дейтерия и гелия. Как известно, массовая концентрация дейтерия, образовавшегося в результате первичного нуклеосинтеза, наиболее сильно зависит от плотности вещества [2]. Наблюдаемое содержание дейтерия в настоящее время характеризуется величиной $X \approx 2 \cdot 10^{-5}$ [3, 4]. По поводу же вопроса о степени уменьшения его содержания (в Галактике дейтерий не синтезируется) имеются существенные разногласия. Построенные в ряде работ простые модели химической эволюции Галактики позволили оценить верхнюю границу первичного содержания этого элемента, $X_{pg} < 10^{-4}$ [5—7], но в то же время авторы работы [8] утверждают, что $X_{pg} \geq 2 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, есть необходимость в проведении детальных расчетов.

Выход гелия в космологическом нуклеосинтезе слабо (логарифмически) зависит от плотности вещества, но весьма чувствителен к числу типов легких релятивистских частиц, например, нейтрино [9]. Кроме того, имеются наблюдения распространенности гелия в других галактиках, в частности молодых, содержащих очень малое количество тяжелых элементов [10]. Это позволяет не только оценить первичное космологическое обилие этого элемента, но и установить эмпирическую связь между дополнительным синтезом гелия в галактиках и содержанием тяжелых элементов (Z). По весьма грубым оценкам $\Delta Y = (1 \div 3) Z$ [10]. Существенное уточнение этого соотношения возможно только путем построения рафинированной модели химической эволюции Галактики.

2. Модель построена следующим образом. Галактика считается членом скопления, причем предполагается, что масса звезд в галактике и масса межгалактического газа, приходящаяся на нее, равны в настоящее время. Действительно, наша Галактика входит в состав местной группы, в которой доминируют две больших спиральных галактики, а также имеются несколько слабых эллиптических и неправильных галактик. В хорошо изученных больших скоплениях ситуация может быть иная. Например, в Деве эллиптических галактик всего 28%, а в Коме — приблизительно 54%. Но поскольку дейтерий наблюдается только в нашей Галактике, основные выводы представленных расчетов мы старались «привязать» именно к типичной спиральной галактике. С другой стороны, содержание железа в межгалактическом газе богатых скоплений известно с достаточно хорошей точностью, а в газе, окружающем нашу Галактику, тяжелые элементы не наблюдались. Поэтому, используя тот факт, что качественных различий между скоплениями и группами галактик не обнаруживается, мы попытались экстраполировать имеющиеся данные на местную группу галактик и, тем самым, «предсказать» химический состав газа между галактиками мест-

ной группы. Полная масса этого газа также неизвестна, но измерения параметров горячего газа изученных скоплений позволяют предположить, что масса, содержащаяся в звездах, примерно равна массе межгалактического газа [11—13]. Однако схема расчетов построена так, что все полученные результаты, относящиеся к межгалактическому газу, легко пересчитать на любое соотношение между массами звезд и газа, если будущие наблюдения позволят существенно уточнить соответствующие величины. Само скопление рассматривается как замкнутая система, т. е. пренебрегается обменом веществом между межгалактической средой и разреженным газом, находящимся между скоплениями галактик. Тогда эволюция газовой и звездной составляющих, а также химического состава вещества в типичной галактике определяется следующей системой уравнений [1]:

$$\frac{dG_g}{dt} = -\psi(t) + \int_0^{\infty} E_s(m) \varphi(m, t) \psi(t - \tau_m) dm - E_g(t) + A(t), \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \psi(t) - \int_0^{\infty} E_s(m) \varphi(m, t) \psi(t - \tau_m) dm, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (X_{ig} G_g) &= -\psi(t) X_{ig} + \\ &+ \int_0^{\infty} E_{is}(m) \varphi(m, t) \psi(t - \tau_m) dm - E_g(t) X_{ig} + A(t) X_{is}. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих уравнениях G_g и S — массы газовой и звездной составляющих галактики соответственно, $E_g(t)$ — темп эжекции вещества из галактики, $\psi(t)$ — скорость звездообразования, $\varphi(m, t)$ — начальная функция масс звезд, τ_m — время жизни звезды, $E_s(m)$ — доля массы звезды, сбрасываемая в межзвездный газ, $A(t)$ — темп аккреции газа галактикой, X_i — обилия элементов, индекс «g» относится к веществу галактики, а индекс «s» — к межгалактическому газу, $E_{is}(m)$ — доля массы звезды, сбрасываемая в виде i -го элемента. Очевидно, что $\sum_i X_i = 1$ и $\sum_i E_{is} = E_s$.

Решение системы (1)—(3) удобно производить в безразмерных переменных. Для этого величины G , S , ψ , E_g , A нормированы на начальную массу галактики M_0 , а время выражено в единицах 10^9 лет. Например, $\psi = 0.1$ в наших обозначениях соответствует $\psi = 10 \frac{M_{\odot}}{\text{год}}$ для $M_0 = 10^{11} M_{\odot}$.

Обмен газом между галактиками и межгалактической средой описывается уравнениями:

$$\frac{dG_g}{dt} = E_g(t) - A(t), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}(X_{i_g} G_g) = X_{i_g} E_g(t) - X_{i_g} A(t). \quad (5)$$

Начальные условия для системы уравнений (1)—(5) имеют следующий вид: $G_g^0 = 1$, $S^0 = 0$, $G_s^0 = 1$; химический состав вещества — первичный, т. е. тяжелые элементы полностью отсутствуют.

Для сбрасываемой звездой массы может быть представлена в виде [14]:

$$E_s(m) = \begin{cases} m - 0.55 m^{0.5}, & m < 8, \\ m - 1.4, & m > 8. \end{cases} \quad \text{где } m = \frac{M}{M_\odot}. \quad (6)$$

Начальная функция масс звезд и ее изменение в течение галактической эволюции известны недостаточно точно. В работе [15], на основании большого статистического исследования звезд окосолнечной окрестности, была построена $\varphi(m)$, имеющая максимум в окрестности малых масс $m \ll 1$ и спадающая степенным образом при $m > 1$. Но в молодой галактике очень мало тяжелых элементов, поэтому существенно выше, чем в настоящее время, джинсовская масса. Так, по расчетам [16, 17], массы первых звезд Галактики должны были составлять $m = 10 \div 20$. В настоящей работе начальная функция масс построена так, чтобы за время эволюции галактики ее максимум сместился от $m_* = 10$ до его современного значения, она имела степенную зависимость от массы звезды при $m > m_*$ и, естественно, удовлетворяла условию:

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

Тогда:

$$\varphi(m, t) = \frac{0.255}{m} \exp[-1.09(\lg m + y)^2 + 2.3(y - 0.53)], \quad (7)$$

$$y = 0.205 t - 2.056.$$

Время жизни звезд τ_m зависит от их начальной массы. Согласно [18], эту зависимость можно с хорошей точностью аппроксимировать следующим образом:

$$\tau_m = \begin{cases} 9m^{-4}, & m < 1.5, \\ 5m^{-2.7} + 0.012, & 1.5 < m \leq 8, \\ 1.2m^{-1.85} + 0.003, & m > 8. \end{cases} \quad (8)$$

Химический состав сбрасываемого звездами вещества зависит от их начальной массы и от состава того газа, из которого образовалась звезда. Кроме того, звезды эжектируют вещество в окружающее пространство двумя путями: звездным ветром и при взрывах. Поэтому доля начальной массы звезды, сброшенная в виде i -го элемента, записывается как

$$E_{is}(m) = E_s(m)[X_{is}(m) + X_{i_g}(t - \tau_m) - X_i^0]. \quad (9)$$

Здесь обилие i -го элемента в сброшенном звездой веществе определяется средней величиной, учитывающей оба возможных варианта потери массы:

$$X_{is}(m) = \frac{X_i^w \Delta m^w + X_i^{\text{exp}} \Delta m^{\text{exp}}}{\Delta m^w + \Delta m^{\text{exp}}}. \quad (10)$$

В уравнении (10) индекс «w» соответствует истечению массы в форме ветра, а индекс «exp» — при взрыве.

Для проведения расчетов требуется знание зависимости $X_{is}(m)$ для $0.8 < m < 60$. Звезды меньших масс практически не обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами, т. к. не успевают прореволюционировать за время жизни галактики t_g , а звезд больших масс просто мало в силу быстрого спадания $\varphi(m)$ с ростом m (см. (7)). К сожалению, теоретические расчеты и наблюдательные данные еще не настолько полны и обширны, чтобы можно было построить абсолютно точно нужные аналитические выражения. Но в работах [19—26] представлены модели различных звезд, позволяющие сделать определенные заключения о виде $X_{is}(m)$. В дальнейшем нас будет интересовать эволюция обилий D, ${}^4\text{He}$ и тяжелых элементов Z. Данные о содержании ${}^4\text{He}$ в сброшенных оболочках звезд с $10 < m < 100$, представленные в [24], были использованы для построения интерполяционных кривых на промежутке $10 < m < 60$. Построенные в [20—22] модели звезд типа Вольфа-Райе, интенсивно теряющих массу вследствие звездного ветра, приводят к практически идентичному обогащению межзвездной среды гелием. Что касается звезд малых масс (с $m \leq 10$), то дополнительный синтез гелия в них пренебрежимо мал [23], и для них $X_{\text{He}} \approx X_{\text{He}}^0$. Большая неопределенность существует и в данных о содержании тяжелых элементов в звездных выбросах. Так, звезды с $m \leq 10$, по данным [23], практически не обогащают межзвездный газ тяжелыми элементами, за исключением, возможно, углерода [25]. Числен-

ные оценки обилия металлов в сбрасываемом звездами данных масс веществе с учетом различных данных (например, [26]) приводят к величине $\approx 10^{-1} + 10^{-3}$. Нами были использованы результаты по интегральному обогащению межзвездной среды металлами [19], которые дают $X_{Zs}(m) \approx \approx 2.6 \cdot 10^{-3}$ для $m \leq 10$. Вклад звезд больших масс в генерацию тяжелых элементов более существенен и определен точнее, хотя и здесь существует значительный разброс в оценках. Так, по данным [23], зависимость содержания Z в оболочках сверхновых с $m > 10$ от массы имеет вид: $X_{Zs} = = 0.01 m^{1.5} E_s^{-1}$, в то время как авторы [24] утверждают, что $X_{Zs} = = (0.5m - 6.3) E_s^{-1}$ для $m > 15$. Как видно, эти величины отличаются примерно в три раза. Соответственно и расчеты с использованием этих зависимостей приводят к примерно в 2—3 раза отличающимся обилиям тяжелых элементов в межзвездном и межгалактическом газе. Лучшее соответствие наблюдениям проявляется в модели с данными [23], и в дальнейшем мы будем использовать их.

Темп аккреции газа галактикой считается постоянным, не зависящим от времени. Сейчас трудно судить о том, насколько это приближение соответствует реальности, но расчеты показывают, что окончательный результат зависит скорее от полной массы аккрецированного вещества, чем от деталей поведения функции $A(t)$. Механизмы эжекции газа из галактики весьма разнообразны (галактический ветер, «обдирание» потоком межгалактического газа, взрывы и активность ядра) и плохо исследованы (обзор см. в [27]). В этой работе мы предполагаем, что выброс газа из галактики инициируется взрывами сверхновых с $m \geq 5$, а именно:

$$E_g(t) = k \int_5^{60} E_s(m) \varphi(m, t) \psi(t) dm. \quad (11)$$

Коэффициент, стоящий перед интегралом, варьировался в широких пределах для получения соответствующих наблюдениям искомым величин. Оказалось, что $k \approx 3$, т. е. взрывы сверхновых ($m \geq 5$) должны обеспечить вынос из галактики примерно в три раза большей массы вещества, чем сбрасывают они сами. Количественно эта величина составляет $\sim (1+3) \cdot 10^{-2}$, что приводит к выметанию из галактики (без учета аккреции) массы порядка $0.3 M_{\odot}$. Это хорошо согласуется с современными теоретическими представлениями: так, по данным [27], если частота вспышек сверхновых превосходила современную примерно на порядок (а в период активного звездообразования так и должно быть), то этого достаточно для выметания из галактики большей части первоначально содержащегося в ней газа.

Следует отметить, что по причине весьма больших неопределенностей в числовых значениях ряда параметров пришлось провести модельный расчет более чем ста вариантов с целью отбора наиболее хорошо согласующихся с наблюдениями в нашей Галактике. Таковых оказалось всего два, отличающихся друг от друга видом функции звездообразования.

В первом скорость образования звезд предполагалась пропорциональной плотности межзвездного газа:

$$\psi(t) = \alpha G_g(t), \quad (12)$$

причем $\alpha = 0.4$.

Результаты расчетов представлены на рис. 1. Видно, что при постоянном темпе аккреции $A = 0.03$ модель демонстрирует хорошее согласие с наблюдениями. Так, масса межзвездного газа составляет $G_g(t_g) \approx 0.06$, а содержание тяжелых элементов (тяжелее бора) $Z \approx 10^{-2}$. Содержание гелия возросло на величину $\Delta Y = 0.026$, т. е. $\Delta Y = 2.5 Z$. Отношение концентраций тяжелых элементов в межзвездном газе и в межгалактической среде $\frac{Z_g}{Z_s} \approx 3$. В наших расчетах мы не разделяли элементы группы

CNO и железа. Но если предположить, что их относительные обилия одинаковы в галактике и в межгалактическом пространстве, то тогда последний результат вполне соответствует наблюдениям [12] рентгеновского излучения атомов железа в горячем газе скоплений галактик. В этой модели химический состав галактического вещества становится практически идентичным современному спустя $\Delta t \approx 7 \cdot 10^9$ лет после рождения Галактики.

Минимальное наблюдаемое количество тяжелых элементов $Z \approx 10^{-4}$ будут содержать звезды на 10 млрд. лет старше Солнца, причем суммарная масса таких звезд не должна превышать 14% от полной массы Галактики. И последний вывод: степень уменьшения первичного содержания дейтерия в межзвездной среде весьма незначительна, не превышает фактора 1.5, т. е. первичное обилие этого элемента должно составлять $X_D^0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$. Согласно расчетам [2], средняя плотность вещества во Вселенной ограничена тогда величиной $\rho_b \leq 6 \cdot 10^{-31}$ г/см³, что соответствует $\Omega_b \leq 0.1$ при постоянной Хаббла $H_0 = 50$ км/с Мпк.

В последнее время появились наблюдательные доказательства непостоянности процесса звездообразования в Галактике [28]. Для построения модели химической эволюции мы воспользуемся эмпирическими данными, указывающими на наличие двух интенсивных всплесков темпа образования звезд с продолжительными перерывами между ними. Второй вариант рассчитывался со следующей функцией звездообразования:

$$\psi(t) = \begin{cases} -h_1(t-t_1+\Delta t)(t-t_1-\Delta t) + \psi_0, & t_1 - \Delta t \leq t \leq t_1 + \Delta t, \\ -h_2(t-t_2+\Delta t)(t-t_2-\Delta t) + \psi_0, & t_2 - \Delta t \leq t \leq t_2 + \Delta t, \\ \psi_0, & t_1 + \Delta t < t < t_2 - \Delta t, \quad t > t_2 + \Delta t. \end{cases} \quad (13)$$

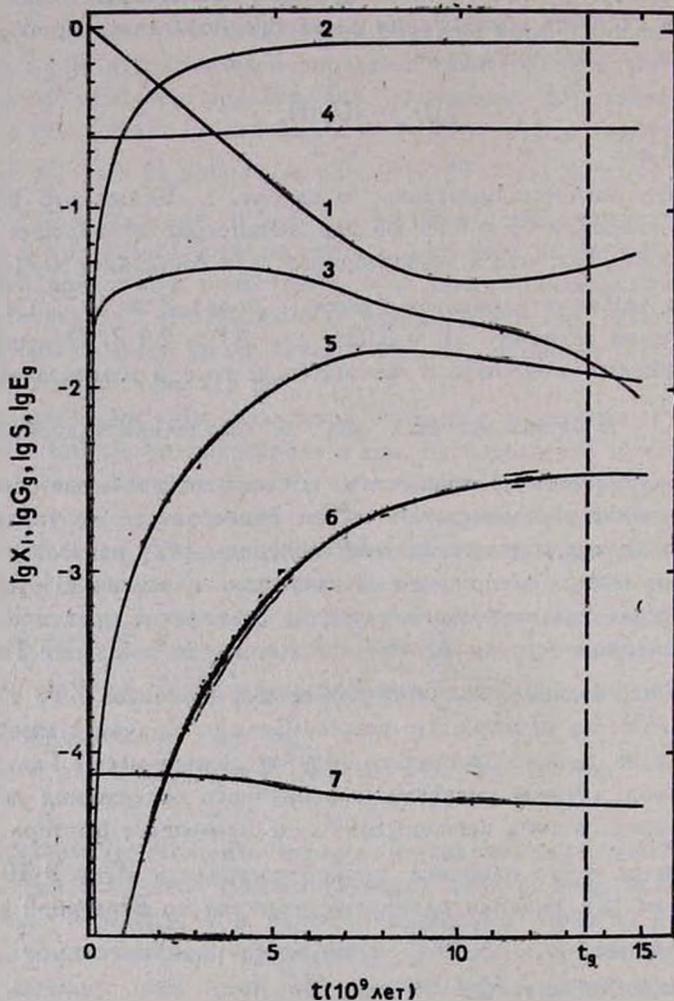


Рис. 1. Эволюция звездной и газовой составляющих Галактики, ее химического состава. 1 — масса межзвездного газа, 2 — масса звезд, 3 — темп эжекции газа из Галактики, 4 — содержание гелия в межзвездной среде, 5 — содержание тяжелых элементов в межзвездном газе, 6 — содержание тяжелых элементов в межгалактическом газе, 7 — распространенность дейтерия.

Параметры в (13) подобраны так, что максимальная скорость рождения звезд достигалась в моменты $t_1 = 10^9$ лет и $t_2 = 5 \cdot 10^9$ лет, продолжи-

тельность вспышек $\Delta t = 10^9$ лет, и между вспышками звезды образовывались очень слабо ($\psi_0 = 0.03$). Высоты пиков оказались равными $h_1 = h_2 = 0.21$. Результаты расчетов изображены на рис. 2. Видно, что окон-

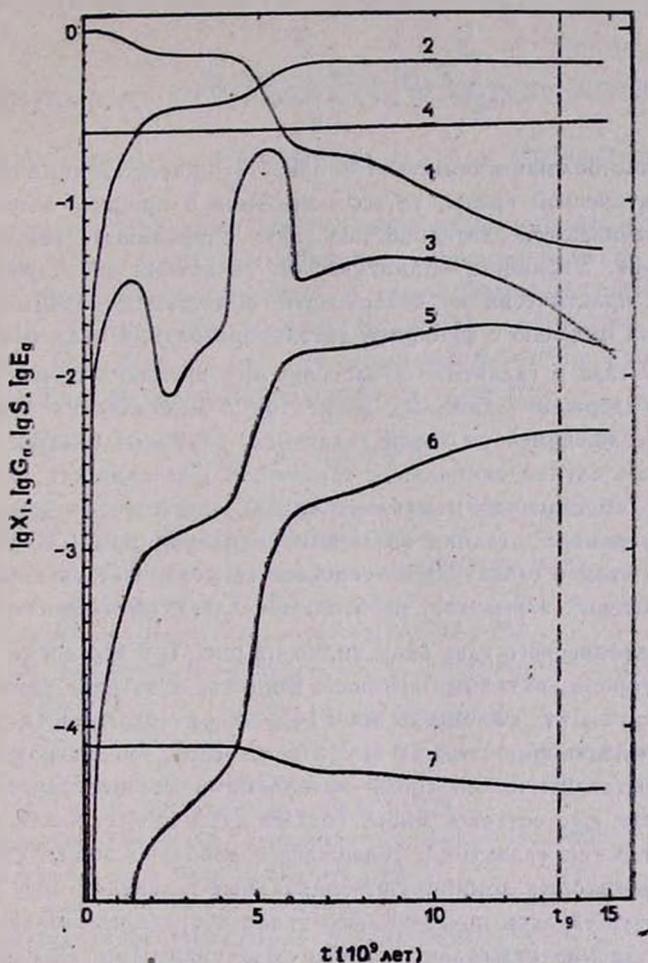


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но с импульсной скоростью звездообразования.

чательные результаты обоих вариантов почти не отличаются. Качественно это вполне понятно, т. к. обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами определяется не самой функцией $\psi(t)$, а ее интегралом, который должен быть примерно одинаков в обеих моделях, т. к. в каждой из них требуется получить одинаковое соотношение между содержаниями газа и звезд в Галактике.

3. *Выводы.* Как показали многочисленные расчеты, вывести модель на всю совокупность имеющихся наблюдательных данных в нашей Галактике можно только при выполнении вполне определенных требований: наличие аккреции и эжекции газа с примерно одинаковым интегральным вкладом

$$\int_0^{t_g} E_g(t) dt \approx \int_0^{t_g} A(t) dt, \quad (14)$$

и с достаточно большим темпом $A \approx 0.03$. Что касается химического состава межгалактической среды, то его изменения в процессе эволюции скопления обеспечиваются деятельностью как спиральных, так и эллиптических галактик. Эволюция эллиптической галактики со старым звездным населением, практически не содержащей в настоящее время газа, может быть описана моделью с функцией звездообразования вида (12). Так, уже при $\alpha = 0.9$ газа в галактике к настоящему времени почти не остается. При этом содержание тяжелых элементов в межгалактическом веществе, обеспеченное эжекцией из такой галактики, слабо отличается от рассмотренного выше случая спиральной галактики. Деятельность эллиптических галактик по обогащению межгалактической среды веществом могла быть активнее на ранних стадиях эволюции скопления при $t < 10^9$ лет [29]. Однако при этом в галактике не успевает синтезироваться достаточное количество тяжелых элементов, необходимое для существенного обогащения ими межгалактического газа (как видно из рис. 1, в это время $Z_g < 10^{-3}$). С другой стороны, активные выбросы вещества в течение раннего периода эволюции приводят, как видно из (14), к необходимости уменьшения $E_g(t)$ на последующих стадиях и, соответственно, уменьшают степень обогащения межгалактической среды металлами в течение этого времени. В этой проблеме еще остается много «белых пятен», т. к. недавно обнаружены эллиптические галактики, содержащие довольно много газа, имеются скопления, в которых доминируют спиральные галактики, и т. д. В настоящей же работе удалось показать, что вклад спиральных галактик типа нашей в обогащение межгалактического газа тяжелыми элементами может быть значительным.

Улучшение качества рассмотренных моделей связано с разделением звезд на населения (I и II), учетом неоднородности распределения газа и звезд по галактике, уточнением химического состава сбрасываемого звездами вещества, отдельным расчетом обилий элементов группы CNO и железа и т. д. Но основной вывод о незначительном уменьшении обилия дейтерия в течение эволюции Галактики, по-видимому, остается неизмен-

ным. Это позволяет использовать наблюдательные данные по его распространенности в качестве теста для отбора космологических моделей.

Ростовский государственный
университет

ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF PREGALACTIC MATTER

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

The results of the numerical calculation of galactic chemical evolution taking into account the substance exchange between Galaxy and intergalactic medium are presented. A small degree of deuterium astray is established. Taking into account the total combination of available observations. This lets us use the observed deuterium abundance as a test for selection of cosmological model parameters.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. M. Tinsley, *Fundam. of Cosmic Phys.*, 5, 287, 1980.
2. R. V. Wagoner, *Astrophys. J.* 179, 343, 1973.
3. Б. В. Вайнер, Ю. А. Щекинов, *Успехи физ. наук*, 146, 143, 1985.
4. J. Murthy et al., *Astrophys. J.*, 315, 675, 1987.
5. Б. В. Вайнер, Ю. А. Щекинов, *Астрофизика*, 18, 143, 1982.
6. J. Yang, M. S. Turner, G. Steigman, D. N. Schramm, K. A. Olive, *Astrophys. J.*, 281, 493, 1984.
7. Б. В. Вайнер, Ю. А. Щекинов, *Астрон. ж.*, 64, 204, 1987.
8. C. Gry, G. Malnis, J. Audouze, A. Vidal-Madjar, in: "Formation and Evolution of Galaxies and Large Structure in the Universe", eds. J. Audouze, J. Tran Thanh Van, D. Reidel, Dordrecht, 1984, p. 279.
9. В. Ф. Шварцман, Письма в Ж. эксперим. и теор. физ., 9, 315, 1969.
10. J. L. Greenstein, *Phys. Scripta*, 21, 759, 1980.
11. Дж. Филд, в кн. «Космология: теории и наблюдения», Мир, М., 1978, стр. 27.
12. R. Rothenflug, M. Arnaud, *Astron. and Astrophys.*, 144, 431, 1985.
13. Дж. Силк, в кн. «Крупномасштабная структура Вселенной», Мир, М., 1981, стр. 204.
14. I. Jr. Iben, J. W. Truran, *Astrophys. J.*, 220, 980, 1978.
15. I. E. Miller, I. M. Scalo, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 41, 513, 1979.
16. А. Г. Дорошкевич, И. Г. Колесник, *Астрон. ж.*, 53, 10, 1976.
17. J. Silk, *Astrophys. J.*, 211, 648, 1977.
18. F. Matteucci, L. Greggio, *Astron. and Astrophys.*, 154, 279, 1986.
19. D. C. V. Mallik, S. V. Mallik, *J. Astrophys. and Astron.*, 6, 113, 1985.
20. A. Maeder, *Publ. Observ. Geneve, Ser. C*, N 1, 1986.
21. A. Maeder, *Astron. and Astrophys.*, 173, 247, 1987.
22. N. Prantzos, C. Doot, M. Arnould, C. de Loore, *Astrophys. J.*, 304, 695, 1986.
23. А. В. Тургуков, *Науч. вестн. Астрон. сов. АН СССР*, 52, 96, 1983.

24. *S. E. Woosley, T. S. Axelrod, T. A. Weaver*, in: "Stellar Nucleosynthesis", eds. C. Chiosi, A. Renzini, 1984, p. 263.
25. *B. M. Tinsley*, *Astrophys. J.*, 229, 1046, 1979.
26. *I. Jr. Iben, A. V. Tutakov*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 58, 661, 1985.
27. *В. Г. Горбачукй*, Введение в физику галактик и скопления галактик, Наука, М., 1986.
28. *Л. С. Марочник, А. А. Сучков*, Галактика, Наука, М., 1984.
29. *D. S. De Young*, *Astrophys. J.*, 223, 47, 1978.