

Химическая эволюция системы галактических планетарных туманностей

Ю.В.Лулева, А.Ф.Холтыгин

Исследуется проблема химической эволюции системы галактических планетарных туманностей (ПТ), начиная с ранней стадии развития Галактики. Определены радиальные и вертикальные градиенты содержания C, N, O, Ne, Ar, Cl и S для различных возрастов звезд-предшественников туманностей. Выявлена статистически значимая зависимость градиентов от возраста.

CHEMICAL EVOLUTION OF THE SYSTEM OF GALACTIC PLANETARY NAEBULAE

Yu.V.Lunyova, A.F.Kholtygin

Chemical evolution of the system of galactic planetary nebulae beginning from the early age of the Galaxy is investigated. We calculate radial and vertical abundance gradients of C, N, O, Ne, Ar, Cl and S depending of different ages of the central star of the nebula. It have been founded statistically significant dependence of abundance gradients with the age of central star.

Одна из важнейших задач астрофизики – проблема происхождения и эволюции нашей и других галактик. Для исследования эволюции во всем объеме Галактики целесообразно выбрать объекты, занимающие достаточно большую долю этого объема. К таким объектам относятся планетарные туманности. Планетарные туманности есть и среди населения гало, и среди населения диска. Следует отметить большой интервал возрастов звезд-предшественников туманностей, поэтому исследование системы планетарных туманностей позволяет проследить изменение химического состава межзвездной среды галактики на протяжении значительной части ее эволюции. Туманности видны на больших расстояниях и для них достаточно надежно определяется содержание элементов, что делает их удобными объектами исследования. В данной работе исследуются эволюционные изменения содержания элементов в ансамбле галактических планетарных туманностей. В качестве набора данных параметров туманностей и содержания элементов в них используется *каталог параметров ПТ*. Планетарные туманности также являются важным источником обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами [1].

Первое подробное определение градиента содержания основных химических элементов в галактических планетарных туманностях дано в работах [2, 3]. Найдено, что градиенты содержания O, Ne, S и Ar сходны по значению с градиентами, полученными по областям III. Существование градиента химического состава туманностей приводит к наличию градиента электронной температуры (≈ 600 K на килопарсек) [4, 5, 6]. Основные результаты исследований можно сформулировать так: все дисковые туманности, которые принадлежат к типам I, II, III классификации Пеймберта [7], дают значимый градиент химического содержания элементов порядка $-0.04.. - 0.07$ dex/кpc. Небольшие расхождения в рассчитанных градиентах интерпретированы в терминах модели химической эволюции для элементов, на содержание которых не влияет предшественник центральной звезды планетарной туманности, а именно – O, S, Ne, Ar и Cl. Градиенты увеличиваются с возрастом объектов, то есть у планетарных туманностей II типа градиент менее крутой, чем у объектов I типа. Минимальным является градиент, определяемый по туманностям III типа. Таким образом, градиенты содержания элементов, наиболее сходные с градиентами, определяемыми по областям III, получены для объектов I и II типов [8].

Целью настоящей работы является определение градиентов содержания химических элементов по планетарным туманностям в предположении различных возрастов их звезд-предшественников. В разделе 2 приводятся методики определения содержания химических элементов в планетарных туманностях и радиальных и вертикальных градиентов содержания химических элементов, а также обсуждается проблема выбора шкалы расстояний до планетарных туманностей. В следующем разделе приводятся определенные нами градиенты содержания химических элементов по планетарным туманностям и сравнение полученных результатов с современными моделями химической эволюции Галактики. В заключении представлены некоторые выводы.

0.0.1 Градиенты содержания элементов в Галактике.

Содержание элементов в туманностях. Химический состав туманностей отражает химический состав их предшественников и вещества звездного ветра центральной звезды туманности, обогащенного C, N, O и другими элементами. Для определения содержания элементов в туманности можно использовать рекомбинационные линии и линии, возбуждаемые электронным ударом.

Наиболее удобны для этой цели запрещенные и интеркомбинационные линии, возбуждаемые электронным ударом (см., например [9]), так как соответствующие линии являются наиболее сильными в спектрах туманностей и их интенсивности определяются с высокой точностью. Однако на наблюдаемые интенсивности сильно влияют мелкомасштабные флуктуации электронной температуры в туманностях, поэтому определения содержания элементов требуют корректного учета этого влияния. Учет такого влияния может привести к получению содержания существенно отклоняющегося от полученного без учета флуктуаций (иногда в 2 и более раз) [10, 11].

В то же время, как показывают результаты цитированных работ, среднее содержание элементов,

полученное для большого числа туманностей слабо зависит от наличия или отсутствия температурных флуктуаций, поэтому при проведении статистических исследований ансамбля планетарных туманностей и, в частности, определении градиента содержания элементов можно использовать данные работ, в которых содержание элементов определены без учета этого эффекта.

Содержание элементов (в основном С, N и O), определяемые по интенсивностям рекомбинационных линий, часто сильно завышены (см. обсуждение этого эффекта в [10]), поэтому данные, полученные по рекомбинационным линиям, будем использовать только при отсутствии сведений об интенсивностях линий, возбуждаемых электронным ударом.

Основными источниками содержания химических элементов, использованных в настоящей работе, являются [4, 6, 12]. В работе [12] приведен список планетарных туманностей с определенным содержанием He, C, N, O и Ne. Этот набор данных включает в себя все наблюдения галактических планетарных туманностей, проведенные до 1989 года. При определении содержаний химических элементов использовано два метода, первый из которых основан на предположении постоянства T_e и n_e или во всей туманности, или в областях ионизации данного элемента, и использовании полуэмпирических ионизационных поправок за ненаблюдаемые стадии ионизации. Во втором методе используются ионизационные поправки, определяемые для каждой туманности по ее фотоионизационной модели.

В работах [4, 6] приводятся полученные из различных источников содержания He, C, N, O, Ne, S, Cl и Ar для свыше 200 туманностей. При этом критерием отбора для устранения погрешности за неоднородность набора объектов является разность в определении содержания химического элемента в пределах 0.1 – 0.2 dex.

Содержание C и O для ряда туманностей взяты также из работ [10, 13].

Определение радиальных и вертикальных градиентов. Для определения градиентов используется стандартное логарифмическое представление содержаний элементов $[X/H] = \log(X/H) + 12$. Зависимость величин $[X/H]$ от галактоцентрических расстояний туманностей R_z может быть представлена в виде:

$$[X/H] = [X/H](R_z) = a_r R_z + b_r. \quad (1)$$

Величина $a = d \log(X/H) / dR_z$ (кпк⁻¹) является искомым градиентом содержания элемента X.

Аналогичным образом находятся вертикальные градиенты a_z . Содержание элемента рассматривается в функции абсолютной величины высоты $|z|$ рассматриваемого объекта над галактической плоскостью.

В настоящей работе определены радиальные градиенты C, N, O, Ne, Ar, Cl и S по содержанию этих элементов, приведенному в таблице [1]. Расстояния планетарных туманностей до Солнца взяты из работ [14, 15, 16, 17]. Дисперсии и стандартные отклонения параметров a_r , b_r , a_z и b_z вычислены по стандартным формулам теории вероятностей [18].

Результаты расчетов радиальных градиентов содержания химических элементов в [4] и в данной работе различаются в среднем на 0.03⁽⁻¹⁾, однако полученные нами градиенты для N и Cl также, как в [4], близки. Определенные нами градиенты по абсолютной величине в 1.5 – 2 раза меньше, чем найденные в работе [4]. Причина этих расхождений связана, вероятнее всего, с тем, что используемая нами шкала расстояний являются более "длинной", чем в других работах и, в частности, в работе [4].

Градиенты содержаний N(O)/N(H) существенно расходятся с найденным в [19]. Отметим, что полученное в этой работе среднее значение $\bar{z} = 0.55$ близко к найденным нами величинам z .

Выбор шкал расстояний и расстояния Солнца до центра Галактики. Галактоцентрические расстояния до планетарных туманностей определялись при значении $R_0 = 7.7$ кпк расстояния от Солнца до галактического центра [20]. Однако при сравнении с другими работами мы использовали значение $R_0 = 8.5$ кпк, так как этими авторами использовано именно такое значение расстояния Солнца до галактического центра.

Таблица 1: коэффициенты корреляции между расстояниями до ПТ из [15] и [21].

Шкала	LL	LG	GL	GG
Коэффициент корреляции(Zhang [21]/Мальков [15])	0.80	0.74	0.72	0.82

При расчетах расстояний до ПТ в использованных в данной работе выборках [15, 21] применялись два метода: метод самосогласованного определения расстояний до ПТ, сочетающий индивидуальный подход к каждой ПТ с возможностью применения метода к большой выборке объектов, предложенный в работах [14, 15] и статистический метод, основанный на корреляциях, полученных из соотношения между массой ионизованного газа в туманности и ее радиусом, а также между поверхностной яркостью и радиусом туманности [21].

Расстояния для одних и тех же туманностей, полученные в указанных работах, оказались близки. Для подтверждения этой близости приведем в таблице 1 значения коэффициентов корреляции между двумя шкалами расстояний. В таблице используются следующие обозначения: L – расстояния взяты в линейной шкале ; G – в логарифмической. Списки туманностей, рассматриваемых в указанных работах, были объединены. Если туманность представлена в обоих списках, то использовались данные работы [15] как более надежные (см. аргументацию в [15]).

При выборе шкалы расстояний до планетарных туманностей крайне важно, чтобы абсолютные значения расстояний были бы согласованы с известными из исследований других галактических объектов размерами Галактики. Хорошо известно [15], что многие шкалы расстояний до туманностей дают сильно заниженные или (реже) завышенные значения. В работе [22] описана методика одновременного построения модели вращения системы планетарных туманностей диска Галактики и определения расстояния до галактического центра в принятой для этих туманностей шкале расстояний. Представлены результаты для трех шкал расстояний [16, 23, 24].

Результаты работы [22] показывают, что расстояния до туманностей, полученные в указанных исследованиях, занижены в 1.5 – 2 раза. Сопоставление расстояний до планетарных туманностей, исправленных с помощью найденных в [22] поправочных коэффициентов, с имеющимися расстояниями до туманностей из используемого нами списка [1] дает возможность сделать вывод, что исправленные расстояния до планетарных туманностей и используемые нами данные работ [15, 21] согласуются в пределах множителя 1.5. Такая точность определения расстояний достаточна для определения градиентов содержания химических элементов.

0.0.2 Эволюция градиентов содержания элементов.

Эволюция содержания элементов в различных областях Галактики. Для определения зависимости радиальных градиентов содержания от расстояния исследуемых объектов до галактического центра галактический диск представлялся системой вложенных колец с радиусами $R_z^1 = 4$ кпк, $R_z^2 = 8$ кпк, $R_z^3 = 12$ кпк и $R_z^4 = 16$ кпк. При этом определялись градиенты содержания элементов C, N, O, Ne и Cl относительно средних радиусов колец, т.е. для $\langle R_z^1 \rangle = 2$ кпк, $\langle R_z^2 \rangle = 6$ кпк, $\langle R_z^3 \rangle = 10$ кпк и $\langle R_z^4 \rangle = 14$ кпк.

На рис. 1 даны зависимости содержаний N, O, Ne и Cl от средних расстояний до галактического центра $\langle r \rangle$. Как видно из Рис. 1a содержание N и O с увеличением $\langle r \rangle$ практически не изменяется, в то время как у Ne и Cl заметно уменьшение содержания с увеличением расстояния до центра Галактики (Рис. 1c,d).

Аналогичная процедура проделана при расчетах вертикальных градиентов содержаний химических элементов: брались объекты со средними значениями $\langle z_1 \rangle = 0.2$ кпк, $\langle z_2 \rangle = 0.6$ кпк, $\langle z_3 \rangle = 1.0$ кпк и $\langle z_4 \rangle = 1.4$ кпк. На Рис. 1 (e-h) представлены зависимости содержания C, N,

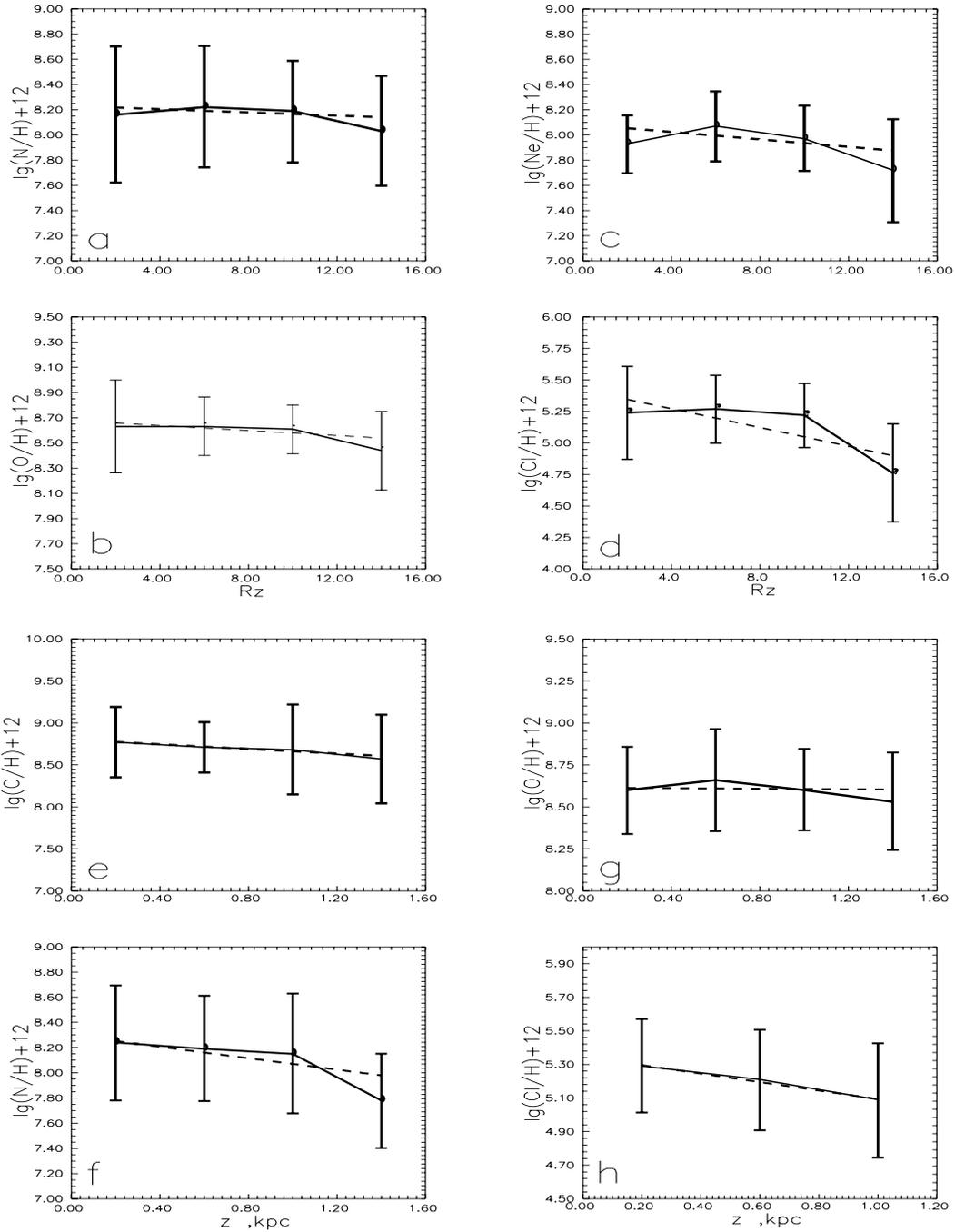


Рис. 1: Верхние четыре рисунка: зависимости содержания элементов от галактоцентрического расстояния ПТ (a- N, b -O, c -Ne, d -Cl). Нижние четыре рисунка: зависимости химического содержания элементов от расстояния ПТ до галактической плоскости: (e - C, f - N, g - O, h - Cl).

Таблица 2: Радиальные и вертикальные градиенты химического состава ПТ

Радиальные		
	a	b
C	-0.009	8.78
N	-0.007	8.23
O	-0.02	8.76
Ne	-0.019	8.10
Ar	-0.025	6.57
Cl	-0.029	5.33
S	-0.034	7.16

Вертикальные		
	a	b
C	-0.185	8.84
N	-0.219	8.29
O	-0.088	8.67
Ne	-0.104	8.01
Ar	-0.261	6.55
Cl	-0.282	5.36
S	-0.157	7.00

O и Cl от средних расстояний до плоскости Галактики. Полученные значения градиентов содержания элементов даны в таблице 2. Градиенты, найденные с помощью вышеописанной процедуры, оказались очень близкими к определяемым из соотношения (1) и аналогично для вертикальных градиентов, поэтому для определения самих градиентов используется данная процедура, а для оценки уровня значимости найденных градиентов — стандартные соотношения, данные в [18].

Определенные нами значения радиальных градиентов для C и N малы и статистически не значимы, так как изменения среднего содержания этих элементов в рассматриваемых интервалах галактоцентрических расстояний малы по сравнению с ошибками его определения. Найденные нами радиальные градиенты содержаний O, Ne и Cl являются промежуточными между значениями градиентов для различных типов туманностей (см. табл. 2). Градиент содержания Cl для всех планетарных туманностей оказался близок к полученному нами для туманностей типа II. Для всех элементов кроме кислорода обнаружено заметное уменьшение содержания с увеличением расстояния туманностей от галактической плоскости. Обращаясь к данным таблицы 2 можно сделать заключение, что статистически значимый вертикальный градиент содержания рассматриваемых нами элементов (кроме Cl) обнаружен только для туманностей промежуточных масс центральных звезд ($0.60 - 0.64 M_{\odot}$). Для Cl вертикальный градиент получен и для массивных центральных звезд ($> 0.64 M_{\odot}$).

Сравним полученные нами радиальные градиенты содержаний элементов C, N, O, Ne, Ar, Cl и Ar с предсказаниями моделей, представленных в работе [25] (Рис. 2). Из списка [1] были отобраны туманности с известными химическим содержанием элементов и расстоянием до галактического центра, спроецированным на плоскость Галактики.

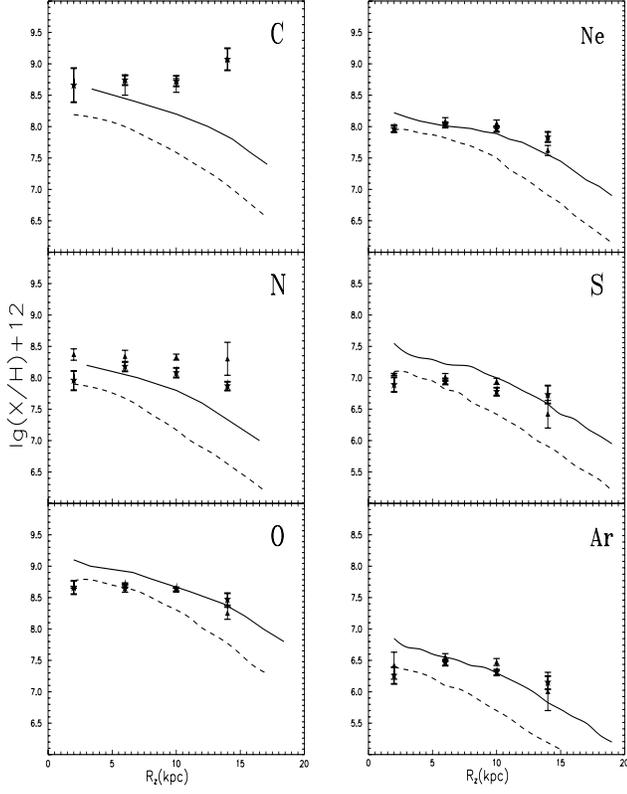


Рис. 2: Содержания элементов в функции галактоцентрического расстояния ПТ для различных возрастов звезд-предшественников туманностей. Нанесены теоретические зависимости, рассчитанные в модели ([25]): пунктиром – для Галактики возраста $1 \cdot 10^9$, сплошной линией – $5 \cdot 10^9$ лет. Треугольники – полученные нами значения для галактоцентрических расстояний 2, 6, 10 и 14 кпк и интервала масс центральных звезд $[0.63-1.2] M_{\odot}$, звездочки – значения градиентов для тех же галактоцентрических расстояний и интервала масс центральных звезд $[0.57-0.63] M_{\odot}$.

Туманности с заданным возрастом отбирались из предположения, что время, прошедшее после образования звезды-предшественника туманности до момента образования самой туманности, равно сумме времен пребывания звезды на стадиях до главной последовательности, на главной последовательности, красного гиганта и асимптотической ветви гигантов соответственно:

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{Pre-MS}} + \tau_{\text{MS}} + \tau_{\text{RGB}} + \tau_{\text{AGB}}. \quad (2)$$

Для звезд промежуточной массы время их жизни на главной последовательности значительно превышает времена их нахождения на других

этапах эволюции. Согласно [26],

$$\tau_{\text{MS}} \approx 0.03 + \frac{10}{M^2} [10^9 \text{ лет}]. \quad (3)$$

В этой формуле M – среднее значение интервала начальных масс звезды-предшественника туманности.

Подставив в формулу (3) средние значения возрастов звезд, приведенных в работе [25], а именно – $1 \cdot 10^9$, $4,5 \cdot 10^9$, $8 \cdot 10^9$ и $12 \cdot 10^9$ лет, мы получили величины $3.21 M_{\odot}$, $1.42 M_{\odot}$, $1.09 M_{\odot}$ и $0.89 M_{\odot}$ соответственно. По используемой нами эмпирической зависимости начальная масса – конечная масса были получены средние значения масс центральных звезд планетарных туманностей из четырех промежутков масс: $[0.63-1.2]$, $[0.57-0.63]$, $[0.555-0.57]$, $[0.53-0.555] M_{\odot}$.

В последние два промежутка масс практически не попало объектов с известными параметрами, поэтому сравнение целесообразно провести по туманностям из двух первых промежутков масс. Оказалось, что полученные нами градиенты менее крутые, чем предсказанные в модели [25]. Возможная причина такого различия – расхождение в шкалах расстояний до планетарных туманностей. Однако, возможно, что причина расхождений в недооценке в указанной работе эффекта аккреции обогащенного металлами вещества на плоскость Галактики. В работе [25] принято значение $Z = 0.1Z_{\odot}$. Увеличение этого значения до $\approx 0.2Z_{\odot}$ устраняет указанные расхождения.

Для выяснения влияния принятого расстояния Солнца до центра Галактики R_0 на величину градиентов содержания элементов нами был проведен расчет градиентов при значении $R_0 = 7.7$ кпк. Выяснилось, что при этом градиенты практически не изменяются.

На Рис. 3 нанесены содержания O, Ne, S и Ar в зависимости от их галактоцентрического расстояния, которые сравниваются с полученными в модели химической эволюции Галактики [25] с первичным притоком газа. По известным возрастам центральных звезд туманностей с помощью формулы (3) нами получен промежуток масс центральных звезд, соответствующий промежутку их возрастов. Значения возрастов $[7 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^9]$ соответствуют промежутку масс $[0.565 - 0.68] M_{\odot}$.

Сравним на Рис. 4 полученные средние содержания кислорода для туманностей типов I+II+III и II+III для различных интервалов расстояний туманностей от галактической плоскости в трех промежутках галактоцентрических расстояний:

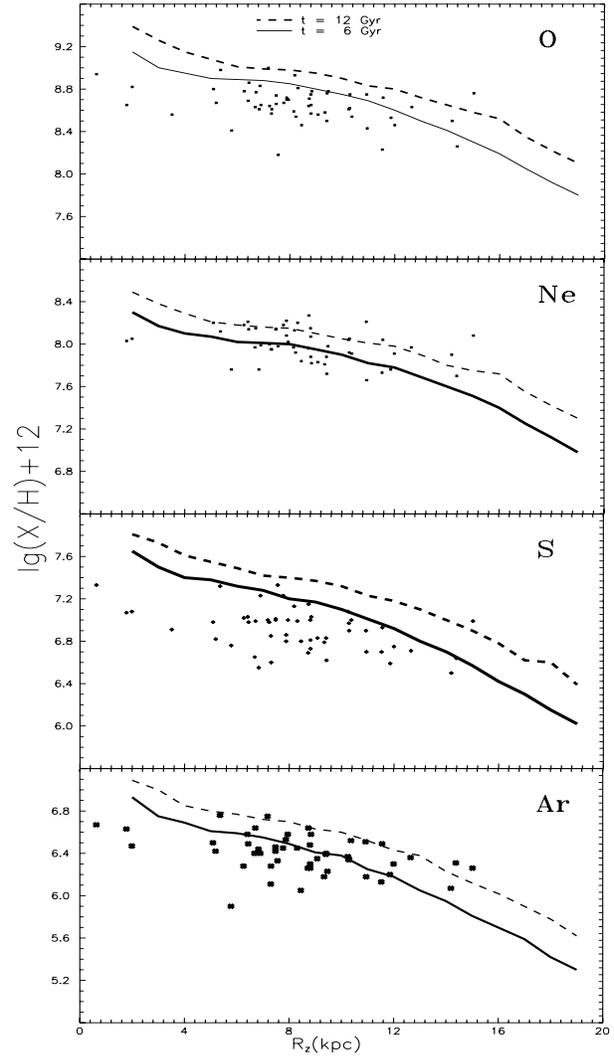


Рис. 3: Содержания элементов в туманностях типа II (с возрастом в промежутке между $1 \cdot 10^9$ и $7 \cdot 10^9$ лет) в функции галактоцентрического расстояния в сравнении с теоретическими значениями. Пунктирными линиями соответствуют теоретические зависимости, полученные в модели химической эволюции Галактики ([25]) возраста $12 \cdot 10^9$, сплошным линиям – $6 \cdot 10^9$ лет.

$R_z=5$ кпк, $R_z=8$ кпк, $R_z=11$ кпк с рассчитанными в рамках модели химической эволюции Галактики с учетом динамических эффектов [27].

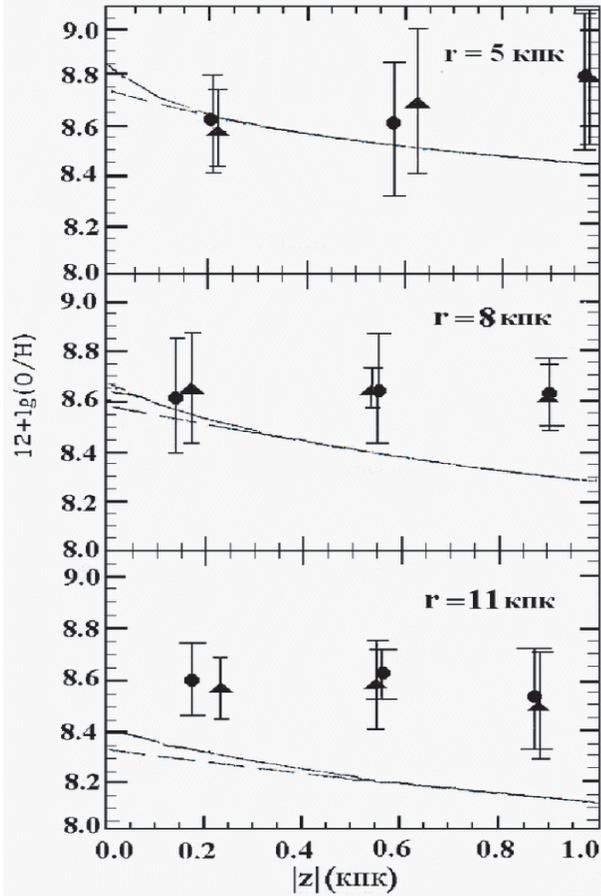


Рис. 4: Вертикальные градиенты содержания О/Н. Сплошная линия соответствует случаю, когда все звезды промежуточных масс становятся ПТ и включает туманности типов I+II+III. Пунктирная линия – ПТ типов II+III. Кружки – данные расчетов содержания $N(O)/N(H)$ для ПТ типов I+II+III, выполненные в настоящей работе, треугольники – для туманностей типов II+III. Указаны среднеквадратичные отклонения рассчитанных средних содержаний.

Из анализа зависимостей, приведенных на Рис. 4, можно сделать вывод, что полученные нами отношения содержания $N(O)/N(H)$ не согласуются с результатами расчетов [27]. Относительное согласие имеется лишь для значений галактоцентрических расстояний 5 и 8 кпк при $z < 0.6$ кпк. Для больших значений z определенные нами содержания О в 2-3 раза превышают предсказанные значения в работе [27]. При значении галактоцентрического расстояния $R_z = 11$ кпк найденные нами отношения $N(O)/N(H)$ превышают вычисленные в [27] в 2-4 раза для всех значений z .

Обсуждение результатов Результаты проведенного нами исследования показывают, что определенные нами радиальные и вертикальные градиенты содержания элементов не вполне удовлетворительно согласуются с моделями химической эволюции Галактики [25, 27].

Особенно велики расхождения для среднего содержания углерода и азота на больших расстояниях от центра Галактики R_z (Рис. fig.GrAbAge). Полученные нами содержания при $R_z \geq 10$ кпк в 5-10 раз превосходят рассчитанные в модели [25]. Обсудим возможные причины расхождений. Несомненно часть расхождений может быть связана с ошибками в определении содержания элементов и расстояний до туманностей. Однако, как видно из рис. 2, расхождения значительно превышают любые возможные ошибки в определении содержания.

Тем самым можно сделать заключения, что эти расхождения реальны и отражают характер химической эволюции в далеких от галактического центра областях Галактики. Возможной причиной увеличения содержания С и N при больших значениях R_z можно считать либо более высокий по сравнению с предполагаемым в работе [25] темп аккреции обогащенного тяжелыми элементами вещества на плоскость Галактики, либо (при предположении, что реальный темп аккреции равен предполагаемому в данной работе) более высокое содержание тяжелых элементов в аккрецирующем веществе.

Вертикальные градиенты содержания N(O)/N(H) для галактоцентрических расстояний 5, 8 и 11 кпк, рассчитанные по модели химической эволюции Галактики с учетом динамических эффектов [27] также расходятся с полученными в настоящей работе. Возможно, что эти различия связаны с расхождением средних значений z для нашей выборки планетарных туманностей: ≈ 0.3 кпк для туманностей типа I и $\approx 0.5 - -0.6$ кпк – типа II, в сравнении со значением 0.16 кпк, рассчитанным для туманностей всех типов в работе [27].

В заключение следует отметить, что как радиальные, так и вертикальные градиенты содержания элементов существенно зависят от принятой шкалы расстояний до планетарных туманностей. Как отмечалось выше, возможно, что многих шкалах расстояния до ПТ могут быть занижены в 1.5 – 2 раза. Для корректировки шкал можно определить расстояние до центра Галактики при предположении справедливости той или иной шкалы расстояний до ПТ и сравнить его с хорошо известным в настоящее время значением $R_0=7.7$ кпк.

Заключение. В работе исследованы эволюционные изменения содержаний элементов в ансамбле планетарных туманностей Галактики. Определены радиальные и вертикальные градиенты содержания С, N, O, Ne, Ar, Cl и S. Выявлена статистически значимая зависимость градиентов от возраста звезд-предшественников туманностей.

Обнаружено (для углерода до порядка величины) увеличение содержания углерода и азота на больших галактоцентрических расстояниях (> 10 кпк) по сравнению с рассчитанными в модели химической эволюции [25].

Для всех элементов кроме кислорода обнаружено заметное уменьшение содержания с увеличением расстояния туманностей от галактической плоскости. Статистически значимый вертикальный градиент содержания рассматриваемых нами элементов (кроме Cl) обнаружен только для туманностей промежуточных масс центральных звезд ($0.60 - 0.64 M_\odot$). Для Cl вертикальный градиент получен и для массивных центральных звезд ($> 0.64 M_\odot$).

Санкт-Петербургский государственный университет,
Астрономический институт, Россия

Список литературы

- [1] <http://www.astro.spbu.ru/staff/afk/AtDatCentre/PIDiagn>
- [2] *M.Faùndez-Abans, W.J.Maciel*, Astron. Astrophys., **158**, 228, 1986.
- [3] *M.Faùndez-Abans, W.J.Maciel*, Astron. Astrophys., **129**, 353, 1987.
- [4] *W.J.Maciel, C.Chiappini*, Astrophys. Space Sci., **219**, 231, 1994.
- [5] *W.J.Maciel, M.Faùndez-Abans*, Astron. Astrophys., **149**, 365, 1985.
- [6] *W.J.Maciel, J.Köppen*, Astron. Astrophys., **282**, 436, 1994.
- [7] *M.Peimbert*, Proceedings of the IAU Symp. No 76, 215, 1978.
- [8] *W.J.Maciel*, Proceedings of the IAU Symp. No 180, 397, 1997.
- [9] *С.Потташ*, Планетарные туманности, М., 1987.

- [10] *A.F.Kholtygin*, *Astron. Astrophys.*, **329**, 691, 1998.
- [11] *А.Ф.Холтыгин*, *Астрофизика*, **43**, No 4, 463, 2000.
- [12] *M.Perinotto*, *Astrophys. J. Suppl. ser.*, **76**, 687, 1991.
- [13] *J.A.Freitas Pacheco*, *W.J.Maciel*, *R.D.D.Costa*, *Astron. Astrophys.*, **250**, 159, 1991.
- [14] *Ю.Ф.Мальков*, *Кинем. и физ. неб. тел*, **10**, No 5, 35, 1994.
- [15] *Ю.Ф.Мальков*, *Астрон. ж.*, **6**, 853, 1997.
- [16] *A.A.Acker*, *Astron. Astrophys. Suppl. ser.*, **33**, 367, 1978.
- [17] *C.Y.Zhang*, *S.Kwok*, *Astrophys. J. Suppl. ser.*, **88**, No 2, 137, 1991.
- [18] *Дж.Тейлор*, *Введение в теорию ошибок*, М., 1985.
- [19] *J.Körppen*, *F.Cuisinier*, *Astron. Astrophys.*, **319**, 98, 1997.
- [20] *J.O.Cazetta*, *W.J.Maciel*, *Rev. Mex. Astron. Astrof.*, **36**, 3, 2000.
- [21] *C.Y.Zhang*, *Astrophys. J. Suppl. ser.*, **98**, 659, 1995.
- [22] *I.I.Nikiforov*, *A.Yu.Bobrova (Mel'nichenkova)*, частное сообщение, 2000.
- [23] *J.H.Cahn*, *J.B.Kaler*, *Astrophys. J. Suppl. ser.*, **22**, No 189, 319, 1971.
- [24] *J.H.Cahn*, *J.B.Kaler*, *L.Stangellini*, *Astron. Astrophys. Suppl. ser.*, **94**, No 3, 399, 1992.
- [25] *A.Alibés*, *J.Labay*, *R.Canal*, preprint, 2001.
- [26] *N.C.Rana*, *Annual review of astronomy and astrophysics*, **29**, 129, 1991.
- [27] *C.Allen*, *L.Carigi*, *M.Peimbert*, *Astrophys. J.*, **494**, 247, 1998.

Рис. 1 Зависимости содержания элементов от галактоцентрического расстояния ПТ: (а- N, б -O, с -Ne, д -Cl); зависимости химического содержания элементов от расстояния ПТ до галактической плоскости: (е - C, ф - N, г - O, х - Cl).

Рис. 2. Содержания элементов в функции галактоцентрического расстояния ПТ для различных возрастов звезд-предшественников туманностей. Пунктиром нанесены теоретические зависимости, рассчитанные в модели ([25]), пунктиром – для Галактики возраста $1 \cdot 10^9$, сплошной линией – $5 \cdot 10^9$ лет. Треугольники – полученные нами значения для галактоцентрических расстояний 2, 6, 10 и 14 кпк и интервала масс центральных звезд $[0.63-1.2] M_{\odot}$, звездочки – значения градиентов для тех же галактоцентрических расстояний и интервала масс центральных звезд $[0.57-0.63] M_{\odot}$.

Рис. 3. Содержания элементов в туманностях типа II (с возрастом в промежутке между $1 \cdot 10^9$ и $7 \cdot 10^9$ лет) в функции галактоцентрического расстояния в сравнении с теоретическими значениями. Пунктирными линиям соответствуют теоретические зависимости, полученные в модели химической эволюции Галактики ([25]) возраста $12 \cdot 10^9$, сплошным линиям – $6 \cdot 10^9$ лет.

Рис. 4. Вертикальные градиенты содержания O/H. Сплошная линия соответствует случаю, когда все звезды промежуточных масс становятся ПТ и включает туманности типов I+II+III. Пунктирная линия – ПТ типов II+III. Кружки – данные расчетов содержания N(O)/N(H) для ПТ типов I+II+III, выполненные в настоящей работе, треугольники – для туманностей типов II+III. Указаны среднеквадратичные отклонения рассчитанных средних содержаний.