

УДК 524.31.02/08-36+524.6-36-54

ОБОГАЩЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАМИ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА ЗВЕЗД ТОНКОГО И ТОЛСТОГО ДИСКОВ ГАЛАКТИКИ

Т.В. Мишенина

Аннотация

Представлено современное состояние расчетов нуклеосинтеза элементов, образующихся в процессах нейтронных захватов, и сравнение их с наблюдательными данными, в том числе для звезд тонкого и толстого дисков Галактики. На примере 170 звезд-карликов, отнесенных к звездам дисков, было обнаружено, что поведение содержания элементов n -захвата в зависимости от металличности отличается для различных элементов. Рассмотрен вклад легких и тяжелых элементов s -процесса и элементов бария (s -процесс) и европия (r -процесс) в обогащение звезд тонкого и толстого дисков. Полученные тренды содержания элементов сравнены с расчетами химической эволюции Галактики.

Ключевые слова: химический состав звезд-гигантов, химический состав звезд-карликов, эволюция Галактики.

Введение

Элементы, образующиеся в процессах нейтронных (n) захватов, являются ключевыми в современных исследованиях нуклеосинтеза, строения Галактики, ее динамической и химической эволюции. Непроэволюционировавшие звезды-карлики отражают химический состав прародительского вещества и характеризуют его состояние на момент рождения звезды, являясь «реперами» химической эволюции. Межзвездная среда, из которой произошли звезды галактического диска (дисков), имеющие металличность от -1 до $+0.3$ dex, согласно современным представлениям, была «засорена» продуктами эволюции нескольких поколений звезд, и восстановление истории ее обогащения является сложной многопараметрической задачей. Для ее решения необходимо знать: 1) источники производства этих элементов, действовавшие в ходе эволюции диска (дисков) и Галактики в целом; 2) строение Галактики и, в этой связи, происхождение галактических дисков; 3) звездный состав и пути обогащения галактических субструктур и пр. Исследуя содержание элементов, в том числе образующихся в процессах n -захватов, можно тестировать теории нуклеосинтеза, гипотезы и предположения о происхождении Галактики и ее субструктур и др.

1. Современное состояние теорий нуклеосинтеза и наблюдаемые проявления обогащения элементами n -захвата

Нейтронный захват подразумевает два основных процесса, зависящих от плотности потока нейтронов: медленный (slow) s -процесс и быстрый (rapid) r -процесс. Они проходят при различных температурах на различных временных интервалах и, соответственно, реализуются в различных астрофизических объектах. Еще в 1957 г. в классической работе [1] было обращено внимание на сечение реакции (n, γ) как важное для ядерной физики, рассмотрена каноническая модель

s -процесса, источники нейтронов в зоне горения гелия и обогащение звездных атмосфер элементами s -процесса. Три компонента s -процесса были введены в классическую модель [2]. Именно тремя экспоненциальными распределениями нейтронных экспозиций было описано солнечное распределение элементов s -процесса (три пика на кривой распространенности): главный (main) компонент, который обеспечивают звезды асимптотической ветви гигантов (АВГ) (изотопы A от 90 до 204); слабый (weak) компонент, за который ответственны массивные звезды, взрывающиеся впоследствии как Сверхновые (изотопы A до 90). Третий компонент (strong) был введен для объяснения 50% производства изотопа свинца ^{208}Pb .

Производство элементов s -процесса в звездах малых масс АВГ обеспечивают два источника нейтронов. Основной – это реакции $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, проходящие в звездах АВГ в фазе между пульсациями в радиативных условиях, и реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$, активизирующиеся в течение термальной неустойчивости в условиях конвекции [3]. В звездах АВГ умеренных масс ($M > 4.5 M_{\odot}$) основную роль играют реакции $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$. Наблюдательное подтверждение прохождения реакций приведено в работах [4, 5]. В качестве примера современного уровня расчетов нуклеосинтеза в звездах АВГ рассмотрим работу [6]. Используя код FRANEC [7], авторами было исследовано 500 изотопов и 700 ядерных реакций. Они показали мультикомпонентность вкладов в производство того или иного изотопа, влияние количества эпизодов третьего перемешивания на продуктивность выхода элементов s -процесса и зависимость соотношения выхода легких элементов ls (Sr, Y, Zr) к выходу тяжелых элементов hs (Ba, La, Ce, Pr, Nd) от металличности на примере звезды АВГ с массой $2M_{\odot}$. Рассчитанные значения были сравнены с наблюдательными данными для углеродных звезд N типа, атмосферы которых обнаруживают непосредственное обогащение элементами вследствие перемешивания, получено хорошее согласие. Слабый (weak) компонент s -процесса обеспечивается массивными звездами ($M > 12 M_{\odot}$) в зонах горения гелия в ядре и слое и зонах горения углерода.

Для производства элементов r -процесса ($A \geq 56$, к ним относится и Eu) рассматриваются три основных источника: нейтринно-индуцируемые ветры от сверхновых [8], обогащенное нейтронами вещество вследствие слипания нейтронных звезд [9] и ветры от слияния нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры [10]. Непосредственно тестировать расчеты r -процессов можно на звездах низкой металличности, образованных в ранней Галактике с недостаточно перемешанным веществом, обогащенным тяжелыми элементами вследствие одного или небольшого числа событий (взрывов сверхновых). Сравнение расчетов с результатами определения содержания элементов в таких звездах выявило два типа распределения содержания тяжелых элементов, что может говорить о двухкомпонентности r -процесса нуклеосинтеза. Например, в одном случае для звезд CS 22892-052, CS 31082-001 [11] это шкалированный солнечный r -процесс, в другом для HD 122563, HD 88609 [12] требуется введение дополнительного источника r -процесса. В работе [13] был предложен гипотетический источник без достаточного обоснования, и вопрос остается дискуссионным.

В целом описанные процессы обогащают межзвездную среду (МЗС) рассмотренными элементами, которые попадают в звезды в процессе их образования, и для восстановления истории обогащения Галактики необходимо использование моделей химической эволюции. В качестве примера, рассмотрим сравнение наблюдаемых данных с расчетом стохастической галактической модели [14] для Eu, включающей выход европия от коллапсирующих сверхновых умеренных и больших масс и слипание нейтронных звезд. Трудно отдать предпочтение обогащению от сверхновых умеренных или больших масс в рамках рассматриваемой модели. Низкие же значения содержания Eu с учетом неопределенностей более оптимистично

описаны расчетами выхода европия за счет слипания нейтронных звезд, за исключением очень низких значений $[\text{Fe}/\text{H}]$. При металличностях от -1 до 0.3 dex все упомянутые процессы вносят различные и изменяющиеся в ходе галактической эволюции вклады в содержание того или иного элемента нейтронного захвата.

2. Галактические подструктуры, толстый диск, модели формирования

Жилмор и Рейд [15], исследуя плотность звезд в направлении Южного галактического полюса, обнаружили, что ее распределение описывается двумя экспонентами, различающимися по высоте и плотности, и ввели понятие «толстый диск». Позднее было показано, что звезды толстого и тонкого дисков отличаются кинематикой, возрастом и содержанием α -элементов. В первых работах по исследованию кислорода и магния в звездах дисков было представлено, что содержания этих элементов в звездах толстого диска близки по значениям к содержанию этих элементов в звездах гало и, более того, эта величина постоянна [16, 17]. Но одновременно с этим авторы работы [18] получили, что содержание этих элементов в звездах обоих дисков ведет себя подобным образом. В ряде последующих работ было найдено повышенное содержание α -элементов в звездах толстого диска по отношению к тонкому [19–21]. Однако вопрос наличия резкого скачка или плавного уменьшения их содержания с увеличением металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ оставался предметом обсуждения.

Содержание элементов нейтронных захватов также было исследовано в звездах дисков ([19, 21–25] и т. д.). В приведенных выше работах рассмотрена зависимость содержания элементов от металличности и даны оценки вкладов s -, r -процессов в обогащение этими элементами подструктур. В целом изменение содержания элементов нейтронного захвата в зависимости от металличности указывает на различающиеся вклады s -, r -процессов для звезд тонкого и толстого дисков. Важным в рассмотрении и интерпретации результатов является анализ, помимо ошибок определения содержаний элементов, точности определения характеристик толстого и тонкого дисков, возрастов звезд, критериев принадлежности звезд к той или иной субструктуре и др. При этом заметим, что в ряде работ не представлены четкие критерии отбора звезд, принадлежащих подструктурам. Интерпретация поведения содержания элементов, обусловленного металличностью, характеристики дисков и др. связаны с различными гипотезами происхождения дисков. Их можно разделить на два типа: 1) эволюционные, 2) взаимодействия или слипания. Оба подхода сталкиваются с трудностями. Эволюционные модели (например, [26]) предсказывают плавный переход к тонкому диску и прогнозируют непрерывность возраста, $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\text{El}/\text{Fe}]$ и кинематических связей. В рамках этих гипотез нагревание в течение длительного периода времени звезд тонкого диска спиральными рукавами или центральным баром, или гигантскими молекулярными облаками, или аккрецией и расширением диска Галактики не в состоянии объяснить наблюдаемое различие в масштабе высот дисков [27, 28]. С другой стороны, в работе [29] показано, что толстый диск может сформироваться во время слияния путем нагрева уже существующего холодного, тонкого диска. В работе [30] указано на возможность прямой аккреции звезд из галактик-спутников. С точки зрения кинематики диск содержит и более разогретые звезды, которые, имея химический состав, соответствующий толстому, попадают в тонкий, в то же диск содержит и отдельно движущиеся группы и скопления звезд. К таким звездным объединениям относится и поток Геркулеса. Исследование его химического состава и кинематики, приведенное в работе [31], показало, что содержания элементов в звездах потока Геркулеса ближе к тонкому диску, а в работе [32] отмечено, что это смесь звезд толстого и

тонкого дисков. В заключение отметим, что вопрос происхождения толстого диска остается открытым.

3. Содержание элементов нейтронных захватов в звездах галактических субструктур

Кратко остановимся на работах по определению содержания элементов нейтронных захватов в звездах в диапазоне металличности от -1 до -0.3 dex, которые в настоящее время проводятся в Одесской астрономической обсерватории. Спектры около 500 звезд (карлики F–K, гиганты G, K) получены с помощью оптико-волоконного эшелле-спектрографа ELODIE [33], установленного на 1.93-м телескопе Обсерватории Верхнего Прованса (Франция). Разрешение спектрографа $R = 42000$, рабочий диапазон длин волн λ 4400–6800 Å, отношение сигнала к шуму $S/N = 100$ –350. Первичная и последующая обработка спектров была выполнена в [34] и нами при помощи пакета программ DECH20 [35]. Для выделения звезд тонкого и толстого дисков мы воспользовались кинематическим подходом, используя вероятность принадлежности каждой звезды тонкому, толстому диску или движущейся группе Геркулеса, основываясь на пространственной скорости этой группы, кинематических параметрах дисков и группы и доли звезд каждого диска в нашей выборке. Отбор звезд, принадлежащих галактическим субструктурам, для всех наших звезд выполнен по методике, описанной в [31].

Параметры атмосфер исследуемых звезд определены в работах [20, 36–38]. Эффективная температура T_{eff} установлена по отношениям глубин (R_1/R_2) большого числа пар линий, имеющих заметно различающиеся потенциалы возбуждения нижнего уровня. Внутренняя точность метода в случае карликов составляет 5–10 K и 15–25 K в случае гигантов [39]. Ускорение силы тяжести $\lg g$ на поверхности звезды определено тремя методами: 1) исходя из условия ионизационного равновесия для атомов нейтрального и ионизованного железа; 2) используя параллаксы; 3) по подгонке крыльев линии Ca I 6162 Å (этот метод использовался только для гигантов). Турбулентная скорость V_t установлена по отсутствию корреляции между содержанием железа, определенным по данной линии Fe I, и эквивалентной ширине этой линии. В качестве металличности принято значение содержания железа, определенного по линиям Fe I. Полученные нами параметры были сравнены с данными других авторов [20, 36–38]. Внешняя точность равна: $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 100$ K; $\Delta \lg g = \pm 0.2$ dex; $\Delta V_t = \pm 0.2$ км/с.

Определение содержания Fe, Y, Zr, Ba (гиганты), La, Ce, Pr, Nd, Sm выполнено в ЛТР-приближении с использованием моделей атмосфер Куруца [40]. Выбор модели осуществлялся стандартной интерполяцией по T_{eff} и $\lg g$. Определение содержания Y, Zr, La, Ce, Pr, Nd, Sm проведено по эквивалентным ширинам линий с использованием программы Куруца WIDTH9 и сил осцилляторов $\lg gf$ [41]. Определение содержания бария по линии Ba II 4554 Å для гигантов и европия по линии Eu II 6645 Å с учетом сверхтонкой структуры для всех звезд было выполнено методом синтетического спектра с помощью новой версии программы STARS [42]. Содержание бария для звезд-карликов определено в не-ЛТР-приближении по модифицированной С.А. Коротиным версии MULTI [43, 44] по линиям Ba II 4554, 5853, 6141 и 6496 Å. В качестве содержания Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu на Солнце были приняты значения, определенные нами по спектрам Луны и астероидов, полученным на спектрографе ELODIE. Для рассматриваемых элементов ошибка определения содержания в среднем составляет от 0.12 до 0.15 dex. К настоящему времени определение содержания элементов, образующихся в процессах нейтронных захватов, выполнено нами для трех выборок звезд: 171 гиганта [38] и 172 карликов, разделенных по кинематике на толстый и тонкий диски, а также для

80 карликов, расположенных преимущественно на нижней части Главной Последовательности. Ниже рассмотрены некоторые результаты по исследованию выборки звезд, ранее разделенных по кинематическим критериям на звезды тонкого, толстого дисков и потока Геркулеса.

3.1. Характеристики зависимостей содержаний от металличности.

Поведение содержания Y, Zr, Ba, La, Ce, Nd, Sm и Eu, обусловленное металличностью, показывает, что распространенность элементов n -захвата в зависимости от металличности отличается для различных элементов. Легкие элементы s -процесса – Y и Zr – демонстрируют разные тенденции поведения с $[\text{Fe}/\text{H}]$: зависимости $[\text{Y}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ не наблюдается, но прослеживается увеличение содержания Zr с уменьшением металличности (при $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$). Подобную картину для иттрия наблюдаем в работе [21], но несколько отличающуюся – в работе [19]: средние значения содержания иттрия чуть ниже нуля при $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.3$. Элементы тяжелого s -процесса (барий, лантан и церий) также показывают различный ход. При этом относительное содержание лантана $[\text{La}/\text{Fe}]$ увеличивается с уменьшением $[\text{Fe}/\text{H}]$, а дефицит содержания La при $[\text{Fe}/\text{H}] > 0$ очевиден для звезд тонкого диска и потока Геркулеса. Во всех подструктурах содержание Ce ведет себя одинаковым образом, не показывая никаких заметных трендов с $[\text{Fe}/\text{H}]$. Подобное поведение у Ce мы видим и в работе [21]. Особое внимание привлекает поведение бария, тяжелого элемента s -процесса. При исследовании гигантов мы определили содержание бария по одной линии в ЛТР-приближении и получили ход содержания бария с заметным пиком при $[\text{Fe}/\text{H}]$ около 0.2 dex, что согласуется с рядом работ (более подробно см. [38]). Использование 4 линий бария и не-ЛТР-подхода привело к уменьшению разброса содержания бария во всем диапазоне рассматриваемых металличностей, но пик в распределении сохранился (при $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.1$ dex). В среднем содержание бария в толстом диске ниже, чем в тонком. В работах [19, 21] также получено более низкое содержание бария у звезд толстого диска, однако пик наблюдается только у звезд тонкого диска [19]. Неодим и самарий, в содержание которых вносит заметный вклад и r -процесс, показывают некоторый рост с уменьшением металличности, особенно Sm. Содержание неодима обнаруживает различающийся ход для звезд тонкого и толстого дисков. Но по данным работы [21] мы не видим ничего подобного. Наблюдающийся рост содержания Eu (по преимуществу элемент r -процесса) с уменьшением $[\text{Fe}/\text{H}]$, согласующийся с результатами работ [19, 21], подтверждает представление о том, что существенный вклад в обогащение европием при данных металличностях продолжают вносить звезды больших масс. В целом различающиеся тренды содержания элементов нейтронных захватов с металличностью говорят о том, что даже в случае элементов, имеющих подобное происхождение (например, легкие элементы s -процесса), вклад s -, r -процессов в их содержание различен и, возможно, различны источники их производства.

3.2. Оценка вкладов s -, r -процессов в обогащение звезд тонкого и толстого дисков. Рассматривая зависимости содержания элементов, преимущественно образовавшихся в s - или r -процессах, мы можем сделать оценку вкладов этих процессов в обогащение звезд различных галактических субструктур – дисков, гало и др. Подобные оценки выполнены в ряде работ для оценки вклада s - или r -процессов в солнечное содержание [3, 45, 46]. Вклад от основного компонента s -процесса, например, в содержание иттрия колеблется от 92% [45] до 67% [3], Zr – от 83% до 60%, для тяжелых элементов s -процесса, Ba, La и Ce оценки вклада более однородны, особенно для бария – от 81% до 85%. Nd и Sm относятся к элементам с высоким вкладом r -процесса и низким s -процесса, для неодима – от 56%

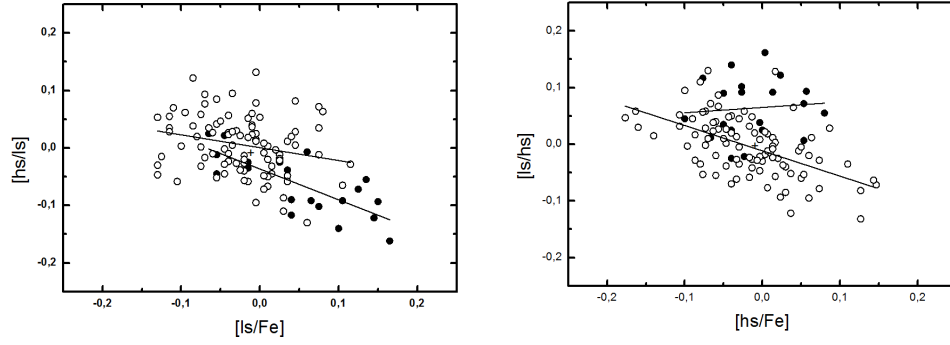


Рис. 1. Зависимость отношений легких (ls) и тяжелых (hs) элементов s -процесса в тонком (белые кружки) и толстом (черные кружки) дисках Галактики

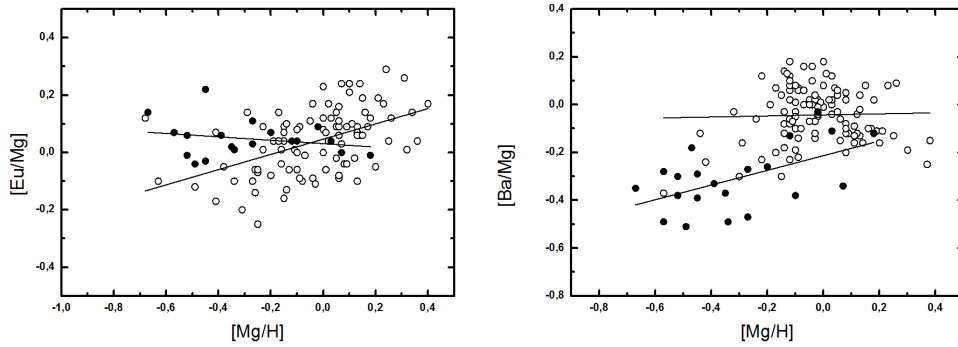


Рис. 2. Зависимость отношений $[Eu/Mg]$ и $[Ba/Mg]$ от $[Mg/H]$ в звездах тонкого (белые кружки) и толстого (черные кружки) дисках Галактики

до 47% [44, 45], для самария – от 29% до 34% [45, 46]. Вклад в Eu оценивается от 6% [45] до 3.5% [46], то есть европий по преимуществу – элемент r -процесса. Детальный анализ вкладов мы планируем выполнить для всех исследованных звезд в дальнейшем.

Посмотрим, различается ли обогащение легкими и тяжелыми элементами s -процесса у звезд тонкого и толстого дисков. С этой целью мы построили зависимости средних относительных содержаний $[hs/ls]$ и $[ls/hs]$ (рис. 1) от средних содержаний легких элементов $[ls/Fe]$ и тяжелых элементов $[hs/Fe]$ s -процесса, где $[ls/Fe] = [(Y, Zr/Fe)]/2$, а $[hs/Fe] = [(Ba, La, Ce)/Fe]/3$. Как видно из рис. 1, рассмотренные нами зависимости отличаются для звезд толстого и тонкого дисков, что говорит о возможном различии вкладов в обогащение дисков легкими и тяжелыми элементами s -процесса и различающейся истории обогащения дисков этими элементами.

На рис. 2 представлены относительные содержания элемента s -процесса $[Ba/Mg]$ от $[Mg/H]$ и элемента r -процесса $[Eu/Mg]$ от $[Mg/H]$ для звезд толстого и тонкого дисков. Отсутствие зависимости $[Eu/Mg]$ от $[Mg/H]$ для толстого диска говорит в пользу того, что источниками производства магния и европия являются одни и те же звезды, сверхновые второго типа умеренных масс. В случае бария наблюдается небольшой тренд с увеличением содержания магния и пониженное относительно солнечной пропорции содержание бария. Это свидетельствует о различающихся источниках производства этих элементов, что подтверждается

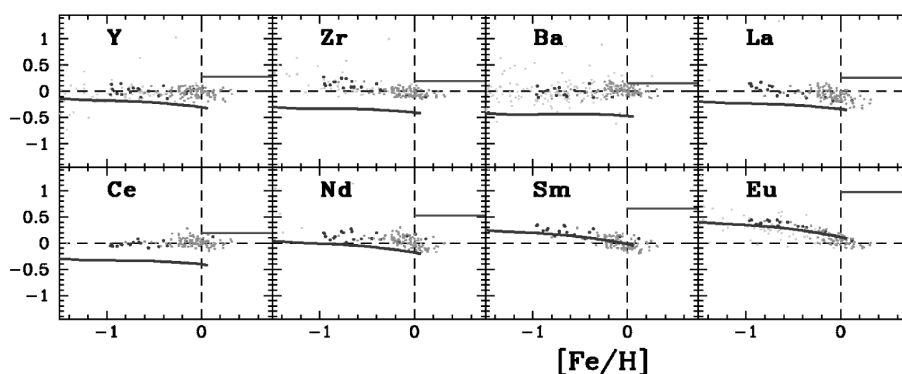


Рис. 3. Сравнение полученных содержаний $[El/Fe]$ с моделью химической эволюции

и другими исследованиями. Заметим, что такое сравнение в нашем случае носит достаточно условный характер, поскольку в звездах диска «наработка» содержания элемента осуществляется несколькими поколениями звезд, то есть МЗС успевает обогатиться элементами от многих предшественников, как массивных, так и менее массивных, в том числе от сверхновых и звезд АВГ, которые вносят различный процентный вклад в обогащение. Для построения адекватной картины обогащения необходимы оценки вкладов от различных процессов нуклеосинтеза и использование моделей галактической эволюции, учитывающих происхождение толстого диска.

3.3. Сравнение с расчетами химической эволюции Галактики. Мы провели сравнение полученных нами содержаний элементов $[El/Fe]$ с эволюционными расчетами, выполненными Н. Прантзосом по нашей просьбе. В модели было принято, что выход r -нуклидов воссоздается шкалированным солнечным содержанием, а s -нуклиды не разрушаются в ходе звездной эволюции (рис. 3, справа, отмечен вклад r -процесса в солнечное содержание). Как и следовало ожидать, дух элементов – самария и европия, на содержание которых значительное влияние оказывает r -процесс, наблюдаемые данные хорошо согласуются с расчетными кривыми.

4. Выводы

Анализ современных теорий нуклеосинтеза и исследование распространенности элементов нейтронного захвата в звездах толстого и тонкого дисков Галактики и других галактических субструктур показал, что:

- 1) поведение каждого легкого и тяжелого элемента s -процесса, а также элементов, образующихся в r -процессе, достаточно индивидуально и различается в тонком и толстом дисках Галактики;
- 2) необходимо дальнейшее развитие теорий нуклесинтеза элементов нейтронного захвата, хотя современные расчеты s -процесса в звездах АВГ достигли заметного прогресса;
- 3) необходимо создание моделей эволюции и формирования Галактики, позволяющих описать достаточно сложные зависимости содержания элементов нейтронных захватов от металличности, наблюдаемые в галактических субструктурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Швейцарского научного фонда (проект SCOPES No. IZ73Z0-128180/1).

Summary

T.V. Mishenina. Enrichment of the Thin and Thick Disk Stars of the Galaxy by the Neutron-Capture Elements.

We studied the current state of nucleosynthesis theory of elements formed in the process of neutron capture and compared it with observational data. On the example of 170 dwarf stars classified as the stars of the thin and thick disks, we found that the behaviour of the abundances of n -capture elements depending on metallicity differed for various elements. Contribution of light and heavy s -process elements, as well as barium (s -process) and europium (r -process) elements, to the enrichment of the thin and thick disk stars was analysed. The obtained trends in the elemental abundances was interpreted through the theoretical computations of the chemical evolution of the Galaxy.

Key words: chemical composition of giant stars, chemical composition of dwarf stars, evolution of the Galaxy.

Литература

1. *Burbidge E.M., Burbidge G.R., Fowler W.A., Hoyle F.* Synthesis of the Elements in Stars // *Rev. Mod. Phys.* – 1957. – V. 29, No 4. – P. 547–650.
2. *Kappeler F., Beer H., Wisshak K.* s -process nucleosynthesis-nuclear physics and the classical model // *Rep. Prog. Phys.* – 1989. – V. 52, No 8. – P. 945–1013.
3. *Serminato A., Gallino R., Travaglio C., Bisterzo S., Straniero O.* Galactic Chemical Evolution of the s Process from AGB Stars // *Publ. Astron. Soc. Australia.* – 2009. – V. 26, No 3. – P. 153–160.
4. *Abia C., Busso M., Gallino R., Dominguez I., Straniero O., Isern J.* The ^{85}Kr s -Process Branching and the Mass of Carbon Stars // *Astrophys. J.* – 2001. – V. 559, No 2. – P. 1117–1134.
5. *Garcia-Hernandez D.A., Manchado A., Lambert D.L., Plez B., Garcia-Lario P., D'Antona F., Lugaro, M., Karakas A.I., van Raai M.A.* Rb-Rich Asymptotic Giant Branch Stars in the Magellanic Clouds // *Astrophys. J.* – 2009. – V. 705, No 1. – P. L31–L35.
6. *Cristallo S., Straniero O., Gallino R., Piersanti L., Dominguez I., Lederer M.T.* Evolution, Nucleosynthesis, and Yields of Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars at Different Metallicities // *Astrophys. J.* – 2009. – V. 696, No 1. – P. 797–820.
7. *Chieffi A., Limongi M., Straniero O.* The Evolution of a $25 M_{\odot}$ Star from the Main Sequence Up to the Onset of the Iron Core Collapse // *Astrophys. J.* – 1998. – V. 502, No 2. – P. 737–762.
8. *Woosley S.E., Wilson J.R., Mathews G.J., Hoffman R.D., Meyer B.S.* The r -process and neutrino-heated supernova ejecta // *Astrophys. J.* – 1994. – V. 433, No 1. – P. 229–241.
9. *Freiburghaus C., Rosswog S., Thielemann F.-K.* R-Process in Neutron Star Mergers // *Astrophys. J.* – 1999. – V. 525, No 2. – P. L121–L124.
10. *Surman R., McLaughlin G.C., Ruffert M., Janka H.-Th., Hix W.R.* r -Process Nucleosynthesis in Hot Accretion Disk Flows from Black Hole-Neutron Star Mergers // *Astrophys. J.* – 2008. – V. 679, No 2. – P. L17–L120.
11. *Snedden C., Cowan J., Lawler J., Ivans I.I., Burles S., Beers T.C., Primas F., Hill V., Truran J.W., Fuller G.M., Pfeiffer B., Kratz K.-L.* The Extremely Metal-poor, Neutron Capture-rich Star CS 22892-052: A Comprehensive Abundance Analysis // *Astrophys. J.* – 2003. – V. 591, No 2. – P. 936–953.
12. *Honda S., Aoki W., Ishimaru Y., Wanajo S., Ryan S.G.* Neutron-Capture Elements in the Very Metal Poor Star HD 122563 // *Astrophys. J.* – 2006. – V. 643, No 2. – P. 1180–1189.

13. *Travaglio C., Gallino R., Arnone E., Cowan J., Jordan F., Sneden C.* Galactic Evolution of Sr, Y, And Zr: A Multiplicity of Nucleosynthetic Processes // *Astrophys. J.* – 2004. – V. 601, No 2. – P. 864–884.
14. *Argast D., Samland M., Thielemann F.-K., Qian Y.-Z.* Neutron star mergers versus core-collapse supernovae as dominant r-process sites in the early Galaxy // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 416. – P. 997–1011.
15. *Gilmore G., Reid N.* New light on faint stars. III – Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1983. – V. 202. – P. 1025–1047.
16. *Gratton R.G., Carretta E., Matteucci F., Sneden C.* Abundances of light elements in metal-poor stars. IV. [Fe/O] and [Fe/Mg] ratios and the history of star formation in the solar neighborhood // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 358. – P. 671–681.
17. *Fuhrmann K.* Nearby stars of the Galactic disk and halo // *Astron. Astrophys.* – 1998. – V. 338. – P. 161–183.
18. *Chen Y.Q., Nissen P.E., Zhao G., Zhang H.W., Benoni T.* Chemical composition of 90 F and G disk dwarfs // *Astron. Astrophys. Suppl. Series.* – 2000. – V. 141, No 3. – P. 491–506.
19. *Bensby T., Feltzing S., Lundstrom I., Ilyin I.* α -, r-, and s-process element trends in the Galactic thin and thick disks // *Astron. Astrophys.* – 2005. – V. 433, No 1. – P. 185–203.
20. *Mishenina T.V., Soubiran C., Kovtyukh V.V., Korotin S.A.* On the correlation of elemental abundances with kinematics among galactic disk stars // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 418. – P. 551–562.
21. *Reddy B.E., Lambert D.L., Allende Prieto C.* Elemental abundance survey of the Galactic thick disc // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2006. – V. 367, No 4. – P. 1329–1366.
22. *Mashonkina L., Gehren T.* Barium and europium abundances in cool dwarf stars and nucleosynthesis of heavy elements // *Astron. Astrophys.* – 2000. – V. 364. – P. 249–264.
23. *Mashonkina L., Gehren T.* Heavy element abundances in cool dwarf stars: An implication for the evolution of the Galaxy // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V. 376. – P. 232–247.
24. *Mashonkina L.I., Kamaeva L.A., Samotoev V.A., Sakhibullin N.A.* Neutron-Capture Elements in Halo, Thick-Disk, and Thin-Disk Stars: Neodymium // *Astron. Rep.* – 2004. – V. 48, No 3. – P. 185–199.
25. *Brewer M.-M., Carney B.W.* A Comparison of the Chemical Evolutionary Histories of the Galactic Thin Disk and Thick Disk Stellar Populations // *Astron. J.* – 2006. – V. 131, No 1. – P. 431–454.
26. *Burkert A., Truran J.W., Hensler G.* The collapse of our Galaxy and the formation of the Galactic disk // *Astrophys. J.* – 1992. – V. 391, No 2. – P. 651–658.
27. *Jenkins A.* Heating of galactic discs with realistic vertical potentials // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1993. – V. 257, No 4. – P. 620–632.
28. *Asiain R., Figueras F., Torra J.* On the evolution of moving groups: an application to the Pleiades moving group // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 350. – V. 434–446.
29. *Quinn P.J., Hernquist L., Fullagar D.P.* Heating of galactic disks by mergers // *Astrophys. J.* – 1993. – V. 403, No 1. – P. 74–93.
30. *Statler T.S.* Orbital decay in aspherical galaxies. I – Oblate systems // *Astrophys. J.* – 1988. – V. 331. – V. 71–101.
31. *Soubiran C., Girard P.* Abundance trends in kinematical groups of the Milky Way's disk // *Astron. Astrophys.* – 2005. – V. 438, No 1. – P. 139–151.

32. *Bensby T., Zenn A.R., Oey M.S., Feltzing S.* Tracing the Galactic Thick Disk to Solar Metallicities // *Astrophys. J.* – 2007. – V. 663, No 1. – P. L13–L16.
33. *Baranne A., Queloz D., Mayor M., Adrianzyk G., Knispel G., Kohler D., Lacroix D., Meunier J.-P., Rimbaud G., Vin A.* ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements // *Astron. Astrophys. Suppl. Series.* – 1996. – V. 119. – P. 373–390.
34. *Katz D., Soubiran C., Cayrel R., Adda M., Cautain R.* On-line determination of stellar atmospheric parameters T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ from ELODIE echelle spectra. I. The method // *Astron. Astrophys.* – 1998. – V. 338. – P. 151–160.
35. *Галазутдинов Г.А.* Система обработки звездных эшелле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. Препринт № 92. – Нижний Архыз: CAO РАН, 1992. – 52 с.
36. *Mishenina T.V., Kovtyukh V.V.* Analysis of neutron capture elements in metal-poor stars // *Astron. Astrophys.* – 2001. – V. 370. – P. 951–966.
37. *Mishenina T.V., Soubiran C., Bienayme O., Korotin S.A., Belik S.I., Usenko I.A., Kovtyukh V.V.* Spectroscopic investigation of stars on the lower main sequence // *Astron. Astrophys.* – 2008. – V. 489, No 2. – P. 923–930.
38. *Mishenina T.V., Gorbaneva T.I., Bienayme O., Soubiran C., Kovtyukh V.V., Orlova L.F.* Abundances of neutron-capture elements in atmospheres of cool giants // *Astron. Rep.* – 2007. – V. 51, No 5. – P. 382–393.
39. *Kovtyukh V.V., Soubiran C., Belik S.I., Gorlova N.I.* High precision effective temperatures for 181 F-K dwarfs from line-depth ratios // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V. 411. – P. 559–564.
40. *Kurucz R.L.* ATLAS9 Stellar Atmospheres Programs and 2 km/s Grid (CD-ROM). – Cambridge: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993.
41. *Kovtyukh V.V., Andrievsky S.M.* Do we really obtain reliable elemental abundances for supergiant stars? // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 351, No 2. – P. 597–606.
42. *Tsymbal V.V.* Model Atmospheres and Spectrum Synthesis // *ASP Conf. Ser.* – 1996. – V. 108. – P. 198–199.
43. *Carlsson M.* A computer program for solving multi-level non-LTE radiative transfer problems in moving or static atmospheres: Upps. Astron. Obs., Rep. No 33. – Uppsala, 1986. – 165 p. – URL: <http://folk.uio.no/matsc/mul22/report33.pdf>, свободный.
44. *Andrievsky S.M., Spite M., Korotin S.A., Spite F., Francois P., Bonifacio P., Cayrel R., Hill V.* Evolution of the barium abundance in the early Galaxy from a NLTE analysis of the Ba lines in a homogeneous sample of EMP stars // *Astron. Astrophys.* – 2009. – V. 494, No 3. – P. 1083–1090.
45. *Arlandini C., Kappeler F., Wisshak K., Gallino R., Lugaro M., Busso M., Straniero O.* Neutron Capture in Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars: Cross Sections and Abundance Signatures // *Astrophys. J.* – 1999. – V. 525, No 2. – P. 886–900.
46. *Burris D.L., Pilachowski C., Armandroff T.E., Sneden C., Cowan J.J., Roe H.* Neutron-Capture Elements in the Early Galaxy: Insights from a Large Sample of Metal-Poor Giants // *Astrophys. J.* – 2000. – V. 544, No 1. – P. 302–319.

Поступила в редакцию
08.12.10

Мишенина Тамара Васильевна – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом физики звезд и галактик Астрономической обсерватории Одесского национального университета, Украина.

E-mail: tmishenina@ukr.net