

УДК 524.31

В. В. Ковтюх, Н. С. Комаров, Т. В. Мишенина

Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова

СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД КИСЛОРОДНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Визначення вмісту хімічних елементів в атмосферах зір різних мас та еволюційного статусу дає інформацію про еволюцію хімічних елементів. Холодні зорі-гіганти та надгіганти – найбільш зручні об'єкти для таких досліджень. Вони є найяскравішими об'єктами зоряного населення Галактики і в їх спектрах наявна велика кількість ліній різних хімічних елементів та їх сполук. В даній роботі коротко наведені основні результати досліджень в цій галузі в Астрономічній обсерваторії Одеського державного університету.

Определение содержания химических элементов в атмосферах звезд разных масс и эволюционного статуса даст информацию об эволюции химических элементов. Холодные звезды - гиганты и сверхгиганты являются наиболее удобными объектами для таких исследований. Они являются наиболее яркими объектами звездного населения Галактики и в их спектрах имеется множество линий разных химических элементов и их соединений. В данной работе коротко приведены основные результаты исследований в этой области в Астрономической обсерватории Одесского государственного университета.

The determination of abundances of chemical elements and their isotopes in atmospheres of stars with different masses and evolution status gives information about evolution of chemical elements. The cool giant and supergiant stars are the most convenient objects for such researches. They are the brightest objects of our Galaxy and in their spectra there is a set of lines of different chemical elements and their compounds. In this paper the main results of investigation of abundances in Astronomical Observatory of Odessa State University are given.

Введение. Для астрофизиков важен вопрос: «На какой стадии происходит перемешивание межзвездной среды с веществом, прошедшим звездную стадию эволюции?» Известно, это происходит во время вспышек сверхновых I-го и II-го типов (CNI, CNII), возможно во время вспышек новых звезд (N). Однако звезды, находящиеся на асимптотической ветви гигантов (ABГ), являются основными поставщиками вновь синтезированных ядер в межзвездную среду в результате истечения вещества (звездный ветер). Массивные, короткоживущие звезды ($M > 8M_{\odot}$, звезды типа CNII) синтезируют кислород, элементы α -процесса и легкие Z-нечетные и N-четные элементы (Na, Al). Звезды типа SNI с $M (1-3)M_{\odot}$ являются источником элементов группы железа, а звезды в стадии ABГ определяют содержание тяжелых элементов, синтезированных в результате s-процесса, и элементов CNO-группы и их изотопов. Звезды ABГ имеют вырожденное СО-ядро и два тонких слоевых источника He и H, которые включаются попеременно и обуславливают гелиевые вспышки. Это способствует перемешиванию вещества, прошедшего нуклеосинтез, с веществом атмосфер звезд.

Звезды-гиганты и сверхгиганты диска и гало Галактики находятся на разных стадиях эволюции – первая и последующие ветви гигантов (ВГ), голубая и красная части горизонтальной ветви гигантов (ГВГ и КВГ), асимптотическая ветвь гигантов (ABГ), post- ABГ и они расположены в проникающих в друг друга областях диаграммы ГР.

В данной работе остановимся коротко на результатах исследований химического состава атмосфер холодных звезд-гигантов и сверхгигантов кислородной последовательности диска и звезд гало Галактики, полученные в Астрономической обсерватории Одесского госуниверситета.

1. Холодные звезды – гиганты, сверхгиганты диска Галактики. Звезды главной последовательности (ГП) диска Галактики в окрестностях Солнца имеют следующие средние содержания элементов CNO-группы: $[A_c/A_H] = -0.23 \pm 0.1$, $[A_N/A_H] = 0.38 \pm 0.1$, $[A_O/A_H] = -0.03 \pm 0.1$ dex, где $[A/A_H] = \log(A/A_H) - \log(A/A_H)^{\odot}$ ($\log A_{\odot}$ – содержание определенного химического элемента в шкале $\log A_H = 12.0$).

Прародителями звезд-гигантов спектральных классов G-K являются звезды-карлики спектральных классов F-G и масс в пределах $0.8 < M/M_{\odot} < 3.0$. Следовательно, в их атмосферах можно ожидать присутствие продуктов термоядерного синтеза. Действительно, для 4-х и 2-х звезд-гигантов скопления Гиад и Ясли среднее отношение $(A_c/A_N)^* = 0.9$, а для Солнца $(A_c/A_N)^0 = 4.8$. При этом для звезд-карликов скопления Гиад найдено, что $(A_c/A_N)^* = (A_c/A_N)^0$. Содержание азота растет, а углерода уменьшается. При этом для звезд с дефицитом металлов и $M < M_{\odot}$ отношение $(A_c/A_N)^* = (A_c/A_N)^0$, в то время как $(A_N/A_{Fe})^* > (A_N/A_{Fe})^0$ и $(A_c/A_{Fe})^* < (A_c/A_{Fe})^0$ для всех гигантов. В тоже время суммарное содержание элементов C, N, O для звезд-карликов и звезд-гигантов скопления Гиад почти одинаково. Для атмосфер звезд-гигантов характерно уменьшение содержания углерода, увеличение содержания азота при почти постоянном содержании кислорода по сравнению с содержанием их в атмосферах звезд-карликов. Содержания химических элементов для атмосфер звезд-гигантов поля Гиад и Ясли в окрестности Солнца прекрасно согласуются с содержанием химических элементов звезд-карликов в области металличностей $-2.4 < [Fe/H] < 0.35$, содержания элементов α -процесса в избытке для звезд с дефицитом металлов, в то время как Na и Al в дефиците по отношению к элементам α -процесса. Отметим, что «избыток» некоторых элементов может быть обусловлен или сверхтонкой структурой атомных линий, или изотопическим сдвигом. Для элементов группы железа изотопический сдвиг маловероятен, т.к. можно наблюдать преимущественно изотопы ^{52}Cr , ^{55}Mn , ^{56}Fe , ^{59}Co , ^{58}Ni . Для элементов с нечетными Z вероятна сверхтонкая структура атомных уровней. Отношения содержаний изотопов элементов C, O, Mg, Al, Si, Ca, Ni, Zr могут отличаться от «стандартных» и дать информацию о термоядерных процессах присоединения α -частиц и нейтронов.

Определение содержания химических элементов в атмосферах холодных звезд в значительной мере привязано к проблеме определения фундаментальных характеристик - эффективной температуры (T_{eff}), ускорения силы тяжести на поверхности (g), металличности ($[Fe/H]$), микротурбулентной скорости (V_t); с проблемой расчета моделей атмосфер адекватных к структуре реальных звезд; с проблемой определения физико-химических радиационных и столкновительных параметров атомов и молекул. Отметим, что эффективная температура звезды для одного и того же спектрального класса (при одном и том же спектральном индексе) увеличивается с ростом металличности. Это обусловлено большим покровным эффектом. Это обстоятельство с учетом гистограмм распределения звезд по спектральным классам для разных значений металличности может обуславливать ход эффективной температуры от спектрального класса, а именно, незначительное изменение T_{eff} в интервале спектральных классов K5 III- M0 III при значительном изменении интенсивности молекулярных полос и других спектральных особенностей. В спектральном интервале K0-M0 у звезд-гигантов можно ожидать изменение механизмов переноса энергии из внутренних слоев наружу, что и обуславливает разное строение внешних оболочек у звезд в этом спектральном интервале.

Получено, что светимости звезд-гигантов поля галактического диска увеличиваются с ростом металличности.

Получив фундаментальные характеристики звезд-гигантов в окрестности Солнца, представилась возможность по очевидным формулам:

$$M^* - M^0 = -2.5 \log(L^* / L^0), \quad (1.1)$$

$$\log(L^* / L^0) = 2 \log(R^* / R^0) + 4 \log(T_{eff}^* / T_{eff}^0), \quad (1.2)$$

$$\log(g^* / g^0) = \log(M^* / M^0) - 2 \log(R^* / R^0) \quad (1.3)$$

определить величины L^* , R^* и M^* для 1370 звезд-гигантов и их зависимости от металличности $[Fe/H]$. Для Солнца были приняты следующие величины

$$M^0 = 4.72, T_{eff}^0 = 5784K, \log g^0 = 4.44.$$

Наиболее впечатляющим результатом является то, что массы для холодных звезд-гигантов поля галактического диска в окрестности Солнца оказались статистически меньше солнечных в спектральном интервале G5-K5 и поэтому статистически должны иметь

возрасты, сравнимые с возрастом шаровых скоплений (в большей мере это относится к звездам с дефицитом металлов).

Величина микротурбулентной скорости V_t в первом приближении оценивалась по кривым роста для линий поглощения FeI. Уточнение величин V_t проводилось методом моделей атмосфер при помощи расчета содержания железа при разных значениях V_t . Находилась корреляция между содержанием железа и микротурбулентной скоростью и выбиралось значение V_t , когда отсутствует эта корреляция.

Влияние вращения и микротурбулентности на контур линии поглощения учитывалось методом свертки синтетического спектра с аппаратной функцией спектрального прибора. Предположено, что уширение контуров линий за счет вращения и макротурбулентности мало по сравнению с аппаратной функцией прибора.

Для нескольких звезд γ Тау, δ Тау, ϵ Тау скопления Гнад, α Тау и γ Sge их параметры и химический состав атмосфер находился по спектрограммам с дисперсией не хуже 5.6 Å/mm и по области длин волн от 5360 до 6700 Å. Так же детально был исследован химический состав в атмосферах звезд BS 3427 и BS 3428, принадлежащих рассеянному скоплению Ясли.

Содержания химических элементов для более 100 звезд-гигантов и фундаментальные характеристики для более 1700 звезд с разными кинематическими характеристиками, в частности, с пространственными скоростями $V_{\text{пр}}$ были определены. Удалось установить существенное различие в распределении звезд по металличности для высоко- и мало-скоростных звезд диска Галактики, возможно звезд толстого (старого?) и тонкого (молодого?) дисков Галактики. По нашим данным о возрастах толстого и тонкого дисков Галактики говорить еще рано. Действительно, малоскоростные звезды имеют отчетливый максимум в распределении, и он соответствует значению $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.2$ dex, а высокоскоростные звезды распределены почти равномерно в диапазоне металличностей $-0.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.3$ dex. Почему у молодых звезд дефицит элементов группы железа?

Одними из наиболее молодых объектов тонкого диска Галактики являются желтые сверхгиганты – массивные звезды высокой светимости. Массы их составляют от 3–5 до 20 и более солнечных масс, а светимости в сотни и тысячи раз превосходят солнечное значение. Сверхгигантами их называют из-за больших размеров – их радиусы в десятки и сотни раз превосходят радиус Солнца. Большие массы определяют быструю эволюцию этих объектов, поэтому возраст сверхгигантов не превосходит нескольких сот миллионов лет, что очень мало по галактическим масштабам. Они являются потомками горячих звезд главной последовательности (ГП) спектральных классов O6–B8. В ходе быстрой эволюции к стадии красного сверхгиганта они пересекают полосу неустойчивости классических цефеид и на короткое время становятся пульсирующими звездами – цефеидами.

На ОАО были впервые открыты цефеиды, застигнутые на этой очень короткой эволюционной стадии первого пересечения, которая длится всего лишь около тысячи лет. Таких уникальных цефеид должно быть очень мало, открыто пока только четыре. Химический состав их атмосфер оказался идентичным составу их прародителей – O, B звездам ГП, а это значит, что они еще не побывали в стадии красного сверхгиганта. В этой стадии в результате сильной конвекции, которая проникает глубоко в недра звезды, на поверхность выносятся продукты термоядерного синтеза. Подавляющая часть цефеид уже побывала в этой стадии, многие даже неоднократно, поэтому их атмосферы показывают аномальное содержание элементов CNO-цикла – углерода, азота и кислорода.

Качественно наблюдения подтверждали теоретические предсказания. Однако длительное время существовало противоречие между наблюдаемым содержанием CNO-элементов и теоретически рассчитанным на базе эволюционных моделей. Наблюдаемые аномалии оказались значительнее, чем давали теоретические предсказания. Наши исследования показали, что это противоречие связано с несовершенством общепринятой методики анализа химического состава.

В классическом подходе для нахождения микротурбулентной скорости уже длительное время используются линии нейтрального железа. Это объяснялось чисто удобством анализа, т. к. в спектрах большинства звезд подавляющее число спектральных линий –

это линии нейтрального железа. Однако детальное исследование химического состава классических цефеид в разных фазах изменения блеска показало, что из-за эффектов сверхионизации линии нейтрального железа ведут себя аномально (ослабевают) и не годятся для нахождения величины микротурбулентной скорости. Для этой цели более подходят линии ионов, в частности можно использовать линии ионизованного железа. Разработанная методика позволила разрешить и парадокс масс классических цефеид, который состоит в несоответствии эволюционных и спектроскопических масс сверхгигантов и цефеид. Например, спектроскопические массы цефеид в Малом Магеллановом Облаке получались на порядок (!) меньше, чем давали эволюционные расчеты. Тут ущербность традиционного подхода усиливается сильным дефицитом металлов звезд ММО, ведь пониженная металличность ведет к усилению не-ЛТР эффектов.

Новая методика анализа химического состава снимает это противоречие. Дефицит кислорода у цефеид, который также никак нельзя было объяснить в рамках классических представлений, тоже оказался следствием несовершенства традиционного подхода в методе моделей атмосфер. Новый подход, являясь более реалистичным по сути, позволил значительно повысить надежность получаемого обилия элементов и количественно подтвердить предсказания теории химической эволюции массивных звезд.

2. Звезды гало. Население гало – старейшее поколение звезд, оно сформировалось на ранних стадиях эволюции Галактики. Поэтому, все наши сведения о том, как возникла Галактика, какой она была несколько млрд. лет назад, мы получаем, исследуя свойства звезд гало – субкарликов и звезд шаровых скоплений. Ряд работ по изучению химического состава таких объектов выполнен на Одесской Астрономической обсерватории в последние годы. Звезды гало имеют довольно большой разброс по металличности – $-0.5 > [Fe/H] > -4.0$ (для звезд поля) и – $-0.5 > [Fe/H] > -2.5$ (для звезд шаровых скоплений), но значительно меньший разброс возрастов по сравнению со звездами диска. Эти объекты являются достаточно слабыми и имеют также ослабленные линии металлов в их спектрах. Это затрудняет получение достаточно качественного спектрального материала и выполнение детального спектроскопического анализа. Однако в настоящее время наблюдается определенный прогресс в создании приемников излучения, обработки и анализа спектров.

На основе ПЗС наблюдений нами проведено исследование вариаций и дисперсии содержания Li, CNO, α -элементов, элементов группы железа и г-, s-процессов в звездах субкарликах гало и шарового скопления M13. Для звезд этого скопления характерно наличие разброса в интенсивностях полос CN, CO и существование CO-rich, CN-rich, CO-poor, CN-rich звезд, отличающихся также кривой распространенности; наличие корреляций интенсивности полос CN с содержанием Na, Al, антикорреляций с содержанием кислорода; самый большой разброс в содержание кислорода в пределах одного шарового скопления и пр. В качестве объяснений этих особенностей, можно предположить более глубокое перемешивание в звездах низкой металличности, или, пересмотр констант реакций NeNa-цикла. Так, полученный нами результат по исследованию гиганта II-90 в M13 позволил по кривой распространенности классифицировать его как CN-rich звезду. Для звезд I-12 и IV-15 также выполнен анализ спектров методом моделей атмосфер, определены содержания 19 химических элементов. Обнаружен избыток натрия и алюминия. Содержания кислорода и натрия хорошо согласуются с зависимостью, опубликованной для M13 ранее. Соотношение содержания натрия и алюминия также соответствует корреляции, построенной для звезд гало в интервале металличностей – $1.0 > [Fe/H] > -1.9$. У звезды IV-15, принадлежащей асимптотической ветви гигантов, заподозрен небольшой избыток элементов, синтезируемых в цепочке s-процесса.

В целом же, для звезд гало, характерно: а) избыток 0.2–0.3 dex элементов α -процесса по отношению к содержанию железа; б) содержание элементов группы железа, близкое к содержанию железа; в) избыток на более высоких и дефицит на низких металличностях элементов г-, s-процессов. Интрига содержится в содержании кислорода у этих звезд. До настоящего времени нет однозначного ответа на вопрос о величине избытка $[O/Fe]$ и его поведении с металличностью конкретной звезды. Нами на примере 40 субкарликов пока-

зано наличие тренда $[O/Fe]$ с $[Fe/H]$, а также то, что среднее значение $[O/Fe] = 0.71 \pm 0.19$ на металличностях $-1.0 > [Fe/H] > -3.0$. Этот результат согласуется с выводами ряда исследователей, но противоречит традиционной теории происхождения α -элементов (включая кислород), которая предсказывает величину порядка 0.3 dex.

Заключение. Таким образом, получено, что химический состав звезд гало и диска Галактики различается по содержанию как легких, так и тяжелых элементов. Молодые звезды имеют химический состав близкий составу звезд диска Галактики. Обнаружено различие среднего химического состава звезд, принадлежащих толстому и тонкому дискам Галактики. Элементы, образовавшиеся в результате разных процессов нуклеосинтеза, имеют различия в содержаниях для звезд диска и гало Галактики.