

УДК 524.31

Л. С. Любимков

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 АР Крым, п. Научный

Гелий в звездных атмосферах

Гелий, впервые открытый на Солнце с помощью спектрального анализа, играет наряду с водородом важнейшую роль в астрофизике. Обсуждаются две фундаментальные величины: первичное содержание гелия, образовавшееся в результате Большого Взрыва, и современное содержание гелия в молодых близких звездах в начале их эволюции. Показано, что на стадии главной последовательности происходит обогащение атмосфер массивных звезд гелием. Обсуждаются данные об обогащении гелием компонентов тесных двойных В- и О-звезд. Рассмотрены звезды с сильными аномалиями гелия и водорода, а именно: химически пекулярные Ар- и Вр-звезды с дефицитом гелия, а также некоторые типы звезд с гелиевыми атмосферами.

ГЕЛІЙ В ЗОРЯНИХ АТМОСФЕРАХ, Любимков Л. С. — Гелій, вперше відкритий на Сонці за допомогою спектрального аналізу, відіграє поряд з воднем найважливішу роль в астрофізиці. Обговорюються дві фундаментальні величини: первинний вміст гелію, що утворився в результаті Великого Вибуху, і сучасний вміст гелію у молодих близьких зірках на початку їхньої еволюції. Показано, що на стадії головної послідовності відбувається збагачення атмосфер масивних зірок гелієм. Обговорюються дані про збагачення гелієм компонентів тесних подвійних В- і О-зірок. Розглянуто зірки із сильними аномаліями гелію і водню, а саме: хімічно пекулярні Ар- і Вр-зірки з дефіцитом гелію, а також деякі типи зірок з гелієвими атмосферами.

HELIUM IN STELLAR ATMOSPHERES, by Lyubimkov L. S. — Helium, which has been first discovered on the Sun with the help of spectral analysis, plays together with hydrogen the most important role in astrophysics. Two fundamental values are discussed: the primordial helium abundance originated as a result of the Big Bang and the current helium abundance in young near stars when they begin their evolution. It is shown that during the main sequence phase the enrichment by helium occurs in massive star atmospheres. Data on the helium enrichment of components of

the close B- and O-type binaries are discussed. Stars with strong anomalies of helium and hydrogen are considered, namely: chemically peculiar Ap- and Bp-type stars with helium deficiency, as well as some types of stars with helium atmospheres.

ВВЕДЕНИЕ

Открытие гелия было одним из первых выдающихся результатов, достигнутых в астрономии с помощью спектрального анализа, рождение которого состоялось 150 лет назад благодаря Густаву Кирхгофу и Роберту Бунзену. Примечательно, что гелий был впервые обнаружен не химиками в земных лабораториях, а астрономами в космосе, точнее на Солнце. В 1868 г. французский астроном Пьер Жансен, наблюдая затмение Солнца, увидел в спектре солнечного протуберанца яркую желтую линию, отсутствующую в спектре какого-либо земного элемента. В 1871 г. английский астроном Норман Локьер, убедившись, что эта линия не совпадает ни с одной измеренной в лаборатории линией, пришел к заключению, что она принадлежит новому химическому элементу. Он назвал этот элемент гелием (от греческого слова «гелиос» — «Солнце»). На Земле его впервые получил в 1895 г. английский химик и физик Уильям Рамзай, выделив этот газ из минерала клевеита. Отметим, что в спектре спокойного Солнца (т. е. в спектре фотосферы) линии гелия не наблюдаются, а найденная П. Жансеном в спектре протуберанца эмиссионная линия, по-видимому, является линией He I 587.6 нм, самой сильной линией гелия в видимой области спектра солнечных протуберанцев.

Фотосферные линии гелия можно наблюдать только в спектрах относительно горячих O-, B- и ранних A-звезд. Первые сравнительно надежные оценки содержания гелия для таких звезд были получены более 50 лет назад. Например, в 1949 г. Аллер [15] получил для трех ранних B-звезд Peg, Her и Cef содержание He/H = 0.07, 0.05 и 0.04 соответственно. В 1955 г. Травинг [55] для B0-звезды Sco нашел He/H = 0.17, а Хунгер [30] для A0-звезды Luy получил He/H = 0.14. Были определены также содержания ряда других элементов. Из этих работ следовал важный вывод, полностью подтвержденный впоследствии, а именно: гелий по распространенности в нормальных звездах является вторым элементом после водорода, а все другие элементы показывают содержания на несколько порядков меньше, чем водород и гелий. Отметим, что содержание гелия здесь и далее дается в современной шкале, где величина He/H означает отношение гелий/водород по числу атомов.

Водород и гелий играют исключительно важную роль в астрофизике. Во-первых, эти два элемента, первые в периодической системе элементов, являются самыми распространенными в наблюдаемой Вселенной. Их доля по массе в звездах и газовых туманностях состав-

ляет 98 %, в то время как на долю всех остальных, более тяжелых элементов («металлов») приходится не более 2 %. Относительное содержание гелия и водорода, т. е. отношение He/H , является важнейшим параметром в расчетах эволюции звезд. Во-вторых, значительная часть наблюдаемого гелия имеет реликтовое происхождение; как и водород, она образовалась в результате Большого Взрыва. Поэтому эмпирическая оценка первичного, догалактического отношения He/H является важнейшим критерием при проверке космологических моделей.

Отметим, что здесь и далее имеется в виду изотоп гелия ${}^4\text{He}$. Космическая распространенность изотопа ${}^3\text{He}$ примерно на четыре порядка меньше, поэтому его вклад в величину He/H пренебрежимо мал.

ПЕРВИЧНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ

Рассмотрим кратко современные данные о первичном, или реликтовом содержании гелия, так как в дальнейшем эта величина будет сравниваться с содержанием гелия в звездных атмосферах. Речь идет о величине Y_p , первичной доле гелия по массе. Эмпирические данные о Y_p получают обычно из наблюдений эмиссионных спектров газовых туманностей (областей H II), расположенных в бедных металлами карликовых галактиках. Химический состав таких систем проэволюционировал очень мало, поэтому они показывают низкое содержание гелия и других элементов. Строится зависимость содержания гелия от содержания металлов, которая затем линейно экстраполируется до нулевой металличности. В качестве индикатора металличности обычно используют содержание кислорода или азота.

В расчетах эволюции звезд приняты следующие обозначения: X — доля водорода по массе, Y — доля гелия по массе, Z — доля металлов по массе, при этом $X + Y + Z = 1$. При анализе звездных атмосфер в качестве содержания гелия вместо Y используется величина He/H (отношение по числу атомов). Для перехода от Y к He/H нетрудно получить следующее соотношение:

$$\text{He}/\text{H} = 0.25Y/(1 - Y - Z).$$

В частности, для случая нулевой металличности ($Z = 0$) находим

$$(\text{He}/\text{H})_p = 0.25 Y_p/(1 - Y_p).$$

В табл. 1 представлены результаты определения величины Y_p примерно за 10-летний период (в хронологическом порядке), а также соответствующие значения $(\text{He}/\text{H})_p$. В двух последних строках приведены два варианта Y_p , полученные Ю. И. Изотовым и др. [34] в зависимости от исходных предположений. Было отмечено, что первое значение Y_p хорошо согласуется со стандартной теорией Большого Взрыва, в то время как второе значение выше теоретического на 2 .

Таблица 1. Оценки первичного содержания гелия

Y_p	$(\text{He}/\text{H})_p$	Литературный источник, год
0.243±0.003	0.080±0.002	[33], 1997
0.245±0.004	0.081±0.002	[31], 1998
0.241±0.002	0.079±0.001	[56], 2000
0.249±0.003	0.083±0.001	[17], 2000
0.242±0.002	0.080±0.001	[32], 2004
0.244±0.004	0.081±0.002	[2], 2005
0.248±0.003	0.082±0.001	[47], 2007
0.2472±0.0012	0.0821±0.0005	[34], 2007
0.2516±0.0011	0.0840±0.0005	[34], 2007

Из табл. 1 следует, что первичное (реликтовое) содержание гелия известно сейчас с высокой точностью. Для дальнейшего использования можно принять величину $(\text{He}/\text{H})_p = 0.082 \pm 0.002$. Подчеркнем, что данная величина получена эмпирически, но находится в прекрасном согласии с космологической оценкой. Этот фундаментальный параметр имеет важнейшее значение для обсуждаемой проблемы, так как он дает нижнюю границу He/H для вещества, из которого образуются звезды. Тем самым он является начальной точкой отсчета для всего наблюдаемого разнообразия содержаний гелия в звездах. Если наблюдаемые значения He/H существенно отличаются от этой первичной величины, их приходится как-то объяснять, например эволюцией звезд.

СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В НОРМАЛЬНЫХ В- и О-ЗВЕЗДАХ НА СТАДИИ ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Открытие эволюционного повышения величины He/H . В начале 1970-х годов уже был накоплен довольно большой материал о содержании гелия в атмосферах нормальных В-звезд главной последовательности (ГП). По разным данным средняя величина He/H для достаточно больших групп таких звезд варьировала между 0.09 и 0.11 [46]. При этом высказывались предположения, что значения He/H для В-звезд разных скоплений могут быть разными [43, 48]. В середине 1970-х гг. нами было исследовано содержание гелия в атмосферах более 100 ранних В- и поздних О-звезд, принадлежащих ряду скоплений и ОВ-ассоциаций разного возраста. Было показано, что имеется тенденция роста He/H с возрастом t , а именно: среднее значение He/H тем выше, чем старше скопление или ассоциация [4, 5]. Позднее такая же зависимость была получена уже не по средним, а по индивидуальным значениям He/H и t для ранних В-звезд ГП, причем увеличение He/H с возрастом оказалось наиболее заметным для самых массивных звезд [7]. Был сделан вывод, что содержание гелия в атмосферах звезд зависит не столько от их принадлежности к тому или иному скоплению, сколько от массы M и возраста t . Аналогичная корреляция с воз-

растом была обнаружена в [6] еще для одного легкого элемента — азота. Отметим, что анализ спектральных линий He I в работах [4, 5, 7] и линий N II в работе [6] был выполнен с учетом отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР).

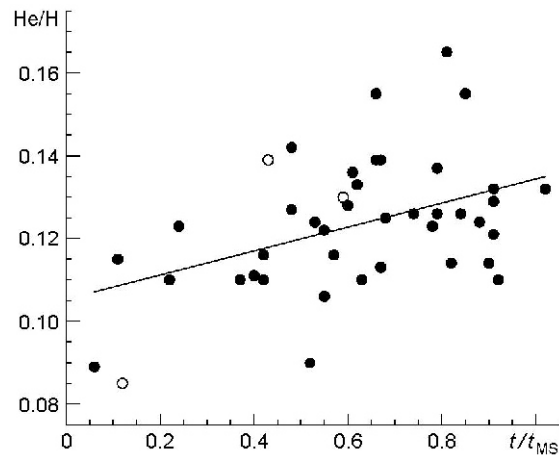
Как известно, гелий и азот участвуют в CNO-цикле, за счет которого светят достаточно массивные звезды во время эволюционной стадии главной последовательности (ГП). Напомним, что ГП — это начальная и самая продолжительная фаза эволюции звезды, когда в ее ядре в реакциях CNO-цикла горит водород. Расчеты показывают, что эти реакции приводят к постепенному увеличению содержаний He и N в недрах звезды. В работах [4—7] найденные эмпирические зависимости содержаний He и N от возраста были интерпретированы как возможный результат перемешивания на стадии ГП, вследствие которого продукты CNO-цикла выносятся из недр звезды на ее поверхность. Такое предположение явилось поначалу полной неожиданностью для теории. Однако со временем накапливались все новые данные, подтверждающие перемешивание на ГП [37, 40]. В настоящее время теоретики включают этот эффект в расчеты звездных моделей, причем причиной перемешивания считается вращение звезд.

Необходимо отметить, что если вначале проблема перемешивания в звездах ГП казалась хотя и интересной, но все-таки частной проблемой, то теперь она приобрела фундаментальное значение. Расчеты показали, что перемешивание в фазе ГП влияет на все последующие стадии эволюции, включая заключительную фазу — взрыв Сверхновой II типа, а значит, на выброс элементов в окружающую межзвездную среду. Следовательно, этот эффект в конечном итоге может влиять на химическую эволюцию Галактики в целом.

Зависимость He/H от возраста и массы. Наиболее полные современные данные об обогащении атмосфер В-звезд ГП гелием получены Л. С. Любимковым, С. И. Ростопчиным и Д. Л. Ламбертом в работе [39]. Использовались спектры высокого разрешения, полученные в НИИ «КрАО» и на обсерватории Мак Дональд Техасского университета [38]. Для 102 ранних и средних В-звезд ГП из неЛТР-анализа шести линий He I была определена величина He/H; по этим же линиям была найдена скорость вращения (точнее, проекция $v \sin i$ скорости вращения на луч зрения). Две звезды показали аномально низкое содержание гелия и оказались химически пекулярными звездами типа “helium-weak”. Остальные 100 звезд были разделены по массам на три группы, и в каждой группе отдельно была построена зависимость наблюдаемого содержания гелия He/H от относительного возраста t/t_{MS} (здесь t — возраст, t_{MS} — время жизни звезды данной массы на ГП). Поскольку рассматриваются звезды на эволюционной стадии ГП, они принадлежат классам светимости V, IV и III.

На рис. 1 представлена зависимость He/H от t/t_{MS} для группы наименее массивных звезд $M = (4...7)M_{\odot}$. Видно, что величина He/H имеет тенденцию повышаться с возрастом. В этом случае повышение

Рис. 1. Зависимость содержания гелия от относительного возраста для группы звезд с массами $M = (4...7)M_{\odot}$

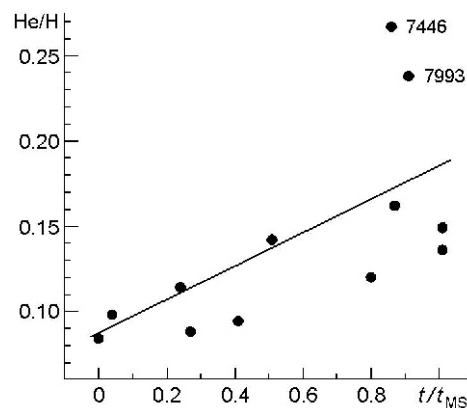


He/H сравнительно невелико: как показывает прямая на рис. 1, проведенная методом наименьших квадратов, в среднем за время жизни на ГП содержание гелия He/H возрастает на 28 %. Разброс точек около прямой обусловлен ошибками измерения эквивалентных ширин линий He I, и в меньшей степени — неточностями определения эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ и ускорения свободного падения lgg .

Очень близкая зависимость He/H от t/t_{MS} была получена в работе [39] для звезд с промежуточными массами $M = (7...11)M_{\odot}$; здесь увеличение He/H в течение фазы ГП составило около 25 %. Следует отметить, что в работе [29] для В-звезд с массами $M = (8.5...16)M_{\odot}$ получена близкая оценка 23 %, хотя немного ранее для них приводилась другая оценка — 70 % [28].

На рис. 2 представлена зависимость He/H от t/t_{MS} для группы самых массивных В-звезд с массами примерно $(12...19)M_{\odot}$ [39]. Здесь повышение He/H в течение стадии ГП гораздо больше, в среднем более чем в 2.2 раза. При этом наблюдается значительный разброс в He/H вблизи конца стадии ГП. Особенно высокое содержание гелия (He/H = 0.27 и 0.24) показали два гиганта, HR 7446 и 7993. Вероятная причина больших значений He/H связана с их особенно высокими скоростями вращения (см. ниже).

Рис. 2. Зависимость содержания гелия от относительного возраста для группы звезд с массами $M = (12...19)M_{\odot}$



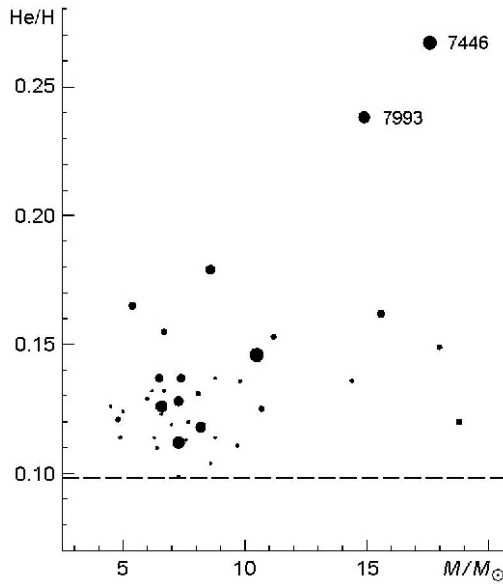


Рис. 3. Зависимость содержания гелия от массы M для звезд с относительным возрастом t/t_{MS} от 0.7 до 1.0, т. е. близких к завершению стадии ГП. Штриховая прямая соответствует начальному содержанию гелия $\text{He}/\text{H} = 0.098$

Согласно расчетам моделей звезд с перемешиванием [25, 41] изменения в атмосферном содержании гелия к концу стадии ГП могут сильно зависеть от массы M и скорости вращения звезды. На рис. 3 представлена зависимость He/H от массы M для звезд с относительным возрастом t/t_{MS} от 0.7 до 1.0, т. е. близких к завершению стадии ГП. Размер кружков пропорционален величине $v \sin i$, проекции скорости вращения на луч зрения. Видим, что все эти звезды показывают избыток гелия по отношению к начальному содержанию $\text{He}/\text{H} = 0.098$, однако при этом разброс в значениях He/H для массивных звезд с $M > 14M_{\odot}$ существенно больше, чем для менее массивных звезд с $M < 11M_{\odot}$. Это объясняется тем, что в соответствии с теорией для более массивных звезд различие скоростей вращения $v \sin i$ влияет на He/H гораздо сильнее.

Особенно высокое содержание гелия He/H на рис. 2 и 3 показали гиганты HR 7446 и 7993. Эти две звезды вблизи конца стадии ГП имеют достаточно большие массы M и высокие скорости вращения ($v \sin i = 270$ и 224 км/с [39]). Напротив, звезды с малыми значениями M и $v \sin i$ показывают незначительное повышение He/H в конце ГП. Таким образом, имеется качественное согласие с теорией. Если же говорить о количественных оценках, сравнение с расчетами [25] показало, что найденное нами обогащение атмосфер В-звезд гелием в течение фазы ГП можно объяснить вращением с экваториальной скоростью $v = 250 \dots 400$ км/с.

На рис. 4 мы сравниваем полученные нами значения He/H для группы наиболее массивных В-звезд ($M = (12 \dots 19)M_{\odot}$) с данными, полученными в работах [26] (рис. 4, а) и [51] (рис. 4, б) для поздних О-звезд ГП, имеющих массы $M = (20 \dots 40)M_{\odot}$. Видно, что, с одной стороны, в течение первой половины жизни на ГП ($0 < t/t_{\text{MS}} < 0.5$) О- и В-звезды показывают низкое содержание гелия, близкое к исходному

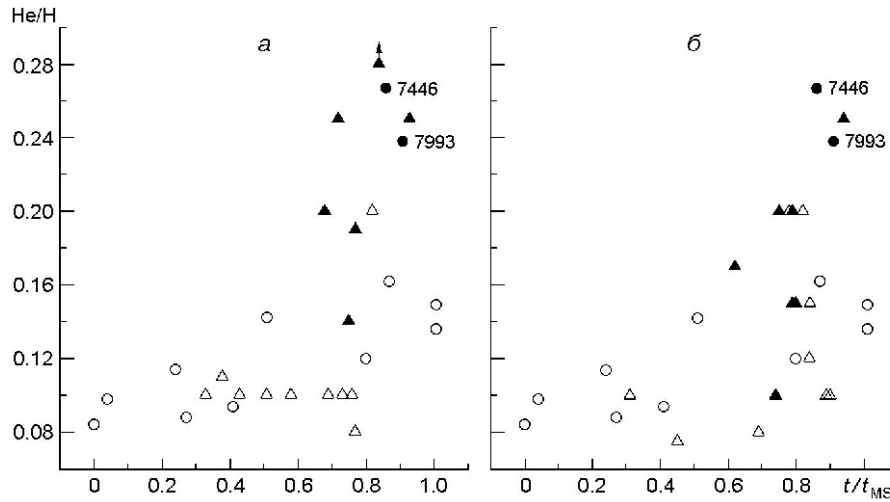


Рис. 4. Зависимость He/H от возраста для массивных В-звезд с $M = (12...19)M_{\odot}$ (кружки), а также поздних О-звезд (треугольники): а — по данным работы [26], б — по данным работы [51]. Темные значки соответствуют звездам с $v \sin i = 200...400$ км/с, а светлые — звездам с $v \sin i = 20...140$ км/с

значению $\text{He}/\text{H} = 0.10$. С другой стороны, для проэволюционировавших звезд ($0.6 < t/t_{\text{MS}} < 1.0$) наблюдается большой разброс содержаний гелия с явным преобладанием повышенных значений He/H . Особенно высокое содержание, вплоть до значений $\text{He}/\text{H} = 0.2...0.3$, показывают звезды с быстрым вращением ($v \sin i = 200...400$ км/с).

Итак, эмпирические данные показывают, что в атмосферах достаточно массивных звезд с массами $M = (4...40)M_{\odot}$ в течение стадии ГП происходит увеличение содержания гелия He/H . В соответствии с теорией обогащение гелием тем сильнее, чем больше масса и скорость вращения.

Содержание гелия, типичное для молодых звезд и газовых туманностей в окрестности Солнца. Рассмотренные результаты имеют прямое отношение к одной важной старой проблеме, а именно: какое содержание гелия He/H можно считать типичным для молодых горячих звезд в окрестности Солнца? Теперь, когда обнаружено изменение He/H с возрастом, вопрос следует ставить немного по-другому: каково исходное содержание He/H у таких звезд в начале их эволюции на ГП? Эта величина оценивалась в работе [39] разными способами; в итоге может быть принято значение $\text{He}/\text{H} = 0.098 \pm 0.003$, которое следует рассматривать как среднее исходное содержание гелия в атмосферах В-звезд в окрестности Солнца (их расстояния $d < 800$ пк). Ясно, что одновременно это есть исходное значение He/H во всей звезде перед началом термоядерных реакций в ее ядре (с их началом начинается увеличение He/H в ядре за счет переработки водорода в гелий).

Недавно в работе [50], посвященной проблеме химического состава молодых звезд и газовых туманностей в солнечной окрестности, было получено, что среднее содержание гелия в атмосферах шести

ранних В-звезд равно 0.096 ± 0.004 , а для четырех звезд, близких к началу ГП, получено содержание гелия $\text{He}/\text{H} = 0.098$, которое в точности совпадает с нашим значением, приведенным выше. Примечательно, что практически такие же оценки He/H получаются для газовых туманностей (зон Н II) в окрестности Солнца. В частности, для туманности Ориона найдено $\text{He}/\text{H} = 0.097 \pm 0.001$ [21].

Таким образом, вполне уверенно можно утверждать, что молодые звезды в окрестности Солнца при своем формировании из межзвездного газа имели содержание гелия, очень близкое к $\text{He}/\text{H} = 0.098$. Эта величина на 20 % больше, чем указанное выше первичное (реликтовое) содержание гелия $(\text{He}/\text{H})_p = 0.082$. Мы видели, что ошибка определения обеих величин мала, так что разница около 20 % оценивается достаточно уверенно.

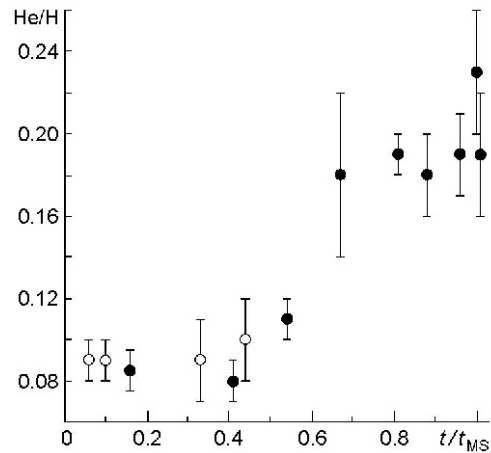
Предполагается, что дополнительный гелий был синтезирован в массивных звездах, которые в конце своей эволюции взрывались как Сверхновые II типа и выбрасывали гелий и другие продукты взрывного нуклеосинтеза в окружающее пространство. Например, согласно расчетам [44] выброс гелия при взрыве звезды с начальной массой $M = 20M_{\odot}$ составляет около $(6...7)M_{\odot}$ (кроме M , эта величина зависит еще от содержания металлов Z). Таким образом, межзвездная среда постоянно обогащалась гелием, что приводило к постепенному увеличению исходного содержания He/H во вновь рождающихся звездах.

ЗВЕЗДЫ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

В Крымской астрофизической обсерватории было исследовано несколько тесных двойных систем, состоящих из В-звезд ГП. Для их компонентов было определено содержание гелия He/H и построена зависимость He/H от относительного возраста t/t_{MS} [11, 37]. На рис. 5 приведена такая зависимость для компонентов пяти двойных В-звезд (точки). Кроме того, здесь представлены также значения He/H для компонентов двух двойных О-звезд, взятые из работ [53, 54] (кружки). С одной стороны, как и у одиночных массивных В-звезд (рис. 4), у этих звезд при $t/t_{MS} < 0.5$ сохраняется низкое (исходное) содержание гелия. С другой стороны, в отличие от одиночных звезд, при $t/t_{MS} > 0.6$ все компоненты двойных систем показывают повышенное содержание гелия (как и на рис. 2, величина He/H повышается примерно в два раза). Отметим, что на рис. 5 представлены тесные двойные системы с орбитальными периодами от 2 до 14 сут, еще не достигшие фазы обмена массой между компонентами (за возможным исключением лишь двойной О-звезды DH Ser [37]).

Естественно предположить, что повышение величины He/H с возрастом у компонентов двойных систем, как и в случае одиночных В-звезд, объясняется перемешиванием на стадии ГП вследствие вращения. Однако современные теоретические модели массивных звезд с

Рис. 5. Зависимость He/H от относительного возраста для компонентов двойных В-звезд (точки) и О-звезд (кружки)



перемешиванием предсказывают монотонное увеличение He/H с возрастом. Они не могут объяснить найденное нами скачкообразное изменение He/H , т. е. сохранение исходного значения He/H в течение первой половины жизни на ГП и дальнейший быстрый его подъем, как на рис. 5. Возможно, что для объяснения такой зависимости He/H от t/t_{MS} необходимо учесть влияние второго компонента в тесной двойной системе.

В двойных системах, где уже состоялся или происходит обмен массой между компонентами, могут наблюдаться большие аномалии в содержании гелия. Примером может служить хорошо известная двойная звезда γ Луг. Ее орбитальный период составляет 2.9 сут, и он постоянно увеличивается со скоростью 19 с/год. Еще в 1959 г. А. А. Боярчук [1] обнаружил сильный избыток гелия у яркого компонента γ Луг, и впоследствии этот результат был подтвержден. Для этого компонента были найдены следующие параметры: эффективная температура $T_{\text{эф}} = 12000 \dots 13000$ К, ускорение свободного падения в атмосфере $\lg g = 2.5$ и содержание гелия $\text{He}/\text{H} = 1.5$ [3, 16]. Таким образом, величина He/H оказалась здесь в 15 раз больше нормального значения. Согласно работе [16] наряду с большим избытком гелия в атмосфере звезды наблюдается также сильный избыток азота (в 20 раз), в то время как содержание углерода и кислорода оказалось пониженным. Был сделан вывод, что яркий компонент γ Луг показывает такие аномалии химического состава, которые характерны для вещества, переработанного в CNO-цикле. Авторы [16] предположили, что первоначально масса яркого компонента составляла $12M_{\odot}$, но затем в результате интенсивной потери вещества он лишился большей части этой массы, и сейчас мы наблюдаем оставшееся ядро с массой около 2. Расчеты химического состава такого остатка, как оказалось, хорошо согласуются с наблюдаемыми содержаниями He, C, N и O.

Согласно современным представлениям звезда γ Луг является затменной двойной в стадии обмена массой между компонентами [24]. Более яркий компонент, объект класса В6-8 II, имеет массу около $3M_{\odot}$, заполняет свою полость Роша и теряет вещество со скоростью

$2 \cdot 10^5 M_{\odot}/\text{год}$. Второй компонент, на который перетекает вещество, является ранней В-звездой с массой около 13. Он полностью погружен в аккреционный диск, который экранирует и рассеивает излучение звезды. Благодаря этому второй компонент выглядит менее ярким в видимой области спектра, чем первый компонент. Таким образом, большой избыток гелия, обнаруженный у γ Лут, является одним из проявлений необычной природы этой звезды.

ГЕЛИЙ В ГОРЯЧИХ СВЕРХГИГАНТАХ

Переходя от горячих звезд на стадии ГП к сверхгигантам, следует отметить работу [49], где для четырех сверхгигантов классов от В8 до А2 показано, что содержание гелия в их атмосферах заметно повышено [49]. Величина He/H изменяется от 0.12 до 0.15, составляя в среднем 0.14. Это значение существенно больше, чем реликтовое содержание $(\text{He}/\text{H})_p = 0.082$ или содержание $\text{He}/\text{H} = 0.098$, характерное для молодых В-звезд ГП в окрестности Солнца. Согласно [49] массы этих сверхгигантов в начале стадии ГП составляли от 10 до $30M_{\odot}$ (в процессе эволюции некоторая часть массы была утеряна вследствие истечения). Некоторые из таких звезд могли уже побывать в фазе красного сверхгиганта, когда в ядре начинается горение гелия, и снова вернуться в фазу позднего В- или раннего А-сверхгиганта (см. пример звезды $10M_{\odot}$ в работе [10]). В этом случае они прошли через перемешивание дважды, сначала на стадии ГП, а затем — на стадии красного сверхгиганта (так называемый “first dredge-up”). Как показывают модельные расчеты [25], у звезды с начальной массой $15M_{\odot}$ и начальной скоростью вращения на экваторе $v = 320$ км/с содержание гелия в атмосфере в течение стадии ГП увеличится от нормального значения 0.10 до повышенного 0.13, а к концу фазы “first dredge-up” — до значения 0.15. Учитывая, что обогащение гелием сильно зависит от массы звезды и ее скорости вращения, можно сказать, что полученные в работе [49] значения He/H для четырех сверхгигантов А2 — В8 вполне согласуются с предсказаниями теории.

При исследовании очень горячих сверхгигантов класса О необходимо принимать во внимание сферичность атмосферы и истечение вещества (звездный ветер). Оба эти эффекта были учтены в моделях атмосфер семи О-звезд, исследованных в работе [27]. Четыре из них являются сверхгигантами классов от О3 до О6 (их эффективные температуры $T_{\text{эф}}$ варьируются от 50000 до 37000 К). Величина He/H у этих сверхгигантов изменяется от 0.18 до 0.33, составляя в среднем $\text{He}/\text{H} = 0.24$. При этом их начальные массы могут значительно превышать $40M_{\odot}$. Видим, что у этих массивных звезд обогащение атмосфер гелием оказалось более существенным, чем у рассмотренных выше сверхгигантов А2 — В8 с начальными массами $M = (10...30)M_{\odot}$.

Из рис. 2 видно, что у некоторых ранних В-звезд с быстрым вращением уже к концу стадии ГП содержание гелия в атмосфере может

возрасти до величины $\text{He}/\text{H} = 0.25$. Это вполне сопоставимо с приведенными выше оценками He/H для О-сверхгигантов. Как показывают расчеты [25], такие значения He/H достигаются в результате перемешивания на ГП даже без последующего прохождения фазы “first dredge-up”.

Итак, наиболее уверенные современные оценки He/H для В- и О-сверхгигантов показали, что 1) у всех этих звезд содержание гелия в атмосфере является повышенным и 2) наблюдаемое обогащение гелием вполне согласуется с расчетами моделей звезд соответствующих масс, в которых учтено перемешивание на стадии ГП, индуцированное вращением.

ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ С АНОМАЛИЯМИ ГЕЛИЯ

Среди звезд класса В различают два типа объектов с аномальными линиями гелия в спектрах. Для одного из них характерны заметно ослабленные линии He I, это звезды типа “helium-weak” или He-w. Для другого отличительным признаком являются усиленные линии He I, это звезды типа “helium-strong” или He-s (другое название — “helium-rich”). Необычные линии He I являются следствием аномального содержания гелия в атмосферах этих звезд. Наряду с гелием, и другие элементы у объектов типа He-w и He-s показывают аномальное содержание, так что звезды He-w и He-s относятся к химически пекулярным звездам (CP-звездам).

В классе В к CP-звездам относят также звезды типа HgMn, а в классе А — магнитные Ap-звезды и «металлические» Am-звезды. Все они отличаются целым рядом химических аномалий, в том числе пониженным содержанием гелия. Детальное описание свойств объектов типа He-s, He-w, HgMn, Ap и Am можно найти в работе [8]. Здесь остановимся лишь на характерных значениях эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ и содержания гелия He/H (табл. 2).

Интересно, что все перечисленные типы CP-звезд по всем признакам, кроме химического состава, принадлежат стадии ГП. В частности, как видно из табл. 2, в области температур $T_{\text{эф}}$ между 17000 и 25000 К на стадии ГП наблюдаются одновременно звезды трех различных типов: He-s, He-w и нормальные В-звезды. Этот интересный феномен до сих пор не получил однозначного объяснения.

Таблица 2. Области значений $T_{\text{эф}}$ и He/H , характерные для пяти типов CP-звезд

Тип звезд	$T_{\text{эф}}$, К	He/H
He-strong	17000—32000	0.3—10
He-weak	13000—25000	0.05—0.005
HgMn	10000—14000	0.05—0.005
Am	7300—10000	0.03—0.006
Магнитные Ap	7500—11000	< 0.05

В спектрах ряда CP-звезд типов He-s, He-w и Ap линии некоторых элементов показали регулярную переменность, откуда был сделан вывод о наличии пятен химического состава на поверхности этих звезд. В частности, были обнаружены гелиевые пятна, где величина He/H оказалась значительно выше, чем в окружающей атмосфере. Обычно CP-звезды с пятнами имеют магнитное поле, и расположение пятен связывают с геометрией поля. Например, у магнитной He-s звезды HD 37776 гелиевые пятна, где величина He/H повышена на 2 dex, оказались расположенными вблизи магнитных полюсов [13].

Наряду с пятнами химического состава у CP-звезд было обнаружено еще одно интересное явление — вертикальная стратификация элементов в атмосфере, т. е. содержание некоторых элементов существенно изменяется с высотой. Большинство таких исследований касалось стратификации сравнительно тяжелых элементов (см., например, анализ стратификации Fe, Cr, Si, Sr, Ca и Mg в атмосфере магнитной Ap-звезды HD 133792 [36]). На примере магнитной He-w звезды HD 49333 в работе [22] было показано, что содержание гелия тоже может существенно изменяться с высотой. Этот вывод был получен из анализа наблюдаемого профиля линии He I 4471, который удалось промоделировать лишь при предположении об увеличении He/H с глубиной в атмосфере. Аналогичный вывод об увеличении He/H с глубиной был получен недавно для магнитной He-w-звезды HD 21699 [52].

Более прямое доказательство стратификации гелия получено в работе [12] для He-w звезды HR 1512. На рис. 6, взятом из работы [12], сравниваются эквивалентные ширины W десяти линий He I у HR 1512 и у нормальной B-звезды HR 8385 с практически такими же параметрами $T_{\text{эф}}$ и l_{gg} . Видим, что различие в эквивалентных ширинах между пекулярной и нормальной звездами показывает сильную зависимость от W , при этом указанное различие уменьшается с переходом от слабых линий к более сильным. Поскольку более сильные линии формируются в более высоких слоях атмосферы, можно сделать вывод об увеличении содержания гелия с высотой в атмосфере звезды HR 1512. Подчеркнем, что зависимость, приведенная на рис. 6, явля-

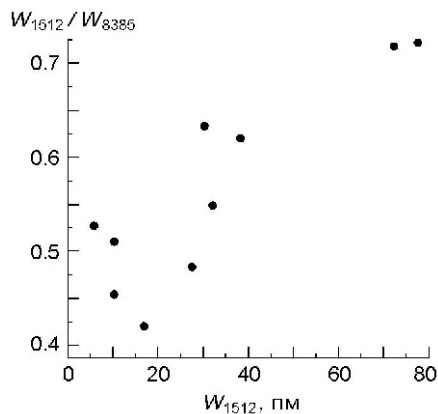


Рис. 6. Сравнение эквивалентных ширин линий He I у звезды типа “helium-weak” HR 1512 и нормальной B-звезды HR 8385 с такими же параметрами $T_{\text{эф}}$ и l_{gg}

ется чисто эмпирической, здесь не проводилось каких-либо расчетов линий He I.

Стратификация гелия в работах [22, 52] и [12] для звезд типа He-w оказалась существенно разной. Действительно, по данным [22, 52] содержание гелия He/H с высотой уменьшается, а согласно [12] — увеличивается. Причина может быть связана с наличием магнитного поля. Известно, например, что у магнитных Ap-звезд могут наблюдаться распределения содержаний элементов по высоте, обратные тем, которые получаются для немагнитных CP-звезд типов HgMn и Am. В связи с этим следует отметить, что He-w-звезда HR 1512 принадлежит к подтипу PGa, родственному более холодным HgMn звездам, и поэтому, в отличие от исследованных в работах [22, 52] двух магнитных He-w-звезд подтипа Si, вероятно, не имеет заметного магнитного поля (см. обсуждение стратификации у звезды HR 1512 в работе [9]).

Образование химических аномалий и стратификации элементов в атмосферах CP-звезд, как принято считать, происходит в результате диффузии атомов в верхних слоях звезды под действием двух противоположно направленных сил — гравитации и давления излучения. В магнитных CP-звездах добавляется еще действие магнитного поля, которое способствует концентрации одних элементов вблизи магнитных полюсов, а других — в области магнитного экватора. Некоторые аспекты проблемы обсуждаются в работах [14, 20, 23]. В частности, моделирование стратификации в работе [14] показало, что распределение элементов по глубине может иметь довольно сложный немонотонный вид.

Итак, согласно современным представлениям наблюдаемые в CP-звездах химические аномалии, в том числе аномалии гелия, не являются следствием каких-то термоядерных реакций в недрах звезд, а рассматриваются как результат процессов диффузии, затрагивающих лишь их поверхностные слои.

ЗВЕЗДЫ С ГЕЛИЕВЫМИ АТМОСФЕРАМИ

Звезды больших масс. Для некоторых звезд наблюдаемое отношение He/H значительно превышает единицу, то есть их атмосферы состоят в основном не из водорода, а из гелия. Примером могут служить звезды Вольфа — Райе, которые, как и нормальные O-звезды, имеют эффективные температуры $T_{\text{эф}} > 30000$ К, но отличаются от последних аномальным химическим составом. Спектры звезд Вольфа — Райе состоят из довольно широких эмиссионных линий на фоне континуума, которые образуются в звездном ветре. В зависимости от вида спектра различают три подгруппы таких звезд — WN, WC и WO (возможно, они образуют эволюционную последовательность). Линии водорода у WC- и WO-звезд обычно не видны, откуда содержание гелия для них составляет He/H > 10 . Делается вывод, что атмосферы WO-звезд являются в основном гелиевыми, а у WC-звезд значительную долю

может составлять также углерод. (Для таких звезд содержание других элементов, составляющих небольшую долю, относят не к водороду, а к гелию, или к сумме $H + He$).

Ослабленные линии водорода видны лишь в спектрах звезд Вольфа — Райе, принадлежащих группе WN. В работе [45] было определено относительное содержание водорода и гелия для 30 WN-звезд, и лишь для некоторых из них было найдено сравнительно низкое содержание гелия $He/H = 0.3...0.6$, в то время как для подавляющего большинства эта величина оказалась больше единицы, достигая значений $He/H = 100$ и более. Отметим, что все эти оценки относятся к верхним слоям атмосфер звезд Вольфа — Райе, где происходит быстрое истечение вещества в виде звездного ветра.

Наблюдаемое высокое отношение He/H у звезд Вольфа — Райе вместе с аномалиями других легких элементов интерпретируется как следствие появления в наружных слоях звездного вещества, переработанного в реакциях термоядерного синтеза (эволюция звезд Вольфа — Райе сопровождается быстрой потерей массы). В частности, WN-звезды демонстрируют химический состав, соответствующий веществу, переработанному в процессе горения водорода в CNO-цикле. Звезды типов WC и WO показывают аномалии, характерные для более поздней стадии эволюции, когда в атмосфере массивной звезды могут появиться продукты горения гелия. Возможно, что у звезд смешанного типа WC/WN наблюдается смесь продуктов горения как водорода, так и гелия.

Очень близкими к звездам Вольфа — Райе по своим свойствам и эволюционному статусу оказались яркие голубые сверхгиганты вблизи центра Галактики [42]. Анализ инфракрасных спектров этих звезд привел к выводу, что они имеют эффективные температуры $T_{эф} = 17000...30000$ К, теряют массу со скоростью около 10^{-4} M /год, а содержание гелия в их верхних слоях значительно превышает единицу, достигая значений $He/H > 500$ (величина He/H оценивалась по эмиссионным ИК-линиям He I с длинами волн около 2 мкм). Таким образом, здесь мы также имеем пример звезд с гелиевыми атмосферами.

Звезды малых масс. Среди звезд, в атмосферах которых водород был заменен гелием с некоторой примесью других элементов (“hydrogen-deficient stars”), встречаются не только молодые массивные звезды, подобные звездам Вольфа — Райе. К этому типу объектов относятся также звезды малых масс на продвинутых стадиях эволюции, а именно: маломассивные пекулярные сверхгиганты, горячие субкарлики типа sdO, некоторые центральные звезды планетарных туманностей и белые карлики гелиевой последовательности (см. обзор [35]).

Переменные звезды типа R CrB по своим эффективным температурам $T_{эф} = 4000...8000$ К и ускорениям свободного падения $lgg = 0...1$ являются сверхгигантами классов F, G и K, но в их спектрах отсутствуют линии водорода, характерные для нормальных звезд этих классов. Согласно [18] их атмосферы состоят в основном из гелия

(98 % по массе) с заметной добавкой углерода (1 %), в то время как содержание водорода крайне низкое ($H/He \approx 10^{-4}$ [8]). Предполагается, что переменная типа R CrV является остатком звезды, только что вышедшей из эволюционной стадии АВГ (асимптотическая ветвь гигантов). Испытав последнюю гелиевую вспышку, которая «раздула» этот маломассивный объект до размеров сверхгиганта, он быстро превращается в центральную звезду планетарной туманности. Альтернативная гипотеза предлагает рассматривать такие объекты как результат слияния двух белых карликов — углеродно-кислородного и гелиевого [18]. Другие примеры сверхгигантов малых масс на стадии пост-АВГ см. в работах [8, 35].

Центральные звезды планетарных туманностей являются переходной фазой от постАВГ-звезд к белым карликам. Содержание гелия He/H в их атмосферах варьирует в довольно широких пределах — от нормального до сильно повышенного [8]. В частности, согласно [19] у звезд типа [WC], имеющих температуры в диапазоне от 30000 до 150000 К, содержание гелия составляет около 40—50 % по массе. Почти столько же у них углерода, то есть атмосферы [WC] звезд являются в основном гелиево-углеродными. (В этом отношении [WC]-звезды похожи на обычные звезды Вольфа — Райе группы WC).

Когда центральные звезды планетарных туманностей становятся белыми карликами (БК), у них сохраняется большое разнообразие в содержании гелия. По этому признаку разделяют водородную и гелиевую последовательности БК. Наиболее горячими представителями второй из них являются БК типа PG1159 с эффективными температурами $T_{эф} = 75000...200000$ К. Доминирующую роль в их атмосферах играют три элемента — углерод (50 % по массе), гелий (35 %) и кислород (15 %) [57]. Далее гелиевую последовательность продолжают (в порядке убывания температуры) БК типов DO, DB, DQ и DZ. Для них также характерно высокое содержание гелия и большой дефицит или полное отсутствие водорода: $H/He < 0.1$ для карликов DO и $H/He \approx 10^{-3}$ или 10^{-4} для карликов DB, DQ и DZ. Интерпретация наблюдаемых химических аномалий БК обсуждается в работе [8].

Мы коснулись лишь одной стороны многогранной проблемы под названием “hydrogen-deficient stars”. Эти звезды находятся на поздних, порой очень кратковременных стадиях эволюции (за исключением стадии БК). Именно с эволюционным статусом связано почти полное отсутствие водорода в их атмосферах, который был заменен гелием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечислим наиболее важные результаты, относящиеся к проблеме содержания гелия в атмосферах звезд.

1. Первичное (primordial) или реликтовое содержание гелия, образовавшееся в результате Большого Взрыва, составляет $(He/H)_p =$

$= 0.082 \pm 0.002$. Этот фундаментальный параметр, найденный эмпирически, находится в прекрасном согласии с космологическими расчетами. Звезды при своем формировании не могут иметь содержание гелия ниже этой величины.

2. Молодые массивные звезды в окрестности Солнца в начале своей эволюции на ГП имеют содержание гелия $\text{He}/\text{H} = 0.098 \pm 0.003$. Отличие от первичного содержания $(\text{He}/\text{H})_p = 0.082$ можно объяснить химической эволюцией звезд и межзвездной среды.

3. В течение эволюции на ГП звезды классов О и В демонстрируют обогащение атмосфер гелием. Этот процесс тем заметнее, чем массивнее звезды; у самых массивных В-звезд величина He/H к концу фазы ГП может быть повышена более чем в два раза. Это свидетельствует о перемешивании на стадии ГП, в результате которого продукты CNO-цикла выносятся из звездных недр на поверхность. Согласие с теоретическими моделями звезд, в которых перемешивание индуцировано вращением, получается при скоростях вращения 250—400 км/с.

4. Звезды классов В и О, которые входят в тесные двойные системы, еще не достигшие фазы активного обмена массой, также демонстрируют повышение He/H в течение стадии ГП (примерно в два раза). Однако, в отличие от одиночных В- и О-звезд, увеличение He/H здесь происходит скачком за относительно короткий отрезок стадии ГП. В двойных системах, где уже состоялся или происходит обмен массой между компонентами, может наблюдаться избыток гелия в 10 раз и больше (пример — яркий компонент в Lyr).

5. В атмосферах горячих массивных сверхгигантов, недавно вышедших из стадии ГП, содержание гелия оказалось повышенным до 2.5 раз относительно исходного содержания. Такое обогащение гелием вполне согласуется с расчетами моделей звезд соответствующих масс, в которых учтено перемешивание на ГП, индуцированное вращением.

6. Некоторые звезды показывают сильные аномалии содержания гелия. В частности, в атмосферах химически пекулярных звезд классов А и В (магнитные Ap-звезды, Am, HgMn и He-weak) величина He/H значительно понижена. Наблюдаемый дефицит гелия здесь, по-видимому, объясняется диффузией атомов в поверхностных слоях этих звезд. Напротив, имеется несколько типов звезд, атмосферы которых состоят в основном из гелия (звезды Вольфа — Райе, переменные типа R CrB, ядра планетарных туманностей типа [WC], белые карлики гелиевой последовательности и др.). Высокое содержание гелия и, соответственно, дефицит водорода у таких звезд объясняются эволюционными причинами.

1. Боярчук А. А. Количественный анализ химического состава атмосферы яркого компонента Лиры // Астрон. журн.—1959.—**36**, № 5.—С. 766—777.
2. Головатый В. В., Мелех Б. Я. Переопределение содержания гелия в областях H II голубых компактных карликовых галактик // Письма в Астрон. журн.—2005.—**82**, № 9.—С. 755—762.

3. *Леушин В. В., Невский М. Ю., Снежко Л. И., Соколов В. В.* Водород и гелий в видимом компоненте двойной системы в Луг // *Астрофиз. исследования (Изв. САО)*.—1977.—**9**, № 1.—С. 3—15.
4. *Любимков Л. С.* Эволюционные изменения содержания гелия в атмосферах звезд ранних спектральных классов // *Письма в Астрон. журн.*—1975.—**1**, № 11.—С. 29—31.
5. *Любимков Л. С.* О вариациях содержания гелия в ассоциациях и скоплениях звезд классов О и В // *Астрофизика*.—1977.—**13**, № 1.—С. 139—151.
6. *Любимков Л. С.* Эволюционное увеличение содержания азота в атмосферах ранних В-звезд // *Астрофизика*.—1984.—**20**, № 3.—С. 475—493.
7. *Любимков Л. С.* О корреляции содержания гелия в атмосферах ранних В-звезд с их возрастом и массой // *Астрофизика*.—1988.—**29**, № 3.—С. 479—494.
8. *Любимков Л. С.* Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
9. *Любимков Л. С., Поклад Д. Б., Рачковская Т. М.* Стратификация фосфора в атмосфере химически пекулярной В-звезды HR 1512 // *Астрофизика*.—2008.—**51**, № 2.—С. 239—253.
10. *Любимков Л. С., Рачковская Т. М., Поклад Д. Б.* Определение фундаментальных параметров сверхгигантов классов F и G // *Астрофизика*.—2009.—**52**, № 2.—С. 237—256.
11. *Любимков Л. С., Рачковская Т. М., Ростопчин С. И., Тарасов А. Е.* Двойная система V373 Cas: элементы орбиты, параметры компонентов и содержание гелия // *Астрон. журн.*—1998.—**75**, № 3.—С. 355—366.
12. *Рачковская Т. М., Любимков Л. С., Ростопчин С. И.* Химический состав HR 1512 — пекулярной звезды типа «helium-weak» // *Астрон. журн.*—2006.—**83**, № 2.—С. 146—157.
13. *Хохлова В. Л., Васильченко Д. В., Степанов В. В., Романюк И. И.* Опыт доплер-зеемановского картирования поверхности быстровращающейся магнитной CP-звезды HD 37776 // *Письма в Астрон. журн.*—2000.—**26**, № 3.—С. 217—233.
14. *Alecian G., Stift M. J.* Modelling element distributions in the atmospheres of magnetic Ap stars // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**475**, N 2.—P. 659—665.
15. *Aller L. H.* The atmosphere of Gamma Pegasi // *Astrophys. J.*—1949.—**109**, N 2.—P. 244—264.
16. *Balachandran S., Lambert D. L., Tomkin J., Parthasarathy M.* The chemical composition of algol systems. III. Beta Lyrae — nucleosynthesis revealed // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1986.—**219**, N 3.—P. 479—494.
17. *Ballantyne D. R., Ferland G. J., Martin P. G.* The primordial helium abundance: toward understanding and removing the cosmic scatter in the dY/dZ relation // *Astrophys. J.*—2000.—**536**, N 2.—P. 773—777.
18. *Clayton G. C.* The evolution of R Coronae Borealis stars // *ASP Conf. Ser.*—2008.—**391**.—P. 17—23.—(Hydrogen Deficient Stars / Eds K. Werner, T. Rauch).
19. *Crowther P. A.* Physical and wind properties of [WC] stars // *ASP Conf. Ser.*—2008.—**391**.—P. 83—93.—(Hydrogen Deficient Stars / Eds K. Werner, T. Rauch).
20. *Element stratification in stars: 40 years of atomic diffusion* / Eds G. Alecian, O. Richard, S. Vauclair // *EAS Publ. Ser.*—2005.—**17**.
21. *Esteban C., Peimbert M., Garcia-Rojas J., et al.* A reappraisal of the chemical composition of the Orion nebula based on Very Large Telescope echelle spectrophotometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**355**, N 1.—P. 229—247.
22. *Farthmann M., Dreizler S., Heber U., Hunger K.* Stratification of helium in the photospheres of the helium-weak stars HD 28843 and HD 49333 // *Astron. and*

- Astrophys.—1994.—**291**, N 3.—P. 919—927.
23. *Fossati L., Bagnulo S., Monier R., et al.* Late stages of the evolution of A-type stars on the main sequence: comparison between observed chemical abundances and diffusion models for 8 Am stars of the Praesepe cluster // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**476**, N 2.—P. 911—925.
 24. *Harmanec P.* The ever challenging emission-line binary beta Lyrae // *Astron. Nachr.*—2002.—**323**, N 2.—P. 87—98.
 25. *Heger A., Langer N.* Presupernova evolution of rotating massive stars. II. Evolution of the surface properties // *Astrophys. J.*—2000.—**544**, N 2.—P. 1016—1035.
 26. *Herrero A., Kudritzki R. P., Vilches J. M., et al.* Intrinsic parameters of galactic luminous OB stars // *Astron. and Astrophys.*—1992—**261**, N 1.—P. 209—234.
 27. *Herrero A., Puls J., Villamariz M. R.* Fundamental parameters of Galactic luminous OB stars. IV. The upper HR diagram // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**354**, N 1.—P. 193—215.
 28. *Huang W.* Spectral Line Synthesis for Hot Stars: Ph.D. dissertation. — Georgia State University, 2005.
 29. *Huang W., Gies D. R.* Stellar rotation in young clusters. II. Evolution of stellar rotation and surface helium abundance // *Astrophys. J.*—2006.—**648**, N 1.—P. 591—606.
 30. *Hunger K.* Die Atmosphäre des A0-Sternes Alpha Lyrae // *Z. Astrophys.*—1955.—**36**, N 1.—P. 42—97.
 31. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* The primordial abundance of ^4He revisited // *Astrophys. J.*—1998.—**500**, N 1.—P. 188—216.
 32. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* Systematic effects and a new determination of the primordial abundance of ^4He and dY/dZ from observations of blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—2004.—**602**, N 1.—P. 200—230.
 33. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance: systematic effects and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**108**, N 1.—P. 1—39.
 34. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Stasinska G.* The primordial abundance of ^4He : a self-consistent empirical analysis of systematic effects in a large sample of low-metallicity H II regions // *Astrophys. J.*—2007.—**662**, N 1.—P. 15—38.
 35. *Jeffery C. S.* Hydrogen-deficient stars: an introduction // *ASP Conf. Ser.*—2008.—**391**.—P. 3—16.—(Hydrogen Deficient Stars / Eds K. Werner, T. Rauch)
 36. *Kochukhov O., Tsymbal V., Ryabchikova T., et al.* Chemical stratification in the atmosphere of Ap star HD 133792. Regularized solution of the vertical inversion problem // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**460**, N 3.—P. 831—842.
 37. *Lyubimkov L. S.* Observational manifestations of early mixing in B- and O-type stars // *Astrophys. and Space Sci.*—1996.—**243**, N 2.—P. 329—349.
 38. *Lyubimkov L. S., Lambert D. L., Rachkovskaya T. M., et al.* Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars. I. Spectral observations of 123 stars; measurements of hydrogen and helium lines; infrared photometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**316**, N 1.—P. 19—32.
 39. *Lyubimkov L. S., Rostopchin S. I., Lambert D. L.* Surface abundances of light elements for a large sample of early B-type stars. III. An analysis of helium lines in spectra of 102 stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**351**, N 2.—P. 745—767.
 40. *Maeder A., Meynet G.* The evolution of rotating stars // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2000.—**38**.—P. 143—190.
 41. *Meynet G., Maeder A.* Stellar evolution with rotation. V. Changes in all the outputs of massive star models // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**361**, N 1.—P. 101—120.
 42. *Najarro F., Krabbe A., Genzel R., et al.* Quantitative spectroscopy of the He I cluster in the Galactic center // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**325**, N 2.—P. 700—708.

43. *Nissen P. E.* Evidence of helium abundance differences between young groups of stars // *Astron. and Astrophys.*—1976.—**50**, N 3.—P. 343—352.
44. *Nomoto K., Tominagava N., Umeda H., et al.* Nucleosynthesis yields of core-collapse supernovae and hypernovae, and galactic chemical evolution // *Nuclear Phys. A.*—2006.—**777**.—P. 424—458.
45. *Nugis T., Niedzielski A.* Chemical composition of Wolf-Rayet stars. II. Hydrogen-to-helium ratio // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**300**, N 1.—P. 237—258.
46. *O'Mara B. J., Simpson R. W.* The helium abundance in thirty-three main sequence B-stars // *Astron. and Astrophys.*—1972.—**19**, N 2.—P. 167—180.
47. *Peimbert M., Luridiana V., Peimbert A.* Revised primordial helium abundance based on new atomic data // *Astrophys. J.*—2007.—**666**, N 2—P. 636—646.
48. *Peterson D. M., Shipman H. L.* Helium abundances in NGC 2264. II Scorpii and I Lacertae // *Astrophys. J.*—1973.—**180**, N 2.—P. 635—645.
49. *Przybilla N., Butler K., Becker S. R., Kudritzki R. P.* Quantitative spectroscopy of BA-type supergiants // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**445**, N 3.—P. 1099—1126.
50. *Przybilla N., Nieva M. F., Butler K.* A cosmic abundance standard: chemical homogeneity of the solar neighborhood and the ISM dust-phase composition // *Astrophys. J. Lett.*—2008.—**688**, N 2.—P. L103—L106.
51. *Repolust T., Puls J., Herrero A.* Stellar and wind parameters of Galactic O-stars. The influence of line-blocking/blanketing // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**415**, N 1.—P. 349—376.
52. *Shavrina A.V., Glagolevskij Yu.V., Silvester J., et al.* Spots structure and stratification of some chemical elements in the atmosphere of He-weak star HD 21699 // *Odessa Astron. Publ.*—2008.—**21**.—P. 115—119.
53. *Simon K. P., Sturm E., Fiedler A.* Spectroscopic analysis of hot binaries. 2. The components of Y Cygni // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**292**, N 2.—P. 507—518.
54. *Sturm E., Simon K. P.* Spectroscopic analysis of hot binaries. 1. The components of DH Cephei // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**282**, N 1.—P. 93—105.
55. *Traving G.* Die Atmosphäre des BO-Sternes Scorpii // *Z. Astrophys.*—1955.—**36**, N 1.—P. 1—41.
56. *Viegas S. M., Gruenwald R., Steigman G.* Ionization corrections for low-metallicity H II regions and the primordial helium abundance // *Astrophys. J.*—2000.—**531**, N 2.—P. 813—819.
57. *Werner K., Rauch T., Reiff E., Kruk J. W.* Elemental abundances in PG1159 stars // *ASP Conf. Ser.*—2008.—**391**.—P. 109—119.—(Hydrogen Deficient Stars / Eds K. Werner, T. Rauch).

Поступила в редакцию 01.10.09