

ОБЗОРЫ

ЛЕГКИЕ ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЗВЕЗДАХ: ЗАГАДКИ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Л.С.ЛЮБИМКОВ

Поступила 30 ноября 2017

Принята к печати 7 марта 2018

Рассмотрены первые восемь элементов периодической системы химических элементов: H, He, Li, Be, B, C, N и O. Их называют ключевыми элементами, учитывая их важную роль в звездной эволюции. Примечательно, что все они первоначально были синтезированы в Большом Взрыве. В обзоре приведены первичные содержания изотопов этих элементов, рассчитанные на основе СМБВ (Стандартная Модель Большого Взрыва). Отмечено хорошее согласие между СМБВ и наблюдаемыми первичными содержаниями изотопов водорода и гелия D, He и ^3He ; однако для лития (изотоп ^7Li) имеет место расхождение ~ 0.5 dex между СМБВ и наблюдениями старых звезд гало Галактики, которое еще не получило объяснения. Содержания легких элементов в атмосферах звезд зависят от начальной скорости вращения, поэтому рассмотрены типичные скорости вращения молодых звезд на стадии Главной последовательности (ГП). Поскольку данные относительно содержаний легких элементов в звездах очень обширны, основной акцент в обзоре сделан на некоторых нерешенных проблемах. Содержание гелия He/H у ранних В-звезд ГП показывает увеличение с возрастом; в частности, для самых массивных В звезд с массами $M = 12 - 19 M_{\odot}$ величина He/H повышается к концу ГП более чем в два раза. Теоретические модели звезд с вращением не могут объяснить столь значительное повышение He/H. Для ранних В- и поздних О-звезд ГП, являющихся компонентами тесных двойных систем, величина He/H показывает резкий скачок в середине стадии ГП, представляющий загадку для теории. Аномальное содержание гелия (и лития) в атмосферах химически некулярированных звезд (типы He-s, He-w, HeMn, Ar и Am) объясняют на основе диффузии атомов в поверхностных слоях звезд, однако эта гипотеза пока не может объяснить всех особенностей химического состава таких звезд. Содержания лития, бериллия и бора у FGK-карликов показывают тренд с понижением эффективной температуры T_{eff} , а также провал на $T_{\text{eff}} \sim 6600$ K в Гиадах и других старых скоплениях. Оба эти явления относятся к числу нерешенных проблем. В случае лития особый интерес вызывают FGK-гиганты и сверхгиганты, богатые литием (у них $\log_{10}(\text{Li}) \geq 2$). Большинство их не находит объяснения в рамках стандартной теории звездной эволюции, поэтому привлекаются нестандартные гипотезы: нелавный синтез лития в звезде и захват звездой гигантской планеты с массой Юпитера и больше. Анализ содержаний углерода, азота и кислорода у ранних В- и поздних О-звезд ГП приводит к выводу о сверхионизации ионов C II, N II и O II в их атмосферах. Для ранних В-звезд ГП получено хорошее согласие между наблюдаемыми значениями отношения N/O и расчетами моделей вращающихся звезд. Получено количественное объяснение известной антикорреляции "азот-углерод" у FGK-гигантов и сверхгигантов: она отражает зависимость аномалий N и C от начальной скорости вращения V_0 . Однако те же модели вращающихся звезд, которые оказались успешными в случае C, N и O, не могут объяснить наблюдаемое повышение содержания гелия у ранних В-звезд ГП.

Ключевые слова: *звезды: химический состав: вращение звезд: звездная эволюция*

1. *Введение.* Первые восемь элементов периодической системы химических элементов - H, He, Li, Be, B, C, N и O - могут существенно менять свое наблюдаемое содержание в процессе звездной эволюции, начиная уже с первой, самой продолжительной стадии эволюции, когда в ядре звезды горит водород; это стадия Главной последовательности (ГП). Их нередко называют ключевыми элементами (key elements), имея в виду их ключевую роль в понимании эволюции звезд. Эти элементы интересны также тем, что их первичный синтез был осуществлен в Большом Взрыве и для первых трех элементов (H, He и Li) имеются наблюдательные данные о первичном содержании их изотопов, которые можно сравнивать с космологическими моделями.

Эти элементы перечислены в табл.1, где наряду с их атомным номером указан наиболее распространенный изотоп, потенциал ионизации E_{ion} и содержание $\log_e(EI)$ на Солнце [1]. Все содержания приведены по отношению к водороду, который, как известно, является самым распространенным элементом в наблюдаемой Вселенной. Величина $\log_e(EI)$ здесь дана в стандартной логарифмической шкале, где для водорода принято $\log_e(H) = 12.00$.

Следует отметить, что автором уже были опубликованы обзоры по гелию и литию, где были суммированы данные о наблюдаемых содержаниях He и Li (относительно H) в звездных атмосферах, а также рассмотрено их соответствие предсказаниям теории звездной эволюции [2,3].

Литературные данные, касающиеся наблюдаемых содержаний легких элементов из табл.1, а также их теоретической интерпретации, очень богаты в случае Li, C, N и O, менее многочисленны для He и Be и достаточно бедны для B. Однако в целом материал для обсуждения столь обширен, что

Таблица 1

СПИСОК ВОСЬМИ САМЫХ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ СОДЕРЖАНИЯ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА (Асплунд и др. [1])

Элемент	Атомный номер	Основной изотоп	E_{ion} , эВ	$\log_e(EI)$
H	1	^1H	13.60	12.00
He	2	^4He	24.59	10.99*
Li	3	^7Li	5.39	1.05
Be	4	^9Be	9.32	1.38
B	5	^{11}B	8.30	2.70
C	6	^{12}C	11.26	8.43
N	7	^{14}N	14.53	7.83
O	8	^{16}O	13.62	8.69

* Линии гелия в фотосферном спектре Солнца не наблюдаются; приведенное здесь содержание гелия соответствует среднему содержанию для близких молодых В-звезд [2].

его детальный анализ потребовал бы написания отдельной книги. Поэтому в настоящем обзоре основное внимание уделено только некоторым проблемам, которые представляют загадку для современной теории или, по крайней мере, еще не имеют общепринятого объяснения.

Отметим, что обсуждаемые ниже наблюдаемые содержания легких элементов были получены при отказе от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие), по крайней мере там, где отклонения от ЛТР играют существенную роль.

2. Первичное содержание легких элементов.

2.1. *Расчеты, выполненные на основе СМБВ.* Загадки возникают уже в самом начале, когда рассматриваются последствия Большого Взрыва. Примечательно, что все эти восемь элементов первоначально были синтезированы в Большом Взрыве. В табл.2 приводятся современные данные [4] о первичном (primordial) содержании их изотопов, основанные на Стандартной Модели Большого Взрыва (СМБВ). В третьем столбце таблицы эти данные представлены в виде содержаний $\log_{\epsilon}(E_i)$, редуцированных в стандартную логарифмическую шкалу.

Интересно, что, в отличие от ранних работ, где на основе СМБВ предсказывался синтез только пяти первых легких элементов (H, He, Li, Be и B), современные данные включают в первичный нуклеосинтез также C,

Таблица 2

ПЕРВИЧНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИЗОТОПОВ ВОСЬМИ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ. РАССЧИТАННОЕ НА ОСНОВЕ СМБВ [4]

Величина	Содержание	$\log_{\epsilon}(E_i)$	$\log_{\epsilon}(E_i)$ наблюдения
D/H	2.59×10^{-5}	7.41	7.403 ± 0.007 [5]
$^4\text{He}/\text{H}$	8.23×10^{-2}	10.92	10.932 ± 0.005 [6]
$^3\text{He}/\text{H}$	1.04×10^{-5}	7.02	7.04 ± 0.08 [7]
$^7\text{Li}/\text{H}$	5.24×10^{-10}	2.72	2.2 ± 0.1 [8,9]
$^6\text{Li}/\text{H}$	1.23×10^{-14}	-1.91	
$^9\text{Be}/\text{H}$	9.60×10^{-19}	-6.02	
$^{10}\text{B}/\text{H}$	3.00×10^{-21}	-8.52	
$^{11}\text{B}/\text{H}$	3.05×10^{-16}	-3.52	
$^{12}\text{C}/\text{H}$	5.34×10^{-16}	-3.27	
$^{13}\text{C}/\text{H}$	1.41×10^{-16}	-3.85	
$^{14}\text{C}/\text{H}$	1.62×10^{-21}	-8.79	
$^{14}\text{N}/\text{H}$	6.76×10^{-17}	-4.17	
$^{15}\text{N}/\text{H}$	2.25×10^{-20}	-7.65	
$^{16}\text{O}/\text{H}$	9.13×10^{-20}	-7.04	
CNO/H	7.43×10^{-16}	-3.13	

Н и О. И хотя общий выход этих трех элементов очень мал (в сумме $CNO/H \sim 7 \times 10^{-16}$), даже столь незначительное их содержание могло сыграть определенную роль в эволюции самых первых звезд.

Наибольший выход в Большом Взрыве имели водород, гелий и литий. Для изотопов этих трех элементов имеются наблюдательные данные об их первичном содержании; они представлены в последнем столбце табл.2. Здесь относительное содержание дейтерия D/H было получено из наблюдений межгалактических облаков нейтрального водорода, находящихся на пути излучения от квазаров с большим красным смещением; это явление известно как "damped Ly α systems" [5]. Первичное содержание изотопа ^4He было определено из наблюдений областей H II в старых карликовых галактиках с низкой металличностью [6]. Первичное содержание ^3He было оценено из наблюдений областей H I в нашей Галактике [7]. И только первичное содержание лития, точнее, содержание его наиболее распространенного изотопа ^7Li , было определено по звездам; это старые FGK-карлики гало Галактики [8,9].

Как видно из табл.2, наблюдаемые содержания изотопов водорода и гелия, т.е. дейтерия, ^4He и ^3He , очень хорошо согласуются с расчетами СМБВ. Совершенно иная ситуация имеет место для лития: наблюдаемое содержание $\log_{\epsilon}(^7\text{Li}) = 2.2$ оказалось на 0.5 меньше значения 2.7, предсказанного теорией. Таким образом, данные о первичном содержании лития, полученные из наблюдений старых звезд гало Галактики, требуют отдельного рассмотрения.

2.2. Литий в старых звездах галактического гало. Первые наблюдения лития в спектрах старых FGK-карликов гало Галактики привели к открытию интересного факта: оказалось, что эти звезды, имеющие низкую металличность $[Fe/H] < -1$, демонстрируют удивительное постоянство содержания лития. Этот феномен, т.е. постоянство величины $\log_{\epsilon}(\text{Li})$ в области $[Fe/H]$ между -1 и -3, стали называть "литиевым плато" или "плато Спит" ("Spite plateau") по имени двух французских астрономов, которые 35 лет назад первыми открыли это явление [10]. Первое изображение "литиевого плато" из их работы воспроизведено на рис.1, где содержания $\log_{\epsilon}(\text{Li})$ представлены как функция эффективной температуры T_{eff} . Здесь для "литиевого плато" была получена величина $\log_{\epsilon}(\text{Li}) = 2.05 \pm 0.15$; современное значение, как уже отмечалось, составляет $\log_{\epsilon}(\text{Li}) = 2.2$ [8,9].

Важно, что значение $\log_{\epsilon}(\text{Li}) = 2.2$ на 0.5 меньше величины 2.7, предсказанной СМБВ. Это расхождение известно уже давно, и все попытки устранить его путем усовершенствования СМБВ ни к чему не привели. В частности, недавно Кибурт и др. [11], используя в расчетах современные значения скоростей ядерных реакций, получили первичные содержания

${}^7\text{Li}/\text{H} = 4.648 \times 10^{-10}$ и ${}^6\text{Li}/\text{H} = 1.288 \times 10^{-14}$, чему в стандартной шкале соответствуют значения $\log \epsilon({}^7\text{Li}) = 2.67$ и $\log \epsilon({}^6\text{Li}) = -1.89$; эти значения практически совпадают с данными табл.2. Таким образом, расхождение ~ 0.5 dex между теорией и наблюдениями относительно первичного содержания ${}^7\text{Li}$ сохраняется.

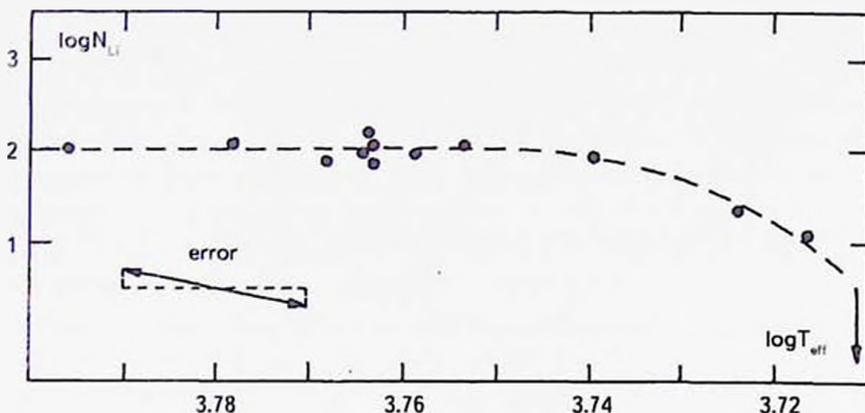


Рис.1. Первое изображение "литиевого плато" в статье Спит и Спит [10].

По мере накопления новых данных о содержании лития в атмосферах старых FGK-карликов галактического гало представление о "литиевом плато" претерпело значительные изменения. Современное распределение величины $\log \epsilon(\text{Li})$ по T_{eff} и $[\text{Fe}/\text{H}]$ для таких звезд представлено на рис.2 (Любимков [3], по данным [12]). Основное изменение по сравнению с рис.1 - "замороженная" горизонтальная линия на $\log \epsilon(\text{Li}) \sim 2$ стала "таять", как бы проливаясь каплями вниз (стрелки вниз указывают, что для содержания Li удалось оценить только верхний предел). Здесь около десятка звезд показывают содержание лития $\log \epsilon(\text{Li}) \leq 1.5$.

Следует отметить, что в недавней работе Спит и др. [9] на примере большой выборки звезд было показано, что в достаточно ограниченной области металличности $-2.8 < [\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$, звезды, как и на рис.1, по-прежнему группируются около "литиевого плато" со значением $\log \epsilon(\text{Li}) = 2.2$.

Несмотря на неоднократные попытки решить проблему относительно содержания Li в старых звездах гало Галактики, по-прежнему остаются загадкой для теории два важных вопроса:

- 1) почему существует несоответствие 0.5 dex между наблюдаемым содержанием лития и предсказанным на основе СМБВ первичным содержанием?
- 2) почему заметная часть карликов гало показывает содержание лития существенно ниже "литиевого плато"?

Пока не будут получены уверенные ответы на эти вопросы, проблему

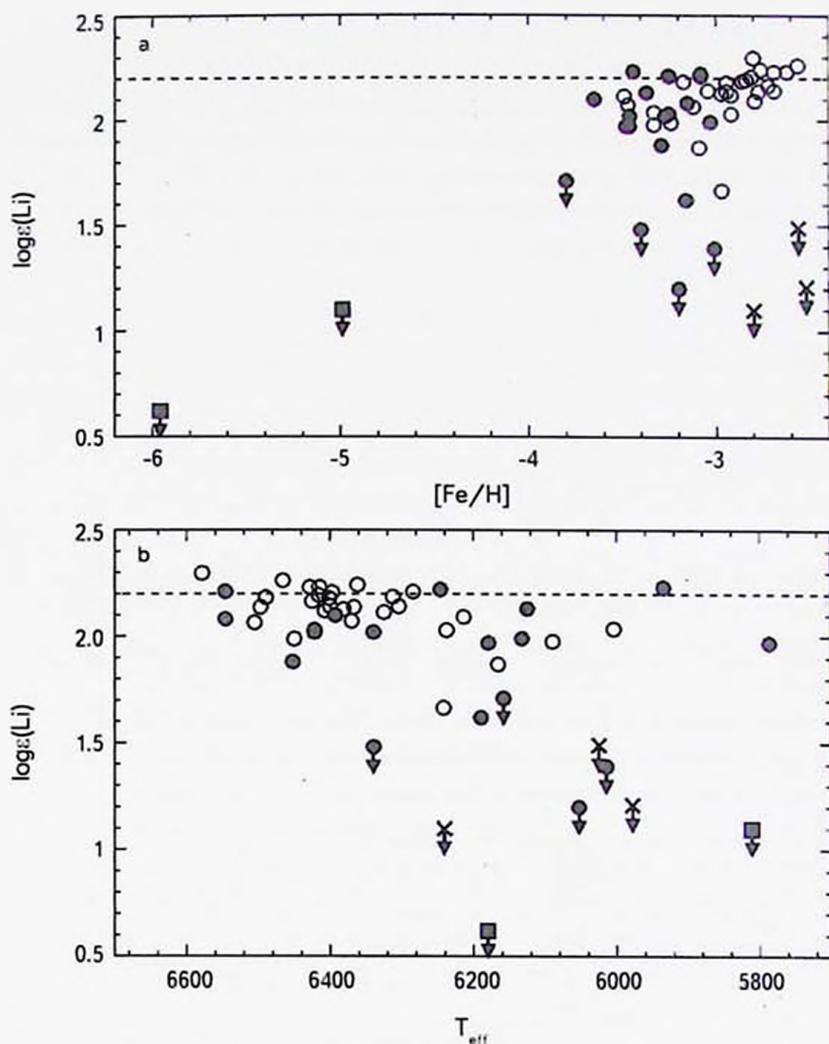


Рис.2. Современное распределение содержания Li для звезд гало по а) индексу металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ и б) эффективной температуре T_{eff} [3]. Значки со стрелками вниз соответствуют верхним пределам значений $\log \epsilon(\text{Li})$. Штриховая линия соответствует содержанию $\log \epsilon(\text{Li}) = 2.2$.

лития для старых звезд гало нельзя считать решенной.

3. *Скорости вращения молодых звезд.* От старых звезд гало Галактики перейдем к рассмотрению молодых звезд тонкого диска. Эволюция таких звезд, в том числе эволюция содержаний легких элементов в их атмосферах, зависит не только от массы звезды M , но также от начальной скорости вращения V_0 . Важная роль вращения стала понятной, когда от расчетов

традиционных звездных моделей без вращения был совершен переход к моделям вращающихся звезд [13]. Вследствие вращения в звезде возникает перемешивание, которое может привести к изменению содержания ряда химических элементов на ее поверхности. Расчеты показали, что эффект тем заметнее, чем больше масса M и скорость вращения V_0 .

Влияние перемешивания, индуцированного вращением, для звезд с массами $M > 2M_{\odot}$ проявляется уже на стадии ГП. Для таких звезд основную роль играют реакции CNO-цикла в ядре звезды, и здесь перемешивание вследствие вращения проявляет себя с двух сторон. С одной стороны, из недр звезды на поверхность выносятся продукты CNO-цикла, вследствие чего в атмосфере звезды увеличиваются содержания He и N и уменьшается содержание C. С другой стороны, с поверхности звезды в более глубокие и более горячие слои переносятся атомы Li, Be и B, где они выгорают в реакции (p, α), в результате чего содержания Li, Be и B в атмосфере звезды понижаются.

Рассматриваемые ниже звезды имеют массы M в диапазоне от 1 до $40M_{\odot}$ (здесь M_{\odot} - масса Солнца). Эволюционные расчеты показывают, что звезды с массами $M \geq 20M_{\odot}$ на начальной ГП (то есть на ZAMS = Zero Age Main Sequence) являются O-звездами, а звезды с $M \approx 4-19M_{\odot}$ на ZAMS соответствуют ранним B-звездам. Звезды с $M = 2-3M_{\odot}$ на ZAMS являются поздними B- и A-звездами, а объекты с $M = 1-2M_{\odot}$ - F- и G-карликами. Поскольку начальная скорость вращения V_0 играет важную роль в дальнейшем обсуждении, возникает вопрос: какие реальные скорости вращения наблюдаются у таких звезд в начале стадии ГП?

Следует отметить, что скорость вращения в течение стадии ГП, согласно расчетам моделей вращающихся звезд, должна уменьшаться. Например, из расчетов [14] следует, что скорость вращения к концу ГП может понизиться на 10-20% и даже до 100%; конкретная величина зависит от V_0 и M . Однако радикальное понижение скорости вращения происходит позже, когда звезда покидает ГП и переходит в стадию холодного гиганта или сверхгиганта. Поэтому в качестве первого приближения можно принять, что изменения скорости вращения на ГП незначительны; тогда поставленный выше вопрос можно сформулировать в более общем виде: какие скорости вращения наблюдаются у звезд на стадии ГП?

Как известно, из наблюдений находится величина $V \sin i$, проекция скорости вращения на экваторе V на луч зрения. Заметим, что для перехода от $V \sin i$ к V следует принять во внимание, что среднее значение случайной величины $\sin i$ равно $\pi/4$ [15]. Современные данные, особенно для горячих звезд классов O и B, позволяют существенно пересмотреть представления о значениях $V \sin i$ и V у звезд на стадии ГП, имевшие место еще 30 лет назад (см., например, справочник Адлена [15]). Вкратце они сводятся к следующему.

Среди звезд классов O и B, как оказалось (в отличие от прежних представлений), велика доля звезд с относительно медленным вращением [16-18]. Действительно, большинство ранних B- и O-звезд, точнее около 70-80%, имели в начале эволюции на ГП небольшие скорости вращения $\sim 0-150$ км/с. При этом значительная их часть попадала в еще более узкий интервал $0-50$ км/с. Число тех же звезд с относительно высокими скоростями вращения, от 150 до $300-400$ км/с, было невелико: $\sim 20\%$ для ранних B-звезд с массами $M \approx 4-19 M_{\odot}$ и $\sim 30\%$ для поздних O-звезд с $M = 20-40 M_{\odot}$.

Более поздние B-звезды и A-звезды с массами M от 4 до $2.5 M_{\odot}$ показали бимодальное распределение с максимумами на 50 км/с и 260 км/с при полном интервале значений V от 0 до $300-400$ км/с [16]. Поздние A- и ранние F-звезды с массами M от 2.0 до $1.6 M_{\odot}$ показали унимодальное распределение скорости V с максимумом на ~ 150 км/с [19].

При дальнейшем понижении M наблюдается быстрое уменьшение V . Обнаружен резкий спад V от ~ 150 до 10 км/с для F-звезд с $M \approx 1.4 M_{\odot}$ (карлики подкласса F4). Отметим, что с этим явлением связывают известный "провал Li и Be" на $T_{\text{эф}} \sim 6600$ K в старых скоплениях, например, в Гиадах (см. раздел 5.1). Для менее массивных звезд с $M \leq 1 M_{\odot}$ на ГП характерны малые скорости вращения < 10 км/с. Напомним, что у Солнца, карлика G2V, скорость вращения на экваторе $V = 2$ км/с [15].

Эти особенности в распределении молодых звезд по скоростям вращения, как будет видно из дальнейшего, играют важную роль в интерпретации наблюдаемых содержаний легких элементов не только для звезд на стадии ГП, но и на последующей стадии AFG-сверхгигантов.

4. *Отношение "гелий/водород"*. Гелий, элемент номер два в периодической системе химических элементов, по своей распространенности в наблюдаемой Вселенной (в звездах и в газовых туманностях) является вторым элементом после водорода. Относительно гелия необходимо зафиксировать две важных величины. Во-первых, первичное (primordial) отношение "гелий/водород" (по числу атомов) составляет $\text{He}/\text{H} = 0.082$ (табл.2). Во-вторых, современное начальное содержание гелия для молодых B-звезд в окрестности Солнца в среднем равно $\text{He}/\text{H} = 0.098 \pm 0.003$ [2]. Обогащение межзвездной среды гелием примерно на 20% за время жизни Галактики, как показывают модели ее химической эволюции, произошло в основном за счет взрывов массивных сверхновых II типа.

Ниже обсуждаются данные о содержании наиболее обильного изотопа гелия ^3He . Вклад другого изотопа ^4He в содержание гелия очень мал; например, для Солнца $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.7 \times 10^{-4}$ [1].

4.1. *Обогащение гелием атмосфер ранних B-звезд ГП*. Линии

нейтрального гелия вследствие высокого потенциала ионизации этого элемента (табл.1) наблюдаются лишь в спектрах горячих звезд от O до ранних A. Особенно полные данные о содержании гелия получены для ранних B- звезд, где линии He I особенно сильны.

Как известно, на стадии ГП основным источником энергии звезд с массами $M > 2M_{\odot}$ является CNO-цикл. На этой стадии в ядре звезды горит водород, превращаясь в гелий, при этом отношение He/H в недрах звезды сильно увеличивается (к концу фазы ГП водород в ядре звезды полностью перерабатывается в гелий). Как оказалось, одновременно у ранних B-звезд ГП величина He/H может повышаться и в атмосфере. Свидетельства этого были получены автором еще 40 лет назад [20,21], однако тогда они оказались полной неожиданностью для теории. Позже стало понятно, что причиной наблюдаемого увеличения He/H на ГП может быть перемешивание, индуцированное вращением звезды и приводящее к выносу продуктов CNO-цикла (включая гелий) из звездных недр на поверхность.

Достаточно полные данные об обогащении атмосфер B-звезд ГП гелием были получены Любимковым, Ростопчиным и Ламбертом [22], где был выполнен не-ЛТР анализ содержания гелия для 102 ранних B-звезд ГП (две из них оказались химически пекулярными звездами типа "He-weak"). Массы 100 звезд, подвергнутых дальнейшему анализу, варьировались от 4 до $19M_{\odot}$, а их наблюдаемые скорости вращения $V \sin i$, найденные в [22] по тем же шести линиям He I, что и содержание гелия, менялись в диапазоне от 0 до 280 км/с. Анализ этих данных показал, что в течение стадии ГП наблюдается повышение He/H с возрастом звезд, причем этот эффект имеет тенденцию расти с массой M и скоростью вращения.

На рис.3 и 4, взятых из [22], представлена зависимость величины He/H от относительного возраста t/t_{MS} (здесь t - возраст и t_{MS} - время жизни звезды данной массы на ГП) для двух групп звезд с разными массами M : звезды с $M = 4 - 7M_{\odot}$ (рис.3) и более массивные звезды с $M = 12 - 19M_{\odot}$ (рис.4). Для первой группы повышение величины He/H в течение стадии ГП составляет в среднем 28%, а для второй группы обнаружено повышение He/H к концу ГП в среднем более чем в два раза. Особенно высокое содержание гелия He/H = 0.27 и 0.24 здесь показали два гиганта, HR 7446 и 7993, что связано, по-видимому, с их высокими скоростями вращения ($V \sin i = 270$ и 224 км/с, соответственно).

В целом рис.3 и 4 как будто согласуются с расчетами моделей вращающихся звезд. Теория предсказывает, что обогащение атмосфер звезд гелием в течение стадии ГП тем выше, чем больше масса звезды и ее скорость вращения. Однако если говорить о количественных оценках, то согласия с теорией нет.

Например, современные расчеты [14] предсказывают, что для модели с

$M = 15 M_{\odot}$ даже при начальной скорости вращения $V_0 = 500$ км/с (0.9 критической скорости) получается повышение He/H в атмосфере только на 28%, что не согласуется с наблюдаемым увеличением He/H в два раза для

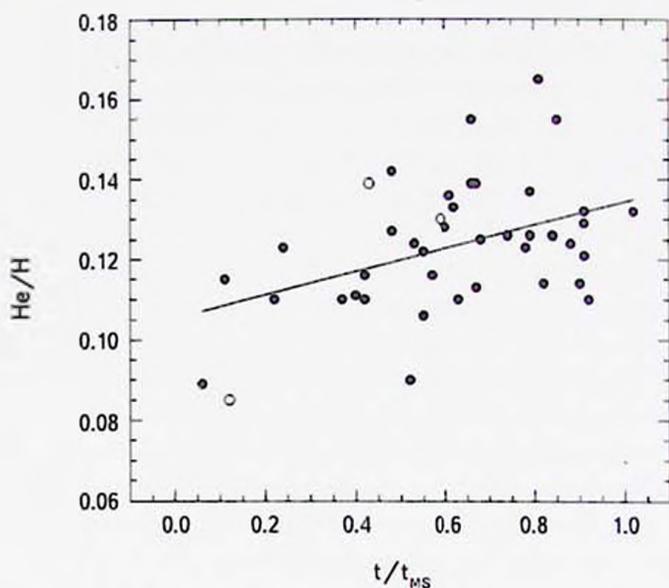


Рис.3. Зависимость He/H от относительного возраста для В-звезд III с массами $M = 4 - 7 M_{\odot}$.

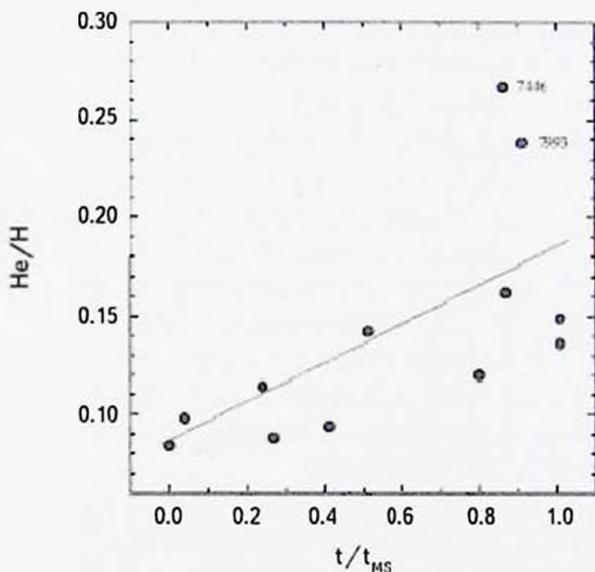


Рис.4. Зависимость He/H от относительного возраста для В-звезд III с массами $M = 12 - 19 M_{\odot}$.

звезд с $M = 12 - 19 M_{\odot}$ (рис.4).

Между тем, как указано в разделе 3, большинство (~80%) ранних В-звезд ГП с массами $M = 4 - 19 M_{\odot}$ имеет относительно небольшие скорости вращения 0-150 км/с. Важно, что данные работы [22] вполне соответствуют этому выводу; действительно, среди 100 исследованных там звезд 85 объектов (т.е. 85%) имеют $V \sin i \leq 150$ км/с, 15 звезд показывают $V \sin i > 150$ км/с и только 8 звезд - $V \sin i > 200$ км/с. Однако только при скоростях вращения 400-500 км/с, согласно расчетам [14], возможно заметное увеличение He/H в атмосфере звезды.

Итак, существуют серьезные разногласия между теорией и наблюдениями. Наблюдательные данные о повышении содержания гелия в атмосферах ранних В-звезд ГП позволяют предположить, что теоретические модели сильно недооценивают вынос гелия, основного продукта CNO-цикла, на поверхность звезды в результате перемешивания. Иначе говоря, можно предположить, что вынос гелия начинается при гораздо меньших скоростях вращения, чем получено в современных теоретических моделях.

Таким образом, объяснение наблюдаемого обогащения гелием атмосфер ранних В-звезд ГП остается для теории нерешенной проблемой.

4.2. Гелий в тесных двойных системах. Совершенно уникальное поведение He/H наблюдается у горячих звезд, являющихся компонентами тесных двойных систем. Свидетельством этого является рис.5, где представлена зависимость He/H от относительного возраста t/t_{MS} для компонентов пяти двойных В-звезд, исследованных в КраО [23] (заполненные кружки). Здесь было выполнено индивидуальное определение как базисных параметров T_{eff} и $\log g$, так и содержания гелия He/H отдельно для каждого компонента.

На рис.5 также показаны значения He/H для компонентов двух двойных O-звезд, взятые из [24,25] (открытые кружки). Все эти системы имеют орбитальные периоды от 2 до 14 дней и они еще не достигли фазы обмена массой между компонентами.

Как видно из рис.5, в отличие от постепенного, монотонного увеличения He/H, наблюдаемого у одиночных горячих звезд (рис.3 и 4), у компонентов тесных двойных систем в течение первой половины эволюции на ГП ($t/t_{MS} < 0.5$) сохраняется низкое (исходное) содержание гелия. Затем на коротком промежутке t/t_{MS} от 0.5 до 0.7 происходит резкое повышение He/H примерно в два раза, после которого величина He/H до конца стадии ГП остается на этом повышенном уровне.

Для современной теории такое скачкообразное повышение He/H в атмосфере в середине стадии ГП представляет загадку.

Необходимы расчеты перемешивания на ГП не только для одиночных

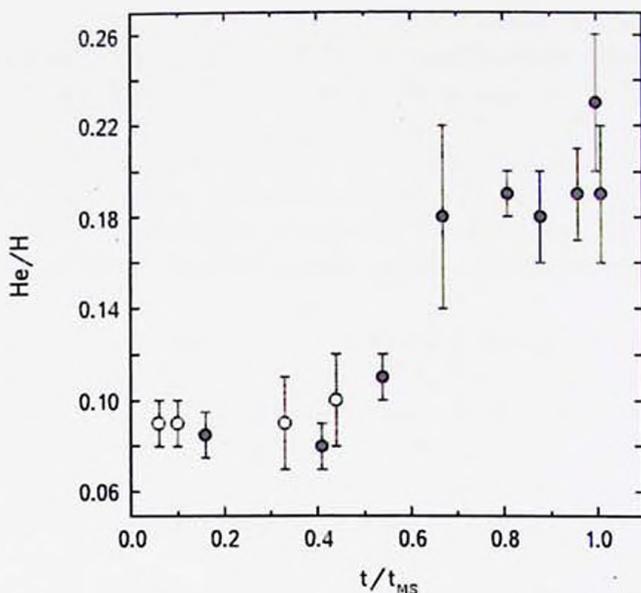


Рис.5. Зависимость He/H от относительного возраста для ранних В-звезд и О-звезд ГП, являющихся компонентами тесных двойных систем.

звезд, но и для компонентов тесных двойных систем, где наряду с вращением, по-видимому, следует учитывать приливное взаимодействие компонентов.

4.3. *Гелий в атмосферах химически некулярных звезд.* Особый интерес в течение уже нескольких десятилетий вызывает химически некулярные звезды (CP-звезды) спектральных типов А, В и F, у которых наблюдаются сильные отличия в содержаниях элементов от звезд с нормальным (солнечным) химическим составом. Содержание гелия у них тоже показывает аномалии. Список пяти типов CP-звезд представлен в табл.3, взятой из [2]; здесь для каждого типа указаны характерные интервалы значений T_{eff} и He/H, известные из литературы. По-видимому, все эти звезды находятся на стадии ГП.

В классе В наблюдаются два типа CP-звезд с разными аномалиями гелия: звезды "He-strong" (He-s или He-r = He-rich) с усиленными линиями гелия и звезды "He-weak" (He-w) с ослабленными линиями гелия. Для первого типа наблюдается повышенное содержание гелия $He/H \approx 0.3 - 1.0$, а для второго, напротив, пониженное содержание гелия $He/H \approx 0.005 - 0.05$. Интересно, что в области температур T_{eff} между 17000 и 25000 К на стадии ГП одновременно наблюдаются три разных типа В-звезд: He-s, He-w и нормальные В-звезды. Этот феномен остается одной из нерешенных проблем CP-звезд.

Очевидно, что объяснение аномального содержания гелия у CP-звезд следует искать совместно с объяснением других особенностей химического

Таблица 3

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ T_{eff} И СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ He/H, ХАРАКТЕРНЫЕ ДЛЯ ПЯТИ ТИПОВ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД [2]

Тип звезд	Область T_{eff} (приблизительно)	Диапазон значений 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

состава этих объектов, включая следующие:

1) Для магнитных Ap-звезд и звезд типов Am и HgMn хорошо известен тренд в поведении химических аномалий: избытки элементов в среднем растут с увеличением атомного номера Z (см., например, [26]). Если для легких элементов эти избытки обычно малы или даже имеют знак "минус", то с повышением Z они возрастают вплоть до 6-7 dex для самых тяжелых элементов [27].

2) Для CP-звезд, показывающих значительные магнитные поля (Ap, He-s и некоторые звезды He-w), характерно неоднородное распределение элементов по поверхности звезды. Пятна одних элементов, в том числе пятна гелия и лития, располагаются в области магнитных полюсов, пятна других элементов либо концентрируются к магнитному экватору, либо вовсе не показывают какой-либо системы в своих положениях.

3) Характерной особенностью CP-звезд является стратификация элементов, т.е. сильная зависимость их содержаний от глубины. При этом разные элементы могут показывать принципиально разное поведение: у одних обнаруживаются сильные избытки в высоких слоях атмосферы, а у других, напротив, в этих слоях наблюдается дефицит при нормальном или повышенном содержании в более глубоких слоях (это зависит не только от элемента, но и от конкретного типа CP-звезды).

В качестве основного объяснения перечисленных особенностей химического состава CP-звезд предлагается гипотеза диффузии. Это означает, что указанные особенности не связаны с термоядерными процессами в недрах звезды, а являются результатом диффузии атомов в ее поверхностных слоях, происходящей под действием двух противоположно направленных сил - гравитации и давления излучения. В магнитных CP-звездах добавляется еще действие магнитного поля.

Детальные расчеты диффузии для какой-нибудь одной конкретной CP -звезды, которые смогли бы дать количественное объяснение всем наблюдаемым явлениям, включая общий тренд избытков всех наблюдаемых элементов с ростом Z , карту распределения пятен различных элементов по поверхности звезды и распределение разных элементов по глубине, является трудной задачей. Полностью она пока не решена ни для одной CP -звезды.

5. *Литий, бериллий и бор.* Литий, бериллий и бор представляют единую группу элементов с точки зрения эволюции, так как их выгорание в звездах происходит в одном и том же процессе - в реакции (p, α) . Однако этот процесс начинается при разных температурах, $T \sim 2.5, 3.5$ и 5.0×10^6 К для Li, Be и B, соответственно. Следовательно для изменения наблюдаемого содержания Be и особенно B требуется более глубокое перемешивание, достигающее более горячих слоев звезды, чем для лития.

Отсюда следует заключение, что бериллий и бор являются гораздо менее чувствительными индикаторами эволюции, чем литий. Такой вывод подтверждают как наблюдения, так и теория. Например, расчеты [28] модели звезды с массой $12 M_{\odot}$ и начальной скоростью вращения 100 км/с показали, что к концу ГП изменение содержания лития в атмосфере составляет -3.0 dex, бериллия - -1.5 dex и бора - только -0.5 dex.

Имеются исключительно богатые публикации по литию, гораздо менее многочисленные по бериллию и сравнительно бедные по бору (для последних необходимы УФ наблюдения из космоса). Эти данные позволяют сделать некоторые интересные выводы.

5.1. *Особенности содержаний лития, бериллия и бора в атмосферах FGK-карликов диска Галактики.* Начальное содержание лития у звезд тонкого диска в окрестности Солнца составляет $\log(\text{Li}) = 3.2$ [3]. Эта величина на порядок превышает "реликтовое" значение $\log(\text{Li}) = 2.2$ ("литиевое плато"), найденное для старых карликов гало Галактики (см., раздел 2.2). Возникает вопрос: как мог появиться этот дополнительный литий в тонком диске?

Современные модели химической эволюции Галактики дают ответ на этот вопрос (см. [3]). Обогащение межзвездной среды литием (изотопом ${}^7\text{Li}$) происходило за счет истечения или выбросов вещества из звезд следующих типов: маломассивные красные гиганты (до 40%), звезды АВГ (Асимптотическая Ветвь Гигантов) и новые. Около 20% изотопа ${}^7\text{Li}$ (и 100% изотопа ${}^6\text{Li}$) дали галактические космические лучи, которые порождали реакции скалывания (spallation reactions) на более тяжелых и гораздо более обильных ядрах атомов C, N и O в межзвездной среде.

Во время эволюции на стадии ГП содержание лития в атмосферах

карликов спектральных типов F, G и K заметно изменяется относительно начального значения $\log\epsilon(\text{Li})=3.2$. Этот процесс зависит от эффективной температуры $T_{\text{эф}}$ (то есть фактически от массы M) и от возраста, а именно: содержание Li понижается с возрастом, причем тем быстрее, чем меньше $T_{\text{эф}}$ или M . В частности, для Солнца за время его жизни $t=4.5$ млрд лет, как показывают современные оценки [1,29,30], приведенные в табл.4, содержание лития в атмосфере понизилось примерно в 140 раз относительно начального значения $\log\epsilon(\text{Li})=3.2$.

Таблица 4

СОВРЕМЕННЫЕ ОЦЕНКИ СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ 3D-МОДЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

$\log\epsilon(\text{Li})$	Работа
1.05 ± 0.10	Асплунд и др. [1]
1.03 ± 0.03	Каффау и др. [29]
1.07 ± 0.02	Монро и др. [30]

Особенно хорошо зависимость $\log\epsilon(\text{Li})=3.2$ от $T_{\text{эф}}$ обнаруживается при исследовании звезд одного скопления, так как их возраст приблизительно одинаков. Помимо тренда в содержании Li с $T_{\text{эф}}$ у FGK-карликов старых скоплений, в частности, для скопления Гиалы (возраст ~ 700 млн лет) был обнаружен еще один загадочный феномен: глубокий провал ("Li dip") в распределении содержания Li вблизи $T_{\text{эф}} \approx 6600$ K [31].

На рис.6, взятом из [26], представлено распределение содержания Li для FGK-карликов Гиал, а также (для сравнения) для карликов более молодого скопления Плеяды, его возраст ~ 100 млн лет. Видно, что в Плеядах тренд в содержании Li с понижением $T_{\text{эф}}$ менее выражен, а литиевый провал вообще отсутствует.

Позже аналогичный провал ("Be dip") для звезд в Гиалах, но не столь глубокий, был обнаружен и для бериллия [32]. Интересно, что в более молодых рассеянных скоплениях Плеяды и α Per ($t \sim 100$ млн. лет) провал Be не обнаружен, в то время как в скоплении Coma Ber = Mel 111 ($t \sim 500$ млн. лет) провал Be, сравнимый по глубине с провалом в Гиалах, присутствует [33]. Отсюда следует, что провал Be, как и провал Li, появляется у звезд ГП с массами $M=1-2M_{\odot}$ в интервале возрастов от 100 до 500 млн лет.

Недавно Боесгард и др. [34] получили новые данные для звезд в Гиалах, которые показали, что наряду с провалом лития и бериллия наблюдается также провал бора ("B dip"). Здесь содержание бора для нескольких звезд

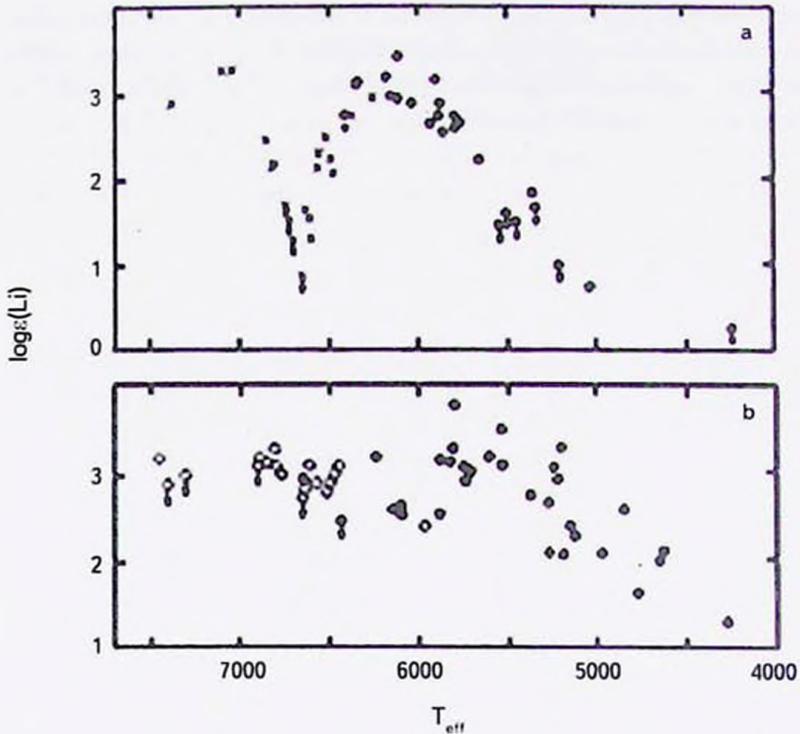


Рис.6. Распределение содержания лития по эффективной температуре для FGK-карликов скопления Гиалы (а) и Плеяды (b) [26].

было определено по УФ линии ВІ 2496.8 Å (наблюдения на HST). Глубина провала в этих трех случаях разная: более 2.0 dex для Li, около 1.0 dex для Be и 0.4 dex для B. Такое различие является вполне ожидаемым, так как из этих трех элементов, как уже отмечалось, наиболее чувствительным индикатором эволюции является литий, а менее чувствительными бериллий и особенно бор.

Провал в распределении содержаний Li, Be и B вблизи значения $T_{\text{eff}} = 6600$ К у звезд в Гиадах, возможно, связан с отмеченным выше фактом (см. раздел 3), что как раз на этом значении T_{eff} у F-карликов в Гиадах наблюдается резкий спад в скорости вращения V от ~ 150 до 10 км/с [34].

Изложенные выше проблемы можно было бы считать решенными, если бы какие-то модельные расчеты позволили воспроизвести наблюдаемое распределение содержаний Li, Be и B по T_{eff} , например, для звезд в Гиадах (как на рис.6). Однако такие расчеты пока не выполнены.

Таким образом, понижение содержания лития и бериллия в атмосферах

FGK-карликов (включая Солнце, где Li понижен в 140 раз), а также тренд с T_{eff} и провал в содержаниях Li , Be и B у звезд старых скоплений типа Гиад остается для теории нерешенной проблемой.

5.2. Литий в атмосферах холодных гигантов и сверхгигантов.
Литию посвящено огромное число публикаций. Столь богатый материал позволяет, в отличие от бериллия и бора, обсуждать результаты о содержании Li не только для холодных карликов ГП, но и для звезд на более продвинутой стадии эволюции - стадии FGK-гигантов и сверхгигантов.

Как известно, эта стадия сопровождается глубоким конвективным перемешиванием (ГКП), в результате которого происходят значительные изменения в наблюдаемых содержаниях некоторых легких элементов (напомним, что такие изменения могут начаться уже на стадии ГП, если имело место перемешивание вследствие вращения). В частности, ГКП приводит к повышению содержания азота и понижению содержания углерода, а содержание лития в атмосфере может уменьшиться до необнаружимо малой величины. При этом, как отмечено в [3], изменения в содержании Li в фазе ГКП начинаются раньше, чем в содержаниях C и N .

Давно известна антикорреляция между содержаниями азота и углерода у FGK-гигантов и сверхгигантов; она обсуждается в разделе 6.3. Что касается лития, то большинство таких звезд вообще не показывает Li в своих спектрах. Таким образом, лития в атмосферах таких звезд мало или он полностью выгорел. Современные модели звезд с вращением вполне объясняют этот факт.

Иллюстрацией к сказанному могут служить результаты, полученные в работах [35] и [36]. В первой из них было получено содержание лития для 55 FGK-сверхгигантов и гигантов, во второй работе число таких звезд было увеличено до 146.

На рис.7 представлено содержание лития $\log\epsilon(Li)$, полученное в двух упомянутых работах, в зависимости от массы M . Открытыми значками показаны данные [35], заполненными значками - данные [36]. Треугольники соответствуют верхнему пределу величины $\log\epsilon(Li)$ (то есть линия лития в спектрах таких звезд не наблюдается).

Эти эмпирические данные, а также данные теории показывают, что FGK-сверхгиганты и гиганты по содержанию лития разделяются на две группы с массами $M \leq 6M_{\odot}$ и $M > 6M_{\odot}$.

Для звезд с $M \leq 6M_{\odot}$ наблюдается большой разброс в содержаниях Li от начального значения $\log\epsilon(Li) = 3.2$ до необнаружимо малых значений $\log\epsilon(Li) < 1$. Такой большой разброс связан с очень высокой чувствительностью атмосферного содержания Li к начальной скорости вращения V_0 . Изменения могут начаться

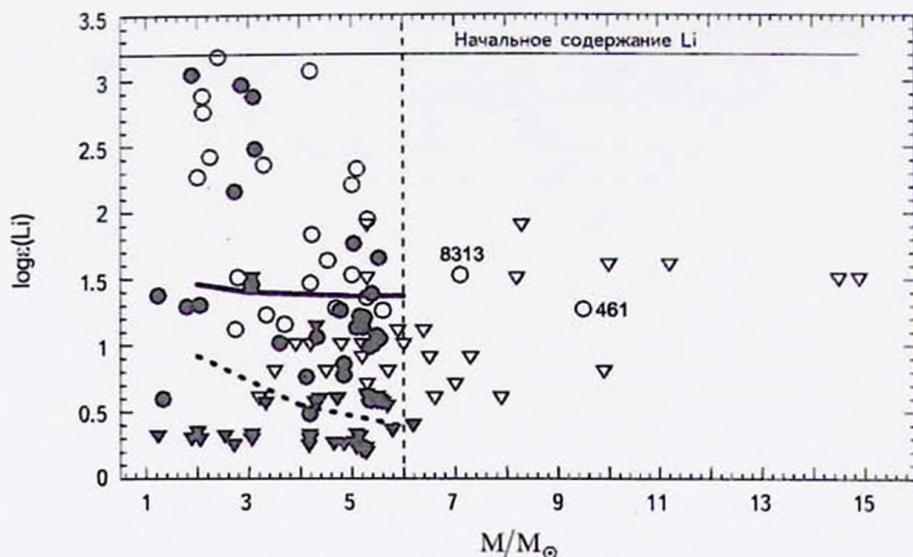


Рис.7. Содержание лития как функция массы M для FGK-сверхгигантов и гигантов. Открытые значки соответствуют 55 звездам из [35], заполненные значки - дополнительной 91 звезде из [36]. Треугольники - верхний предел $\log\epsilon(\text{Li})$. Сплошная и штриховая линии - результаты расчетов при $V_0 = 0$ и 50 км/с, соответственно.

уже к концу стадии ГП даже при небольших значениях $V_0 \sim 50$ км/с. Как показывают расчеты, при $V_0 = 100$ км/с содержание Li в конце ГП падает на 3-4 dex, т.е. становится необнаружимым (при этом содержания C и N в атмосфере практически не меняются). Изменения в содержании Li на стадии FGK-гиганта/сверхгиганта к концу фазы ГКП даже при $V_0 = 0$ и 50 км/с достаточно велики (см. рис.7, сплошная и штриховая линии, соответственно).

Для звезд с $M > 6M_\odot$ ситуация проще: здесь наблюдаются только низкие содержания Li (рис.7); в большинстве случаев линия Li в спектре совсем отсутствует. Напомним, что большинство (~80%) таких сравнительно массивных звезд имеет на стадии ГП скорости вращения менее 150 км/с (см. раздел 2). К концу ГП, согласно расчетам звездных моделей, при $V_0 \approx 50 - 100$ км/с в атмосферах таких звезд весь литий должен практически исчезнуть. Более того, даже при $V_0 = 0$ км/с у таких звезд вскоре после выхода из стадии ГП происходит резкое падение содержания Li [35]. Таким образом, у всех звезд с $M > 6M_\odot$ еще до их прихода в фазу красного гиганта/сверхгиганта практически весь литий должен выгореть. Из рис.7 видно, что две звезды этой группы, сверхгиганты HR 461 (K0 Ia) и HR 8313 (G5 Ib), у которых детектирован литий на уровне $\log\epsilon(\text{Li}) \sim 1.5$, находятся в противоречии с теорией.

Итак, современные теоретические модели с вращением вполне объясняют отсутствие лития в атмосферах большинства FGK-гигантов и сверхгигантов. Они могут объяснить содержания лития $\log \epsilon(\text{Li}) \approx 1-2$ для звезд с массами $M \leq 6M_{\odot}$. Однако в той же группе $M \leq 6M_{\odot}$ наблюдаются звезды, богатые литием, с содержаниями $\log \epsilon(\text{Li}) \geq 2$; в большинстве случаев они представляют загадку для теории. В группе $M > 6M_{\odot}$, как отмечено выше, противоречит теории детектируемый литий у холодных сверхгигантов HR 461 и HR 8313.

5.3. Загадка гигантов, богатых и сверхбогатых литием. Гиганты и сверхгиганты, богатые литием (у них $\log \epsilon(\text{Li}) \geq 2$), привлекают повышенный интерес, так как в своем большинстве они не находят объяснения в рамках стандартной теории эволюции звезд. Такие объекты составляют очень малую часть всех FGK-гигантов и сверхгигантов - по разным данным от 1 до 3%. Тот факт, что таких звезд мало, может свидетельствовать либо об очень краткой продолжительности этой фазы эволюции, либо о необычном сценарии их происхождения.

Следуя наметившейся в литературе тенденции, можно разделить такие звезды на два подтипа - гиганты, просто богатые литием ("Li-rich giants") и гиганты, сверхбогатые литием ("super Li-rich giants"). Принципиальное различие в содержаниях Li между этими двумя группами состоит в том, что для гигантов "Li-rich" величина $\log \epsilon(\text{Li})$ не превышает начального значения $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.1$, в то время как у гигантов "super Li-rich", показывающих содержания $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.5-4.3$, это значение существенно превышено. Установлено, что гиганты и сверхгиганты обоих типов имеют массы $M < 6M_{\odot}$. Такой вывод был получен в [35] на основе анализа всех доступных литературных данных.

Какая-то часть гигантов типа "Li-rich", как показывают модели вращающихся звезд, может быть потомками В-звезд ГП с небольшими начальными скоростями вращения 0-50 км/с (при условии, что эти звезды после завершения стадии ГП еще не прошли фазу ГКП). Остальные гиганты типа "Li-rich" и все гиганты типа "super Li-rich" совершенно необъяснимы в рамках стандартной теории звездной эволюции. Следует отметить, что многие из этих звезд уже прошли фазу ГКП, на что указывает низкое отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в их атмосферах (см. [3]); в этом случае весь литий в их атмосферах должен был бы выгореть.

В объяснении звезд, богатых литием, конкурируют две гипотезы. Первая из них - это нелавный синтез лития после ГКП в результате механизма Кэмерона-Фаулера [37]. Он включает следующие реакции: $^3\text{He} + \alpha \rightarrow ^7\text{Be} + \gamma$; $^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$, т.е. из ^3He через ^7Be синтезируются атомы ^7Li . В механизме Кэмерона-Фаулера важную роль должна играть конвекция, которая

способствует быстрому выносу ${}^7\text{Be}$ в более холодные слои атмосферы. В отличие от звезд АВГ с массами $M \approx 4 - 6 M_{\odot}$, где для выноса ${}^7\text{Be}$ в верхние слои достаточно обычной конвекции, в случае гигантов с $M \approx 1 - 2 M_{\odot}$, принадлежащих ВКГ (Ветвь Красных Гигантов), требуется дополнительное перемешивание (extra mixing).

Вторая гипотеза - это захват звездой планеты-гиганта с массой Юпитера или больше. Эта гипотеза в последние годы обсуждается все более активно; это объясняется тем, что быстро растущее число вновь открытых экзопланет подтверждает, что существование планетных систем около холодных гигантов - достаточно распространенное явление. Кроме того, как показали расчеты, в формирующихся планетных системах имеет место миграция планет, в результате которой какая-то планета может быть захвачена звездой.

Интересно, что такой захват может: 1) включить упомянутый механизм Кэмерона-Фаулера и 2) заметно повысить скорость вращения звезды (у некоторых гигантов типа "Li-rich" действительно наблюдаются аномально высокие скорости вращения, до ~ 100 км/с, совершенно нетипичные для FGK-гигантов).

Гипотеза захвата звездой планеты-гиганта продолжает активно разрабатываться. В частности, недавно в работе [38] были рассчитаны последствия падения на красный гигант планеты с массой до 15 масс Юпитера; оказалось, что содержание лития на поверхности звезды может повыситься до величины $\log_e(\text{Li}) \approx 2.2$ (без учета эффекта extra mixing). Поскольку этого явно недостаточно для объяснения содержания Li у большинства гигантов "Li-rich", в расчетах следует учитывать действие механизма Кэмерона-Фаулера вместе с extra mixing.

6. *Углерод, азот и кислород.* Эти три элемента участвуют в CNO-цикле, который на стадии ГП является основным источником энергии у звезд с массами $M > 2 M_{\odot}$. Изменения в содержаниях C, N и O у звезд, находящихся на разных стадиях эволюции, уже не одно десятилетие привлекают повышенный интерес исследователей. Линии этих трех элементов наблюдаются в широком диапазоне спектральных типов от O до M. В частности, в спектрах горячих звезд видны линии C II, N II и O II. Максимальной интенсивности они достигают в спектрах ранних В-звезд.

6.1. *C, N и O в атмосферах ранних В- и поздних O-звезд.* Длительное время для ранних В-звезд ГП разные авторы получали по линиям C II, N II и O II пониженные содержания C, N и O (относительно Солнца). Постепенно это разногласие удалось почти ликвидировать, благодаря: 1) более точным оценкам содержаний C, N и O для В-звезд ГП и 2) уточнению содержаний C, N и O для Солнца на основе нестационарных

гидростатических 3D-моделей солнечной атмосферы. Тем не менее, для углерода значимое различие осталось.

Исследования последних лет показали, что молодые звезды в окрестности Солнца имеют в среднем такую же металличность, как и Солнце; это было показано для содержаний N, O, Mg, Si, Fe, Cr и Ti. Поэтому дефицит углерода у ранних В-звезд вряд ли можно признать реальным. Скорее можно предположить, что имеют место какие-то дефекты в расчетах линий C II.

Вычисления линий C II, N II и O II для ранних В-, а также О-звезд основаны на стандартных плоско-параллельных моделях звездных атмосфер. Их адекватность вызывает сомнения, так как они: 1) не могут объяснить наблюдаемое рентгеновское излучение от таких звезд, 2) сильно занижают УФ поток в области $\lambda < 912 \text{ \AA}$ (континуум H I) и особенно в области $\lambda < 504 \text{ \AA}$ (континуум He I); но именно это УФ излучение контролирует фотоионизацию ионов C II, N II и O II. Подтверждением служат УФ наблюдения двух ранних В-звезд, β CMa (B1 II-III) и ϵ CMa (B2 II), с помощью спутника EUVE. Наблюдаемый поток оказался больше теоретического на два порядка при $\lambda < 504 \text{ \AA}$ и в несколько раз при $\lambda < 912 \text{ \AA}$.

В работе [39] сделан вывод, что в атмосферах ранних В- и поздних О-звезд, по-видимому, имеет место сверхионизация ионов C II, N II и O II, которая не учитывается в обычных расчетах. Она становится заметной при температурах $T_{\text{eff}} > 18500 \text{ K}$ в случае линий C II и при $T_{\text{eff}} > 26000 \text{ K}$ в случае линий N II и O II. Пренебрежение этим эффектом для столь горячих звезд может занижать содержания C, N и O на 0.2 dex. Если при определении содержания углерода рассматривать только В-звезды с температурами $T_{\text{eff}} < 18500 \text{ K}$, то отмеченный выше дефицит углерода относительно Солнца исчезает.

В некоторых современных работах авторы решают проблему сверхионизации у В-звезд ГП неявным образом, фактически учитывая это явление при определении базисных параметров таких звезд - эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести $\log g$. В отличие от традиционной методики определения T_{eff} и $\log g$, которая основана на применении фотометрических индексов и бальмеровских линий, эти авторы базируются исключительно на рассмотрении ионизационного баланса для линий некоторых легких элементов, в частности, линий C II-III, O I-II и Ne I-II (см., например, [40]). Это означает, что для каждой звезды подбираются такие значения T_{eff} и $\log g$, для которых содержания данного элемента, найденные для двух соседних стаций ионизации, должны совпадать. Параметры T_{eff} и $\log g$, определенные таким методом, оказались систематически завышенными: T_{eff} до 2300 K и $\log g$ до 0.5 dex. За счет такого увеличения T_{eff} и $\log g$ повышается степень ионизации в расчетах и тем самым искусственно снимается проблема сверхионизации. Однако возникает другая проблема: систематическое расхождение

между значениями T_{eff} и $\log g$, полученными принципиально разными методами.

Чтобы решить проблему сверхионизации для горячих звезд, при исследовании содержаний С, N и O в их атмосферах следует перейти к применению более реалистичных моделей атмосфер: это подразумевает переход от плоскопараллельных моделей к сферическим моделям, а также учет звездного ветра и магнитного поля, которое наблюдается у ряда O- и B-звезд. В этой связи интересно отметить, что у двух упомянутых выше B-гигантов с сильным избытком УФ излучения, β CMa и ϵ CMa, недавно было обнаружено магнитное поле ~ 100 Гс [41].

6.2. *Отношение N/O в атмосферах ранних B-звезд.* Из предыдущего раздела следует вывод: в случае ранних B-звезд ГП из трех отношений - N/C, C/O и N/O, которые рассматриваются в качестве индикаторов звездной эволюции, с доверием следует относиться только к величине N/O, так как она оказалась нечувствительной к сверхионизации ионов N II и O II. Величины N/C и C/O, куда входит углерод, напротив, для звезд с эффективными температурами $T_{\text{eff}} > 18500$ К. могут содержать систематические ошибки из-за неучтенной сверхионизации ионов C II.

В работе [42] для 46 ранних звезд ГП была определена величина $[N/O]$ - отношение N/O, нормированное к исходному значению (в логарифмической шкале). На рис.8 показана найденная в этой работе зависимость $[N/O]$ от массы M для тех звезд, которые находятся в конце стадии ГП (их относительный возраст $t/t_{\text{ГП}} = 0.70 - 1.02$). Здесь же сплошными линиями представлены результаты модельных расчетов [14] для трех значений начальной угловой скорости вращения Ω относительно критической скорости Ω_{crit} . Рядом с каждой кривой, наряду с относительной угловой скоростью $\Omega/\Omega_{\text{crit}}$, указано соответствующее значение линейной скорости V_0 (это среднее значение, так как V_0 зависит от массы M).

Из рис.8 видно, что большинство звезд в конце ГП показывает сравнительно низкие значения $[N/O] \leq 0.3$ и им с точки зрения теории соответствуют модели с $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0$ и 0.3 (или V_0 от 0 до 130 км/с). Для четырех звезд (18%) с наиболее высокими значениями $[N/O] = 0.40 - 0.77$ (их номера HR указаны на рис.8) хорошо подходят модели с $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.5$ и 0.7 ($V_0 \approx 220 - 300$ км/с). Эти результаты хорошо согласуются с приведенными в разделе 3 данными о скоростях вращения ранних B-звезд ГП, а именно: около 80% таких звезд имеют скорости 0-150 км/с и только 20% - скорости 200-400 км/с (18% на рис.8).

Это исследование отношения N/O в ранних B-звездах ГП показывает, что для элементов С, N и O, по крайней мере в данном конкретном случае, имеет место согласие между результатами наблюдений и предсказаниями

теории. В следующем разделе будет представлен другой пример согласия между наблюдениями и теорией относительно содержаний С, N и O.

6.3. Анतिकорреляция "азот-углерод" для AFG-сверхгигантов.

Как уже отмечалось, после завершения стадии ГП ранние В-звезды быстро переходят в стадию А-, F-, G- и K-сверхгигантов и гигантов. При достижении

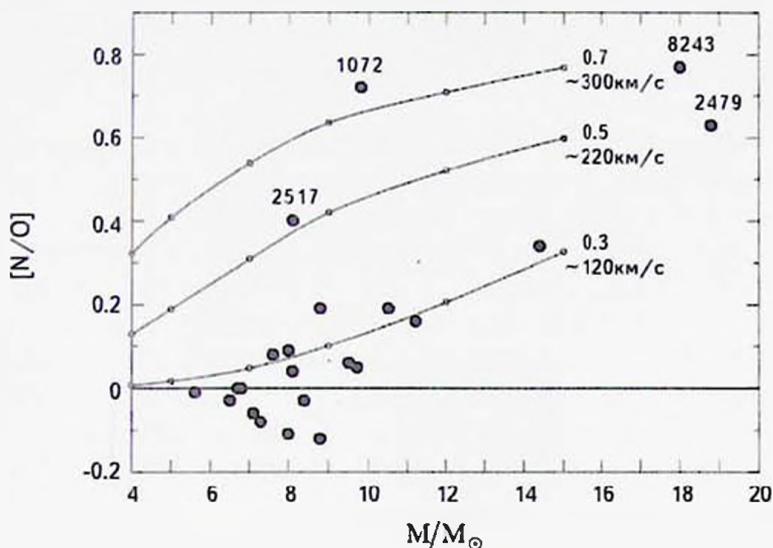


Рис.8. Зависимость величины $[N/O]$ от массы M для В-звезд, находящихся в конце стадии ГП ($t/t_{\text{ГП}} = 0.70-1.02$) [42]. Сплошные линии соответствуют теоретическим зависимостям, основанным на модельных расчетах [14] для трех значений начальной угловой скорости вращения $\Omega/\Omega_{\text{crit}} = 0.3, 0.5$ и 0.7 .

температуры $T_{\text{eff}} \leq 5900$ К в таких звездах начинается глубокое конвективное перемешивание (ГКП), которое приводит к дальнейшему усилению аномалий С, N и O на поверхности, появившихся во время стадии ГП, в частности, дефицита С и избытка N. Отметим, что для этих относительно холодных звезд содержания С, N и O определяются по линиям C I, N I и O I.

Уже более 30 лет известна антикорреляция "азот-углерод" для А-, F- и G-сверхгигантов (см., например, [43]). Качественно такая антикорреляция была понятна: во время CNO-цикла внутри звезды атомы ^{12}C перерабатываются в ^{14}N , поэтому дефицит углерода должен сопровождаться избытком азота. Однако количественная интерпретация этой зависимости была невозможна, пока теоретики от моделей звезд без вращения не перешли к расчетам моделей вращающихся звезд.

На рис.9 из работы [44] наблюдаемая антикорреляция "азот-углерод" для AFG-сверхгигантов сравнивается с расчетами [28] поверхностных содержаний

N и C для модели с массой $M = 12 M_{\odot}$ при разных начальных скоростях вращения V_0 (отметим, что соотношение между N и C в моделях слабо зависит от массы M). На верхней панели расчеты соответствуют концу стадии ГП, на нижней - окончанию ГКП в стадии AFG-сверхгигантов. Значения скорости V_0 указаны рядом с узловыми точками.

Из рис.9 следует важный вывод: *антикорреляция "азот-углерод" отражает главным образом зависимость аномалий N и C от начальной скорости вращения V_0* . Этот факт можно было установить только с помощью расчетов моделей вращающихся звезд.

На рис.9 обращает на себя внимание скопление точек в выделенном сером квадрате. Имеются два возможных объяснения этого "облака": 1) либо это звезды после ГП с начальными скоростями $V_0 \sim 200 - 250$ км/с (верхняя панель), 2) либо это сверхгиганты и гиганты, близкие к окончанию ГКП, имевшие $V_0 \sim 0 - 150$ км/с (нижняя панель). Если вспомнить, что 80% звезд таких масс ($M \approx 5 - 20 M_{\odot}$) в начале своей эволюции имели скорости вращения < 150 км/с (см. раздел 3), становится ясно, что подавляющее большинство звезд в указанном облаке - это сверхгиганты и гиганты в конце ГКП.

Рис.9 (наряду с рис.8 в предыдущем разделе) иллюстрирует несомненный успех теории в объяснении наблюдаемых содержаний C, N и O. В этой связи следует отметить, что многолетние расчеты моделей вращающихся звезд, по-видимому, были нацелены прежде всего на объяснение наблюдений именно C, N и O. Как видно из предыдущих разделов данного обзора, в отношении более легких элементов такое согласие между теорией и наблюдениями перелко отсутствует. В частности, как отмечалось выше, те же модельные расчеты, которые оказались успешными в случае C, N и O, не могут объяснить наблюдаемое повышение содержания гелия у ранних В-звезд ГП.

7. Заключение. В обзоре рассмотрены первые восемь элементов периодической системы химических элементов - H, He, Li, Be, B, C, N и O. Примечательно, что все эти элементы первоначально были синтезированы в Большом Взрыве. Приведены первичные содержания изотопов этих элементов, рассчитанные на основе СМБВ (Стандартная Модель Большого Взрыва). Для первичных содержаний изотопов водорода и гелия (дейтерий, ^3He и ^4He) имеет место отличное согласие между СМБВ и наблюдательными данными, однако в случае лития (изотоп ^7Li) между теорией и наблюдениями существует расхождение 0.5 dex. Этот факт получен из наблюдений старых звезд гало Галактики, для которых обнаружены две особенности, пока не нашедшие объяснения в теории: "литиевое плато" с содержанием лития $\log_{10}(\text{Li}) = 2.2$ (именно эта величина на 0.5 dex меньше предсказания СМБВ), а также существенное понижение этой величины для ряда звезд.

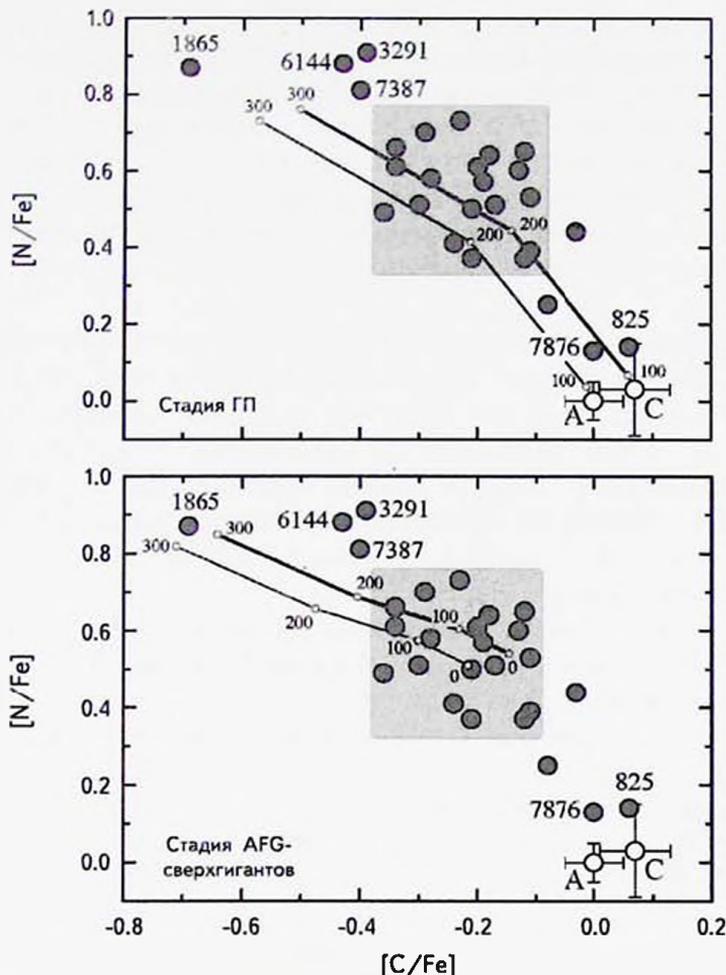


Рис.9. Наблюдаемая зависимость "азот-углерод" для AFG-сверхгигантов в сравнении с расчетами для модели $M = 12 M_{\odot}$ при начальных скоростях вращения от 0 до 300 км/с [44]. Точки А и С - солнечные содержания N и C в соответствии с данными [1] и [29].

Содержание легких элементов в атмосферах звезд зависит от начальной скорости вращения, поэтому рассмотрены типичные скорости вращения молодых звезд на стадии ГП. Отмечено, что, в отличие от традиционных представлений, современные данные для горячих звезд (классы В и О) указывают на большое число (около 80%) звезд с невысокими скоростями вращения ≤ 150 км/с; этот факт играет важную роль в интерпретации наблюдаемых содержаний легких элементов.

Учитывая обилие данных о содержаниях легких элементов в звездах, основной акцент сделан на некоторых нерешенных проблемах, включая

следующие:

Гелий. Содержание гелия He/H у ранних В-звезд ГП показывает увеличение с возрастом, причем для самых массивных звезд с массами $M = 12 - 19 M_{\odot}$ величина He/H повышается к концу ГП более чем в два раза. Теоретические модели звезд, в которых учитывается перемешивание, индуцированное вращением, не могут объяснить столь значительное повышение He/H . Представляет загадку для теории скачкообразное повышение величины He/H в середине стадии ГП у В- и О-звезд, являющихся компонентами тесных двойных систем.

Аномальное содержание гелия (а также лития) в атмосферах химически peculiарных звезд ГП, включая магнитные звезды (типы He-s, He-w, HgMn, Am и магнитные Ap), пытаются объяснить на основе диффузии атомов в поверхностных слоях. Подчеркнуто, что гипотеза диффузии должна одновременно объяснять и другие особенности химического состава таких звезд, а именно: общий тренд избытков элементов с ростом атомного номера Z , распределение пятен различных элементов на поверхности звезды и распределение разных элементов по глубине.

Литий, бериллий и бор. Выгорание этих элементов происходит в одной и той же реакции (p, α), но при разных температурах (соответственно, 2.5, 3.5 и 5×10^6 K), поэтому они совершенно по-разному проявляют себя как индикаторы звездной эволюции; это подтверждают как наблюдения, так и теория. Для FGK-карликов не получил объяснения тренд содержаний Li, Be и B с понижением $T_{\text{эф}}$ а также провал в распределении содержаний этих элементов на $T_{\text{эф}} \sim 6600$ K в Гиадах и других старых скоплениях. Особый интерес вызывают FGK-гиганты и сверхгиганты, богатые литием (у них $\log \epsilon(\text{Li}) \geq 2$). Большинство их не находит объяснения в рамках стандартной теории звездной эволюции, поэтому привлекаются нестандартные гипотезы: недавний синтез лития в звезде и захват звездой гигантской планеты с массой Юпитера и больше.

Углерод, азот и кислород. Сделан вывод, что в случае ранних В- и поздних О-звезд ГП имеет место сверхионизация ионов C II, N II и O II, неучтенная в расчетах, основанных на стандартных моделях атмосфер. С другой стороны, для ранних В-звезд ГП получено хорошее согласие между наблюдаемыми значениями отношения N/O и расчетами моделей вращающихся звезд. В полном соответствии с наблюдаемыми скоростями вращения таких молодых звезд, величина N/O к концу стадии ГП показывает повышение на 0.4-0.8 dex лишь для небольшой части (~20%) звезд с достаточно высокими начальными скоростями вращения 200-400 км/с.

Получено количественное объяснение известной антикорреляции "азот-углерод" у AFG-гигантов и сверхгигантов: оно отражает зависимость аномалий

N и C от начальной скорости вращения V_0 . Отмечено, что те же расчеты моделей вращающихся звезд, которые оказались успешными в случае C, N и O, не могут объяснить наблюдаемое повышение содержания гелия у ранних В-звезд ГП.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН,
e-mail: lyub@crao.crimea.ru

REVIEWS

LIGHT CHEMICAL ELEMENTS IN STARS: MYSTERIES AND UNSOLVED PROBLEMS

L.S.LYUBIMKOV

First eight elements of the periodical system of chemical elements are considered: H, He, Li, Be, B, C, N and O. They are named key elements, considering their important role in stellar evolution. Remarkably that they all have been initially synthesized in the Big Bang. Primordial abundances of isotopes of these elements computed on the basis of SMBB (the Standard Model of Big Bang) are presented in the review. A good agreement between SMBB and the observed primordial abundances of the hydrogen and helium isotopes D, ^3He и ^4He is noted; but for lithium (the ^7Li isotope) the discrepancy ~ 0.5 dex takes place between SMBB and observations of old stars from the halo of the Galaxy that was not explained yet. The abundances of light elements in stellar atmospheres depend on the initial rotational velocity, so typical rotational velocities of young stars on the Main Sequence (MS) stage are discussed. Since data on the light element abundances in stars are very numerous, we put the accent mainly on some unsolved problems. The helium abundance He/H in early B-type MS stars shows an increment with the age; in particular, for the most massive B stars with masses $M = 12 - 19 M_{\odot}$ the He/H value increases more than two times by the MS end. Theoretical models of rotating stars cannot explain such a steep enhancement of He/H. For early B- and late O-type MS stars that are components of close binary systems the He/H value shows a sharp jump in the middle of the MS stage, which is a mystery for the theory. The anomalous helium (and lithium) abundance in atmospheres of chemically peculiar stars (He-s, He-w, HgMn, Ap and Am types) is explaining on the basis of atom diffusion in surface layers of stars, but this

hypothesis cannot explain so far all features in chemical abundances of such stars. The lithium, beryllium and boron abundances show a trend with decrease of effective temperature T_{eff} , as well as a dip at $T_{\text{eff}} \sim 6600$ K in the Hyades and other old clusters. Both these phenomena are unsolved problems. In the case of lithium the Li-rich FGK-giants and supergiants (with $\log \epsilon(\text{Li}) \geq 2$) are of special interest. Most of them cannot be explained by the standard theory of stellar evolution, so non-standard hypothesis are attracted: the recent lithium synthesis in a star and the engulfment by a star of a giant planet with the mass like Jupiter or greater. An analysis of the carbon, nitrogen and oxygen abundances for early B- and late O-type MS stars leads to the conclusion that there is an over-ionization of the C II, N II and O II ions in their atmospheres. For early B-type MS stars a good agreement is found between the observed values of the N/O ratio and the computed ones from models of rotating stars. A quantitative explanation of the known anti-correlation "nitrogen-carbon" for FGK-giants and supergiants is obtained; it reflects a dependence of the N and C anomalies on the initial rotational velocity V_0 . However, the same models of rotating stars, which seem to be successful in the case of C, N and O, cannot explain the observed helium enrichment in early B-type MS stars.

Key words: *stars: chemical composition: stellar rotation: stellar evolution*

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Asplund, N.Grevesse, A.J.Sauval et al.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **47**, 481, 2009.
2. *Л.С.Любимков*, Кинематика и Физика Небесных Тел, **26**, 32, 2010. (Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **26**, 169, 2010).
3. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **59**, 459, 2016. (Astrophysics, **59**, 411, 2016).
4. *A.Coc, S.Goriely, Y.Xu et al.*, Astrophys. J., **744**, 158, 2012.
5. *R.J.Cooke, M.Pettini, R.A.Jorgenson et al.*, Astrophys. J., **781**, id. 31, 2014.
6. *Y.I.Izotov, T.X.Thuan, N.G.Guseva*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **445**, 778, 2014.
7. *T.Bania, R.Rood, D.Balser*, Nature, **415**, 54, 2002.
8. *M.Spite, F.Spite, P.Bonifacio*, Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl., **22**, 9, 2012.
9. *M.Spite, F.Spite, E.Caffau et al.*, Astron. Astrophys., **582**, A74, 2015.
10. *F.Spite, M.Spite*, Astron. Astrophys., **115**, 357, 1982.
11. *R.H.Cybur, B.D.Fields, K.A.Olive et al.*, Modern Physics, **88**, id. 015004, 2016.
12. *P.Bonifacio, L.Sbordone, E.Caffau et al.*, Astron. Astrophys., **542**, A87, 2012.

13. *A.Maeder*, *Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*. Springer, Berlin, 2009.
14. *C.Georgy, S.Ekstrom, A.Granada et al.*, *Astron. Astrophys.*, **553**, A24, 2013.
15. *К.У.Аллен*, *Астрофизические величины* (3 изд.), М., Мир, 1977, (*Astrophysical Quantities* (3 ed.), London, Athlone Press, 1973).
16. *И.А.Аби, И.Левато, М.Гроссо*, *Astrophys. J.*, **573**, 359, 2002.
17. *S.Simon-Diaz, A.Herrero*, *Astron. Astrophys.*, **562**, A135, 2014.
18. *G.A.Bragança, S.Daflon, K.Cunha et al.*, *Astron. J.*, **144**, 130, 2012.
19. *J.Zorec, F.Royer*, *Astron. Astrophys.*, **537**, A120, 2012.
20. *Л.С.Любимков*, *Письма в Астрон. ж.*, **1**, 11, 29, 1975.
21. *Л.С.Любимков*, *Астрофизика*, **13**, 139, 1977, (*Astrophysics*, **13**, 71, 1977).
22. *L.S.Lyubimkov, S.I.Rostopchin, D.L.Lambert*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **351**, 745, 2004.
23. *L.S.Lyubimkov*, *Astrophys. Space Sci.*, **243**, 329, 1996.
24. *E.Sturm, K.P.Simon*, *Astron. Astrophys.*, **282**, 93, 1994.
25. *K.P.Simon, E.Sturm, A.Fiedle*, *Astron. Astrophys.*, **292**, 507, 1994.
26. *Л.С.Любимков*, *Химический состав звезд: метод и результаты анализа*. Одесса, Астропринт, 1995, (*Chemical Composition of Stars: Method and Results of Analysis*, Odessa, Astroprint, 1995).
27. *Л.С.Любимков*, *Известия Крым. Астрофиз. Obs.*, **110**, 6, 2014, (*Bull. Crimean Astrophys. Obs.*, **110**, 9, 2014).
28. *A.Heger, N.Langer*, *Astrophys. J.*, **544**, 1016, 2000.
29. *E.Caffau, H.-G.Ludwig, M.Steffen et al.*, *Solar. Phys.*, **268**, 255, 2011.
30. *T.W.R.Monroe, J.Meléndez, I.Ramirez et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **774**, L32, 2013.
31. *A.M.Boesgaard, M.Tripicco*, *Astrophys. J.*, **302**, L49, 1986.
32. *A.M.Boesgaard, J.R.King*, *Astrophys. J.*, **565**, 587, 2002.
33. *A.M.Boesgaard*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.*, **336**, 39, 2005.
34. *A.M.Boesgaard, M.G.Lum, C.P.Deliyannis et al.*, *Astrophys. J.*, **830**, id. 49, 2016.
35. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, B.M.Kaminsky et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **427**, 11, 2012.
36. *Л.С.Любимков, Д.В.Петров*, *Астрофизика*, **60**, 359, 2017, (*Astrophysics*, **60**, 333, 2017).
37. *A.G.W.Cameron, W.A.Fowler*, *Astrophys. J.*, **164**, 111, 1971.
38. *C.Aguilera-Gómez, J.Chanamé, M.H.Pinsonneault et al.*, *Astrophys. J.*, **829**, id. 127, 2016.
39. *Л.С.Любимков*, *Астрофизика*, **56**, 517, 2013, (*Astrophysics*, **56**, 472, 2013).
40. *M.F.Nieva, N.Przybilla*, *Astron. Astrophys.*, **539**, A143, 2012.
41. *L.Fossati, N.Castro, T.Morel et al.*, *Astron. Astrophys.*, **574**, A20, 2015.
42. *Л.С.Любимков*, *Астрофизика*, **59**, 519, 2016, (*Astrophysics*, **59**, 472, 2016).
43. *R.E.Luck, D.L.Lambert*, *Astrophys. J.*, **298**, 782, 1985.
44. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.A.Korotin et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **446**, 3447, 2015.

