

DOI: 10.54503/0571-7132-2022.65.4-515

ДЕВЯТЬ БЛИЗКИХ К-ГИГАНТОВ С ПЛАНЕТАМИ: ДЕТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Л.С.ЛЮБИМКОВ, Д.Б.ПОКЛАД, С.А.КОРОТИН

Поступила 11 августа 2022

Принята к печати 11 ноября 2022

Исследован химический состав 9-ти К-гигантов с планетами, расположенных в пределах 100 пк от Солнца. При этом использованы фундаментальные параметры звезд, найденные нами ранее; для гиганта μ Leo по линиям FeI переопределены индекс металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ и параметр микротурбулентности $V_t = 1.3$ км/с. Определено содержание 17-ти химических элементов от лития ($Z=3$) до гафния ($Z=72$). Анализ линий некоторых элементов выполнен при отказе от предположения ЛТР (локальное термодинамическое равновесие). По инфракрасным линиям молекулы CN найдено содержание азота и отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Низкие значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 8-18$ доказывают, что программные гиганты прошли глубокое конвективное перемешивание в фазе FDU (First Dredge-Up). При анализе полученных содержаний добавлены наши недавние данные для магнитных гигантов EK Eri и OU And, полученные по той же методике. Литий не был найден у 7 из 11-ти рассматриваемых гигантов. Отсутствие лития в атмосферах звезд, испытавших глубокое перемешивание в фазе FDU, соответствует предсказаниям теории. Однако у 4-х гигантов литий был нами обнаружен; ранее у 3 из них было найдено магнитное поле. Эти два явления, т.е. присутствие лития в атмосфере и наличие магнитного поля, неожиданные для post-FDU гигантов с точки зрения стандартной теории, находят объяснение в рамках единой гипотезы: захват звездой планеты с массой в несколько масс Юпитера. Для 11-ти рассмотренных гигантов мы нашли ярко выраженную корреляцию между величинами $[\text{N}/\text{C}]$ и $[\text{N}/\text{O}]$. Сравнение наблюдаемой зависимости с теоретической моделью, учитывающей вращение, показало, что теория не может объяснить высокие значения $[\text{N}/\text{C}] = 1.0-1.4$, полученные для большинства гигантов. По-видимому, здесь следует привлечь известную гипотезу дополнительного неконвективного перемешивания (extra mixing). Суммарное содержание C+N+O, которое, согласно теории, должно оставаться неизменным со времени формирования звезды, показало корреляцию с индексом металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. При этом для звезд с нормальной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$ получена величина $\log(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.97$, которая отлично согласуется с солнечным значением $\log(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.94$. Для гиганта μ Leo с повышенной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ получено самое высокое значение $\log(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 9.31$. Найдена антикорреляция между величиной $[\text{RE}/\text{Fe}]$, средним содержанием редкоземельных элементов (относительно Fe) и индексом $[\text{Fe}/\text{H}]$. Она хорошо согласуется с данными для F- и G-карликов в окрестности Солнца и отражает начальный химический состав исследованных гигантов.

Ключевые слова: красные гиганты; химический состав; экзопланеты

1. *Введение.* Открытие тысяч экзопланет около холодных звезд поставило перед исследователями несколько важных вопросов. Один из них касается химического состава таких звезд. Не показывает ли он каких-либо отличий (в целом или в деталях) от химического состава "нормальных" звезд, не

имеющих планет? Не могли ли особенности химического состава, если они имеются, оказать определенное влияние на формирование планетных систем около таких звезд, или, гипотетически, на возникновение жизни на одной из планет?

Для решения проблемы химического состава звезд с планетами применяют статистический подход, рассматривая одновременно до тысячи таких звезд и используя при этом автоматические методы отбора и анализа спектральных линий. Мы применяем в данной работе иной, традиционный подход, в котором для избранных звезд проводится детальный анализ содержания многих элементов по всем доступным линиям, как в видимой, так и в инфракрасной области, по возможности при учете отклонений от локального термодинамического равновесия (ЛТР).

Здесь мы детально анализируем химический состав 9-ти близких и ярких К-гигантов с планетами, исследование которых было начато нами ранее (Любимков и др. [1]). В табл.1 приведен список этих гигантов вместе с некоторыми данными о них из [1], включая наблюдаемую скорость вращения $V \sin i$ и расстояние d , найденное по параллаксу π . Видно, что расстояния d варьируются от 10 до 93 пк, т.е. это действительно достаточно близкие звезды. Скорости вращения малы ($V \sin i = 2.4-6.9$ км/с), поэтому линии в спектрах этих звезд достаточно узкие и резкие, что важно при анализе химического состава.

В [1] приведены сведения о планетах, найденных около этих гигантов. Отметим, что массы планет m (точнее, величина $m \sin i$) варьируются от 1.8 до $8.8 M_{Jup}$, где M_{Jup} - масса Юпитера.

В [1] были определены фундаментальные параметры 9-ти гигантов, включая их эффективную температуру T_{eff} , ускорение силы тяжести в атмосфере $\log g$, индекс металличности $[Fe/H]$ и другие. Там же были определены содержания 3-х легких элементов - лития, углерода и кислорода (с учетом отклонений

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О 9-ти ПРОГРАММНЫХ ГИГАНТАХ

Звезда	HR	HD	V , mag	Sp	$V \sin i$, км/с	π , mas	d , пк
α Ari	617	12929	2.01	K1 III	4.2	49.56	20
α Tau	1457	29139	0.86	K5 III	4.3	48.94	20
β Gem	2990	62509	1.14	K0 III	2.8	96.54	10
	3145	66141	4.38	K2 III	4.7	12.84	78
β Cnc	3249	69267	3.52	K4 III	6.9	10.75	93
μ Leo	3905	85503	3.88	K2 III	4.5	26.28	38
γ^1 Leo	4057	89484	1.98	K1 III	4.3	25.96	39
β UMi	5563	131873	2.08	K4 III	5.0	24.91	40
ε CrB	5947	143107	4.13	K2 III	2.4	14.73	68

от ЛТР). Теперь мы можем существенно расширить наши данные о химическом составе этих звезд. В частности, чтобы иметь полные данные относительно группы CNO-элементов, необходимо определить содержание азота. Так как линии NI в спектрах К-гигантов слишком слабы, мы будем использовать инфракрасные линии молекулы CN. Анализ этих линий позволит также определить отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, важный показатель эволюционного статуса красных гигантов.

Методика определения содержания N и отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ по линиям CN, а также анализ содержаний элементов тяжелее железа от Cu до Hf были детально описаны в недавней работе Любимкова и др. [2]. В ней были рассмотрены два красных гиганта с магнитными полями, EK Eri (K0 III) и OU And (G1 III), которые предположительно являются потомками магнитных Ap-звезд. Там же был рассмотрен в качестве звезды сравнения гигант β Gem (Поллукс), который включен и в настоящую работу. Методика статьи [2] и полученные там результаты использованы нами в данном исследовании.

2. Фундаментальные параметры гигантов и методика расчетов. Фундаментальные (или базисные) параметры исследованных гигантов представлены в табл.2; они были получены в [1], за исключением параметров $[\text{Fe}/\text{H}]$ и V_r для μ Leo (см. ниже). Здесь приведены, прежде всего, эффективная температура T_{eff} звезды и ускорение силы тяжести в звездной атмосфере g (указана величина $\log g$). Далее представлены две величины, полученные из анализа линий FeI: индекс металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ и параметр микротурбулентности V_r . Напомним, что $[\text{Fe}/\text{H}] = \log \varepsilon(\text{Fe}) - \log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe})$, где $\log \varepsilon(\text{Fe})$ и $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe})$ - содержание железа в атмосфере звезды и Солнца,

Таблица 2

БАЗИСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ 9-ти ПРОГРАММНЫХ ГИГАНТОВ, А
ТАКЖЕ ГИГАНТОВ EK Eri И OU And С МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ,
ИССЛЕДОВАННЫХ В [2]

Звезда	T_{eff}	$\log g$	$[\text{Fe}/\text{H}]$	V_r , км/с	$M / M_{\odot}$	$\log t$
β Gem	4830	2.85	0.03	1.4	2.3	8.89
α Ari	4510	2.40	-0.11	1.2	2.0	9.10
μ Leo	4475	2.50	0.26	1.3	1.5	9.56
γ^1 Leo	4465	1.90	-0.35	1.7	2.8	8.62
ε CrB	4360	2.12	-0.10	1.4	2.0	9.10
HR 3145	4265	1.87	-0.35	1.8	1.2	9.73
β UMi	4020	1.31	-0.33	1.3	1.6	9.29
β Cnc	4010	1.37	-0.18	1.5	2.5	8.89
α Tau	3920	1.20	-0.37	1.4	1.2	9.74
EK Eri	5025	3.26	0.10	1.2	1.8	9.16
OU And	5330	2.83	-0.11	1.6	2.9	8.60

соответственно. В [1] для Солнца было принято содержание $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe}) = 7.50$ [3]. В настоящей работе при вычислении $[\text{Fe}/\text{H}]$ мы использовали уточненное значение $\log \varepsilon_{\odot}(\text{Fe}) = 7.48$ [4].

Для гиганта μ Leo, химический состав которого представляет повышенный интерес (см. ниже) и поэтому требует особой точности от используемых величин $[\text{Fe}/\text{H}]$ и V_t , мы заново определили эти параметры, применив спектры PEPSI [5]. Проанализировав 21 линию FeI из списка [1], мы получили для μ Leo содержание железа $\log \varepsilon(\text{Fe}) = 7.74 \pm 0.06$ и параметр микротурбулентности $V_t = 1.29 \pm 0.09$ км/с. В дальнейших расчетах были приняты значения $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.26$ и $V_t = 1.3$ км/с.

В табл.2 приведены также две величины, масса M и возраст t , которые были найдены в [1] с помощью эволюционных треков. При этом были использованы эволюционные треки Кларета [6,7]. Как было показано нами в [2] на примере β Gem, в случае наших гигантов переход к более современным трекам MIST [8] не приводит к заметным изменениям в эволюционных параметрах.

Для нашей задачи важно точное знание величин T_{eff} и $\log g$, так как на них основана модель звездной атмосферы, применяемая при анализе химического состава. Как известно, определяемые содержания элементов в случае холодных звезд особенно чувствительны к ошибкам в эффективной температуре T_{eff} . Точность значений T_{eff} , приведенных в табл.1, достаточно высока: согласно [1], ошибка определения T_{eff} для 3-х звезд (α Tau, γ^1 Leo и ε CrB) составляет ± 40 К; для остальных 6-ти гигантов она равна ± 30 К.

Отметим, что в [1] полученные нами для β Gem, μ Leo и α Tau параметры T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, V_t и M были сравнены со значениями, найденными в [9,10] для 34-х эталонных звезд ("benchmark stars") классов F, G и K, в том числе и для трех названных объектов. Учитывая новые определения $[\text{Fe}/\text{H}]$ и V_t для μ Leo (см. выше), мы приходим к выводу, что имеет место отличное согласие с данными [9,10]; тем самым мы еще раз подтверждаем высокую точность величин, приведенных в табл.1.

Интересно отметить, что для 2-х звезд из 9-ти гигантов, перечисленных в табл.1, были обнаружены слабые магнитные поля; согласно [11], максимум поля составляет $B_{\text{max}} = 0.7$ Гс для β Gem и 0.3 Гс для α Tau. Для гигантов EK Eri и OU And, исследованных в [2], поле существенно сильнее: $B_{\text{max}} = 98.6$ Гс и 41.4 Гс, соответственно (это наибольшие значения B_{max} , найденные в [11]).

Наши вычисления основаны на моделях атмосфер, рассчитанных по известной программе Куруца (Kurucz's code) ATLAS9 с использованием новых значений ODF [12]. Анализ содержаний элементов основывался на расчетах синтетических спектров и их сравнении с наблюдаемыми спектрами.

Атомные данные, необходимые для расчетов линий исследуемых элементов, а также линий других элементов, участвующих в вычислении синтетических спектров, были взяты из базы данных VALD3 [13].

Мы использовали наблюдаемые спектры звезд из базы данных PolarBase, полученные на спектрографе NARVAL [14]. Здесь разрешение было $R=65000$, отношение сигнал/шум $S/N > 350$, а диапазон длин волн составлял $3700\text{--}10480 \text{ \AA}$. Для нашего анализа химического состава было важно, что используемые спектры охватывают не только видимый, но и инфракрасный диапазон.

3. *Легкие элементы Li, C, N и O.* Эти легкие элементы часто называют ключевыми (key elements), имея в виду их ключевую роль в звездной эволюции. Содержания 3-х элементов, Li, C и O, были определены нами в [1] по атомарным линиям LiI, CI и OI, при этом учитывались отклонения от ЛТР. В случае азота из-за отсутствия атомарных линий NI в спектрах холодных звезд, как и в [2], использованы линии молекулы CN. Кроме содержания N, по линиям CN определено также отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$.

3.1. *Содержание лития.* Литий, как известно, является одним из самых чувствительных индикаторов звездной эволюции. Содержание этого элемента у 9-ти гигантов было определено в [1] путем подгонки синтетического спектра к наблюдаемому в области резонансной линии LiI $6707.76 \text{ \AA}$. Указанная линия была детектирована только в спектрах 2-х звезд, β Gem и μ Leo; для них были получены ЛТР-содержания лития $\log\epsilon(\text{Li})=0.73$ и 0.16 , соответственно (с ошибкой $\pm 0.06 \text{ dex}$). Для остальных 7-и гигантов удалось оценить лишь верхний предел величины $\log\epsilon(\text{Li})$. К найденным значениям $\log\epsilon(\text{Li})$ в [1] были добавлены не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} , которые составили 0.19 dex для β Gem и 0.29 dex для μ Leo; величины Δ_{NLTE} были найдены на основе вычислений [15].

Недавно были выполнены новые не-ЛТР расчеты линии LiI $6707.76 \text{ \AA}$ для красных гигантов [16], которые привели к существенному пересмотру (уменьшению) не-ЛТР поправок в содержании лития. В частности, величина Δ_{NLTE} теперь составляет только -0.02 dex для β Gem и $+0.02 \text{ dex}$ для μ Leo. Поскольку для всех 9-ти гигантов не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} оказались малы по сравнению с ошибками определения содержаний $\log\epsilon(\text{Li})$, мы ими пренебрегаем, т.е. окончательно принимаем для всех 9-ти гигантов содержания лития, полученные в [1] при условии ЛТР.

3.2. *Содержания C и O.* Не-ЛТР анализ содержаний углерода и кислорода был выполнен в [1]. Там же приведен список использованных линий CI и OI; он охватывает не только видимую, но и инфракрасную

область спектра (вплоть до линии $\text{C I } 9658.44 \text{ \AA}$). Примененная здесь методика не-ЛТР расчетов линий C I и O I разработана одним из авторов настоящей работы (САК) и описана в статьях [17,18]. Полученные содержания C и O приведены в табл.3. Видно, что содержание углерода у всех гигантов в табл.3 показывает дефицит относительно солнечного содержания $\log \varepsilon_{\odot}(\text{C}) = 8.47$, чему соответствуют пониженные значения $[\text{C}/\text{Fe}]$ от -0.2 до -0.5 dex . Содержание кислорода, напротив, не показывает каких-либо систематических отклонений от солнечного значения $\log \varepsilon_{\odot}(\text{O}) = 8.71$.

Таблица 3

**РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО CNO-ЭЛЕМЕНТАМ ДЛЯ 9-ти
ПРОГРАММНЫХ ГИГАНТОВ И ГИГАНТОВ ЕК Eri И OU And,
ИССЛЕДОВАННЫХ В [2]**

Звезда	$\log \varepsilon(\text{C})$	$\log \varepsilon(\text{N})$	$\log \varepsilon(\text{O})$	$[\text{N}/\text{C}]$	$[\text{N}/\text{O}]$	$\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$
$\beta \text{ Gem}$	8.12 ± 0.05	8.42 ± 0.04	8.71 ± 0.05	0.92 ± 0.06	0.57 ± 0.06	8.96 ± 0.08	17
$\alpha \text{ Ari}$	7.89 ± 0.07	8.57 ± 0.03	8.65 ± 0.05	1.30 ± 0.08	0.78 ± 0.06	8.95 ± 0.09	18
$\mu \text{ Leo}$	8.45 ± 0.06	8.86 ± 0.05	9.01 ± 0.07	1.03 ± 0.08	0.71 ± 0.09	9.31 ± 0.10	18
$\gamma^1 \text{ Leo}$	7.75 ± 0.10	8.22 ± 0.04	8.46 ± 0.10	1.09 ± 0.11	0.62 ± 0.11	8.71 ± 0.15	8
$\varepsilon \text{ CrB}$	7.88 ± 0.11	8.62 ± 0.04	8.65 ± 0.09	1.36 ± 0.12	0.83 ± 0.10	8.97 ± 0.15	9
HR 3145	7.84 ± 0.11	8.33 ± 0.05	8.52 ± 0.10	1.11 ± 0.12	0.67 ± 0.11	8.79 ± 0.16	-
$\beta \text{ UMi}$	7.82 ± 0.12	8.44 ± 0.03	8.48 ± 0.07	1.24 ± 0.12	0.82 ± 0.08	8.81 ± 0.14	13
$\beta \text{ Cnc}$	7.81 ± 0.11	8.61 ± 0.05	8.50 ± 0.10	1.42 ± 0.12	0.97 ± 0.11	8.90 ± 0.16	13
$\alpha \text{ Tau}$	7.73 ± 0.10	8.50 ± 0.06	8.37 ± 0.08	1.39 ± 0.12	0.99 ± 0.10	8.78 ± 0.14	13
ЕК Eri	8.15 ± 0.07	8.17 ± 0.06	8.81 ± 0.07	0.64 ± 0.09	0.22 ± 0.09	8.97 ± 0.12	17
OU And	7.90 ± 0.15	8.40 ± 0.10	8.80 ± 0.12	1.12 ± 0.18	0.46 ± 0.16	8.98 ± 0.21	-

3.3. *Содержание N и отношение $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$* . Как и в [2], определяя содержание азота и отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ по линиям молекулы CN , мы рассматривали спектральный интервал $7985\text{--}8025 \text{ \AA}$. Здесь наблюдается ряд линий ^{12}CN , содержащих изотоп ^{12}C , а также мультиплет $^{13}\text{CN } 8004.7 \text{ \AA}$ с изотопом ^{13}C . В этом интервале нами рассчитывался синтетический спектр звезды, который затем подгонялся к наблюдаемому спектру. При такой подгонке содержание углерода было фиксировано (оно определено выше), а содержание азота варьировалось.

Найденное содержание азота $\log \varepsilon(\text{N})$ и отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ приведены в табл.3, где собраны все полученные нами данные по CNO-элементам. Здесь, наряду с 9-тью программными звездами, представлены также гиганты ЕК Eri и OU And, исследованные в [2] по той же методике. Видно, что содержание азота у всех гигантов в табл.3 показывает избыток относительно солнечного содержания $\log \varepsilon_{\odot}(\text{N}) = 7.85$, чему соответствуют

повышенные значения $[N/Fe] = 0.54 - 1.12$.

Что касается отношения $^{12}C/^{13}C$, то пониженные значения $^{12}C/^{13}C = 8 - 18$, полученные для большинства гигантов в табл.3 (для Солнца $^{12}C/^{13}C = 89$), несомненно доказывают, что эти гиганты прошли фазу FDU. Величину $^{12}C/^{13}C$ не удалось определить для звезд HR 3145 и OU And. Как отмечено в [2], в случае OU And причина заключалась в относительно быстром вращении и повышенной эффективной температуре этой звезды, однако найденное для OU And высокое значение $[N/C] = 1.1$ могло служить подтверждением того, что и этот гигант прошел фазу FDU. В случае HR 3145 нам был доступен единственный наблюдаемый ИК спектр, который на месте мультиплета $^{13}CN\ 8004.7\ \text{\AA}$ демонстрировал сильную бленду, возможно, теллурическую линию. Однако и для HR 3145 значение $[N/C] = 1.1$, столь же высокое, как и для OU And, доказывает прохождение фазы FDU. Следует отметить, что в [1] для 7 из 9-ти гигантов были приведены значения $^{12}C/^{13}C$, найденные другими авторами ранее (из анализа эквивалентных ширин линий CN, а не с помощью синтетических спектров, как в нашей работе). Сравнение этих данных с табл.3 показывает хорошее согласие.

4. *Корреляция между $[N/C]$ и $[N/O]$.* Для красных гигантов давно известна антикорреляция между содержаниями азота и углерода. Как было показано в [17], в случае более массивных А-, F- и G-сверхгигантов антикорреляция "азот-углерод" отражает зависимость эволюционных изменений в содержаниях N и C от начальной скорости вращения звезд. Теория предсказывает, что более ярким показателем эволюции может быть зависимость между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$.

На рис.1 показана зависимость между $[N/C]$ и $[N/O]$ для 9-ти программных звезд, а также для магнитных гигантов EK Eri и OU And, исследованных в [2]. Наблюдается ярко выраженная корреляция между этими величинами, при этом величина $[N/C]$ меняется от 0.64 (EK Eri) до 1.4 (β Cnc и α Tau), т.е. увеличивается почти на 0.8 dex. Корреляция хорошо аппроксимируется линейной зависимостью, что подтверждает штриховая прямая, проведенная методом наименьших квадратов.

Интересно сравнить зависимость между $[N/C]$ и $[N/O]$ для красных гигантов, звезд сравнительно малых масс ($M/M_{\odot} = 1.2 - 2.8$, см. табл.1), с аналогичной зависимостью для гораздо более массивных AFG-сверхгигантов ($M/M_{\odot} = 4 - 20$). В частности, как видно из рис.5 в [18], для большинства сверхгигантов величина $[N/C]$ варьируется от 0.4 до 1.6, что немного шире, чем вариации $[N/C]$ на рис.1.

На рис.1 представлена также теоретическая зависимость $[N/C]$ от $[N/O]$, следующая из расчетов [19] для модели вращающейся звезды с массой

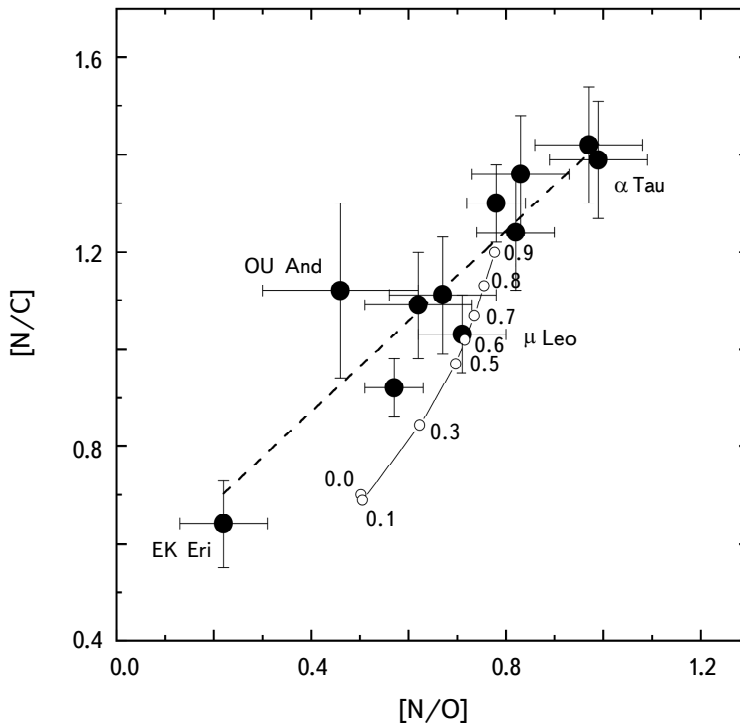


Рис.1. Корреляция между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$ для 9-ти программных звезд, а также магнитных гигантов EK Eri и OU And [2]. Штриховая прямая проведена методом наименьших квадратов. Тонкой линией представлены результаты расчетов для модели вращающейся звезды с $M = 2.5 M_{\odot}$ [18]. Около узловых точек на этой кривой указаны значения относительной начальной угловой скорости вращения.

$2.5 M_{\odot}$ (тонкая сплошная линия). Представлены результаты расчетов для фазы post-FDU (конец горения гелия). Узловые точки на этой кривой соответствуют разным значениям Ω_0/Ω_{crit} , где Ω_0 - начальная угловая скорость вращения, а Ω_{crit} - критическая скорость вращения. Заметим, что изменениям Ω_0/Ω_{crit} от 0 до 0.9 соответствуют вариации начальной скорости вращения на экваторе от 0 до 316 км/с (см. [19]).

Видим, что расчеты для модели $M = 2.5 M_{\odot}$ не могут описать количественно наблюдаемую зависимость $[N/C]$ от $[N/O]$. Важно, что для большинства гигантов наблюдаемые высокие значения $[N/C]$ и $[N/O]$, согласно теории, могут быть достигнуты лишь при большой начальной скорости вращения, приближающейся к критической скорости или даже выше ее. В частности, теория не может объяснить высокие значения $[N/C] = 1.0 - 1.4$, полученные для большинства гигантов. Обсуждение этого расхождения, приводится ниже.

5. *Суммарное содержание C+N+O.* Важное предсказание теории

касается суммарного содержания $C+N+O$, а именно: несмотря на значительные изменения индивидуальных содержаний элементов C , N и O в процессе эволюции звезды, сумма содержаний $C+N+O$ должна оставаться неизменной с момента начала эволюции. Это означает, что у красных гигантов эта величина должна быть такой же, как и в начале их эволюции.

Значения суммарного содержания $\log \epsilon(C+N+O)$ приведены в табл.3. На их основе построен рис.2, где показана зависимость $\log \epsilon(C+N+O)$ от индекса металличности $[Fe/H]$.

На рис.2 обращает на себя внимание компактная группа точек, соответствующая пяти гигантам с нормальной металличностью $[Fe/H] = \pm 0.1$ и с очень близкими значениями $\log \epsilon(C+N+O) = 8.95 - 8.98$ (в среднем 8.97), которые практически совпадают с солнечным значением 8.94 [4]. Этот результат важен по двум причинам.

Во-первых, подтверждено предсказание теории: гиганты с нормальной (солнечной) металличностью сохранили первоначальное (солнечное) суммарное содержание $C+N+O$. Во-вторых, этот результат можно рассматривать как объективный критерий точности наших результатов по CNO -элементам.

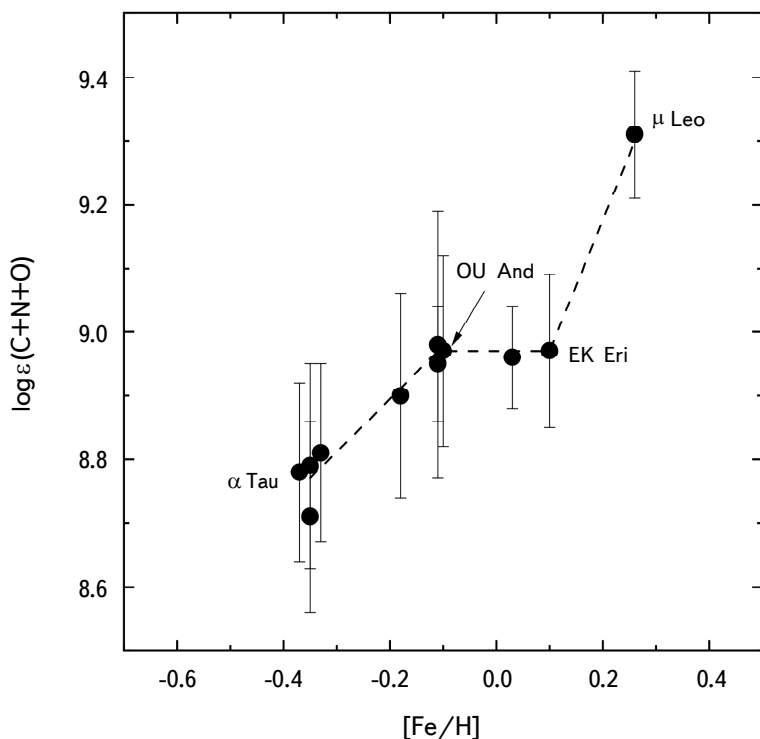


Рис.2. Суммарное содержание $C+N+O$ как функция индекса металличности $[Fe/H]$. Ломаная штриховая линия аппроксимирует наблюдаемый тренд.

Малое различие в 0.03 dex в значениях $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ между пятью звездами не может быть случайным; мы считаем на этом основании, что реальная ошибка найденных нами для этих звезд содержаний C, N и O, вероятно, составляет не более ± 0.05 dex.

Другую компактную группу на рис.2 образуют четыре гиганта с пониженной металличностью; у них индекс $[\text{Fe}/\text{H}]$ заключен между -0.33 и -0.37, а значения $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ - между 8.71 и 8.81 (в среднем 8.77, что на 0.17 dex ниже солнечного значения).

Штриховая линия на рис.2 аппроксимирует очевидный тренд величины $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ с индексом металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. Особое положение здесь занимает гигант μ Leo с повышенным индексом $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ и высоким значением $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 9.31$, что на 0.37 dex больше, чем на Солнце. Возникает вопрос: насколько достоверно большое значение $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ для μ Leo? Как уже упоминалось, при определении содержаний элементов для холодных звезд результаты особенно чувствительны к ошибкам в эффективной температуре T_{eff} . Точность определения T_{eff} в случае μ Leo высока; подтверждением может служить табл.4, где для μ Leo представлены как наши значения T_{eff} и $\log g$, так и результаты других авторов, полученные в последние годы. Видим, что имеет место отличное согласие в значениях T_{eff} (а также и в $\log g$), Таким образом, подтверждается повышенное значение $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ для μ Leo.

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ T_{eff} И $\log g$, НАЙДЕННЫЕ В [1] ДЛЯ ГИГАНТА μ Leo, В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

T_{eff}	$\log g$	Работа, год
4475	2.50	[1], 2021
4474	2.51	[8], 2015
4471	2.45	[20], 2015
4461	2.65	[21], 2019

6. *Тяжелые элементы.* К тяжелым мы относим химические элементы тяжелее железа. Всего нами было рассмотрено 12 таких элементов от Cu до Hf; восемь из них (от La до Er) относятся к редким землям (Rear Earthes, далее RE), три элемента легче RE (Cu, Rb и Ba) и один тяжелее RE (Hf). Ранее в [2] для контроля мы определили содержания этих элементов для Солнца, причем по тем же спектральным линиям, что и в [2] и в настоящей работе. Было показано, что эти содержания хорошо согласуются с последними данными для Солнца [4] (см. табл.7 в [2]).

Анализ содержаний тяжелых элементов в данной работе был выполнен по методике, описанной в [2]. В частности, содержания меди, рубидия и бария были определены при отказе от условия ЛТР, а при анализе редких земель (RE) и гафния мы применили ЛТР-подход.

Полученные содержания всех элементов, в том числе тяжелых, представлены в табл.5. В последнем столбце даны современные данные для Солнца [4]; при этом уточненное содержание лития взято из [16]. Мы не указали здесь ошибки в содержаниях элементов (кроме Солнца), так как включение в эту таблицу таких ошибок увеличило бы ее размеры почти в два раза. Тем более, что для CNO-элементов ошибки уже приведены в табл.3, а для Li ошибка ± 0.06 dex в случае двух звезд с обнаруженным литием (β Gem и μ Leo) была указана в [1]. Ошибки в содержании железа представлены в [1,2] (отметим, что ошибки в содержании Fe варьируются в диапазоне от ± 0.05 до ± 0.09 dex). Для тяжелых элементов типичная ошибка составляет ± 0.10 dex.

Таблица 5

СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ $\log \epsilon(\text{El})$ В АТМОСФЕРАХ 9-ти
К-ГИГАНТОВ В СРАВНЕНИИ С ДАННЫМИ ДЛЯ СОЛНЦА [4]
(солнечное содержание Li см. в [16])

Z	Элемент	β Gem	α Ari	μ Leo	γ^1 Leo	ϵ CrB	HR 3145	β UMi	β Cnc	α Tau	Солнце
3	Li	0.72	≤ -0.12	0.16	≤ -0.24	≤ -0.27	≤ -0.43	≤ -1.05	≤ -0.63	≤ -1.15	0.96 ± 0.05
6	C	8.12	7.89	8.45	7.75	7.88	7.84	7.82	7.81	7.73	8.47 ± 0.06
7	N	8.42	8.57	8.86	8.22	8.62	8.33	8.44	8.61	8.50	7.85 ± 0.12
8	O	8.71	8.65	9.01	8.46	8.65	8.52	8.48	8.50	8.37	8.71 ± 0.04
26	Fe	7.51	7.37	7.74	7.13	7.38	7.13	7.15	7.30	7.11	7.48 ± 0.04
29	Cu	4.30	4.13	--	4.00	3.97	3.85	4.16	4.09	4.05	4.18 ± 0.05
37	Rb	2.39	2.25	2.75	2.12	2.27	2.10	2.21	2.10	2.24	2.47 ± 0.07
56	Ba	2.19	2.20	2.35	2.00	2.19	1.74	2.28	2.46	2.14	2.25 ± 0.07
57	La	1.15	1.09	1.23	0.91	0.98	0.82	0.97	1.11	0.82	1.11 ± 0.04
59	Pr	0.71	0.68	0.85	0.55	0.57	0.54	0.50	0.69	0.50	0.72 ± 0.04
60	Nd	1.51	1.48	1.56	1.27	1.39	1.09	1.38	1.46	1.03	1.42 ± 0.04
62	Sm	1.00	0.93	1.1	0.77	0.83	0.74	0.85	0.93	0.75	0.95 ± 0.04
63	Eu	0.55	0.49	0.81	0.42	0.45	0.37	0.43	0.51	0.30	0.52 ± 0.04
64	Gd	1.12	1.09	1.17	0.94	1.01	0.88	0.94	0.96	0.87	1.08 ± 0.04
66	Dy	1.11	1.20	1.22	0.92	0.88	0.77	0.64	0.80	0.56	1.10 ± 0.04
68	Er	0.93	0.80	0.86	--	--	0.60	0.89	--	0.74	0.93 ± 0.05
72	Hf	0.94	0.75	0.92	0.59	0.60	0.48	0.53	0.55	0.40	0.85 ± 0.05

Выше, при обсуждении рис.2, мы разделили исследованные гиганты на три группы в зависимости от их индекса металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. В группу с нормальной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$ мы включили три программных гиганта (β Gem, α Ari и ϵ CrB), а также два магнитных гиганта, исследованных в [2], - EK Eri и OU And. Химический состав трех звезд из этой группы,

β Gem, EK Eri и OU And, уже обсуждался нами в [2]. В частности, было показано, что для тяжелых элементов от Fe до Hf найденные содержания отличаются от солнечных содержаний обычно в пределах ошибок определения. Анализируя данные табл.5, мы приходим к такому же выводу и в отношении двух оставшихся звезд из этой группы - α Agi и ε CrB.

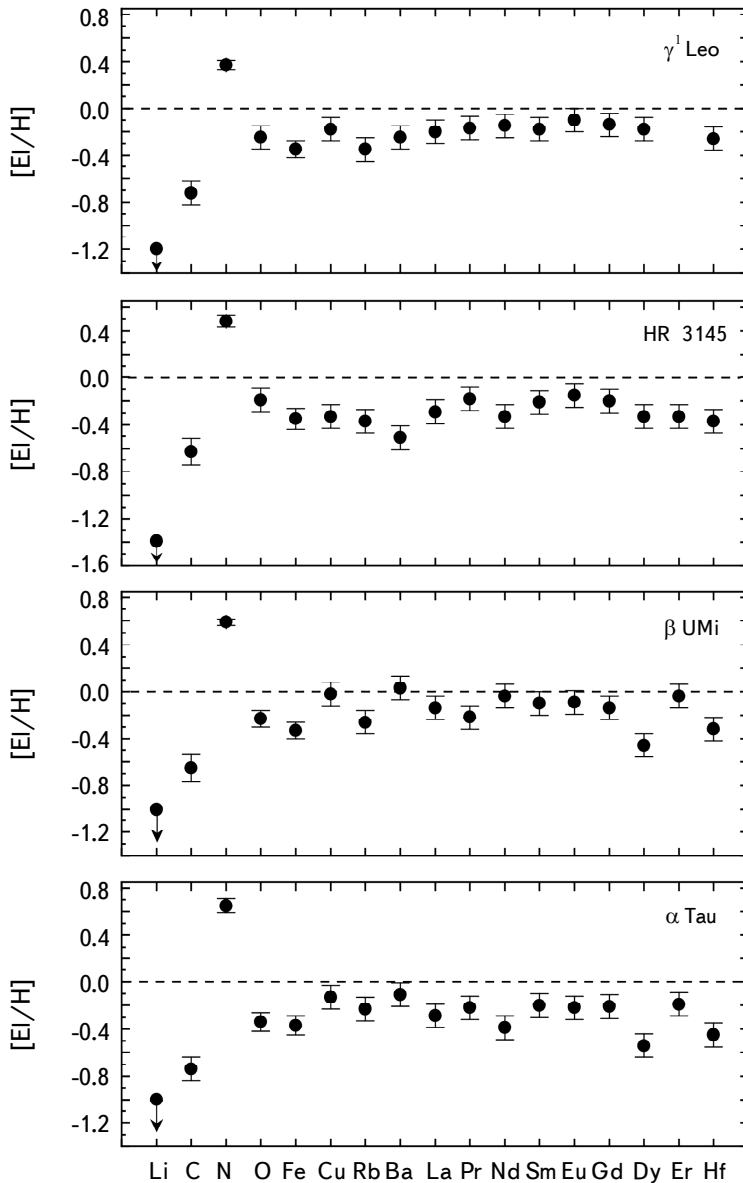


Рис.3. Содержание элементов (относительно Солнца) в атмосферах 4-х гигантов с пониженным индексом металличности $[Fe/H] = -(0.33-0.37)$.

Таким образом, для группы гигантов с нормальной металличностью получен вполне ожидаемый результат: они имеют практически солнечное содержание тяжелых элементов. О химическом составе гигантов с пониженной металличностью (у них $[\text{Fe}/\text{H}]$ между -0.33 и -0.37) можно судить по рис.3, где показана разность $[\text{El}/\text{H}]$ в содержаниях между звездой и Солнцем для всех исследованных элементов от Li до Hf. Чтобы по возможности уменьшить размеры этого рисунка для двух наиболее холодных звезд этой группы, β UMi и α Tau, указан завышенный верхний предел содержания лития $[\text{Li}/\text{H}] \leq -1.00$, в то время как реальный предел составляет $[\text{Li}/\text{H}] \leq -2.01$ и -2.11 для β UMi и α Tau, соответственно (см. табл.5).

Дополнить общую картину могут данные о химическом составе μ Leo, гиганта с повышенной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$, показавшего аномально высокое суммарное содержание C+N+O (рис.2). На рис.4 мы представили для этой звезды содержания элементов $[\text{El}/\text{H}]$ относительно Солнца. Видим, что содержания RE-элементов отличаются от солнечных заметно меньше, чем содержание железа.

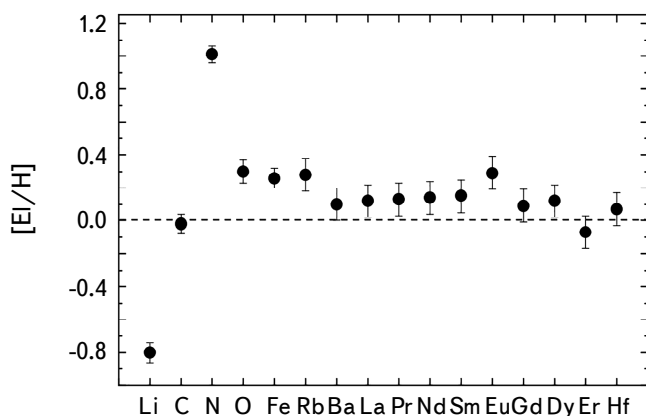


Рис.4. Содержание элементов (относительно Солнца) в атмосфере гиганта μ Leo с повышенным индексом металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$.

Число линий, использованных нами при анализе какого-либо редкоземельного элемента, зависело от самого элемента и от конкретной звезды. Наибольшее количество линий (12-19) было привлечено для анализа содержания Nd. Самое малое число линий удалось использовать для Dy и Er: только 2-3 линии для Dy и 1-2 линии для Er (единственное исключение составил гигант β Gem с 4-5 линиями). Поэтому найденные содержания Dy и Er мы считаем менее надежными.

На рис.5 представлена величина $[\text{RE}/\text{Fe}]$, среднее значение $[\text{El}/\text{Fe}]$ для шести RE-элементов от La до Gd, как функция $[\text{Fe}/\text{H}]$ (результаты для Dy и

Er не были включены). Виден отчетливый тренд $[RE/Fe]$ с ростом $[Fe/H]$, при этом величина $[RE/Fe]$ уменьшается от $+0.2$ до $-(0.11-0.15)$ dex при увеличении $[Fe/H]$ от -0.35 до $0.10-0.26$ dex. Таким образом, при повышении $[Fe/H]$ на 0.6 dex величина $[RE/Fe]$ падает примерно на 0.3 dex.

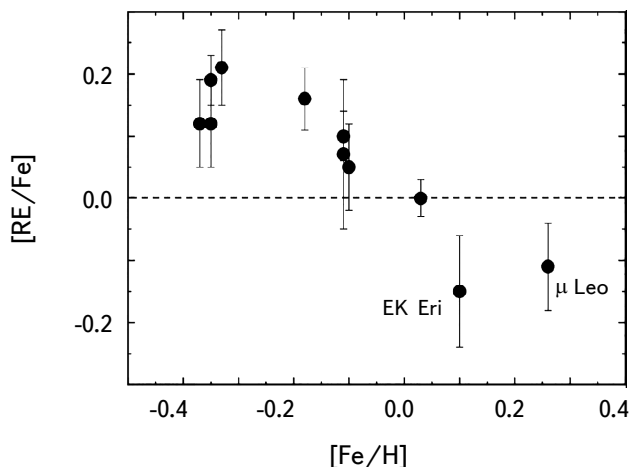


Рис.5. Средняя величина $[RE/Fe]$ для RE-элементов как функция индекса металличности $[Fe/H]$.

Напомним, что анализ содержаний RE-элементов был выполнен нами при предположении ЛТР. Возможно ли, чтобы приведенная на рис.5 зависимость объяснялась неучтенными не-ЛТР эффектами? Следует отметить, что линии RE-элементов в спектрах исследуемых звезд, как правило, очень слабы и образуются глубоко в их атмосферах. Для звезд с околосолнечной металличностью на таких глубинах велика концентрация электронов, соударения с которыми обеспечивают населенности уровней в атоме в соответствии с ЛТР. Это позволяет надеяться, что возможные не-ЛТР эффекты для них достаточно малы. Это предположение отчасти подтверждается не-ЛТР расчетами линий Pr II [22], Nd II [23] и Eu II [24] для Солнца, из которых следует, что применение ЛТР-анализа может вносить ошибку в определяемое содержание не более ± 0.03 dex. Эта величина на порядок меньше изменения $[RE/Fe]$ на 0.3 , показанного на рис.5. Для окончательного решения проблемы желательны прямые не-ЛТР расчеты линий RE-элементов для холодных гигантов, подобных нашим.

7. Обсуждение. Важный результат, полученный нами для 9-ти исследованных гигантов с планетами, состоит в том, что все они испытали глубокое конвективное перемешивание в фазе FDU. Этот факт важен именно при обсуждении их химического состава. К этому обсуждению мы подключили

и два магнитных гиганта, EK Eri и OU And, исследованных нами в [2] по той же методике (они тоже прошли фазу FDU, см. [2]).

Литий, самый легкий элемент в нашем списке, не был найден для 7 из 11-ти рассматриваемых гигантов. Этот результат является вполне ожидаемым для таких post-FDU объектов; действительно, у них вследствие глубокого перемешивания литий из звездной атмосферы был перенесен в глубокие и горячие слои звезды, где полностью выгорел. Однако у четырех гигантов (β Gem, μ Leo, EK Eri и OU And) литий был обнаружен, что противоречит стандартной теории эволюции звезд. Еще один непонятный факт состоит в том, что у трех из этих четырех гигантов (β Gem, EK Eri и OU And) было найдено магнитное поле, которого не должно быть у post-FDU объектов после глубокого перемешивания.

Как было отмечено нами в [2], у этих двух загадочных явлений может быть единое объяснение. Оно заключается в гипотетическом захвате звездой (уже после завершения фазы FDU) планеты-гиганта с массой в несколько масс Юпитера.

Расчеты [25] показали, что в результате падения на красный гигант планеты с массой до $15 M_J$ (где M_J - масса Юпитера) содержание лития на поверхности звезды может повыситься до величины $\log \epsilon(\text{Li}) \approx 2.2$. Следовательно, найденные нами значения $\log \epsilon(\text{Li}) = 0.16 - 1.52$ у четырех указанных выше гигантов вполне объяснимы в рамках этой гипотезы. Важно, что захват планеты, кроме увеличения содержания лития, приводит к значительному повышению скорости вращения красного гиганта. Согласно [26], следствием этого является запуск динамо-механизма и возникновение магнитного поля.

Для красных гигантов, у которых уже обнаружены планеты, такая гипотеза представляется достаточно реалистичной. При этом следует учитывать, что в формирующихся планетных системах происходит миграция планет, при которой падение одной из планет на центральную звезду является вполне вероятным. Согласно оценке [27], захват планет красными гигантами происходит в Галактике достаточно часто - примерно 3 события в год.

Переходя от лития к обсуждению группы CNO-элементов, следует остановиться на расхождении между наблюдениями и теорией относительно зависимости $[\text{N}/\text{C}]$ от $[\text{N}/\text{O}]$. Согласно рис.1, расчеты модели звезды с вращением не могут объяснить весь наблюдаемый диапазон этих двух величин. Более того, наблюдаемые на рис.1 для большинства гигантов высокие значения $[\text{N}/\text{C}] = 1.0 - 1.4$, согласно расчетам [19], могут быть получены лишь при начальных скоростях вращения более 150 км/с, что противоречит наблюдениям звезд с массами $1-3 M_{\odot}$.

В литературе уже более двух десятков лет обсуждается гипотеза дополнительного неконвективного перемешивания (extra mixing) в красных гигантах

после FDU, привлеченная для объяснения некоторых особенностей в наблюдаемых содержаниях легких элементов Li, C, N и O у таких звезд, которые не удастся объяснить в рамках стандартной теории. Например, идея "extra mixing" привлекалась в [28] для объяснения низкого отношения изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ у таких звезд, а также в [29] при анализе величины $[\text{C}/\text{N}]$ для большого числа гигантов с разной металличностью. По-видимому, эта идея необходима и для объяснения полученной нами зависимости $[\text{N}/\text{C}]$ от $[\text{N}/\text{O}]$.

На рис.1 особенно низкое положение занимает гигант EK Eri, у которого было обнаружено значительное магнитное поле. Этот пример показывает, что химический состав магнитных красных гигантов заслуживает отдельного исследования.

Еще один интересный результат относительно CNO-элементов касается суммарного содержания C+N+O. Мы нашли, что, в полном соответствии с предсказанием теории, для 5-ти гигантов с нормальной (солнечной) металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1 \text{ dex}$, полученные значения $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.95 - 8.98$ фактически совпадают с солнечным значением 8.94. Другими словами, несмотря на значительные изменения в индивидуальных содержаниях C и N в процессе эволюции, особенно после фазы FDU, сумма C+N+O остается неизменной с момента формирования звезды.

Особый интерес представляет зависимость суммарного содержания C+N+O от индекса металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ (рис.2). Она получена по 11-ти звездам, среди которых особое положение занимает гигант μ Leo с повышенным индексом металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ и с исключительно высоким значением $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 9.31$. По нашему мнению, для подтверждения и уточнения такой зависимости следует существенно увеличить число рассматриваемых звезд, добавив гиганты с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] < -0.4$, а также несколько звезд в интервале $[\text{Fe}/\text{H}]$ от 0.2 до 0.4, где пока мы имеем только гигант μ Leo. Если зависимость суммы C+N+O от $[\text{Fe}/\text{H}]$ подтвердится, это будет означать, что она имела место уже в том исходном межзвездном веществе, из которого сформировались рассматриваемые звезды. Тогда объяснение этому явлению необходимо будет искать в современных моделях химической эволюции Галактики.

Относительно тяжелых элементов представляет интерес найденная нами антикорреляция между средним содержанием RE-элементов и величиной $[\text{Fe}/\text{H}]$ (рис.5). Ранее аналогичная антикорреляция была получена в [30] для RE-элементов Nd, Sm и Eu при исследовании нескольких сотен F- и G-карликов в окрестности Солнца, причем в более широком диапазоне значений $[\text{Fe}/\text{H}]$ от +0.4 до -1.4 (см. рис.2 в [30]). В этом диапазоне, как оказалось, имеют место существенное понижение значений $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ при повышении

[Fe/H], примерно 0.5-0.7 dex для Nd, Sm и Eu. (Обсуждение подобных трендов для других химических элементов можно найти, например, в [31]).

В современных моделях химической эволюции Галактики главная роль в образовании RE-элементов отводится r-процессу и s-процессу. Роль этих двух процессов в звездном нуклеосинтезе и в химической эволюции Галактики рассмотрена, например, в [32]; детальное обсуждение роли r-процесса приведено в обзоре [33]. Подчеркнем, что представленная на рис.5 зависимость [RE/Fe] от [Fe/H] никак не связана с эволюцией исследованных гигантов, а всего лишь отражает начальный химический состав этих звезд (или, другими словами, химический состав межзвездной среды, из которой они сформировались).

8. Заключение. В данной работе мы исследовали химический состав 9-ти К-гигантов, имеющих планеты и расположенных в пределах 100 пк от Солнца. При этом нами были использованы фундаментальные параметры звезд, найденные нами ранее [1]. Только для гиганта μ Leo мы заново проанализировали линии FeI и уточнили содержание железа и параметр микротурбулентности V_t .

Мы определили содержания 17-ти химических элементов от лития ($Z=3$) до гафния ($Z=72$). При этом анализ линий ряда элементов был выполнен при отказе от предположения ЛТР (локальное термодинамическое равновесие). Недавно по той же методике нами в [2] были исследованы гиганты EK Eri и OU And, у которых были обнаружены значительные магнитные поля и которые были объявлены вероятными потомками магнитных Ap-звезд. Анализируя содержания элементов, полученные в настоящей работе, мы добавили к ним результаты, найденные в [2] для EK Eri и OU And.

Мы показали, что все 9 программных К-гигантов прошли глубокое перемешивание в фазе FDU (First Dredge-Up). Для большинства гигантов на это указывает низкое отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=8-18$, найденное нами по линиям молекулы CN. Для звезды HR 3145, где величину $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ определить не удалось, доказательством служит высокое отношение N/C (на 1.1 dex больше солнечного), характерное для post-FDU объектов. Ранее вывод о принадлежности к post-FDU объектам был получен также для звезд EK Eri и OU And.

Литий, являющийся чувствительным индикатором звездной эволюции, не был найден у 7 из 11-ти рассматриваемых гигантов. Отсутствие лития в атмосферах звезд, испытавших глубокое перемешивание в фазе FDU, это вполне ожидаемый результат. Однако у 4-х гигантов, также прошедших фазу FDU, литий был нами обнаружен. Одновременно у 3 из этих 4-х звезд ранее другими авторами было найдено магнитное поле. Эти два явления, присутствие лития в атмосфере и наличие магнитного поля, совершенно неожиданные для

post-FDU гигантов с точки зрения стандартной теории, сегодня находят общее объяснение в рамках единой гипотезы: захват (engulfment) звездой планеты с массой в несколько масс Юпитера.

Для группы CNO-элементов представляют интерес две зависимости, найденные нами. Первая из них - это ярко выраженная корреляция между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$, которая является наблюдаемым проявлением эволюции звезд. Сравнение наблюдаемой зависимости с теоретической моделью, учитывающей вращение, показало, что теория не может объяснить высокие значения $[N/C] = 1.0 - 1.4$, полученные нами для большинства рассмотренных гигантов. По-видимому, здесь следует привлечь гипотезу дополнительного (неконвективного) перемешивания (extra mixing), которая обсуждается в литературе уже более двух десятков лет.

Вторая зависимость касается суммарного содержания $C+N+O$, которое, согласно теории, не должно меняться со времени формирования звезды. Мы показали, что у гигантов с околосолнечной металличностью $[Fe/H] = \pm 0.1$ полученные содержания $\log \epsilon(C+N+O) = 8.95 - 8.98$ (в среднем 8.97) фактически совпадают с солнечным значением 8.94. Найден тренд величины $\log \epsilon(C+N+O)$ с ростом $[Fe/H]$, однако для его подтверждения необходимо расширить диапазон значений $[Fe/H]$ и, соответственно, расширить список рассмотренных гигантов. Отдельного внимания заслуживает высокое значение $\log \epsilon(C+N+O) = 9.31$ для гиганта μ Leo, имеющего повышенную металличность $[Fe/H] = +0.26$.

Найдена антикорреляция между величиной $[RE/Fe]$, средним содержанием редкоземельных элементов La, Pr, Nd, Sm, Eu и Gd (относительно Fe) и индексом металличности $[Fe/H]$. Она хорошо согласуется с данными для F- и G-карликов в окрестности Солнца и отражает начальный химический состав исследованных гигантов.

Авторы благодарят рецензента за внимательное прочтение статьи и за полезные замечания, а также выражают благодарность Правительству Российской Федерации и Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за поддержку (проект 075-15-2020-780).

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

NINE NEARBY K-GIANTS WITH PLANETS: A
DETAILED ANALYSIS OF THEIR CHEMICAL
COMPOSITION

L.S.LYUBIMKOV, D.B.POKLAD, S.A.KOROTIN

The chemical composition of nine K-giants with planets is studied, which are located within 100 pc from the Sun. The fundamental parameters of the stars obtained by us earlier are used in this regard; for the giant μ Leo the metallicity index $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ and the microturbulent parameter $V_t = 1.3$ km/s are re-determined from FeI lines. Abundances of 17 chemical elements from lithium ($Z=3$) to hafnium ($Z=72$) are found. An analysis of lines of some elements is made without the supposition of LTE (local thermodynamic equilibrium). From the infrared CN molecular lines the nitrogen abundance and the carbon isotope ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ are found. The low values $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 8-18$ show that the programme giants passed through the deep convecting mixing in the FDU (First Dredge-Up) phase. When analyzing the abundances obtained we added our recent data for the magnetic giants EK Eri and OU And found from the same technique. Lithium was not found for 7 of 11 giants in question. An absence of lithium in atmospheres of stars passed through the deep mixing in the FDU phase corresponds to the theory predictions. However for 4 giants lithium was found by us; earlier for 3 of these 4 stars the magnetic field has been detected. These two phenomena unexpected for post-FDU giants from the viewpoint of standard theory, i.e. the presence of lithium in atmosphere and the existence of magnetic field, can be explained in the framework of one hypothesis: an engulfment by a star of the planet with the mass of several Jupiter masses. For 11 giants considered we found the pronounced correlation between the $[\text{N}/\text{C}]$ and $[\text{N}/\text{O}]$ values. A comparison of the observed relation with the theoretical model computed with rotation showed that the theory cannot explain the high values $[\text{N}/\text{C}] = 1.0-1.4$ obtained for the most of the giants. Obviously, the known hypothesis of extra mixing is needed here. The summary abundance $\text{C}+\text{N}+\text{O}$, which, according to the theory, should remain constant from the star's formation, showed the correlation with the metallicity index $[\text{Fe}/\text{H}]$. In this regard for the stars with the normal metallicity $[\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.1$ the value $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.97$ was found that agrees perfectly with the solar value $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 8.94$. For the giant μ Leo with the higher metallicity $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ the greatest value $\log \epsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O}) = 9.31$ was obtained. The anticorrelation was found between the $[\text{RE}/\text{Fe}]$ value, the mean abundance of rare earth (RE) elements (relative to Fe) and the index $[\text{Fe}/\text{H}]$. It is in good

agreement with data for F- and G-dwarfs in the solar neighborhood and reflects the initial chemical composition of the giants explored.

Keywords: *red giants: chemical composition: exoplanets*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al.*, Astron. Nachr., **342**, 497, 2021.
2. *Л.С.Любимков, С.А.Коротин, Д.В.Петров и др.*, Астрофизика, **65**, 63, 2022, (Astrophysics, **65**, 53, 2022).
3. *M.Asplund, N.Grevesse, A.J.Sauval et al.*, Ann. Rev. Astron. Astrophys., **47**, 481, 2009.
4. *K.Lodders*, Space Sci. Rev., **217**, id.44, 2021.
5. *K.G.Strassmeier, I.Ilyin, M.Weber*, Astron. Astrophys., **612**, A45, 2018.
6. *A.Claret*, Astron. Astrophys., **424**, 919, 2004.
7. *A.Claret*, Astron. Astrophys., **453**, 769, 2006.
8. *J.Choi, A.Dotter, C.Conroy et al.*, Astrophys. J., **823**, 102, 2016.
9. *U.Heiter, P.Jofré, B.Gustafsson et al.*, Astron. Astrophys., **582**, A49, 2015.
10. *P.Jofré, U.Heiter, C.Soubiran et al.*, Astron. Astrophys., **564**, A133, 2014.
11. *M.Aurière, R.Konstantinova-Antova, C.Charbonnel et al.*, Astron. Astrophys., **574**, A90, 2015.
12. *Sz.Mészáros, C.Allende Prieto, B.Edvardsson et al.*, Astron. J., **144**, 120, 2012.
13. *T.Ryabchikova, N.Piskunov, R.L.Kurucz et al.*, Physica Scripta, **90**, id. 054005, 2015.
14. *P.Petit, T.Louge, S.Théado et al.*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **126**, 469, 2014.
15. *K.Lind, M.Asplund, P.S.Barklem*, Astron. Astrophys., **503**, 541, 2009.
16. *E.Wang, T.Nordlander, M.Asplund et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **500**, 2159, 2021.
17. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.A.Korotin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **446**, 3447, 2015.
18. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.L.Lambert*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **489**, 1533, 2019.
19. *C.Georgy, S.Ekström, A.Granada et al.*, Astron. Astrophys., **553**, A24, 2013.
20. *R.E.Luck*, Astron. J., **150**, 88, 2015.
21. *M.Lomaeva, H.Jönsson, N.Ryde et al.*, Astron. Astrophys., **625**, A141, 2019.
22. *A.M.K.Shaltout, M.K.Abdelrazek, Ali G.A.Abdelkawy et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **496**, 5361, 2020.
23. *A.G.Abdelkawy, A.M.K.Shaltout, M.M.Beheary et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 470, 4007, 2017.

24. *G.Zhao, L.Mashonkina, H.L.Yan et al.*, *Astrophys. J.*, 833, 225, 2016.
25. *C.Aguilera-Gómez, J.Chanamé, M.H.Pinsonneault et al.*, *Astrophys. J.*, **829**, id. 127, 2016.
26. *G.Privitera, P.Eggenberger, C.Georgy et al.*, *Astron. Astrophys.*, **593**, L15, 2016.
27. *А.В.Понков, С.Б.Понов*, *Известия Крымской астрофиз. общ.*, **114**, 70, 2018.
28. *C.Abia, S.Palmerini, M.Busso et al.*, *Astron. Astrophys.*, **548**, A55, 2012.
29. *M.Shetrone, J.Tayar, J.A.Johnson et al.*, *Astrophys. J.*, **872**, 137, 2019.
30. *C.Battistini, T.Bensby*, *Astron. Astrophys.*, **586**, A49, 2016.
31. *T.Bensby, S.Feltzing, I.Lundström et al.*, *Astron. Astrophys.*, **433**, 185, 2005.
32. *N.Prantzos, C.Abia, S.Cristallo et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **491**, 1832, 2020.
33. *J.J.Cowan, C.Snedden, J.E.Lawler et al.*, *Rev. Mod. Phys.*, **93**, id. 015002. 2021.