

ВЕЛИЧИНА $[N/C]$ КАК ИНДИКАТОР ЭВОЛЮЦИИ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ: НАБЛЮДАЕМЫЕ РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ И НЕМАГНИТНЫМИ ГИГАНТАМИ

© 2024 г. Л. С. Любимков*, Д. Б. Поклад**

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Научный, Россия

**E-mail: lyub@craocrimea.ru*

***E-mail: dmitry.crao@gmail.com*

Поступила в редакцию 05.06.2024 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята в печать 18.07.2024 г.

Выполнен анализ данных о величине $[N/C]$, одного из самых чувствительных индикаторов эволюции звезд, для 20 красных гигантов с магнитными полями в сравнении с данными для 7 немагнитных гигантов. Для большинства рассмотренных гигантов величина $[N/C]$ показала зависимость от возраста t и массы M . В частности, величина $[N/C]$ у большинства магнитных гигантов уменьшается от 1.2 до 0.9 при увеличении $\log t$ от 8.2 до 9.8 и при увеличении M от 1 до 4 $M_{\odot}$. Показано, что для большинства магнитных гигантов значения $[N/C]$ занижены (до 0.4 dex) по сравнению с немагнитными гигантами с такими же значениями t или M . Высказано предположение, что такие различия в величине $[N/C]$ между этими двумя группами звезд объясняется тем, что эволюция красных гигантов с магнитными полями (на стадии главной последовательности (ГП) поля могли быть сильными) может отличаться от эволюции гигантов без магнитных полей. В частности, магнитное поле может подавлять процесс перемешивания уже на стадии ГП и, особенно в фазе “First Dredge-Up” (FDU), что и приводит к снижению величины $[N/C]$ у магнитных гигантов.

Ключевые слова: красные гиганты, химический состав, эволюция

DOI: 10.31857/S0004629924090057 **EDN:** IBDNRI

1. ВВЕДЕНИЕ

Мы продолжаем серию работ по исследованию химического состава близких G и K-гигантов, отличающихся какими-либо особенностями. В работе [1] были определены фундаментальные параметры и содержания ключевых легких элементов Li, C и O для 9 K-гигантов с планетами. В работе [2] был проанализирован химический состав гигантов EK Eri and OU And с магнитными полями, которые были объявлены вероятными потомками магнитных Ap-звезд. Далее, в работе [3] был детально исследован химический состав 9 гигантов с планетами из списка [1]. Наконец, в работе [4] были определены фундаментальные параметры и химический состав 20 G и K-гигантов с магнитными полями в окрестности Солнца. Отметим, что в статьях [3, 4] не было найдено систематических отличий в содержаниях элементов для гигантов с планетами и гигантов с магнитными полями от нормальных гигантов. Важно отметить, что анализ химического состава во всех

четырех работах был выполнен по единой методике.

Особое внимание в работах [1, 2, 3, 4] было уделено элементам группы CNO, которые считаются ключевыми в теории эволюции звезд. Как известно, эти элементы участвуют в реакциях горения водорода на стадии главной последовательности (ГП), самой продолжительной стадии в эволюции звезды, и их содержание в ядре звезды существенно меняется, особенно C и N. Содержание N значительно увеличивается, а содержание C, наоборот, уменьшается. При этом изменения в содержаниях CNO-элементов на стадии ГП могут наблюдаться и в поверхностных слоях звезды, если ее скорость вращения достаточно велика. Особенно сильные изменения в процессе эволюции испытывает отношение N/C. После ухода с ГП, когда звезда становится красным гигантом, отношение N/C в звездной атмосфере может возрасти более чем на порядок.

В данной работе мы будем рассматривать величину $[N/C] = \log(N/C) - \log(N/C)_{\odot}$, разницу между звездой и Солнцем, где для Солнца принято $\log(N/C)_{\odot} = -0.62$ [5]. Чтобы найти величину $[N/C]$ для данной звезды, прежде всего, необходимо определить для нее содержание азота $\log_e(N)$ и содержание углерода $\log_e(C)$; отсюда получаем $\log(N/C) = \log_e(N) - \log_e(C)$, и далее вычисляем $[N/C]$.

Очевидно, что точность величины $[N/C]$ зависит от точности определения содержаний N и C . Анализ содержаний углерода $\log_e(C)$, использованных в настоящей работе, был выполнен по линиям $C\ I$; его методика описана в статье [1]. Расчеты линий $C\ I$ были проведены при отказе от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие); благодаря этому было получено хорошее согласие между линиями в видимой и инфракрасной областях. Что касается содержания азота $\log_e(N)$, то ввиду слабости линий $N\ I$ в спектрах красных гигантов мы использовали для его определения линии молекулы CN в спектральном интервале 7985–8025 Å (детали см. в [2]). Этот метод позволил найти не только содержание азота, но и отношение изотопов углерода $^{12}C/^{13}C$. Как содержание C , так и содержание N для каждой звезды определялось индивидуально путем вычисления синтетических спектров и их “ручной” подгонки к наблюдаемым спектрам. Мы считаем, что такая методика позволила оценить величину $[N/C]$ для программных гигантов с достаточно высокой надежностью.

В работах [3, 4] было показано, что величина $[N/C]$ демонстрирует ярко выраженную корреляцию с $[N/O]$, другой характерной величиной в группе CNO -элементов. При этом, согласно [4], для 20 гигантов с магнитными полями не было найдено каких-либо явных систематических отличий в содержаниях элементов и, в частности, в зависимости между $[N/C]$ и $[N/O]$ от 7 гигантов без магнитных полей. С одной стороны, число рассмотренных гигантов (особенно немагнитных), вероятно, является недостаточным, чтобы делать уверенные выводы. Однако, с другой стороны, содержания элементов, а также отношения содержаний в группе CNO взаимосвязаны, поэтому чтобы получить дополнительную, не связанную с CNO -элементами информацию, следует поискать зависимость между $[N/C]$ и, например, такими фундаментальными параметрами как масса и возраст гигантов.

Недавно в работе [6] для красных гигантов в открытых скоплениях была найдена линейная зависимость между средним значением $[N/C]$ в скоплении и средним возрастом t . Используя тот же список звезд, что и в работе [4] (20 магнитных и 7 немагнитных гигантов), мы покажем, что для этих звезд также имеет место зависимость $[N/C]$ от t , при этом имеются систематические различия между гигантами с магнитными полями и немагнитными гигантами (раздел 4).

Мы покажем также, что существует зависимость $[N/C]$ от массы M гигантов. При этом вновь обнаруживаются систематические различия между магнитными и немагнитными гигантами (раздел 5). Возможная причина таких различий обсуждается в разделе 6.

2. СПИСОК ИССЛЕДОВАННЫХ ГИГАНТОВ И ИХ ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В данной работе рассмотрены те же G и K -гиганты, что и в работе [4]. Их список, включающий 20 гигантов с магнитными полями и 7 немагнитных гигантов с планетами, представлен в табл. 1. Наряду с обозначением звезды и ее номером HD, в табл. 1 указаны следующие физические характеристики: эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести g на поверхности звезды (в логарифмической шкале), индекс металличности $[Fe/H]$, масса звезды M в единицах массы Солнца $M_{\odot}$, возраст t и величина $[N/C]$. Все эти параметры были получены в работах [1, 2, 3, 4] на основе единой методики.

Верхнюю часть табл. 1 занимают данные работы [2, 4] для 20 магнитных гигантов, нижнюю часть — данные статьи [1, 3] для 7 немагнитных гигантов с планетами. Как и в работе [2, 4], мы использовали результаты работы [7], где были исследованы магнитные поля 48 красных гигантов. Магнитное поле было детектировано в работе [7] у 29 звезд, из них для анализа химического состава подходящими оказались 20 близких гигантов в пределах 150 пк от Солнца (детали см. в [4]). Для большинства этих звезд максимальное поле B_{max} не превышает 10 Гс (точнее, $B_{\text{max}} = 0.3 - 9.0$ Гс), и лишь для двух гигантов, EK Eri и OU And, поле оказалось значительно сильнее: у них $B_{\text{max}} = 99$ и 41 Гс соответственно. Гиганты EK Eri и OU And и еще две звезды, β Ceti

Таблица 1. Основные физические характеристики исследованных гигантов

Звезда	HD	T_{eff}	$\log g$	[Fe/H]	$M / M_{\odot}$	$t, 10^9$ лет	$^{12}\text{C} / ^{13}\text{C}$	[N/C]
Гиганты с магнитным полем								
β Cet	4128	4800	2.42	−0.01	3.30	0.29	16	1.19 ± 0.10
η Psc	9270	4930	2.33	−0.06	3.90	0.18	24	1.14 ± 0.07
ϵ Tau	28305	4810	2.53	0.13	3.10	0.34	22	1.04 ± 0.06
θ^1 Tau	28307	4955	2.74	0.18	2.90	0.42	23	0.64 ± 0.07
ν^3 CMa	47442	4630	2.11	−0.11	4.10	0.16	22	1.57 ± 0.06
Pup	68290	4930	2.89	0.03	2.30	0.72	23	0.99 ± 0.06
α Hya	81797	4070	1.24	−0.22	2.50	0.72	17	0.71 ± 0.11
d UMa	82210	5200	3.29	−0.25	1.80	1.26	—	0.96 ± 0.07
ν^1 Hya	85444	5005	2.54	0.02	3.40	0.26	18	1.16 ± 0.07
α Boo	124897	4285	1.61	−0.49	1.10	6.41	7	0.91 ± 0.17
δ CrB	141714	5270	3.07	−0.18	2.30	0.68	—	0.95 ± 0.08
k Her A	145001	4990	2.48	−0.12	3.30	0.26	22	1.27 ± 0.09
η Her	150997	4940	2.81	−0.16	2.20	0.77	16	1.03 ± 0.06
ζ Her	163993	4985	2.83	0.07	2.70	0.50	20	0.98 ± 0.08
ι Cap	203387	5035	2.75	−0.02	2.90	0.39	26	1.01 ± 0.07
ρ Cyg	205435	5030	2.95	−0.10	2.30	0.71	25	1.00 ± 0.09
β Gem	62509	4830	2.85	0.03	2.30	0.93	17	0.92 ± 0.06
α Tau	29139	3920	1.20	−0.37	1.20	8.97	13	1.39 ± 0.12
EK Eri	27536	5025	3.26	0.10	1.80	1.32	17	0.64 ± 0.09
OU And	223460	5330	2.83	−0.11	2.90	0.40	—	1.12 ± 0.18
Немагнитные гиганты с планетами								
α Ari	12929	4510	2.40	−0.11	2.00	1.26	18	1.30 ± 0.08
μ Leo	85503	4475	2.50	0.26	1.50	3.63	18	1.03 ± 0.08
γ^1 Leo	89484	4465	1.90	−0.35	2.80	0.42	8	1.09 ± 0.11
ϵ CrB	143107	4360	2.12	−0.10	2.00	1.26	9	1.36 ± 0.12
HR 3145	66141	4265	1.87	−0.35	1.20	5.37	—	1.11 ± 0.12
β UMi	131873	4020	1.31	−0.33	1.60	1.95	13	1.24 ± 0.12
β Cnc	69267	4010	1.37	−0.18	2.50	0.78	13	1.42 ± 0.12

и β Gem, были признаны в работе [7] вероятными потомками магнитных Ap-звезд.

Что касается 7 немагнитных гигантов в нижней части табл. 1, то здесь две звезды, γ^1 Leo и β UMi, как будто действительно следует признать немагнитными, так как они были исследованы в числе 48 гигантов в работе [7] и значимого магнитного поля у них там найдено не было. В отношении остальных пяти звезд термин “немагнитные” является достаточно условным; он лишь означает, что поисков магнитного поля у этих звезд не было. Как будет показано ниже, случай γ^1 Leo требует особого рассмотрения.

Следует еще раз отметить, что все 7 немагнитных гигантов имеют планеты. Планеты могут иметь и некоторые магнитные гиганты в табл. 1; по крайней мере, у трех из них (α Tau, β Gem и ϵ Tau) планеты были обнаружены.

Два параметра гигантов в табл. 1, их масса M и возраст t , играют особую роль в дальнейшем нашем исследовании. Отметим, что массы M рассмотренных гигантов варьируются в диапазоне от 1.1 до $4.1 M_{\odot}$, а их возраст t занимает интервал от 160 миллионов до 9 миллиардов лет.

Необходимо отметить, что значения M и t , приведенные в табл. 1, основаны на эволюционных расчетах, выполненных без учета магнитного

поля. Когда подобные расчеты будут проведены для моделей с магнитным полем, оценки M и t для магнитных гигантов могут несколько измениться.

3. ГИГАНТЫ НА ЭВОЛЮЦИОННОЙ ДИАГРАММЕ И ЗАВИСИМОСТЬ “МАССА – ВОЗРАСТ”

На рис. 1 в плоскости $\{T_{\text{eff}}, \log g\}$ представлена диаграмма, которая иллюстрирует эволюционный статус исследуемых гигантов. Здесь наряду с позициями исследуемых звезд (заполненные и открытые кружки – магнитные и немагнитные гиганты соответственно) представлены эволюционные треки MIST [8], рассчитанные для масс $M = 1, 2, 3$ и $4 M_{\odot}$. Треки показаны как для нормального значения индекса металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ (толстые линии), так и для пониженного значения $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$ (тонкие линии). Видим, что все гиганты находятся на стадии Ветви Красных Гигантов или ВКГ (RGB, Red Giant Branch). При этом большинство этих звезд, как было показано в работе [4], испытало на ВКГ глубокое конвективное перемешивание (фаза First Dredge-Up или FDU), о чем свидетельствуют низкие значения отношения изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 7 - 26$ (для Солнца $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$).

Известно, что существует тесная связь между массой M и возрастом t красных гигантов. Подтверждением служит рис. 2, где представлена полученная нами антикорреляция между $\log t$ и M для исследуемых гигантов. Объяснение такой зависимости было дано в работе [1]: возраст красных гигантов на ВКГ на 95% определяется их временем жизни на стадии ГП, самой длительной стадии в эволюции звезды; но это время, как известно, сильно зависит от массы M .

4. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ $[N/C]$ ОТ ВОЗРАСТА ГИГАНТОВ

На рис. 3 представлена зависимость величины $[N/C]$ от возраста гигантов. Здесь основная масса магнитных гигантов, 15 из 20 звезд, образует компактную последовательность, которая аппроксимирована сплошной ломаной линией и демонстрирует уменьшение $[N/C]$ от 1.2 до 0.9 при увеличении $\log t$ от 8.2 до 9.8. Гигант α Boo (Арктур), имеющий самый большой возраст, $\log t = 9.8$, и поэтому на рис. 3 сильно смещенный

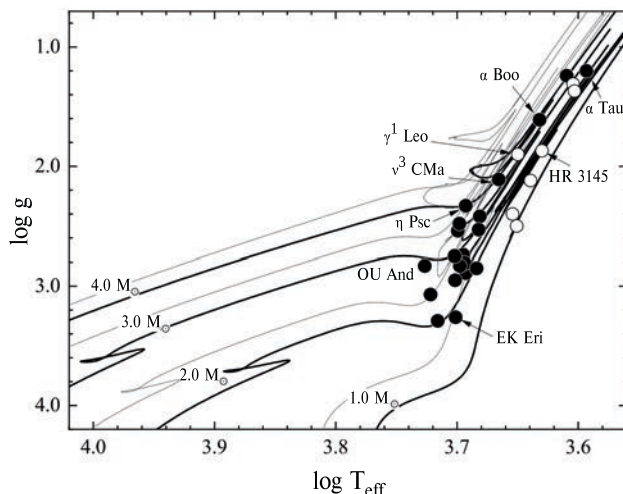


Рис. 1. Диаграмма $\{\log T_{\text{eff}}, \log g\}$ для программных гигантов. Представлены эволюционные треки MIST [8] для масс $M = 1, 2, 3$ и $4 M_{\odot}$; толстые линии соответствуют трекам с нормальной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$, тонкие линии – трекам с пониженной металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.5$. Здесь и на всех последующих рисунках заполненные кружки соответствуют магнитным гигантам, открытые кружки – немагнитным гигантам. Отмечены некоторые наиболее интересные гиганты.

вправо, тем не менее, хорошо ложится на указанную линию.

Шесть из семи немагнитных гигантов (исключая γ^1 Leo) образуют отдельную последовательность, она аппроксимирована штриховой прямой и лежит заметно выше последовательности, полученной для магнитных гигантов.

Особый случай представляет немагнитный гигант $\gamma^1 \text{Leo} = \gamma \text{LeoA} = \text{HD } 89484$, который на рис. 3 почему-то оказался среди магнитных гигантов. Как отмечалось выше, в работе [7] магнитного поля у этой звезды найдено не было. Можно предположить, что в действительности это гигант со слабым остаточным магнитным полем $B_{\text{max}} \leq 0.2$ Гс, которое на ГП могло быть значительно сильнее.

Итак, на рис. 3 мы выделяем две зависимости $[N/C]$ от $\log t$, а именно: 1) основная зависимость для магнитных гигантов (15 звезд) и 2) зависимость для немагнитных гигантов (6 звезд). Имеется очевидное систематическое разделение, то есть сдвиг по величине $[N/C]$ между этими зависимостями. При этом разница между немагнитными и магнитными гигантами зависит от воз-

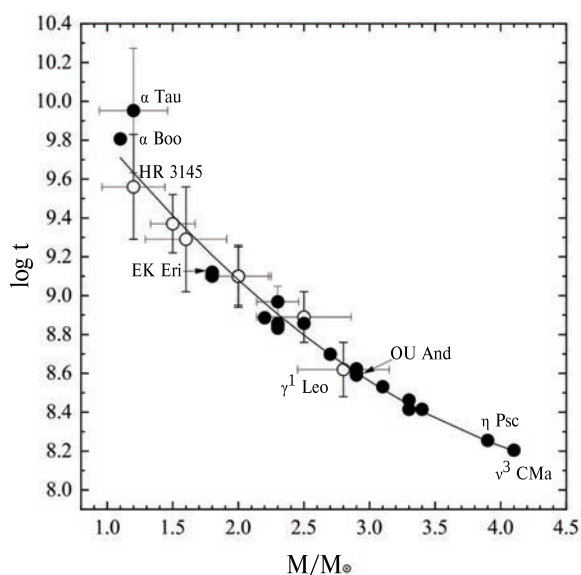


Рис. 2. Зависимость возраста программных гигантов от их массы. Сплошная кривая — аппроксимация, полученная методом наименьших квадратов.

раста: она составляет около 0.4 dex при $\log t \sim 9.0$ и всего лишь около 0.1 dex при $\log t \sim 9.5$.

Пять звезд на рис. 3 выпадают из общей зависимости для магнитных гигантов. В частности, три гиганта, θ^1 Tau, α Hya и EK Eri, показали здесь особенно низкие значения $[N/C] \approx 0.6 - 0.7$. Это можно объяснить тем, что эти звезды имели нулевую начальную скорость вращения (см. ниже).

Напротив, магнитные гиганты v^3 CMa и α Tau показали очень высокие значения $[N/C] = 1.4 - 1.6$. Примечательно, что в списке рассмотренных гигантов эти звезды демонстрируют экстремальные значения массы M и возраста t . Действительно, как видно из табл. 1 и рис. 2, звезда v^3 CMa является самой молодой и самой массивной в нашем списке, а звезда α Tau (Альдебаран), напротив, самой старой и почти самой маломассивной (напомним также, что α Tau имеет планету).

Во Введении было отмечено, что в работе Касали и др. [6] была найдена зависимость средней величины $[C/N]$ для гигантов рассеянных скоплений от их возраста. Согласно рис. 8 из этой статьи, если перейти от $[C/N]$ к величине $[N/C] = -[C/N]$, последняя меняется от 0.9 до 0.3 при увеличении $\log t$ от 8.2 до 9.8. Такие значения $[N/C]$ из работы [6] существенно занижены по сравнению с большинством наших

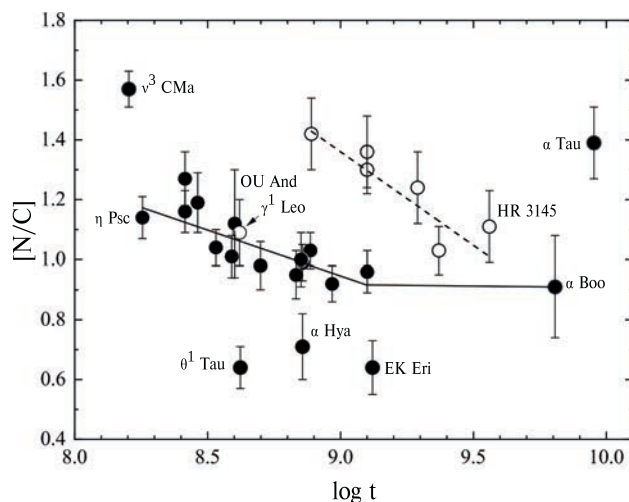


Рис. 3. Зависимость величины $[N/C]$ от возраста гигантов. Сплошная ломаная линия представляет усредненную зависимость для 15 магнитных гигантов, штриховая линия — то же для 6 немагнитных гигантов.

значений, представленных на рис. 3. Основная причина такого различия, по нашему мнению, заключается в принципиально разном эволюционном статусе звезд в работе [6] и наших гигантов.

Действительно, отбор звезд в статье [6] для всех скоплений проводился так, чтобы соответствовать определенному моменту эволюции, когда в начале фазы FDU величина $[C/N]$ начинала монотонно уменьшаться (а величина $[N/C]$, соответственно, увеличиваться). Таким образом, отобранные в [6] гиганты находились в самом начале перемешивания во время FDU. Напротив, в нашей работе программные гиганты уже завершили фазу FDU, о чем говорят их низкие значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 7 - 26$, типичные для post-FDU звезд. Таким образом, звезды в [6] соответствовали более раннему моменту эволюции, чем наши гиганты, что и явилось основной причиной заниженных значений $[N/C]$ в работе [6].

5. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ $[N/C]$ ОТ МАССЫ ГИГАНТОВ

Поскольку возраст t рассмотренных гигантов, согласно рис. 2, находится в тесной зависимости от их массы M , естественно предположить, что величина $[N/C]$ показывает тренд не только с t , но и с M . Зависимость $[N/C]$ от массы M представлена на рис. 4. Здесь, как и на рис. 3, наиболее заметна последовательность для магнитных гигантов; она аппроксимирована

сплошной кривой (15 звезд, включая α Boo/Арктур).

Мы привели здесь также результаты теоретических расчетов [9] для моделей вращающихся звезд с массами 2.5, 3.0 и 4.0 $M_{\odot}$ (толстые ломаные линии). Расчеты зависят от начальной относительной угловой скорости вращения $\Omega_0 / \Omega_{\text{crit}}$, где Ω_0 — начальная скорость вращения, Ω_{crit} — критическая скорость. Видим, что основная последовательность для магнитных гигантов хорошо соответствует модельным расчетам при $\Omega_0 / \Omega_{\text{crit}} = 0.6$. Следует отметить, что последнее значение получено на основе моделей, рассчитанных без учета магнитного поля. Когда подобные расчеты будут проведены для моделей с магнитным полем, оценка $\Omega_0 / \Omega_{\text{crit}} = 0.6$ для магнитных гигантов может несколько измениться.

Как видно из рис. 4, основная последовательность для немагнитных гигантов (штриховая линия), как и на рис. 3, лежит систематически выше, чем для магнитных гигантов, и не может быть описана теорией без привлечения гипотезы “extra mixing” (см. ниже).

Как и на рис. 3, звезда γ^1 Leo, включенная нами в группу немагнитных гигантов, на рис. 4 заняла уверенное положение среди магнитных звезд. Это подтверждает, что статус гиганта γ^1 Leo должен быть пересмотрен. Мы предполагаем, что это магнитная звезда со слабым полем (которое на стадии ГП могло быть значительно сильнее).

Положения трех магнитных гигантов, θ^1 Tau, α Hya и EK Eri, с наиболее низкими значениями $[N/C] = 0.6 - 0.7$ хорошо соответствуют теоретическим расчетам при нулевой скорости $\Omega_0 / \Omega_{\text{crit}} = 0.0$.

Исключительное положение на рис. 4, как и на рис. 3, занимают магнитные гиганты v^3 CMa и α Tau с высокими значениями $[N/C] = 1.4 - 1.6$, которые можно объяснить лишь с привлечением гипотезы дополнительного неконвективного перемешивания (“extra mixing”).

Эта гипотеза в отношении красных гигантов после FDU уже более двух десятков лет обсуждается в литературе; она была применена для объяснения некоторых особенностей в наблюдаемых содержаниях легких элементов Li, C, N и O у таких звезд, которые не удавалось объяснить в рамках стандартной теории (см., напр., [10, 11]). По-видимому, идея “extra mixing” необходима

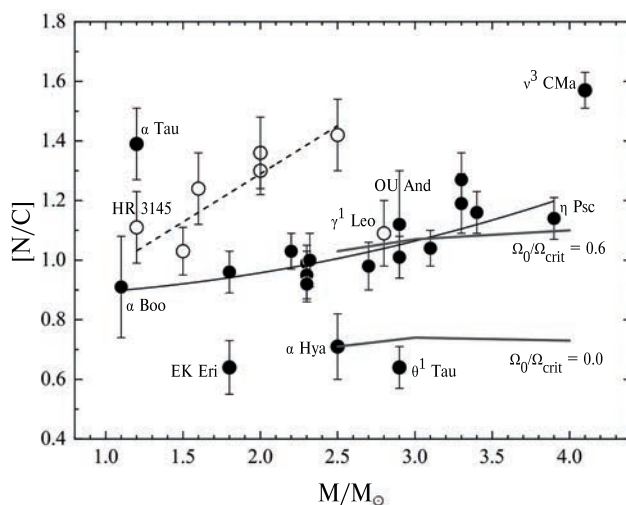


Рис. 4. Зависимость величины $[N/C]$ от массы гигантов. Сплошная кривая представляет усредненную зависимость для 15 магнитных гигантов, штриховая линия — то же для 6 немагнитных гигантов. Толстыми ломаными линиями показаны результаты теоретических расчетов для моделей вращающихся звезд при двух значениях начальной относительной скорости вращения (0.0 и 0.6).

и для объяснения высоких значений $[N/C]$ у гигантов v^3 CMa и α Tau.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, рассмотрение зависимостей величины $[N/C]$ от возраста исследуемых гигантов t (рис. 3), а также от их массы M (рис. 4) привело к двум интересным результатам. Первый из них состоит в том, что большинство рассмотренных звезд показало явную антикорреляцию между $[N/C]$ и величинами t и M , этими двумя фундаментальными параметрами звезд. В частности, величина $[N/C]$ у магнитных гигантов уменьшается от 1.2 до 0.9 при увеличении $\log t$ от 8.2 до 9.8 и при увеличении M от 1 до 4.0 $M_{\odot}$.

Несомненно, определяющим параметром в эволюции звезды является ее масса M . От нее сильно зависят, в том числе, и все эволюционные изменения химического состава, происходящие в поверхностных слоях звезды. Чем больше масса M , тем больше эти изменения, что и демонстрирует рис. 4.

Возраст красных гигантов t является вторичной величиной по отношению к их массе M , так как имеется почти функциональная зависимость между M и t для таких звезд (рис. 2). Отсюда

следует, что рис. 3 является просто следствием рис. 4.

Если первый результат нашей работы можно считать вполне ожидаемым, то второй ее результат является совсем нетривиальным. Он состоит в том, что на рис. 3 и 4 большинство магнитных гигантов показало систематически более низкие значения $[N/C]$, чем гиганты без магнитных полей. Можно считать, что этот результат носит предварительный характер, поскольку число немагнитных гигантов недостаточно для окончательного заключения.

Этому наблюдательному факту, если он подтвердится, можно дать такое естественное объяснение: эволюция звезд с магнитным полем отличается от эволюции звезд без магнитного поля. Прежде всего, это относится к перемешиванию, которое для звезд с заметным вращением имеет место уже на стадии ГП. Затем, на стадии ВКГ, когда имеет место глубокое конвективное перемешивание, влияние магнитного поля также может оказаться существенным, хотя поле там может быть значительно слабее, чем на ГП. Наше предположение состоит в том, что магнитное поле подавляет процесс перемешивания, что и приводит к меньшим значениям величин $[N/C]$, чем для гигантов без магнитного поля.

Мы уже отмечали, что для большинства наших гигантов измеренное в [7] магнитное поле достаточно мало ($B_{\max} < 10$ Гс), и лишь для двух гигантов, ЕК Eri и OU And, поле оказалось значительно сильнее ($B_{\max} = 99$ и 41 Гс соответственно). Гиганты ЕК Eri и OU And были обозначены в [7] как вероятные потомки магнитных Ар-звезд. Еще два гиганта, β Gem и β Cet, показавшие небольшие магнитные поля ($B_{\max} = 0.7$ и 9.0 Гс соответственно), также были отнесены в [7] к категории возможных потомков магнитных Ар-звезд.

Существует ли какая-то зависимость $[N/C]$ от $B_{\max}$? Гигант ЕК Eri с максимальным полем $B_{\max} = 99$ Гс занимает на рис. 3 и 4 очень низкое положение, но столь же низкое положение занимают здесь звезды α Нуа и θ^1 Тау с очень слабым полем $B_{\max} = 0.6 - 0.7$ Гс, так что явной зависимости от $B_{\max}$ здесь не наблюдается. Гиганты β Gem и β Cet со слабым полем, вероятные потомки Ар-звезд, на рис. 3 и 4 никак не выделяются на фоне основной последователь-

ности для магнитных звезд. Мы приходим к заключению, что зависимость от $B_{\max}$ не обнаружена.

Можно предположить, что не только ЕК Eri, OU And, β Gem и β Cet, но и другие магнитные гиганты нашего списка в своем большинстве, когда они находились на стадии ГП, были магнитными Ар-звездами и, следовательно, имели тогда сильные поля.

Вопрос об эволюции магнитных Ар-звезд исследован слабо. Например, авторы обзора [12], основываясь на данных наблюдений, отметили вероятное уменьшение магнитного поля в процессе эволюции на ГП, при этом эффект, возможно, зависит от массы звезды. Очевидно, что модельные расчеты эволюции магнитных звезд с массами $(1 - 4)M_{\odot}$ достаточно сложны; такие расчеты нам неизвестны.

В литературе отмечалось, что после выхода из ГП и перехода в стадию красного гиганта магнитное поле значительно ослабевает вследствие увеличения радиуса звезды и уменьшения ее скорости вращения (см., напр., [13]).

Представляет интерес сравнение полученных результатов с данными работы [14], где исследована величина $[N/C]$ для AFG-сверхгигантов и ярких гигантов. Это более массивные звезды (в большинстве они имеют массы $M = (5 - 15)M_{\odot}$), поэтому они эволюционируют быстрее и имеют гораздо меньший возраст ($t < 180$ млн лет). Для этих звезд также наблюдается тренд величины $[N/C]$ с возрастом, однако разброс велик (от 0.1 до 1.6). Он вызван двумя причинами: 1) большой зависимостью от начальной скорости вращения и 2) наличием в этой группе звезд в двух фазах эволюции — после ГП (фаза post-MS) и фаза post-FDU.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Величина $[N/C]$ известна как один из самых чувствительных индикаторов эволюции звезд. Наш анализ данных об этой величине для 20 красных гигантов с магнитными полями, а также для 7 немагнитных гигантов привел к следующим результатам. Большинство магнитных гигантов (15 из 20) и все немагнитные гиганты показали зависимость величины $[N/C]$ от возраста звезд t и их массы M . В частности, величина $[N/C]$ у магнитных гигантов уменьшается от 1.2

до 0.9 при увеличении $\log t$ от 8.2 до 9.8 и при увеличении M от 1 до $4.0 M_{\odot}$.

На основную зависимость для магнитных гигантов хорошо ложится звезда γ^1 Leo, которая сначала была включена нами в список 7 немагнитных звезд. Выдвинуто предположение, что в действительности это магнитный гигант со слабым полем $B_{\max} \leq 0.2$ Гс, которое на стадии ГП могло быть значительно сильнее (если γ^1 Leo — бывшая магнитная Ар-звезда).

Оставшиеся 6 немагнитных гигантов образуют отдельную зависимость, которая лежит систематически выше основной зависимости для магнитных гигантов. Разница в значениях $[N/C]$ между немагнитными и магнитными гигантами растет с уменьшением возраста t и с увеличением массы M и достигает 0.4 dex.

Пять магнитных гигантов выпадают из общей зависимости, полученной по 15 звездам. Из них три гиганта, θ^1 Tau, α Нуа и EK Eri, с наиболее низкими значениями $[N/C] = 0.6 - 0.7$, согласно расчетам, соответствуют моделям звезд с нулевой начальной скоростью вращения. Два других магнитных гиганта, ν^3 CMa и α Tau, напротив, имеют очень высокие значения $[N/C] = 1.4 - 1.6$, и для их объяснения приходится привлекать известную гипотезу дополнительного неконвективного перемешивания (extra mixing).

Основной результат настоящей работы — это обнаружение систематического различия в величине $[N/C]$ между основной массой магнитных гигантов и немагнитными гигантами. Мы предположили, что эволюция этих двух групп звезд происходит по-разному. В частности, магнитное поле подавляет процесс перемешивания у магнитных гигантов, что и приводит к меньшим

значениям величинам $[N/C]$ у них, чем у гигантов без магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. S. Lyubimkov, S. A. Korotin, D. V. Petrov, D. B. Poklad, D. E. Mkrtichian, I. Han, and B.-C. Lee, *Astron. Nachricht.* **342**, 497 (2021).
2. Л. С. Любимков, С. А. Коротин, Д. В. Петров, Д. Б. Поклад, Д. О. Кудрявцев, Д. Н. Бакланова, *Астрофизика* **65**, 63 (2022).
3. Л. С. Любимков, Д. Б. Поклад, С. А. Коротин, *Астрофизика* **65**, 515 (2022).
4. L. S. Lyubimkov, S. A. Korotin, D. V. Petrov, and D. B. Poklad, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **528**, 304 (2024).
5. K. Lodders, *Space Sci. Rev.* **217**, id. 44 (2021).
6. G. Casali, L. Magrini, E. Tognelli, R. Jackson, et al., *Astron. and Astrophys.* **629**, id. A62 (2019).
7. M. Aurière, R. Konstantinova-Antova, C. Charbonnel, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, id. A90 (2015).
8. J. Choi, A. Dotter, C. Conroy, M. Cantiello, B. Paxton, and B. D. Johnson, **823**(2), id. 102 (2016).
9. C. Georgy, S. Ekström, A. Granada, G. Meynet, N. Mowlavi, P. Eggenberger, and A. Maeder, *Astron. and Astrophys.* **553**, id. A24 (2013).
10. C. Abia, S. Palmerini, M. Busso, and S. Cristallo, *Astron. and Astrophys.* **548**, id. A55 (2012).
11. M. Shetrone, J. Tayar, J. A. Johnson, G. Somers, et al., **872**(2), id. 137 (2019).
12. P. L. North, J. Babel, and D. Erspamer, *Contrib. Astron. Observ. Skalnat Pleso* **38**, 375 (2008).
13. J. D. Landstreet, in *Magnetic Stars*, Proc. Intern. Conf., held in the Special Astrophysical Observatory of the Russian AS, August 27–31, 2003, edited by Yu. Glagolevskij, D. Kudryavtsev, and I. Romanyuk, p. 11 (2004).
14. L. S. Lyubimkov, D. L. Lambert, S. A. Korotin, T. M. Rachkovskaya, and D. B. Poklad, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 3447 (2015).

THE $[N/C]$ VALUE AS AN INDICATOR OF THE RED GIANT EVOLUTION: OBSERVED DIFFERENCES BETWEEN MAGNETIC AND NON-MAGNETIC GIANTS

L. S Lyubimkov*, D. B. Poklad**

Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nauchny, Russia

*E-mail: lyub@craocrimea.ru

**E-mail: dmitry.crao@gmail.com

An analysis is performed of data concerning the $[N/C]$ value, one of the most sensitive indicators of stellar evolution, for 20 red giants with magnetic fields in comparison with similar data for 7 non-magnetic giants. For the most giants in question the $[N/C]$ value showed a dependence on the age t and mass M . In particular, the $[N/C]$ value for the most of magnetic giants decreases from 1.2 to 0.9 when $\log t$ increases from 8.2 to 9.8 and M increases from 1 to 4 $M_{\odot}$. It was shown that for the most of magnetic giants the $[N/C]$ values are lowered (up to 0.4 dex) as compared with non-magnetic giants with the same values of t or M . The supposition was made that such differences in the $[N/C]$ values between these two groups of stars are explained by different ways of stellar evolution of red giants with magnetic fields (on the main sequence (MS) stage the fields could be strong) and giants without magnetic fields. In particular, the magnetic field can suppress the mixing process on the MS stage already and especially in the First Dredge-Up (FDU) phase; that leads to the $[N/C]$ lowering in magnetic giants.

Keywords: red giants, chemical composition, evolution