

DOI: 10.54503/0571-7132-2025.68.3-225

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ С МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ: ОБЗОР ПОСЛЕДНИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Л.С.ЛЮБИМКОВ

Поступила 30 апреля 2025

Принята к печати 10 сентября 2025

На основе серии работ, выполненных недавно в Крымской астрофизической обсерватории, рассмотрены данные о химическом составе 20 G- и K-гигантов с магнитными полями в сравнении с химическим составом 7 немагнитных гигантов. Обнаружены существенные различия в содержании лития и в величине $[N/C]$ между магнитными и немагнитными гигантами; оба эти параметра, как известно, являются чувствительными индикаторами эволюции звезд. Показано, что литий отсутствует почти у всех немагнитных гигантов, в полном соответствии с предсказаниями теории относительно эволюции гигантов, прошедших глубокое конвективное перемешивание в фазе FDU. Напротив, у большинства магнитных гигантов литий присутствует в атмосфере. Далее, величина $[N/C]$, рассмотренная как функция возраста и массы, показывает систематические различия между магнитными и немагнитными гигантами. Обсуждаются возможные объяснения найденных различий в химическом составе двух типов гигантов. Показано, что суммарное содержание C+N+O, которое в течение эволюции звезды, по-видимому, остается постоянным, демонстрирует явную зависимость от индекса металличности $[Fe/H]$, причем не только для рассмотренных гигантов, но в расширенном диапазоне $[Fe/H]$ от -2.5 до +0.3.

Ключевые слова: *красные гиганты; магнитное поле; химический состав*

1. Введение. Благодаря многолетним исследованиям химический состав красных гигантов изучен достаточно хорошо. Например, установлены аномалии некоторых легких элементов, имеющие эволюционную природу. В частности, обнаружена характерная для таких звезд антикорреляция между содержаниями азота и углерода. Однако в последние годы в этой проблеме появились два новых момента, требующие дополнительных исследований.

Во-первых, были открыты тысячи экзопланет около звезд, в том числе планеты были найдены примерно у 200 красных гигантов. Возникает вопрос, касающийся химического состава таких гигантов; возможно, он имеет какие-то особенности, которые могли бы как-то способствовать формированию планет около таких звезд.

Во-вторых, у некоторых красных гигантов были обнаружены магнитные поля и этот факт представляется довольно неожиданным с точки зрения стандартной теории звездной эволюции. Дело в том, что на стадии красного

гиганта звезда испытывает глубокое конвективное перемешивание, при котором сохранение магнитного поля вряд ли возможно. Возникает вопрос: каким образом могло появиться магнитное поле у таких звезд? Другой вопрос касается химического состава: имеются ли какие-нибудь различия в химическом составе между магнитными и немагнитными гигантами? В настоящем обзоре мы попытаемся ответить на эти вопросы.

В серии работ, выполненных в Крымской астрофизической обсерватории, исследовались красные гиганты в окрестности Солнца, принадлежащие обоим указанным выше типам: гиганты с планетами, гиганты с магнитными полями. В частности, в работах [1,2] были определены физические параметры и химический состав 9 близких К-гигантов с планетами. В настоящем обзоре, основываясь на измерениях магнитных полей [3], обсуждены результаты, полученные недавно для 20 красных гигантов с магнитными полями. Они опубликованы в работах [4-7] и содержат основные физические параметры гигантов и высокоточные данные об их химическом составе.

Из 29 G- и К-гигантов, у которых в [3] было обнаружено магнитное поле, для анализа химического состава в [5] были отобраны 20 гигантов, лежащих в пределах 150 пк от Солнца. Максимальное магнитное поле B_{max} у этих 20 звезд, согласно [3], варьируется в диапазоне от 0.3 до 98.6 Гс, но в большинстве случаев $B_{max} < 10$ Гс. Только для двух звезд в [3] было детектировано сравнительно большое поле: $B_{max} = 98.6$ Гс для EK Eri и 41.4 Гс для OU And. Эти два гиганта были признаны в [3] вероятными потомками магнитных Ар-звезд. Данные о химическом составе 20 магнитных гигантов, полученные в [4-7], были сравнены с данными [1,2] для немагнитных гигантов.

Отметим, что две звезды, α Tau (Альдебаран) и β Gem (Поллукс), оказались в обоих списках - и среди гигантов с планетами в [1,2], и среди гигантов с магнитными полями в [4-7]. Если учесть это обстоятельство, то мы имеем в [1,2] данные для 7 немагнитных гигантов с планетами. При сравнении магнитных и немагнитных гигантов важно, что содержания элементов для всех этих звезд были определены по единой методике. Такое сравнение помогает ответить на важный вопрос: существуют ли какие-либо различия в химическом составе этих двух типов звезд?

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

2. Базисные физические параметры и эволюционный статус рассмотренных гигантов. Для всех рассмотренных G- и К-гигантов (20 магнитных и 7 немагнитных гигантов) были определены основные физические

характеристики, включая эффективную температуру T_{eff} , ускорение силы тяжести $\log g$, индекс металличности $[Fe/H]$, массу звезды M в массах Солнца $M_{\odot}$ и ее возраст t . Все эти параметры были получены в указанных выше работах на основе единой методики.

Значения эффективной температуры T_{eff} и ускорения силы тяжести $\log g$ в атмосферах 20 магнитных гигантов, согласно [5], варьируются в интервалах $T_{eff} = 3920 - 5330$ К и $\log g = 1.2 - 3.3$, т.е. являются вполне типичными для G- и K-гигантов. Индекс металличности $[Fe/H]$ занимает околосолнечные значения от -0.49 до $+0.18$.

Два параметра, связанные с эволюцией гигантов, конкретно их масса M и возраст t , представляют особый интерес. Отметим, что массы M рассмотренных звезд варьируются в диапазоне от 1.1 до $4.1 M_{\odot}$, а их возраст t занимает интервал от 160 млн до 9 млрд лет. Необходимо отметить, что значения M и t были найдены на основе эволюционных расчетов MIST [8], выполненных без участия магнитного поля. Когда эволюционные расчеты будут проведены для моделей с магнитным полем, оценки M и t для

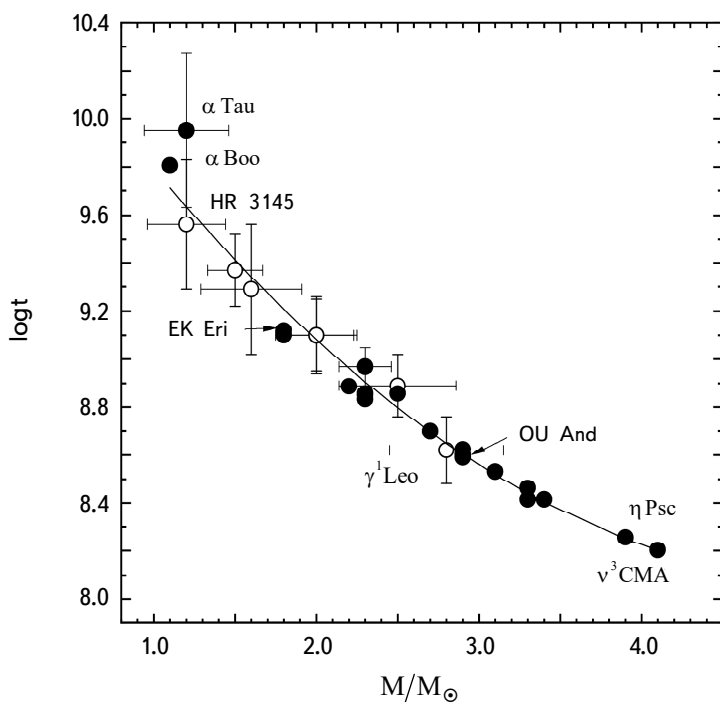


Рис.1. Зависимость возраста от массы для 20 магнитных гигантов (заполненные кружки) и 7 немагнитных гигантов (незаполненные кружки). Отмечены некоторые звезды, представляющие особый интерес. Сплошная кривая - аппроксимация, полученная методом наименьших квадратов. Отметим, что два немагнитных гиганта, α Agi и ϵ CrB, имеют одинаковые координаты: $M/M_{\odot} = 2.0$ и $\log t = 9.10$.

магнитных гигантов могут несколько измениться.

Из рис.1, взятом из [6], видно, что существует зависимость между массой и возрастом гигантов: чем меньше масса, тем больше возраст. Такая анти-корреляция "масса-возраст" для красных гигантов, как отмечено в [1], вполне объяснима. Действительно, возраст таких звезд определяется в основном их временем жизни на стадии главной последовательности (ГП), наиболее продолжительной стадии эволюции, а время жизни на ГП сильно зависит от массы звезды.

Важным показателем эволюционного статуса красных гигантов служит отношение изотопов углерода $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Согласно [5,6], рассмотренные гиганты находятся на стадии ВКГ (Ветвь Красных Гигантов или RGB = Red Giant Branch) и демонстрируют значительное понижение величины $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$: $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 7 - 26$ для магнитных гигантов и $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 8 - 18$ для немагнитных гигантов (для Солнца $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$). Столь низкие значения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ несомненно доказывают, что эти звезды прошли на стадии ВКГ глубокое конвективное перемешивание (фаза First Dredge-Up или FDU). Этот важный факт необходимо учитывать при анализе химического состава этих звезд.

3. Содержание лития. Литий, как известно, является одним из самых чувствительных индикаторов звездной эволюции. Содержание этого элемента для рассматриваемых гигантов определялось путем подгонки синтетического спектра к наблюдаемому спектру в области резонансной линии LiI 6707.76 Å. Результаты оказались разными для магнитных и немагнитных гигантов.

С одной стороны, из 7 немагнитных гигантов слабая линия LiI 6707.76 Å была детектирована в [2] только у одной звезды, μ Leo, гиганта с наибольшей металличностью; у него $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.26$ и $\log \varepsilon(\text{Li}) = 0.16$. С другой стороны, указанная линия была найдена у 16 из 20 магнитных гигантов (то есть у 80%) [5]. Оказалось, что содержание лития $\log \varepsilon(\text{Li})$ у большинства этих звезд лежит в интервале от 0.6 до 1.5. Отметим, что в эти 80% входят и два гиганта с наибольшими магнитными полями, EK Eri и OU And, у них $\log \varepsilon(\text{Li}) = 1.07$ и 1.52, соответственно.

В чем причина столь резкого различия в содержании лития у магнитных и немагнитных гигантов? Напомним, что и те и другие прошли глубокое конвективное перемешивание в фазе FDU, в результате которого, как ожидалось, весь литий должен был выгореть. Этому вполне соответствуют немагнитные гиганты, у которых литий действительно отсутствует (исключая μ Leo). Однако присутствие лития в атмосферах большинства магнитных гигантов как будто противоречит теории. Представляется неожиданным и присутствие магнитного поля (пусть даже сравнительно слабого) у звезд, прошедших глубокое перемешивание в фазе FDU. Возможные объяснения

этих явлений обсуждаются ниже.

4. *Корреляция между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$.* Особое внимание при исследовании химического состава как магнитных, так и немагнитных гигантов было уделено элементам группы CNO, которые считаются ключевыми в теории эволюции звезд. Как известно, эти элементы участвуют в реакциях горения водорода в ядре звезды на стадии ГП, самой продолжительной стадии в эволюции звезды. На этой стадии в ядре звезды, где идут термоядерные реакции, существенно меняются содержания этих элементов, особенно C и N. Содержание N значительно увеличивается, а содержание C, наоборот, уменьшается. При этом изменения в содержаниях CNO-элементов могут наблюдаться не только в недрах, но и в поверхностных слоях звезды, причем уже на стадии ГП, 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. Здесь мы будем рассматривать величину $[N/C] = \log(N/C) - \log(N/C)_{\odot}$, разницу между звездой

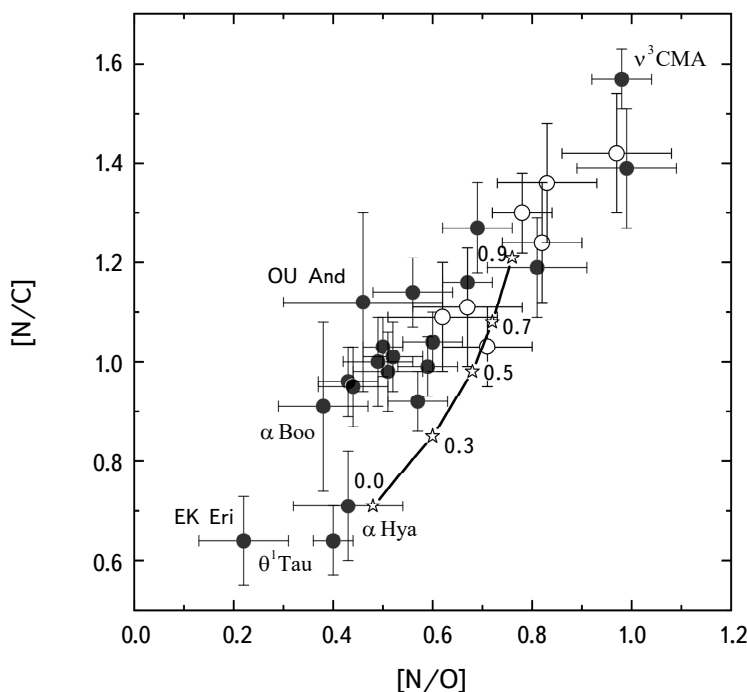


Рис.2. Корреляция между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$ для 20 магнитных гигантов (заполненные кружки) и 7 немагнитных гигантов (незаполненные кружки). Сплошная ломаная линия представляет результаты расчетов [11] для модели вращающейся звезды с массой $2.5 M_{\odot}$ (фаза post-FDU). Вблизи узловых точек на этой линии указаны значения относительной начальной угловой скорости вращения.

и Солнцем, где для Солнца принято $\log(N/C)_{\odot} = -0.62$ [9].

Показательной, с эволюционной точки зрения, является зависимость между величинами $[N/C]$ и $[N/O]$, где величина $[N/O]$ определяется по формуле, аналогичной $[N/C]$. Согласно рис.2, взятом из [5], рассматриваемые гиганты показывают ярко выраженную корреляцию между $[N/C]$ и $[N/O]$. При этом значения $[N/C]$ варьируются от 0.6-0.7 (ЕК Eri, θ^1 Tau и α Hya) до 1.57 (v^3 CMa), т.е. увеличиваются примерно на 1 dex. Интересно сравнить эту зависимость на рис.2 для гигантов со сравнительно малыми массами ($M/M_{\odot} = 1.1 - 4.1$) с аналогичной зависимостью для более массивных AFG-сверхгигантов ($M/M_{\odot} = 4 - 20$). Согласно [10], большинство сверхгигантов показало значения $[N/C]$ между 0.4 и 1.6, что сравнимо с тем, что получено для гигантов на рис.2.

На рис.2 приведена также теоретическая зависимость между $[N/C]$ и $[N/O]$ (сплошная линия) согласно расчетам [11], выполненным для модели вращающейся звезды с массой $2.5 M_{\odot}$ (фаза post-FDU). Узловые точки от 0.0 до 0.9 на этой кривой соответствуют разным значениям Ω_0/Ω_{crit} , где Ω_0 - начальная угловая скорость вращения звезды и Ω_{crit} - критическая скорость вращения. Отметим, что вариации Ω_0/Ω_{crit} от 0 до 0.9 соответствуют вариациям экваториальной скорости вращения от 0 до 316 км/с. Отметим также, что теоретическая кривая для модели $2.5 M_{\odot}$ оказалась очень близкой к кривой для модели $3.0 M_{\odot}$, что говорит о слабой зависимости расчетов от принятой массы.

Из сравнения с теорией можно заключить, что наблюдаемая зависимость $[N/C]$ от $[N/O]$ отражает в основном зависимость этих двух величин от начальной скорости вращения звезд. Однако, как видно из рис.2, теория не может объяснить высокие значения $[N/C]$ от 1.2 до 1.6. Для объяснения этого явления приходится привлекать известную гипотезу дополнительного перемешивания ("extra mixing").

Важный вывод, который следует из рис.2, состоит в том, что зависимость $[N/C]$ от $[N/O]$ не показывает каких-либо заметных систематических различий между магнитными гигантами (заполненные кружки) и немагнитными гигантами (открытые кружки).

5. Зависимость величины $[N/C]$ от возраста и массы гигантов.
Содержания элементов в группе CNO, а также отношения этих содержаний эволюционно взаимосвязаны, поэтому, чтобы получить дополнительную информацию, следует исследовать зависимость между величиной $[N/C]$ и другими, независимыми параметрами. Особый интерес представляет, например, зависимость между $[N/C]$ и такими фундаментальными параметрами как масса и возраст гигантов. В связи с этим можно отметить, например, что в [12] для

красных гигантов в открытых скоплениях была найдена линейная зависимость между средним значением $[N/C]$ в скоплении и средним возрастом t .

На рис.3 представлена найденная в [6] 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 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 γ^1 Leo = γ Leo A = HD 89484, который на рис.3 почему-то оказался среди магнитных гигантов. Следует отметить, что в [3] магнитное поле у этой звезды найдено не было. Можно предположить, что в действительности это гигант со слабым остаточным магнитным полем $B_{max} \leq 0.2$ 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, т.е. сдвиг по величине $[N/C]$ между этими зависимостями. При

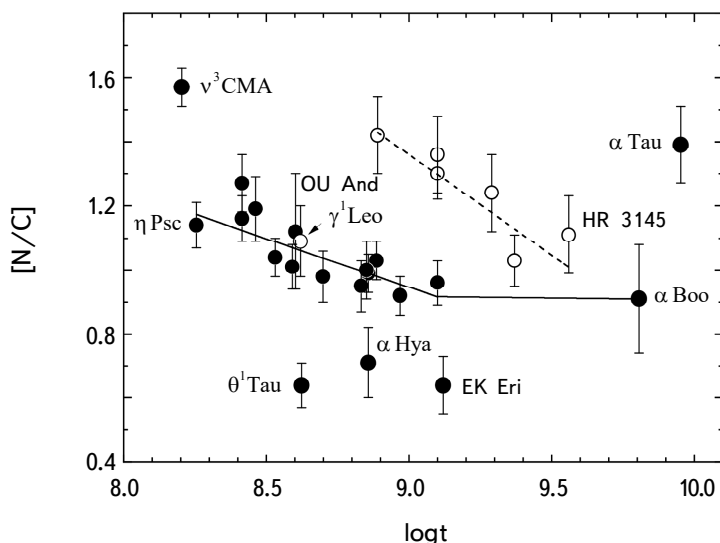


Рис.3. Зависимость величины $[N/C]$ от возраста гигантов. Сплошная ломаная линия представляет усредненную зависимость для 15 магнитных гигантов, штриховая линия - то же для 6 немагнитных гигантов.

этом разница между немагнитными и магнитными гигантами зависит от возраста: 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 $[N/C] \approx 0.6 - 0.7$. Их можно объяснить тем, что эти звезды имели нулевую начальную скорость вращения (см. ниже).

Напротив, магнитные гиганты ν^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, звезда ν^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).

На рис.4, взятом из [6], представлена зависимость величины $[N/C]$ от массы M . Здесь, как и на рис.3, наиболее заметна последовательность для магнитных гигантов; она аппроксимирована сплошной кривой (15 звезд, включая α Boo, Арктур). Здесь приведены также результаты теоретических расчетов [11] для моделей вращающихся звезд с массами $2.5, 3.0$ и $4.0 M_\odot$ (толстые ломаные линии). Как и на рис.2, расчеты зависят от начальной относительной угловой скорости вращения Ω_0/Ω_{crit} , где Ω_0 - начальная скорость вращения, Ω_{crit} - критическая скорость. Видно, что основная

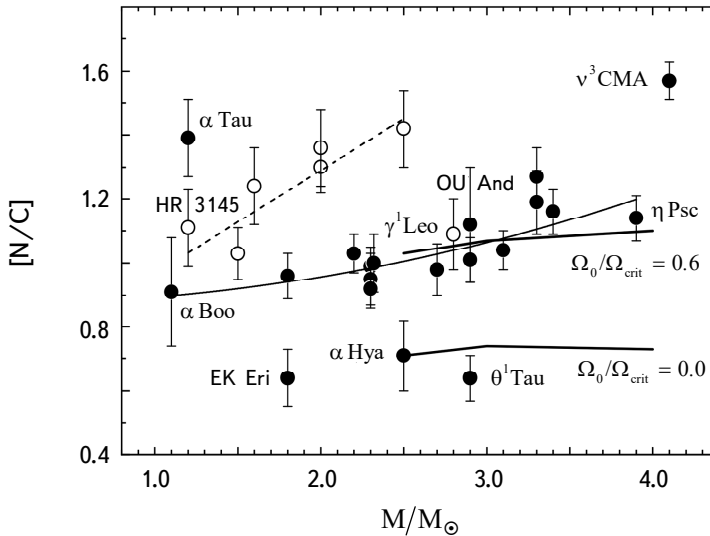


Рис.4. Зависимость величины $[N/C]$ от массы гигантов. Сплошная кривая представляет усредненную зависимость для 15 магнитных гигантов, штриховая линия - то же для 6 немагнитных гигантов. Толстыми ломаными линиями показаны результаты теоретических расчетов [11] для моделей вращающихся звезд при двух значениях начальной относительной скорости вращения (0.0 и 0.6).

последовательность для магнитных гигантов хорошо соответствует модельным расчетам при $\Omega_0/\Omega_{crit} = 0.6$.

Как видно из рис.4, основная последовательность для немагнитных гигантов (штриховая линия), как и на рис.3, лежит систематически выше, чем для магнитных гигантов.

Как и на рис.3, звезда γ^1 Leo, включенная нами в группу немагнитных гигантов, на рис.4 заняла уверенное положение среди магнитных звезд. Вновь предполагаем, что в действительности это магнитная звезда со слабым остаточным 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 $\Omega_0/\Omega_{crit} = 0.0$.

Исключительное положение на рис.4, как и на рис.3, занимают магнитные гиганты ν^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").

Итак, величина $[N/C]$, этот чувствительный индикатор эволюции звезд, рассмотренная как функция возраста и массы, показывает систематические различия между магнитными и немагнитными гигантами. Возможные причины такого различия обсуждаются ниже.

6. *Суммарное содержание C+N+O.* При рассмотрении CNO-элементов специального внимания заслуживает суммарное содержание C+N+O. Имеются данные, как теоретические, так и наблюдательные, указывающие на то, что сумма C+N+O в звезде в процессе ее эволюции остается постоянной (см., например, [13-15]). Другими словами, сумма C+N+O в звезде не меняется с момента ее формирования, и эта величина характеризует химический состав той межзвездной среды, из которой образовалась звезда.

В [5] для рассматриваемых красных гигантов была найдена отчетливая корреляция между суммарным содержанием C+N+O и индексом металличности $[Fe/H]$. Это видно из рис.5, взятом из [5]. Здесь представлены две следующие величины в зависимости от $[Fe/H]$: а) содержание $\log \epsilon(C + N + O)$ в обычной шкале и б) величина $[(C+N+O)/Fe]$, где, как принято, $[El/Fe] = \log(El/Fe) - \log(El/Fe)_\odot$. Две горизонтальные линии на рис.5а соответствуют двум различным солнечным содержаниям $\log \epsilon(C + N + O)$, вычисленным для двух моделей солнечной атмосферы, конкретно 8.94 для 3D-модели (сплошная линия) и 9.02 для 1D-модели (штриховая линия) (основано на данных [9]). Аналогичные прямые, соответствующие Солнцу, проведены и на рис.5б.

На рис.5а, б отчетливо виден тренд суммарного содержания C+N+O с $[Fe/H]$. Здесь значения $[Fe/H]$ варьируются от -0.49 до +0.26, при этом

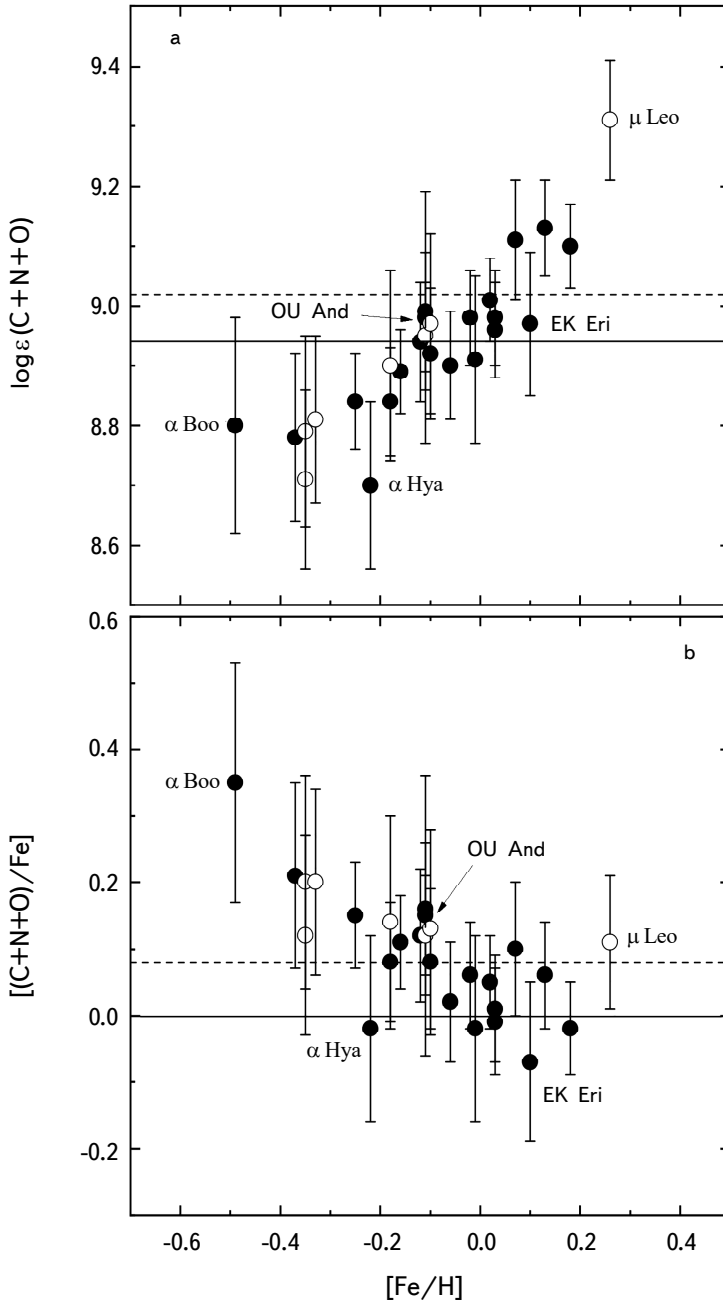


Рис.5. Суммарное содержание C+N+O, конкретно величины (a) $\log \varepsilon(C+N+O)$ и (b) $[(C+N+O)/Fe]$ как функции индекса металличности $[Fe/H]$ для 20 магнитных и 7 немагнитных гигантов (заполненные и открытые кружки, соответственно). Две горизонтальные прямые соответствуют двум разным содержаниям C+N+O для Солнца, полученным для двух моделей солнечной атмосферы: 9.02 для 1D-модели - штриховая линия и 8.94 для 3D-модели - сплошная линия (данные [9]).

величина $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ возрастает примерно от 8.8 до 9.3 (рис.5а), а величина $[(\text{C} + \text{N} + \text{O})/\text{Fe}]$, напротив, уменьшается от 0.3 до -0.1 (рис.5б).

В [7] было показано, что изображенная на рис.5а, б зависимость от $[\text{Fe}/\text{H}]$ является частью более ярко выраженной зависимости на протяженном интервале $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -2.5 до +0.3. В частности, согласно [7], величина $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ меняется на этом интервале от 7.0 до 9.2, т.е. увеличивается на 2.2 dex (а не на 0.5 dex, как на рис.5а).

На рис.6, взятом из [7], представлена зависимость $[(\text{C} + \text{N} + \text{O})/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$. Видим, что, в отличие от рис.5, где величина $\log \varepsilon(\text{C} + \text{N} + \text{O})$ в диапазоне $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -2.5 до +0.3 меняется более чем на два порядка, величина $[(\text{C} + \text{N} + \text{O})/\text{Fe}]$ на том же интервале $[\text{Fe}/\text{H}]$ меняется только на 0.7 dex (это можно оценить по сплошной прямой линии, проведенной на рис.6 методом наименьших квадратов).

Среди CNO-элементов в сумму C+N+O наибольший вклад вносит кислород, так как он является самым обильным элементом в этой группе. Это видно на примере Солнца, для которого содержания C, N и O составляют $\log \varepsilon(\text{C}) = 8.47$, $\log \varepsilon(\text{N}) = 7.85$ и $\log \varepsilon(\text{O}) = 8.71$ [9]. В этой связи следует

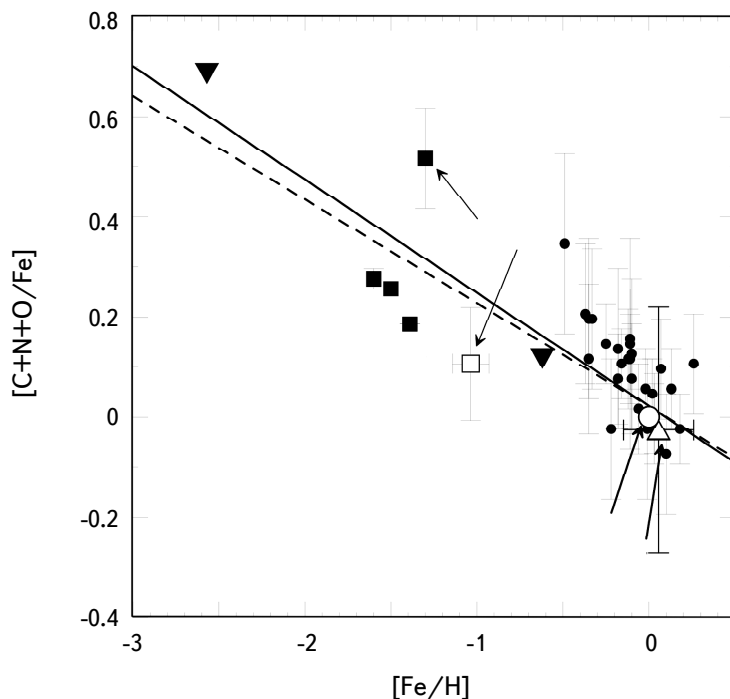


Рис.6. Зависимость величины $[(\text{C} + \text{N} + \text{O})/\text{Fe}]$ от индекса металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ в интервале $[\text{Fe}/\text{H}]$ от -2.5 до +0.3. Сплошная прямая проведена методом наименьших квадратов. Штриховая прямая представляет линию, полученную в [6] для кислорода.

отметить, что давно известна антикорреляция, которая существует между величинами $[O/Fe]$ и $[Fe/H]$ (см., например, [16] и ссылки в ней, а также обзор [17]). Зависимость между $[O/Fe]$ и $[Fe/H]$ представлена на рис.6 штриховой прямой, найденной в [7] методом наименьших квадратов. Видно, что эта штриховая линия, представляющая кислород, очень близка к сплошной прямой, представляющей сумму $C+N+O$, но лежит слегка ниже ее. Тем самым мы подтвердили, что кислород действительно вносит доминирующий вклад в сумму $C+N+O$.

Как отмечалось выше, зависимость, изображенная на рис.6, отражает химический состав межзвездной среды, из которой сформировалась звезда, так что ее объяснение следует искать в современных моделях химической эволюции Галактики.

7. Тяжелые элементы. Некоторые из магнитных красных гигантов, когда они находились на стадии ГП, могли быть магнитными Ар-звездами. По крайней мере, два из рассматриваемых двадцати магнитных гигантов, звезды EK Eri и OU And с самыми сильными магнитными полями, согласно [3], являются вероятными потомками магнитных Ар-звезд.

Характерной особенностью магнитных Ар-звезд являются аномалии химического состава. Избытки химических элементов у них в среднем растут с ростом атомного номера Z , так что для редкоземельных элементов, La, Ce, Pr и др., они могут составлять 4 dex, а для наиболее тяжелых элементов, таких как Pt, Au, Hg, вплоть до U ($Z=92$), они достигают 5-6 dex (см., например, [18] и обзор [19]).

Одиннадцать элементов тяжелее железа от Cu ($Z=29$) до Hf ($Z=72$) были проанализированы для магнитных гигантов в [5]. Из них семь элементов относятся к редким землям (Rare Earths, далее RE). Никаких избытков тяжелых элементов у этих звезд обнаружено не было, даже у упомянутых выше гигантов EK Eri и OU And [4]. Согласно [5], этот результат объясняется тем, что эти гиганты прошли глубокое перемешивание в фазе FDU, которое привело к исчезновению химических аномалий, имевших место на ГП.

На рис.7 представлена полученная в [5] антикорреляция между величиной $[RE/Fe]$, средним содержанием RE-элементов (относительно Fe) и индексом металличности $[Fe/H]$. Виден отчетливый тренд $[RE/Fe]$ с ростом $[Fe/H]$, при этом величина $[RE/Fe]$ падает почти на 0.4 dex при увеличении $[Fe/H]$ от -0.35 до +0.26 dex. Эта зависимость отражает различия в начальном химическом составе гигантов, и ее объяснение, как и в случае суммы $C+N+O$, следует искать в современных моделях химической эволюции Галактики.

Из общего тренда на рис.7 явно выпадает Арктур (α Boo), звезда с самой низкой металличностью $[Fe/H] = -0.49$ среди 20 рассмотренных магнитных

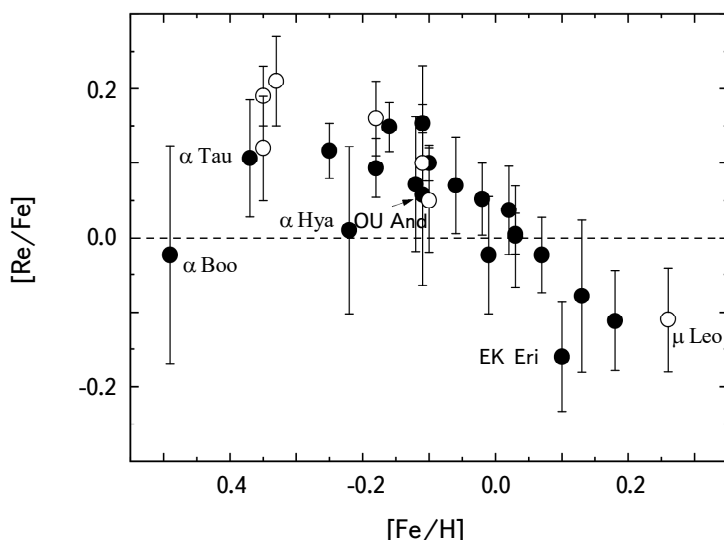


Рис.7. Средняя величина $[Re/Fe]$ для шести RE-элементов (La, Pr, Nd, Sm, Eu и Gd) как функция индекса металличности $[Fe/H]$ для 20 магнитных и 7 немагнитных гигантов (заполненные и открытые кружки, соответственно).

гигантов. При этом среднеквадратичная ошибка в значении $[RE/Fe]$ для этой звезды особенно велика. Она обусловлена реальными различиями в относительных содержаниях между отдельными RE-элементами. Особенно велика разница между европием, элементом r -процесса, и лантаном, элементом s -процесса. Имеется в виду разница между величинами $[Eu/Fe]$ и $[La/Fe]$, она составляет около 0.4 dex . Арктур, как видно из рис.1, отличается также малой массой ($1.1 M_{\odot}$) и большим возрастом (6.4 млрд лет). Возможно, эволюция этого гиганта имела какие-то особенности.

8. Обсуждение. Поиск различий в химическом составе магнитных и немагнитных красных гигантов привел к двум важным результатам. Они касаются содержания лития и величины $[N/C]$, этих двух чувствительных индикаторов эволюции звезд.

Во-первых, как оказалось, литий присутствует у большинства (у 80%) магнитных гигантов, в то время как практически у всех немагнитных гигантов он отсутствует. Во-вторых, величина $[N/C]$, рассмотренная как функция возраста и массы, показывает систематические различия между магнитными немагнитными гигантами. Рассмотрим возможные объяснения двух упомянутых различий между двумя типами гигантов.

В [6] высказано предположение, что магнитное поле может подавлять процесс перемешивания в фазе FDU у магнитных гигантов, что и приводит

к меньшим значениям величины $[N/C]$ у них, чем у гигантов без магнитного поля. Данная гипотеза могла бы также объяснить, почему литий у магнитных гигантов в фазе FDU выгорает лишь частично и почему у них сохраняются остатки магнитного поля.

Из этой гипотезы должно было бы следовать, что сохранились какие-то остаточные избытки тяжелых элементов. Однако, как отмечено выше, таких избытков у этих звезд не обнаружено. Наиболее яркий пример - гиганты EK Eri и OU And, у которых обнаружено наиболее сильное магнитное поле и значительное содержание лития, но совсем нет избытков тяжелых элементов. Таким образом, данные по тяжелым элементам как будто не соответствуют рассматриваемой гипотезе.

Существует альтернативная гипотеза, касающаяся присутствия лития и наличия магнитного поля у гигантов, прошедших конвективное перемешивание в фазе FDU. Имеется в виду гипотетический захват звездой (уже после фазы FDU) планеты-гиганта с массой в несколько масс Юпитера. Такая гипотеза в последние годы обсуждается достаточно активно; это объясняется тем, что быстро растущее число вновь открытых экзопланет подтверждает, что существование планетных систем около холодных гигантов - достаточно распространенное явление.

Расчеты [20] 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, значения $\log \epsilon(\text{Li}) \approx 0.6 - 1.5$, наблюдаемые у магнитных гигантов, вполне объяснимы в рамках этой гипотезы. Важно, что захват планеты, кроме увеличения содержания лития, приводит к значительному повышению скорости вращения красного гиганта. Согласно [21], следствием этого является запуск динамо-механизма и возникновение магнитного поля. Напомним, что планеты были обнаружены у 3 из 20 магнитных гигантов (β Gem, α Tau и ϵ Tau).

В рамках этой гипотезы возможен такой сценарий происхождения магнитных и немагнитных красных гигантов: те гиганты, на которые произошло падение планеты, показывают присутствие лития и магнитного поля. И, напротив, у тех гигантов, где падения планеты не было, нет ни лития, ни магнитного поля.

Может ли захват планеты, наряду с повышением содержания лития у магнитных гигантов, объяснить результат, касающийся понижения величины $[N/C]$ у таких звезд? Чтобы точно ответить на этот вопрос, конечно, нужны соответствующие расчеты (как для лития). Однако, исходя из общих соображений, предварительно можно положительно ответить на этот вопрос. Действительно, падение на звезду гигантской планеты с нормальной (то есть

близкой к нулю) величиной $[N/C]$ может привести к уменьшению повышенного значения $[N/C]$ в атмосфере звезды.

Таким образом, в настоящее время можно предложить две гипотезы, объясняющие различия в содержаниях легких элементов Li, C и N между магнитными и немагнитными гигантами.

Примечательно, что в отличие от индивидуальных содержаний CNO-элементов (особенно содержаний C и N), которые подвержены сильным эволюционным изменениям, суммарное содержание C+N+O в течение эволюции звезды, по-видимому, не меняется. Сумма C+N+O показывает ярко выраженную зависимость от индекса металличности $[Fe/H]$ не только для рассмотренных гигантов (рис.5), но и для гигантов в гораздо более широкой области $[Fe/H]$ (рис.6). Согласно [7], суммарное содержание C+N+O следует включить в число параметров, характеризующих химическую эволюцию Галактики.

9. Заключение. Основываясь на серии работ, выполненных недавно в Крымской астрофизической обсерватории, рассмотрены данные о химическом составе 20 G- и K-гигантов с магнитными полями в сравнении с химическим составом 7 немагнитных гигантов. Во всех этих работах использована единая методика анализа содержаний химических элементов.

Наибольший интерес представляют впервые обнаруженные различия в химическом составе магнитных и немагнитных гигантов. Они касаются содержания лития и величины $[N/C]$, этих двух особо чувствительных индикаторов эволюции звезд. Литий, как оказалось, присутствует у большинства (у 80%) магнитных гигантов, в то время как он отсутствует практически у всех немагнитных гигантов. Величина $[N/C]$, рассмотренная как функция возраста и массы, показывает систематические различия между магнитными и немагнитными гигантами.

Для объяснения этих двух явлений можно предложить две гипотезы. Первая состоит в том, что у магнитных гигантов магнитное поле подавляет перемешивание в фазе FDU. За счет неполного перемешивания частично сохраняется литий в атмосфере гиганта и наблюдается остаточное магнитное поле, которое на стадии ГП могло быть сильным. Вторая гипотеза основана на предположении, что на гигант (уже после фазы FDU) падает планета с массой в несколько масс Юпитера, что приводит к появлению лития в его атмосфере и, возможно, к возникновению магнитного поля.

Обе гипотезы сталкиваются с определенными трудностями. Первая из них не может объяснить, почему при неполном перемешивании в фазе FDU за счет магнитного поля не наблюдаются остаточные избытки тяжелых элементов. Что касается второй гипотезы, то нужны дополнительные расчеты,

чтобы выяснить, приводит ли падение планеты на звезду к уменьшению величины $[N/C]$ в ее атмосфере.

Представляет интерес также результат, касающийся суммарного содержания $C+N+O$ в гигантах. Эта величина, которая, по-видимому, не меняется в течение эволюции звезды, показывает явную зависимость от $[Fe/H]$ и может рассматриваться как параметр, характеризующий химическую эволюцию Галактики.

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

CHEMICAL COMPOSITION OF RED GIANTS WITH MAGNETIC FIELDS: A REVIEW OF LAST RESULTS

L.S.LYUBIMKOV

On the base of the series of works implemented recently in the Crimean astrophysical observatory the data are considered on the chemical composition of 20 G- and K-type giants with magnetic fields in comparison with the chemical composition of 7 non-magnetic giants. Substantial differences are found in the lithium abundance and in the $[N/C]$ value between magnetic and non-magnetic giants: both these parameters are known to be sensitive indicators of star's evolution. It was shown that lithium is absent in almost all non-magnetic giants, that is in full accordance with the theory predictions concerning the evolution of giants, which passed through the deep convective mixing during the FDU phase. Conversely, for most magnetic giants lithium is present in an atmosphere. Further, the $[N/C]$ value, when considered as a function of the age and the mass, shows systematic differences between magnetic and non-magnetic giants. Possible explanations are discussed of differences found for chemical composition of the two types of giants. It was shown that the total $C+N+O$ abundance, which remains probably constant during the star's evolution, demonstrates a clear dependence on the metallicity index $[Fe/H]$, and not only for the giants in question but also in the expanded region $[Fe/H]$ from -2.5 to +0.3.

Keywords: *red giants; magnetic field; chemical composition*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al.*, *Astron. Nachr.*, **342**, 497, 2021.
2. *Л.С.Любимков, Л.Б.Поклад, С.А.Коротин*, *Астрофизика*, **65**, 515, 2022, (*Astrophysics*, **65**, 494, 2022).
3. *M.Auriure, R.Konstantinova-Antova, C.Charbonnel et al.*, *Astron. Astrophys.*, **574**, A90, 2015.
4. *Л.С.Любимков, С.А.Коротин, Д.В.Петров et al.*, *Астрофизика*, **65**, 63, 2022, (*Astrophysics*, **65**, 53, 2022).
5. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.V.Petrov et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **528**, 304, 2024.
6. *Л.С.Любимков, Д.Б.Поклад*, *Астрон. ж.*, **101**, 60, 2024, (*Astron. Rep.*, **68**, 925, 2024).
7. *Л.С.Любимков, Д.В.Петров*, *Астрофизика*, **68**, 37, 2025, (*Astrophysics*, **68**, 37, 2025).
8. *J.Choi, A.Dotter, C.Conroy et al.*, *Astrophys. J.*, **823**, 102, 2016.
9. *K.Lodders*, *Space Sci. Rev.*, **217**, 44, 2021.
10. *L.S.Lyubimkov, S.A.Korotin, D.L.Lambert*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **489**, 1533, 2019.
11. *C.Georgy et al.*, *Astron. Astrophys.*, **553**, A24, 2013.
12. *G.Casali, L.Magrini, E.Tognelli et al.*, *Astron. Astrophys.*, **629**, A62, 2019.
13. *R.E.Luck, D.L.Lambert*, *Astrophys. J.*, **298**, 782, 1985.
14. *J.G.Cohen, J.Meléndez*, *Astron. J.*, **129**, 303, 2005.
15. *D.Yong, F.Grundahl, J.E.Norris*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **446**, 3319, 2015.
16. *Т.В.Мишенина*, "Галактика, ее строение и обогащение химическими элементами", Одесса, Астропринт, 2017, ("Galaxy, its structure and enrichment with chemical elements", Odessa, Astroprint, 2017).
17. *F.Matteucci*, *Astron. Astrophys. Rev.*, **29**, 5, 2021.
18. *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).
19. *Л.С.Любимков*, *Изв. Крымской Астрофиз. Obs.*, **110**, 16, 2014, (*Bull. Crim. Astrophys. Obs.*, **110**, 9, 2014).
20. *C.Aguilera-Gómez, J.Chanamé, M.H.Pinsonneault et al.*, *Astrophys. J.*, **829**, id. 127, 2016.
21. *G.Privitera, P.Eggenberger, C.Georgy et al.*, *Astron. Astrophys.*, **593**, L15, 2016.