

УДК 524.31

Литий в F- и G-сверхгигантах как индикатор звездной эволюции

*Л.С. Любимков¹, Д.Л. Ламберт², Б.М. Каминский³, Я.В. Павленко³, Д.Б. Поклад¹,
Т.М. Рачковская¹*

¹ НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Научный, АР Крым, Украина, 98409

² Обсерватория Мак Дональд, США

³ Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Украина

Поступила в редакцию 17 декабря 2012 г.

Аннотация. По профилю резонансной линии LiI 6707.8 Å определено содержание лития $\log \varepsilon(\text{Li})$ для 43 галактических F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов. Получен большой разброс в содержаниях Li; для большинства звезд найден лишь верхний предел величины $\log \varepsilon(\text{Li})$, так как линия LiI 6707.8 Å в их спектрах не видна. Полученные содержания Li сопоставлены с предсказаниями теории для моделей звезд с массами от 2 M_{\odot} до 15 M_{\odot} (как с вращением, так и без него). Большинство наших результатов находится в хорошем согласии с теорией. Однако для некоторых звезд найденные значения $\log \varepsilon(\text{Li})$ противоречат теории; возможно, в атмосферах этих звезд наблюдается недавно синтезированный литий.

LITHIUM IN F AND G SUPERGIANTS AS AN INDICATOR OF STELLAR EVOLUTUON, by *L.S. Lyubimkov, D.L. Lambert, B.M. Kaminsky, Ya.V. Pavlenko, D.B. Poklad, T.M. Rachkovskaya*. The lithium abundance $\log \varepsilon(\text{Li})$ is determined from profiles of the LiI 6707.8 Å resonance line for 43 Galactic F and G supergiants and bright giants. A large scatter is found in the Li abundances; for most of the stars only the upper limit of the $\log \varepsilon(\text{Li})$ value is derived, because the LiI 6707.8 Å line is not seen in their spectra. The derived Li abundances are compared with theoretical predictions for stellar models with masses from 2 M_{\odot} to 15 M_{\odot} (both rotating and non-rotating). Most of our results are in good agreement with the theory. However, for some stars the detected $\log \varepsilon(\text{Li})$ values contradict the theory; it is possible that recently synthesized lithium is observed in atmospheres of these stars.

Ключевые слова: сверхгиганты, химический состав, эволюция

Литий – один из ключевых химических элементов, чье наблюдаемое содержание отражает эволюцию звезд. Более того, из всех элементов литий является наиболее чувствительным индикатором звездной эволюции. Связано это с тем, что атомы лития разрушаются при сравнительно небольших температурах ~ 2 млн градусов, и поэтому даже при не очень глубоком перемешивании его содержание в звездной атмосфере значительно понижается. Если же принять во внимание, что на стадии главной последовательности (ГП) может происходить более глубокое перемешивание, индуцированное вращением звезд, тогда понижение атмосферного содержания Li может быть очень сильным.

Основной источник информации о литии в звездных спектрах – резонансный дублет LiI 6707.8 Å. Эта линия видна лишь в спектрах достаточно холодных звезд с эффективными

температурами $T_{eff} < 7000$ К (классы F, G, K и M). Иногда она видна также в спектрах более горячих Ар-звезд, когда они имеют значительный избыток лития. При значительных избытках лития иногда наблюдается также более слабая субординатная линия LiI 6103.6 Å. В спектрах наших программных звезд видна лишь резонансная линия 6707.8 Å.

Согласно современным данным, содержание лития в атмосферах очень молодых звезд с нормальной (солнечной) металличностью составляет $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.1$. Эта величина находится в прекрасном согласии с метеоритным содержанием $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.26 \pm 0.05$ (Асплунд и др., 2009). Отсюда следует, что величина $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.1$ есть исходное содержание Li для молодых звезд в окрестности Солнца в начале их эволюции.

Как известно, наблюдаемое содержание лития у F-, G- и K-карликов показывает корреляцию с T_{eff} , а именно: чем ниже температура T_{eff} , тем меньше в среднем содержание Li. В частности, пониженное содержание лития надежно установлено для Солнца: $\log \varepsilon_0(\text{Li}) = 1.05 \pm 0.10$ (Асплунд и др., 2009). Дефицит лития в атмосферах Солнца и других холодных карликов объясняется разрушением атомов лития во время эволюции звезды на стадии главной последовательности (ГП), например, в результате конвекции.

Мы исследовали содержание лития в атмосферах F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов (классы светимости I и II). Из литературы следует, что наблюдаемые содержания Li для таких звезд показывают большой разброс. Для большинства звезд линия LiI 6707.8 Å вообще не видна, и здесь можно оценить лишь верхний предел величины $\log \varepsilon(\text{Li})$. С другой стороны, найдено сравнительно небольшое число FGK-сверхгигантов и гигантов со сравнительно высокими содержаниями $\log \varepsilon(\text{Li}) \approx 2-4$. Звезды с $\log \varepsilon(\text{Li}) \geq 2.0$ принято называть “Li-rich stars”.

Ранее на обсерватории Мак Дональд Техасского университета США нами были выполнены наблюдения 63 A-, F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов (телескоп 2.7 м, эшелле-спектрометр в фокусе куде, разрешение 60000); для них были определены такие параметры, как эффективная температура T_{eff} , ускорение силы тяжести в атмосфере $\log g$, содержание железа $\log \varepsilon(\text{Fe})$, масса M , возраст t и расстояние d (Любимков и др., 2010). Для данной работы из этого списка были отобраны 43 F- и G-сверхгиганта и ярких гиганта.

Чтобы расширить список звезд, показывающих детектируемый литий, сюда были добавлены еще 12 ярких гигантов из списка Лака и Вепфера (1995). В последнем случае были выбраны звезды с самыми надежными оценками содержания Li; для них мы переопределили по нашей методике параметры T_{eff} и $\log g$, после чего внесли поправки в содержание лития, включая не-ЛТР поправки.

Содержание лития определялось путем подгонки синтетического спектра к наблюдаемому в области резонансной линии лития 6707.8 Å. Расчеты профиля этой линии проводились при отказе от предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). Такие не-ЛТР расчеты особенно важны для наиболее холодных звезд из нашего списка с эффективными температурами $T_{eff} < 5500$ К.

Анализ содержания лития для 43 программных звезд (по нашим спектрам) показал, что только 25 % звезд (11 из 43) показали детектируемый литий. Другими словами, для большинства F- и G-сверхгигантов и гигантов содержание лития столь мало, что его в спектре не видно. Как уже отмечалось, к аналогичному выводу пришли и другие авторы. Итак, большинство FGK-сверхгигантов и гигантов в результате эволюции сильно понизили исходное содержание лития $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.2$ в своих атмосферах.

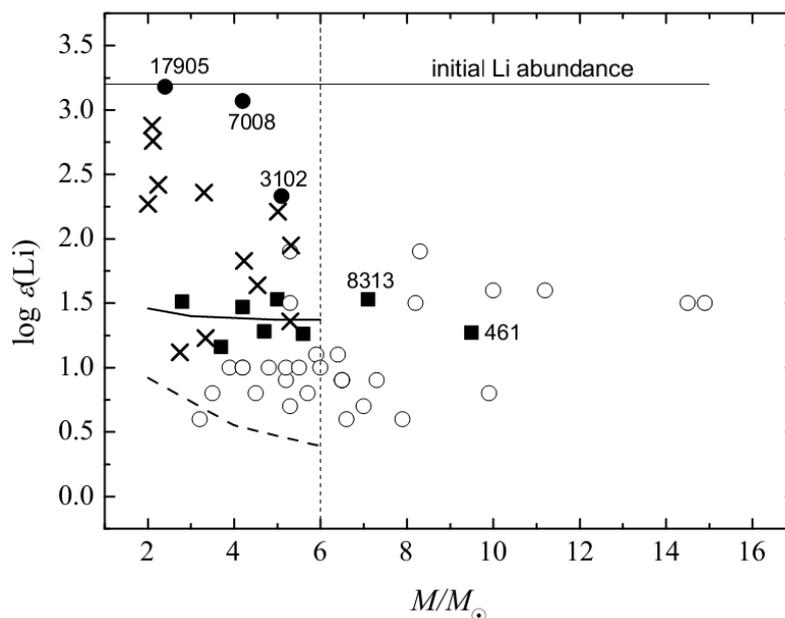


Рис. 1. Наблюдаемая зависимость $\log \epsilon(\text{Li})$ от M/M_{\odot} в сравнении с теоретическими расчетами У.Фришкнехта (2011). Начальное содержание лития $\log \epsilon(\text{Li}) = 3.2$ представлено тонкой прямой линией. Толстая линия в области $M = 2-6 M_{\odot}$ показывает предсказанное содержание Li для стадии “post-FD” для невращающихся моделей ($v_0 = 0$ км/с); штриховая линия соответствует “post-FD” содержаниям для моделей с $v_0 \approx 50$ км/с

На рис. 1 представлены найденные значения $\log \epsilon(\text{Li})$ в зависимости от массы M/M_{\odot} , выраженной в массах Солнца M_{\odot} . Обращает на себя внимание большой разброс содержаний лития в области масс $M < 6 M_{\odot}$. В частности, все наши звезды типа “Li-rich”, показавшие содержание $\log \epsilon(\text{Li}) \geq 2.0$, попадают именно в эту область. Оказалось, что это не случайно. Мы просмотрели данные других авторов по звездам типа “Li-rich” (всего семь работ, кроме нашей) и определили их массы M/M_{\odot} по эволюционным трекам. Оказалось, что все звезды типа “Li-rich” имеют массы $M < 6 M_{\odot}$. Нет ни одной такой звезды с массой $M > 6 M_{\odot}$ (полный диапазон их масс составляет от $1.0 M_{\odot}$ до $5.2 M_{\odot}$).

Большой интерес представляет сравнение найденных содержаний лития с предсказаниями теории. В атмосферах сверхгигантов и ярких гигантов классов F и G, которые мы рассматриваем, могут наблюдаться аномалии в содержании некоторых легких элементов (например, C и N), связанные с двумя причинами: 1) перемешивание на стадии ГП вследствие вращения; 2) последующее конвективное перемешивание на стадии FG-сверхгигантов (так называемый “first dredge-up”, далее FD). Для нашей задачи нужны вычисления звездных моделей с вращением, где кроме самих моделей рассчитываются изменения химического состава на поверхности звезд. Такие расчеты в течение ряда лет проводятся в Швейцарии (А.Медер, Ж.Мейне и др.), однако до последнего времени они затрагивали лишь относительно массивные звезды с $M \geq 9 M_{\odot}$, где можно ожидать заметных изменений в содержаниях C, N и O. Но в случае лития заметные изменения его содержания можно ожидать и для менее массивных звезд.

По нашей просьбе Урс Фришкнехт (Urs Frischknecht, Базельский университет, Швейцария) выполнил дополнительные расчеты звездных моделей вплоть до массы $M = 2 M_{\odot}$ как с вращением, так и без него. Анализ его обширных данных для моделей с $M = 2-15 M_{\odot}$ привел нас к интересным выводам относительно эволюционных изменений содержания лития. Мы

сравнили эти новые расчеты с нашими данными. Как наши данные (см. рис. 1), так и расчеты Фришкнехта приводят к выводу, что исследуемые звезды можно разделить на две группы в зависимости от массы, а именно: звезды с $M \leq 6 M_{\odot}$ и звезды с $M > 6 M_{\odot}$.

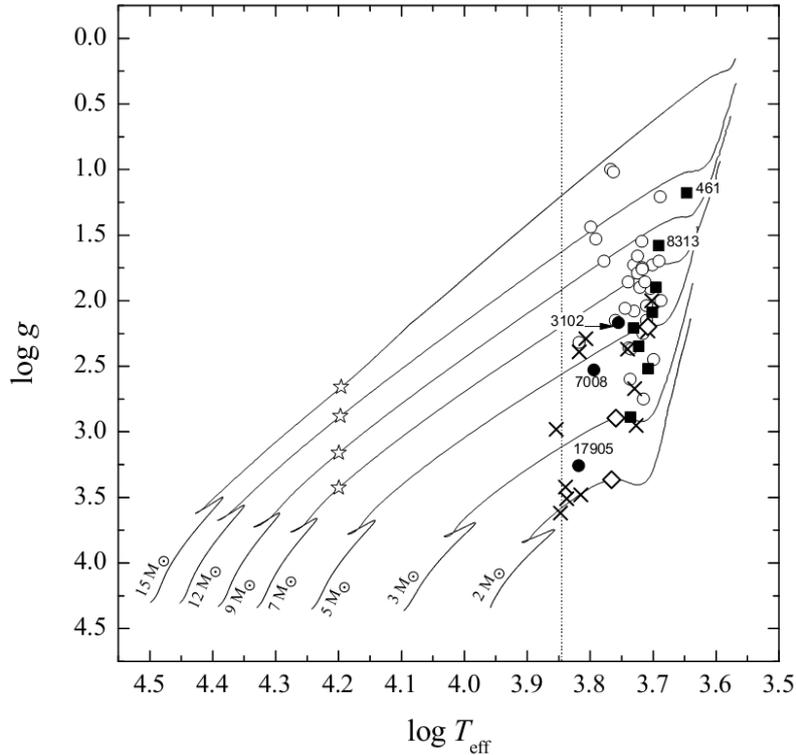


Рис. 2. Эволюционные треки Фришкнехта для моделей без вращения ($v_0 = 0$ км/с) и положения программных звезд на плоскости $T_{\text{eff}} - \log g$. Открытые ромбики на треках 2, 3 и $5 M_{\odot}$ отмечают начало уменьшения $\log \epsilon(\text{Li})$ на стадии FD. Открытые звездочки на треках 7– $15 M_{\odot}$ соответствуют моментам после ГП, когда происходит быстрое и глубокое (на 5–6 dex) падение содержания Li в атмосфере. Пунктирная линия соответствует эффективной температуре $T_{\text{eff}} = 7000$ К, которая отделяет F-сверхгиганты от более горячих A-сверхгигантов

Звезды с массами $2 M_{\odot} < M \leq 6 M_{\odot}$

В этой области наблюдаемые содержания $\log \epsilon(\text{Li})$ демонстрируют большой разброс (рис. 1). Звездные модели без вращения (начальная скорость вращения $v_0 = 0$ км/с) не показывают здесь каких-либо изменений в химическом составе атмосферы (включая и содержание лития) в течение фазы ГП. Изменения начинаются позже, когда звезда вступает в фазу FD (“first dredge-up”).

- Теоретическая зависимость, представленная на рис. 1 толстой сплошной линией (post-FD, то есть после стадии FD, при отсутствии заметного вращения, т. е. при $v_0 = 0$ км/с), прекрасно согласуется с наблюдаемыми содержаниями Li для звезд с $\log \epsilon(\text{Li}) = 1.2$ – 1.6 (квадратики на рис. 1). И теория, и наблюдения дают здесь в среднем $\log \epsilon(\text{Li}) = 1.4$.
- Уже небольшое повышение начальной скорости вращения до $v_0 = 50$ км/с (штриховая линия на рис. 1) дает содержание Li ниже предела обнаружения. Поэтому часть звезд с верхним пределом Li (открытые кружки) можно объяснить как post-FD объекты с $v_0 = 50$ км/с и более. Остальная часть этих звезд может рассматриваться как объекты после стадии ГП с начальными скоростями вращения $v_0 = 100$ км/с и более (при таких

скоростях v_0 значительное понижение содержания Li имеет место уже к концу стадии ГП).

- Особый интерес на рис. 1 представляют две звезды типа “Li-rich” (HD 17905 и HR 7008), для которых содержание Li в пределах ошибки совпадает с исходным содержанием $\log \varepsilon(\text{Li}) = 3.2 \pm 0.1$. Обе звезды еще не достигли стадии FD (рис. 2), то есть это объекты после ГП. Самое простое предположение – на стадии ГП они имели $v_0 = 0$ км/с и поэтому сохранили исходное содержание Li. Однако их наблюдаемые скорости вращения довольно велики ($v \sin i = 53$ км/с и 58 км/с), а в начале ГП они должны были быть существенно выше ($v_0 \geq 100$ км/с). Но тогда уже к концу ГП они должны были иметь значительный дефицит Li в атмосфере. Противоречие между теорией и наблюдениями имеет место и для другой звезды типа “Li-rich” – HR 3102; здесь высокое содержание лития сопровождается одновременно заметным избытком азота – $[\text{N}/\text{Fe}] = 0.41$ dex (Любимков и др. 2011). Можно предположить, что в этих случаях мы наблюдаем в атмосфере недавно синтезированный литий.

Звезды с массами $M > 6 M_\odot$

В отличие от звезд с $M \leq 6 M_\odot$, в этой области нет сильного разброса в содержаниях лития (рис. 1). Здесь нет звезд типа “Li-rich”, и, кроме двух звезд, все остальные показали только верхний предел Li.

- Звездные модели без вращения ($v_0 = 0$ км/с) для масс $M = 7-15 M_\odot$ показывают драматическое отличие от моделей с $M \leq 6 M_\odot$. Вскоре после завершения стадии ГП в их атмосферах происходит резкое и глубокое падение содержания лития (на 5–6 dex). На рис. 2, где представлены эволюционные треки Фришкнехта, эти моменты отмечены звездочками. Таким образом, в фазу FG-сверхгигантов они вступают уже с сильным дефицитом лития.
- Звездные модели с вращением показывают существенное понижение содержания Li уже к концу стадии ГП. При движении по эволюционному треку от ГП к фазе FD дефицит Li усиливается. Таким образом, теория предсказывает, что все F- и G-сверхгиганты в области масс $M = 7-15 M_\odot$ не должны показывать наблюдаемый литий.
- С одной стороны, теперь понятно, почему в области $M > 6 M_\odot$ совсем нет звезд типа “Li-rich” и почему там подавляющее большинство звезд не показывает литий (рис. 1). С другой стороны, здесь имеются две звезды (HR 461 и HR 8313) с надежно определенными содержаниями Li, подтвержденными оценками других авторов. Относительно этих двух звезд можно высказать следующие предположения: 1) литий, наблюдаемый в атмосферах HR 461 и HR 8313, недавно синтезирован, например, во время стадии FD; 2) предсказания теории относительно внезапного и резкого падения величины вскоре после ГП несостоятельны; другими словами, звезды HR 461 и HR 8313, подобно другим звездам с $\log \varepsilon(\text{Li}) \approx 1.4$ показывают типичное содержание Li для случая post-FD при $v_0 = 0$ км/с (квадратики на рис. 1). Отметим, что в теории действительно еще есть большие неопределенности.

В заключение мы можем сказать, что современные теоретические модели эволюции звезд (с вращением и без него) объясняют подавляющее большинство наблюдаемых содержаний лития у F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов. В частности, теория вполне объясняет, почему большинство F- и G-сверхгигантов не показывает литий в своих спектрах. Тем не менее, мы можем отметить два случая, когда теория оказывается несостоятельной. Во-первых, это относительно маломассивные “Li-rich” гиганты HD 17905, HR 7008, HR 1135 и HR 3102 ($M < 6 M_\odot$), чьи высокие содержания лития не соответствуют относительно большим скоростям вращения (первые три звезды) или заметному избытку азота (HR 3102). Во-вторых, две более

массивные звезды HR 461 и HR 8313 ($M > 6 M_{\odot}$) с детектированным содержанием лития $\log \varepsilon(\text{Li}) \approx 1.4$, которого, согласно теории, не должно быть. Одно из возможных объяснений – в атмосферах этих звезд наблюдается недавно синтезированный литий.

Расширенная версия данной работы принята к печати в *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Литература

- Асплунд и др. (Asplund M. et al.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2009. V. 47. P. 481.
Лак и Вепфер (Luck R.E. and Wepfer G.G.) // *Astron. J.* 1995. V. 110. P. 2425.
Любимков и др. (Lyubimkov L.S. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2010. V. 402. P. 1369.
Любимков и др. (Lyubimkov L.S. et al.) // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 410. P. 1774.
Фришкнехт (Frischknecht U.) // Частное сообщение. 2011.