АСТРОФИЗИКА

ТОМ 60 АВГУСТ, 2017 ВЫПУСК 3

АНАЛИЗ НЕ-ЛТР СОДЕРЖАНИЯ ЛИТИЯ ДЛЯ БОЛЬШОЙ ГРУППЫ F-, G- и K-ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ

Л.С.ЛЮБИМКОВ, Д.В.ПЕТРОВ

Поступила 21 февраля 2017
Принята к печати 7 июня 2017

Создан метод пятимерной интерполяции и построена соответствующая компьютерная программа, которая на основе опубликованных расчетов позволяет находить не-ЛТР поправку Δ_{NLTE} в содержании лития $\log\varepsilon(Li)$, определенном по линии Li I 6707.8 Å. Величина Δ_{NLTE} определяется по следующим пяти параметрам: эффективная температура T_{eff}, ускорение силы тяжести $\log g$, индекс металличности $[Fe/H]$, скорость микротурбулентности V_t и ЛТР-содержание лития $\log\varepsilon(Li)$. С помощью этой программы получены значения Δ_{NLTE} и не-ЛТР содержания Li для 91 одиночного яркого гиганта из списка Лебре и др. Объединив эти результаты с данными для 55 звезд из предыдущей работы, мы получили не-ЛТР значения $\log\varepsilon(Li)$ для 146 FGK-гигантов и сверхгигантов. Мы подтвердили, что для большинства таких звезд из-за отсутствия линии Li в спектре можно оценить лишь верхний предел содержания Li. Подтвержден большой разброс значений $\log\varepsilon(Li)$ для звезд с массами $M \le 6 M_{\odot}$. Сравнение полученных результатов с расчетами звездных моделей подтверждает уникальную чувствительность содержания лития к начальной скорости вращения V_0. Обсуждаются гиганты и сверхгиганты с содержаниями $\log\varepsilon(Li) = 1.4 \pm 0.3$, которые, согласно теории, имели скорость вращения $V_0 = 0$ км/с и уже испытали глубокое конвективное перемешивание. Рассмотрены звезды, богатые литием (гиганты "Li-rich"), имеющие содержание лития $\log\varepsilon(Li) \ge 2$ вплоть до значений, близких к начальному значению $\log\varepsilon(Li) = 3.2 \pm 0.1$. Показано, что часть гигантов "Li-rich", у которых $V_0 \approx 0 - 50$ км/с, находится в согласии с современными эволюционными моделями. Для объяснения остальных звезд этого типа, а также всех гигантов типа "super Li-rich", где стандартная теория оказывается несостоятельной, приходится прибегать к гипотезе недавнего синтеза лития в звезде или к альтернативной гипотезе захвата звездой гигантской планеты.

Ключевые слова: *звездные атмосферы: химический состав: вращение звезд: звездная эволюция*

1. *Введение.* Литий, номер три в периодической системе химических элементов, занимает особое место среди всех легких элементов. Несомненно, он является среди них самым чувствительным индикатором звездной эволюции. В обзоре Любимкова [1] рассмотрены современные данные о содержании лития в атмосферах звезд разных типов на разных стадиях эволюции; там же отмечено, что наблюдаемые содержания этого элемента нередко находятся в противоречии с предсказаниями теории.

Современные расчеты моделей звезд с вращением показывают, что уже на первой стадии эволюции, стадии Главной последовательности (ГП), когда

в ядре звезды горит водород, содержания некоторых легких элементов в звездной атмосфере могут измениться вследствие перемешивания, индуцированного вращением. В частности, содержание лития может сильно понизиться, если начальная скорость вращения V_0 достаточно велика, точнее $V_0 > 50$ км/с (см. [1]). Таким образом, величина V_0 при рассмотрении эволюции содержания лития в звездах является столь же важным параметром, как и масса звезды M. Мы подтвердим, что литий по чувствительности к V_0 можно считать уникальным элементом (см. ниже).

На стадии ГП звезды с массами M от 3 до 20 $M_\odot$ наблюдаются как ранние и средние B-звезды. Вследствие высоких эффективных температур таких звезд ($T_{\rm eff}$ = 15000 - 30000 K), а также низкого потенциала ионизации Li I, линии лития, и прежде всего наиболее сильная резонансная линия Li I 6707.8 Å, в спектрах таких звезд не наблюдается. Эту линию можно наблюдать только у сравнительно холодных звезд с эффективными температурами $T_{\rm eff} < 8500$ K. Среди таких звезд особый интерес вызывают A-, F-, G- и K-гиганты и сверхгиганты, которые представляют следующую после ГП стадию эволюции звезд тех же масс $M = 3 - 20 M_\odot$. Как известно, на этой стадии возникает глубокое конвективное перемешивание (ГКП), которое может приводить к дополнительным изменениям в содержаниях легких элементов (включая литий), возникших ранее на стадии ГП.

Как показано в работе Любимкова и др. [2], где было рассмотрено 55 галактических F- и G-сверхгигантов и ярких гигантов, многие из таких звезд совсем не показывают лития в своих спектрах, а у других содержание лития варьируется в довольно широких пределах. Эти особенности, в целом, находят объяснение в современных расчетах моделей вращающихся звезд. Тем не менее, некоторые проблемы остаются нерешенными. Поэтому расширение списка FGK-гигантов и сверхгигантов, для которых получены достаточно надежные оценки содержания лития $\log\varepsilon$(Li), представляется актуальным.

В связи с проблемой надежности определяемых содержаний лития $\log\varepsilon$(Li) необходимо подчеркнуть, что расчеты линий Li I, в том числе резонансной линии 6707.8 Å, вообще говоря, требуют отказа от условия ЛТР (локальное термодинамическое равновесие), т.е. необходим не-ЛТР анализ (non-LTE analysis). В частности, согласно [2], не-ЛТР поправки в величине $\log\varepsilon$(Li) для холодных гигантов и сверхгигантов могут достигать 0.4 dex. Согласно расчетам Линд и др. [3], эти поправки зависят от таких параметров звезды как эффективная температура $T_{\rm eff}$, ускорение силы тяжести $\log g$, индекс металличности $[Fe/H]$, скорость микротурбулентности V_t и сама величина $\log\varepsilon$(Li).

На рис.1 в качестве иллюстрации к работе [3] показана не-ЛТР поправка $\Delta_{\rm NLTE}$ для линии Li I 6707.8 Å как функция $T_{\rm eff}$ при $\log g = 2.0$ для четырех значений $\log\varepsilon$(Li). Здесь $[Fe/H] = 0$ и $V_t = 2$ км/с. Этот рисунок дает общее

представление о том, какие значения Δ_{NLTE} можно ожидать для FGK-гигантов и сверхгигантов, рассматриваемых ниже. Видим, что при температурах $T_{eff} \geq 6000$ K поправка Δ_{NLTE} мала при всех содержаниях $\log\varepsilon(Li)$, в то время как при $T_{eff} \leq 5000$ K она значительна и существенно зависит от $\log\varepsilon(Li)$.

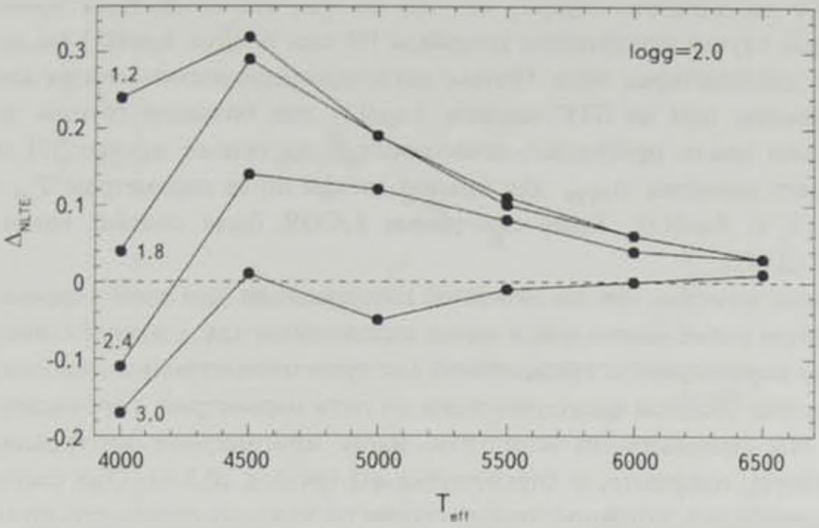

Рис 1. Не-ЛТР поправка Δ_{NLTE} в содержании лития $\log\varepsilon(Li)$ по линии Li I 6707.8 Å как функция эффективной температуры T_{eff}, вычисленная при $\log g = 2$ для значений $\log\varepsilon(Li) = 1.2$, 1.8, 2.4 и 3.0 (по данным [3]).

В настоящей работе были поставлены две задачи. Так как не-ЛТР расчеты линии Li I 6707.8 Å для конкретных звезд достаточно трудоемки, нашей первой задачей было упростить такие расчеты; для этого была создана компьютерная программа, позволяющая находить не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} к найденным ЛТР-содержаниям лития $\log\varepsilon(Li)$ путем интерполяции сетки значений Δ_{NLTE}, рассчитанных в [3]. Наша вторая задача состояла в том, чтобы применить эту программу для определения не-ЛТР содержаний лития для большой группы FGK-гигантов с известными ЛТР-содержаниями $\log\varepsilon(Li)$. Объединив полученные результаты с данными работы [2] и тем самым существенно расширив список звезд рассматриваемого типа с известными не-ЛТР оценками $\log\varepsilon(Li)$, мы смогли проверить некоторые важные выводы, полученные в [2]. Отметим, что величина $\log\varepsilon(Li)$ дается в стандартной логарифмической шкале, где для водорода принято $\log\varepsilon(H) = 12.00$.

2. *Пятимерная интерполяция не-ЛТР поправок к величине* $\log\varepsilon(Li)$. Линд и др. [3] рассчитали не-ЛТР поправки Δ_{NLTE} к ЛТР-значениям $\log\varepsilon(Li)$ для двух линий Li I: резонансной линии 6707.8 Å и субординатной линии 6103.6 Å. Эти поправки зависят от пяти параметров:

эффективной температуры T_{eff} ускорения силы тяжести log$g$, индекса металличности $[Fe/H]$, скорости микротурбулентности V_t и ЛТР-содержания лития logε(Li). Расчеты были выполнены в следующих диапазонах названных параметров: T_{eff} от 4000 до 8000 K; log$g$ от 1.0 до 5.0; $[Fe/H]$ от -3.0 до 0.0; V_t от 1.0 до 5.0 км/с; logε(Li) от -0.3 до 4.2. Из литературы известны отдельные случаи применения поправок [3] при оценке logε(Li) по линии 6707.8 Å для некоторых звезд. Однако для корректного использования данных [3], особенно при не-ЛТР анализе logε(Li) для большой группы звезд, желательно иметь программу, позволяющую на основе данных [3] сразу определять значение Δ_{NLTE} для каждой звезды по ее параметрам T_{eff}, log$g$, $[Fe/H]$, V_t и logε(Li). Такая программа LiCOR была создана одним из авторов (ДВП).

Хорошо известны методы линейной интерполяции (для одного параметра); в литературе также можно найти явные соотношения для методов билинейной (по двум параметрам) и трилинейной (по трем параметрам) интерполяции. Наша задача состояла в интерполяции по пяти параметрам, перечисленным выше. Мы использовали известную идею многомерной интерполяции, изложенную, например, в справочнике [4] (раздел 20.5-6). Она состоит в последовательной линейной интерполяции по каждому параметру, при этом остальные параметры фиксированы. Полученные нами интерполяционные соотношения здесь не приводятся по причине их громоздкости. Построенную на основе этих соотношений программу LiCOR, чтобы проконтролировать ее точность, мы применили к звездам, рассмотренным в упомянутой выше работе [2]. Отметим, что содержание лития logε(Li) было определено в [2] по линии Li I 6707.8 Å.

Для многих звезд в [2] удалось оценить только верхний предел величины logε(Li), так как линия Li I 6707.8 Å в их спектрах отсутствует. Однако для 11 сверхгигантов и гигантов классов от F5 до K0 были получены точные значения logε(Li), как при ЛТР, так и не-ЛТР (см. табл.1 в [2]). Таким образом, для этих 11 звезд известны не-ЛТР поправки Δ_{NLTE}, найденные в [2] на основе прямых не-ЛТР расчетов. Интересно сравнить значения Δ_{NLTE}, полученные для этих звезд в [2], с результатами вычислений по программе LiCOR. На рис.2а поправки Δ_{NLTE} представлены как функция эффективной температуры T_{eff}; здесь заполненные кружки соответствуют данным из работы [2], а крестики - значениям Δ_{NLTE}, полученным для тех же 11 звезд с помощью LiCOR (при этом были использованы те же параметры T_{eff}, log$g$, $[Fe/H]$, V_t и logε(Li), что и в [2]).

На рис.2а отчетливо виден тренд величины Δ_{NLTE} с температурой T_{eff} - чем ниже T_{eff}, тем в среднем больше поправка Δ_{NLTE}. В целом на рисунке для сверхгигантов и ярких гигантов в диапазоне T_{eff} от 4400 до 6600 K

наблюдается хорошее согласие между поправками Δ_{NLTE}, найденными по программе LiCOR и с помощью не-ЛТР расчетов в работе [2]. Для большинства рассмотренных звезд (9 из 11) разница между значениями Δ_{NLTE},

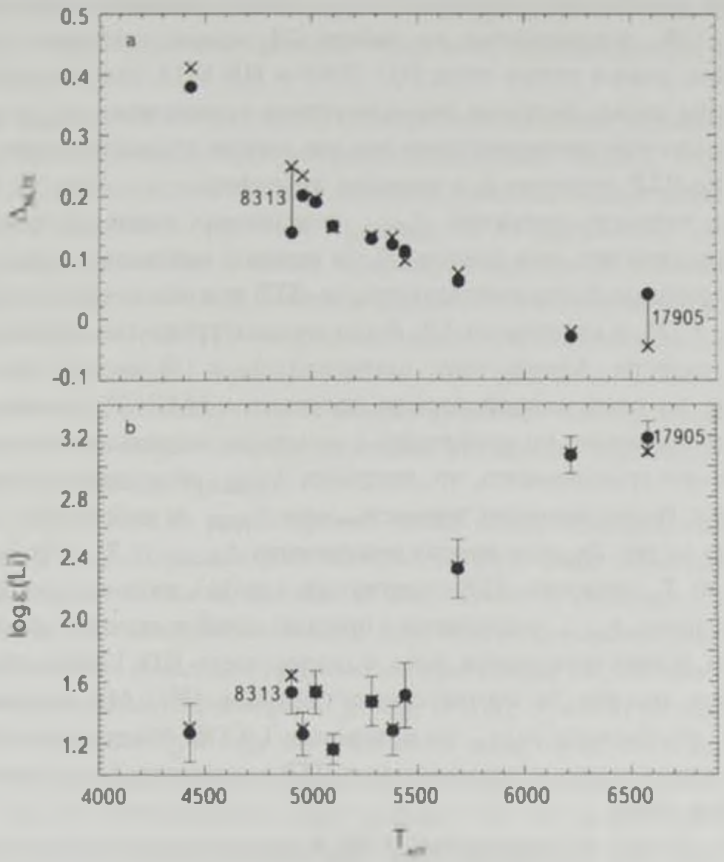

Рис 2. Сравнение a) не-ЛТР поправок Δ_{NLTE} и b) не-ЛТР содержаний лития log ε(Li) для 11-ти сверхгигантов и гигантов по данным двух работ: зачерненные кружки – [2], крестики – настоящая работа.

полученными независимо в двух работах, очень мала; она варьируется от +0.03 до -0.02 dex (в среднем +0.01 dex). Столь небольшие расхождения вполне можно приписать погрешностям интерполяции. Только для двух звезд разница больше: -0.09 dex для HD 17905 и +0.11 dex для HR 8313 (они отмечены на рис.2).

Из многолетнего опыта не-ЛТР вычислений для разных химических элементов хорошо известно, что данные разных авторов для линий одних и тех же атомов или ионов могут заметно различаться. Это объясняется различиями в методике не-ЛТР расчетов, а также в применяемых моделях

атмосфер. Линд и др. [3] сравнили свои результаты для лития с данными других авторов и пришли к выводу, что разница в не-ЛТР поправках достигает 0.20 dex. В частности, как следует из [3], вследствие указанных выше причин ожидаемая разница в Δ_{NLTE} между данными работы [2] и данными LiCOR, основанными на работе [3], может достигать 0.12 dex. Таким образом, даже в случае звезд HD 17905 и HR 8313, для которых выше были отмечены самые большие несоответствия в значениях Δ_{NLTE} (около ± 0.10 dex), указанные несоответствия вполне можно объяснить отличиями в методике не-ЛТР расчетов и в моделях атмосфер.

Обсуждая точность поправок Δ_{NLTE}, найденных нами по программе LiCOR, следует отметить, что данные [3], на которых основана эта программа, получены с помощью более совершенной не-ЛТР методики, чем в работе [2]. В частности, в [3], в отличие от [2], были учтены неупругие столкновения с атомами водорода. Кроме того, примененные в [3] модели атмосфер, рассчитанные по современной версии программы MARCS, по-видимому, являются более точными по сравнению с моделями, использованными в [2]. Все это позволяет предположить, что поправки Δ_{NLTE}, полученные с помощью LiCOR, имеют более высокую точность, чем Δ_{NLTE} в работе [2].

Как видно из рис.2b, если вместо зависимости Δ_{NLTE} от T_{eff} рассматривать зависимость от T_{eff} самих не-ЛТР содержаний $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, разница между двумя системами поправок Δ_{NLTE} оказывается в пределах ошибок определения величин $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. Этот вывод справедлив даже в случае звезд HD 17905 и HR 8313 (бары ошибок на рис.2b соответствуют данным [2]). Мы приходим к заключению, что расчеты Δ_{NLTE} по программе LiCOR обеспечивают вполне приемлемую точность при исследовании не-ЛТР содержания Li для достаточно больших групп звезд.

Тестовые расчеты по программе LiCOR были проведены нами также для холодного K-гиганта HD 77361, интересного тем, что он принадлежит к редкому типу "super Li-rich giant". В работе [5] для этой звезды были найдены следующие параметры: $T_{eff} = 4370$ K, $\log g = 2.30$, $[Fe/H] = -0.01$, $V_t = 1.1$ км/с и ЛТР-содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.80$ (по линии 6707.8 Å). С помощью LiCOR получаем для этих параметров не-ЛТР поправку $\Delta_{NLTE} = -0.19$, которая отличается от значения $\Delta_{NLTE} = -0.11$, найденного в [5], на -0.08 dex.

3. *Определение не-ЛТР значений* $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ *для ярких гигантов из списка Лебре и др. [6].* Как уже отмечалось, в работе [2] был выполнен не-ЛТР анализ содержания лития в атмосферах 55 F- и G-звезд классов светимости I и II. Полученные для них содержания $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, а также их последующие сравнения с предсказаниями теории привели к ряду интересных выводов. Возможность значительного расширения списка звезд этого типа дает

работа Лебре и др. [6]. В ней были найдены ЛТР-содержания лития (по линии Li I 6707.8 Å) для 145 F-, G- и K-ярких гигантов (класс светимости II и отчасти II-III). Существенно, что в списке [6] присутствуют как одиночные, так и спектрально-двойные звезды. Чтобы применить к этим звездам нашу программу LiCOR, сначала проведем отбор звезд, подходящих для последующего анализа.

Мы исключили из списка [6] спектрально-двойные звезды; отметим, что в [2] двойные звезды тоже не рассматривались. Важно, что корректный анализ двойных систем требует индивидуального определения параметров каждого компонента, включая $T_{\rm eff}$, $\log g$, M и содержания лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. Примером такого анализа может служить исследование двойной звезды ι Peg [7], где компоненты A и B показали разное, но высокое содержание Li (если учесть небольшие не-ЛТР поправки, найденные с помощью LiCOR, содержание Li составляет $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.17$ и 2.59 для A и B, соответственно). Поскольку в [6] двойные звезды анализировались как одиночные и для них были получены некие средние значения указанных параметров, они были исключены из рассмотрения.

Мы исключили из рассмотрения также самые маломассивные звезды с массами $M < 1 M_{\odot}$, для которых использованные нами эволюционные треки не могли дать надежной оценки M (см. ниже). В результате в списке [6] мы оставили 91 одиночную звезду, пригодную для дальнейшего анализа.

Как отмечено выше, для применения программы LiCOR необходимо знать следующие входные параметры: $T_{\rm eff}$, $\log g$, $[Fe/H]$, V_t и ЛТР-содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. Значения $T_{\rm eff}$ и $\log g$ для ряда звезд в [6] были взяты из литературы. Когда такие данные отсутствовали, эффективная температура $T_{\rm eff}$ в [6] была определена по фотометрическому индексу $(B-V)$, а для ускорения силы тяжести было принято значение $\log g = 2.0$. Кроме того, для части таких звезд было принято $V_t = 2$ км/с и $[Fe/H] = 0.0$. Таким образом, для некоторой части звезд в [6] были заданы приближенные параметры $\log g = 2.0$, $V_t = 2$ км/с и $[Fe/H] = 0.0$. Необходимо оценить, как это могло повлиять на определяемое содержание лития.

Относительно индекса металличности $[Fe/H]$ можно сказать, что для большинства звезд в [6] этот параметр действительно близок к нулю; он варьируется в диапазоне от +0.5 до -0.5 dex (см. табл.1 в [6]). Значение параметра микротурбулентности $V_t = 2$ км/с для ярких гигантов (класс светимости II), возможно, немного занижено. Согласно работе [8], где было выполнено аккуратное определение фундаментальных параметров для 63 галактических сверхгигантов и ярких гигантов (эти данные были использованы в [2]), значения V_t для звезд класса светимости II лежат преимущественно в диапазоне $V_t \approx 2.5 - 3.5$ км/с. Однако возможное небольшое занижение V_t в [6], согласно

нашей оценке, не могло оказать значительного влияния на определение $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$.

Что касается значения $\log g = 2.0$, то оно достаточно хорошо соответствует F- и G-звездам класса светимости II; согласно той же работе [8], для них характерны значения $\log g = 2.0 - 2.5$. К счастью, определяемое содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ малочувствительно к ошибкам в параметре $\log g$, поэтому замена точного значения $\log g$ на $\log g = 2.0$ не могла оказать существенного влияния на определение содержания лития в [6]. Очень слабую чувствительность содержания лития к $\log g$ подтверждают, например, расчеты [3], из которых следует, что изменение $\log g$ на 1.0 dex (от 2.0 до 3.0) меняет эквивалентную ширину W линии Li I 6707.8 Å всего лишь на несколько процентов. Соответствующее изменение в содержании лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ составляет только 0.02-0.03 dex. Намного чувствительней величина W к вариациям эффективной температуры T_{eff}: изменение T_{eff} на 100 K может изменить W на 50-60%.

Параметры T_{eff} и $\log g$ из работы [6] необходимы не только для определения поправок Δ_{NLTE} в содержании лития для 91 отобранной нами из [6] звезды, но и для определения масс M этих звезд. Чтобы оценить M, мы использовали те же эволюционные треки [9], что и в работах [2] и [8]. На рис.3 в плоскости T_{eff} - $\log g$ представлена эволюционная диаграмма, где наряду с положениями исследуемых звезд (крестики) показан ряд треков [9],

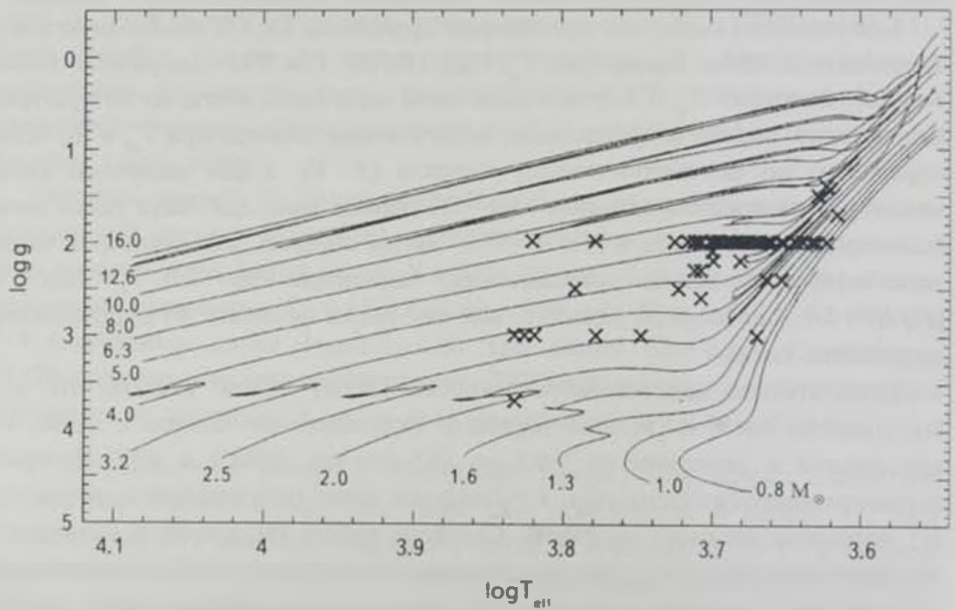

Рис.3. Положение 91 й звезды, отобранной из списка Лебре и др. [6], на плоскости T_{eff} - $\log g$. Показан ряд эволюционных треков [9]

рассчитанных для масс M от 0.8 до 16 $M_\odot$ (здесь $M_\odot$ - масса Солнца). Как отмечено выше, треки [9] позволяют оценить M только для звезд с $M \geq 1 M_\odot$.

С помощью программы LiCOR мы нашли не-ЛТР поправку Δ_{NLTE} для 91 отобранной звезды. На рис.4 полученные значения Δ_{NLTE} представлены в зависимости от эффективной температуры T_{eff}. Здесь хорошо виден тренд величины Δ_{NLTE} с уменьшением T_{eff}: если при $T_{eff} = 6000 - 7000$ K поправка Δ_{NLTE} близка к нулю, то при понижении T_{eff} она растет и достигает 0.3-0.4 dex для наиболее холодных звезд с $T_{eff} = 4100 - 4500$ K. Наличие такого тренда уже было отмечено при обсуждении рис.2а.

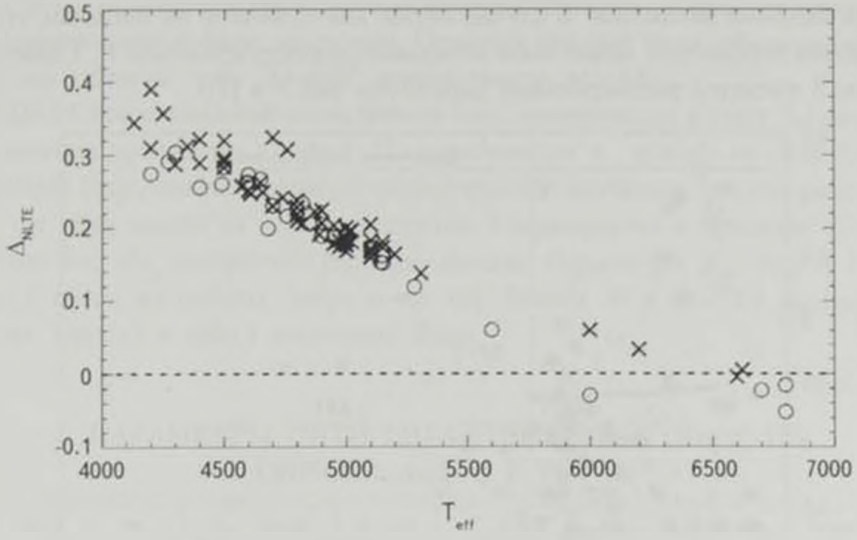

Рис.4. Поправки Δ_{NLTE}, вычисленные для 91-й звезды из списка [6], в зависимости от эффективной температуры T_{eff}. Открытые кружки соответствуют точным значениям $\log\varepsilon(Li)$, крестики - верхним пределам величины $\log\varepsilon(Li)$.

При сравнении с рис.1 может возникнуть вопрос, почему на рис.4 при низких температурах T_{eff} не наблюдается разброс значений Δ_{NLTE}, связанный с различиями в содержаниях лития $\log\varepsilon(Li)$. Ответ состоит в том, что в интервале T_{eff} между 4000 и 5500 K все отобранные из [6] звезды имеют низкие ЛТР-содержания $\log\varepsilon(Li) < 1.5$, которым, согласно рис.1, соответствуют сравнительно высокие значения Δ_{NLTE}.

Использовав найденные поправки Δ_{NLTE}, мы нашли не-ЛТР содержание лития $\log\varepsilon(Li)$ для 91 отобранной звезды. Следует вновь отметить, как и в [1], тот важный факт, что в спектрах большинства FGK-гигантов и сверхгигантов линия Li I 6707.8 Å отсутствует, поэтому для таких звезд можно оценить лишь верхний предел содержания лития $\log\varepsilon(Li)$. В частности, из 91 объекта, представленного на рис.4, для 63 звезд (69%) данные [6] позволяют

указать только верхний предел содержания Li (крестики), а точная оценка $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ получена для 28 звезд (31%) (открытые кружки).

4. *Анализ не-ЛТР содержаний лития для 146 FGK-гигантов и сверхгигантов.* Полученные выше не-ЛТР содержания Li для 91-й FGK-звезды классов светимости II и II-III, объединенные с содержаниями Li из работы [2] для 55 звезд классов светимости I, II и отчасти III, дают в сумме достаточно интересную основу для анализа содержания лития у 146 FGK-гигантов и сверхгигантов. На рис.5 не-ЛТР значения $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ для этих звезд представлены как функция массы M, важнейшего параметра с точки зрения звездной эволюции. В случае лития, как отмечено во *Введении*, столь же важным параметром может быть начальная скорость вращения V_0. (Заметим, что рис.5 является расширенным вариантом рис.7 в [2]).

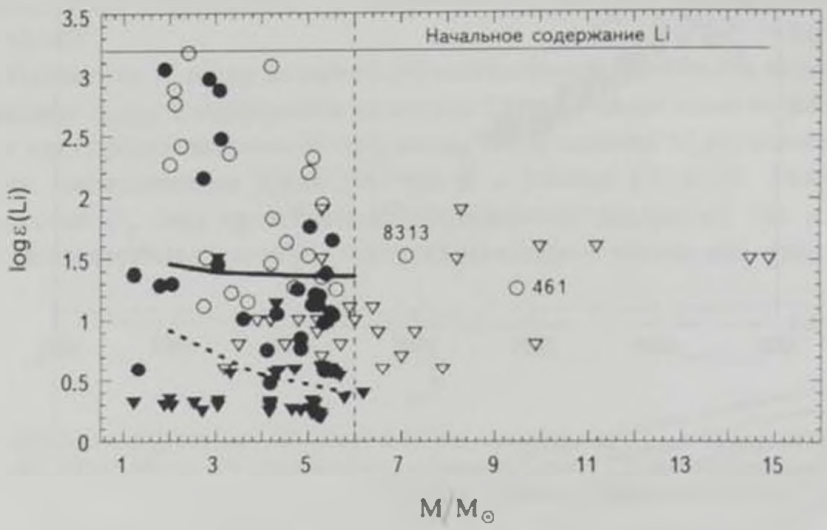

Рис.5. Не-ЛТР содержание лития как функция массы. Заполненные значки соответствуют данным для 91-й звезды, полученным в настоящей работе, открытые значки - данным для 55-ти звезд из работы [2]. Кружки - точные значения $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, треугольники - верхние пределы $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. Сплошная линия - предсказание теории для холодных гигантов с $V_0 = 0$ км/с после ГКП, штриховая линия - то же для гигантов с $V_0 = 50$ км/с.

Один из главных результатов, полученных в [2], состоял в том, что и данные наблюдений и расчеты звездных моделей показывают, что имеются принципиальные различия в поведении величины $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ у звезд с массами $M \le 6M_\odot$ и $M > 6M_\odot$. Для 91 звезды, рассмотренной в настоящей работе, мы получили массы M в интервале от 1.2 до $6.2M_\odot$. Таким образом, практически все эти звезды, представленные на рис.5 заполненными значками (кружки и треугольники), попадают в область $M \le 6M_\odot$. Как и для звезд

из списка [2] (открытые кружки и треугольники на рис.5), для них наблюдаются значительные вариации величины $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, начиная со значений, близких к начальному содержанию $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.1$ [1], и до полного отсутствия признаков лития в спектрах многих звезд. Как отмечено выше, для 63 звезд из 91 удалось оценить только верхний предел величины $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, а для 28-ми звезд получено точное значение $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$.

Особый интерес на рис.5 представляют звезды с высоким содержанием лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) \geq 2.0$, которые относят к типу "Li-rich". Известно, что звезды этого типа составляют малую часть всех FGK-гигантов и сверхгигантов (см. [1]), и это обстоятельство приводит к предположению о краткой продолжительности данной фазы эволюции. Отметим важный факт, обнаруженный в [2]: все гиганты типа "Li-rich" имеют массы $M < 6 M_{\odot}$.

Из 91 исследованной нами звезды пять принадлежат к типу "Li-rich". Их параметры приведены в табл.1. По параллаксам π, взятым из базы данных SIMBAD (http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid), мы нашли для них расстояние $d = 1/\pi$. Как видно из табл.1, величина d варьируется в пределах от 39 до 160 пк, т.е. это достаточно близкие звезды. Параметры T_{eff}, $\log g$ и $V\sin i$ в табл.1 взяты из работы Лебре и др. [6]. Массы M и не-ЛТР содержания лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ в табл.1 получены нами.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ ПЯТИ ГИГАНТОВ ТИПА "Li-rich" ИЗ СПИСКА ЛЕБРЕ И ДР. [6]

HD	m_v, mag	π, mas	d, пк	$T_{\mathrm{eff}}/\log g$ [6]	$V\sin i$, км/с	$M/M_{\odot}$	$\log\varepsilon(\mathrm{Li})$
65228	4.20	6.25±0.23	160	5600/3.0	14	2.7	2.16
186155	5.07	20.15±0.16	50	6000/3.0	59	2.9	2.97
204509	6.63	9.52±0.91	105	6700/3.0	19	3.1	2.88
216756	5.91	25.63±0.34	39	6800/3.7	12	1.9	3.05
218043	6.78	15.51±0.45	64	6800/3.0	20	3.1	2.49

Интересно, что один из этих гигантов, HD 65228 (HR 3102), был исследован в работе [2]. В табл.2 мы сравнили параметры этой звезды по данным [2] и [6]. Видим, что при кажущемся хорошем согласии в значениях T_{eff} (разница = 90 K) имеет место заметное расхождение в величине $\log g$, составляющее около 0.8 dex. Как уже отмечалось, определяемое содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ чувствительно к вариациям T_{eff}, а от $\log g$ зависит слабо. По нашей оценке различие в 0.8 dex в значениях $\log g$ могло изменить $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ только на 0.02 dex. Согласно табл.2, найденное в [2] содержание $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ отличается от полученного в данной работе на 0.17 dex (интересно, что не-ЛТР поправка в

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗДЫ HD 65228 (HR 3102) ПО ДАННЫМ ДВУХ РАБОТ

$T_{\rm eff}$	log$g$	$[Fe/H]$	$V\sin i$, км/с	logε(Li) ЛТР	logε(Li) не-ЛТР	Литература
5690	2.17	0.11	12	2.27	2.33	[2]
5600	3.00	0.00	14	2.10	2.16*	[6]

* Не-ЛТР значение logε(Li), найденное в настоящей работе.

обоих случаях одинакова: $\Delta_{\rm NLTE}$ = 0.06 dex). Наша оценка показала, что такое расхождение объясняется в основном как раз отмеченной выше разницей 90 K в значениях $T_{\rm eff}$.

Пример гиганта HD 65228 интересен также тем, что для него были найдены следующие аномалии в содержаниях углерода и азота (относительно солнечных содержаний): дефицит углерода $[C/Fe] = -0.24$, избыток азота $[N/Fe] = 0.41$ и повышенное отношение $[N/C] = 0.65$ [10]. Такие аномалии C и N характерны для гигантов, прошедших фазу глубокого конвективного перемешивания (ГКП), но в этом случае весь литий должен был бы выгореть. Высокое значение logε(Li) = 2.3 у HD 65228 в сочетании с аномалиями C и N приводит к предположению о недавнем синтезе лития (см. ниже).

Как указано в [2], расчеты звездных моделей без вращения ($V_0 = 0$ км/с) дают для FGK-сверхгигантов с массами $M = 2 - 6 M_\odot$, прошедших фазу ГКП, атмосферное содержание лития, близкое в среднем к logε(Li) = 1.4 (сплошная линия на рис.5). Такими объектами на рис.5 могут быть звезды, попадающие в полосу logε(Li) = 1.4 ± 0.3, т.е. с logε(Li) = 1.1 – 1.7 (с учетом возможных ошибок в значениях logε(Li)). Видим, что для объектов с массами $M \le 6 M_\odot$ в эту полосу в дополнение к 10-ти звездам из работы [2] (открытые кружки) попадает еще 11 звезд из числа вновь исследованных (заполненные кружки). Всего получается 21 звезда, что составляет заметную долю (14%) от общего числа (146 звезд).

Определение не-ЛТР содержания Li, выполненное в настоящей работе для группы FGK-гигантов, состоящей из 91 звезды, не добавило новых (по отношению к [2]) данных для объектов с массами $M > 6 M_\odot$. Поэтому мы лишь кратко напомним основные выводы работы [2] относительно таких объектов. Согласно предсказаниям теории, звезды с $M > 6 M_\odot$ должны приходить в стадию FGK-гиганта (сверхгиганта) с очень низким содержанием Li, которое не может быть детектировано. Это относится даже к звездам без вращения ($V_0 = 0$ км/с), у которых содержание Li резко падает вскоре после выхода из

стадии ГП. Данные [2] и рис.5 в основном подтверждают такое предсказание: большинство звезд с $M > 6M_\odot$ не показывает лития в своих спектрах. Исключением являются два холодных сверхгиганта – HR 461 (K0 Ia) и HR 8313 (G5 Ib) (отмечены на рис.5), которые заслуживают отдельного внимания.

Для объяснения этих двух звезд возможны два варианта. С одной стороны, учитывая их низкие температуры $T_{\rm eff}$ (4430 и 4910 K, соответственно), можно предположить, что они уже прошли фазу ГКП. Примечательно, что найденные для них содержания лития (1.3 и 1.5, соответственно) очень близки к величине $\log\varepsilon({\rm Li}) \approx 1.4$, предсказанной после ГКП для моделей с $V_0 = 0$ км/с и с массами $M \le 6M_\odot$ (см. выше). Возникает предположение, что предсказания теории при $M > 6M_\odot$ не вполне корректны. С другой стороны, если расчеты при $M > 6M_\odot$ верны, остается предположить, что в этих звездах недавно произошел синтез лития.

5. *Начальная скорость вращения V_0 и содержание лития*. Расчеты звездных моделей с вращением показывают, что содержание лития очень чувствительно к начальной скорости вращения V_0. В связи с этим возникает вопрос: какие начальные скорости V_0 наблюдаются у FGK-гигантов и сверхгигантов в реальности? Следуя [1], напомним, что предшественниками таких звезд с массами $M = 3 - 20M_\odot$ являются ранние B-звезды ГП. В [11] получено, что максимум в распределении наблюдаемых скоростей вращения $V\sin i$ у карликов ГП классов B0-B2 приходится на интервал 0-20 км/с, хотя весь диапазон значений $V\sin i$ простирается до ~ 400 км/с. Близкий результат ранее был получен в [12]: максимум в распределении $V\sin i$ у ранних B-звезд ГП приходится на интервал 0-50 км/с. Таким образом, наблюдаемые скорости вращения у ранних B-звезд ГП, предшественников рассматриваемых гигантов и сверхгигантов, дают основание для вывода, что у большинства из них начальная скорость вращения V_0 была мала.

Дополнительным подтверждением этого могут служить результаты, полученные недавно в [13], где проанализировано отношение N/O в атмосферах 46 ранних B-звезд ГП. Величину N/O можно рассматривать как один из индикаторов звездной эволюции. В [13] показано, что для большинства рассмотренных звезд она не изменилась в процессе эволюции на ГП (то есть $[N/O] \approx 0$). Отсюда был сделан вывод, что эти звезды имели малую величину V_0. Строго говоря, из сравнения с моделями вращающихся звезд следует, что у них $V_0 < 100$ км/с. Только при $V_0 = 200$ - 300 км/с наблюдаются повышенные значения $[N/O] = 0.4$ - 0.8 в конце стадии ГП, но таких звезд мало [13].

Содержания C, N и O, а также их отношения (в частности, N/O) меняются в процессе эволюции, однако эти изменения не столь чувствительны к начальной скорости вращения V_0, как содержание лития. Как отмечено в [1],

например, при $V_0 = 100$ км/с к концу стадии ГП содержания C и N в атмосфере практически не меняются, в то же время содержание Li падает на несколько порядков и, следовательно, становится необнаружимым. Даже при скорости $V_0 = 50$ км/с содержание Li в атмосферах звезд с массами 2 и $4\,M_\odot$ к концу ГП должно понизиться на 0.6 и 1.1 dex, что соответствует содержаниям $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 2.6$ и 2.1. После перехода в стадию холодного гиганта и после ГКП содержание Li при $V_0 = 50$ км/с становится столь малым ($\log\varepsilon(\mathrm{Li}) < 1$), что его трудно детектировать (см. штриховую линию на рис.5). Без сомнения, литий демонстрирует уникальную чувствительность к величине V_0.

Из сказанного ясно, что случай $V_0 = 0$ км/с для звезд рассматриваемого типа представляет особый интерес. Возможна ситуация, когда при $V_0 = 0$ км/с FGK-сверхгигант (гигант) с $M = 2 - 6\,M_\odot$ еще не прошел фазу ГКП; расчеты звездных моделей показывают, что для этого необходимо условие $T_{\mathrm{eff}} > 5900$ K. В этом случае звезда, хотя и находится на достаточно продвинутой стадии эволюции, должна сохранить начальное содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.1$.

Звезды со значениями $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$, близкими к 3.2, действительно наблюдаются на рис.5. Три таких звезды представлены в табл.1; это звезды HD 186155, 204509 и 216756, у которых $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 2.88 - 3.05$. В работе [2] были исследованы две звезды, HD 17905 и HR 7008, с содержаниями $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.18$ и 3.07, особенно близкими к начальному значению $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2$. Там же были рассмотрены еще две звезды, HR 1298 и HR 2936 с $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 2.76$ и 2.88. Все эти звезды - F-гиганты с эффективными температурами $T_{\mathrm{eff}} \geq 6000$ K. Поскольку у них $T_{\mathrm{eff}} > 5900$ K, вполне возможно, что они еще не достигли фазы ГКП (альтернатива - возвращение в область повышенных температур T_{eff} по известной петле "red-blue-red", см. [2]). Если они начинали свою эволюцию с малой скоростью вращения $V_0 \approx 0$ км/с, тогда, согласно теории, они должны были сохранить в атмосфере исходное содержание лития.

Случай $V_0 = 0$ км/с имеет прямое отношение также к тем гигантам, которые уже прошли фазу ГКП. Как отмечено выше, для таких звезд теория предсказывает содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) \approx 1.4$. Напомним, что на рис.5 имеется 21 звезда в группе $M \leq 6\,M_\odot$ с содержаниями $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 1.4 \pm 0.3$. Нельзя исключить, что тот же сценарий подходит и для двух сверхгигантов из группы $M > 6\,M_\odot$, именно HR 461 и HR 8313, так как их содержания лития тоже близки к $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 1.4$ (см. выше).

6. *О происхождении гигантов, богатых литием*. Как уже отмечалось, особый интерес привлекают холодные гиганты и сверхгиганты, богатые литием (Li-rich giants), у которых $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) \geq 2$. В литературе встречается высказывание, что все гиганты типа "Li-rich" представляют загадку для стандартной теории звездной эволюции. Однако можно предположить, что

какая-то часть этих звезд все-таки находит объяснение в современных расчетах моделей звезд.

Из предыдущего раздела следует, что для FGK-гигантов и сверхгигантов достаточно часто имеет место случай $V_0 \approx 0$ км/с. Как отмечено выше, звезды с $V_0 \approx 0$ км/с, если они еще не достигли фазы ГКП, могут наблюдаться как гиганты типа "Li-rich" с содержаниями лития вплоть до исходной величины $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2$. Такой сценарий появления гигантов "Li-rich" может работать в диапазоне значений V_0 от 0 до 50 км/с (см. выше). Следовательно, современные эволюционные модели звезд могут объяснить частично существование гигантов типа "Li-rich", если они имели малые начальные скорости вращения $V_0 \approx 0-50$ км/с. Иначе говоря, часть гигантов "Li-rich" является вполне объяснимой с точки зрения современной теории звездной эволюции.

Однако теория оказывается несостоятельной для звезд с $V_0 \approx 0-50$ км/с, которые уже прошли фазу ГКП (содержание Li после ГКП становится слишком низким, см. сплошную и штриховую линии на рис.5). Тем более теория не может объяснить происхождение гигантов "Li-rich", если $V_0 \sim 100$ км/с и выше. Здесь следует отметить, что многие гиганты "Li-rich" действительно прошли фазу ГКП; об этом свидетельствует низкое отношение изотопов углерода $^{12}C/^{13}C$ у этих звезд (см. [1]). Можно снова напомнить пример гиганта HD 65228 (HR 3102) из табл.1, у которого были найдены аномалии в содержаниях C и N, свидетельствующие, что эта богатая литием звезда уже прошла фазу ГКП, во время которой весь литий должен был выгореть.

Совершенно невозможно объяснить с точки зрения стандартной теории происхождение гигантов, сверхбогатых литием ("super Li-rich giants"), у которых содержание Li существенно превышает начальное значение $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2$. Примером звезды типа "super Li-rich" является отмеченный выше холодный гигант HD 77361 (HR 3597), который, согласно [5], имеет высокое содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.75 \pm 0.11$, найденное не по одной, а по трем линиям Li I: по сильной резонансной линии 6707.8 Å и более слабым субординатным линиям 6103.6 и 8126.4 Å. У этой звезды обнаружено низкое отношение изотопов углерода $^{12}C/^{13}C = 4$ [14] (напомним, что у Солнца $^{12}C/^{13}C = 89$), которое свидетельствует, что звезда прошла фазу ГКП, во время которой весь литий должен был выгореть.

Несостоятельность теории во всех отмеченных случаях заставляет искать иные объяснения высоким содержаниям лития. В настоящее время в литературе рассматриваются две гипотезы, призванные объяснить феномен звезд типа "Li-rich" и "super Li-rich" (см. [1]). В первой гипотезе для объяснения предлагается недавний синтез лития внутри звезды. В другой, привлекается внешний фактор: поглощение звездой планеты-гиганта типа Юпитера или коричневого карлика. Вторая гипотеза, кроме высокого содержания Li, по-

видимому, может объяснить еще один интересный факт: неожиданно большие скорости вращения (до 100 км/с) у ряда звезд типа "Li-rich", совершенно нетипичные для холодных гигантов [1].

Обе эти гипотезы активно обсуждаются в современной литературе. В отношении каждой из них выдвигаются аргументы "за" и "против", однако в нашу задачу не входит их детальное обсуждение. Из недавних работ можно отметить исследование [15], интересное расчетами в подтверждение захвата планеты. Альтернативная гипотеза, синтез лития внутри звезды, обсуждается в работе [16], причем с несколько неожиданной стороны - в связи с возможным образованием органических молекул в оболочке вокруг гиганта типа "Li-rich".

7. *Заключение*. Подводя итоги, отметим основные результаты настоящей работы.

Создан метод пятимерной интерполяции и построена соответствующая компьютерная программа LiCOR, которая на основе расчетов [3] позволяет находить не-ЛТР поправку Δ_{NLTE} в содержании лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ для линии Li I 6707.8 Å по следующим пяти параметрам: эффективная температура T_{eff}, ускорение силы тяжести $\log g$, индекс металличности $[Fe/H]$, скорость микротурбулентности V_t и ЛТР-содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. Сравнение с детальными не-ЛТР расчетами для ряда звезд подтвердило достаточно высокую точность этого метода.

С помощью программы LiCOR определены значения Δ_{NLTE}, а также не-ЛТР содержания Li для 91одиночного яркого гиганта, отобранного из списка Лебре и др. [6]. Объединив эти результаты с данными для 55 звезд из работы [2], мы получили не-ЛТР значения $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ для 146 FGK-гигантов и сверхгигантов, что послужило основой для проверки и подтверждения выводов, полученных в [2].

Подтвержден большой разброс значений $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ для звезд с массами $M \le 6M_{\odot}$, начиная со значений, близких к начальному содержанию $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.1$, и до полного отсутствия признаков лития. Для большинства рассмотренных звезд из-за отсутствия линии Li в спектре можно оценить лишь верхний предел содержания Li. Эти результаты в целом согласуются с современными моделями вращающихся звезд.

Обсуждая зависимость содержаний $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ от начальной скорости вращения V_0, мы подтвердили, что литий демонстрирует уникальную чувствительность к V_0. Отмечено, что большинство рассмотренных звезд, будучи на стадии ГП ранними В-звездами, имело малую скорость вращения $V_0 \sim 0$ км/с, что могло сыграть решающую роль в их эволюции, в том числе и в эволюции содержания лития.

Показано, что случай $V_0 = 0$ км/с имеет прямое отношение к гигантам и сверхгигантам с содержаниями $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 1.4 \pm 0.3$, которые составляют заметную долю исследованных звезд. Согласно теории, они имели $V_0 = 0$ км/с и уже испытали глубокое конвективное перемешивание.

Обсуждаются гиганты, богатые литием (тип "Li-rich"), которые имеют содержание лития $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) \geq 2$ вплоть до значений, близких к начальному значению $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.1$ и даже выше (тип "super Li-rich"). Показано, что часть гигантов "Li-rich", у которых $V_0 \approx 0$ км/с, могут быть согласованы с современными эволюционными моделями. Для остальных звезд типа "Li-rich" и всех звезд типа "super Li-rich", где стандартная теория оказывается несостоятельной, приходится прибегать к гипотезе недавнего синтеза лития в звезде или к альтернативной гипотезе захвата звездой гигантской планеты типа Юпитера или коричневого карлика.

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

ANALISYS OF THE NON-LTE LITHIUM ABUNDANCE FOR A LARGE SAMPLE OF F-, G- AND K-TYPE GIANTS AND SUPERGIANTS

L.S.LYUBIMKOV, D.V.PETROV

Five-dimensional interpolation method is created and the corresponding computer code is constructed, which on the basis of published calculations allows to find the non-LTE correction Δ_{NLTE} in the lithium abundance $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ derived from the Li I 6707.8 Å line. The Δ_{NLTE} value is determined by the following five parameters: the effective temperature T_{eff}, surface gravity acceleration $\log g$, metallicity index $|Fe/H|$, microturbulent velocity V_t and LTE lithium abundance $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$. With this code the Δ_{NLTE} values and the non-LTE Li abundances are obtained for 91 single bright giants from Lebre et al.'s list. Combining these results with data for 55 stars from previous work, we got the non-LTE $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ values for 146 FGK giants and supergiants. We have confirmed that for the majority of such stars only the upper Li limit can be evaluated due to the lack of the Li line in a spectrum. Large spread of the $\log\varepsilon(\mathrm{Li})$ values for the stars with masses $M \leq 6 M_{\odot}$ is confirmed. Comparison of the results with computations of stellar models confirms the unique sensitivity of the lithium abundance to the initial rotational velocity V_0. Giants and supergiants with abundances $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 1.4 \pm 0.3$ are discussed, which,

according to the theory, had the rotational velocity $V_0 = 0$ km/s and have already experienced a deep convective mixing. The Li-rich giants are considered, which have the lithium abundance $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) \geq 2$ up to values close to the initial value $\log\varepsilon(\mathrm{Li}) = 3.2 \pm 0.1$. It has been shown that some of the Li-rich giants, having $V_0 \approx 0 - 50$ km/s, are in accordance with current evolutionary models. For explanation of other stars of this type, as well as all super Li-rich giants, where the standard theory seems to be untenable, it is necessary to use the hypothesis of a recent lithium synthesis in the star or the alternative hypothesis of a giant planet engulfing by the star.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **59**, 459, 2016, (Astrophysics, **59**, 411, 2016).
2. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, B.M.Kaminsky et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **427**, 11, 2012.
3. *K.Lind, M.Asplund, P.S.Barklem*, Astron. Astrophys., **503**, 541, 2009.
4. *Г.Корн, Т.Корн*, Справочник по математике для научных работников и инженеров, М., Наука, 1970. (G.A.Korn, T.M.Korn, Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. New York, McGraw-Hill Book Company, 1961).
5. *Л.С.Любимков, Б.М.Каминский, В.Г.Метлов и др.*, Письма в Астрон. ж., **41**, 872, 2015, (Astron. Lett., **41**, 809, 2015).
6. *A.Lèbre, P. de Laverny, J.D. do Nascimento et al.*, Astron. Astrophys., **450**, 1173, 2006.
7. *Л.С.Любимков, Н.С.Полосухина, С.И.Ростопчин*, Астрофизика, **34**, 149, 1991, (Astrophysics, **34**, 65, 1991).
8. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.I.Rostopchin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **402**, 1369, 2010.
9. *A.Claret*, Astron. Astrophys., **424**, 919, 2004.
10. *L.S.Lyubimkov, D.L.Lambert, S.A.Korotin et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **446**, 3447, 2015.
11. *S.Simón-Díaz, A.Herrero*, Astron. Astrophys., **562**, A135, 2014.
12. *G.A.Bragança, S.Daflon, K.Cunha et al.*, Astron. J., **144**, 130, 2012.
13. *Л.С.Любимков*, Астрофизика, **59**, 519, 2016, (Astrophysics, **59**, 461, 2016).
14. *Y.B.Kumar, B.E.Reddy*, Astrophys. J., **703**, L46, 2009.
15. *C.Aguilera-Gómez, J.Chaname, M.H.Pinsonneault et al.*, Astrophys. J., **829**, 127, 2016.
16. *R. de la Reza, N.A.Drake, I.Oliveira et al.*, Astrophys. J., **806**, 86, 2015.