

УДК 523.985

Э. А. Барановский, В. П. Таращук

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
п. Научный, Крым, 98409
edward@crao.crimea.ua

Содержание лития в солнечном пятне по данным наблюдений в августе 1981 г.

Наблюдался спектр солнечного пятна в областях линии Li I 670.8 нм и некоторых линий Ca I, Ti I, Al I, Na I. Наблюдения проводились 21 августа 1981 г. на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Была рассчитана модель пятна по наблюдаемым профилям линий Ca I, Ti I, Al I, Na I. С помощью рассчитанной модели пятна и наблюдаемого профиля линии Li I 670.8 нм получена оценка содержания лития $\lg(N_{Li}) = 0.78$ (в шкале $\lg A(H) = 12.0$).

ВМІСТ ЛІТІЮ У СОНЯЧНІЙ ПЛЯМІ ЗА ДАНИМИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У СЕРПНІ 1981 Р., Барановський Е. А., Таращук В. П. — Спостережівся спектр сонячної плями в областях лінії Li I 670.8 нм і деяких ліній Ca I, Ti I, Al I, Na I. Спостереження виконувались 21 серпня 1981 р. на телескопі БСТ-2 Кримської астрофізичної обсерваторії. Було розраховано модель плями за профілями ліній Ca I, Ti I, Al I, Na I. За допомогою розрахованої моделі плями і спостереженого профіля лінії Li I 670.8 нм отримано оцінку вмісту літію $\lg(N_{Li}) = 0.78$ (за шкалою $\lg A(H) = 12.0$).

THE LITHIUM ABUNDANCE IN A SOLAR SPOT FROM OBSERVATIONS IN AUGUST 1981, by Baranovskii E. A., Taraschuk V. P. — A solar spot spectrum in the regions of the Li I 670.8 nm line as well as of some Ca I, Ti I, Al I, and Na I lines was observed. The observations were performed on 21 August 1981 with the TST-2 telescope of the Crimean Astrophysical Observatory. A spot model was calculated using the observed profiles of Ca I, Ti I, Al I, and Na I lines. On the basis of this model and the observed Li I 670.8 nm line profile the lithium abundance was estimated as $\lg(N_{Li}) = 0.78$ (in the scale $\lg A(H) = 12$).

Проблема лития в звездной астрофизике. Поведение лития на звездах и в межзвездной среде изучается несколько десятилетий, но до сих пор задача далека от решения. Проблема лития играет большую роль в

решении многих задач современной астрофизики. К ним относятся образование химических элементов, происхождение и развитие некоторых типов звезд (например, Ap), аномалии их поведения и внутренняя структура, роль ядерных реакций в различных процессах освобождения энергии на звездах и др.

У щелочного металла лития при переходе внешнего s -электрона на более высокие уровни возникают спектры с хорошо выраженными спектральными сериями, как у K, Na, Cs. Переход $2s \rightarrow 2p$ является резонансным, и соответствующая спектральная линия максимальна по интенсивности. Спин электрона обуславливает тонкую структуру уровней и спектральных линий, так что у ${}^7\text{Li}$ образуются линии 670.776 и 670.791 нм, а у ${}^6\text{Li}$ — 670.792 и 670.807 нм). ${}^6\text{Li}$ стабилен при наличии трех нейтронов, ${}^7\text{Li}$ стабилен с четырьмя нейтронами. Соотношение изотопов в Солнечной системе составляет 7.6 % и 92.4 % для ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ соответственно [2].

К настоящему времени литий, возникший при Большом взрыве, большей частью должен был исчезнуть. В межзвездном пространстве он может образоваться при столкновении более тяжелых атомов с высокоскоростными частицами космических лучей. В настоящее время содержание Li (и отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$) в межзвездном газе на порядок выше первоначального. Рождающиеся из облаков межзвездного газа звезды содержат этот литий. По-видимому, литий может существовать только в атмосферах очень молодых звезд.

Однако Li наблюдается и в атмосферах старых звезд. Полагают, что в этом случае он возникает при ядерной вспышке из легкого изотопа гелия ${}^3\text{He}$ в глубине звезды с последующим его выносом в верхние слои звезды. Из звездных оболочек при их постепенном рассеянии Li попадает в межзвездную среду, пополняя собой состав новорожденных звезд — происходит своеобразный круговорот лития. В период формирования Галактики химический состав среды отражал результат космического нуклеосинтеза. Поэтому содержание лития в звездах зависит от возраста звезды и ее эволюции.

Принято считать, что количество лития в звездах поздних классов коррелирует с такими характеристиками, как масса, возраст, скорость вращения. У звезд с глубокими конвективными зонами Li исчезал за относительно короткое время. (Это справедливо для звезд позднего типа главной последовательности.) Уменьшение содержания лития является чувствительным показателем процессов конвекции, диффузии, а также потери массы при разных стадиях эволюции звезд. В ряде случаев наблюдается корреляция содержания Li с хромосферной активностью. Следует заметить, что содержание лития и его изотопный состав могут изменяться в результате реакции «скальвания», когда энергичная частица, сталкиваясь с тяжелым ядром, выбивает из него ядро легкого элемента. Такие реакции могут происходить в активных областях на звездах и на Солнце в процессе появления потоков частиц, ускоренных до высоких энергий.

Особенности и задачи изучения лития на Солнце. Близость и относительная стабильность поведения Солнца являются очень благоприятными факторами наблюдения лития. В процессе исследования звездного лития приходится обращаться к Солнцу, где пространственное разрешение деталей позволяет выяснить связь свечения лития со структурными образованиями. Тем не менее поведение легких щелочных элементов и лития на Солнце, как и на звездах, относится к числу мало исследованных ключевых проблем современной астрофизики.

Линии лития практически отсутствуют в невозмущенной фотосфере и регистрируются в солнечных пятнах, где температура ниже. Поэтому изучение лития на Солнце — определение его содержания, выяснение его поведения во времени — возможно только с помощью наблюдений спектров солнечных пятен. При этом для построения моделей пятен и определения их некоторых физических параметров используются линии других элементов.

Основными задачами изучения лития на Солнце являются: 1) исследование поведения лития в различных структурных образованиях; 2) определение содержания и его изменения со временем (связь с фазой солнечного цикла); 3) определение содержания в пятнах, имеющих различные физические характеристики.

Изучение лития на Солнце осложняется тем, что его довольно многочисленные линии имеют малую интенсивность, и для наблюдений пригодна только линия 670.8 нм . В невозмущенной фотосфере линия очень слабая, ее остаточная интенсивность составляет 0.97 . Тем не менее именно резонансный дублет 670.8 нм наиболее пригоден для наблюдений в солнечных пятнах. Линия 610.3 нм очень слаба и сильно блендирована.

Наблюдения лития в солнечных пятнах и обработка спектров. За последние 50 лет выполнено всего шесть работ, где приводятся оценки содержания Li , полученные по спектрам пятен в области линии 670.8 нм [1, 5, 7, 10, 12, 13]. Все определения сделаны в приближении ЛТР. На рис. 1 показаны значения содержания лития, определенные в разные годы разными исследователями. Видно, что разные оценки различаются в несколько раз. Причина этого не

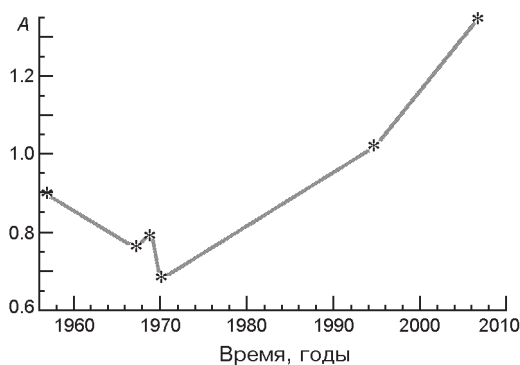


Рис. 1. Сводка данных о содержании лития в солнечных пятнах

выяснена — связано ли это с неточностями определений (например, учета рассеянного света или неправильной модели пятна), или это реальные различия содержания лития в разных пятнах и в разное время на Солнце при развитии активных областей. Другой особенностью этих определений является то, что в большинстве исследований использовались модели пятен, взятые из литературных источников (например, модель Цваана [14]). Это обстоятельство снижает точность определения содержания, так как разные пятна различаются по величине температуры и плотности. Только в двух недавних работах из этой серии (Ритценхоф [7], Э. А. Барановский, В. П. Тарашук [1]) содержание лития получено для пятен, для которых предварительно рассчитана модель по данным наблюдений профилей нескольких линий других элементов.

Наши исследования поведения лития были начаты в 2006 г. на телескопе БСТ-2 Научно-исследовательского института «Крымская астрофизическая обсерватория». Был получен ряд спектров Li I

670.8 нм с регистрацией с помощью ПЗС-камеры VS-СТТ 249. Для настоящей работы использованы эшельные спектры из архивных материалов КрАО, полученные 21 августа 1981 г. с дисперсией 0.057 нм/мм. Наблюдалось большое пятно (N 375) вблизи центрального меридиана. Выполнялась фотометрия линий Li I 670.8 нм, Ca I 558.2 и 671.7 нм, Na I 589.6 и 568.2 нм, Al I 669.6 и 669.8 нм, Ti I 633.6 нм в невозмущенной фотосфере и пятне и последующая обработка по программе SPE. Пример наблюдаемого спектра в области линий лития 670.8 нм и кальция 671.7 нм показан на рис. 2.

В нашем исследовании мы прежде всего рассчитали модель пятна, используя для этого указанные выше линии. По программам Барановского [3] и SIR [8] проводился расчет температуры T , плотности N_h , турбулентной скорости V_t и магнитного поля H так, чтобы вычисленные профили выбранных спектральных линий и величина контраста пятна были близки к наблюдаемым. Таким образом, мы получили модель конкретного пятна — того пятна, для которого получены наблюдаемые профили линии лития.

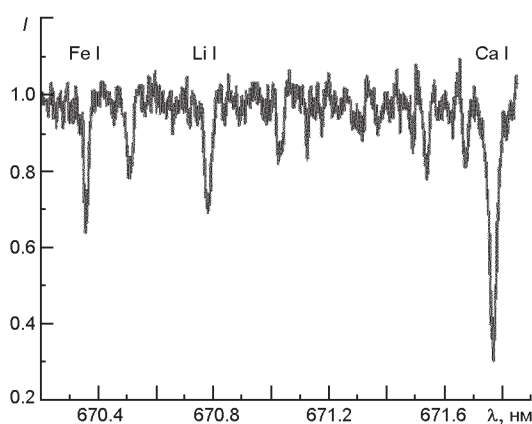


Рис. 2. Спектр пятна в области линии лития Li I 670.8 нм

Приблизительную модель можно получить из наблюдаемого контраста пятна. При этом получаем температуру пятна на уровне образования непрерывного спектра, то есть в области нижней фотосферы. Но при этом остается неопределенной величина плотности в модели и температура T более высоких слоев, т. е. в средней и верхней фотосфере.

Образование линий (в том числе и Li) происходит как раз в средней и верхней фотосфере. Поэтому для расчета более точной модели пятна нужно использовать кроме контрастности наблюдаемые профили нескольких линий.

При расчетах профилей линий для невозмущенной области используется стандартная модель невозмущенной фотосферы. Расчеты профилей для невозмущенной области нужны для уточнения сил осцилляторов тех линий, по которым рассчитывается модель пятна.

Для оценки рассеянного света были использованы спектральные наблюдения края Солнца со щелью, располагавшейся вдоль радиуса диска. Далее при расчете модели величина рассеянного света входила как свободный неизвестный параметр, который определяется путем подбора — так же, как и параметры модели. Определенная таким способом доля рассеянного света составляла 20 %.

На рис. 3 и рис. 4 показаны примеры согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий при расчете модели пятна. Температура в рассчитанной нами модели показана на рис. 5.

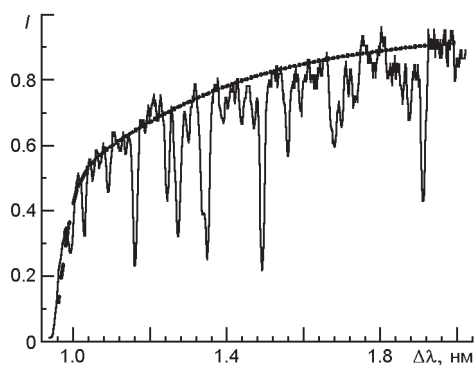


Рис. 3. Наблюдаемый в пятне (сплошная линия) и вычисленный (пунктирная линия) профили линии Na I D1 при расчете модели пятна

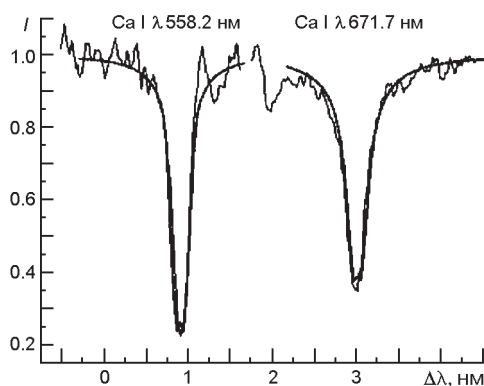
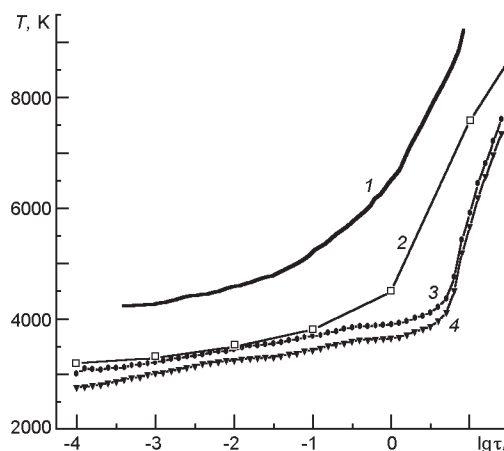


Рис. 4. Наблюдаемые в пятне (сплошная линия) и вычисленные (пунктирная линия) профили линий Ca I при расчете модели пятна

Рис. 5. Распределения температуры в моделях пятен и в невозмущенной фотосфере: 1 — невозмущенная фотосфера, 2 — модель пятна Ритценхофа [7], 3 — модель пятна, рассчитанная нами по наблюдениям 2006 г. [1], 4 — модель пятна, рассчитанная нами в данном исследовании по наблюдениям 1981 г.



Плотность в нашей модели больше плотности невозмущенной фотосферы. В верхней фотосфере плотности отличаются немного, а в нижней фотосфере плотность в модели в 10 раз больше, чем в невозмущенной. Магнитное поле в модели изменяется от 0.1 Тл в верхней фотосфере до 0.3 Тл в нижней фотосфере.

Для определения содержания лития нужно сравнивать наблюдаемый профиль линии Li I 670.8 нм с вычисленным для полученной модели пятна. При таких расчетах нужно подобрать величину содержания так, чтобы вычисленный и наблюдаемый профили лития давали наилучшее согласие.

Профили линии 670.8 нм рассчитывались как бленда, состоящая из девяти компонентов. Все компоненты являются переходами между разными подуровнями ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$. Данные для всех переходов были взяты из работ [11] и [9]. Величина отношения ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ для Солнца по разным оценкам составляет от 0.01 [6] до 0.03 [7] и 0.04 [12].

Наилучшее согласие профилей получено для значений содержания $\lg A = 0.78$ и отношения ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.03$. На рис. 6 показано сравнение вычисленного и наблюдаемого профилей. Ноль по шкале длин волн соответствует положению компонента с наименьшей длиной волны. Для ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} > 0.04$ согласие профилей ухудшается. Таким образом, значение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.04$ можно считать верхней границей отношения содержания изотопов лития.

Полученное значение содержания лития, равное 0.78, существенно меньше полученного нами из наблюдений 2006 г. (1.30). Но этот результат вполне правдоподобный, так как пятно 1981 г. холоднее пятна 2006 г., а линия лития 670.8 нм по наблюдениям 1981 г. менее глубокая.

Ясно, что чем ниже T , тем глубже резонансная линия лития, при этом количество нейтральных атомов увеличивается, а ионизированных уменьшается.

Определенное нами значение содержания лития в пятне 1981 г. и все имеющиеся данные из литературных источников нанесены на

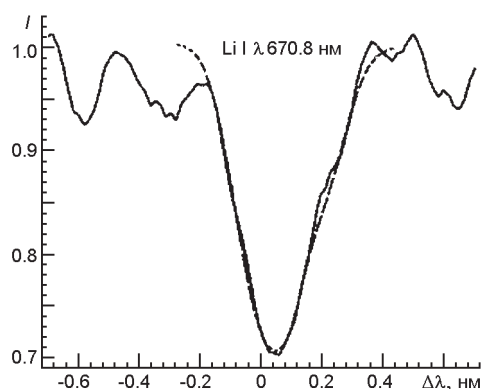


Рис. 6. Наблюдаемый (сплошная линия) и вычисленный (пунктирная линия) профили линии Li I 670.8 нм в пятне по модели пятна для значений $\lg A = 0.78$ и ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.03$

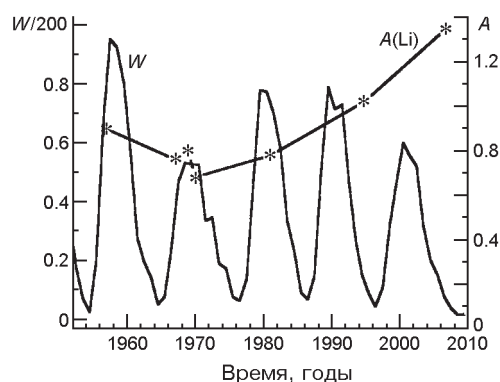


Рис. 7. Значения содержания лития A в солнечных пятнах, полученные в разные годы, и значения чисел Вольфа W

рис. 7 вместе с числами Вольфа (для удобства сравнения нанесены величины $W/200$). На рис. 1 и 7 можно заметить две особенности: 1) содержание Li увеличивается со временем; 2) самые большие величины A приходятся на минимумы солнечных циклов. Самые малые величины содержания лития (четыре точки) приходятся на максимумы циклов. Эти факты нуждаются в дальнейших наблюдениях и уточнениях. Они могут указывать на влияние на образование лития процессов, изменяющихся с фазой 11-летнего цикла — факт, ранее не известный.

Значения содержания лития, приведенные на рис. 1 и 7, можно исправить за неЛТР-эффекты, используя результаты расчетов Карлсона и др. [4]. Соответствующая поправка для физических условий в солнечных пятнах составляет около 0.3 dex.

Учет поправки приведет к смещению кривых на рис. 1 и 7 по вертикали, но вид временной зависимости не изменится.

Заключение. 1. По эшелльным спектрам пятна 21 августа 1981 г. проведена фотометрия окрестности линии лития 670.8 нм и нескольких других линий.

2. По наблюдаемым профилям линий Na, Ca, Al, Ti и значению контраста пятна рассчитана модель пятна.

3. Рассчитаны профили линии Li I 670.8 нм для разных значений содержания Li и проведено сравнение с наблюдаемыми профилями. Полученное таким образом содержание лития для пятна 1981 г. составляет $A(\text{Li}) = 0.78$ (в шкале $\lg A(\text{H}) = 12.0$).

4. Значения величин содержания, полученные в разных работах за последние 50 лет, обнаруживают две тенденции:

а) содержание лития увеличивается со временем (1960—2010 гг.);

б) наибольшие значения содержания наблюдались в минимумах солнечной активности, наименьшие значения содержания относятся к максимумам цикла. Возможно, на образование лития влияет изменение физических процессов на Солнце в течение солнечного 11-летнего цикла.

1. Барановский Э. А., Таращук В. П. Содержание лития в солнечных пятнах // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2008.—**104**, № 1.—С. 30—39.
2. Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., et al. The chemical composition of the Sun // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.—2009.—**47**.—P. 481—522.
3. Baranovsky E. A. Semiempirical LTE modeling of solar photospheric layers. I. Theoretical background // Contr. astron. observ. Scalnate Pleso.—1993.—**23**.—P. 107—117.
4. Carlsson M., Rutten R. J., Bruls J. H. M. J., Shchukina N. G. The non-LTE formation of Li I lines in cool stars // Astron. and Astrophys.—1994.—**288**.—P. 860—882.
5. Engvold O., Kjeldseth Moe O., Maltby P. The solar lithium abundance // Astron. and Astrophys.—1970.—**9**.—P. 79—85.
6. Müller E. A., Peytremann E., de la Reza R. The solar lithium abundance. II: Synthetic analysis of the solar lithium feature at 6707.8 Å // Solar. Phys.—1975.—**41**, N 1.—P. 53—65.
7. Ritzenhoff S., Schroter E. H., Schmidt W. The lithium abundance in sunspots // Astron. and Astrophys.—1997.—**328**.—P. 695—701.
8. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J. C. Inversion of Stokes profiles // Astrophys. J.—1992.—**398**.—P. 375—385.
9. Shavrina A. V., Polosukhina N. S., Pavlenko Ya. V., et al. The spectrum of the roAp star HD 101065 (Przybylski's star) in the Li I 6708 Å spectral region // Astron. and Astrophys.—2003.—**409**.—P. 707—713.
10. Schmal G., Schröter E. H. Die Li-Häufigkeit und das Isotopenverhältnis Li^6/Li^7 in Sonnenflecken // Z. Astrophys.—1965.—**62**.—P. 143—153.
11. Smith V. V., Lambert D. L., Nissen P. E. Isotopic lithium abundances in nine halo stars // Astrophys. J.—1998.—**506**.—P. 405—423.
12. Traub W., Roesler F. L. The abundance of lithium in sunspots // Astrophys. J.—1971.—**163**.—P. 629—644.
13. Wier E., Stellmacher G., Schroter E. H. On lithium in sunspots // Astrophys. Lett.—1968.—**1**.—P. 181—190.
14. Zwaan C. Structure of sunspots // Solar. Phys.—1974.—**37**, N 1.—P. 99—111.

Поступила в редакцию 11.11.11