

УДК 523.985

Содержание лития в солнечных пятнах по наблюдениям 2014 года

Э.А. Барановский, В.П. Тарашук

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, 298409
edward@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

Аннотация. Получены спектры солнечных пятен в областях линий LiI 6708 Å и некоторых линий FeI и CaI. Наблюдения проводились с ПЗС-камерой в августе 2014 г. на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Были рассчитаны модели пятен по наблюдаемым профилям линий FeI, CaI. По моделям пятен и наблюдаемым профилям линии LiI 6708 Å определена величина содержания лития. Средний результат для пятен, наблюдавшихся 26.08.2014: $\log(A(\text{Li})) = 1.2$ (в шкале $\log(A(\text{H})) = 12$). Обработаны также спектры пятен, полученные ранее (4.10.10), рассчитанное значение содержания – $\log(A(\text{Li})) = 1.02$.

THE LITHIUM ABUNDANCE DETERMINATION IN SUNSPOTS BASED ON OBSERVATIONS OF 2014, *by E.A. Baranovsky, V.P. Taraschuk.* The sunspot spectra in the region of the lithium 6708 Å line and some FeI and CaI lines have been obtained. The observations were carried out with CCD-camera in August 2014 at the telescope TST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory. The sunspot models were calculated using the observed profiles of FeI and CaI lines. The lithium abundance was obtained using the calculated sunspot models and observed LiI 6708 Å line profiles. The mean value for the sunspots, observed on 26.08.14 is $\log(A(\text{Li})) = 1.2$ (in scale $\log(A(\text{H})) = 12$). The sunspot spectra taken earlier (on 4.10.10) also have been used for calculations with result $\log(A(\text{Li})) = 1.02$.

Ключевые слова: Солнце, спектры, модели, литий

Проблема легких химических элементов возникла в астрофизике после разработки теории Большого Взрыва (БВ) и теории первичного нуклеосинтеза, когда возникли водород, гелий и литий. Если измерения содержания дейтерия и ${}^4\text{He}$ находятся в согласии с расчетными данными, то для ${}^7\text{Li}$ наблюдается несоответствие – его в 3–4 раза меньше, чем предсказывает теория БВ и плотность барионного вещества в космических лучах в соответствии с теорией ядерного синтеза элементов в эпоху первичного нуклеосинтеза.

Современные теории Большого Взрыва не могут объяснить высокое содержание лития во Вселенной. Предполагается существование так называемого “Плато лития” – такой его концентрации в звездах, ниже которой оно почему-то не опускается. Аппроксимация такого количества лития на момент БВ приведет к тому, что его окажется слишком много. Таким образом, обилие лития не согласуется с предсказанием стандартного космологического сценария: лития в несколько раз меньше, чем должно быть.

У звезд одинакового возраста, металличности и массы наблюдается различная величина содержания Li. Это говорит о том, что имеются неизвестные условия, которые влияют на скорость разрушения и образования атомов лития. Литий очень нестойкий элемент, при температуре около 2.6 млн К и взаимодействии с протонами он разрушается, превращаясь в два атома гелия ${}^4\text{He}$. Поэтому величина содержания Li очень чувствительна к различным физическим параметрам звездных атмосфер. Именно поэтому определение содержания Li в звездах разного типа дает возможность уточнять строение их атмосферы и конвективной зоны, пути эволюции звезд. Однако на этом пути возникают загадки и проблемы. Имеется противоречие между теорией нуклеосинтеза и данными о распространенности легких элементов. Существует связь между обилием лития и бериллия, причем поведение последнего содержит также много неясного.

Проблема Li существует и для Солнца. Величина его содержания на Солнце на два порядка меньше, чем в Солнечной системе, например, в метеоритах. Необходимая для разрушения Li температура существует в глубоких слоях Солнца, и богатые литием поверхностные слои, опускаясь вниз, привели бы к превращению лития в гелий и подъему обедненных литием слоев. Но расчеты в соответствии с современными моделями Солнца показывают, что конвективная зона достигает до глубины, где температура всего 1 млн К. То есть низкое содержание Li не объясняется современными моделями строения внутренних областей Солнца. Температура в конвективной зоне недостаточно высокая для выгорания лития. Чтобы конвекция проникла глубже, нужен другой химический состав, другая скорость вращения, совсем не те параметры, которые наблюдаются у Солнца в действительности.

Надо полагать, что, по-видимому, существуют какие-то неизвестные механизмы, изменяющие количество лития.

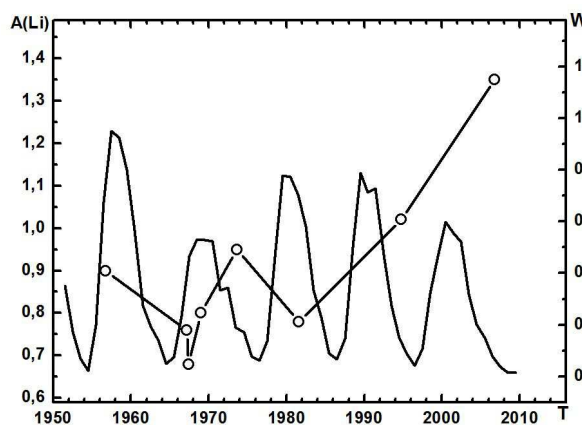


Рис. 1. Числа Вольфа – W, сплошная без значков; величины содержания лития – A(Li), кружки. Ошибка определения величины содержания составляет 0.1–0.15 dex

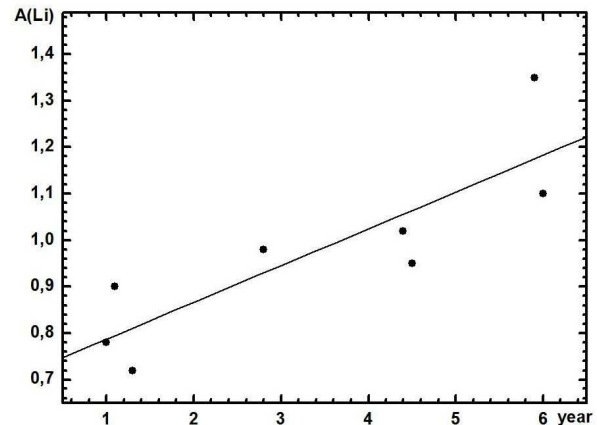


Рис. 2. Величина содержания лития в разные годы наблюдений. По оси абсцисс – интервал времени между моментом наблюдения и моментом ближайшего максимума. Наблюдения разных авторов, 1956–2011 годы. Ошибка определения величины содержания составляет 0.1–0.15 dex

Определение содержания лития делается обычно по наблюдениям в области линии 6707.8 \AA . В спектре Солнца для невозмущенных областей линия 6707.8 \AA очень слабая, поэтому определение содержания лития на Солнце делается по спектрам солнечных пятен. Вследствие низкой температуры в тени пятна степень ионизации лития уменьшается и интенсивность линии 6707.8 \AA существенно увеличивается.

Определение содержания лития по спектрам солнечных пятен сделано в работах разных авторов, начиная с 1956 года (около 10 определений): Шмаль, Шрётер (1965); Виер и др. (1968); Трауб, Рослер (1971); Энгвольд и др. (1970); Ритценхоф и др. (1997); Барановский, Тарашук (2008, 2012); Барановский и др. (2012, 2013). Все определения сделаны по наблюдениям линии Li I 6708 Å в ЛТР-приближении. Даты всех имеющихся наблюдений спектров пятен относятся к разным фазам солнечного цикла. Оказалось, что самые большие значения содержания получены вблизи минимумов циклов, а малые значения – вблизи максимумов солнечной активности.

На рис. 1 показаны числа Вольфа и величины содержания лития в разные годы. На рис. 2 показана зависимость величины содержания лития от интервала времени между моментом наблюдения и моментом ближайшего максимума солнечной активности. Рисунок взят из нашей предыдущей публикации.

Для проверки реальности обнаруженной закономерности мы продолжали наблюдения спектров солнечных пятен в области линии лития 6708 Å. В данной работе мы представляем результаты расчетов по наблюдениям в августе 2014 года. Были получены спектры для двух пятен 22 августа и для четырех пятен – 26 августа. Наблюдения проведены с ПЗС-камерой на телескопе БСТ-2 НИИ “КрАО”.

Для каждого пятна были обработаны несколько спектров, полученных с интервалом в несколько минут. Измерялись эквивалентные ширины линий железа и кальция, по которым рассчитывались модели пятен. Далее с помощью индивидуальных моделей пятен рассчитывались эквивалентные ширины линии лития 6708 Å и сравнивались с наблюдаемыми эквивалентными ширинами этой линии. Из такого сравнения мы получаем величину содержания лития, которая дает наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых эквивалентных ширин. Эта величина и принимается за искомую величину содержания.

При расчетах было принято отношение ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li} = 0.03$. Профили линии 6708 Å рассчитывались как бленда, состоящая из 9 компонент. Все компоненты являются переходами между разными подуровнями ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$. Результаты определения величины содержания по отдельным спектрам усреднялись. Окончательный результат $\log(A(\text{Li})) = 1.2$ (в шкале $\log(A(\text{H})) = 12$) для пятна, наблюдавшегося 26.08.2014. Чтобы иметь большее количество определений обилия лития мы провели обработку также спектров пятна, наблюдавшегося 4.10.2010; рассчитанное для него значение содержания $\log(A(\text{Li})) = 1.02$. Ошибка определения величины содержания составляет 0.1–0.15 dex.

Сравнение всех результатов разных лет показано на рис. 3. Здесь по оси абсцисс указаны числа Вольфа в относительных единицах во время наблюдений спектров, по оси ординат – величина содержания лития.

Видно, что отмеченная ранее тенденция в поведении лития сохраняется – в периоды большей активности пятнообразования содержание лития меньше.

Имеются данные о том, что отношение величин содержания лития и бериллия на Солнце меняется со временем. При этом отношение $A(\text{Be})/A(\text{Li})$ имеет большее значение во время максимума солнечной активности. Поскольку Li выгорает при меньших значениях температуры, чем Be, то более вероятным является сценарий, когда от солнечного цикла зависит величина содержания лития – во время максимума солнечной активности количество Li меньше.

При определении содержания лития по спектрам солнечных пятен обязательным шагом является расчет моделей пятен. Модели рассчитывались по линиям железа и кальция, расположенным вблизи линии лития 6708 Å. Результат расчета моделей зависит от принятой величины рассеянного света в пятне, который входит в расчеты как свободный параметр. Приблизительно рассеянный свет оценивался по снимкам края солнечного диска. Вычисление профилей линий сделано по программам Барановского (1993) и SIR (Руиз Кобо, дель Торо Иньеста, 1992). На рис. 4 приведен пример сравнения наблюдаемых и вычисленных контуров линий железа.

Некоторые из полученных моделей пятен показаны на рис. 5 – кривые 2, 3, 5, 6. Кривая 1 – модель Колладоса (Колладос и др., 1994), которая иногда используется как стандартная модель пятна. Различие применявшихся моделей пятен сказывается на результате определения содержания лития. Все модели имеют одинаковый температурный градиент в средней и верхней фотосфере и различаются только величиной температуры. Величина рассеянного света составляла 15–20 %.

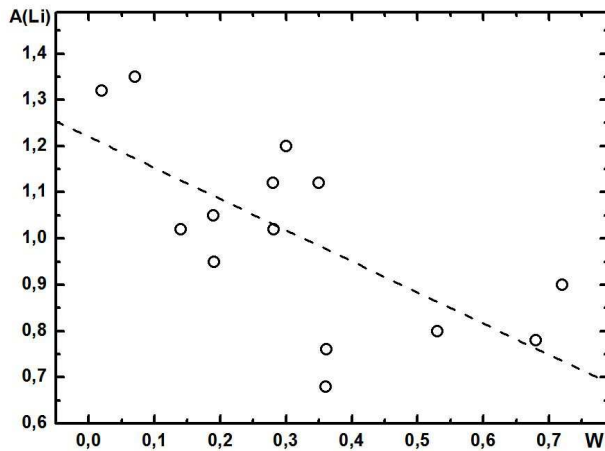


Рис. 3. Зависимость величины содержания лития от уровня солнечной активности (W). Ошибка определения величины содержания составляет 0.1–0.15 dex

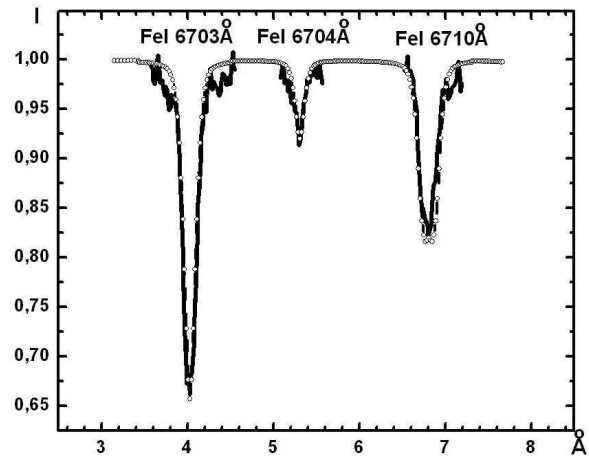


Рис. 4. Наблюденные и рассчитанные контуры линий

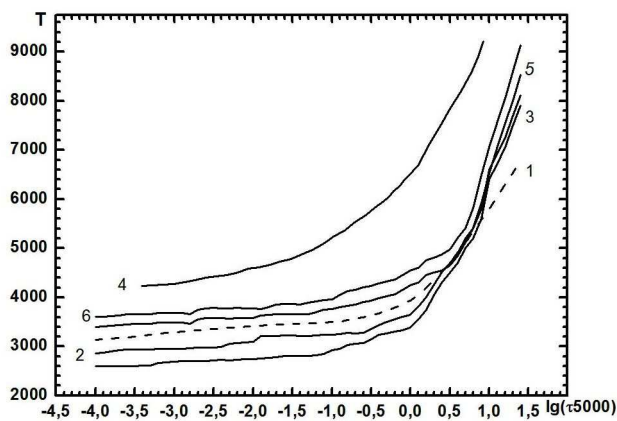


Рис. 5. Ход температуры в моделях пятен – 2, 3, 5, 6; в невозмущенной фотосфере – 1 и 4; в модели Колладоса – 1

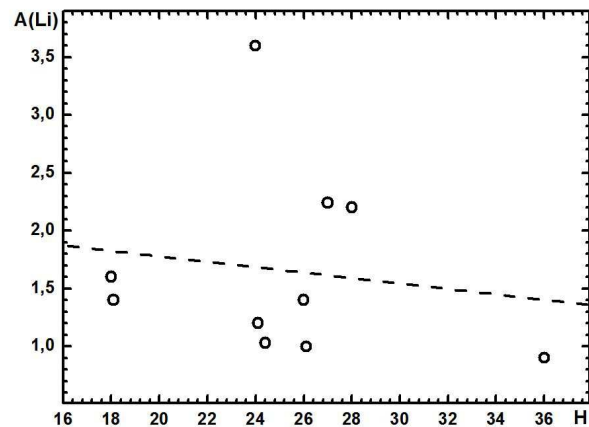


Рис. 6. Ход величины содержания лития с изменением магнитных полей пятен. Ошибка определения величины содержания составляет 0.1–0.15 dex

Плотность в наших моделях ниже плотности невозмущенной фотосферы и плотности в модели Колладоса в 2–8 раз.

Различие величины температуры до 1000 К в разных пятнах говорит о том, что расчет моделей для каждого отдельного пятна является необходимой процедурой.

Мы определяли содержание лития для пятен с различной величиной магнитного поля. Обнаружена слабая и не очень уверенная из-за малого количества точек зависимость величины содержания лития от величины магнитного поля пятна (рис. 6). Величины магнитных полей взяты из архивных наблюдений на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории.

Выводы

В 2014 году получены наблюдения спектров шести солнечных пятен в области линии лития 6708 Å. Для определения величины содержания лития обработаны спектры двух пятен – определены эквивалентные ширины линий лития 6708 Å, кальция CaI 6717 Å и железа FeI 6703 Å, FeI 6710 Å. По линиям кальция и железа рассчитаны модели всех наблюдавшихся пятен. С помощью моделей пятен и наблюдаемых эквивалентных ширин линии лития рассчитаны величины содержания лития.

Рассчитана также величина содержания по спектрам пятна, наблюдавшегося 4.10.2010. Полученные величины вместе с результатами прошлых лет мы использовали для оценки возможной зависимости величины содержания от уровня солнечной активности. Полученная зависимость между величинами содержания и числами Вольфа не противоречит отмеченной ранее закономерности – величины содержания меньше для периодов большей солнечной активности.

Все рассчитанные модели пятен обнаруживают одинаковый температурный градиент, идентичный градиенту в модели Колладоса.

Обнаружена тенденция зависимости содержания лития от напряженности магнитных полей пятен, однако требуются дополнительные наблюдения.

Литература

- Барановский (Baranovsky E.A.) // Contr. Astron. Obs. Scalnate Pleso. 1993. V. 23. P. 107.
Барановский Э.А., Мусорина С.А., Тарашук В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2012. Т. 108. № 1. С. 26.
Барановский Э.А., Мусорина С.А., Тарашук В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2013. Т. 109. № 1. С. 165.
Барановский Э.А., Тарашук В.П. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2008. Т. 104. № 1. С. 30.
Барановский Э.А., Тарашук В.П. // Кинем. и физ. небесн. тел. 2012. Т. 28. № 5. С. 50.
Вьер и др. (Wier E., Stellmacher G., Schroter E.H.) // Astrophys. Lett. 1968. V. 1. P. 181.
Колладос и др. (Collados M. et al.) // Astron. Astrophys. 1994. V. 291. P. 622.
Ритценхоф и др. (Ritzenhoff S., Schroter E.H., Schmidt W.) // Astron. Astrophys. 1997. V. 328. P. 695.
Руиз Кобо, дель Торо Иньеста (Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C.) // Astrophys. J. 1992. V. 398. P. 375.
Трауб, Рослер (Traub W., Roesler F.L.) // Astrophys. J. 1971. V. 163. P. 629.
Шмаль, Шрётер (Schmahl G., Schroter E.H.) // Z. Astrophys. 1965. V. 62. P. 143.
Энгвольд и др. (Engvold O., Kjeldseth Moe O., Maltby P.) // Astron. Astrophys. 1970. V. 9. P. 79.