

УДК 523.985

Определение содержания лития в солнечных пятнах, наблюдения 2007 года

Э.А. Барановский, С.А. Мусорина, В.П. Тарашук

НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория», Научный, АР Крым, Украина, 98409
edward@crao.crimea.ua

Поступила в редакцию 11 января 2013 г.

Аннотация. Наблюдались спектры солнечных пятен в областях линий LiI 6708 Å и некоторых линий FeI и CaI. Наблюдения проводились с ПЗС-камерой в мае, июне и июле 2007 г. на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Были рассчитаны модели пятен по наблюдаемым профилям линий FeI, CaI. С помощью рассчитанных моделей пятен и наблюдаемых профилей линии LiI 6708 Å определена величина содержания лития. Получено $lg(N_{Li}) = 1.20, 1.15$ и 1.0 (в шкале $lgA(H) = 12.0$).

THE LITHIUM ABUNDANCE DETERMINATION IN SUNSPOTS, THE OBSERVATIONS OF 2007, *by E.A. Baranovsky, S.A. Musorina, V.P. Taraschuk.* Spectra of the spots in the region of the lithium 6708 Å line and some FeI and CaI lines have been observed. The observations were carried out with CCD-camera in May, June and July 2007 at the telescope TST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory. The spot models were calculated using the observed profiles of FeI and CaI lines. The lithium abundance was obtained using the calculated spot models and observed LiI 6708 Å line profiles. The result is $lg(N_{Li}) = 1.20, 1.15$ and 1.00 (in scale $lgA(H) = 12$).

Ключевые слова: Солнце, спектры, модели, литий

1 Введение

Литий является очень нестойким элементом, он исчезает при сравнительно низкой температуре около 2.6 млн град. Поэтому величина содержания лития очень чувствительна к различным параметрам звездных атмосфер. Определение содержания лития в атмосферах звезд разного типа дает возможность уточнять строение атмосфер и конвективной зоны и уточнять пути эволюции звезд.

Проблема лития играет большую роль в решении многих задач: образование химических элементов, происхождение и развитие некоторых типов звезд (например, Ар), аномалии их поведения и внутренняя структура, роль ядерных реакций в различных процессах освобождения энергии на звездах и др.

Определение содержания лития в солнечных пятнах...

Однако на этом пути возникают загадки и проблемы. Так, теория нуклеосинтеза предсказывает втрое большее количество изотопа ${}^7\text{Li}$ во Вселенной, чем следует из наблюдений.

Для некоторых звезд было получено (Асплунд и др., 2006) из наблюдений аномально высокое содержание изотопа ${}^6\text{Li}$.

Таким образом, имеется противоречие между теорией нуклеосинтеза и данными о распространенности легких элементов.

Наблюдается различная величина содержания лития у звезд с одинаковым возрастом, металличностью и массой. Такое различие говорит о том, что имеются неизвестные свойства, влияющие на скорость разрушения и образования атомов лития.

2 Литий на Солнце

Проблема лития существует и для Солнца. Величина содержания лития на Солнце на два порядка меньше величины содержания в космосе – в метеоритах. Такое низкое содержание не объясняется современными моделями строения внутренних областей Солнца. Температура в конвективной зоне недостаточно высокая для выгорания лития. По-видимому, существуют какие-то неизвестные механизмы, вызывающие уменьшение количества лития.

С другой стороны, литий может и образовываться в атмосфере звезд и Солнца в результате реакции скалывания во время сильных вспышек или под воздействием космических лучей.

Если предполагается наличие механизмов разрушения лития и процессов образования атомов лития, то может возникнуть вопрос о постоянстве величины содержания лития на Солнце.

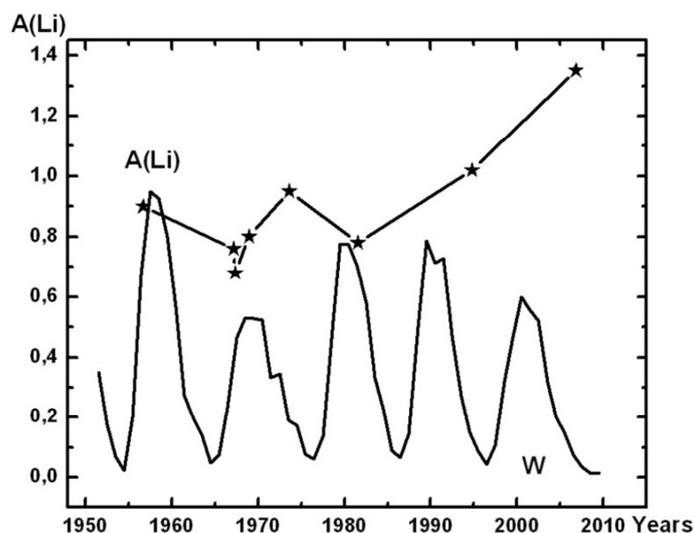


Рис. 1. Величина содержания (звездочки) лития в солнечных пятнах в разные годы и числа Вольфа W

Имеются данные о том, что отношение величин содержания лития и бериллия на Солнце меняется со временем (Кужевский, 2002). При этом отношение $A(\text{Be})/A(\text{Li})$ имеет большее значение во время максимума солнечной активности. Поскольку литий выгорает при меньших значениях температуры, чем бериллий, то более вероятным является сценарий, когда от

солнечного цикла зависит величина содержания лития – во время максимума количество лития меньше.

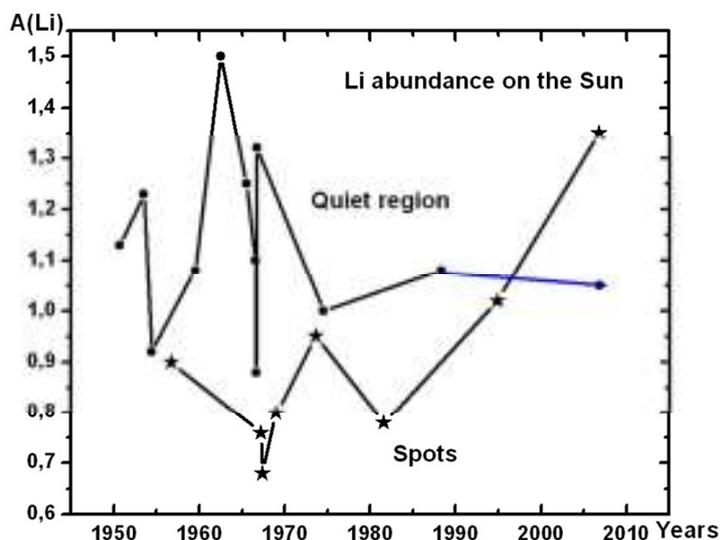


Рис. 2. Определение содержания лития на Солнце по спектрам пятен (звездочки) и невозмущенных областей (кружки)

Такая зависимость намечается и по результатам определения содержания лития на Солнце по спектрам солнечных пятен в разные годы.

За последние 50 лет имеется 8 работ, где приведено содержание Li, полученное по спектрам солнечных пятен: Шмаль, Шрётер (1965), Виер и др. (1968), Трауб, Рослер (1971), Энгвольд и др. (1970), Ритценхоф и др. (1997), Барановский, Таращук (2008, 2012), Барановский и др. (2012). Все определения сделаны по наблюдениям линии Li I 6708 Å в ЛТР-приближении.

На рисунке 1 можно видеть, что самые большие значения содержания приходятся на минимумы циклов, а малые значения – на максимумы. Для определенных выводов здесь мало данных, нужны дальнейшие наблюдения.

Еще одна загадка поведения лития обнаруживается при сравнении величин содержания, полученных для спокойных областей Солнца и для солнечных пятен в разные годы (рис. 2).

Величина содержания по невозмущенным областям примерно в 2 раза больше величин, определенных по пятнам.

3 Обработка исходных данных и вычисления

В этом исследовании мы обработали спектры трех пятен, наблюдавшихся с ПЗС-камерой на телескопе БСТ-2 4 мая, 6 июня и 3 июля 2007 года. Всего обработано 25 спектров. На рис. 3 показаны образцы обработанных спектров.

Размер тени наблюдавшихся пятен: 15" * 40" (вытянутое ядро), 18" * 18", 17" * 17". Магнитное поле по визуальным измерениям: 1800 гс, 1800 гс, 2100 гс. Наблюдаемый контраст пятен: от 0.3 до 0.45 для разных спектров в области линии 6708 Å.

При определении содержания лития по спектрам солнечных пятен необходимо сначала рассчитать модель пятна, т. е. его температуру, плотность, магнитное поле и пр. Для этой цели

Определение содержания лития в солнечных пятнах...

используются наблюдаемые профили линий других элементов, полученные одновременно с линией лития 6708 Å. В нашем случае мы использовали линии железа и кальция.

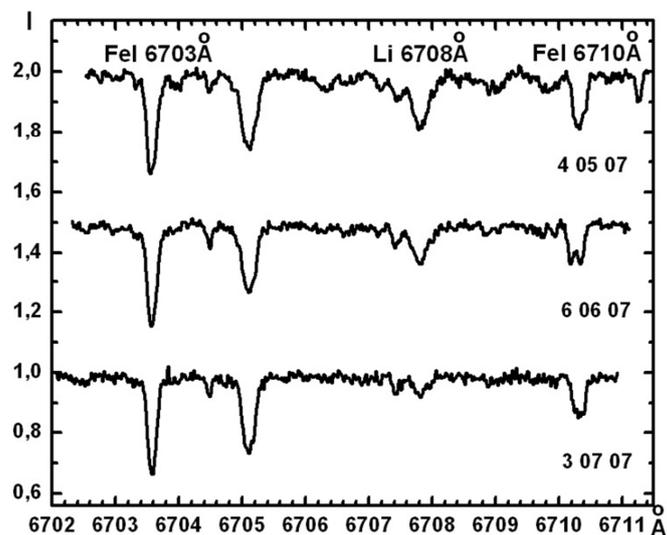


Рис. 3. Спектры пятен в области линии лития 6708 Å

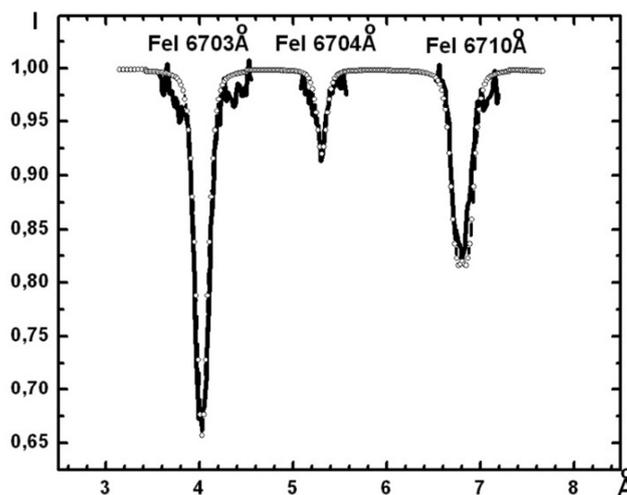


Рис. 4. Сравнение вычисленных (кружки) и наблюдаемых (сплошная) профилей

Модель пятна рассчитывается путем подбора параметров модели (температура и др.) так, чтобы получить наилучшее согласие вычисленных и наблюдаемых профилей линий и величины контраста пятна. При этом величина рассеянного света в пятне входит в расчеты как свободный параметр, который определяется в процессе согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линий. Вычисление профилей линий сделано по программам Барановского (Барановский, 1993) и SIR (Пуиз Кобо, дель Торо Иньеста, 1992).

На рисунке 4 показан пример согласования вычисленных и наблюдаемых профилей при расчете модели пятен.

Ход температуры с глубиной в рассчитанных моделях пятен показан на рис. 5, где приведены также данные для пятна 1981 года (прошрое исследование) и для модели Колладоса (Колладос и др., 1994). Изучаемые пятна – небольшие по величине и соответственно имеют более высокую температуру. На рисунке приведены значения температуры, усредненные по нескольким спектрам соответствующей даты. Точность определения температуры 150 К. Заметим, что в наших моделях градиент температуры существенно меньше по сравнению с моделью Колладоса.

Плотности в наших моделях пятен в 2–4 раза меньше плотности невозмущенной фотосферы. Магнитное поле и турбулентная скорость определялись на основании согласования ширины профилей линий с разной магнитной чувствительностью. Получено, что для пятен 4 мая и 6 июня магнитное поле растет от 1100 гаусс в верхней фотосфере до 3000 гаусс в нижней фотосфере, а для пятна 3 июля соответственно от 700 гаусс до 2000 гаусс.

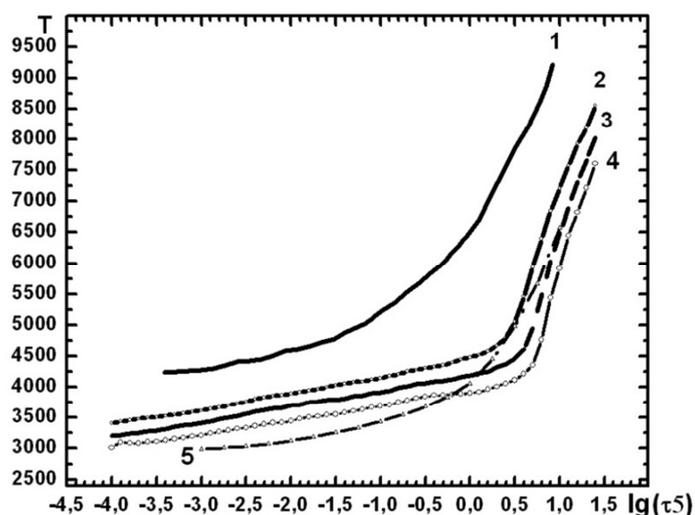


Рис. 5. Температура в моделях пятен и в невозмущенной фотосфере:

- 1) невозмущенная,
- 2) пятно 6.06.07,
- 3) пятно 4.05.07,
- 4) пятно из прошлого исследования (Барановский и др., 2012),
- 5) модель Колладоса (Колладос и др., 1994)

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.

Далее по рассчитанным моделям пятен вычисляются профили линии лития 6708 Å с различными величинами содержания лития и сравниваются с наблюдаемыми профилями. Вариант с наилучшим согласием дает нам искомую величину содержания. При этом 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 ${}^6\text{Li}$. Данные для всех переходов были взяты из работ Смита и др. (1998) и Шавриной и др. (2003).

Определение содержания лития в солнечных пятнах...

На рис. 6 показан пример согласования вычисленных и наблюдаемых профилей линии лития 6708 Å.

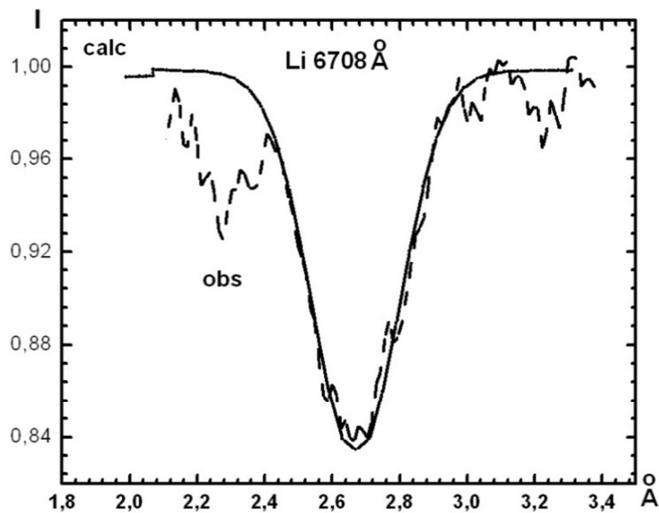


Рис. 6. Согласование вычисленных и наблюдаемых профилей линии лития 6708 Å

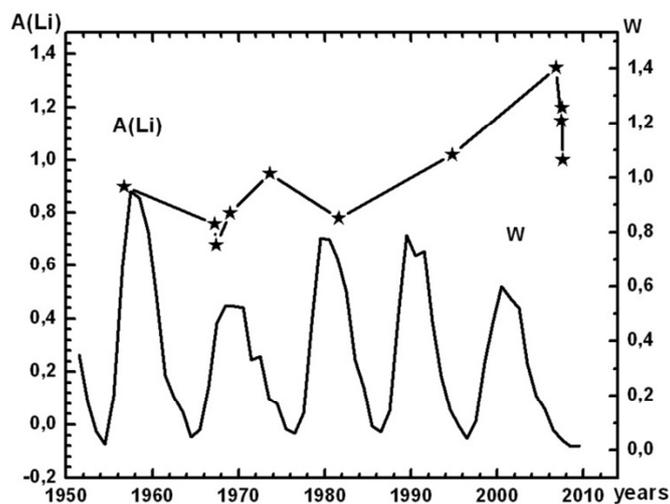


Рис. 7. Величина содержания лития (звездочки) в солнечных пятнах в разные годы и числа Вольфа W

4 Результаты

Для пятна 4.05.2007 г. мы взяли для обработки 8 спектров, полученных с интервалом в несколько минут. Спектры различаются величиной контраста пятна, что является следствием разной величины рассеянного света в пятне или неточного наведения на центр пятна.

Результаты определения величины содержания по отдельным спектрам усреднялись. Окончательный результат $\log(A(\text{Li})) = 1.15$.

Для пятна 6.06.2007 обработано 10 спектров, среднее значение величины содержания лития $\log(A(\text{Li})) = 1.2$.

Для пятна 3.07.2007 обработано 7 спектров, среднее значение величины содержания лития $\log(A(\text{Li})) = 1.00$.

Ошибка определения величины содержания составляет 0.2 dex.

Рассчитанные величины мы добавили к ранее полученным данным, что показано на рис. 7.

5 Заключение

1. По наблюдениям спектров пятен с ПЗС-камерой 4 мая, 6 июня и 3 июля 2007 г. получены профили линии лития 6708 Å и нескольких линий железа и кальция. Всего обработано 25 спектров.
2. По наблюдаемым профилям линий FeI и CaI и величине контраста пятен рассчитаны модели пятен. Сравнение с моделями Цвана и Колладоса показывает, что в наших моделях температура выше, а градиент температуры меньше. Для пятен меньших размеров мы получили более высокую температуру, что согласуется с результатами Колладоса о различии моделей пятен разной величины.
3. По вычисленным моделям пятен рассчитаны профили линии LiI 6708 Å для разных величин содержания Li и проведено сравнение с наблюдаемыми профилями. Полученное таким образом содержание лития для изучаемых пятен равно $A(\text{Li}) = 1.15$, 1.20 и 1.00 (в шкале $\lg A(\text{H}) = 12.0$).
4. Значения величин содержания, полученные в разных работах за последние 50 лет, обнаруживают две тенденции:
 - а) увеличение содержания лития со временем (1957–2007 гг.);
 - б) наибольшие величины содержания наблюдались в минимумах солнечной активности, наименьшие величины содержания относятся к максимумам цикла. Этот факт может указывать на то, что на образование лития влияет изменение физических процессов на Солнце в течение солнечного 11-летнего цикла.

Литература

- Асплунд и др. (Asplund M., Lambert D.L., Nissen P.E., et al.) // *Astrophys. J.* 2006. V. 644. P. 229.
- Барановский (Baranovsky E.A.) // *Contr. Astron. Obs. Scalnate Pleso.* 1993. V. 23. P. 107.
- Барановский Э.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. Т. 104. № 1. С. 30.
- Барановский Э.А., Мусорина С.А., Тарашук В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 26.
- Барановский Э.А., Тарашук В.П. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2012. Т. 28. № 5. С. 50.
- Виер и др. (Wiehr 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.
- Кужевский Б.М. // *Наука в России.* 2002. Т. 4. С. 4.
- 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.
- Смит и др. (Smith V.V., Lambert D.L., Nissen P.E.) // *Astrophys. J.* 1998. V. 506. P. 405.
- Трауб, Рослер (Traub W., Roesler F.L.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 163. P. 629.

Определение содержания лития в солнечных пятнах...

Шаврина и др. (Shavrina A.V., Polosukhina N.S., Pavlenko Ya.V., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 409. P. 707.

Шмаль, Шрётер (Schmahl G., Schröter 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.