



Рис. 4. То же, что и на рис. 3. во время второго выброса (пунктирные линии со значками – для фрагмента выброса)

1. Лившиц М.А. Солнечные вспышки: результаты наблюдений и газодинамические процессы // Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - С.60–81. 2. Прист Э.Р. Солнечная магнитогиродинамика. - М., 1985. 3. Сыроватский С.И., Сомов Б.В. Физика солнечных вспышек. Теория наблюдаемых проявлений вспышек // Итоги науки и техники. Астрон. - 1982. - Т.21. - С.221–237. 4. Canfield R.S., Reardon K.P., Leka K.D. et al. На surges and X-ray jets in AR 7260 // Astrophys. J. - 1996. - Vol.464, N 2. - P.1016–1029. 5. Gaizauskas V. Magnetic reconnection as a driver of chromospheric surges // Solar Physics. - 1996. - Vol.169. - P.357–366. 6. Li K., Li J., Gu X., Zhong S. A quantitative analysis of the surge of March 19, 1989 // Solar Physics. - 1996. - Vol.168. - P.91–103. 7. Madjarska M.S., Doyle J.G., de Pontieu B. Explosive events associated with a surge // Astrophys. J. - 2009. - Vol.701. - P.253–259. 8. Priest E.R., Hood A.W., Bewsher D. The Nature of Blinkers and the Solar Transition Region // Solar Physics. - 2002. - Vol.205. - P.249–264.

Поступила в редколлегию 10.06.11

УДК 523.9-355 + 523.9-36

А. Сухоруков, асп., Н. Щукіна, д-р фіз.-мат. наук

СОЛЯЧНИЙ ВМІСТ КРЕМНІЮ В НАБЛИЖЕННІ ЛТР В ОДНОВИМІРНИХ МОДЕЛЯХ

Визначено вміст кремнію в одновимірних напівемпіричних моделях атмосфери Сонця в наближенні ЛТР. Для моделі HOLMUL він дорівнює 7.594 ± 0.015 dex. Для сонячних сил осциляторів, за якими визначався вміст, доведені якість, легітимність та можливість прив'язки до експериментальних даних.

The LTE abundance of silicon was determined for one-dimensional semiempirical models of the solar atmosphere. The abundance value for the HOLMUL model is 7.594 ± 0.015 dex. Solar oscillator strengths, which were used for abundance determination, were shown to be of high quality, legitimate and able to be linked to the experimental ones.

Вступ. Дослідження сонячного спектру кремнію важливе по багатьом причинам. По-перше, кремній — один з найбільш поширених елементів у Всесвіті. За кількістю атомів він посідає 6-е місце.

По-друге, атоми та йони кремнію сильно поглинають випромінювання в ультрафіолетовому континуумі. Врахування поглинання кремнію важливе при моделюванні та дослідженні глибоких шарів фотосфер Сонця та зір пізніх класів.

По-третє, кремній — основний донор вільних електронів у верхніх шарах атмосфер зір різних класів на рівні із залізом та магнієм.

По-четверте, інфрачервоні лінії спектру кремнію достатньо чутливі до Зееманівського розчеплення та деполяризації Ханле під дією магнітного поля [18]. Завдяки достатньо сильному сигналові у Стокс-компонентах, ці лінії можна використовувати для дослідження фізичних процесів у різних магнітних структурах на Сонці. Зокрема, дуже зручною є лінія

Si I 10827 Å, що близька до відомої лінії He I 10830 Å. Спостерігаючи обидві ці лінії одночасно на одному детекторі, можна досліджувати вертикальне поширення хвиль в сонячних плямах, оскільки перша лінія формується на висоті приблизно 500 км (верхні шари фотосфери), а друга — на висоті поза 2000 км (середні та верхні шари хромосфери) [12].

По-п'яте, кремній традиційно використовується як реперний елемент для прив'язки шкал сонячного та метеоритного вмісту елементів. Реперний елемент обраний так, що елементи з більшими атомними номерами не еволюціонували на Сонці з моменту конденсації протопланетної хмари Сонячної системи. Таким чином, відношення їхніх вмістів до вмісту кремнію — самоузгоджені та практично сталі величини. Для 40 важких елементів після кремнію їхній метеоритний вміст узгоджується із сонячним при вимірювання у хондритах класу CI [16].

Вміст кремнію вперше визначено в 1929 році [19], а остання робота з цього приводу вийшла в 2008 році [21]. Надійні результати почали з'являтися з 1973 року [14], коли з'явилися достатньо потужні комп'ютери та чисельні методи для розрахунку реалістичних моделей атомів та атмосфер. При цьому за останні 20 років визначені значення сонячного вмісту кремнію змінювались в межах 25 % [14, 5, 23, 21]. Через це шкала метеоритного вмісту елементів зсувалася на таку ж величину. Після завершення розрахунків вмісту елементів в наближенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) для тривимірних моделях Асплунда та ін. [6] виявилось, що отриманий вміст важких елементів на Сонці, — металевість, — зменшився приблизно в два рази ($Z/X = 0.0165$ замість $Z/X = 0.0275$) порівняно з попередніми загальноприйнятими результатами [3]. Це повністю заперечує результати геліосейсмології, оскільки швидкість звукових хвиль на Сонці надто чутлива до величини металевості і за останні роки вона визначається дуже точно [10, 7].

Ця розбіжність в першу чергу пов'язана з традиційною прив'язкою шкал вмісту до вмісту кремнію, що був зменшений на $0.04 dex$ [5]. Найбільш надійний спосіб розв'язку цієї проблеми — розрахунок вмісту кремнію в аналогічній тривимірній моделі, але вже при врахуванні реалістичних відхилень від ЛТР (так звана НЛТР). Для цього ми вирішили виконати повний цикл досліджень з ревізією попередніх результатів та ще додатково дослідити поляризацію в лініях Si I.

Повне дослідження спектру кремнію складається з наступних етапів: визначення вмісту в рамках ЛТР та НЛТР для одновимірних моделей атмосфери (ревізія попередніх результатів); визначення вмісту в рамках ЛТР (ревізія) та НЛТР (що буде визначено вперше) в тривимірній моделі атмосфери; врахування впливу магнітного поля моделі на профілі ліній та визначення його вмісту; дослідження поляризації в лініях; застосування до спостережень, діагностики, суміжних областей астрофізики. Нижче ми наводимо результати першого етапу досліджень.

Метод визначення вмісту. Як вхідні дані було використано 65 ліній Si I з монографії Гуртовенко та Костика [2]. Ці лінії мають наступні діапазони параметрів: довжини хвиль $\lambda 5500 \div 9900 \text{ Å}$, потенціали збудження нижнього рівня $EPL = 4.93 \div 6.22 \text{ eV}$, еквівалентні ширини $W = 3 \div 125 \text{ mÅ}$. Сили осциляторів цих ліній астрофізичного походження, отримані підгонкою синтезованого сонячного спектру до атласу спостережень. З повного списку, що містить близько 90 ліній, ми виключили ті, що блендовані, дуже слабкі, мають недостовірний континуум. Інфрачервоні лінії поза $\lambda 10\,000 \text{ Å}$ не розглядались, оскільки для них немає надійних сил осциляторів. Три лінії Si II були вилучені через великі помилки у їхніх силах осциляторів (біля $-0.1 dex$, що призводить до небажано великих похибок вмісту $0.06 \div 0.12 dex$).

Ван-дер-Ваальсівська стала згасання ліній γ_6 , що дає найбільший внесок серед інших сталих згасання, обчислювалась за класичною теорією Унзольда [1] з поправковим множником $E = 1.5$.

Моделі HOLMUL, MACKKL та VAL,C [15, 17, 22] було обрано в якості одновимірних моделей сонячної атмосфери. Вони принципово відрізняються між собою наявністю хромосферного зростання температури та різної її величини в області температурного мінімуму. Це дозволяє оцінити похибку вмісту через неточності опису параметрів атмосфери.

Обрана величина мікротурбулентної швидкості дорівнює $V_{mi} = 1 \text{ км/с}$. Макротурбулентна швидкість V_{ma} не використовувалась, оскільки вміст визначався шляхом обчислення еквівалентної ширини ліній. Спостережувані еквівалентні ширини ліній були запозичені з монографії Гуртовенко та Костика [2]. Вони виміряні з похибкою близько 3 %.

Профілі ліній Si I розраховувались в наближенні ЛТР шляхом формального розв'язку рівнянь переносу випромінювання в одновимірному, плоско-паралельному середовищі методом коротких характеристик [20]. Вміст визначався шляхом підгонки обчисленої еквівалентної ширини лінії до спостережуваної.

Для запобігання можливих прихованих похибок, що виникають при використанні сил осциляторів астрофізичного походження, ми перевірили сили осциляторів з монографії Гуртовенко та Костика.

Порівнюючи обидві сонячні шкали сил осциляторів, визначені за еквівалентною шириною та центральною глибиною ліній, ми визначили, що вони в середньому відрізняються на $0.055 dex$, а величина різниці між ними явно залежить від еквівалентної ширини. Це свідчить про наявність НЛТР-ефектів, що мають вплив на центральну глибину ліній. В такому разі шкала, визначена за еквівалентними ширинами, краща.

Порівнюючи останню шкалу з експериментальними даними, визначено, що вона зсунута відносно експериментальних шкал Гарц [13] та Бекера та ін. [11] на $-0.026 dex$ і $+0.073 dex$ відповідно. Залежностей поправок $\delta \lg gf$ від параметрів ліній не спостерігалось, середня похибка їх менша $0.03 dex$.

Отримано значення вмісту $A = 7.594 \pm 0.015 dex$ для наступного фундаментального набору вхідних параметрів: модель атмосфери HOLMUL; сонячні сили осциляторів $\lg gf$ Гуртовенко та Костика, виправлені на $+0.073 dex$ для прив'язки до експериментальної шкали Бекера та ін.; стала згасання ліній γ_6 за класичною формулою Унзольда з поправковим множником $E = 1.5$; мікротурбулентна швидкість $V_{mi} = 1 \text{ км/с}$. Отримані значення вмісту в лініях з еквівалентною шириною зростають приблизно на $0.04 dex$.

Похибки результатів. Отримана помірна залежність вмісту в лініях від еквівалентної ширини може бути пояснена як результат: а) нехтування НЛТР-ефектами; б) нехтування ефектами, що викликані неоднорідною структурою атмосфери (так звані, 3D-ефекти); в) похибками сталої згасання γ_6 ; г) похибками вимірювання еквівалентних ширин ліній; д) похибками мікротурбулентної швидкості; е) вибором моделі атмосфери. Перші два ефекти буде перевірено в наших наступних роботах.

Для оцінки решти похибок вільних параметрів моделювання та їх впливу на результат ми змінювали ці параметри в можливих діапазонах значень та обчислювали результуючу поправку до вмісту.

При оцінці наслідків неточностей сил осциляторів $lg gf$ вміст було обраховано ще раз, але лише для 13 ліній, спільних для списків Гуртовенко та Костика і Бекера та ін. Зміщені на $0.073 dex$ сонячні сили осциляторів Гуртовенко та Костика дають $\langle A \rangle = 7.592 \pm 0.013 dex$ без якої-небудь залежності вмісту від параметрів ліній. Експериментальні сили осциляторів Бекера та ін. дають те саме середнє значення $\langle A \rangle = 7.595 \pm 0.052 dex$, але з більшою в 4 рази похибкою. В останньому разі спостерігається зростання значення вмісту від параметрів ліній λ , EPL , W . Це свідчить на користь вищої якості сонячних сил осциляторів.

Для оцінки похибки ван-дер-Ваальсівської сталої згасання γ_6 класичне наближення Унзольда з поправковим множителем $E = 1.5$ було замінено на наближення теорії Ансті, Барклема та О'Мари (АБО) [4, 8, 9]. Теорія АБО дає великий поправковий множник порядку $E = 2.5$. Від цього середня поправка до вмісту становить $\langle \delta A \rangle = 0.03 dex$.

Оцінюючи вплив неточностей еквівалентних ширин ліній W , їх було змінено в межах 3 % (похибка вимірювання). Середня поправка до вмісту виявилась $\langle \delta A \rangle = 0.02 dex$.

При зміні мікротурбулентної швидкості V_{mi} в її можливих межах від $0.8 km/c$ до $1 km/c$ вміст змінювався на $\langle \delta A \rangle = 0.007 dex$. Це найменша похибка в цій роботі.

Якщо замість моделі HOLMUL обрати модель MACKKL, то значення вмісту буде $\langle A \rangle = 7.593 \pm 0.012 dex$.

Для моделі VAL,C вміст становить $\langle A \rangle = 7.623 \pm 0.012 dex$. Похибка в різних моделях виходить майже однаковою, але середнє значення для найбільш холодної моделі (VAL,C) на $0.04 dex$ більше.

Висновки. Ми відібрали 65 ліній Si I, за якими визначено вміст елемента. Цей список ліній переважає за обсягом попередні списки з аналогічною точністю атомних параметрів [14], що дає кращу статистичну достовірність результату. Також він переважає за якістю атомних параметрів (в основному, по силам осциляторів) попередні списки, що мали більше ліній, але атомні параметри їх були гірші за якістю [21].

Показано, що сонячні сили осциляторів Гуртовенко та Костика, за якими визначався вміст кремнію, мають внутрішню систематичну похибку меншу, ніж аналогічні експериментальні дані Гарц та Бекера і ін. Сонячні сили осциляторів також легко прив'язуються до експериментальних шляхом зсуву їхніх величин на фіксовану величину.

Недостовірності ван-дер-Ваальсівської сталої згасання γ_6 ліній вносять найбільшу похибку до середнього значення вмісту кремнію — більше $0.03 dex$. Похибка вибору моделі атмосфери проявляє себе слабше, в середньому, менше $0.03 dex$. Сумарний вплив похибок сталої згасання γ_6 , еквівалентної ширини W , мікротурбулентної швидкості V_{mi} та вибору моделі атмосфери становить близько $0.11 dex$. Похибки за рахунок використання наближення ЛТР та нехтування ефектами, притаманними трьохвимірним моделям атмосфери, не враховувались і будуть оцінені в наступних наших роботах.

Отримане значення вмісту кремнію для моделі HOLMUL в наближенні ЛТР становить $\langle A \rangle = 7.594 \pm 0.015 dex$, що узгоджується із попередніми результатами досліджень.

1. *Allen K. Y.* Астрофизические величины. — М., 1977. 2. *Гуртовенко Э. А., Костык П. И.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — К., 1989. 3. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements—Meteoritic and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta.*—1989.—Vol. 53.—P. 197–214. 4. *Anstee S. D., O'Mara B. J.* Width Cross-Sections for Collisional Broadening of s—p and p—s transitions by Atomic Hydrogen // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—Vol. 276, N 3.—P. 859–866. 5. *Asplund M.* Line formation in solar granulation. III. The photospheric Si and meteoritic Fe abundances // *Astron. and Astrophys.*—2000.—Vol. 359.—P. 755–758. 6. *Asplund M.* New light on stellar abundance analyses: Departures from LTE and Homogeneity // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*—2005.—Vol. 43, № 1.—P. 481–530. 7. *Bahcall J. N., Basu S., Pinsonneault M., Serenelli A. M.* Helioseismological Implications of Recent Solar Abundance Determinations // *Astrophys. J.*—2005.—Vol. 618, № 2.—P. 1049–1056. 8. *Barklem P. S., O'Mara B. J.* The broadening of p—d and d—p transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—Vol. 290, № 1.—P. 102–106. 9. *Barklem P. S., O'Mara B. J., Ross J. E.* The broadening of d—f and f—d transitions by collisions with neutral hydrogen atoms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—Vol. 296, № 4.—P. 1057–1060. 10. *Basu S., Antia H. M.* Constraining Solar Abundances Using Helioseismology // *Astrophys. J. Lett.*—2004.—Vol. 606, № 1.—P. 85–88. 11. *Becker U., Zimmernann P., Holweger H.* Solar and meteoritic abundance of silicon // *Geochim. et Cosmochim. Acta.*—1980.—Vol. 44.—P. 2145–2149. 12. *Centeno R., Collados M., Trujillo Bueno J.* Spectropolarimetric Investigation of the Propagation of Magnetoacoustic Waves and Shock Formation in Sunspot Atmospheres // *Astrophys. J.*—2006.—Vol. 640, № 2.—P. 1153–1162. 13. *Garz T.* Absolute oscillator strength of Si I lines between 2500 Å and 8000 Å // *Astron. and Astrophys.*—1973.—Vol. 26.—P. 471–477. 14. *Holweger H.* The solar abundance of silicon // *Astron. and Astrophys.*—1973.—Vol. 26.—P. 275–278. 15. *Holweger H., Müller E. A.* The photospheric barium spectrum: The abundance and collision broadening of Ba II lines by hydrogen // *Solar Phys.*—1974.—Vol. 39.—P. 19–30. 16. *Lodders K.* Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.*—2003.—Vol. 591, № 2.—P. 1220–1247. 17. *Maltby P., Avrett E. H., Carlsson M., Kjeldeseth-Moe O., Kurucz R., Loeser R. A.* New sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // *Astrophys. J.*—1986.—Vol. 306, № 1.—P. 284–303. 18. *Rüedi I., Solanki S. K., Livingston W., Harvey J.* Interesting lines in the infrared solar spectrum. III. A polarimetric survey between $\lambda 1.05$ and $\lambda 2.50 \mu m$ // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—Vol. 113.—P. 91–106. 19. *Russell H. N.* On the composition of the Sun's atmosphere // *Astrophys. J.*—1929.—Vol. 70.—P. 11–82. 20. *Shchukina N., Trujillo Bueno J.* The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamic models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—Vol. 550, № 2.—P. 970–990. 21. *Shi J. R., Gehren T., Butler K., Mashonkina L. I., Zhao G.* Statistical equilibrium of silicon in the solar atmosphere // *Astron. and Astrophys.*—2008.—Vol. 486.—P. 303–310. 22. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. II. The underlying photosphere and temperature-minimum region // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1976.—Vol. 30.—P. 1–60. 23. *Wedemeyer S.* Statistical equilibrium and photospheric abundance of silicon in the Sun and in Vega // *Astron. and Astrophys.*—2001.—Vol. 373.—P. 998–1008.