ISSN 1024-588X. Вісник Львівського ун-ту. Серія фізична. 2011. Випуск 46. С. 113–122
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2011. Issue 46. P. 113–122

УДК 523.942
PACS 97.10.Ex

УТВОРЕННЯ ЛІНІЙ ПОГЛИНАННЯ В АТМОСФЕРІ СОНЦЯ ЗА НАЯВНОСТІ ДРІБНОМАСШТАБНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

М. Стоділка[1], І. Лаушник[2], М. Ковальчук[1], М. Гірняк[1]

[1] *Астрономічна обсерваторія ЛНУ імені Івана Франка*
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

[2] *Львівська філія ДНУЗТ*
вул. Блажкевич, 12а, 79052 Львів, Україна

Досліджено вплив дрібномасштабного магнітного поля на нерівноважне утворення магніточутливих ліній у спокійній атмосфері Сонця. З'ясовано, що дрібномасштабні магнітні поля сонячної фотосфери зумовлюють додаткове розширення магніточутливих ліній поглинання, що збільшує їхній діагностичний потенціал під час спостережень з низькою просторовою роздільною здатністю. Розроблено модель впливу дрібномасштабного магнітного поля на профілі фраунгоферових ліній.

Ключові слова: атмосфера Сонця, магнітні поля, фраунгоферові лінії.

Більша частина магнітного потоку на Сонці, проходячи через фотосферу, концентрується в дрібномасштабних магнітних елементах (ДМЕ). Вони є утвореннями з високою напруженістю магнітного поля, оточені плазмою, майже вільною від поля. Наявність магнітного поля змінює фізичні умови і спричинює утворенню різних морфологічних структур у спостережуваних шарах сонячної атмосфери. В активних областях скупчення ДМЕ утворюють факели, поза активними областями — формують сіткову структуру. Магнітне поле в сітковій структурі напрямлене вертикально, тоді як в інших областях переважає горизонтальна топологія. Спостереження показують [1], що підйом густого пасма магнітного потоку складається із ряду окремих трубок; це так зване "дерево, що піднімається". Дж. Піддінгтон [2] відстоював модель, основану на компактних і скручених магнітних трубках потоку, непроникних для конвективних рухів. Але ця модель була недостатньо обґрунтована спостереженнями, особливо, що стосувалось спостережуваних доказів гвинтової скрученості трубок потоку. К. Цваан [3] узагальнив картину "дерева, що піднімається". Він зв'язує утворення активної області

© Стоділка М., Лаушник І., Ковальчук М., Гірняк М., 2011

з підйомом петлі однорідного тороїдального магнітного поля. При проходженні через конвективну зону однорідна трубка розщеплюється на безліч трубок, що відповідають плямам, порам і факельним гранулам.

Тепер часто вживаною є модель трубки у вигляді пучка силових ліній магнітного поля з розривом у формі круга чи листа на поверхні трубки [4]. Вважається, що поздовжня компонента магнітного поля не змінюється на поперечному перерізі трубки, тоді як радіальна компонента лінійно залежить від її радіуса.

Високе просторове розділення сучасних магнітографів [5] дозволяє зробити оцінку номінальних розмірів магнітних трубок потоку: $\sim$100–200 км [6]. Час життя цих трубок потоку поки що невідомий; прямо співвіднести його з часом життя яскравих точок сіткової структури не можна. Бо ці яскраві точки можуть супроводжувати трубки потоку тільки якийсь час.

За умов спостережень з недостатньою просторовою роздільною здатністю ці дрібномасштабні магнітні поля розглядаються нами як флуктуаційні. Ця флуктуаційна компонента фотосферного магнітного поля впливає на утворення магніточутливих спектральних ліній аналогічно мікротурбулентності. Як відомо, при наявності магнітного поля відбуваються зміни форми профілю фраунгоферової лінії і величини її еквівалентної ширини, виникає поляризація випромінювання. Ці зміни спричиняються зміною коефіцієнта поглинання внаслідок розщеплення енергетичних рівнів атома (ефект Зеємана).

У наближенні мікротурбулентності масштаб кореляції магнітного поля значно менший за середню довжину вільного пробігу фотона; у такому випадку досить усереднити по розподілу магнітного поля відповідні елементи матриці поглинання в лінії.

Моделі магнітної мікротурбулентності і її вплив на профілі фраунгоферових ліній було розглянуто у роботах [7] і [8]. У роботі [9] вивчали утворення магніточутливих ліній при наявності магнітних мікротурбулентних полів у моделях атмосфер Мілна–Еддінгтона в наближенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР); автори розглянули різні моделі мікротурбулентності. У роботі [10] записано вирази для елементів матриці поглинання в лінії (зеєманівський триплет) для різних моделей магнітних турбулентних полів та проведено дослідження впливу магнітної турбулентності на профілі коефіцієнтів поглинання. Отримані вирази для профілів коефіцієнта поглинання громіздкі і вимагають числових обчислень багатократних інтегралів.

У цій роботі ми провели дослідження впливу дрібномасштабного магнітного поля на нерівноважне утворення магніточутливих ліній в спокійній атмосфері Сонця за допомогою отриманого нами виразу для коефіцієнта поглинання, що враховує інтегральний внесок дрібномасштабного магнітного поля в зеєманівське розщеплення рівнів лінії поглинання.

За спостережувані дані ми використали магніточутливі профілі ліній нейтрального заліза в незбуреній атмосфері Сонця в центрі сонячного диску, що наведені в Льєжському атласі [11] та дані спостережень з роботи [12]. Фізичні параметри цих спостережуваних ліній наведено у табл. 1.

Сьогодні ці лінії найчастіше використовують для дослідження магнітних полів на Сонці.

Табл. 1. Атомні і фізичні параметри ліній FeI, що використовуються в розрахунках цієї статті

№	λ, Å	EP, eB		$\lg gf$	Фактор Ланде	W, мÅ	Мультиплет
		нижн.	верх.				
1	5232,9	2,93	5,29	$-0,057$	1,26	346	$z^7P^0 - e^7D$
2	5247,1	0,09	2,44	$-4,97$	2	59	$a^5D - z^7D^0$
3	5250,2	0,12	2,47	$-4,96$	3	62	$a^5D - z^7D^0$
4	15648,5	5,43	6,22	$-0,652$	3	–	$e^7D - n^7D^0$

При спостереженнях з обмеженою просторовою роздільною здатністю відбувається "погашення" слабких полів змішаної полярності. За рахунок цього зменшується сигнал зеєманівської поляризації випромінювання магнітним полем, однак це не стосується I-сигналу Стокса, оскільки розщеплення рівнів визначається виключно величиною цього магнітного поля. Дрібномасштабні поля змішаної полярності важко виявити по V-сигналу Стокса, бо профіль лінії послаблюється та сильно розширюється. Тому для вирішення проблеми стосовно властивостей і динаміки тонкоструктурних трубок магнітного потоку потрібні виміри I-параметрів Стокса, чи використання Ханле-ефекту.

Зупинимось коротко на методиці розрахунку ліній поглинання у спектрі Сонця з врахуванням дії магнітного поля. Розрахунки профілів проведено у рамках моделі спокійної фотосфери Сонця VAL-80C [13]. Атомні параметри брали з бази даних VALD [14], для інфрачервоної лінії заліза $\lambda 15648,5$ Å з [12]. Розрахунок ударного розширення нейтральними атомами водню зроблено згідно з [15]. При розрахунках профілів ми використовували макротурбулентну швидкість $V_{macro} = 1{,}5$ км/с [16].

Інтегрування рівнянь переносу випромінювання проведено методом прискореної Λ-ітерації [17].

Вплив магнітного поля на утворення лінії поглинання будемо враховувати шляхом зміни профілю коефіцієнта поглинання. Для I-параметра Стокса:

$$\varphi_I = \frac{1}{2}\varphi_p \sin^2\gamma + \frac{1}{4}(\varphi_r + \varphi_b)\cdot(1+\cos^2\gamma),$$

де індекси p, r, b стосуються π та σ компонент випромінювання, а γ — кут нахилу вектора турбулентного магнітного поля відносно напрямку поширення світла. Усереднення за турбулентним магнітним полем дає:

$$\varphi_I = \frac{1}{3}\overline{\varphi_p} + \frac{1}{3}(\overline{\varphi_r} + \overline{\varphi_b}),$$

де φ_I — усереднений профіль коефіцієнта поглинання відповідної компоненти.

У випадку досліджуваного нами дрібномасштабного флуктуаційного магнітного поля при спостереженнях з низькою чи недостатньою просторовою роздільною здатністю потрібно вибрати відповідну функцію розподілу.

Ця функція розподілу магнітних полів для значень дрібномасштабних магнітних елементів є лінійною комбінацією функцій розподілу, отриманих на основі ефектів Ханле та Зеємана [18]. Під час дослідження таких функцій розподілу для ДМЕ в роботах [19, 20] з'ясовано, що більшість магнітних полів у нижній частині фотосфери є слабкими, а ймовірність появи слабких і дуже сильних полів на поверхні спокійної фотосфери вища, ніж у випадку нормального закону розподілу [21]. Результати ж стокс-діагностики в області кілогаусових полів дають більш різке зменшення функції розподілу порівняно з даними із МГД моделей [20]. Отже, навіть сама форма функції розподілу для ДМЕ є досі дискусійною. Тому ми взяли гаусівську функцію розподілу з нульовим середнім значенням. Для характеристики ізотропної флуктуаційної компоненти магнітного поля введемо її усереднену шкалу $\overline{h}$ [22]. Тоді функція розподілу матиме вигляд:

$$W(H) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}\overline{h}^3} e^{-(H_1^2+H_2^2+H_3^2)/2\overline{h}^2},$$

де $\overline{h}$ — масштаб поля.

Перейшовши до сферичної системи координат, отримуємо максвелівський розподіл магнітного поля за величиною:

$$W(H) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\overline{h}^3} H^2 e^{-H^2/2\overline{h}^2}.$$

На рис. 1 показано розподіл Максвела для трьох значень параметра $\overline{h}$: 200, 500, 1000 Гс.

Масштаб поля $\overline{h}$ пов'язаний з найбільш ймовірним значенням H_m, середнім значенням $< |H| >$ та середньоквадратичним значенням $< |H^2| >$ магнітного поля такими співвідношеннями:

$$H_m = \sqrt{2} \cdot \overline{h}; < |H| >= \sqrt{8/\pi} \cdot \overline{h}; \sqrt{< |H^2| >} = \sqrt{3} \cdot \overline{h}.$$

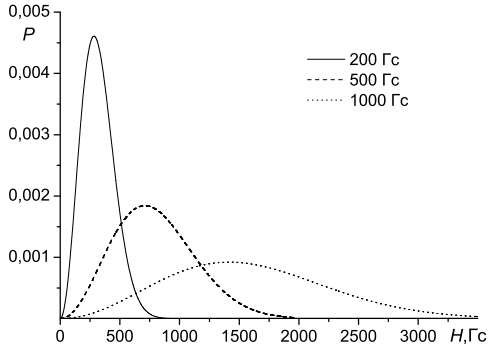

Рис. 1. Розподіл Максвела для різних значень масштабу флуктуаційного магнітного поля

Маючи у своєму розпорядженні отриману вище функцію розподілу $W(H)$, що враховує наявність магнітного поля, можемо, проводячи розрахунки аналогічно, як у роботі [22], отримати коефіцієнт поглинання в лінії з урахуванням магнітного поля:

$$K(\omega) = \frac{2\pi^2 c^2 f}{mc\sqrt{\pi}\omega_D} V_m(b^{'}, a^{'}, v^{'}),$$

де $V_m(b, a, v)$ — функція Фогта, видозмінена магнітним полем. Вона має вигляд:

$$V_m(b, a, v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} Re \int\limits_0^\infty dt e^{-t^2/4 - at + ivt} \cdot (1 - b^2 t^2) dt,$$

де $a = \gamma/(2\Delta\omega_D)$; $\Delta\omega_D = \omega_0 V/c$; $v = (\omega - \omega_0)/\Delta\omega_D - \mu_B \cdot g \cdot H/\Delta\omega_D$;

$\Delta\omega_D^{'} = \Delta\omega\sqrt{1 + 2b^2}$; $b^{'} = b/\sqrt{1 + 2b^2}$; $\alpha^{'} = \alpha/\sqrt{1 + 2b^2}$; $v^{'} = v/\sqrt{1 + 2b^2}$.

Тут γ — постійна загасання; ω_0 — центральна частота лінії, яка зміщується за рахунок зеєманівського розщеплення: $\omega_0 \to \omega_0 + \mu_B g \cdot H$, де $\mu_B = e/(2mc)$ — магнетон Бора; g — фактор Ланде для переходу $A \to A^{'}$.

У кінцевому випадку ми отримуємо для коефіцієнта поглинання видозмінену функцію Фогта, тільки замість $\Delta\omega_D$ буде:

$$\Delta\omega_D\sqrt{1 - b^2} = \Delta\omega_D\sqrt{1 + 2\mu_B^2 g_{ef}^2 \overline{h}^2/\Delta\omega_D^2}.$$

Параметр b враховує вплив дрібномасштабного магнітного поля; він має вигляд:

$$b = \mu_B g_{ef} \overline{h}/\Delta\omega_D,$$

де g_{ef} — ефективний фактор Ланде.

При малих b профіль коефіцієнта поглинання близький до фойгтівського, а при великих b зміна самого профілю досягає насичення.

На рис. 2 показано, як параметр $b^{'}$ впливає на форму профілю коефіцієнта поглинання: слабке дрібномасштабне магнітне поле (малі значення $b^{'}$) розширює профіль коефіцієнта поглинання та зменшує його максимальне значення. А при сильних полях ($b^{'} > 0{,}5$) профіль стає двогорбим. Для порівняння суцільною лінією проведено фойгтівський профіль (Voigt). Крім того, змінне магнітне поле збільшує допплерівську півширину, що у свою чергу додатково розширює профіль коефіцієнта поглинання лінії.

Аналогічні обчислення для моделі неізотропного магнітного поля дають розширення профілю коефіцієнта поглинання тільки за рахунок зміни допплерівської півширини $\Delta\lambda_D$, як у випадку слабкої флуктуаційної компоненти магнітного поля [22].

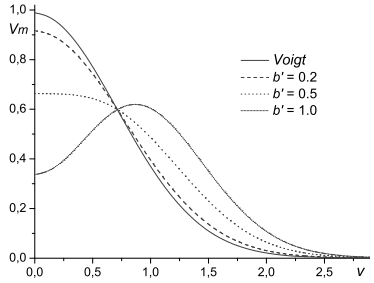

Рис. 2. Вплив дрібномасштабного магнітного поля (параметр b') на профіль коефіцієнта поглинання

На рис. 3 представлені спостережуваний (Liege) та теоретичні рівноважний (LTE) та нерівноважний (NLTE) профілі магніточутливої лінії λ5250,2 Å. Як бачимо, теоретичні профілі недостатньо розширені в крилах лінії, причому збільшення постійної загасання дозволяє узгодити лише крила лінії, оскільки при цьому зростає її ширина. Особливо сильно відрізняються між собою центральні інтенсивності LTE та NLTE профілів; зі спостереженнями узгоджується тільки NLTE профіль.

Отже, лінія λ5250,2 Åчутлива до NLTE ефектів. Ультрафіолетове випромінювання з нижніх шарів атмосфери додатково іонізує нижні енергетичні рівні нейтрального заліза (ультрафіолетова надіонізація), а область утворення лінії зміщується у нижні шари. Так, при рівноважному утворенні глибини утворення лінії такі: 7–426 км, тоді як при нерівноважному утворенні: 7–281 км. Тобто, область утворення ядра лінії зміщується в сторону нижніх шарів майже на півтори сотні кілометрів, що не можна не враховувати при інтерпретації результатів спостережень Сонця у цій лінії.

Крила теоретичного нерівноважного та спостережуваного профілів цієї лінії ми узгодили шляхом підбору висотної стратифікації вертикального масштабу дрібномасштабного магнітного поля у спокійній фотосфері Сонця. Відповідні узгоджені профілі приведені на рис. 4.

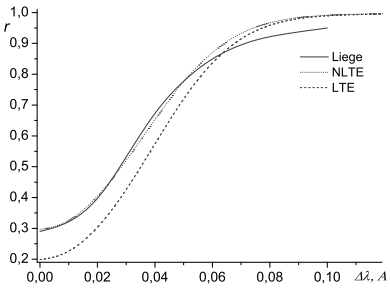

Рис. 3. Спостережуваний (Liege) та теоретичні (LTE, NLTE) профілі лінії FeI λ5250,2 Å

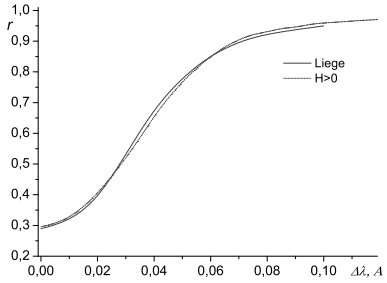

Рис. 4. Спостережуваний та розширений магнітним полем нерівноважний профілі лінії FeI λ5250,2 Å

Ми провели аналогічне дослідження інших магніточутливих ліній заліза. Найбільш чутливою до ефекту Зеємана виявилась інфрачервона лінія заліза λ15648,5 Å. Глибини утворення лінії: –2 –121 км.

На рис. 5 зображено спостережувані [11, 12] та теоретичні профілі цієї лінії без врахування і з врахуванням дрібномасштабного магнітного поля. І знову ж крила лінії розширені, до того ж лінія послаблена, оскільки у даному випадку під впливом магнітного поля зменшується коефіцієнт поглинання в центрі лінії, внаслідок чого область утворення лінії зміщується у глибші шари з вищою температурою. Як видно з рис. 5 введення дрібномасштабного поля суттєво покращує узгодження теоретичного профілю із спостереженнями.

Отже, при спостереженнях з невисокою просторовою роздільною здатністю дрібномасштабне магнітне поле додатково розширює профілі магніточутливих ліній. Наявність такого додаткового розширення крил цих ліній збільшує їх діагностичний потенціал, що важливо при дослідженні статистичних характеристик дрібномасштабних магнітних полів.

Підсумовуючи результати проведених досліджень, можна зробити такі висновки:

1. Розроблено модель впливу дрібномасштабного магнітного поля на профілі поглинання фраунгоферових ліній.

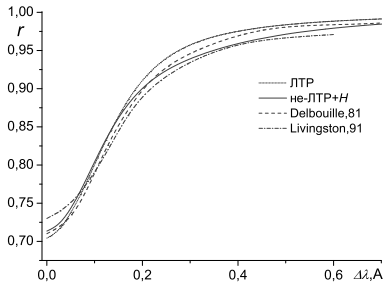

Рис. 5. Спостережувані [11, 12] та теоретичні профілі лінії λ15648,5 Å

2. Дрібномасштабне магнітне поле збільшує доплерівську півширину лінії, що у свою чергу видозмінює профіль коефіцієнта поглинання лінії.

3. За сильних дрібномасштабних магнітних полів з'являється двогорбість профілю коефіцієнта поглинання.

4. Дрібномасштабні магнітні поля сонячної фотосфери зумовлюють додаткове розширення крил магніточутливих ліній поглинання, що збільшує їх діагностичний потенціал при спостереженнях з низькою просторовою роздільною здатністю.

---

1. *Vrabec D.* Streaming Magnetic Features Near Sunspots / D. Vrabec // Ed. R. G. Athay. Dordrecht-Holland D. Reidel Publ. Comp. – 1974. – Vol. 56. – P. 201–231.
2. *Piddington J.* Solar magnetic fields and convection VI – Basic properties of magnetic flux tubes / J. Piddington // Astrophys. Space Sci. – 1976. – Vol. 45. – P. 47–62.
3. *Zwaan C.* On the Appearance of Magnetic Flux in the Solar Photosphere / C. Zwaan // Solar Phys. – 1978. – Vol. 60. – P. 213–240.
4. *Schussler M.* Small-Scale Photospheric Magnetic Fields / M. Schussler, M. Schussler// Proc. of the NATO. – 1992. – Vol. 373. – P. 191–202.
5. *Kneer F.* Einige Aspekte der Erfordernisse und Mo'glichkeiten zeitlicher Auflo'sung in der optischen Sonnenphysik / F. Kneer // Mit. Astron. Ges. – 1987. – Vol. 68. – P. 167–169.
6. *Muller R.* The dynamical behavior of facular points in the quiet photosphere / R. Muller // Solar Phys. – 1983. – Vol. 85. – P. 113–121.
7. *Unno W.* Turbulent Motion in the Solar Atmosphere. I. Doppler Widths of Photospheric Lines / W. Unno // Astrophys. J. – 1959. – Vol. 129. – P. 375–387.
8. *Stenflo J.* Statistical analysis of solar FeI lines – Magnetic line broadening / J. Stenflo, L. Lindegren // Astron. and Astrophys. – 1977. – Vol. 59, № 3. – P. 367–378.
9. *Domke H.* Line formation in microturbulent magnetic fields / H. Domke, G. G. Pavlov // Astrophys. and Space Sci. – 1979. – Vol. 66, № 1. – P. 47–75.
10. *Frisch H.* Turbulent magnetic field averages for the Zeeman effect / H. Frisch, M. Sampoorna, K. N. Nagendra // Memorie della Societa Astronomica Italiana. – 2007. – Vol. 78.
11. *Delbouille L.* Atlas photometrique du spectre solaire de λ 10000 / L. Delbouille, G. Roland, L. Neven. – Liege Universite de Liege : Institut d'Astrophysique, 1973.
12. *Solanki S. K.* Infrared lines as probes of solar magnetic features. II. Dianostic capabilities of FeI 15648.5 Å and 15652.9 Å / S. K. Solanki, I. Ruedi, W. Livingston // Astron. and Asrophys. – 1992. – Vol. 263, № 1/2. – P. 312- 322.
13. *Vernazza J.* Structure of the solar chromosphere. III. — Models of the EUV brightness components of the quiet sun / J. Vernazza, E. Avrett, R. Loezer // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1981. – Vol. 45, № 4. – P. 635–725.
14. *Piskunov N. E.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base / N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova et.al. // Astron. and Astropohys., Suppl. Series. – 1995. – Vol. 112, № 3. – P. 525–535.
15. *Anstee S. D.* Width cross — sections for collisional broadening of s-p and p-s transitions of atomic hydrogen / S. D. Anstee, B. J. O'Mara // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. – 1995. – Vol. 276. – P. 859–866.

16. *Гуртовенко Э. А.* Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов / Э. А. Гуртовенко, Р. И. Костык. – Киев : Наук. думка, 1989.
17. *Стоділка М. І.* Задача двовимірного переносу випромінювання для багаторівневих атомів / М. І. Стоділка, Р. Є. Рикалюк // Журн. фіз. досл. – 1998. – Vol. 2, № 3. – С. 427–432.
18. *Dominguez Cerdena I.* The Distribution of Quiet Sun Magnetic Field Strengths from 0 to 1800 G / Cerdena I. Dominguez, Almeida J. Sanchez, F. Kneer. // Astrophys. J. – 2006. – Vol. 636, № 1. – P. 496–509.
19. *Khomenko E. V.* Quiet Sun inter-network magnetic fields observed in the infrared / E. V. Khomenko, M. Collados, S. K. Solanki, A. Lagg, Bueno J. Trujillo // Astron. and Astrophys. – 2003. – Vol. 408, № 2. – P. 1115–1135.
20. *Sheminova V. A.* Stokes Diagnostics of 2D MHD-Simulated Solar Magnetogranulation / V. A. Sheminova // Solar Phys. – 2009. – Vol. 254, № 1. – P. 29–50.
21. *Voegler A.* Simulations of magneto-convection in the solar photosphere. Equations, methods, and results of the MURaM code / A. Voegler, S. Shelyag, M. Schussler // Astron. and Astrophys. – 2005. – Vol. 429, № 1. – P. 335–351.
22. *Вакарчук І. О.* Теорія зоряних спектрів : Навч.посібн. / І. О. Вакарчук. – Львів : ЛНУ, 2002.
23. *Solanki S. K.* Continuum brightness of solar magnetic elements / S. K. Solanki, V. Briigljevic // Astron. and Astrophys. – 1992. – Vol. 262, № 2. – P. L32-L32.

FORMATION OF ABSORPTION LINES IN SOLAR ATMOSPHERE IN THE PRESENCE OF SMALL-SCALE MAGNETIC FIELDS

M. Stodilka[1], I. Laushnyk[2], M. Koval'chuk[1], M. Hirnyak[1]

[1] Astronomikal Observatory of the Ivan Franko National University of Lviv Kyrylo and Mefodiy str., 8, 79005 Lviv, Ukraine e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

[2] Lviv branch of DNURT Blazhkevych str., 12a, 79052 Lviv, Ukraine

We study the influence of small-scale magnetic fields on the non-equilibrium formation of magneto-sensitive lines in the quiet atmosphere of the Sun. We show that the small-scale magnetic fields of the Solar atmosphere cause additional broadening of the magneto-sensitive absorption lines, thus increasing their diagnostic potential during the observations with low spatial resolution. We elaborate a model for the effect of the small-scale magnetic field upon the profiles of Fraunhofer lines.

Key words: solar atmosphere, magnetic fields, Fraunhofer lines.

ОБРАЗОВАНИЕ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА ПРИ НАЛИЧИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

М. Стодилка[1], И. Лаушник[2], М. Ковальчук[1], М. Гирняк[1]

[1] *Астрономическая обсерватория ЛНУ имени Ивана Франко*
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

[2] *Львовский филиал ДНУЗТ*
ул. Блажкевич, 12а, 79052 Львов, Украина

Исследовано влияние мелкомасштабного магнитного поля на неравновесное образование магниточувствительных линий в спокойной атмосфере Солнца. Показано, что мелкомасштабные магнитные поля солнечной фотосферы обусловливают дополнительное уширение магниточувствительных линий поглощения, что увеличивает их диагностический потенциал при наблюдениях с низким пространственным разрешением. Разработана модель влияния мелкомасштабных магнитных полей на профили фраунгоферовых линий.

Ключевые слова: атмосфера Солнца, магнитные поля, фраунгоферовые линии.

Статтю отримано: 27.10.2010
Прийнято до друку: 14.07.2011