

УДК 523.942
PACS number(s): 96-60 FS

НЕРІВНОВАЖНЕ УТВОРЕННЯ ЛІНІЙ ПОГЛИНАННЯ ЛІТІУ В СОНЯЧНІЙ АТМОСФЕРІ

М. Ковальчук, М. Гірняк

*Астрономічна обсерваторія
Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

На основі точного розв'язку рівняння нерівноважного випромінювання проаналізовано сонячний спектр літію високої спектральної роздільної здатності. В ході цих досліджень діагностовано фізичний стан сонячної атмосфери – як у незбуреній фотосфері, так і у плямах з урахуванням впливу магнітного поля.

Ключові слова: сонячна атмосфера, фраунгоферові лінії, хімічний вміст, рівняння переносу нерівноважного випромінювання.

Літій є одним з ключових елементів у процесі верифікації наявних знань щодо еволюції зір, Галактики та Всесвіту в цілому. Відповідно до сучасних уявлень, літій був останнім (за атомним номером Z) елементом, ядра якого в значних кількостях були створені під час Великого вибуху. Внаслідок невеликого кулонівського бар'єра ядра літію вигорають у надрах зір вже за порівняно низьких температур $T=2,6 \cdot 10^6$ К. Як наслідок, залежно від маси, хімічного складу та часу еволюції зір, вміст літію у їхніх атмосферах змінюється у широких межах. Інтерпретація даних щодо вміст літію в різних зорях дає змогу отримувати відомості щодо еволюції і вік цих зір, будову і перемішування речовини в них, особливості зоряного нуклеосинтезу тощо.

Ще у 60-х роках минулого століття Бонсак і Грінштейн [1] уперше звернули увагу на те, що вміст літію в атмосферах зір має відмінності у шість порядків величини. Результат цей притягнув широку увагу астрономів до проблеми вмісту літію в атмосферах зір різних типів.

Найбільше розповсюдження отримала гіпотеза, висловлена Хербігом [2], що всі зорі під час народження мали приблизно однаковий вміст літію, близький до його вмісту в міжзоряному середовищі $\lg N_{\text{Li}}=3,3$ (у логарифмічній шкалі, де вміст водню є $\lg N_{\text{H}}=12$). В ході еволюції поверхневий вміст літію зменшувався, створюючи спостережуване розмаїття вмісту літію в атмосферах зір.

Для інтерпретації даних щодо вміст літію розглянемо зорі, що знаходяться на початковому етапі еволюції, у разі наближення зір до головної послідовності і під час перебування на ній. Згідно з Хаяші [3] зоря народжується повністю конвективною. Потім у неї виникає радіативне ядро, яке росте, відтісняючи конвекцію у все більш зовнішні шари. Доти, поки існує конвекція, існує і

перемішування, і літій з поверхні переміщується вглиб зорі, де і руйнується. Згодом речовину, що вже не містить літій, унаслідок конвекції виносять на поверхню. Відбувається зменшення спостережуваного вмісту літій в атмосферах зір. Як тільки радіативне ядро розвинеться сильно, конвекція припиняється і літій на поверхні зберігається. Виникнення радіативного ядра, його ріст і зникнення конвективної оболонки відбувається у зір різної маси на різних етапах. Тому потрібно очікувати, що і зменшення поверхневого вмісту літій відбуватиметься по-різному у зір різної маси.

Особливий інтерес для задач сучасної астрофізики як у плані вивчення еволюції зір, їх будови і особливостей зоряного нуклеосинтезу, так і для дослідження можливих шляхів в еволюції всього Всесвіту становить величина вмісту первинного літій. Під терміном “первинний літій” трактують той вміст літій, який існував на момент утворення Галактики і який можна приписати всьому ранньому Всесвіту.

Великий інтерес з цього погляду представляють багаті літійем холодні вуглецеві зорі, оскільки їх первинний літій вигорів на ранніх стадіях еволюції, а той літій, що спостерігається – новоутворений. Крім того, холодні вуглецеві зорі – це об’єкти, що постійно гублять масу і збагачують літійем міжзоряне середовище. Тому має космогонічний інтерес по можливості більш точна оцінка вкладу багатих ($\lg N_{Li} > 1,0$) і надбагатих літійем ($\lg N_{Li} > 4,0$) вуглецевих зір у галактичний вміст літій. Спробу розв’язку цієї задачі провели в 1993 р. Абія, Ізер, Кенел [4]. Однак з допомогою відомих на сьогодні механізмів руйнування і виробництва літій неможливо інтерпретувати ні спостережуваний космічний вміст літій ($\lg N_{Li} = 3,3$), ні еволюцію вмісту літій в Галактиці. Дослідження зір населення II, а також розрахунки “стандартних” моделей Великого вибуху приводять до того, що первинний, догалактичний вміст літій становив $\lg N_{Li} = 2,2$.

Далі, старі зорі гало Галактики з винятково низькою металічністю займають особливе місце у можливості оцінки вмісту первинного літій. На підставі аналізу вибірки таких зір Е. Мавріце, Ф. Спайт і М. Спайт у праці [5] повідомили про відкриття незалежності вмісту літій від ефективних температур зір в інтервалі $T_{\text{eff}} \approx 500 - 6250^\circ \text{K}$. Автори допустили, що це плато у вмісті літій ($\lg N_{Li} = 2,05$) відображає його первинний вміст. Допущення ґрунтується на тій обставині, що ці зорі через низьку металічність, і отже, невисоку непрозорість речовини в оболонці, мають менш протяжні конвективні зони перемішування порівняно із зорями сонячного типу. Це оберігає літій від вигорання у внутрішніх високотемпературних областях. Згодом ці результати і припущення були підтвержені у дослідженні [6].

У 1995 р. Куруч [7] висловив припущення, що через неоднорідність зоряних атмосфер, спричинена фотосферною проникаючою конвекцією і НЛТР-ефектами літій є на порядок надіонізованим порівняно з оцінками для одномірних однорідних моделей атмосфер. Отже, реальний вміст літій може також на порядок перевищувати отримані раніше величини. Цей результат суттєво змінив укладене представлення щодо еволюції Галактики. Дослідження із формування ліній літій у разі відмови від ЛТР в атмосферах зір належать Павленку з співавторами [8] та Щукіній зі співавторами [9].

Поряд з визначенням відносного вмісту літій велике значення має визначення ізотопічного складу літій у зоряних атмосферах. Але, на жаль, лінії

ізоотопів літію ${}^6\text{Li}$ і ${}^7\text{Li}$ у зоряних спектрах дуже важко розділити. Для більшості зір відношення ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ дорівнює 0. Відношення ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$, відмінне від 0, спостерігається в основному для магнітозмінних зір. Можливо, в атмосферах цих зір існують необхідні умови для синтезу ${}^6\text{Li}$ [10, 11].

Зі збільшенням віку зорі унаслідок дії механізмів перемішування вміст літію в їх атмосферах має зменшуватися; на пізніх стадіях еволюції в атмосферах більшості зір $\lg N_{i_{\text{Li}}} \leq 1$ [12].

Значний прогрес у вивченні спектрів і вмістів легких елементів, зокрема літію, в атмосферах Сонця і зір було досягнуто останніми роками внаслідок вдосконалення розрахунків моделей їх атмосфер, появи і використання систем сил осциляторів достатньої точності для великого числа елементів, а також завдяки широкому впровадженню в астрофізичні спостереження ПЗС-камер з високою чутливістю в різних ділянках спектра [13-16].

На сьогодні накопичено значний обсяг спостережуваного матеріалу про лінії літію в атмосферах зір різних спектральних класів [12–20]. Однак визначення вмісту літію в зорях є дуже складним завданням, що зумовлене тим, що в атмосферах зір, а зокрема Сонця, літій майже повністю іонізований.

Наприклад, число атомів іонізованого літію на Сонці перевищує число атомів нейтрального літію більше, ніж у 600 разів. Спектральні лінії іонів розміщено далеко в УФ-області ($\lambda < 500 \text{ \AA}$).

Лінії ж нейтральних атомів дуже слабкі і ледь можуть бути виміряні, що робить визначення вмісту цього елемента дуже невпевненим. Це пояснюють низьким потенціалом іонізації нейтрального літію, який дорівнює $\chi_{\text{ion}} = 5,37 \text{ eV}$.

Тому вміст літію в зорях, як і на Сонці, визначають лише за інтенсивністю резонансної лінії нейтрального літію $\lambda 6708 \text{ \AA}$. Інші лінії літію слабкі. Субординатні лінії нейтрального літію $\lambda 8126$, 6103 , 4971 , 4602 \AA виявляються значно слабшими, ніж $\lambda 6708 \text{ \AA}$.

Резонансна лінія літію $\lambda 6708 \text{ \AA}$ – це дублет, причому кожна з ліній дублету є своєю чергою дублетом, що відповідає ізотопам ${}^6\text{Li}$ і ${}^7\text{Li}$.

${}^7\text{Li}$ $\lambda 6707,76$ і $\lambda 6707,91$ із відношенням інтенсивностей 2:1;

${}^6\text{Li}$ $\lambda 6707,92$ і $\lambda 6708,07$ із відношенням інтенсивностей 2:1.

Зазначимо, що у спектрі плями резонансна лінія $\lambda 6708 \text{ \AA}$ дуже сильна і з нею дуже зручно працювати.

Зробимо ще кілька зауважень про характер лінії літію $\lambda 6103,64 \text{ \AA}$. Це найбільш яскрава з ліній складного дублету першої побічної (дифузної) серії. Її складові наведені нижче:

$2^2 P_{1/2}^0 - 3^2 D_{3/2}$	$\lambda 6103,537$	5 (інтенсивність)
$2^2 P_{3/2}^0 - 3^2 D_{3/2}$	$\lambda 6103,664$	1 (інтенсивність)
$2^2 P_{3/2}^0 - 3^2 D_{5/2}$	$\lambda 6103,649$	9 (інтенсивність)

Лінія $\lambda 6103,664 \text{ \AA}$ дуже слабка. Дві інші лінії є головними складовими дублету. Лінію $\lambda 6103,664 \text{ \AA}$ використовують у спектрі плями, оскільки там вона в кілька разів сильніша.

Видається природним спробувати провести визначення вмісту літію за спектрами плям, оскільки за нижчої температури сонячних плям лінії нейтрального літію повинні бути посилені.

Визначення вмісту літію за спектрами плям цікаве ще й тому, що в активній області вміст його може відрізнитися від звичайної для Сонця величини ($\lg N_{Li}=1,23$), оскільки у цих областях під час хромосферних спалахів, на думку деяких авторів [20], відбуваються ядерні реакції. Літій, як відомо, легко бере участь в ядерних реакціях і його вміст може бути змінений.

Відмінність фізичних умов у незбуреній сонячній атмосфері та в активних областях (типу плям) відображена у зміні інтенсивності спостережуваного спектра Сонця. Тому вивчення фізичних характеристик і процесів, які відбуваються в атмосфері Сонця, ґрунтується на аналізі спостережуваного спектру, що описують рівнянням переносу випромінювання. У статті на основі точного розв'язку рівняння переносу нерівноважного випромінювання проаналізовано сонячний спектр літію високої спектральної роздільної здатності як у незбуреній фотосфері, так і в плямах з урахуванням впливу магнітного поля.

а) У незбуреній сонячній атмосфері.

У нашій статті ми звернулись до класичного трактування проблеми переносу випромінювання у лінії. При цьому підході, як відомо, допускають два різні процеси утворення лінії – розсіяння і поглинання. Вхідна формула для інтенсивності випромінювання, що виходить з атмосфери Сонця під кутом θ до нормалі, така:

$$I_{\lambda}(0, \mu) = \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}) e^{-\tau_{\lambda}/\mu} \frac{d\tau_{\lambda}}{\mu},$$

де $\mu = \cos \theta$; τ_{λ} – повна оптична глибина (лінія плюс континуум), тобто $\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda}^l + \tau_{\lambda}^c$, де τ_{λ}^l і τ_{λ}^c виражені через стандартну оптичну глибину на довжині хвилі $\lambda = 5000 \text{ \AA}$,

$$\tau_{\lambda}^c = \int_0^{\tau_{5000}} \frac{k_{\lambda}}{k_{5000}} d\tau_{5000}; \quad \tau_{\lambda}^l = \int_0^{\tau_{5000}} \frac{\sigma_{\lambda}}{k_{5000}} d\tau_{5000},$$

де k_{λ} і σ_{λ} – коефіцієнти поглинання в континуумі та в лінії.

Під час розрахунку теоретичних профілів ліній поглинання допущено, що процес, унаслідок якого утворюються лінії, є комбінацією істинного поглинання і когерентного розсіяння. У цьому загальному випадку функцію джерела S_{λ} можна подати як лінійну комбінацію функції Планка B_{λ} і середньої інтенсивності J_{λ} , узятих з вагами, що відповідають коефіцієнтам неперервного поглинання k_{λ} і поглинання в лінії σ_{λ} за відсутності розсіяння, істинному коефіцієнту поглинання всередині лінії k_{λ}^0 і коефіцієнту розсіяння всередині лінії σ_{λ}^0 [21]:

$$S_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = \frac{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0}{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0 + \sigma_{\lambda}^0} B_{\lambda}(\tau_{\lambda}) + \frac{\sigma_{\lambda}^0}{k_{\lambda} + k_{\lambda}^0 + \sigma_{\lambda}^0} J_{\lambda}(\tau_{\lambda}),$$

причому $k_{\lambda}^0 = \varepsilon_{\lambda} \sigma_{\lambda}$ і $\sigma_{\lambda}^0 = (1 - \varepsilon_{\lambda}) \sigma_{\lambda}$. Величина ε_{λ} показує, яка частина селективно поглинутої енергії перетворюється у теплову, а яка буде перевипромінена у вигляді розсіяння.

У випадку когерентного розсіяння інтенсивність, усереднену за всіма напрямками, визначають інтегральним рівнянням:

$$J_{\lambda}(\tau_{\lambda}) = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\tau_{\lambda}') E(|\tau_{\lambda} - \tau_{\lambda}'|) d\tau_{\lambda}' .$$

Це рівняння розв'язували методом послідовних наближень. За нульове наближення приймали функцію Планка. За такого комплексного підходу до проблеми утворення ліній розв'язок рівняння переносу отримували після трьох-чотирьох послідовних наближень.

б) в сонячних плямах.

Магнітні поля суттєво впливають на лінії поглинання у спектрі Сонця – відбуваються зміни форми профілю фраунгоферової лінії та її еквівалентної ширини. Ці зміни, як відомо, спричинені зміною коефіцієнта поглинання атомів, що беруть участь в утворенні лінії внаслідок розщеплення або принаймні розширення атомних рівнів магнітним полем. Оскільки магнітні поля завжди орієнтовані довільно відносно спостерігача, то дуже важливо мати коефіцієнти поглинання атомів за довільної орієнтації магнітного поля.

На основі теорії магнітооптичних явищ, узагальненої у роботі [22], коефіцієнт поглинання атомів за довільної орієнтації магнітного поля (в розрахунку на 1 атом) має вигляд:

$$S_{\pm} = \frac{1}{2}(S_1 + S_2) + \frac{1}{4}(2S_0 - S_1 - S_2)^2 \sin^2 \gamma \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{4}(2S_0 - S_1 - S_2)^2 \sin^4 \gamma + (S_1 - S_2)^2 \cos^2 \gamma} .$$

Отже, ми отримали два коефіцієнти поглинання S_+ і S_- , що відповідають двом ортогональним станам поляризації світла і описують поглинання крайніх компонентів розщеплення S_1 і S_2 (у разі поздовжнього ефекту) і S_0 поглинання незміщеного π -компонента (у поперечному ефекті Зеємана).

Компоненти розщеплення S_1, S_2, S_0 описуються формулами:

$$S_{1,2} = \frac{e^2}{m_e c} \frac{\delta_{ik} f_{ik}}{[(v - v_{ik}) \pm v_L]^2 + \delta_{ik}^2}$$

$$S_0 = \frac{e^2}{m_e c} \frac{\delta_{ik} f_{ik}}{(v - v_{ik})^2 + \delta_{ik}^2} ,$$

де $\delta_{ik} = \frac{1}{4\pi}(\gamma_i + \gamma_k + \gamma_c)$ – загальна постійна загасання ; f_{ik} – сила осцилятора; нульова частота v_{ik} , внаслідок дії магнітного поля H , зміщена на величину v_L , що дорівнює

$$v_L = \frac{e}{4\pi m_e c^2} \cdot H ,$$

решта позначень загальноприйняті.

Ми обчислили атомний коефіцієнт поглинання для низки величин γ – кута між променем зору і напрямом магнітного поля, а також для спостережуваних значень напруженостей магнітного поля в плямах.

З цими промодельованими різними сукупностями коефіцієнтів поглинання ми проводили розрахунки результуючих профілів та еквівалентних ширин магніточутливих ліній поглинання у плямах.

Вивчення фізичних характеристик і процесів, які відбуваються в атмосфері Сонця, ґрунтується на аналізі простеженого спектра, що описують рівнянням перенесенню випромінювання. Точний розрахунок теоретичних профілів ліній поглинання у спектрі Сонця потребує знання різних параметрів, одні з яких належать до структури сонячної атмосфери, інші зв'язані з атомами чи іонами, що утворюють цю лінію, ще інші описують взаємодію відповідного роду частинок із полем випромінювання та середовищем.

а) Спостережуваний матеріал.

Ми використовували спостереження профілів ліній поглинання літію в незбуреній фотосфері і в сонячних плямах, отримані у Кримській астрофізичній обсерваторії [17, 18]. У табл. 1 подано деякі фізичні параметри цих спостережуваних ліній – довжина хвилі в Å (колонка 1), потенціал збудження нижнього рівня (колонка 2), логарифм добутку статистичної ваги і сили осцилятора (колонка 3), еквівалентні ширини у спокійній фотосфері і в плямах, відповідно (колонки 4 і 5), напруженість магнітного поля у плямах (колонка 6), температура в плямах (колонка 7).

Таблиця 1

Фізичні параметри спостережуваних ліній літію в незбуреній фотосфері та в плямах

λ , Å	χ , eV	lg gf	W_{λ} , mÅ		H, гс	T, K
			фотосф.	плями		
1	2	3	4	5	6	7
6 103,65	1,85	+0,588	0,46	0,96	2 800	4 469
6 707,76	0,00	0,00	1,74	2,51	3 150	3 690

б) Модель атмосфери Сонця .

Для кількісних досліджень сонячної фотосфери і сонячних плям за фраунгоферовими лініями поглинання ми використовували, відповідно, модель VAL-C-80 (Вернацца, Авретта, Лезера, середній потік) [23] та моделі плям MACKKL [24]. Ці моделі відрізняються характером спостережуваних даних, на основі яких вони побудовані (спокійна фотосфера і плями), як наслідок цього – різним значенням і положенням рівня температурного мінімуму.

Модель VAL ґрунтується на абсолютних вимірах неперервного спектра, виконаних у широкому діапазоні довжин хвиль – від мікрохвиль до ультрафіолетових. Мінімальна температура моделі – 4 150°K. Розподіл поля мікро- і макротурбулентних швидкостей подано в моделі і, відповідно, становить: 1,4 і 0,7 км /с на висоті h=800 км; 1,0 і 0,4 км /с на висоті h=0 км.

Напівемпірична модель MACKKL – містить модель середньої атмосфери Сонця і дві моделі сонячних плям – холодної і гарячої. Модель середньої сонячної

атмосфери охоплює хромосферу, мінімальна температура якої на 650°K нижча, ніж в моделі VAL; мікротурбулентна швидкість в моделі MACKKL має мінімум $v_t \approx 0,5$ км/с на висоті $h \approx 300$ км, потім вона зростає і становить 1,8 км/с при $h = 0$ км. Ця модель отримана з аналізу залежності центр-край інтенсивності випромінювання у неперервному спектрі для довжин хвиль в діапазоні від синьої до близької ІЧ-області.

в) Інші вхідні дані.

На початковій стадії розрахунків еквівалентних ширин ліній поглинання літїю в спектрах спокійної фотосфери і плям ми використовували прийнятий хімічний вміст цього елемента в атмосфері Сонця, що базується на рекомендованому в каталозі VALD [25]. З цього ж каталогу взяті і сили осциляторів, потенціали іонізації і збудження для досліджуваних ліній літїю.

г) Параметри загасання.

За умови дослідження механізмів розширення фотосферних ліній і постійних взаємодій в ефектах Штарка і ван дер Ваальса такі відомості обов'язкові, оскільки у фотосфері домінує загасання внаслідок зіткнень. Тому дуже важливо знати параметри загасання під час зіткнень. Під час визначення постійної загасання, яка належить як один із параметрів до функції Фойгта, обчислювали лише загасання внаслідок зіткнень з атомами нейтрального водню γ_6 , оскільки воно є набагато більшим порівняно із загасанням внаслідок випромінювання і загасанням під час зіткнення з електронами. Ми обчислили еквівалентні ширини ліній з поправочним множником до сталої загасання $1,5 \gamma_6$.

д) Оцінка впливу відхилень від ЛТР на фізичні параметри фраунгоферових ліній.

Для оцінки впливу відхилень від ЛТР на інтенсивності випромінювання в лініях, на їхні функції джерела, врешті-решт, на самі профілі та еквівалентні ширини ліній поглинання значення цих величин порівнювали з відповідними значеннями, розрахованими в наближенні ЛТР.

Унаслідок точного розв'язку рівняння переносу нерівноважного випромінювання як у незбуреній фотосфері, так і в плямах, ми отримали еквівалентні ширини ліній поглинання нейтрального літїю в цих областях сонячної фотосфери. Еквівалентна ширина лінії, як відомо, – це інтегральна характеристика, яка відображає фізичні умови в тих шарах атмосфери, де утворюється лінія. Її визначають сумарним вкладом різних ділянок профілю лінії: від ядра лінії до далеких крил, інтенсивність яких формується на різних глибинах: ядра – у вищих, а крила – у нижчих шарах атмосфери Сонця. Варіації еквівалентних ширин ліній у спокійних і активних (у цьому випадку в плямах) областях Сонця відображають в області утворення ліній стратифікації і градієнти температури, поля швидкостей концентрації агентів селективного поглинання та інших характеристик сонячної атмосфери; вони чутливі до не-ЛТР ефектів. Після узгодження теоретичних еквівалентних ширин зі спостережуваними визначали фізичні умови в неоднорідній атмосфері Сонця та вплив параметрів поглинаючого середовища на фраунгоферові лінії. У табл. 2 наведені спостережувані та теоретичні ЛТР та не-ЛТР еквівалентні ширини ліній літїю, розраховані у спокійних областях сонячного диску та у плямах (для найближчих до цих спостережень промодельованих значень кутів нахилу γ магнітного поля).

Таблиця 2

Зіставлення теоретичних еквівалентних ширин ліній поглинання літію зі спостережуваними даними

$\lambda, \text{\AA}$	Фотосфера			Плями				
	$W_{\text{теор.}}, \text{m\AA}$		$W_{\text{спост.}}$	$H, \text{гс}$	γ	$W_{\text{теор.}}, \text{m\AA}$		$W_{\text{спост.}}$
	ЛТР	не-ЛТР				ЛТР	не-ЛТР	
6103,65	0,33	0,39	0,46	2 800	60°	0,80	0,93	0,96
6707,76	1,58	1,67	1,74	3 150	40°	2,18	2,29	2,51

З метою найкращого узгодження теоретичних і спостережуваних еквівалентних ширин ліній літію проводили автоматичний перерахунок коефіцієнта поглинання лінії з різними значеннями величини, що характеризує індивідуальні властивості лінії $\lg L = \lg gf + \lg N_{Li} - \lg N_H$. Цей перерахунок проводився необхідну кількість разів з поступовим зменшенням по абсолютній величині різниці: $|W_{\text{теор}} - W_{\text{спост}}|$ до максимального збігу теоретичних і спостережуваних значень еквівалентних ширин кожної досліджуваної лінії. Після підбору $\lg N_{Li}$ включено цикл за розрахунком теоретичної еквівалентної ширини лінії. Отже, точність визначення вмісту хімічних елементів суттєво обмежена як ненадійністю системи сил осциляторів, що використовують під час теоретичних розрахунків, так і розбіжностями у вимірюванні спостережуваних еквівалентних ширин.

На підставі узгодження теоретичних еквівалентних ширин ліній поглинання, розрахованих за моделями VAL-C і MACKKL в рамках гіпотез ЛТР і НЛТР, зі спостережуваними було визначено вміст літію у сонячній фотосфері і в плямах (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст літію, розрахований по моделях спокійної фотосфери і плями в рамках припущень ЛТР і НЛТР

$\lambda, \text{\AA}$	$\lg N_{Li}, \text{ фотосфера}$		$\lg N_{Li}, \text{ плями}$	
	ЛТР	НЛТР	ЛТР	НЛТР
6 103,65	0,95	0,97	1,17	1,18
6 707,76	0,97	1,02	1,21	1,24

Аналіз результатів цих досліджень дає змогу діагностувати фізичний стан сонячної атмосфери – як в незбуреній фотосфері, так і у плямах з урахуванням впливу магнітного поля.

1.3 метою узгодження слабких сонячних ліній нейтрального літію із спостережуваними в незбуреній фотосфері та в плямах розрахунки потрібно проводити в рамках теорії, в якій враховано відхилення від ЛТР в атмосфері Сонця; отже, вплив ефектів відхилення від рівноважного стану на утворення

навіть слабких фраунгоферових ліній є суттєвим – збільшується центральна глибина лінії і, відповідно, стає більшою еквівалентна ширина.

2. В умовах сонячних плям магнітне поле поляризує випромінювання, внаслідок чого змінюється форма профілів ліній та їхні еквівалентні ширини. Збільшення еквівалентних ширин ліній поглинання у сонячних плямах пропорційне до збільшення напруженості магнітного поля в них, і залежить від напрямку поля γ щодо променя зору.

3. Виявлено ефекти підвищеної чутливості ліній літію до температурної моделі атмосфери Сонця. Температурні відмінності у моделях VAL-C і MACKK у ділянці утворення ліній спричиняють до варіації еквівалентних ширин ліній.

4. НЛТР розрахунки лише частково знімають проблему оцінок вмісту літію в атмосфері Сонця, що одержані в рамках ЛТР аналізу: НЛТР поправки до вмісту літію не перевищують 0,02–0,05 dex.

-
1. *Bonsack W. K., Greenstein J. L.* The Abundance of Lithium in T Tauri Stars and Related Objects // *Astrophys. J.* 1960. Vol. 131. 83 p.
 2. *Herbig G. H.* Lithium Abundances in F5 – G8 Dwarfs // *Astrophys. J.* 1965. Vol. 141. 588 p.
 3. *Hayashi C.* Evolution of Protostars // *Annual Rev. of Astron. and Astrophys.* 1966. Vol. 4. 171 p.
 4. *Abia C., Isern J., Canal R.* On the Li Production by Galactic C-Stars // *Astron. Astroph.* 1993. Vol.275. N 1. 96 p.
 5. *Maurice E., Spite E., Spite M.* Abundance of lithium in old dwarf stars // in: *ESO Workshop on Primordial Helium, Garching, West Germany, February 2, 3, 1983.* P. 361–371.
 6. *Dantona F., Mazzitelli I.* Lithium depletion in stars – Pre-main Sequence burning and extra-mixing // *Astron. Astrophys.* 1984. Vol. 138. N 2. P. 431–442.
 7. *Kurucz R.L.* The Primordial Lithium Abundance // *Astrophys. J.* 1995. Vol. 452. 102 p.
 8. *Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez R. J.* Formation of Lithium lines in Spectra of very cool dwarfs // *Astron. Astrophys.* 1995. Vol. 303. P. 807–818.
 9. *Carlsson M., Rutten R. J., Bruls J. H., Shchukina N. G.* The non-LTE formation of Li I lines in cool stars // *Astron. Astrophys.* 1994. Vol. 288. P. 860–882.
 10. *Burkhardt C., Coupry M. F.* Am stars of the Hyades cluster – Temperatures, lithium, and the heavier elements, Al, Si, and Fe // *Astron. Astrophys.* 1989. Vol. 220. P. 197–205.
 11. *Burkhardt C., Coupry M. F.* The A and Am-Fm stars. I-The abundances of Li, Al, Si, and Fe // *Astron Astroph.* 1991. Vol. 249. P. 205–216.
 12. *Balachandran S.* Observations of Li in F stars // *Mem. Soc. Astron. Italiana* . 1991. Vol. 62. 33 p.
 13. *Uitenbroek H.* The Effect of Surface Inhomogeneities on the Determination of the Lithium Abundance in Cool Stellar Atmosphere // *ASP Confer.Ser 154, The Tenth Cambridge WorkShop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun, Edit. By R.A.Donahue and J.A.Bookbinder, 1998.* 979 p.

14. *Takeda Yoichi, Kawanomoto Satoshi.* Lithium Abundances of F-, G-, and K-Type Stars. Profile-Fitting Analysis of the Li I 6708 Doublet // PASJ (Homepage) 2005. Vol. 57. N 1. P. 45–63.
15. *Ritzenhoff S., Schroter E. H., Schmidt W.* The Lithium abundance in sunspots // *Astron. Astrophys.* 1997. Vol. 328. P. 695–701.
16. *Jahn K.* Magnetohydrostatic equilibrium in sunspot models // in: *Sunspots: Theory and observations; Proceedings of the NATO advanced Research Workshop on the Theory of Sunspots, Cambridge, United Kingdom, Sept. 22-27. 1991.* P. 139–162.
17. *Прокофьев В. К., Северный А. Б.* Об определении линии лития 6103.64 Å в спектре солнечных пятен // *Изв. КрАО.* 1976. Т. 36. С.90–97.
18. *Боярчук М. Е.* Содержание лития в звездных атмосферах // *Изв. КрАО.* 1976. Т. 55. С. 127–156.
19. *Barrado y Navascués D., Garcia López R. J., Severino G., Gomez M. T.* The effect of stellar activity on the Li I 6708, Na I 5896 and KI 7699 Å lines. A comparison with Pleiades, field stars and the Sun // *Astron. Astrophys.* 2001. Vol. 371. P. 652–666.
20. *Северный А. Б., Дубов Э. Е., Хромова Т. П.* Определение содержания некоторых элементов на Солнце по спектрам солнечных пятен // *Изв. КрАО.* 1964. Т. 31. С.247–258.
21. *Бабий Б. Т., Ковальчук М. М.* Об образовании слабых фраунгоферовых линий солнечного спектра // *Астроном. журн.* 1984. Т. 61. Вып. 4. С. 771–777.
22. *Степанов В. Е.* Коэффициент поглощения атомов в обратном эффекте Зеемана при произвольном направлении магнитного поля // *Астроном. журн.* 1958. Т. 18. С. 136–150.
23. *Vernazza J. E., Avrett E. R., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* 1981. Vol. 45. N 4. P. 635–725.
24. *Maltby P., Avrett E. H., Carlsson M., Kjeldseth-Moe et al.* A new sunspot umbral model and its variation with the solar cycle // *Astrophys. J.* 1986. Vol. 306. P. 284–303.
25. *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A. et al.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* 1995. Vol. 112. 525 p.

**THE NONEQUILIBRIUM FORMATION OF LITHIUM ABSORPTION
LINES IN THE SOLAR ATMOSPHERE****M. Koval'chuk, M. Hirnyak**

*Astronomical observatory
of the Ivan Franko Lviv National University,
Kyrylo and Mefodii Str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

The correct solution of equations of transfer of nonequilibrium radiation was obtained. We analyze lithium solar spectrum with high spectral resolution. The diagnostic of physical conditions in a unperturbed photosphere and in spots with accounting influence of magnetic field was made.

Key words: solar atmosphere, fraunhofer lines, chemical abundance, equation of transfer of nonequilibrium radiation.

Стаття надійшла до редколегії 21.03.2008

Прийнята до друку 08.07.2008