

УДК 523.98
PACS 95.85 Bh

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЛІНІЙ НАТРІЮ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ АТМОСФЕРИ СОНЦЯ

М. Ковальчук, М. Стоділка, М. Гірняк

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Дослідження профілів ліній нейтрального натрію важливе для визначення фізичних умов в атмосферах Сонця і зір. В роботі проведено інтерпретацію спектральних спостережень ліній натрію при переході від центра до краю сонячного диска. Розрахунки ґрунтуються на числовому розв'язку рівняння переносу нерівноважного випромінювання у цих лініях із врахуванням багаторівневої моделі атома натрію. Уточнені параметри і механізми, що впливають на процес утворення ліній. У результаті врахування відхилень від ЛТР у населеностях рівнів встановлено, що у хромосфері енергетичні рівні перенаселені, в області температурного мінімуму і в прилеглих областях – недонаселені. Показано, що найкращого узгодження між теоретичними і спостережуваними профілями ліній можна досягти при розгляді різних механізмів утворення ліній з одночасним врахуванням відхилень від ЛТР у населеностях енергетичних рівнів.

Ключові слова: рівняння переносу нерівноважного випромінювання; профілі ліній поглинання натрію; модель сонячної атмосфери

1 Вступ

Дослідженню ліній поглинання в атмосфері Сонця завжди приділялась велика увага. Сильні лінії поглинання на Сонці несуть багату інформацію щодо фотосфери, області температурного мінімуму, нижньої і верхньої хромосфери, слабкі ж лінії - в основному стосовно фотосфери. Крім того, дуже часто різні лінії одного і того ж елемента мають області утворення, що взаємно перекриваються: це дозволяє зробити відповідні висновки про механізми утворення ліній, відхилення від локальної термодинамічної рівноваги, про хімічний вміст, фізичний стан, структурні особливості атмосфери Сонця.

З цієї точки зору особливий інтерес становлять дослідження профілів ліній нейтрального натрію, оскільки натрій є єдиним елементом, що посідає наступні переваги: містить як і дуже сильні, так і слабкі лінії, має просту систему термів, низьку

енергію іонізації, відносно добре відомі поперечні перерізи взаємодії, відсутній помітний вплив на атмосферу через низький сонячний вміст; лінії натрію знаходяться як у видимій, так і в інфрачервоній областях спектру. Тому вивчення ліній натрію суттєве для виявлення фізичних умов в атмосфері Сонця і зір. Отримана інформація служить важливою складовою частиною при побудові узгодженої картини будови і еволюції зір.

2 Спостережуваний матеріал

Ми використали високоточні фотоелектричні профілі 30 ліній натрію в сонячному спектрі спокійного періоду сонячної активності, отримані на національній обсерваторії Кітт-Пік (Арізона, США) [1].

Спостереження покривають інтервал довжин хвиль від $\lambda 3302 \text{ \AA}$ до $\lambda 40432 \text{ \AA}$ і охоплюють різні точки сонячного диска від його центра до краю ($\cos \theta = \mu = 1.0; 0.7; 0.4; 0.2; 0.1$).

У таблиці 1 подано деякі атомні та фізичні (для центра сонячного диска) параметри ліній натрію, що вивчаються.

Розташування колонок таке: довжини хвиль (2), переходи між термами (3); номери мультиплетів (4); енергії збудження нижніх і верхніх рівнів (5); внутрішні квантові числа цих рівнів (6); логарифми добутку статистичної ваги і сили осцилятора (7); центральні залишкові інтенсивності (8); повні півширини ліній в m\AA (9); еквівалентні ширини ліній в m\AA (10).

У таблиці 2 подана зміна центральних залишкових інтенсивностей профілів натрію від центра до краю сонячного диска (у відносних одиницях).

У таблиці 3 подана зміна еквівалентних ширин профілів ліній натрію від центра до краю сонячного диска (в m\AA).

Метою роботи була інтерпретація спектральних спостережень ліній натрію при переході від центра до краю сонячного диска для діагностики фізичного стану неоднорідної атмосфери Сонця. Розрахунки проводились для різних як за характером, так і за інтенсивністю ліній, що відповідають різним потенціалам збудження. Дослідження ґрунтуються на числовому розв'язку рівняння переносу нерівноважного випромінювання у цих лініях з врахуванням багаторівневої моделі атома натрію і на аналізі поведінки цих ліній на диску Сонця.

3 Структура енергетичних рівнів атома натрію

Ми використали багаторівневу модель енергетичних рівнів атома натрію, що включає в себе вісім рівнів. У цій моделі всі мультиплети замінені еквівалентними рівнями із зваженими атомними параметрами (енергія збудження, довжина хвилі, сила осцилятора) і статистичною вагою, що дорівнює сумі статистичних ваг на підрівнях; останній рівень - континуум. Ця модель є оптимальною, оскільки вона дозволяє розглядати як резонансні (відомі лінії D_1 і D_2) з переходами між рівнями 1 і 2, так і субординатні лінії, наприклад, переходи 2-6, 2-7 і ряд інших.

Дані про всі включені у розрахунок переходи, представлені в таблиці 4.

Табл. 1: Атомні та фізичні параметри ліній натрію (для центра сонячного диску)

N	$\lambda, \text{Å}$	перехід мульти.	N мульти.	χ, eV		J		$lg gf$	r_λ	$\Delta h_{1/2},$ mÅ	$W,$ mÅ
				нижн.	верх.	нижн.	верх.				
1	2	3	4	5		6		7	8	9	10
1	3302.37	$3s^2S - 4p^2P^0$	2	0.00	3.74	1/2	3/2	-1.73	0.041	128	110
2	3302.97	$3s^2S - 4p^2P^0$	2	0.00	3.74	1/2	1/2	-2.021	0.057	82	83
3	4497.66	$3p^2P^0 - 7d^2D$	15	2.10	4.84	3/2	5/2	-1/56	0.75	11	35
4	4751.82	$3p^2P^0 - 7s^2S$	11	2.10	4.69	3/2	1/2	-2.095	0.87	84	14
5	4982.82	$3p^2P^0 - 5d^2D$	9	2.10	4.57	3/2	5/2	-0.95	-	-	95
6	5148.84	$3p^2P^0 - 6s^2S$	8	2.09	4.49	1/2	1/2	-2.058	0.868	89	14
7	5682.64	$3p^2P^0 - 4d^2D$	6	2.09	4.27	1/2	3/2	-0.67	0.305	122	119
8	5688.21	$3p^2P^0 - 4d^2D$	6	2.10	4.27	3/2	3/2	-0.420	0.232	145	152
9	5889.97	$3s^2S - 3p^2P^0$	1	0.00	2.10	1/2	3/2	-0.184	0.0396	515	889
10	5895.93	$3s^2S - 3p^2P^0$	1	0.00	2.09	1/2	1/2	+0.117	0.0456	415	643
11	6154.23	$3p^2P^0 - 5s^2S$	5	2.09	4.10	1/2	1/2	-0.56	0.704	108	41
12	6160.75	$3p^2P^0 - 5s^2S$	5	2.10	4.10	3/2	1/2	-1.261	0.558	118	65
13	8183.27	$3p^2P^0 - 3d^2D$	4	2.09	3.60	1/2	3/2	+0.220	0.208	224	263
14	8194.84	$3p^2P^0 - 3d^2D$	4	2.10	3.60	3/2	5/2	+0.477	0.173	254	322
15	8648.92	$4s^2S - 6p^2P^0$	19	3.18	4.60	1/2	-	-	0.9896	-	2.6
16	8650.89	$4s^2S - 6p^2P^0$	19	3.18	4.60	1/2	1/2	-2.29	0.990	-	2.3
17	9961.25	$3d^2D - 7f^2F^0$	23	3.60	4.84	1/2	3/2	-0.58	0.9644	-	16
18	10565.95	$4p^2P^0 - 8d^2D$	-	3.75	4.92	1/2	3/2	-1.57	0.9943	-	1.8
19	10572.43	$4p^2P^0 - 8d^2D$	-	3.75	4.92	3/2	3/2	-2.27	0.9921	-	2.5
20	10746.45	$4s^2S - 5p^2P^0$	18	3.18	4.33	1/2	3/2	-1.29	0.9503	-	-
21	10834.96	$3d^2D - 6f^2F^0$	22	3.60	4.74	5/2	7/2	-0.50	0.903	-	-
22	11403.82	$3p^2P^0 - 4s^2S$	3	2.10	3.18	3/2	1/2	-0.183	0.330	-	-
23	12311.48	$4p^2P^0 - 6d^2D$	-	3.75	4.76	1/2	3/2	-1.00	0.9732	-	-
24	12679.24	$3d^2D - 5f^2F^0$	21	3.60	4.57	3/2	5/2	-0.20	0.693	-	-
25	12907.94	$4p^2P^0 - 7s^2S$	-	3.75	4.71	1/2	1/2	-1.83	0.9916	-	-
26	14779.89	$4p^2P^0 - 5d^2D$	-	3.75	4.59	3/2	5/2	-0.29	0.845	-	-
27	16388.93	$4p^2P^0 - 6s^2S$	-	3.75	4.51	3/2	1/2	-1.03	0.9405	-	-
28	22056.62	$4s^2S - 4p^2P^0$	-	3.19	3.75	1/2	3/2	0.29	0.611	-	-
29	22083.93	$4s^2S - 4p^2P^0$	-	3.19	3.75	1/2	1/2	-0.02	0.653	-	-
30	23348.82	$4p^2P^0 - 4d^2D$	-	3.75	4.28	1/2	3/2	0.28	0.727	-	-

Табл. 2: Зміна центральних залишкових інтенсивностей профілів ліній натрію від центра до краю сонячного диска

λ	r_{λ_0} центр.зал.	
	$\cos \theta$	
	1.0	0.1
3302.37	0.04	0.075
4497.7	0.750	0.662
4751.8	0.865	0.839
4982.8	0.348	0.422
5148.8	0.868	0.836
5682.6	0.305	0.349
5688.2	0.232	0.298
5889.9	0.039	0.089
5895.9	0.046	0.102
6154.2	0.686	0.704
6160.7	0.558	0.578
8183.3	0.208	0.243
8194.8	0.173	0.217
8648.9	0.9896	0.9883
8650.9	0.990	0.989
9961.2	0.964	0.953
10565.9	0.9943	0.9921
10572.4	0.9921	0.9867
10746.4	0.9503	0.9523
10834.8	0.903	0.929
11403.8	0.330	0.391
12311.5	0.973	0.968
12679.2	0.693	0.824
12907.9	0.992	0.987
14779.9	0.845	0.854
16388.9	0.940	0.915
22056.6	0.611	0.719
22083.9	0.653	0.746
23348.8	0.727	0.781

Табл. 3: Зміна еквівалентних ширин профілів ліній натрію від центра до краю сонячного диска

λ	$\cos \theta$				
	1.0	0.7	0.4	0.2	0.1
8648.9	2.6	2.8	2.9	2.3	2.6
8650.9	2.3	2.9	3.0	3.1	3.1
10565.9	1.8	2.2	2.3	2.6	2.8
10572.4	2.5	3.5	4.0	4.7	5.0

Табл. 4: Дані про еквівалентні рівні переходів

$i \rightarrow j$	$I \rightarrow J'$	λ (Å)	f
1-2	1/2-1/2	5895.92	0.325
	1/2-3/2	5889.95	0.655
1-5	1/2-1/2	3302.98	0.00476
	1/2-3/2	3302.17	0.0093
2-3	3/2-3/2,5/2	11403	0.162
	1/2-3/2	11381.45	0.161
2-4	3/2-3/2	8194.79	0.082
	3/2-5/2	8194.82	0.75
	1/2-3/2	8183.25	0.83
2-6	3/2-3/2, 5/2	6160.75	0.0137
	1/2-3/2	6154.22	0.0135
2-7	3/2-3/2	5688.19	0.0106
	3/2-5/2	5688.20	0.095
	1/2-3/2	5682.63	0.107

Система рівнів атома натрію і порогові значення перерізів фотоіонізації приведені в таблиці 5.

Табл. 5: Система рівнів атома натрію і перерізи фотоіонізації

рівень	g	χ (эВ)	a^0 (см ²)
1 3S	2	0	$1.61 \cdot 10^{-19}$
2 3P	6	2.103	$8.01 \cdot 10^{-18}$
3 4S	10	3.190	$8.31 \cdot 10^{-19}$
4 3D	10	3.616	$1.89 \cdot 10^{-17}$
5 4P	6	3.752	$1.85 \cdot 10^{-17}$
6 5S	10	4.115	$2.06 \cdot 10^{-17}$
7 4D	10	4.282	$3.60 \cdot 10^{-17}$

Швидкості ударних переходів між рівнями обчислювались за формулою Парка, яка дає найкращу апроксимацію для експериментальних значень [2], для еквівалентних переходів ми брали суму або середнє значення Ω_{ij}^0 залежно від того, який рівень розщеплений: верхній чи нижній. Параметри Ω_{ij}^0 (верхнє значення) і r_{ij} (нижнє значення) переходів, що нами розглядаються, представлені в таблиці 6.

Для дозволених переходів, для яких відсутні точні дані, застосувалась формула Регермортера [2].

4 Методика розрахунку профілів ліній натрію

Точний розрахунок теоретичних профілів ліній поглинання у спектрі Сонця вимагає знання різних параметрів, одні з яких належать до структури сонячної атмо-

Табл. 6: Параметри ударних переходів для Ω_{ij}^0 і r_{ij} Na I

i	j	3S	3P	4S	3D	4P	5S	4D	cont.
3S			$0.417 \cdot 10^{-6}$ 0.17			$0.330 \cdot 10^{-7}$ 0.03			$0.416 \cdot 10^{-7}$ 0.50
3P				$0.500 \cdot 10^{-6}$ 0.32	$0.180 \cdot 10^{-5}$ 0.27		$0.834 \cdot 10^{-8}$ 0.22	$0.599 \cdot 10^{-7}$ 0.15	$0.119 \cdot 10^{-6}$ 0.50
4S									$0.290 \cdot 10^{-6}$ 0.50
3D									$0.475 \cdot 10^{-6}$ 0.50
4P									$0.573 \cdot 10^{-6}$ 0.50
5S									$0.105 \cdot 10^{-5}$ 0.50
4D									$0.151 \cdot 10^{-5}$ 0.50

сфери, інші зв'язані з атомами чи іонами, що утворюють цю лінію, ще інші описують взаємодію відповідного роду частинок із полем випромінюванням та середовищем.

Розрахунки профілів і еквівалентних ширин ліній натрію проводили від центра до краю сонячного диску - в точках $\mu = \cos \theta = 1; 0.7; 0.4; 0.2; 0.1$.

Для розрахунків ми використовували модель VAL C-80 [3]. Прийнятий хімічний вміст натрію в атмосфері Сонця ґрунтується на рекомендованому в роботі [4], де зроблено аналіз багаторічних результатів з цієї проблеми. Отже, ми використовуємо $\lg N_{Na} = 6.34$ dex в шкалі, де прийнято $\lg N_{Na} = 12$ dex.

Коефіцієнт поглинання у неперервному спектрі обчислювали з врахуванням багатьох фізичних процесів, за яких поглинаючі частинки здійснюють зв'язано-вільні і вільно-вільні переходи.

Коефіцієнт поглинання в лінії описували фойгтівським профілем, який є згортокою дисперсійного й гаусового профілів.

При визначенні постійної загасання, що входить як один з параметрів у функцію Фойгта, враховували лише постійну загасання, зумовлену взаємодією з атомами водню, оскільки вона є набагато більшою порівняно з постійними загасання внаслідок випромінювання і зіткнень з електронами.

Розподіл поля мікрошвидкостей взято відповідно до моделі атмосфери. Зміну макротурбулентної швидкості з висотою брали з роботи [5]. Для ліній, що утворюються в центрі диска $V_{\text{макро}} = 1.8 - 2.0$ км/с, для краю $V_{\text{макро}}$ дещо зростає.

У даний час розрахунок профілів навіть слабких фраунгоферових ліній не проводиться в допущенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР). Дійсно, в рамках гіпотези ЛТР пояснити спостережувані профілі ліній натрію не тільки на краю, але і в центрі сонячного диску не є можливим.

У даний роботі ми звернулися до класичного трактування проблеми нерівноважного переносу випромінювання у лінії. За механізм утворення лінії прийнято комбінацію істинного поглинання, що описується функцією Планка B_λ , та когерентного і некогерентного розсіяння, що описується функцією джерела S_λ [6].

При такому комплексному підході до проблеми утворення ліній рівняння переносу випромінювання в лінії має вигляд:

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

де $S_\lambda(\tau_\lambda)$ - функція джерела в лінії, $\mu = \cos \theta$, τ_λ - повна оптична глибина (лінія плюс континуум).

Розв'язок цього рівняння переносу ми отримували після трьох-чотирьох послідовних наближень. Залежність поведінки функції джерела лінії S_λ і функції Планка B_λ в неперервному спектрі та їх відношення S_λ/B_λ від геометричної глибини зображені на рис.1.

Як видно з рисунка у глибоких шарах атмосфери характер поведінки S_λ і B_λ відображає температурний хід моделі атмосфери, а відношення S_λ/B_λ близьке до 1. На висотах, де формуються центральні частини ліній натрію (поблизу 400-700 км) відношення S_λ/B_λ стає більшим від 1. Цим самим підтверджується вплив не-ЛТР ефектів на лінії натрію.

Оцінку впливу відхилень від ЛТР на фізичні параметри ліній натрію - на інтенсивності випромінювання $I_\lambda(\mu)$, на функції джерела в лініях $S_\lambda(\mu)$, на центральні залишкові інтенсивності $r_{\lambda_0}(r)$, на профілі $R_\lambda(\mu)$ і на еквівалентні ширини $W_\lambda(\mu)$ ліній NaI ми проводили шляхом порівняння цих величин, знайдених для різних положень μ на диску Сонця, з відповідними значеннями, обчисленими в наближенні ЛТР. Відношення населеностей рівнів при відхиленні збудження атомів від рівноважного стану записують так:

$$\frac{n_l}{n_u} = \frac{b_l}{b_u} \cdot \frac{g_l}{g_u} e^{-\chi_l/kt}$$

де $b_l = n_l(\text{не-ЛТР})/n_l(\text{ЛТР})$; $b_u = n_u(\text{не-ЛТР})/n_u(\text{ЛТР})$ - коефіцієнти відхилень від рівноважного стану; g_l і g_u - статистичні ваги, відповідно, нижнього і верхнього рівнів переходу, χ_l - потенціал збудження нижнього рівня. Відомо, що функція джерела в лінії пов'язана з відношенням населеностей цього рівня переходу таким співвідношенням [7]:

$$\frac{n_l}{n_u} = \frac{g_l}{g_u} \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5} + S_\lambda(\tau_\lambda) \right) / S_\lambda(\tau_\lambda)$$

На рис.2-4 зіставлені спостережувані і теоретичні не-ЛТР профілі найбільш показових ліній натрію $\lambda\lambda 5682.6, 6160.7, 5895, 9 (D_1) \text{ \AA}$ під час переходу від центра ($\mu = 1$) до краю ($\mu = 0.1$) сонячного диску. Врахування ефектів не-ЛТР приводить до збільшення (хоча незначного) центральних залишкових інтенсивностей $\tau_{\lambda_0}(\mu)$ як в центрі, так і на краю сонячного диску. Збільшення $\tau_{\lambda_0}(\mu)$ пов'язане із зменшенням населеності основного рівня в області формування ядер ліній і, внаслідок цього, до збільшення функції джерела $S_\lambda(\tau)$.

Спостережувані профілі двох ліній $\lambda 5682.6 \text{ \AA}$ і $\lambda 6160.7 \text{ \AA}$ - асиметричні. Їх асиметрія викликана накладанням двох ліній, що виникають із спільного нижнього рівня. Тому ми розраховували і співставляли лише неблендовані крила цих ліній (рис.2-3). Так як для лінії $\lambda 5682.4 \text{ \AA}$ бленда з'являється при $\Delta\lambda_0 = -0.19 \text{ \AA}$, а для $\lambda 6160.7 \text{ \AA}$ при $\Delta\lambda_0 = 0.14 \text{ \AA}$, то асиметрія першої більш чітко виражена порівняно з другою. Для ліній $\lambda 5682.6$ і $\lambda 6170.7 \text{ \AA}$ маємо більш-менш хороше узгодження теоретичних і спостережуваних профілів в області ядра і ближніх крил, а в далеких крилах узгодження трохи гірше. У той же час спостережувані і теоретичні профілі ліній D натрію узгоджуються добре як в ядрах, так і в крилах ліній (рис.4). Це ж стосується і більшості профілів ліній натрію при переміщенні від центра до краю сонячного диска.

Аналіз отриманих результатів дає змогу провести інтерпретацію спектральних спостережень профілів ліній нейтрального натрію і діагностувати фізичний стан неоднорідної сонячної атмосфери:

1.Проведено різностороннє не - ЛТР дослідження ліній натрію, що утворюються в незбурених областях атмосфери Сонця для багаторівневого атома із одночасним врахуванням впливу нерівноважних ефектів на населеності рівнів.

2.Уточнені параметри і механізми, що впливають на процес утворення ліній нейтрального натрію.

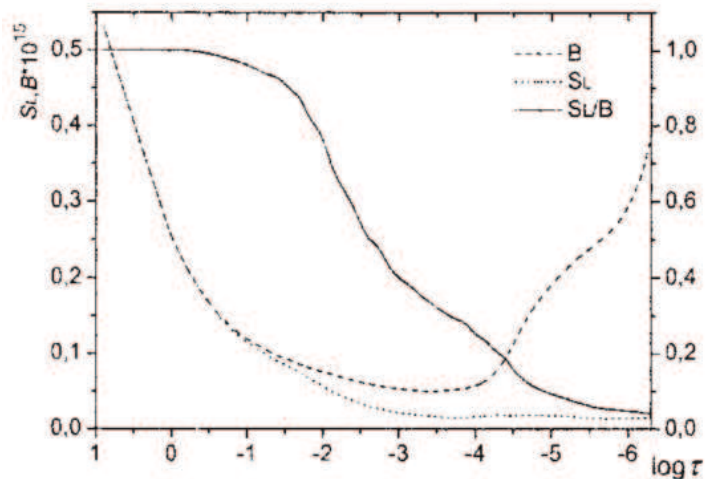


Рис. 1: Залежність S_λ , B_λ та S_λ/B_λ від оптичної глибини в сонячній атмосфері для $Na I \lambda 5682.6 \text{ \AA}$.

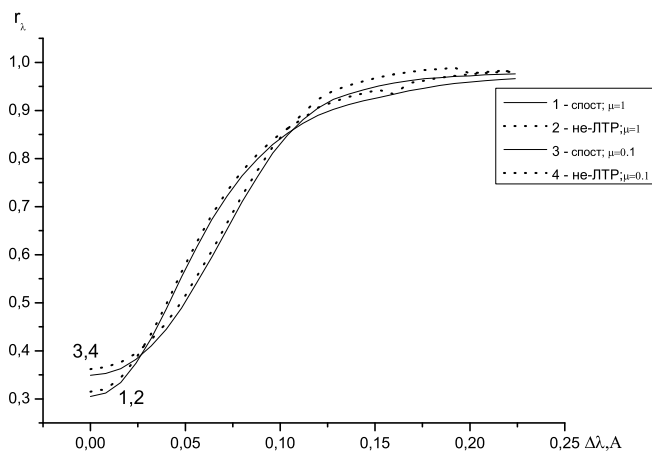


Рис. 2: Зіставлення спостережуваних і теоретичних не-ЛТР профілів в центрі (1,2) і на краю (3,4) сонячного диску для лінії $Na I \lambda 5682.6 \text{ \AA}$.

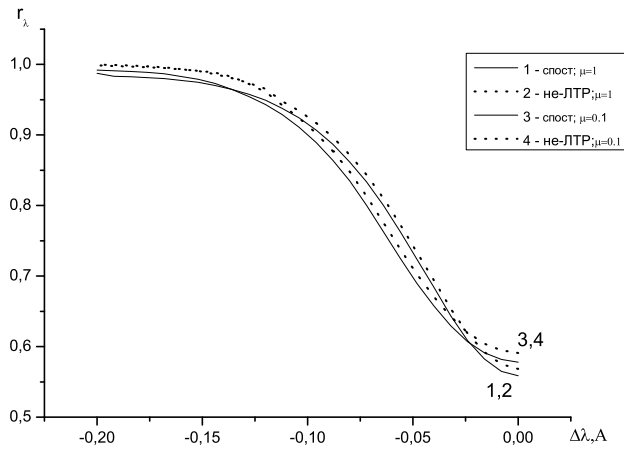


Рис. 3: Зіставлення спостережуваних і теоретичних не-ЛТР профілів в центрі (1,2) і на краю (3,4) сонячного диску для лінії $NaI_{6160.7\text{Å}}$.

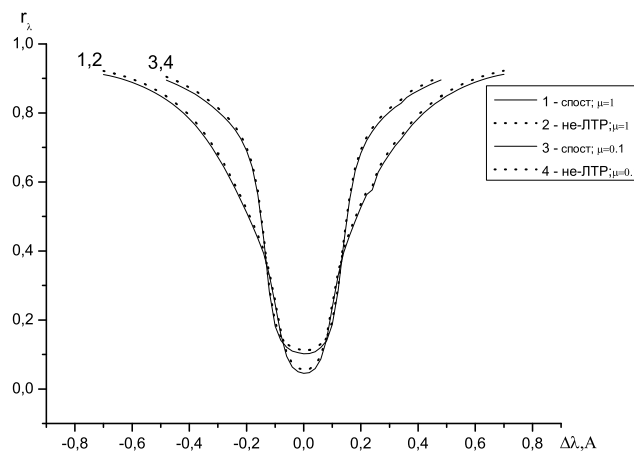


Рис. 4: Зіставлення спостережуваних і теоретичних не-ЛТР профілів в центрі (1,2) і на краю (3,4) сонячного диску для лінії $NaI_{5895.9\text{Å}}$.

3. Профілі дублетів відносно слабких ліній мають асиметричний характер: фіолетова сторона їх більш полого, ніж червона, що можна частково пояснити блендуванням ядер цих ліній більш слабкими лініями, що виникають із загального нижнього підрівня. Що стосується сильних широких ліній, таких як D_1 і D_2 NaI , то тут асиметрії безпосередньо не видно, оскільки сильні лінії взагалі менш чутливі до впливу бленд. Однак дійсна картина для спостережуваних профілів все-таки трохи видозмінена, що обумовлено втратою резонансних крил, які захоплюють і ядра ліній в центрі сонячного диску.

4. Характер зміни центральних залишкових інтенсивностей контурів слабких і сильних ліній у центрі і на краю диска Сонця відрізняється неоднаково: для більш сильних ліній ($r_{\text{край}} - r_{\text{центр}}$) має більшу величину, ніж для більш слабких.

5. У результаті врахування відхилень від ЛТР в населеностях рівнів отримано, що в хромосфері енергетичні рівні перенаселені, в області температурного мінімуму і в прилеглих областях - недонаселені.

6. Показано, що найкращого узгодження між теоретичними і спостережуваними профілями ліній натрію можна досягти при розгляді різних механізмів утворення ліній з одночасним врахуванням відхилень від ЛТР у населеностях енергетичних рівнів їх атомів.

Список використаної літератури

1. *A.K.Pierce, Ch.Slaughter*, *Astrophys. J.* **48**, 73 (1982).
2. *H.Van Regermorter*, *Astrophys. J.* **136**, 906 (1962).
3. *J.E.Vernazza, E.Avrett, R.Loesper*, *Astrophys. J., Suppl. Ser.* **45**, № 4, 635 (1981).
4. *N.E.Piskunov, F.Kupka, T.A.Ryabchikova et al.*, *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
5. *Э.А.Гуртовенко*, *Астрон. и Астрофиз.* **28**, 93 (1976).
6. *Б.Т.Бабий*, *Проблемы космической физики.* **16**, 34 (1981).
7. *Д.Михалас* *Звездные атмосферы в 2 томах* (М.: Мир, 1982).

Стаття надійшла до редакції 16.10.2014
прийнята до друку 26.11.2014

INTERPRETATION OF SPECTRAL OBSERVATIONS OF
SODIUM LINES FOR DIAGNOSTICS OF SOLAR
ATMOSPHERE

M. Kovalchuk, M. Stodilka, M. Hirnyak

*Ivan Franko National University of Lviv
Kyrylo and Mefodiy St., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Research of profiles of the sodium lines is important for determination of physical conditions in atmospheres of the Sun and stars. Interpretation of spectral observations of sodium lines in transition from a center to the limb of solar disk is carried out. Calculations are based on numerical solutions of non-equilibrium radiative transfer equation in these lines with taking into account multilevel model of sodium atom. Parameters and mechanisms that influence on the process of formation of neutral sodium are specified. We received that in chromosphere layers energy levels are overpopulated and in area of temperature minimum and in adjacent areas are depleted. It is shown that the best agreement between the theoretical and observational sodium lines can be attained at consideration of different mechanisms of formation of lines with the simultaneous taking into account of deviations from LTE in populations of energy levels of the atoms.

Key words: non-equilibrium radiative transfer equation; profiles of absorption of sodium lines; model of solar atmosphere

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЛИНИЙ НАТРИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АТМОСФЕРЫ СОЛНЦА

М. Ковальчук, М. Стодилка, М. Гирняк

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия 8, 79005 Львов, Украина
e-mail: hirnyak@astro.franko.lviv.ua*

Исследование профилей линий нейтрального натрия существенно для определения физических условий в атмосферах Солнца и звезд. Выполнена интерпретация спектральных наблюдений линий натрия при переходе от центра к краю солнечного диска. Расчеты базируются на числовом решении уравнения переноса неравновесного излучения в этих линиях с учетом многоуровневой модели атома натрия. Уточнены параметры и механизмы, влияющие на процесс образования линий. В результате учета отклонений от ЛТР в населенностях уровней установлено, что в хромосфере энергетические уровни перенаселены, в области температурного минимума и в прилегающих областях - недонаселены. Показано, что наилучшего согласования между теоретическими и наблюдаемыми профилями линий натрия можно достичь при рассмотрении различных механизмов образования линий с одновременным учетом отклонений от ЛТР в населенностях энергетических уровней атомов.

Ключевые слова: уравнение переноса неравновесного излучения; профили линий поглощения натрия; модель солнечной атмосферы