ISSN 1024-588X. Вісник Львівського університету. Серія фізична. 2021. Випуск 58. С. 39-49
Visnyk of the Lviv University. Series Physics. 2021. Issue 58. P. 39-49

УДК 523.9; 523.9-7; 523.9-47; 52-75; 52-76 https://doi.org/10.30970/vph.58.2021.39
PACS 5.30.-k, 95.30.Cq, 96.60.-j 97.10.Ex

ЕФЕКТ ДЕПРЕСІЇ У СПЕКТРАХ НЕПЕРЕРВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ І ЗІР

М. Ваврух, О. Стельмах, Д. Дзіковський

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: mvavrukh@gmail.com

Завдяки розрахункам коефіцієнта поглинання і спектральної інтенсивності неперервного випромінювання Сонця встановлено існування широкомасштабної депресії в області $\lambda\lambda$ (6500 – 8200) Å, що підтверджується спостережуваними даними [1,2]. На основі даних Одеського спектрофотометричного каталогу показано, що ефект депресії простежується у неперервному випромінюванні деяких зір спектральних класів A, F, G, які належать до головної послідовності, субгігантів та гігантів.

Key words: Сонце і зорі, неперервний спектр, коефіцієнт поглинання, спектральна інтенсивність випромінювання.

1. Вступ

Спектральні властивості коефіцієнта неперервного поглинання Сонця в основних рисах встановлені Е. Мілном у 1923 році [3] на основі аналізу спостережуваних даних. Для їхньої інтерпретації Р. Вільдт [4,5] запропонував гіпотезу про те, що головним механізмом формування коефіцієнта неперервного поглинання у зорях типу Сонця є процес фотоіонізації негативних іонів водню H^-, що мають енергію іонізації 0.0555... Рідберга (0.755... еВ) [6]. Новизна цієї ідеї зацікавила навіть фізиків-експериментаторів, які взялися за визначення спектральної залежності поперечного перерізу процесу фотоіонізації іона H^- у водні, нагрітому до температури близько $6 \cdot 10^3 K$ [7–9]. У роботі [9] з високою точністю виміряно відносний поперечний переріз цього процесу $\sigma(\lambda)/\sigma(\lambda_1)$ при $\lambda_1 = 5280$Å в області $\lambda\lambda(4 \div 12)10^3$Å. Одержані результати підтверджували гіпотезу Р. Вільдта експериментально.

Автори теоретичних робіт, виконаних згодом, зокрема [10], виявили загалом добру узгодженість своїх результатів розрахунку поперечного перерізу фотоіонізації іона H^- з результатами роботи [9], але проігнорували наявність неглибокого проміжного мінімуму в околі максимуму кривої С. Сміта і Д. Барча.

2. Ефективний поперечний переріз процесів зіткнень фотонів з мікрочастинками атмосфери Сонця

Щоб узгодити результати лабораторного експерименту з теоретичними розрахунками, ми припустили, що в роботі [9] вимірювався ефективний поперечний переріз водню, до якого дають внески три низькоенергетичні процеси: фотоіонізація іонів H^-, фотоіонізація збуджених нейтральних атомів водню і поглинання фотонів "вільними" електронами. Згідно з цією ідеєю для однорідної моделі, яка відповідає умовам експерименту С. Сміта і Д. Барча, ефективний поперечний переріз зображають у вигляді [1, 2]

$$\sigma_{eff}(\lambda) = \sigma_{H^-}(\lambda) + \left\{\frac{N_{H^-}}{V}\right\}^{-1} \left\{\sum_{n\geq 2}\sum_{l=0}^{n-1} \frac{N_H^{(n)}}{V}\sigma_{n,l}(\lambda) + \frac{N_e}{V}\sigma_{ff}(\lambda, T)\right\}, \qquad (1)$$

де $\sigma_{H^-}(\lambda)$ – поперечний переріз фотоіонізації іонів H^-, $\sigma_{n,l}(\lambda)$ – поперечний переріз фотоіонізації нейтральних атомів водню зі станів з головним квантовим числом n і орбітальним l; $\sigma_{ff}(\lambda, T)$ – поперечний переріз поглинання фотона "вільним" електроном; N_{H^-}/V – концентрація іонів H^-, $N_H^{(n)}/V$ – концентрація збуджених атомів водню, N_e/V – концентрація "вільних" електронів. Водночас $\sigma_{H^-}(\lambda)$ та $\sigma_{n,l}(\lambda)$ не залежать від температури, а $\sigma_{ff}(\lambda, T)$ є функцією температури та концентрації нейтральних атомів водню, але в області $\lambda\lambda(6000 - 12000)$Å він є малою величиною. При температурі порядку $6 \cdot 10^3 K$ концентрація високозбуджених атомів водню є малою, тому основні внески можуть давати лише атоми, збуджені на рівні з головним квантовим числом $2 \leq n \leq 4$. Поперечний переріз $\sigma_{2,l}(\lambda)$ відмінний від нуля лише в області $\lambda \leq 3645$ Å, де вимірювання не проводились. Згідно з формулою (1), в експерименті С. Сміта і Д. Барча до ефективного поперечного перерізу могли давати суттєві внески атоми водню, збуджені на рівні з квантовими числами $n = 3$, $l = 0, 1, 2$ та $n = 4$, $l = 1, 2, 3$.

Поперечний переріз фотоіонізації іона H^- розрахований у роботах [2, 10–13] різними методами, а відхилення між результатами має порядок 1%. Розрахована нами спектральна залежність відносного ефективного поперечного перерізу $\sigma_{eff}/\sigma_{eff}(\lambda_0)$ при врахуванні доданків $\sigma_{3,l}(\lambda)$ та $\sigma_{4,l}(\lambda)$ зображена на рис. 1 суцільною жирною кривою. Тонка суцільна крива зображає спектральну залежність $\sigma_{H^-}(\lambda)$ і відповідає результатам робіт [10–12]. Мітки відповідають результатам вимірювань С. Сміта і Д. Барча [9]. Потрібні для розрахунку концентрації мікрочастинок знайдено самоузгодженим способом при $T = 6000K$ і загальній безрозмірній концентрації баріонів $n_* = m_H^{-1}\rho a_0^3 = 10^{-8}$, що відповідає атмосфері Сонця (m_H – атомна одиниця маси, ρ – густина речовини, a_0 – радіус Бора). Водночас пунктирна крива побудована з використанням перерізів $\sigma_{3,l}(\lambda)$ та $\sigma_{4,l}(\lambda)$, які відповідають фотоіонізації ізольованих у вакуумі атомів, а суцільна крива – з використанням згладжених модельних перерізів, що враховують процеси рекомбінації у середовищі низькотемпературної частково іонізованої плазми, якою є атмосфера зорі. Як видно з рисунка, тільки врахування процесів іонізації нейтральних збуджених атомів дозволяє узгодити результати теоретичних розрахунків з результатами вимірювань.

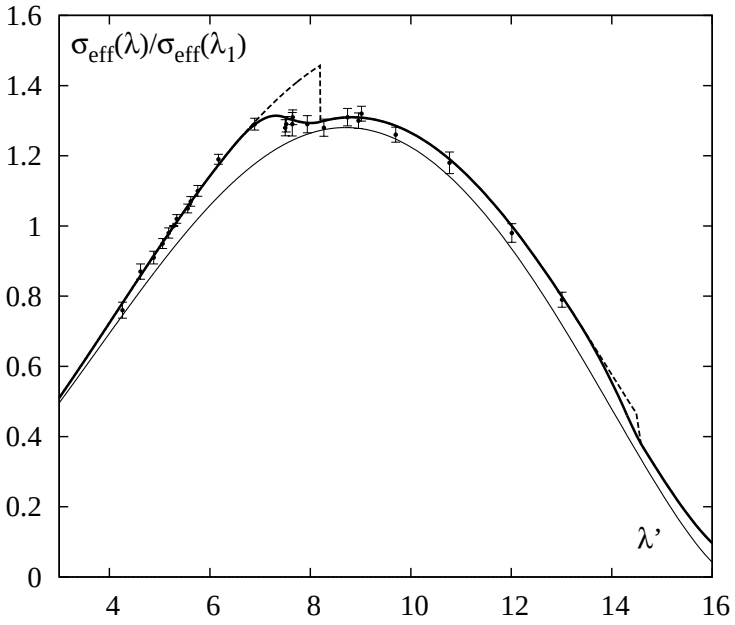

Рис. 1: Спектральна залежність відносного ефективного поперечного перерізу для однорідної моделі з термодинамічними параметрами Сонця ($T = 6000K$, $n_* = \frac{\rho}{m_H} a_0^3 = 10^{-8}$) у різних наближеннях (див. текст). Мітки – дані з роботи [9].

Співвідношенню (1) відповідає коефіцієнт неперервного поглинання в однорідній моделі

$$æ(\lambda) = \left\{1 - \exp[-(\lambda_* T_*)^{-1}]\right\} \frac{N_{H^-}}{V} \sigma_{eff}(\lambda), \tag{2}$$

де $\lambda_* = \lambda/\lambda_0$, $T_* = k_B T (e^2/2a_0)^{-1}$, $\lambda_0 = 911.27$Å.

Розрахунок спектральної інтенсивності випромінювання зорі вимагає знаходження розв'язків рівняння переносу випромінювання у рамках моделі атмосфери, яка задає координатну залежність термодинамічних параметрів атмосфери (температури і загальної густини речовини) (див. [14]), що дає змогу розрахувати координатну залежність концентрацій мікрочастинок (іонів H^-, електронів, нейтральних атомів) і коефіцієнта неперервного поглинання. Таким способом ми визначили спектральну інтенсивність випромінювання центра сонячного диску $I(\lambda)$ [2] у рамках моделі Л. Аллера [15] в області $\lambda\lambda(4000 - 12000)$Å. Результати розрахунку ілюструє рис. 2, на якому крива 1 відповідає результатам розрахунку в разі врахування $\sigma_{3,l}(\lambda)$ і $\sigma_{4,l}(\lambda)$, однак внесок $\sigma_{4,l}(\lambda)$ в області $\lambda < 8200$Å є дуже малим. Крива 2 побудована без врахування доданків $\sigma_{n,l}(\lambda)$. Пунктирна крива зображає функцію Планка за температури $T = 6160K$. Як видно з рисунка, крива 1 дуже близька до спостережуваних даних для центра сонячного диску з роботи [16]. Відхилення кривої 1 від функції Планка

$$J(\lambda, T) = \frac{4\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \{\exp[2\pi\hbar c(\lambda T k_B)^{-1}] - 1\}^{-1} \tag{3}$$

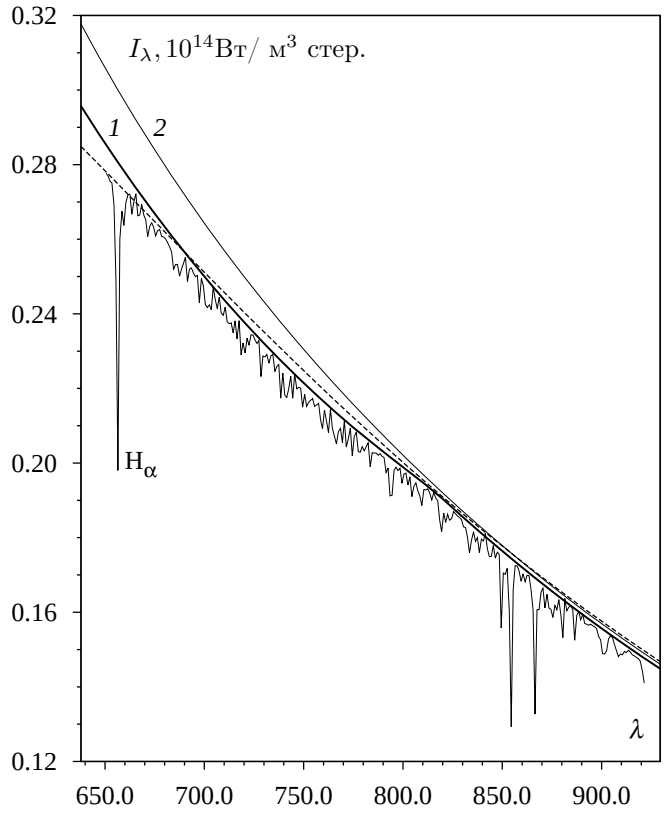

Рис. 2: Інтенсивність неперервного випромінювання центра сонячного диску. Довжина хвилі λ вимірюється в нм. Пунктирна крива відповідає інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла за температури 6160 K. Крива 2 відповідає врахуванню процесів фотоіонізації іонів водню H^-. Крива 1 враховує також фотоіонізацію нейтральних збуджених атомів водню. Спостережувані дані взято з роботи [15].

визначає величину депресії у неперервному випромінюванні Сонця в області $\lambda\lambda(6500 - 8200)$Å. Точнішу інформацію про спектральну залежність депресії дає таблиця 1, у якій подано інтенсивність випромінювання з роботи [17], розраховану нами спектральну інтенсивність випромінювання у неперервному спектрі $I(\lambda)$ та величину депресії $\delta(\lambda) \equiv J(\lambda, T) - I(\lambda)$, відносна величина якої має порядок $(2 \div 2.5)\%$.

Як видно з таблиці, розрахована нами інтенсивність випромінювання центра сонячного диску в неперервному спектрі також добре узгоджується з даними спостережень Г. Неккеля і Д. Лабса [17]. Без врахування процесу фотоіонізації нейтральних атомів водню, збуджених на рівні з головним квантовим числом $n = 3$, неможливо узгодити результати розрахунку спектральної інтенсивності Сонця зі спостережуваними даними. Нам невідомі праці інших авторів, які враховували б процес фотоіонізації нейтральних атомів водню за розрахунками коефіцієнта поглинання.

Табл. 1: Спектральна залежність інтенсивності випромінювання центра сонячного диску в одиницях 10^{14}Вт/ м^3 стер. ($I(\lambda)$ відповідає нашим розрахункам; $\delta(\lambda) \equiv J(\lambda, T) - I(\lambda)$ визначає величину депресії).

λ, нм	[17]	$I(\lambda)$	$\delta(\lambda)$	λ, нм	[17]	$I(\lambda)$	$\delta(\lambda)$
651	0.2843	0.2746	0.0015	739	0.2209	0.2237	0.0055
653	0.2821	0.2733	0.0018	741	0.2174	0.2227	0.0055
655	0.2663	0.2721	0.0019	743	0.222	0.2217	0.0055
657	0.2369	0.2708	0.0021	745	0.2206	0.2207	0.0054
659	0.2723	0.2695	0.0023	747	0.2212	0.2197	0.0054
661	0.2770	0.2683	0.0024	749	0.2188	0.2187	0.0054
663	0.2743	0.2670	0.0027	751	0.2174	0.2177	0.0054
665	0.2750	0.2658	0.0028	753	0.2166	0.2168	0.0053
667	0.2705	0.2645	0.0030	755	0.2159	0.2158	0.0053
669	0.2724	0.2633	0.0031	757	0.2145	0.2149	0.0051
671	0.2670	0.2620	0.0033	759	0.2129	0.2139	0.0051
673	0.2676	0.2608	0.0035	761	0.2122	0.213	0.0050
675	0.2654	0.2596	0.0036	763	0.2128	0.2121	0.0049
677	0.2651	0.2584	0.0037	765	0.2093	0.2111	0.0049
679	0.2633	0.2572	0.0038	767	0.2033	0.2102	0.0049
681	0.2621	0.2559	0.0040	769	0.2062	0.2093	0.0048
683	0.2597	0.2547	0.0042	771	0.2063	0.2084	0.0047
685	0.2553	0.2535	0.0043	773	0.2068	0.2075	0.0046
687	0.2574	0.2524	0.0043	775	0.2033	0.2067	0.0044
689	0.2562	0.2512	0.0044	777	0.2046	0.2058	0.0043
691	0.2538	0.2500	0.0046	779	0.203	0.2049	0.0043
693	0.2536	0.2488	0.0047	781	0.2028	0.204	0.0042
695	0.2515	0.2477	0.0047	783	0.201	0.2032	0.0040
697	0.2478	0.2465	0.0048	785	0.2016	0.2023	0.0040
699	0.2492	0.2453	0.0050	787	0.2009	0.2015	0.0038
701	0.2424	0.2442	0.0050	789	0.2003	0.2007	0.0037
703	0.2426	0.2431	0.0050	793	0.195	0.199	0.0035
705	0.2469	0.2419	0.0052	795	0.1934	0.1982	0.0033
707	0.2443	0.2408	0.0052	797	0.1963	0.1974	0.0032
709	0.2413	0.2397	0.0052	799	0.1934	0.1965	0.0031
713	0.2391	0.2375	0.0053	801	0.1945	0.1957	0.0030
715	0.2377	0.2364	0.0054	803	0.1922	0.1949	0.0029
717	0.2355	0.2353	0.0054	805	0.1899	0.1941	0.0027
719	0.2308	0.2342	0.0054	807	0.1906	0.1933	0.0026
721	0.2312	0.2331	0.0055	809	0.1863	0.1925	0.0025
723	0.2339	0.2320	0.0055	811	0.1893	0.1916	0.0025
725	0.2342	0.2309	0.0056	813	0.1895	0.1908	0.0023
727	0.2333	0.2299	0.0055	815	0.1881	0.19	0.0022
729	0.2286	0.2288	0.0056	817	0.1875	0.1891	0.0022
731	0.2296	0.2278	0.0056	819	0.1805	0.1883	0.0021
733	0.2281	0.2267	0.0056	821	0.1833	0.1874	0.0021
735	0.2265	0.2257	0.0056	823	0.1822	0.1865	0.0021
737	0.2259	0.2247	0.0055	825	0.1823	0.1856	0.0021

3. Спектральна інтенсивність і депресія у неперервному випромінюванні інших зір

Варіації хімічного вмісту зір спектральних класів $A - F - G$ є невеликі, а термодинамічні параметри їхніх атмосфер (температура і густина речовини) співмірні з параметрами атмосфери Сонця. Це дозволяє припустити, що прояви ефекту депресії слід очікувати більшою чи меншою мірою у випромінюванні зір згаданих спектральних класів головної послідовності, субгігантів та слабких гігантів. Абсолютне визначення спектральної інтенсивності у неперервному спектрі зір є складною задачею, що зумовлено високими ефективними температурами фотосфер та низькою інтенсивністю випромінювання за великих довжин хвиль. Каталоги, сформовані у минулому столітті, зазвичай, відзначаються невисокою точністю і великим кроком ($\Delta\lambda = 50$Å). У цьому сенсі дані робіт [16, 17] щодо Сонця є унікальними і щодо точності, і щодо кроку ($\Delta\lambda = 10$Å$, 20$Å).

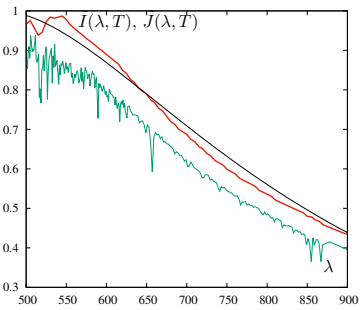

Рис. 3: Спектральна залежність нормованої інтенсивності випромінювання зорі головної послідовності класу $G0V - \lambda$ Змії за ефективної температури $T = 6300$ К (номер за катологом 5868).

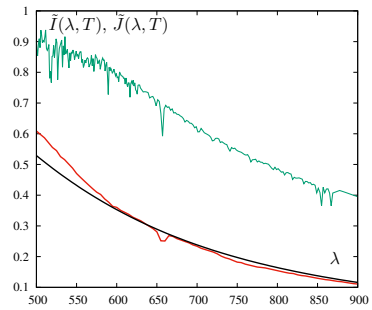

Рис. 4: Те саме, що на рис. 3, для зорі класу $A0V$ за $T = 10380$ К (номер за каталогом 613).

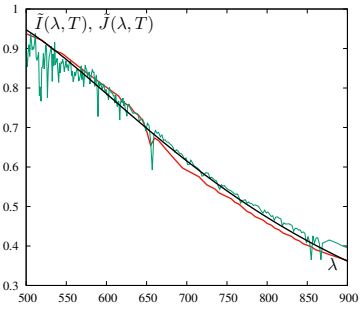

Рис. 5: Спектральна залежність нормованої інтенсивності випромінювання зорі класу $F7V$ заи $T = 6850$ К (номер за кат. 799).

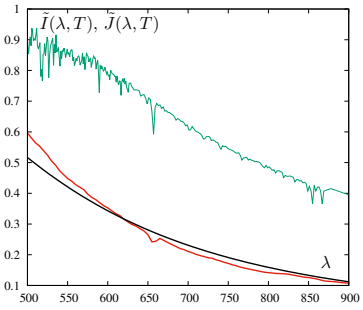

Рис. 6: Те саме, що на рис. 5, для субгіганта класу $A0IV$ за $T = 10500$ К (номер за кат. 972).

У багатьох сучасних каталогах наведено дані про світлові потоки тільки в області $\lambda < 7{\cdot}10^3$Å. Враховуючи, що величина депресії для Сонця є невеликою, нині складно встановити наявність депресії у спектрах неперервного випромінювання всіх зір, що належать до ранніх та середніх спектральних класів. Мета нашої роботи полягає в тому, щоб продемонструвати високу імовірність прояву ефекту депресії на прикладах деяких зір головної послідовності, субгігантів та гігантів.

Ми використали Одеський спектрофотометричний каталог (М. Комаров та ін.) [18], який містить дані про 555 зір різних спектральних класів і класів світності в області $\lambda\lambda(330-900)$ нм. Для зручності порівняння спектрів зір зі спектром Сонця ми використовуємо нормовану спектральну інтенсивність $\tilde{I}(\lambda) = I(\lambda)/I_{max}$, де I_{max} є максимальним значенням інтенсивності (і лежить звичайно в інтервалі $\lambda\lambda(400-500)$ нм), а також нормовану функцію Планка $\tilde{J}(\lambda,T) = J(\lambda,T)/J(\lambda_{max},T)$, де λ_{max} відповідає максимальному значенню цієї функції за заданої температури. На кожному з рисунків 3–10 наведено 3 криві: спостережувана нормована спектральна інтенсивність $\tilde{I}(\lambda)$ деякої зорі за каталогом, нормована спектральна інтенсивність для Сонця та функція $\tilde{J}(\lambda)$, що визначає спектральну інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла за заданої ефективної температури.

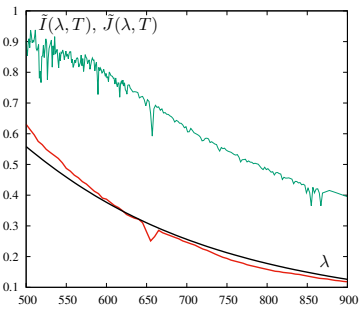

Рис. 7: Спектральна залежність нормованої інтенсивності випромінювання субгігантів класу $A2IV$ за $T = 10100$ К (номер за каталогом 7194).

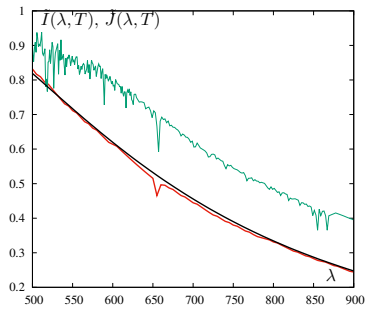

Рис. 8: Те саме, що на рис. 7 для слабкого гіганта класу $F2III$ за $T = 7960$ К (номер за каталогом 4310).

Рисунки 3–5 стосуються зір спектральних класів G0, A0, F7 головної послідовності, рис. 6–7 – субгігантів спектральних класів A0, A2, а рис. 8-9 – слабких гігантів класів G0, F2. З цих рисунків видно, що спектральна залежність інтенсивності випромінювання зір спектральних класів A-F-G дуже близька до спектральної залежності інтенсивності випромінювання Сонця. Оскільки зорі класів A, F мають вищу ефективну температуру, ніж Сонце, то у їхніх атмосферах вища відносна концентрація іонів H^- та відносна концентрація збуджених атомів водню. Як видно з рисунка 10, за зростання температури зменшується відносна концентрація нейтральних атомів водню $y_H(t)$ [19], але все одно лінії водню у фраунгоферовому спектрі зір класів A є найсильнішими.

Це дає підстави вважати, що в атмосферах цих зір переважає процес збудження нейтральних атомів водню над процесом іонізації і очікувати прояву ефекту депресії у спектрах зір класів A, F. Як відомо, у спектрах зір класів O, B лінії водню є

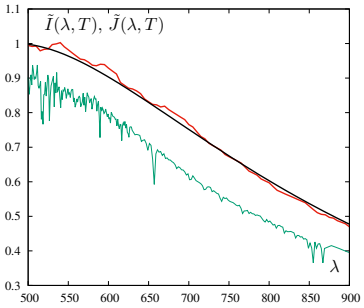

Рис. 9: Спектральна залежність нормованої інтенсивності випромінювання слабкого гіганта класу $G0III$ - 31 Волосся Вероніки за $T = 6060$ К (номер за каталогом 4883).

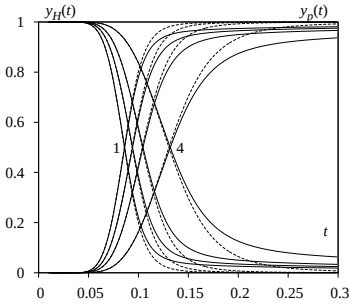

Рис. 10: Залежність відносної концентрації атомів водню y_H і протонів y_p від температури (у Рідбергах). Кривій 1 відповідає загальна концентрація баріонів $n^* = 10^{-8}$, кривій 2 – $n^* = 10^{-7}$, кривій 3 – $n^* = 10^{-6}$, 4 – $n^* = 5 \cdot 10^{-6}$.

слабкими, що свідчить про високий рівень іонізації атомів водню і зменшення їхньої абсолютної концентрації. Через це внесок процесу іонізації збуджених нейтральних атомів водню повинен бути малим, у зв'язку з чим прояв ефекту депресії є малоймовірним. У спектрах зір пізніх спектральних класів прояв депресії теж малоймовірний через малу концентрацію збуджених атомів водню, що зумовлено низькою ефективною температурою атмосфер.

Ці міркування підтверджено на рисунках 3–8. Максимальна величина депресії деяких зір головної послідовності перевищує величину депресії для Сонця: для зорі G0V (5868) вона дорівнює приблизно 5%, для зорі F7V (799) – приблизно 2.6% і (5÷6)% для зорі A0V (613). Депресія є найбільшою для субгігантів спектрального класу A – близько 12% для A0IV (792) і близько 14% для A2IV (7194). У субгіганта F2III величина депресії сягає близько 3%. З рис. 9 складно визначити величину депресії для гіганта G0III (4883), хоча спектральна поведінка інтенсивності випромінювання цієї зорі близька до інтенсивності випромінювання Сонця.

4. Висновки

Нами встановлено, що для коректного опису спектральної інтенсивності випромінювання Сонця у неперервному спектрі недостатньо враховувати процес фотоіонізації негативних іонів водню H^- , як того вимагає гіпотеза Р. Вільдта [4,5]. Лише врахування процесу фотоіонізації нейтральних збуджених атомів водню дозволяє узгодити результати квантовомеханічних розрахунків зі спостережуваними даними. Ефект депресії у неперервному випромінюванні Сонця в області $\lambda\lambda$ (650–820) нм, виявлений за допомогою розрахунків, підтверджується високоточними вимірюваннями спектру Сонця [16,17], а його відносна величина має порядок 2%.

Невеликі варіації фраунгоферового спектру зір середніх спектральних класів свідчать про незначні зміни у хімічному вмісті і співмірні ефективні температури їхніх атмосфер. Звідси випливає припущення, що і їхнє випромінювання у неперерв-

ному спектрі має мати подібну спектральну залежність, а ефект депресії повинен бути універсальним явищем, притаманним багатьом зорям. Аналіз спектральної інтенсивності деяких зір, виконаний на основі Одеського спектрофотометричного каталогу [18], підтверджує існування ефекту депресії у спектрах зір класів A, F, G головної послідовності, субгігантів та гігантів. Як свідчить наш аналіз, максимальна величина депресії простежується у випромінюванні субгігантів спектрального класу A, сягаючи значень (12÷14)%. Ефект депресії як прояв квантових властивостей атомів повинен бути універсальним явищем прнаймні для зір типу Сонця, а подальше його дослідження є актуальною задачею і для спостерігачів, і для теоретиків.

1. Stelmakh O.M. Depression in the Continuous Spectrum of Solar Radiation in the Region (6500 — 8200) A Stelmakh O.M., Tyshko N.L. Odessa Astronomical Publication. – 2015.– Vol. 28. issue 1.– P.5.
2. Vavrukh M.V., Vasil'eva I.E., Stelmakh O.M., Tyshko N.L. Continuous Absorption and Depression in the Solar Spectrum at Wavelengths from 650 to 820 nm. Kinematics and Physics of Celestial Bodies.– 2016.– Vol. 32, № 3.– P. 129.
3. Milne E. Radiative Equilibrium: The Relation between the Spectral Energy Curve of a Star and the Law of Darkening of the Disc towards the Limb, with Special Reference to the Effects of Scattering and the Solar Spectrum / E. Milne // Philos. Trans. Roy. Soc. London.– 1923.– Vol. 223.– P. 01.
4. Wildt R. Negative ions of hydrogen and the opacity of stellar atmospheres / R. Wildt // Astrophys. J.– 1939.– Vol. 89 – P. 295 and Vol. 90.– P. 611.
5. Wildt R. The continuous spectrum of Stellar atmoospheres consisting only of atoms and negative ions of hydrogen / R. Wildt // Astrophys. J.– 1941.– Vol. 93.– P. 47.
6. Massey H. Negative ions / H. Massey // – Cambridge, London, 1976.– C. 754.
7. Branscomb L.M. Atomic Negative-Ion-Photodetachment Cross-Section and Affinity Measurements / L.M. Branscomb, S.J. Smith // J. Research Natl. Bur. Standards.– 1955.– Vol. 55, № 3.– P. 165.
8. Weber O. Erzeugung und Nachweis des H^- - Kontinuums im Stowellenrohr. / O. Weber // Z. Phys.– 1958.– Vol. 152.– P. 281.
9. Smith S.J. Relative Measurement of the Photodetachment Cross Section for H^- / S.J. Smith, D.S. Burch // Phys. Rev.– 1959.– Vol. 116.– P. 5.
10. Geltman S. The bound-free absorption coefficient of the hydrogen negative ion / S. Geltman // Phys. Rev.– 1962.– Vol. 136.– P. 935.
11. Wishart A.W. The bound-free photodetachment cross section of H^- / A.W. Wishart // J.Phys. B: Atom. Molec. Phys.– 1979.– Vol. 12, № 21.– P. 3511.
12. Stewart A.L. A perturbation-variation study of photodetachment from H^- / A.L. Stewart // J.Phys. B: Atom. Molec. Phys.– 1978.– Vol. 11.– P. 3851.
13. Vavrukh M.V. The calculation of photoionization cross-section of negative hydrogen ions in the Born approximation / M.V. Vavrukh, D.V. Dzikovskyi, O.M. Stelmakh, V.B. Solovyan // Mathem. Model. and Computing – 2020.– Vol. 7, № 1.– P. 125.
14. Вакарчук І.О. Теорія зоряних спектрів / І.О. Вакарчук – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2002.– 356 с.

15. Аллер Л. Атомы, звезды и туманности / Л. Аллер – Москва: Мир, 1976.– 352 с.
16. Burlov-Vasiljev K. A. New Measurements of the Solar Disk-center Spectral Intensity in the Near IR Range 645-1070 nm / K.A. Burlov-Vasiljev, I.E. Vasiljeva, Yu.B. Matvejev // Solar Phys.– 1998.– Vol. 177.– P. 25.
17. Labs D. The Radiation of the Solar Photosphere from 2000 A to 100 nm. / D. Labs, H. Neckel // Zeitschrift fur Astrophysik.– 1968.– Vol. 69.– P. 1.
18. Komarov N.S. The Spectrophotometric Star Katalogue / N.,S. Komarov, A.V. Dragunova et al. // Odessa Astronomical Publication.– 1995.– Vol. 8 – P. 3.
19. Vavrukh M.V. The screening of interaction and the ionization equilibrium in the photospheres of stars / Vavrukh M.V., Stelmalh O.M., Smerechynskyi S.V. // Journal of physical studies.– 2009.– Vol. 13, № 3.– С. 3902-14.

References

1. O. M. Stelmakh, N. L. Tyshko, Odessa Astronomical Publication. **28**, 5 (2015).
2. M. V. Vavrukh, I. E. Vasil'eva, O. M. Stelmakh, N. L. Tyshko, Kinematics and Physics of Celestial Bodies. **32**, 129 (2016). Doi: 10.3103/S0884591316030053.
3. E. Milne, Philos. Trans. Roy. Soc. London. **223**, 1 (1923).
4. R. Wildt, Astrophys. J. **89**, 295 and **90**, 611 (1939). Doi:10.1086/144125
5. R. Wildt, Astrophys. J. **93**, 47 (1941). Doi:10.1086/144242
6. H. Massey, Negative ions. Cambridge, London, 1976. – 754 c.
7. L. M. Branscomb, S. J. Smith, J. Research Natl. Bur. Standards. **1955**, 165 (1955).
8. O. Weber, Z. Phys. **152**, 281 (1958).
9. S. J. Smith, D. S. Burch, Phys. Rev. **116**, 5 (1959). Doi:https://Doi.org/10.1103/PhysRev.116.1125
10. S. Geltman, Phys. Rev. **136**, 935 (1962). Doi:10.1086/147447
11. A. W. Wishart, J.Phys. B: Atom. Molec. Phys. **12**, 3511 (1979).
12. A. L. Stewart, J.Phys. B: Atom. Molec. Phys. **11**, 3851 (1978).
13. M. V. Vavrukh, D. V.Dzikovskyi, O. M. Stelmakh, V. B. Solovyan, Mathem. Model. and Computing. **7**, 125 (2020). Doi:10.23939/mmc2020.01.125
14. I. O. Vakarchuk, Theory of star spectra. Lviv: LNU, 2002. – 356p.
15. L. Aller, Atoms, stars and nebulae. Moscow: Mir, 1976. – 352 p.
16. K. A. Burlov-Vasiljev, I. E. Vasiljeva, Yu. B. Matvejev, Solar Phys. **177**, 25 (1998). Doi:10.1023/a:1004953725155
17. D. Labs, H. Neckel, Zeitschrift fur Astrophysik. **69**, 1 (1968).
18. N. S. Komarov, A. V. Dragunova et al., Odessa Astronomical Publication **8**, 3 (1995).
19. M. V. Vavrukh, O. M. Stelmalh, S. V. Smerechynskyi // Journal of physical studies **13**, 3902-14 (2009).

Статтю отримано: 15.10.2021
Прийнято до друку: 11.11.2021

THE DEPRESSION EFFECT IN SOLAR AND STELLAR CONTINUOUS SPECTRA

M. Vavrukh, O. Stelmakh, D. Dzikovskyi

Ivan Franko National University of Lviv,
astrophysics department,
Kyrylo and Methodiy Str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: mvavrukh@gmail.com

In this paper we outline the main relations of quantum mechanical approach to description of collision processes of photons with microparticles of solar-type stellar atmospheres. Here, the main process of continuous absorption coefficient formation is the process of photoionization of negative hydrogen ions H^-. We have proposed hypothesis, which generalize Wildt's hypothesis [4,5], in order to obtain the agreement of the results of a laboratory experiment with theoretical calculation. We assumed that authors of work [9] measured not the partial cross section of ion H^- photoionization, but some effective cross section $\sigma_{eff}(\lambda)$, formed by three low-energy processes: photoionization of ion H^-, photoionization of neutral hydrogen atoms excited to the level with the main quantum number $n \geq 3$, and photon absorption by "free" electrons. In the region $\lambda\lambda$ (6500 – 8200) Å the effect of photon absorption by "free" electrons is negligible. The effective cross section $\sigma_{eff}(\lambda)$ calculated for the model, which takes into account the photoionization of ions H^- and hydrogen atoms from states $n = 3$ and 4, agree with the results of the work of Smith and Burch. In the model of the one-dimensional Aller atmosphere it was investigated spectral properties of absorption continuous coefficient and radiation intensity of the center of solar disk. The calculation results with high accuracy coincide with the observation results from works [16, 17]. Large-scale depression of intensity was revealed in the region $\lambda\lambda$ (6500 – 8200) Å which is determined by the difference between the radiation intensity for a completely black body and the calculated / measured intensity of the center of the solar disk. The relative value of depression has order $2 \div 2.5\%$ in the middle of the specified wavelength interval. It was substantiated the possibility of manifestation of depression effect in radiation of other stars, in particular those belonging to the spectral classes A-G. Based on data on the spectral intensity of stars from the catalog [18] the effect of depression was revealed in some stars of classes A, F, G, belonging to the main sequence, sub-giants and giants. The perspective of expanding the search for the effect of depression in the spectra of stars seems to be an urgent task for observers and theorists.

Ключові слова: Sun and stars, continuous spectrum, absorption coefficient, spectral radiation intensity.