

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.03.065>

УДК 524.316.7-36

**Ю. П. Любчик<sup>1</sup>, Я. В. Павленко<sup>1</sup>,  
О. К. Любчик<sup>2,1</sup>, Х. Р. А. Джонс<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
вул. Академіка Зabolотного 27, Київ, 03143, Україна

<sup>2</sup>Національний медичний університет ім. О. О. Богомольця,  
пр. Перемоги 34, Київ, Україна

<sup>3</sup>Центр астрофізичних досліджень, Університет Гертфордшира,  
Гатфільд, AL10 9AB, Велика Британія

E-mail: lyu@mao.kiev.ua

## **Системи смуг молекули NaN у спектрах зір пізніх спектральних класів**

*В роботі моделюється поглинання випромінення системами смуг молекули NaN в атмосферах зір пізніх спектральних класів. Розрахунки синтетичних спектрів з параметрами моделей атмосфер, які описують M-зорі, демонструють, що смуги ліній цієї молекули утворюють помітні спектральні деталі приблизно однакової інтенсивності на довжинах хвиль від 380 нм до майже 1100 нм. В розрахунках використовувались нещодавно розраховані параметри молекули NaN з бази даних Exotol, а також нове значення потенціалу дисоціації цієї молекули  $D_0 = 1.975$ . Були розглянуті залежності розрахованих розподілів енергії від потенціалу дисоціації молекули NaN та від параметрів зоряної атмосфери ( $T_{\text{eff}}$ ,  $lg g$ ,  $[Fe/H]$ ). Аналіз синтетичних спектрів показує, що лінії молекули NaN слабшають зі зростанням температури та зменшенням сили тяжіння в атмосфері зорі. Тобто, ліній гідриду натрію неможливо спостерігати ні в зорях з ефективними температурами, що відповідають раннім M-зорям, ні у M-гігантах. Лінії молекули NaN мають проявлятися лише у спектрах холодних карликів, хоча сильне поглинання іншими молекулами (TiO, CrH, FeH) у видимій та близькій інфрачервоній області спектру та поглинання атомами в синій ділянці ускладнюють детектування ліній NaN. Відтворено розподіл енергії у спектрі червоного карлика VB 10 (M8V) в синій області спектру. Показано, що при нормальних умовах та*

близькому до сонячного хімічному складі молекули  $\text{NaH}$  лише вносять додаткову складову в непрозорість атмосфер холодних зір карликів та субзоряніх об'єктів.

**Ключові слова:** синтетичні спектри, спектри холодних зір, атомне та молекулярне поглинання.

## ВСТУП

Загальний вигляд спектрів зір та субзоряніх об'єктів пізніх спектральних класів формується завдяки молекулярному поглинанню різних хімічних сполук. Основними молекулами, відповідальними за непрозорість в атмосферах цих зір, є:  $\text{AlH}$ ,  $\text{SiH}$  — в синій області спектру,  $\text{TiO}$ ,  $\text{VO}$  у видимій частині спектру,  $\text{CaH}$ ,  $\text{FeH}$ ,  $\text{CrH}$ ,  $\text{MgH}$  в червоній та  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$  у близькій інфрачервоній області спектру [3, 7, 13, 16, 22, 25].

Відсутність або нестача точних та якомога повніших списків ліній молекул при дослідженні холодних карликів можуть негативно впливати на відтворення розподілу енергії у спектрах цих об'єктів і, таким чином, на коректність визначення основних параметрів зоряних атмосфер: ефективної температури, прискорення вільного падіння, металічності тощо.

Нещодавні дослідження моделей атмосфер М-карликів [22] показали, що  $\text{NaN}$  є однією з трьох молекул, поряд з  $\text{CaOH}$  і  $\text{AlH}$ , неврахування яких призводить до некоректного відтворення спостережних спектрів ( $\text{CaOH}$  в районі  $\lambda = 557$  нм,  $\text{AlH}$  та  $\text{NaN}$  між 380 та 460 нм). Хоча варто зазначити, що спостереження, які проводилися раніше, не підтверджували наявності  $\text{NaN}$  у будь-яких спостережних об'єктах (зорях або планетах [26]). При цьому деякі молекули, зокрема гітриди металів, спостерігаються у міжзоряному просторі. Але для молекули  $\text{NaN}$  були отримані лише верхні межі вмісту, як у щільних, так і в дифузних хмарах [9, 20, 24].

У цій роботі ми зробили спробу відтворити короткохвильову (синю) частину спостережних спектрів М-карликів з врахуванням непрозорості, зумовленої молекулою  $\text{NaN}$  та визначити найімовірніші інтервали довжин хвиль, в яких можна спостерігати лінії цієї молекули. У ролі спостережуваного спектру використовувався спектр добре вивченого червоного М-карлика VB10 (M8V).

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ

**Синтетичні спектри.** Синтетичні спектри розраховувалися з використанням програми WITA6 [17] у класичних наближеннях (плоско-паралельна модель атмосфери, відсутність джерел та стоків енергії). Для розрахунків синтетичних спектрів (точніше — розподілів енергії у спектрах) використовувались моделі атмосфер BT-Settl [5] з сітки PHOENIX [2].

Для врахування інструментального профілю розраховані синтетичні спектри згорталися з гауссіаною  $FWHM = 0.1$  нм, що відповідає спектрам середньої роздільноті  $R = 6500$ .

**Джерела непрозорості.** Для порівняння відносного вкладу в непрозорість враховувалось поглинання атомними та молекулярними лініями різних хімічних елементів в наближенні «лінія за лінією». Системи смуг молекули NaH у спектрах зір формуються у спектральних областях, де внесок в непрозорість зумовлений рядом молекул, зокрема TiO, FeH, CrH, MgH, SiH та ін. Для цього в розрахунках синтетичних спектрів, крім списків ліній NaH, ми використовували: список атомних ліній з бази даних VALD3 [11], списки AlH [28], SiH [27], MgH (CD 18 Куруца) [12], TiO [21], H<sub>2</sub>O [6], FeH [10] та CrH [8].

**Список ліній NaH.** Дані для розрахунків списку молекули NaH були взяті з бази EXOMOL (сайт [www.exomol.com](http://www.exomol.com)). У роботі [23] наведено функції стану, параметри рівнів енергії та переходів для гідриду натрію, як для <sup>23</sup>NaH, так і для <sup>23</sup>NaD. Цей список ліній включає всі обертально-коливальні стани основного (<sup>1</sup>) та першого збуджено-го (<sup>1</sup>) електронних рівнів. Список ліній підходить для температур до 7000 К та може використовуватися для розрахунків непрозорості в атмосферах екзопланет, коричневих карликів та холодних зір.

Список ліній NaH був приведений до формату, що використовується у програмі WITA618 [17]: довжина хвилі в ангстремах, сила осцилятора  $gf$ , потенціал збудження — в електронвольтах.

Довжина хвилі розраховувалась як величина обернено пропорційна різниці енергій рівнів переходу та переводилась в ангстреми. Величина  $gf$  обчислювалась згідно з формулою  $gf = 1.499 \cdot 10^{-8} gA^{-2}$ , де  $g$  — статистична вага рівня,  $A$  — ймовірність спонтанного переходу, — довжина хвилі, виражена у мікрометрах [1].

Павленко та ін. в роботі [19] вказали на важливу відмінність у визначенні функцій стану  $Q$  та, відповідно, сил осциляторів ліній, які використовуються у фізичних та астрономічних розрахунках. Чисельно відмінність виражається формулою  $Q^{(\text{phys})}/Q^{(\text{astro})} = g$ . У випадку молекули NaH  $g = (2I(\text{Na}) + 1)(2I(\text{H}) + 1)$ , де  $I(\text{Na}) = +3/2$  — спін ядра ізотопу <sup>23</sup>Na, а  $I(\text{H}) = +1/2$  — спін ядра <sup>1</sup>H [4]. Тому значення  $gf$  ліній NaH, що були обчислені за фізичними параметрами з бази даних EXOMOL [23], в нашій роботі були зменшені у  $g = 8$  разів.

**Іонізаційно-дисоціативна рівновага.** При розрахунках синтетичних спектрів система рівнянь іонізаційно-дисоціативної рівноваги розв'язувалась для середовища, що складається з атомів, іонів та молекул, при цьому враховувався вплив приблизно 100 компонентів [17].

Для молекули NaH було взято нове значення енергії дисоціації  $D_0 = 1.975$  [14] та розраховано нові рівноважні константи дисоціації (dissociation equilibrium constants) для сум по станах з EXOMOL [23].

В ході роботи були також проаналізовані залежності молекулярних щільностей речовин, що містять Na, від температури та тиску у

фотосфері. Аналіз продемонстрував, що з п'яти найбільш поширеніх молекул ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{NaN}$ ,  $\text{Na}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ) молекула  $\text{NaN}$  має найбільшу молекулярну щільність при різних значеннях параметрів атмосфери.

## РЕЗУЛЬТАТИ

**Синтетичні спектри, що враховують молекулу  $\text{NaN}$ .** Для різних значень ефективних температур ( $T_{\text{еф}} = 2000 \dots 4000 \text{ К}$ ), прискорень вільного падіння ( $\lg g = 0.0 \dots 5.0$ ) та металічностей ( $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.0 \dots 0.0$ ) були обчислені розподіли енергії у спектрах, які показують, як змінюється інтенсивність ліній  $\text{NaN}$  в залежності від цих параметрів для різних довжин хвиль. На рис. 1 наведено спектри для  $T_{\text{еф}} = 2600$  та  $3400 \text{ К}$ ,  $\lg g = 0.0$  та  $5.0$  та сонячної металічності ( $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$ ). З аналізу синтетичних спектрів видно, що інтенсивність молекулярних ліній  $\text{NaN}$  при зменшенні прискорення вільного падіння зменшується, і у спектрах зір-гігантів лінії цієї молекули не будуть виявлятися взагалі. Також зменшується інтенсивність ліній  $\text{NaN}$  зі збільшенням ефективної температури. При зміні параметра металічності інтенсивність ліній  $\text{NaN}$  практично не змінюється відносно інших молекул, що формують вид спектрів холодних зір. Рис. 1 демонструє, що у спектрах холодних карликів лінії  $\text{NaN}$  з'являються в районі довжин хвиль  $\lambda = 350 \text{ нм}$  та

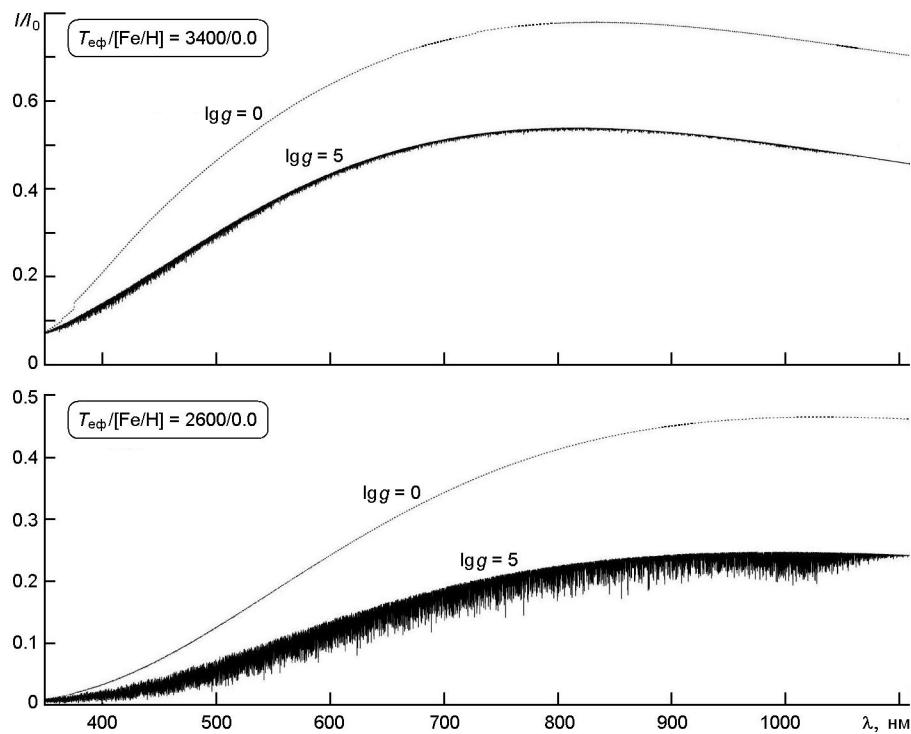


Рис. 1. Залежність інтенсивностей молекулярних смуг  $\text{NaN}$  від ефективної температури та  $\lg g$  при сонячній металічності  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$

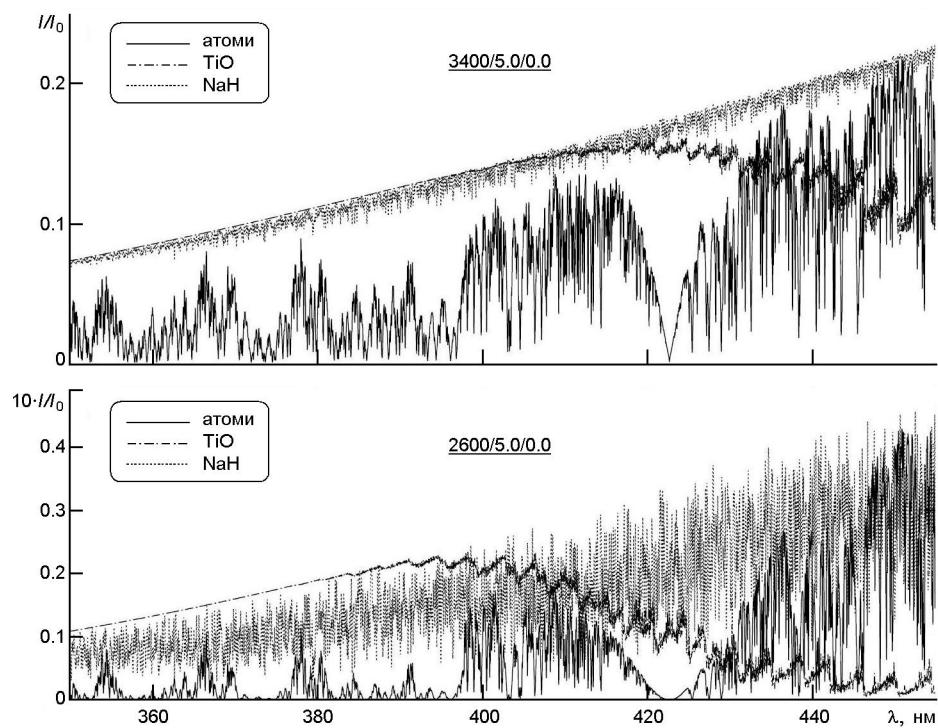


Рис. 2. Синтетичні спектри, розраховані для основних джерел непрозорості в синій області, де наявні лінії молекули NaN. Моделі атмосфери  $T_{\text{eff}} = 2600, 3400$  К,  $\lg g = 5.0$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0$

спостерігаються до 1050 нм, зберігаючи приблизно однакову інтенсивність на всій цій ділянці спектру.

Відомо, що вигляд спектрів зір та субзоряних об'єктів пізніх спектральних класів у видимій та близькій інфрачервоній областях спектру формується внаслідок поглинання молекулами TiO, VO, H<sub>2</sub>O, FeH, CrH, на фоні яких інші молекулярні лінії не виявляються. Поглинання молекулою TiO стає помітним вже на довжинах хвиль

450 нм, а інші перераховані молекули починають відігравати роль у більш довгохвильовій частині спектру.

Ми проаналізували область довжин хвиль до  $= 500$  нм, щоб визначити, поглинання яких молекул суттєве в цьому спектральному діапазоні. На рис. 2 наведено синтетичні спектри, що розраховані для окремих атомів та молекул, які дають найбільший внесок у непрозорість у спектрах холодних карликів в синій області для різних параметрів  $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$  та сонячної металічності. На рис. 2, крім NaN, зображені лінії найсильнішої в цій ділянці спектру молекули TiO та атомні лінії. У випадку низьких температур лінії NaN є найбільш інтенсивними молекулярними лініями на довжинах хвиль 420 нм, з'являючись в синьому крилі резонансної лінії Ca I 422.6 нм. Але за інтенсивністю все одно вони виявляються слабшими, ніж поглинання

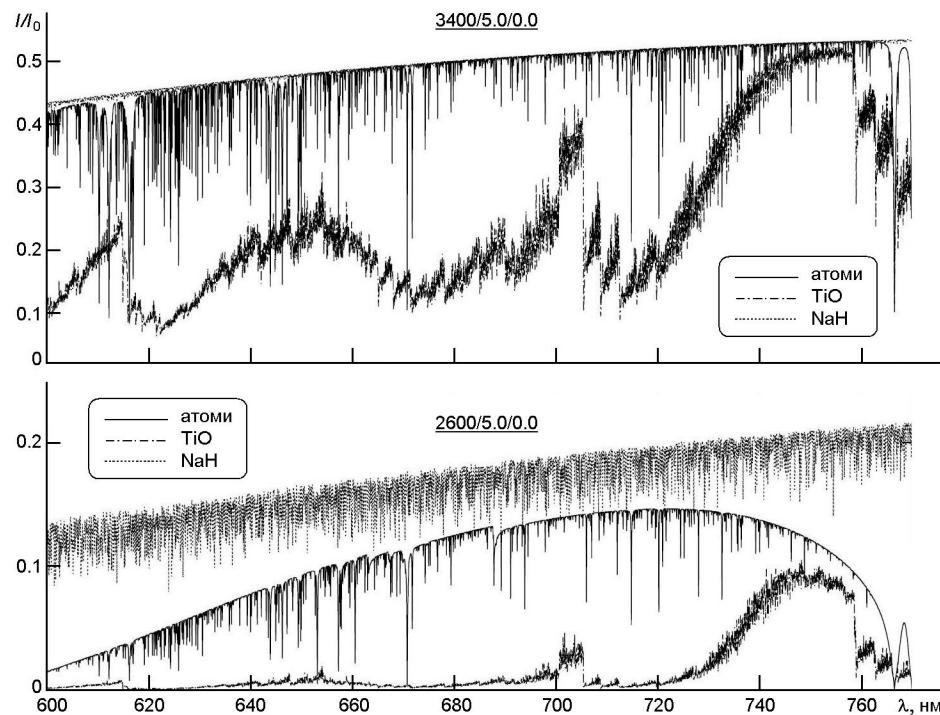


Рис. 3. Те ж, що і на рис. 2, в області лінії K

атомами, яке формує вид спектру на цих довжинах хвиль. Починаючи з правого крила лінії Ca I 422.6 нм збільшується інтенсивність ліній молекули TiO, які в основному і формують вид спектрів холодних зір у видимій області спектру.

На рис. 3 та 4 видно, що лінії NaN в ультрахолодних карликах ( $lgg = 5.0$ ) створюють додаткову непрозорість, але не виділяються на фоні поглинання молекулою TiO в області резонансної лінії K I 769.9 нм та CrH і FeH в області довжин хвиль 850 нм, які і формують основний вид спектру в цих ділянках. Для холодних гігантів ( $lgg = 0.0$ ) лінії молекули NaN дуже слабкі і не дають помітного внеску в розрахований спектр.

**Порівняння зі спостереженнями.** Для порівняння зі спостережуваним спектром холодного карлика VB10 (M8V) ми розрахували синтетичні спектри з урахуванням поглинання молекулами TiO, MgH, SiH, AlH, NaN в області  $\lambda = 350\ldots 500$  нм. Параметри атмосфери  $T_{\text{eff}}/lgg/[Fe/H] = 2800/5.0/0.0$  та  $v \sin i = 10$  км/с були взяті з роботи Любчика та ін. [15]. Як відмічалося в роботі [18], атомні лінії поглинання в синій області спектру в теоретичних розрахунках виявляються значно сильнішими, ніж у спостережених спектрах. Для кращого відтворення спостережного спектру VB10 в синій області при розрахунках синтетичних спектрів ми використовували методику, запропо-

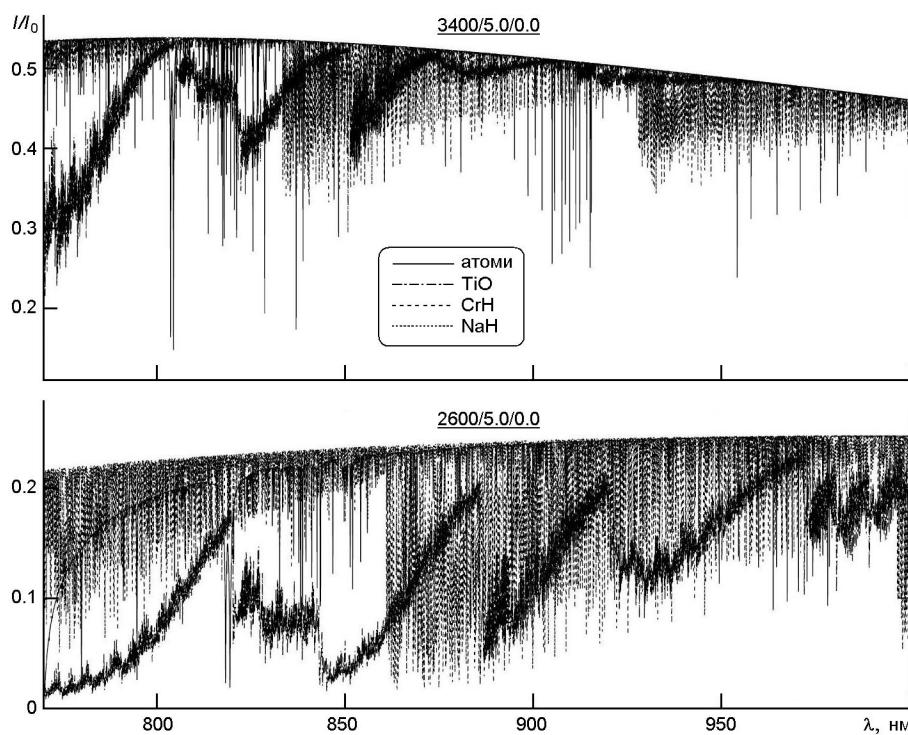


Рис. 4. Те ж, що і на рис. 2, в області ліній Na

новану в роботі [18], яка дозволяє зменшити сили атомних ліній за рахунок врахування додаткового поглинання в континуумі. Додаткове поглинання в континуумі враховувалось домноженням значень непрозорості на коефіцієнт  $k = 100$ . На рис. 5 представлено порівняння спостережного спектру з теоретичними з врахуванням та без врахування поглинання молекулою NaN в окремих ділянках спектру. Ці ділянки довжин хвиль поблизу  $\lambda = 354, 357.5, 377.5, 399$  і  $409$  нм були відібрані таким чином, щоб поглинання атомами поблизу цих довжин хвиль було мінімальним (див. рис. 2). Відсутність гідриду натрію в розрахунках призводить до недостатнього поглинання та, відповідно, до менш коректного опису спостережень.

**Обговорення результатів.** Проведені нами розрахунки та аналіз внеску ліній молекули NaN у формування спектрів холодних зір демонструють, що лінії цієї молекули майже не дають внеску в непрозорість у спектрах зір-гіантів. Дослідження також показують, що інтенсивність ліній NaN зменшується з підвищенням ефективної температури. Лінії NaN приблизно однакової інтенсивності спостерігаються в синтетичному спектрі на довжинах хвиль від  $\lambda = 350$  нм до  $\lambda = 1050$  нм для зір з  $T_{\text{еф}} = 2600$  К та  $\lg g = 5.0$ , хоча вони і не стають сильнішими від основних джерел непрозорості на цих довжинах хвиль.

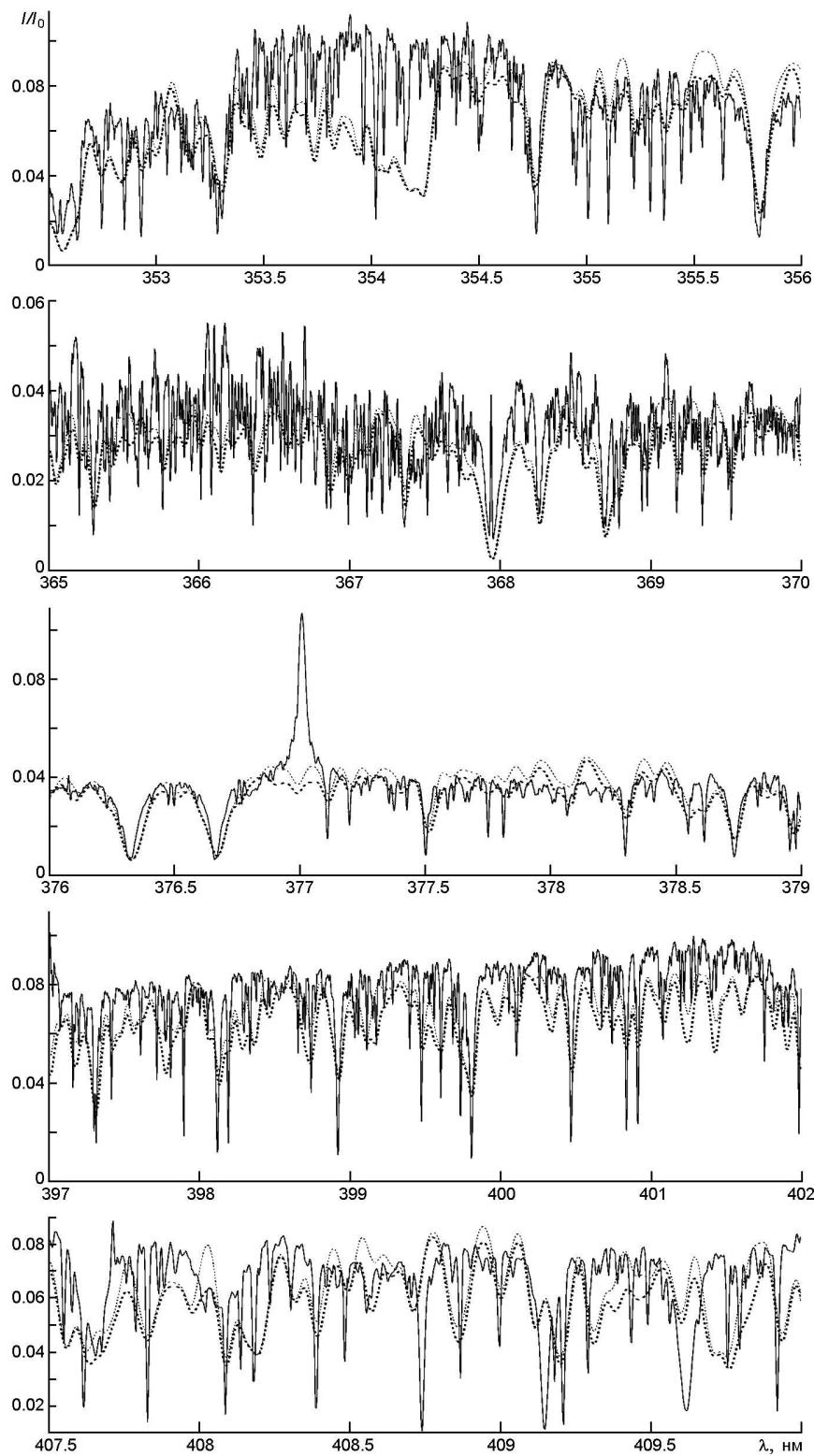


Рис. 5. Порівняння спостережного спектру VB10 (M8V) (суцільна лінія) та синтетичних спектрів, розрахованих з врахуванням молекул TiO, MgH, SiH, AlH, NaN та атомних ліній в окремих ділянках спектру (штриховані лінії — з включенням молекули NaN, пунктирні — без молекули NaN). Модель атмосфери  $T_{\text{eff}}/\lg g/[\text{Fe}/\text{H}]$ : 2800/5.0/0.0,  $v \sin i = 10 \text{ км/с}$

Таким чином, врахування поглинання лініями молекули NaH вносить додаткову непрозорість в загальний вид спектрів холодних карликів і стає суттєвим при моделюванні спектрів високої роздільноті та великих значень співвідношення сигнал/шум.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках бюджетного фінансування науково-дослідницької теми (реєстраційний N 14006632), що фінансується Відділенням фізики і астрономії Національної академії наук України. В цьому дослідженні використовувались дані з бази даних SIMBAD ([simbad.u-strasbg.fr/simbad/](http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/)), що працює в CDS (Страсбург, Франція), база даних VALD3 ([vald.astro.uu.se](http://vald.astro.uu.se)), яка працює в Університеті Уппсала, Інституті астрономії РАН та Віденському університеті, а також дані з бази спектральних ліній ExoMol ([www.exomol.com](http://www.exomol.com)), що підтримується Advanced Investigator Projects 267219 and 883830. Спостережний матеріал був отриманий в Європейській організації астрономічних досліджень у південній півкулі в рамках програм ESO 072.

## REFERENCES

1. *Allen's Astrophysical Quantities*. (2002) Ed. A. N. Cox, New York: Springer.
2. Allard F., Hauschildt P. H. (1995) Model atmospheres for M (sub)dwarf stars. 1: The base model grid. *Astrophys. J.* 445. 433—450.
3. Allard F., Hauschildt P. H., Schwenke D. (2000) TiO and H<sub>2</sub>O absorption lines in cool stellar atmospheres. *Astrophys. J.* 540. 1005—1015.
4. Audi G., Kondev F. G., Meng Wang, Huang W. J., Naimi S. (2017) The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties. *Chinese Phys.* 41. 030001
5. Baraffe I., Homeier D., Allard F., Chabrier G. (2015) New evolutionary models for pre-main sequence and main sequence low-mass stars down to the hydrogen-burning limit. *Astron. and Astrophys.* 577. A 42.
6. Barber R. J., Tennyson J., Harris G. J., Tolchenov R. N. (2006) A high-accuracy computed water line list. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 368. 1087—1094.
7. Bean J. L., Sneden C., Hauschildt P. H., Johns-Krull C. M., Benedict G. F. (2006) Accurate M dwarf metallicities from spectral synthesis: a critical test of model atmospheres. *Astrophys. J.* 652. 1604—1616.
8. Burrows A., Ram R. S., Bernath P., Sharp C. M., Milson J. A. (2002) New CrH opacities for the study of L and brown dwarf atmospheres. *Astrophys. J.* 577. 986—992.
9. Czarny J., Felenbok P., Roueff E. (1987) A search for interstellar NaH and MgH in diffuse clouds. *Astron. and Astrophys.* 188. 155—158.
10. Dulick M., Bauschlicher C. W., Burrows A., et al. (2003) Line intensities and molecular opacities of the FeH F<sup>4</sup><sub>i</sub> - X<sup>4</sup><sub>i</sub> transition. *Astrophys. J.* 594. 651—663.
11. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., Stempels H. C., Weiss W. W. (1999) VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data base. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 138. 119—133.
12. Kurucz R. L. (1993) *CD-ROM NN 1-23*. Cambridge, MA: Smithsonian Astrophys. Obs.
13. Leggett S. K., Allard F., Dahn C., et al. (2000) Spectral energy distributions for disk and halo M dwarfs. *Astrophys. J.* 535. 965—974.
14. Le Roy R. J., Walji S., Sentjens K. (2013) A DPF analysis yields quantum

- mechanically accurate analytic potential energy functions for the  $a^1 +$  and  $X^1 +$  States of NaH. 68th International Symposium on Molecular Spectroscopy.
- 15. Lyubchik Yu., Jones H. R. A., Pavlenko Y. V., Pinfield D. J., Covey K. R. (2012) Values of  $vsini$  for late-type stars from spectral synthesis in the K-band region. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 422. 2195—2201.
  - 16. Önehag A., Heiter U., Gustafsson B., et al. (2012) M-dwarf metallicities. A high-resolution spectroscopic study in the near infrared. *Astron. and Astrophys.* 542. A 33.
  - 17. Pavlenko Y. V. (1998) Lithium lines in the spectra of late M dwarfs: The effects of chromosphere-like structures. *Astron. Repts.* 42. 501—507.
  - 18. Pavlenko Y. V., Suárez Mascareño A., Rebolo R., Lodieu N., Bejar V. J. S., González Hernández J. I. (2017) Flare activity and photospheric analysis of Proxima Centauri. *Astron. and Astrophys.* 606. A 49.
  - 19. Pavlenko Y. V., Yurchenko S. N., Tennyson J. (2020) Analysis of the first overtone bands of isotopologues of CO and SiO in stellar spectra. *Astron. and Astrophys.* 633. A 52.
  - 20. Plambeck R. L., Erickson N. R. A (1982) search for NaH in dense molecular clouds—evidence against formation on grains. *Astrophys. J.* 262. 606—610.
  - 21. Plez B. (1998) A new TiO line list. *Astron. and Astrophys.* 337. 495—500.
  - 22. Rajpurohit A. S., Reyé C., Allard F., et al. (2013) The effective temperature scale of M dwarfs. *Astron. and Astrophys.* 556. A15.
  - 23. Rivlin T., Lodi L., Yurchenko S. N., Tennyson J., Le Roy R. J. (2015) ExoMol molecular line lists. X. The spectrum of sodium hydride. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 451. 634—638.
  - 24. Snow T. P., Smith W. H. (1977) A search for interstellar NaH in diffuse clouds. *Astrophys. J.* 217. 68—70.
  - 25. Valenti J. A., Piskunov N., Johns-Krull C. M. (1998) Spectral synthesis of TiO lines. *Astrophys. J.* 498. 851—862.
  - 26. Weisstein E. W., Serabyn E. (1996) Submillimeter line search in Jupiter and Saturn. *Icarus.* 123. 23—36.
  - 27. Yurchenko S. N., Sinden F., Lodi L., Hill C., Gorman M. N., Tennyson J. (2018) ExoMol line lists XXIV: A new hot line list for silicon monohydride, SiH. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 473. 5324—5333.
  - 28. Yurchenko S. N., Williams H., Leyland P. C., Lodi L., Tennyson J. (2018) ExoMol linelists XXVIII: the rovibronic spectrum of AlH. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 479. 1401—1411.

Yu. P. Lyubchyk<sup>1</sup>, Ya. V. Pavlenko<sup>1</sup>, O. K. Lyubchyk<sup>2,1</sup>, H. R. A. Jones<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Centre for Astrophysics Research, University of Hertfordshire, Hatfield, UK

## BANDS OF NaH LINES IN SPECTRA OF LATE TYPE STARS

The absorption of radiation by systems of NaH molecule bands in the atmospheres of late type stars is modeled. Calculations of synthetic spectra with model atmosphere parameters, which corresponds to M stars, show that the lines of this molecule form notable spectral details approximately the same intensity at wavelengths from 380 nm to almost  $\sim 1100$  nm. The recently calculated parameters of the NaH molecule from the database Exomol, as well as a new value of the dissociation potential of this molecule  $D_0 = 1.975$  were used in our calculations. The dependences of the calculated spectral energy distribu-

tions on the dissociation potential of the NaH molecule and on the parameters of the stellar atmospheres ( $T_{eff}$ ,  $lgg$ , [Fe/H]) were considered. Analysis of synthetic spectra shows that the lines of the NaH molecule become weak with temperature increasing and gravity decreasing in the stellar atmosphere. So, sodium hydride lines cannot be observed either in stars with effective temperatures corresponding to early M stars, nor in M giants. NaH lines should appear only in the spectra of cold dwarfs, although the strong absorption of other molecules (TiO, CrH, FeH) in visible and near-infrared region of the spectrum and absorption by atoms in the blue region make the NaH lines detection very complicated task. The energy distribution in the spectrum of the red dwarf VB 10 (M8V) in the blue region of the spectrum is modeled. The results of our analysis show that under normal conditions and close to the solar chemical composition, NaH molecules provide only an additional component in the opacity of the spectra of cold dwarfs and substellar objects.

**Keywords:** synthetic spectra, spectra of cold stars, atomic and molecular absorption.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2021

Після доопрацювання 09.11.2021

Прийнята до друку 16.12.2021