

Іонізаційно-корекційні множники, отримані з фотоіонізаційного моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення

І. Кошмак

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, Україна, 79005
e-mail: ihor.koshmak@lnu.edu.ua*

Ця праця є прямим продовженням роботи [1], де за допомогою мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення були отримані, зокрема, синтетичні потоки сильних заборонених ліній та іонний вміст хімічних елементів. Проведено селекцію кращих моделей, чії відносні інтенсивності найкраще відтворюють відповідні спостережені відносні інтенсивності. Іонний вміст хімічних елементів, отриманий у відселектованих моделях, був використаний для отримання іонізаційно-корекційних множників (ІКМ). За допомогою ІКМ можна, у подальшому, визначити відносний хімічний вміст елементів та перевизначити вміст первинного гелію та темп його збагачення протягом зоряної хімічної еволюції речовини, як це було зроблено для низькометалічних зон Н II навколо областей спалахового зореутворення [11].

Ключові слова: зони Н II, бульбашки, еволюція.

1. Вступ

Низькометалічні зони Н II у блакитних компактних карликових галактиках (БККГ) зазвичай використовують для визначення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення протягом зоряної хімічної еволюції речовини (див. напр. [2, 3, 6, 17]). Це тому, що вони характеризуються найнижчою металічністю серед усіх різновидів небулярних об'єктів, та, з іншого боку, синтез первинного гелію відбувався протягом епохи нуклеосинтезу Великого Вибуху, коли важкі елементи ще не утворились (металічність $Z=0$).

У попередніх роботах [7–10, 13] було розроблено та вдосконалено мультикомпонентне фотоіонізаційне моделювання (МФМ) низькометалічних зон Н II. Результати такого моделювання були використані для перевизначення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення протягом зоряної хімічної еволюції речовини для низькометалічних зон Н II у БККГ навколо областей спалахового зореутворення [11]. Для

цього іонний вміст, отриманий під час розрахунку МФМ, та прийнятий хімічний вміст у МФМ використовувались для визначення нових виразів для іонізаційно-корекційних множників (ІКМ – вирази, що враховують неспостережені стадії іонізації хімічних елементів). Ці вирази, а також іонний вміст 88 об'єктів з [2]– [6], використовувались для перевизначення хімічного вмісту в зонах Н II у БККГ.

Наступним кроком стало моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення [1]. Оскільки ця робота є прямим продовженням праці [1], то тут не буде опису моделей та процесу моделювання, а буде розглянуто безпосередньо селекція/відсіювання найкращих моделей та виведення іонізаційно-корекційних множників.

2. Порівняння результатів моделювання зі спостережними даними та селекція

Отримана у [1] сітка моделей, яка враховує внутрішню структуру зон Н II з низькою металічністю та її еволюцію, утворену супервітром із центральної області неперервного зореутворення, пройшла порівняння синтетичних відносних інтенсивностей ліній зі спостережними даними з компіляції Пілюгіна [14–16] з відносними інтенсивностями R_2 , R_3 , N_2 , S_2 сильних емісійних ліній у спостережних спектрах зон Н II у спіральних та неправильних галактиках, в яких виявлено принаймні одну авроральну лінію, де: $R_2 = ([OII]3727 + [OII]3729)/H\beta$; $R_3 = ([OIII]4959 + [OIII]5007)/H\beta$; $N_2 = ([NII]6548 + [NII]6584)/H\beta$; $S_2 = ([SII]6717 + [SII]6731)/H\beta$.

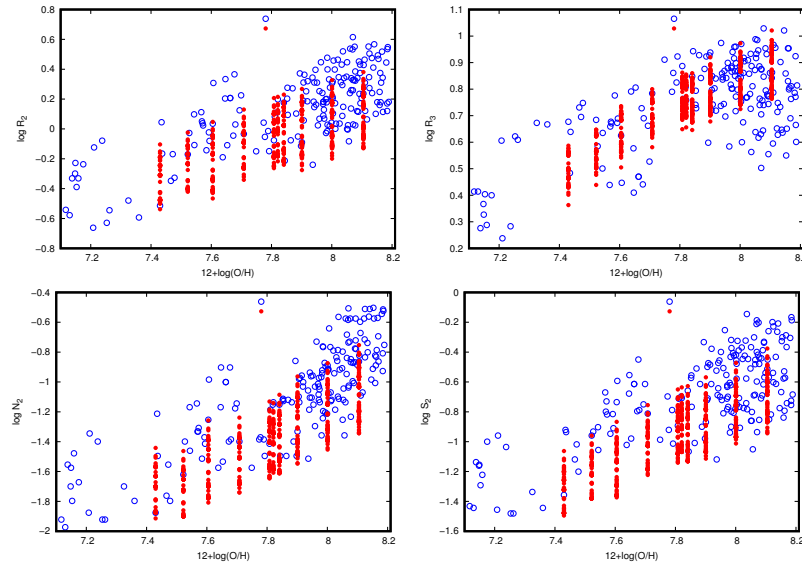


Рис. 1: Відселектовані модельні (заповнені кола) та спостережні (пусті кола – компіляція даних Пілюгіна з лінією $[OIII] \lambda 4363 \text{ \AA}$ [14–16]) значення відносних інтенсивностей сильних емісійних ліній для R_2 , R_3 , N_2 , S_2 як функції від $12 + \log(O/H)$ при $SFR=0.0267, 0.05, 0.1, 0.5, 1 M_{\odot}/\text{рік}$.

Після порівняння змодельованих відносних інтенсивностей зі спостережними, проводили селекцію моделей: відбирали тільки ті моделі, які лежать в області спостережних даних, тобто разом відтворюють відносні інтенсивності і для R_2 , і для R_3 , і для N_2 , і для S_2 (рис. 1). І тільки ті моделі, які відтворюють всі спостережні дані, були в подальшому використані для визначення іонізаційно-корекційних множників.

Іонний вміст A^{+i}/H^+ , отриманий у результаті усереднення за об'ємом зовнішнього компонента бульбашкоподібного утворення всередині зони Н ІІ та гідродинамічно незбуреної зовнішньої частини зони Н ІІ (в цих компонентах виникає більшість спостережних емісійних ліній), та зважений за електронною концентрацією, а також хімічний вміст A/H , прийнятий у МФМ, ми використали для визначення нових виразів для ІКМ у такий спосіб:

$$\log[(A^{+i}/H^+)/(A/H)] = f(x), x = X^{+k+1}/X^{+k}, f(x) = \sum_{n=0}^4 C_n x^n, ICF(x) = 10^{-f(x)},$$

де C_n – коефіцієнти полінома, та $f(x)$ – апроксимаційна функція, що визначає ІКМ (ICF – ionization-correction factors).

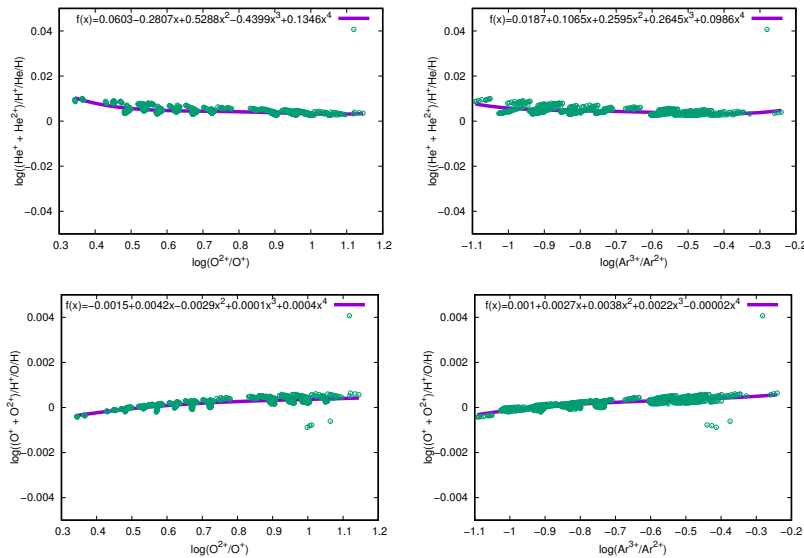


Рис. 2: Приклади відхилення ІКМ для визначення вмісту He/H та O/H у низькометалічних зонах Н ІІ.

Для прикладу, на рис. 2 показані відповідні залежності між іонним та хімічним вмістом для визначення He/H та O/H. Можна бачити, що ІКМ для визначення He/H необхідно враховувати, тоді як ІКМ для визначення O/H можна знехтувати через малу величину $f(x)$ і відповідні ІКМ дуже близькі до одиниці вздовж усього інтервалу x . Така ж ситуація трапляється у випадку з усіма ІКМ для визначення O/H, які ґрунтуються на сумі іонного вмісту $(O^+ + O^{2+})/H^+$.

Таблиця 1 містить іонний вміст A^{+i}/H^+ (який був використаний для визначення ІКМ), коефіцієнти $C_0 - C_4$ для поліноміальної апроксимаційної формули для визначення $f(x)$ та відповідні стандартні відхилення (CV; SD – standard deviations).

Табл. 1: Іонізаційно-корекційні множники ($ICF=10^{-\sum_{n=0}^{n=4} C_n x^n}$) для визначення хімічного вмісту елементів у низькометалічних зонах Н II.

№	$\frac{\Lambda^{+i}}{H^+}$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	СВ
1	2	3	4	5	6	7	8
$x = \log(O^{++}/O^+)$:							
1	$\frac{He^+ + He^{2+}}{H^+}$	0.06028586	-0.28068107	0.5288391	-0.43986052	0.13464374	0.001
2	$\frac{N^+}{H^+}$	0.25280659	-3.63005089	5.8330281	-5.17737078	1.66000758	0.0138
3	$\frac{O^+ + O^{2+}}{H^+}$	-0.00146642	0.00418758	-0.00285589	0.00004979	0.00044318	0.0001
4	$\frac{O^+}{H^+}$	-0.30251577	-0.48950017	-0.32803317	0.07900184	—	0.0001
5	$\frac{O^{2+}}{H^+}$	-0.30251577	0.51049983	-0.32803317	0.07900184	—	0.0001
6	$\frac{Ne^{2+}}{H^+}$	0.17675511	-1.44439312	3.1682734	-2.80306443	0.88792056	0.0061
7	$\frac{S^+ + S^{2+}}{H^+}$	-0.15283444	0.87503509	-2.24384176	2.05648585	-0.74798328	0.0073
8	$\frac{S^{2+}}{H^+}$	-0.49728487	2.17591531	-4.57864064	4.00277579	-1.35661212	0.0105
9	$\frac{Ar^{2+} + Ar^{3+}}{H^+}$	-0.01783282	0.02283962	-0.00686506	—	—	0.001
10	$\frac{Ar^{2+}}{H^+}$	-0.15735739	0.73838594	-1.67191229	1.4987235	-0.53927334	0.0048
$x = \log(S^{++}/S^+)$:							
11	$\frac{He^+ + He^{2+}}{H^+}$	0.10203403	-0.30200834	0.31569567	-0.11247603	—	0.0006
12	$\frac{O^+ + O^{2+}}{H^+}$	-0.06224911	0.30854623	-0.57383245	0.47321839	-0.14534096	0.0002
13	$\frac{Ar^{2+} + Ar^{3+}}{H^+}$	-0.64161324	3.31168463	-6.41235819	5.4434628	-1.70323448	0.0016
$x = \log(Ar^{3+}/Ar^{2+})$:							
14	$\frac{He^+ + He^{2+}}{H^+}$	0.01874404	0.10648909	0.25950765	0.26453397	0.09856428	0.0012
15	$\frac{O^+ + O^{2+}}{H^+}$	0.00102579	0.00270592	0.00381335	0.00223224	-0.00002166	0.0001
16	$\frac{Ne^{2+}}{H^+}$	0.0580872	0.42748917	0.98883405	1.04118099	0.36911702	0.0047
17	$\frac{S^+ + S^{2+}}{H^+}$	-0.42307593	-0.44173861	0.23741973	0.54647441	0.23023767	0.0045
18	$\frac{S^{2+}}{H^+}$	-0.56106345	-1.10044564	-1.31026797	-0.94832823	-0.31335197	0.005
19	$\frac{Ar^{2+} + Ar^{3+}}{H^+}$	0.00521044	0.03460271	0.07175426	0.0773689	0.02582563	0.0007
20	$\frac{Ar^{2+}}{H^+}$	-0.29774463	-0.48314667	-0.27804505	-0.02417449	0.0178902	0.0007
21	$\frac{Ar^{3+}}{H^+}$	-0.30060389	0.4973222	-0.32546649	-0.0728125	—	0.0007

Висновки

У цій праці було продовжено дослідження, початі в [1]. Мультикомпонентні фотоіонізаційні моделі низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення, отримані в [1], були відселектовані шляхом відтворення спостережних даних. Іонний вміст у моделях, які найкраще відтворюють спостережні дані, був використаний для подальшого розрахунку іонізаційно-корекційних множників. Отримані поліноміальні коефіцієнти для ІКМ були викладені у таблиці 1.

Отже, якщо $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$ та $X_{\text{diagn}}^{+k+1}/X_{\text{diagn}}^{+k}$ є іонний вміст, отриманий як результат діагностики спостережних емісійних ліній деякої низькометалічної зони Н II, тоді відносний хімічний вміст елемента А можна визначити так:

$$\frac{A}{H} = \text{ICF}(X_{\text{diagn}}^{+k+1}/X_{\text{diagn}}^{+k}) \cdot \left(\frac{A^{+i}}{H^+}\right)_{\text{diagn}}.$$

У наступному дослідженні буде проведено діагностику спостережних емісійних ліній та на її основі буде отримано іонний вміст, який разом із іонізаційно-корекційними множниками, отриманими з мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення, будуть використані для перевизначення вмісту первинного гелію Y_p та темпу його збагачення $dY/d(O/H)$ протягом зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті.

Подяка

Робота виконана в межах проекту ФФ–11Нр (No. 0121U100058) Міністерства освіти і науки України.

-
1. Кошмак І. О. Фотоіонізаційне моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення / І. О. Кошмак // Вісник Львівського університету. Серія фізична. – 2021. – Vol.58. – С. 61–71. doi: 10.30970/vph.58.2021.61.
 2. Izotov Yu. I. The primordial helium abundance from a new sample of metal deficient blue compact galaxies / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky // *Astrophys. J.* – 1994. – Vol. 435. – P. 647–667. doi: 10.1086/174843.
 3. Izotov Yu. I. The Primordial Helium Abundance: Systematic Effects and a New Determination / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky // *Astrophys. J. Supp.* – 1997. – Vol. 108. – P. 1–39. doi: 10.1086/312956.
 4. Izotov Yu. I. The Primordial Abundance of ^4He revisited / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 500. – P. 188–216. doi: 10.1086/305698.
 5. Izotov Yu. I. Systematic effects and a new determination of the primordial abundance of ^4He and dY/dZ from observations of blue compact galaxies / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 602. – P. 200–230. doi: 10.1086/380830.
 6. Izotov Yu. I. The primordial abundance of ^4He : a self-consistent empirical analysis of systematic effects in a large sample of low-metallicity HII regions / Yu. I. Izotov, T. X. Thuan // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 662. – P. 15–38. doi: 10.1086/513601.

7. Кошмак І. О. Моделювання світіння зони Н II, що містить бульбашкоподібну структуру / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2013. – Т. 29. – № 6. – С. 3–19. doi: 10.3103/S0884591313060020.
8. Кошмак І. О. Роль пилу під час моделювання світіння зони Н II, що містить бульбашкоподібну структуру / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Журнал фізичних досліджень. – 2013. – Т. 17. – № 4. – С. 4901-1–4901-10. doi: 10.30970/jps.17.4901.
9. Кошмак І. О. Мультикомпонентне моделювання світіння низькометалічних зон Н II / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2014. – Т. 30. – № 2. – С. 70–84. doi: 10.3103/S0884591314020044.
10. Кошмак І. О. Моделювання світіння зони Н II, що оточує область зореутворення, з урахуванням еволюції структур, утворених супервітром / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // Кінематика і фізика небесних тіл. – 2017. – Т. 33. – № 2. – С. 3–23. doi: 10.3103/S0884591317020040.
11. Koshmak I. O. The primordial helium abundance determination using multi-component photoionization modelling of low-metallicity H II regions / I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2018. – Vol. 8. – Issue 1. – P. 16–23. doi:10.17721/2227-1481.8.16-23.
12. Leitherer C. Starburst 99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation / C. Leitherer, D. Schaerer, J. D. Goaldader, et al. // Astrophysical Journal Supplement series. – 1999. – Vol. 123. – P. 3–40. doi: 10.1086/313233.
13. Мелех Б. Я. Вплив бульбашкоподібних структур, утворених зоряним вітром, на спектр іонізуючого випромінювання в небулярних об'єктах / Б. Я. Мелех, І. О. Кошмак, Р. В. Козел // Журнал фізичних досліджень. – 2011. – Т. 15. – № 3. – С. 3901-1–3901-8. doi: 10.30970/jps.15.3901
14. Pilyugin L. S. New improved calibration relations for the determination of electron temperatures and oxygen and nitrogen abundances in HII regions / L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, T. X. Thuan // Astrophys. J. – 2010. – Vol. 720. – P. 1738–1751. doi: 10.1088/0004-637X/720/2/1738.
15. Pilyugin L. S. “Counterpart” method for abundance determinations in HII regions / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, L. Mattsson // Mon. Not. Roy. Ast. Soc. – 2012. – Vol. 424. – Issue 3. – P. 2316–2329. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21398.x.
16. Pilyugin L. S. The Abundance Properties of Nearby Late-type Galaxies. I. The Data / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, A. Y. Kniazev // Astrophys. J. – 2014. – Vol. 147. – Issue 6. – P. 131–154. doi: 10.1088/0004-6256/147/6/131
17. Thuan T. X. High-ionization emission in metal-deficient blue compact dwarf galaxies / T. X. Thuan, Yu. I. Izotov // Astrophys. J. – 2005. – Vol. 161. – P. 240–270. doi: 10.1086/491657.

References

1. І. О. Кошмак, Вісник Львівського університету. Серія фізична. **58**, 61–71 (2021). doi: 10.30970/vph.58.2021.61.
2. Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, Astrophys. J. **435**, 647–667 (1994). doi:10.1086/174843.
3. Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, Astrophys. J. Supp., **108**, 1–39 (1997). doi:10.1086/312956.

4. Yu. I. Izotov, T. X. Thuah, *Astrophys. J.* **500**, 188–216 (1998). doi: 10.1086/305698.
5. Yu. I. Izotov, T. X. Thuah, *Astrophys. J.* **602**, 200–230 (2004). doi: 10.1086/380830.
6. Yu. I. Izotov, T. X. Thuah, *Astrophys. J.* **662**, 15–38 (2007). doi: 10.1086/513601.
7. I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh, *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* **29, Issue 6**, 3–19 (2013). doi:10.3103/S0884591313060020.
8. I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh, *J. Phys. Studies.* **17**, 4901-1–4901-10 (2013). doi: 10.30970/jps.17.4901.
9. I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh, *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* **30**, 70–84 (2014). doi: 10.3103/S0884591314020044.
10. I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh, *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* **33**, 3–23 (2017). doi: 10.3103/S0884591317020040.
11. I. O. Koshmak, B. Ya. Melekh, *AASP.* **8, Issue 1–2**, 16–23 (2018). doi:10.17721/2227-1481.8.16-23.
12. C. Leitherer, D. Schaerer, J.D. Goaldader et al., *Astroph. J. Supp.* **123**, 3–40 (1999). doi:10.1086/313233.
13. B. Ya. Melekh, I. O. Koshmak, R. V. Kozel, *J. Phys. Studies.* **15**, 3901-1–3901-8 (2011). doi:10.30970/jps.15.3901.
14. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **720**, 1738–1751 (2010). doi:10.1088/0004-637X/720/2/1738.
15. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, L. Mattsson, *Mon. Not. Roy. Ast. Soc.* **424, Issue 3**, 2316–2329 (2012). doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21398.x.
16. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, A. Y. Kniazev, *Astroph. J.* **147, Issue 6**, 131–154 (2014). doi:10.1088/0004-6256/147/6/131.
17. T. X. Thuah, Yu. I. Izotov, *Astrophys. J.* **161**, 240–270 (2005). doi: 10.1086/491657.

Стаття надійшла до редколегії: 23.05.2022

Прийнята до друку: 16.06.2022

Ionization-correction factors obtained by photoionization modeling of the low-metallicity H II regions surrounding continuous star formation

I. Koshmak

*Ivan Franko National University of Lviv,
8 Kyrylo and Mefodiy Str., Lviv, Ukraine, 79005
e-mail: ihor.koshmak@lnu.edu.ua*

This work is a direct continuation of [1], where multicomponent photoionization modeling of low-metallicity H II regions around areas of continuous star formation was obtained, in particular, synthetic fluxes of strong forbidden lines and ionic abundances of chemical elements. This multicomponent photoionization modeling takes into account complex structure of H II region formed by the effect of superwind from the center of star-forming region. The complex structure of H II regions can be divided into internal and external components. The internal components correspond to the region of free expansion of the superwind and the superwind cavity, respectively, and the external ones to the dense gas shell compressed by the direct shock wave of the superwind and the hydrodynamically undisturbed outer part of the H II region, where most of the observed strong emission lines are formed. The simulation components were calculated under the assumption of spherical symmetry. Photoionization of the gas was caused by ionizing quanta of both direct and diffuse ionizing radiation. The fluxes of this radiation were calculated during modeling using radiation transfer equations that take into account all the important processes in the H II region that cause this transfer. For the region of free expansion of the superwind, the input spectrum of ionizing radiation, the velocity of the superwind, and the chemical abundance were determined using models of evolutionary-population synthesis [12] in the region of continuous star formation. During photoionization modeling, the distributions of electron temperature and density in the external components were obtained as a solution of the energy balance equation. The stopping criterion for evolutionary modeling was the condition of equality of pressure at the boundary between the third and fourth components. In this paper, we select the best models whose relative intensities best reproduce the corresponding observed relative intensities. The ionic abundances of chemical elements obtained in the selected models were used to obtain ionization-correction factors (ICF). With the help of ICF, it is possible to further determine the relative chemical abundances of elements and redetermine the abundance of primordial helium and the rate of its enrichment during stellar chemical evolution of matter, as was done for low-metallicity H II regions around starburst regions [11].

Key words: H II regions, bubbles, evolution.