УДК 524.5; 524.52; 524.78
PACS 98.58-w; 98.58.Hf

<https://doi.org/10.30970/vph.58.2021.61>

Фотоіонізаційне моделювання низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення

І. Кошмак

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

Представлено підхід до моделювання іонізаційної структури низькометалічних зон Н II навколо областей неперервного зореутворення. Цей метод ґрунтується на мультикомпонентному фотоіонізаційному моделюванні цих об'єктів, що враховує їх складну структуру, утворену дією супервітру із центральної області зореутворення. Складну структуру зон Н II можна поділити на внутрішню та зовнішню складові. Внутрішні компоненти відповідають області вільного розширення супервітру і каверні супервітру відповідно, а зовнішні – щільному шару газу, стисненому прямою ударною хвилю супервітру, і гідродинамічно незбуреною зовнішньою частиною зони Н II, де формуються більшість спостережуваних сильних емісійних ліній. Компоненти моделювання були розраховані у припущенні сферичної симетрії. Фотоіонізація газу була спричинена іонізуючими квантами прямого і дифузного іонізуючого випромінювання. Потіки цього випромінювання були розраховані під час моделювання з використанням рівнянь переносу випромінювання, які враховують усі важливі процеси у зоні Н II, які спричиняють цей перенос. Для області вільного розширення супервітру було визначено вхідний спектр іонізуючого випромінювання, швидкість супервітру та хімічний вміст з використанням моделей еволюційно-популяційного синтезу області неперервного зореутворення. Під час фотоіонізаційного моделювання були отримані розподіли електронної температури та густини в зовнішніх компонентах як розв'язок рівняння енергетичного балансу. Критерієм зупинки для еволюційного моделювання була умова рівності тиску на межі між третім та четвертим компонентами. Розраховано еволюційну сітку мультикомпонентних низькометалічних моделей зон Н II навколо областей неперервного зореутворення, які порівнювалися зі спостережуваними даними.

Ключові слова: зони Н II, бульбашки, еволюція.

1. Вступ

Низькометалічні зони Н II у блакитних компактних карликових галактиках зазвичай використовують для визначення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення протягом зоряної хімічної еволюції речовини (див. напр. [3, 4, 7, 19]).

Використання фотоіонізаційного моделювання дає можливість відтворити, наскільки це можливо сьогодні, фізичні умови у справжніх зонах Н II. Також для такого моделювання є важливим якомога точніше описати внутрішню структуру зони Н II у компактних карликових галактиках. У більшості попередніх робіт по фотоіонізаційному моделюванні низькометалічних зон Н II (див. напр. [2, 18]) нех/ується/-ся можливість наявності внутрішньої структури небулярної області, утвореної супервітром із центральної області зореутворення.

У нашому попередньому дослідженні [14] розраховано мультикомпонентні фотоіонізаційні моделі зон Н II та показано, що за певних умов бульбашкоподібні структури утворені зоряним супервітром можуть привести до нестачі квантів у енергетичному розподілі у спектрі іонізуючого випромінювання, що іонізує оточуючу гідродинамічно незбурену зону Н II (використовувалася теорія еволюції бульбашки, запропонована Уівером, МакКреєм, Кастором [20] для опису розподілу густини та температури в області супервітру).

У наших статтях [9, 10] у фотоіонізаційному моделюванні були вперше додані пилові зерна. Пряма взаємодія газу та пилу полягає в тому, що фотоелектричний ефект пилових зерен призводить до охолодження пилу та нагрівання газу, тоді як поглинання квантів ультрафіолетового діапазону через зіткнення з пилом та газом призводить до нагрівання пилу та охолодження газу.

Окрім того, припущення про наявність складної внутрішньої структури всередині зон Н II, яку ми враховуємо у наших моделюваннях та описуємо у [8], дозволяє пояснити наявність ліній високого збудження He II 4686 Å та [Ne V] 3626 Å у спостережуваних спектрах зон Н II у компактних карликових галактиках [19].

У роботі [11] була використана модель Шевальє та Клеґґа [1] для визначення розподілу температури в області вільного поширення супервітру (це перший компонент у наших моделюваннях). Окрім того, було зменшено кількість вільних параметрів у моделях, що зробило процес моделювання більш самоузгодженим. Моделювання припиняється, якщо тиск на зовнішній межі бульбашки падає до тиску на внутрішньому краю навколишньої зони Н II. Згідно з нашим припущенням, така ситуація має свідчити про припинення розширення внутрішньої структури. Після цього, швидше за все, прийнята структура області супервітру починає руйнуватися через гідродинамічні нестійкості. Отже, ми змогли оцінити верхню межу життя бульбашки шляхом моделювання. Іонний вміст, отриманий під час розрахунку фотоіонізаційного моделювання, усереднений за об'ємом зовнішнього компонента бульбашки та незбуреної гідродинамічно зовнішньої зони Н II (в цих компонентах виникає більшість спостережуваних емісійних ліній), та прийнятий хімічний вміст у фотоіонізаційному моделюванні застосовувалися нами для визначення нових виразів для іонізаційно-корекційних множників. Ці вирази, а також іонний вміст 88 об'єктів з [3–7], використовувалися для перевизначення хімічного вмісту в зонах Н II у компактних карликових галактиках. Використовуючи цей хімічний вміст, отримали первинний вміст гелію Y_p та його збагачення під час зоряної хімічної еволюції

речовини.

У роботі [12] розраховувались фотоіонізаційні моделі високометалічних зон Н II у компактних карликових галактиках для різних початкових мас центрального спалаху зореутворення. У результаті такого моделювання показано утворення різних форм вихідного спектру лайманівського континууму (*Lyc*-спектру) та проведено порівняння модельних та спостережуваних відносних інтенсивностей у різних довжинах хвиль.

У цій роботі для задання вхідного спектру, швидкості супервітру та хімічного вмісту елементів для фотоіонізаційного моделювання низькометалічних (металічність бралась у діапазоні $Z = 0.00029\text{--}0.003$ ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.117\text{--}8.2$)) зон Н II використана центральна область зореутворення неперервного типу з різними значеннями швидкості зореутворення, яка є більш реалістичною, на відміну від наших попередніх робіт, де використовувались області зореутворення спалахового типу (в моделюванні спалахового зореутворення припускається, що всі зорі утворились в один момент і далі не утворюються [13]).

2. Опис моделей

Відмінністю цієї роботи від [11] є використання неперервного характеру центральної області зореутворення. Було розраховано еволюційно-популяційні сітки областей зореутворення за допомогою програми *Starburst99* [13] за швидкостей зореутворення (SFR – star formation rate) рівних 0.0267, 0.05, 0.1, 0.5, 1 $M_{\odot}/\text{рік}$; решта параметрів для еволюційно-популяційного синтезу є таким же самим як у [11, 12].

У результаті розрахунку була отримана еволюція таких параметрів, як:

1. Суперпозиція зоряних *Lyc*-спектрів (рис. 1а).
2. Загальна кількість іонізуючих квантів Q_{ion} , що випромінюються областю зореутворення за 1 с (рис. 1б).
3. Темп втрати маси спалахом зореутворення $\dot{M}_w$ [$M_{\odot}/\text{рік}$] (рис. 1в).
4. Хімічний вміст елементів, які надходять в оточуючу область у результаті дії супервітру та вибухів наднових (рис. 1г).
5. Механічна світність L_w [ерг/с] (рис. 1д).

Ці дані були використані як вхідні параметри у подальшому мультикомпонентному фотоіонізаційному моделюванні.

Детальний опис нашого методу для фотоіонізаційного моделювання зони Н II, що оточує область зореутворення, можна знайти в нашій попередній роботі [11].

Отже, було розраховано еволюційні сітки таких моделей для віку від 1 млн років до досягнення стагнаційного радіуса (тобто стагнаційного віку) [11]. Ці моделі враховують еволюцію внутрішньої структури низькометалічних зон Н II через наявність супервітру з центральної області зореутворення. Таке фотоіонізаційне моделювання зон Н II враховує перенос випромінювання через внутрішні компоненти, тому такий підхід до моделювання іонізаційної структури зон Н II є більш правильним, ніж звичайне фотоіонізаційне моделювання.

Рис. 1: а) вхідні *Lyс*-спектри для області зореутворення з $\text{SFR}=0.1 M_{\odot}/\text{рік}$ для віків 1, 3, 10 млн років; б) еволюційна зміна кількості іонізуючих квантів, що надходять від області зореутворення з $\text{SFR} = 0.1 M_{\odot}/\text{рік}$; в) еволюційна зміна темпу втрати маси областю зореутворення; г) відносний вміст хімічних елементів, що надходять від області зореутворення з $\text{SFR}=0.1 M_{\odot}/\text{рік}$; д) еволюційна зміна механічної світності для області зореутворення.

Розрахунок моделей зупиняється у випадку рівності тиску на межі третього та четвертого компонент. Зовнішній радіус третього компонента та вік, за якого він виникає, називаються стагнаційним радіусом та стагнаційним віком, відповідно. Одночасно розширення бульбашки супервітру припиняється, і згодом, ймовірно, третій компонент фрагментується з подальшим розпадом через гідродинамічні нестійкості.

3. Порівняння результатів моделювання зі спостережуваними даними

Щоб переконатися, що моделі відповідають спостережуваним даним щодо зон Н II, що оточують області зореутворення, зроблено порівняння синтетичних спектрів зі спостережуваними. На рис. 2–6 показано порівняння наступних відносних інтенсивностей сильних емісійних заборонених ліній, отриманих від фотоіонізаційного моделювання, з такими ж, отриманими під час спектроскопічних спостережень (використовувалася компіляція Пілюгіна [15–17] з відносними інтенсивностями сильних емісійних ліній у спостережуваних спектрах зон Н II у спіральних та неправильних галактиках, в яких виявлено принаймні одну авроральну лінію, що дозволило визначити хімічний вміст класичним T_e -методом, з використанням електронної температури у різних зонах іонізації кисню): $R_2 = ([OII]3727 + [OII]3729)/H_\beta$; $R_3 = ([OIII]4959 + [OIII]5007)/H_\beta$; $N_2 = ([NII]6548 + [NII]6584)/H_\beta$; $S_2 = ([SII]6717 + [SII]6731)/H_\beta$.

Рис. 2: Порівняння змодельованих синтетичних спектрів (заповнені кола) зі спостережуваними (пусті кола – компіляція даних Пілюгіна з лінією $[OIII] \lambda 4363 \text{ \AA}$ [15–17]) значеннями відносних інтенсивностей сильних емісійних ліній для R_2 як функції від $12 + \log(O/H)$ при $SFR=0.0267, 0.05, 0.1, 0.5 M_\odot/\text{рік}$.

Рис. 3: Те ж саме для R_3 . Рис. 4: Те ж саме для N_2 .

Рис. 5: Те ж саме для S_2 .

Рис. 6: Те ж саме для R_2, R_3, N_2, S_2 при $SFR=1 M_{\odot}/\text{рік}$.

Висновки

На рис. 2, 4 та 5 видно, що модельні відносні інтенсивності R_2 , N_2 , S_2 добре відтворюють спостережувані дані у випадках, коли $\text{SFR} = 0.0267$, 0.05 та $0.1 M_\odot/\text{рік}$. На цих же самих рисунках помітно тенденцію, що зі збільшенням швидкості зореутворення модельні дані зміщуються “донизу” і вже при $\text{SFR} = 0.5 M_\odot/\text{рік}$ погано відтворюють спостереження. У випадку R_3 моделі знаходяться у області спостережуваних даних для всіх швидкостей зореутворення, представлених на рис. 3 та зі збільшенням SFR зміщуються “догори” (оскільки чим менший вміст іонів O^+ , тим більший вміст O^{++} , і навпаки). За найвищої швидкості зореутворення $\text{SFR} = 1 M_\odot/\text{рік}$ (рис. 6) модельні відносні інтенсивності R_2 , N_2 , S_2 майже не відтворюють спостережувані дані; виключення є лише для R_3 . Відхилення модельних результатів від спостережуваних даних зі збільшенням швидкості зореутворення можна пояснити тим, що спостережувані дані стосуються низькометалічних зон H II у невеликих спіральних та неправильних галактиках та характеризуються низькими значеннями швидкості зореутворення. Тому зрозуміло, що моделі зон H II з великими значеннями SFR (притаманними для цілих галактик) не відтворюють спостереження, що і було продемонстровано. У подальшому тільки ті моделі, які відтворюють спостережувані відносні інтенсивності R_2 , R_3 , N_2 та S_2 , будуть використані для уточнення вмісту первинного гелію та темпу його збагачення, як у роботі [11].

Подяка

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

-
1. Chevalier R. A. Wind from a starburst nucleus / R. A. Chevalier, A. W. Clegg // Letters to Nature.– 1985.– Vol. 317.– P. 44–45. doi:10.1038/317044a0
 2. Holovaty V. V. Ionization-correction factors for H II regions in blue compact dwarf galaxies / V. V. Holovaty, B. Ya. Melekh // Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.– 2002.– Vol. 18.– Issue 4.– P. 362–375. Bibcode:2002KFNT...18..362H
 3. 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
 4. 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
 5. 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
 6. 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

7. 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
8. Кошмак І.О. Моделювання світіння зони H 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
9. Кошмак І.О. Роль пилу під час моделювання світіння зони H 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
10. Кошмак І.О. Мультикомпонентне моделювання світіння низькометалічних зон H II / І. О. Кошмак, Б. Я. Мелех // *Кінематика і фізика небесних тіл.*– 2014.– Vol. 30.– № 2.– P. 70–84. doi:10.3103/S0884591314020044
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. Koshmak I.O. Photoionization modelling of the H II regions surrounding star-forming regions within the metallicity range $Z=0.003-0.012$ / I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh // *Advances in Astronomy and Space Physics.*– 2020.– Vol. 10.– Issue 1.– P. 21–27. doi:10.17721/2227-1481.10.21-27
13. Leitherer C. Starburst 99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation / C. Leitherer, D. Schaerer, J. D. Gooldader, et al. // *Astrophysical Journal Supplement series.*– 1999.– Vol. 123.– P. 3–40. doi:10.1086/313233
14. 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
15. 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
16. 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
17. 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
18. Stasinska G. A grid of model HII regions for extragalactic studies / G. Stasinska // *Astron. Astroph. Supp.*– 1990.– Vol. 83.– P. 501–538. Bibcode:1990A&AS...83..501S
19. 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
20. Weaver R. Interstellar bubbles. II - Structure and evolution / R. Weaver, R. McCray, J. Castor, et al. // *Astroph. J.*– 1977.– Vol. 218.– P. 377–395. doi:10.1086/155692

References

1. R.A. Chevalier, A.W. Clegg, Letters to nature. **317**, 44-45 (1985). doi:10.1038/317044a0
2. V.V. Holovaty, B.Ya. Melekh, Kinematics Phys. Celestial Bodies. **18**, Issue 4, 362-375 (2002). Bibcode:2002KFNT...18..362H
3. Yu.I. Izotov, T.X. Thuah, V.A. Lipovetsky, Astrophys. J. **435**, 647-667 (1994). doi:10.1086/174843
4. Yu.I. Izotov, T.X. Thuah, V.A. Lipovetsky, Astrophys. J. Supp., **108**, 1-39 (1997). doi:10.1086/312956
5. Yu.I. Izotov, T.X. Thuah, Astrophys. J. **500**, 188-216 (1998). doi:10.1086/305698
6. Yu.I. Izotov, T.X. Thuah, Astrophys. J. **602**, 200-230 (2004). doi:10.1086/380830
7. Yu.I. Izotov, T.X. Thuah, Astrophys. J. **662**, 15-38 (2007). doi:10.1086/513601
8. I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh, Kinematics Phys. Celestial Bodies. **29**, Issue 6, 3-19 (2013). doi:10.3103/S0884591313060020
9. I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh, J. Phys. Studies. **17**, 4901-1-4901-10 (2013). doi:10.30970/jps.17.4901
10. I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh, Kinematics Phys. Celestial Bodies. **30**, 70-84 (2014). doi:10.3103/S0884591314020044
11. I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh, AASP. **8**, Issue 1-2, 16-23 (2018). doi:10.17721/2227-1481.8.16-23
12. I.O. Koshmak, B.Ya. Melekh, AASP. **10**, Issue 1, 21-27 (2020). doi:10.17721/2227-1481.10.21-27
13. C. Leitherer, D. Schaerer, J.D. Goaldader et al., Astroph. J. Supp. **123**, 3-40 (1999). doi:10.1086/313233
14. B.Ya. Melekh, I.O. Koshmak, R.V. Kozel, J. Phys. Studies. **15**, 3901-1-3901-8 (2011). doi:10.30970/jps.15.3901
15. L.S. Pilyugin, J.M. Vilchez, T.X. Thuan, Astrophys. J. **720**, 1738-1751 (2010). doi:10.1088/0004-637X/720/2/1738
16. 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
17. 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
18. G. Stasinska, Astron. Astroph. Supp. **83**, 501-538 (1990). Bibcode:1990A&AS...83..501S
19. T.X. Thuah, Yu.I. Izotov, Astrophys. J. **161**, 240-270 (2005). doi:10.1086/491657
20. R. Weaver, R. McCray, J. Castor et al., Astroph. J. **218**, 377-395 (1977). doi:10.1086/155692

Статтю отримано: 09.11.2021
Прийнято до друку: 04.01.2022

Photoionization modeling of the low-metallicity H II regions surrounding continuous star formation

I. Koshmak

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

This paper presents an approach to modeling the ionization structure of low-metallicity H II regions around areas of continuous star formation. This method is based on multicomponent photoionization modeling of these objects, which takes into account their complex structure formed by the effect of superwind from the central region of star formation. 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 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. An evolutionary grid of multicomponent low-metallicity models of H II regions around the regions of continuous star formation was calculated, which were compared with the observed data.

Key words: H II regions, bubbles, evolution.