

УДК 524.37
PACS 98.58.Li

СІТКОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ РЕЧОВИНИ В ОБОЛОНКАХ ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

М. Кашеба, Б. Мелех

*Львівський Національний університет імені Івана Франка
кафедра астрофізики
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79000, Львів, Україна
e-mail: bmelekh@gmail.com*

Розроблено новий метод визначення параметрів радіального розподілу густини в оболонках планетарних туманностей (ПТ) в представленні Головатого-Малькова на основі результатів обчислення сітки газопилових фотоіонізаційних моделей світіння ПТ Галактики розрахованої вздовж еволюційних треків їх ядер з малим кроком (0.25) зміни параметру густини. Таким чином кожна з моделей має дещо інший розподіл густини речовини в оболонці ПТ. Суть методу полягає у виборі з сітки моделей такої, що найкраще відтворює наступні діагностичні співвідношення між інтенсивностями емісійних ліній із спостережуваних спектрів: [O II] $\lambda 3726\text{\AA}/\lambda 3729\text{\AA}$, [O III] $\lambda 51.8\text{mic}/\lambda 88.3\text{mic}$, [S II] $\lambda 6716\text{\AA}/\lambda 6731\text{\AA}$, [S III] $\lambda 18.7\text{mic}/\lambda 33.5\text{mic}$. Метод апробовано на визначенні параметрів розподілу густини оболонок ПТ IC 5117 та NGC 7293, які порівняно з відповідними результатами пошуку оптимальної фотоіонізаційної моделі для цих об'єктів.

Ключові слова: Планетарні туманності, пил, фотоіонізаційне моделювання, розподіл густини

1 Вступ

Проблема пошуку розподілу матерії густини в оболонці планетарної туманності (ПТ) полягає у тому, що ми спостерігаємо в потоках випромінювання в емісійних лініях кванти, які виникають вздовж променя зору у різних частинах туманності, що можуть відрізнятися фізичними характеристиками (електронними концентраціями n_e та температурами T_e).

Відомо (див. напр. [1, 2]), що деякі з так званих діагностичних співвідношення між інтенсивностями ліній (відношення інтенсивностей одного і того ж іона) є чутливі до T_e (напр. $\lambda 4363\text{\AA}/\lambda \lambda(4959\text{\AA}+5007\text{\AA})$ [O III]), в той час як інші (напр.

$\lambda 6716\text{\AA}/\lambda 6731\text{\AA}$ [S II], або ж $\lambda 3726\text{\AA}/\lambda 3729\text{\AA}$ [O II]) – до n_e . Саме на таких методах базуються найпростіші діагностичні методи (напр. двозонний метод Пейджела). Більшість діагностичних співвідношень є чутливі як до T_e , так і до n_e . Для їх використання під час діагностики модельних спектрів застосовують так званий методу перетину кривих залежностей $n_e - T_e$, побудовані для кожного з доступних із спостережуваних спектрів діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній (див. напр. [3]). Однак, у стандартних реалізаціях такі підходи дозволяють визначити n_e , T_e і, відповідно, іонний вміст у 2, максимум чотирьох зонах іонізації. Через це стандартні діагностичні методи не дозволяють детально визначити розподіл густини вздовж променя зору.

У сферично-симетричних ПТ (їх менше 20% від загальної кількості) можна проаналізувати мапи ізотоп у яскравих H_α і/або H_β лініях і з них отримати розподіл густини. Саме це було зроблено у праці [4], автори якої, в результаті такого аналізу для 10 оболонок ПТ різного розміру (а отже і віку), запропонували напівемпіричний вираз для опису радіального розподілу густини в таких об'єктах. Цей вираз має перевагу над звичайними апроксимаційними виразами тим, що залежить від фізичних параметрів: густина поблизу максимуму розподілу, характеристичний радіус, який з часом збільшується, відповідно до швидкості розширення оболонки, та параметру густини, який залежить від процесів (наприклад, характеристик віку), які привели до утворення оболонки ПТ. Ці параметри розподілу густини дозволяють пов'язати розподіл густини в оболонці ПТ з її еволюцією.

У даній праці ми пропонуємо метод визначення параметрів радіального розподілу густини матерії в оболонці ПТ, який може бути описаний у представленні Головатого–Малькова. Це – сферично симетричні моделі, які, однак, дозволять нам детально вивчити кореляції між спектральними характеристиками оболонки ПТ та розподілом густини в ній, з перевіркою їх на спостережуваних даних. Далі такі кореляції можна буде використовувати для вивчення розподілу густини вздовж променя зору в оболонках ПТ складнішої геометрії (2D та 3D) та морфології.

Метод спектрального визначення характеристик розподілу густини в оболонках тих ПТ, кутові розміри яких є надто малі для проведення доволі громіздкої процедури аналізу їх ізотоп, дозволить нам швидко (лише із інтенсивностей спектральних ліній) визначати як характер такого розподілу, так і його параметри. Це дозволить нам більш детально дослідити морфологію оболонок ПТ, їх виникнення та еволюцію, а в поєднанні з фотоіонізаційними моделями їх світіння – визначити більш точно вирази для іонізаційно-корекційних множників, а отже суттєво збільшити достовірність визначення хімічного вмісту в цих об'єктах.

2 Сітка фотоіонізаційних моделей світіння оболонок планетарних туманностей

Фотоіонізаційні моделі світіння (ФМС) оболонок ПТ дозволяють доповнити інформацію, якої бракує із спостережуваних даних, зокрема, і параметри розподілу густини матерії всередині цих об'єктів. У цій роботі ми обмежимося сферично-симетричними ФМС, розподіл густини в яких задається у представленні Головатого–Малькова [4], яке вони отримали на основі аналізу мап ізотоп в лінії H_β 10 реальних

ПТ у припущенні їх сферичної симетрії за допомогою рівняння Абеля:

$$n_H(r) = \frac{x^2 (1 + 3e^{-1.2x})}{(x^2 - 1)^2 + 0.36r_c^{-0.43}x^2} \cdot \frac{A_{dens}}{r_c^2} \quad (1)$$

де $x = r/r_c$, r_c визначає позицію розподілу густини, близьку до максимуму, ця величина повинна задаватися у пк, а A_{dens} є так званим параметром густини.

Ми прийняли, що при нульовому віці ($t = 0$) оболонки ПТ концентрація гідрогену в ній при радіусі $r = r_c$ становить 100000 см^{-3} , оскільки у праці [4] для найбільш компактною і молоді ПТ IC5117 було отримано концентрацію гідрогену 100000 см^{-3} при $r = r_c$. Величина r_c для $t = 0$ визначалася за допомогою виразу (1) при $r = r_c$. З часом r_c змінювалося як $r_c = V_{exp} \cdot t$, де $V_{exp} = 10 \text{ км/с}$ для $T_{eff} \leq 2 \cdot 10^4 \text{ K}$ і $V_{exp} = 20 \text{ км/с}$ для $T_{eff} > 2 \cdot 10^4 \text{ K}$.

Як і в [5] внутрішній радіус туманності (r_i) розраховувався за допомогою апроксимаційного виразу для залежності відношення r_i/r_c від r_c , отриманого нами з аналізу результатів Головатого та Малькова [4]:

$$r_i/r_c = 0.440935 - 4.89604r_c + 27.9594r_c^2 - 44.0096r_c^3.$$

Сумарна маса оболонки ПТ у моделях сітки визначалася як різниця між масою зорі-попередниці ПТ, M_* , та масою ядра ПТ, M_c . Зовнішній радіус оболонки ПТ (r_o) визначався шляхом інтегрування розподілу $n(r)$ (1) за об'ємом туманності до радіусу (зовнішнього), при якому досягається маса ПТ. Для визначення маси ядра ПТ (білого карлика) M_c , за масою M_* зорі-попередника ПТ на Головній послідовності та металічністю Z , було використано наступне співвідношення Вассіліадіса та Вуда [6]:

$$\frac{M_c}{M_\odot} = 0.473 + 0.084 \frac{M_*}{M_\odot} - 0.058 \log \frac{Z}{Z_\odot}$$

Для задання розподілу енергії в спектрі іонізуючого випромінювання ($\lambda \leq 912 \text{ \AA}$) ядра оболонки ПТ ми вибрали маси зір-попередниць ПТ з масами 1.0 та 1.5 маси Сонця, оскільки більшість ПТ має попередниками зорі саме в такому діапазоні мас.

Хімічний склад газової компоненти оболонок ПТ був взятий з праці [7], як усереднений вміст ПТ Галактики [5]. У праці [5] ми розраховували також відношення маси пилу до маси газу в оболонках ПТ Галактики для карбонатних та силікатних пилик. Ці відношення були прийняті при розрахунку моделей сітки ФМС.

Детально процедура розрахунку такої сітки ФМС оболонок ПТ описана у праці [5]. Зауважимо, що у [5] моделі були розраховані для чотирьох значень параметра густини A_{dens} : 1, 2, 4 та 8. Для наших досліджень у даній роботі ми доповнили сітку ФМС у такий спосіб, що тепер значення A_{dens} лежить у діапазоні 1 – 8, але з кроком 0.25. Мінімальне значення густини (коли розподіл Головатого–Малькова переходить у стагу густини) прийняте рівним 10 см^{-3} .

Слід також зауважити, що результати синтетичної фотометрії модельних спектрів сітки у [5] були порівняні з результатами фотометричних спостережень в ІЧ-діапазонах на космічних телескопах *Spitzer* та *IRAS*, а також в рамках проекту *2MASS* [8, 9].

3 Опис методу

У тривимірному просторі параметрів розподілу густини (A_{dens} , n_{rc} , r_c) вищепи-сана сітка ФМС представлена двовимірною поверхнею, показаною на рис. 3. Кожен вузол цієї поверхні представляє окрему ФМС ПТ Галактики. Також аналізувалися лише ФМС з масами зір-попередниць ПТ рівними 1.0 та 1.5 мас Сонця, оскільки ПТ, утворених такими зорями, найбільше. Вищезгадане, наприкінці попередньої пункту, збільшення кількості моделей, досягнуте за рахунок збільшення моделей з різними значеннями A_{dens} , дозволило нам отримати достатньо добру базу даних ФМС ПТ для вибору найбільш відповідного розподілу густини за спектральними характери-стиками оболонки ПТ.

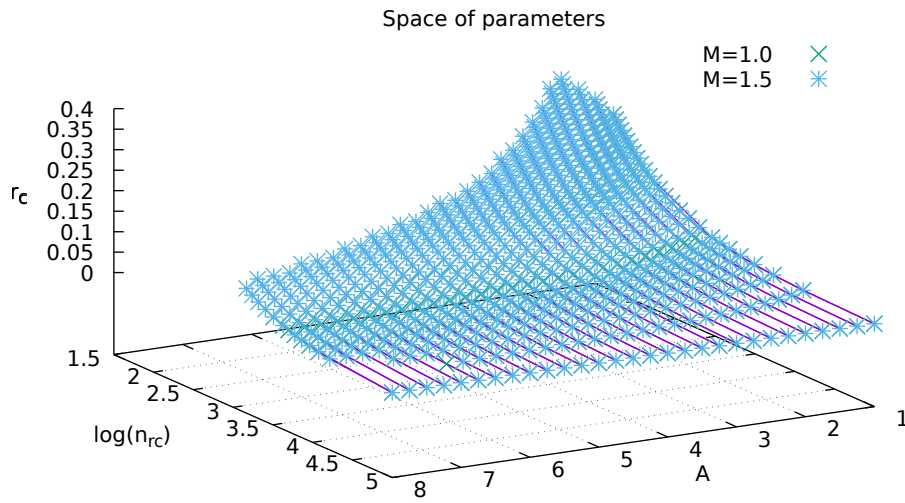


Рис. 1: Простір параметрів ПТ

У якості критерію вибору оптимального розподілу густини ми використали χ^2 -функцію для діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній:

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{r_{model} - r_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$i =$$

{[O II] λ 3726/ λ 3729, [O III] λ 51.8mic/ λ 88.3mic, [S II] λ 6716/ λ 6731, [S III] λ 18.7mic/ λ 33.5mic},

які визначаються із спостережуваних спектрів емісійних лінійчатих оболонок ПТ.

Принцип цього підходу полягає у тому, що для кожної ФМС розраховується χ^2 -функція. Далі вибирається модель з мінімальним значенням цієї функції (χ^2_{min}). З цієї моделі отримуємо 3 вищезгадані параметри густини по 4-х діагностичних співвідношеннях. Два з цих діагностичних співвідношень можна вважати зв'язаними,

оскільки вони визначають n_e майже в одній зоні іонізації. Однак, з трьох представлених параметрів розподілу густини, тільки два незалежні (напр., маючи A_{dens} та r_c можна (за виразом 1) отримати значення $n(r_c)$). Тому кількість ступенів вільності приймаємо рівною одиниці, а $\Delta\chi^2 = 1$, відповідно. Далі, вибираються i -ві моделі із проміжку $\chi_{min}^2 < \chi_i^2 < \chi_{min}^2 + \Delta\chi^2$. З відселектованих у такий спосіб моделей, за максимальним χ_i^2 зліва та справа у вищезгаданому проміжку значень цієї функції, визначаються похибки оптимальних значень для параметрів густини.

4 Апробація методу.

Для апробації даного методу ми вибрали найкомпактнішу (наймолодшу) та найпротяжнішу (найстаршу) ПТ з вибірки Головатого-Малькова [4] – IC 5117 та NGC 7293, відповідно.

Слід відзначити, що для застосування даного підходу до реальних об'єктів, потрібно мати інтенсивності наступних ліній: [O II] λ 3726Å, [O II] λ 3729Å, [O III] λ 51.8mic, [O III] λ 88.3mic, [S II] λ 6716Å, [S II] λ 6731Å, [S III] λ 18.7mic, [S III] λ 33.5mic, але не у всіх реальних об'єктах їх можна спостерігати в одному спектрі, оскільки лінії належать двом діапазонам (оптичному та ІЧ), а також лінії [O II] λ 3726Å та [O II] λ 3729Å у багатьох спектрах блендуються (зливаються в одну лінію), а тому їх відношення [O II]3726/3729 отримати неможливо.

В цьому якраз полягає основна практична проблема нашого методу – повинні бути наявні всі 8 інтенсивностей цих ліній для його застосування. Через це ми зараз працюємо над розробкою наближених методів.

Але вищезгадану проблему недостачі ліній можна частково розв'язати і в інший спосіб. Зокрема, в праці [10] було отримано оптимальні ФМС (ОФМС) двох об'єктів нами для апробації ПТ (IC 5117 та NGC 7293). В спектрах оптимальних ФМС цих об'єктів присутні всі 8 необхідних інтенсивностей емісійних ліній, а також з моделей ми знаємо фактичні значення параметрів розподілу густини у представленні Головатого-Малькова [4]. Таким чином порівняння отриманих нашим методом значень параметрів розподілу густини з фактичним (заданими в ОФМС) дозволило нам перевірити коректність роботи нашого методу.

На рис. 2 – 4 показано визначення максимальної концентрації частинок n_{rc} для ПТ NGC 7293, характеристичного радіусу r_c та параметру густини A_{dens} , а також їх похибок за описаною вище схемою. Розподіл χ^2 за n_{rc} обмежений зліва значенням 50 cm^{-3} , оскільки моделі з меншим n_{rc} не розраховувалися (газ оболонки ПТ вважався перемішаним з міжзор'яним середовищем). Та ж причина відсутності великої кількості моделей праворуч від оптимального значення r_c (такі моделі не розраховувалися через концентрації співмірні з концентраціями газу у міжзор'яному середовищі). Несиметричність розподілів χ^2 за значеннями n_{rc} та r_c відображає взаємозв'язок цих параметрів через вираз Головатого-Малькова (1). Аналогічний розподіл за параметром A_{dens} виглядає набагато симетричнішим, оскільки він був прийнятим у [5] вільним параметром сітки, а тому не залежить від віку оболонки ПТ.

У випадку ПТ IC 5117 під час застосування даного методу у межах $\Delta\chi^2$ знайдено лише одну модель, а тому похибки параметру густини для неї не визначалися.

У табл. 1 наведено порівняння значення параметрів густини для ПТ NGC 7293

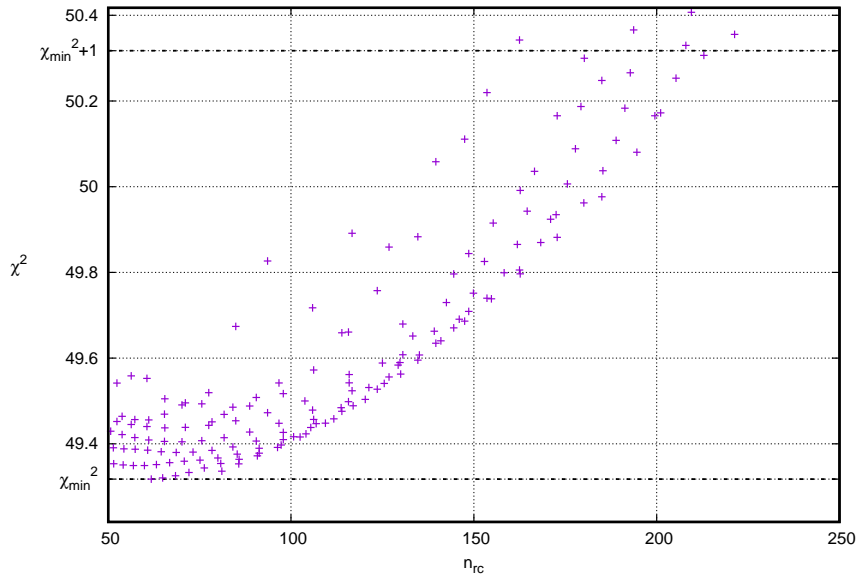


Рис. 2: Результати сіткового методу у визначенні максимальної концентрації частинок (n_{rc} , у cm^{-3}) об'єкту *NGC7293*.

та IC 5117, отриманих нашим методом з їх фактичними значеннями, отриманими в процесі розрахунку ОФМС у праці [10]. Похибки параметрів, отримані нашим методом, були максимізовані через невелику кількість моделей сітки у цьому діапазоні n_{rc} . Як видно з таблиці, значення параметрів густини у випадку *NGC 7293* в межах похибок співпадають, а у випадку IC 5117 – близькі, або ж співпадають з їх фактичними значеннями (з ОФМС).

Табл. 1: Отримані нашим методом та фактичні (з праці [10]) значення параметрів густини для ПТ *NGC 7293* та IC 5117.

	A	n_{rc}	r_c
Сітковий метод (<i>NGC 7293</i>):	$2.00^{+1.25}_{-1.10}$	$61.8^{+156.2}_{-11.2} \text{ cm}^{-3}$	$0.325^{+0.011}_{-0.235} \text{ пк}$
ОФМС (<i>NGC 7293</i>):	1.6	66.9 cm^{-3}	0.268 пк
Сітковий метод (IC 5117):	7.25	23236 cm^{-3}	0.017 пк
ОФМС (IC 5117):	8	27528 cm^{-3}	0.017 пк

5 Висновки

На основі деталізованої сітки ФМС галактичних ПТ запропоновано метод оцінки параметрів густини у представленні Головатого–Малькова [4]. Метод базується на

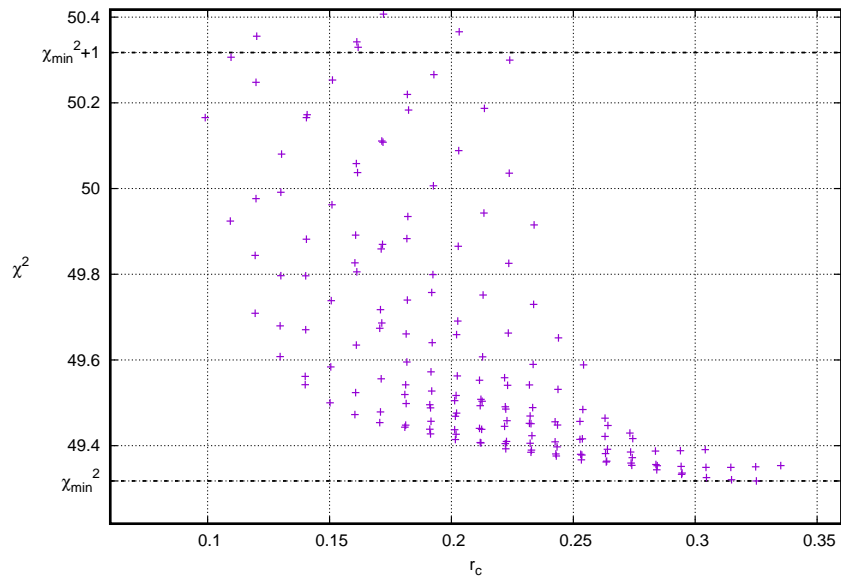


Рис. 3: Результати сіткового методу у визначенні відстані до максимальної концентрації частинок (r_c , у пк) об'єкту NGC7293.

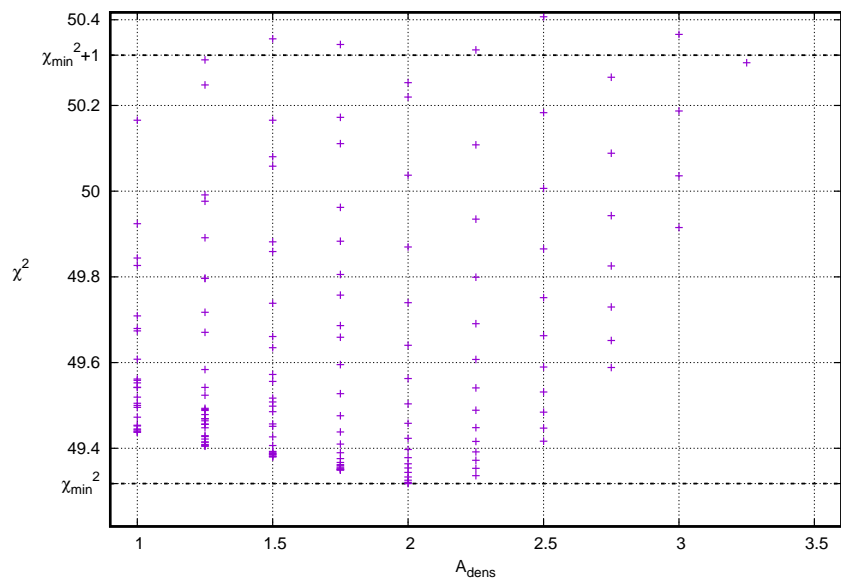


Рис. 4: Результати сіткового методу у визначенні параметра густини A_{dens} об'єкту NGC7293.

виборі з сітки моделі, яка має найближчі до спостережуваних значень діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній [O II] $3726\text{\AA}/3729\text{\AA}$, [O III] $51.8\text{mic}/88.3\text{mic}$, [S II] $6716\text{\AA}/6731\text{\AA}$, [S III] $18.7\text{mic}/33.5\text{mic}$. Параметри розподілу густини у цій моделі і будуть шуканими. Запропоновано також процедуру пошуку похибок цих параметрів.

Метод апробовано на відтворенні розподілів густини в оболонках ПТ IC 5117 та NGC 7293, отриманих у праці [10] в результаті пошуку їх ОФМС. Виявилось, що значення параметрів густини у випадку NGC 7293 в межах похибок співпадають, а у випадку IC 5117 – близькі, або ж співпадають з їх фактичними значеннями (з ОФМС).

Такий результат дозволяє розглядати запропонований метод пошуку параметрів густини у представленні Головатого-Малькова як ініціалізаційний для пошуку ОФМС для інших ПТ Галактики.

Список використаної літератури

1. В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, Н. В. Гаврилова, Фізика світіння газових туманностей. Навчальний посібник (Львів: Видавництво ЛНУ ім.І.Франка, 2013).
2. D. E. Osterbrock & G. J. Ferland *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. Second Edition (Saulito, California: University Science Book, ISBN 1-891389-34-3, 2005).
3. В. В. Головатий, Р. Е. Гершберг, Ю. Ф. Мальков, В. И. Проник, Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. **96**, 72 (1999).
4. В. В. Головатий, Ю. Ф. Мальков, Астрон. журн. **69**, 1166 (1992).
5. Мелех Б.Я. Вісник Львівського університету. Серія фізична, **50**, 125 (2015).
6. E. Vassiliadis, P. R. Wood, *Astrophys. J. Supp.* **92**, 125 (1994).
7. A. Karska *Porownanie wlasnosci podczerwonych mglawic planetarnych w Drodze Mlecznej i Wielkim Obloku Magellana* (Torun: Praca magisterska na kierunku astronomia, 2009).
8. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, S. Schneider, J. M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, T. Chester, J. Elias, J. Huchra, J. Liebert, C. Lonsdale, D.G. Monet, S. Price, P. Seitzer, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, J. E. Gizis, E. Howard, T. Evans, J. Fowler, L. Fullmer, R. Hurt, R. Light, E. L. Kopan, R. A. Marsh, H. L. McCallon, R. Tam, S. van Dyk & S. Wheelock, *Astronom. J.* **131**, 1163 (2006).
9. M. Meixner, K. D. Gordon, R. Indebetouw, J. L. Hora, B. Whitney, R. Blum, W. Reach, J. P. Bernard, M. Meade, B. Babler, C. W. Engelbracht, B. Q. For, K. Misselt, U. Vijh, C. Leitherer, M. Cohen, E. B. Churchwell, F. Boulager, J. A. Frogel, Y. Fukui, J. Callagher, V. Gorjian, J. Harris, D. Kelly, A. Kawamura, S. Kim, W. B. Latter, S. Madden, C. Markwisch-Kemper, A. Mizuno, N. Mizuno, J. Mould, A. Nota, M. S. Oey, K. Olsen, T. Onishi, R. Paladini, N. Panagia, P. Perez-Gonzalez, H. Shibai, S. Sato, L. Smith, L. Staveley-Smith, A. G. G. M. Tielens, T. Ueta, S. V. Dyk, K. Volk, M. Werner & D. Zaritsky, *Astronom. J.* **132**, 2268 (2006).

10. Melekh B.Ya. Demchyna A.V., Holovaty V.V., Kinematics and Physics of the Celestial Bodies. **31**, №2, 73 (2015).

Стаття надійшла до редакції 18.05.2017
прийнята до друку 15.06.2017

**GRID METHOD TO DETERMINE THE PARAMETERS OF
RADIAL DENSITY DISTRIBUTION IN PLANETARY
NEBULAE ENVELOPES**

M. Kasheba, B. Melekh

*Ivan Franko National University of Lviv
Astrophysics Department
8 Kyrylo and Methody Str., 79000 Lviv, Ukraine
e-mail: bmelekh@gmail.com*

The new method to determine the parameters of the radial density distribution within planetary nebulae envelopes (PNe) in the representation of Golovaty-Mal'kov on the base of results of the photoionization gas-dust photoionization models (PhM) grid for PNe in Milky Way was developed. PhM grid was calculated along the evolutionary tracks of the PNe nuclei at small step (0.25) over density parameter. Thus, each of models is characterized by different density distribution of matter. The method is based on the search within grid models the optimal one that reproduce in the best way the values of the following observed diagnostic ratios between emission line intensities: [O II] $\lambda 3726\text{\AA}/\lambda 3729\text{\AA}$, [O III] $\lambda 51.8\text{mic}/\lambda 88.3\text{mic}$, [S II] $\lambda 6716\text{\AA}/\lambda 6731\text{\AA}$, [S III] $\lambda 18.7\text{mic}/\lambda 33.5\text{mic}$. We used this method to determine the density distribution parameters in PNe IC 5117 та NGC 7293. These parameters were compared with ones obtained using optimized photoionization modelling of these objects..

Key words: planetary nebulae, dust grains, photoionization modelling, density distribution

**СЕТКОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА В ОБОЛОЧКАХ ПЛАНЕТАРНЫХ
ТУМАННОСТЕЙ**

М. Кашеба, Б. Мелех

*Львовский Национальный университет имени Ивана Франка
кафедра астрофизики
ул. Кирила и Мефодия, 8, 79000, Львов, Украина
e-mail: bmelekh@gmail.com*

Разработан новый метод определения параметров радиального распределения плотности в оболочках планетарных туманностей (ПТ) в представлении Головатого-Малькова на основе результатов сетки газопылевых фотоионизационных моделей свечения ПТ Галактики, рассчитаной вдоль эволюционных треков их ядер с малым шагом (0.25) по значениям параметра плотности. Таки образом каждая модель характеризуется отличным от других моделей распределением плотности вещества в оболочках ПТ. Суть метода лежит в поиске среди моделей сетки той, которая воспроизводит наилучшим образом следующие наблюдательные отношения между интенсивностями эмиссионных линий: [O II] $\lambda 3726\text{\AA}/\lambda 3729\text{\AA}$, [O III] $\lambda 51.8\text{\AA}/\lambda 88.3\text{\AA}$, [S II] $\lambda 6716\text{\AA}/\lambda 6731\text{\AA}$, [S III] $\lambda 18.7\text{mic}/\lambda 33.5\text{mic}$. Метод апробирован на определении параметров распределения плотности вещества в оболочках ПТ IC 5117 та NGC 7293, которые мы сравнили с результатами поиска оптимальной фотоионизационной модели свечения для этих объектов.

Ключевые слова: Планетарные туманности, пыль, фотоионизационное моделирование, распределение плотности