

## ЙОНІЗАЦІЙНО-КОРЕКЦІЙНІ ФАКТОРИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХЕМІЧНОГО ВМІСТУ ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ З НЕОДНОРІДНИМ РОЗПОДІЛОМ ГУСТИНИ НЕБУЛЯРНОГО ГАЗУ

Н. В. Гаврилова, В. В. Головатий, Б. Я. Мелех  
*Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету,  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна*  
(Отримано 31 липня 2002 р.)

Розраховано 270 фотойонізаційних моделей свічення планетарних туманностей. Вільними параметрами сітки були розподіл енергії в спектрі випромінювання ядра за  $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$ , фактор наповнення та хемічний склад. Значення  $T_*$  та  $g_*$  моделей узято з еволюційних треків Блокера. Розподіли енергії в спектрах випромінювання ядер за  $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$  відповідали моделям атмосфер Клегга–Міддлемасса, скорегованим за наявності зоряного вітру. Фотойонізаційні моделі вважали сферично-симетричними, радіальний розподіл густини газу в їхніх оболонках задано емпіричним співвідношенням, отриманим з аналізу карт ізофот реальних планетарних туманностей. Для розрахунку моделей свічення туманностей була використана програма Г. Ферланда Cloudy 94. Отримані в результаті інтегральні спектри проаналізовано звичайним методом діагностики небулярного газу. Розраховані таким чином відносні вмісти різних йонів були застосовані для визначення аналітичних виразів для ICF. У результаті знайдено нові ICF, які плануємо використати для уточнення хемічного вмісту галактичних планетарних туманностей.

**Ключові слова:** планетарні туманності, фотойонізаційні моделі свічення, йонізаційно-корекційні фактори.

PACS number(s): 98.38.Am, 98.38.Ly

### І. РОЗРАХУНОК ФОТОЙОНІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СВІЩЕННЯ ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

Труднощі у визначенні хемічного вмісту планетарних туманностей (ПТ) полягають у тому, що не всі емісійні лінії і не всіх йонів хемічних елементів спостерігаються в спектрах туманностей. Звичайно для встановлення хемічного складу ПТ використовували йонізаційно-корекційні фактори (ICF), основані на близькості потенціалів йонізації. Однак вони не враховують відмінностей ефективних перерізів фотойонізації та умов збудження свічення різних йонів. Очевидно, що точнішим методом визначення ICF є їх пошук з розрахунків сітки фотойонізаційних моделей свічення (ФМС) ПТ.

Для побудови сітки ФМС ПТ ми застосували програму Г. Ферланда CLOUDY 94 [1,2], оскільки в ній залучені найновіші дані про ймовірності атомних процесів. З цією метою, використовуючи Perl5 [3], ми написали драйвер CLOUDY 94 для побудови сітки ФМС, а також деякі функції, які були додані в CLOUDY 94 для формування вхідних файлів програми діагностики плазми газових туманностей DIAGN [4].

Для вибору параметрів ФМС, що підлягали розрахунку, ми послуговувались еволюційними треками Блокера [5,6]. У цій роботі використано розподіл енергії в спектрі випромінювання ядер за  $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$  з моделей зоряних атмосфер Клегга–Міддлемасса [7], скорегований за наявності зоряного вітру [8]. Для побудови сітки ФМС за основу взято хемічний уміст, середній для ПТ:

$$\begin{aligned} \text{H} : \text{He} : \text{C} : \text{N} : \text{O} : \text{Ne} : \text{Mg} : \text{Si} : \text{S} : \text{Ar} &= 1 : 0.120 : 3.93 \times 10^{-4} : 1.21 \times 10^{-4} : 3.89 \times 10^{-4} : 6.76 \times 10^{-5} \\ &: 4.20 \times 10^{-6} : 1.00 \times 10^{-5} : 7.99 \times 10^{-6} : 1.59 \times 10^{-6}. \end{aligned} \quad (1)$$

При розрахунку кожної з ФМС ми використали також хемічний уміст у два рази більший і у два рази менший від середнього, а відносний уміст гелію взято рівним 0.07, 0.12 та 0.20 відповідно.

У результаті побудовано сітку ФМС, вільними параметрами якої були прийняті :

1) розподіл енергії, що відповідає температурам кожної з 30 вибраних моделей;

2) хемічний уміст небулярного газу в моделях;  
 3) фактор наповнення [9], значення якого для кожної з моделей вважали рівними 0.1, 0.5 та 1.

Усі моделі приймали сферично-симетричними, а радіальний розподіл густини газу в їхніх оболонках задавали емпіричним співвідношенням, отриманим з аналізу карт ізотоп реальних планетарних туманностей [10]. Розрахунок емісійного лінійчатого спектра в кожній з моделей продовжували до досягнення йонізаційної межі, що відповідає  $T_e \approx 4000^\circ \text{K}$ . Дифузне йонізуюче випромінювання обчислювали комбінованим “outward only” – “on-the-spot” методом [11].

У результаті розраховано 270 ФМС ПТ. Інтегральні спектри цих моделей уважали “спостережуваними” і проаналізували звичайним методом діагностики небулярного газу, унаслідок чого встановлено  $T_e$ ,  $n_e$  та відносні вмісти йонів  $A^{+i}/H^+ \equiv (A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$ . Саме так аналізують спостережуваний лінійний спектр реальних ПТ. Для визначення  $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$  ми використали програму DIAGN, опис якої наведений в [4], але з атомними даними, що відповідають програмі Cloudy 94. Відзначимо, що знайдені таким чином значення  $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$  для більшості йонів відрізняються від  $(A^{+i}/H^+)_{\text{mod}}$  (рис. 1). Ми вважаємо, що  $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$  є точнішими, оскільки зі спостережень вони визначаються саме таким способом.

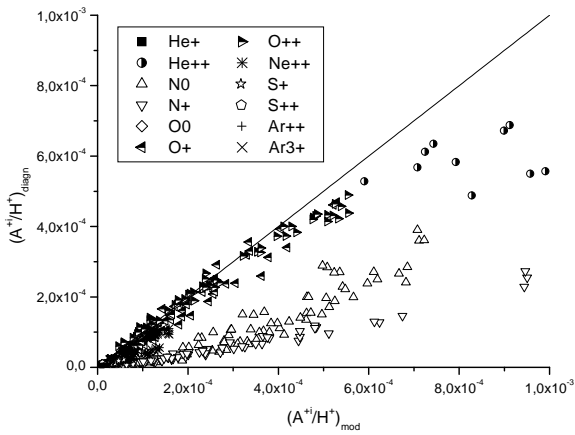


Рис. 1. Порівняння відносних йонних умістів  $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$  та  $(A^{+i}/H^+)_{\text{mod}}$ .

Знайдені так усереднені відносні йонні вмісти, електронні концентрації та температури всіх 270 моделей містяться на FTP сервері Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету за адресою :

<ftp://astro.franko.lviv.ua/pub/PN/PNGrid.tar.gz>

## II. НОВІ ICF ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХЕМІЧНОГО ВМІСТУ НЕБУЛЯРНОГО ГАЗУ

Для визначення хемічного вмісту газу в ПТ ми розглянули залежності, що пов'язують йонні вмісти

$(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$  з повним умістом  $A/H$  [12]:

$$\lg[(A^{+i}/H^+)/(A/H)] = f(x), \quad x = \lg(X^{+k+1}/X^{+k}), \quad (2)$$

звідки

$$\lg(A/H) = \lg(A^{+i}/H^+) - f(x)$$

або

$$A/H = 10^{-f(x)} (A^{+i}/H^+) \equiv \text{ICF}(A) (A^{+i}/H^+).$$

Тут  $f(X^{+k+1}/X^{+k})$  — деякі апроксимаційні функції, а відношення  $X^{+k+1}/X^{+k}$  відповідає  $\text{He}^{++}/\text{He}^+$ ,  $\text{O}^{++}/\text{O}^+$ ,  $\text{S}^{++}/\text{S}^+$  або  $\text{Ar}^{3+}/\text{Ar}^{2+}$ .

Ми проаналізували різні залежності типу (2) для йонів, лінії яких спостерігаємо у спектрах ПТ. Дві з цих залежностей, які можуть бути використані для визначення вмістів  $\text{He}/H$  та  $N/H$  за спостережуваними відношенням інтенсивностей ліній  $[\text{HeII}]/H_\beta$  та  $[\text{OII}]/H_\beta$ , показані на рис. 2. Вони апроксимовані поліноміальною функцією:

$$f(x) = \sum_{n=0}^3 C_n x^n, \quad (3)$$

де  $C_n$  — коефіцієнти полінома, які наведено в табл. 1.

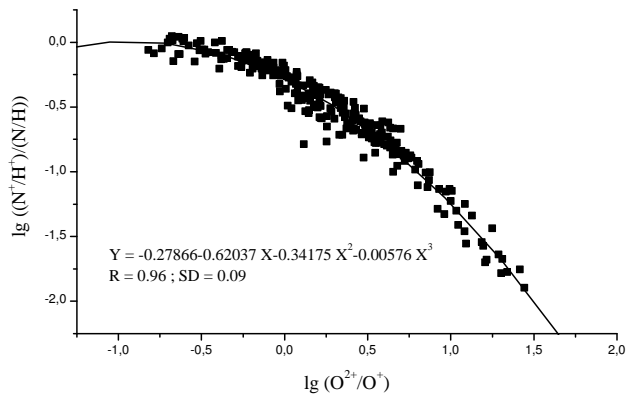
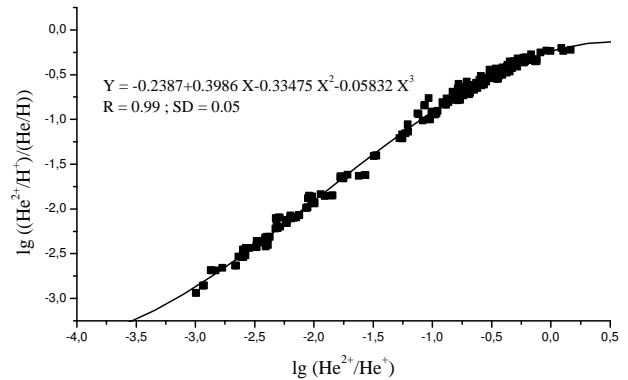


Рис. 2. Залежність між  $\lg[(\text{He}^{2+}/\text{H}^+)/(H/H)]$  та  $\lg(\text{He}^{2+}/\text{He}^+)$ ;  $\lg[(N^+/H^+)/(N/H)]$  та  $\lg(\text{O}^{2+}/\text{O}^+)$ .

У цій таблиці подано поліноміальні апроксимації для визначення вмістів також інших хемічних елементів. Тут у кол. 1 наведено порядковий номер виразу для ICF, у кол. 2 — відносний уміст  $i$ -тої стадії йонізації  $A^{+i}/H^+$  хемічного елемента  $A$ , у кол. 3 — йонні вмісти елементів сусідніх стадій йонізації  $X^{+k+1}/X^{+k}$ , у кол. 4–7 — коефіцієнти поліноміального розкладу  $C_0, C_1, C_2, C_3$ , у кол. 8 — коефіцієнт

кореляції ( $R$ ) для кожного виразу відповідно. Вказані також межі застосування кожного виразу, тобто межі зміни величин  $x = \lg(X^{+k+1}/X^{+k})$ . Перевага цього методу визначення хемічного вмісту полягає в тому, що величини  $A/H$  можна встановити з відповідних інтенсивностей ліній, що спостерігаються лише в одній стадії йонізації.

N	$A^{+i}/H^+$	$X^{+k+1}/X^{+k}$	Коефіцієнти полінома				$R$	calc/mod
			$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$		
He/H								
1, 2 ( $x \in [-3.012 \dots -0.173]$ )								
1	He <sup>+</sup>	He <sup>2+</sup> /He <sup>+</sup>	-0.23870	-0.60140	-0.33475	-0.05832	0.91	1.011
2	He <sup>2+</sup>	He <sup>2+</sup> /He <sup>+</sup>	-0.23870	0.39860	-0.33475	-0.05832	0.99	1.011
O/H								
3, 5 ( $x \in [-0.848 \dots 1.445]$ ); 4, 7 ( $x \in [-0.601 \dots 1.111]$ ); 6 ( $x \in [-1.538 \dots -0.278]$ )								
3	O <sup>0</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.55745	-0.60001	-0.29266	-0.26891	0.86	1.106
4	O <sup>0</sup>	S <sup>2+</sup> /S <sup>+</sup>	-0.40322	-0.91849	-0.73947	-0.28272	0.91	1.055
5	O <sup>+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.28283	-0.59360	-0.41503		0.91	1.033
6	O <sup>+</sup>	Ar <sup>3+</sup> /Ar <sup>2+</sup>	-1.36930	-2.26755	-1.44714	-0.32455	0.84	1.041
7	O <sup>2+</sup>	S <sup>2+</sup> /S <sup>+</sup>	-0.37506	0.76762	-0.80102		0.65	1.008
N/H								
8, 10 ( $x \in [-0.842 \dots 1.445]$ ); 9, 11 ( $x \in [-0.589 \dots 1.093]$ ); 12 ( $x \in [-2.069 \dots 0.121]$ )								
8	N <sup>0</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-1.05348	-0.42614	-0.30078	-0.83380	0.75	0.663
9	N <sup>0</sup>	S <sup>2+</sup> /S <sup>+</sup>	-0.88821	-0.75088	-0.59492	-1.65986	0.89	0.649
10	N <sup>+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.27782	-0.62239	-0.34683		0.96	1.149
11	N <sup>+</sup>	S <sup>2+</sup> /S <sup>+</sup>	-0.16105	-0.71193	-1.04641	0.30716	0.88	1.189
12	N <sup>+</sup>	Ar <sup>3+</sup> /Ar <sup>2+</sup>	-1.30959	-2.17432	-1.43771	-0.34048	0.84	0.870
S/H								
13 ( $x \in [-0.821 \dots 1.467]$ ); 14 ( $x \in [-0.598 \dots 1.093]$ ); 15 ( $x \in [-2.077 \dots 0.121]$ ); 16 ( $x \in [-0.842 \dots 1.424]$ )								
13	S <sup>+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.33362	-0.62060	-0.26100	-0.07336	0.94	1.021
14	S <sup>+</sup>	S <sup>2+</sup> /S <sup>+</sup>	-0.20142	-0.86441	-0.72479	0.11284	0.94	1.015
15	S <sup>+</sup>	Ar <sup>3+</sup> /Ar <sup>2+</sup>	-1.37852	-2.40162	-1.76205	-0.45096	0.79	1.093
16	S <sup>2+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.17925	-0.03041	-0.36595	0.03666	0.78	1.007
Ar/H								
17 ( $x \in [-0.821 \dots -1.424]$ ); 18, 20 ( $x \in [-2.060 \dots 0.122]$ ); 19 ( $x \in [-0.864 \dots 1.445]$ )								
17	Ar <sup>2+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.07643	-0.22497	-0.23215	0.03283	0.76	1.017
18	Ar <sup>2+</sup>	Ar <sup>3+</sup> /Ar <sup>2+</sup>	-0.55070	-1.00470	-0.63547	-0.13461	0.78	1.015
19	Ar <sup>3+</sup>	O <sup>2+</sup> /O <sup>+</sup>	-0.98922	1.05332	-0.59124	-0.03053	0.88	1.050
20	Ar <sup>3+</sup>	Ar <sup>3+</sup> /Ar <sup>2+</sup>	-0.55070	-0.00471	-0.63547	-0.13461	0.95	1.015

Таблиця 1. Йонізаційно-корекційні фактори для визначення хемічного складу планетарних туманностей.

Усі отримані апроксимаційні вирази були протестовані так. Спочатку для кожної моделі сітки ФМС за кожним із виразів для ICF ми визначали хемічний уміст  $(A/H)_{\text{calc}}$  за йонними концентраціями, отриманими програмою DIAGN. Потім знайдені таким чином  $(A/H)_{\text{calc}}$  порівнювали з відповідними модельними значеннями  $(A/H)_{\text{mod}}$ . Одержані співвідношення  $(A/H)_{\text{calc}}/(A/H)_{\text{mod}}$  за кожним із виразів

усереднювали за всією кількістю моделей сітки, для якої визначалося  $A/H$ . Результат такого тестування наведено в кол. 9 табл. 1. Чим ближче відношення  $(A/H)_{\text{calc}}/(A/H)_{\text{mod}}$  до 1, тим відповідні апроксимаційні вирази є точнішими. Зрозуміло, що для визначення хемічного вмісту реальних ПТ будуть використані вирази з табл. 1 з найменшим відхиленням від одиниці.

- [1] G. J. Ferland, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy 94*, Univ. of Kentucky, Phys. Dept. Internal Report (1999).  
 [2] <http://www.pa.uky.edu/gary/cloudy>.  
 [3] <http://www.perl.com/pub>.  
 [4] В. В. Головатий, Р. Е. Гершберг, Ю. Ф. Мальков, В. И. Проник, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **96**, 1 (1999).  
 [5] T. Bloeker, *Astron. Astrophys.* **297**, 727 (1995).  
 [6] T. Bloeker, *Astron. Astrophys.* **299**, 755 (1995).  
 [7] R. E. S. Clegg, D. Middlemass, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **229**, 759 (1987).  
 [8] Н. В. Гаврилова, О. В. Рокач, *Вісн. астрон. школи* **2**, N1, 82 (2001).  
 [9] D. E. Osterbrock, E. Flather, *Astrophys. J.* **129**, 26 (1959).  
 [10] V. V. Golovaty, Yu. F. Malkov, *Sov. Astron.* **36**, 599 (1992).  
 [11] G. J. Ferland, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy*, Univ. of Kentucky, Dept. of Phys. and Astron. Internal Report (1996).  
 [12] В. В. Головатый, В. И. Дмитерко, Ю. Ф. Мальков, О. В. Рокач, *Астрон. журн.* **70**, 691 (1993).

**IONIZATION-CORRECTION FACTORS FOR THE CHEMICAL COMPOSITION  
 DETERMINATION OF PLANETARY NEBULAE WITH INHOMOGENEITY NEBULAR GAS  
 DISTRIBUTION**

N. V. Havrylova, V. V. Holovaty, B. Ya. Melekh  
*Astronomical Observatory of Ivan Franko National University of Lviv*  
*8 Kyryla i Mefodiya Str., Lviv, UA-79005, Ukraine*

*e-mail: natalya@astro.franko.lviv.ua, gol@astro.franko.lviv.ua, melekh@astro.franko.lviv.ua*

The photoionization models grid of the planetary nebulae luminescence was calculated. Free parameters for the grid were energy distribution at the wavelengths  $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$ , filling factor and chemical composition.  $T_*$  and  $r_*$  in the models were selected from Blocker's evolutionary tracks. Energy distributions in nuclei radiation spectra at the wavelengths  $\lambda \leq 912 \text{ \AA}$  were taken from Clegg–Middlemass stellar atmosphere models, revised on the stellar wind presence. The nebular shell was assumed to be spherically-symmetrical. The radial distribution of nebular gas density was given by the empirical expression that was derived by approximating surface brightness distribution for the real planetary nebulae. For the grid modeling we used the Cloudy 94 Ferland's code. Obtained integrated spectra were analyzed using common nebular gas diagnostic method. Relative abundances of different ions, calculated by this method were used for the determination of analytical expressions for ICFs. As a result, new ICFs were found and we are going to use these ICFs for obtaining chemical abundances of galactic planetary nebulae more exactly.