



УДК 524.37

Іонізаційно-корекційні фактори для визначення хімічного вмісту галактичних планетарних туманностей з врахуванням флуктуацій густини газу в їх оболонках

Н.В. Гаврилова

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка

Розраховано 270 фотоіонізаційних моделей свічення планетарних туманностей. Вільними параметрами сітки моделей були розподіл енергії в спектрі випромінювання ядра за $\lambda \leq 912\text{\AA}$, фактор наповнення та хімічний склад. Значення T_* та r_* моделей свічення бралися з еволюційних треків Блокера. Розподіли енергії в спектрах випромінювання ядер за $\lambda \leq 912\text{\AA}$ відповідали моделям зоряних атмосфер Клегга–Міддлемасса, скоригованим за присутність зоряного вітру. Фотоіонізаційні моделі приймалися сферично-симетричними, радіальний розподіл густини газу в їх оболонках задавався емпіричним співвідношенням, отриманим з аналізу карт ізотоп реальних планетарних туманностей. Флуктуації густини накладалися на такий розподіл, використовуючи стандартний генератор випадкових чисел. Для розрахунку моделей свічення туманностей була використана програма Г.Ферланда Cloudy 94. Отримані в результаті інтегральні спектри аналізувалися звичайним методом діагностики небулярного газу. Розраховані таким чином відносні вмісти різних іонів були використані для визначення аналітичних виразів для ICF. При аналізі спектрів до уваги приймалися емісійні лінії, найменш чутливі до наявності флуктуацій густини газу. В результаті були знайдені нові ICF, які планується використати для уточнення хімічного вмісту галактичних планетарних туманностей.

ИОНИЗАЦИОННО-КОРРЕКЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ С УЧЕТОМ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ГАЗА В ИХ ОБОЛОЧКАХ, Гаврилова Н.В. — Рассчитано 270 фотоионизационных моделей свечения планетарных туманностей. Свободными параметрами сетки моделей были распределение энергии в спектре излучения ядра за $\lambda \leq 912\text{\AA}$, фактор наполнения и химический состав. Значения T_* и r_* моделей свечения взяты с эволюционных треков Блокера. Распределения энергии в спектрах излучения ядер за $\lambda \leq 912\text{\AA}$ соответствовали моделям звездных атмосфер Клегга–Миддлемасса, скорректированным за наличие звездного ветра. Фотоионизационные модели принимались сферически-симметричными, радиальное распределение плотности газа в их оболочках задавалось эмпирическим соотношением, полученным с анализа карт изотоп реальных планетарных туманностей. Флуктуации плотности накладывались на такое распределение, используя стандартный генератор случайных чисел. Для расчета моделей свечения туманностей была использована программа Г.Ферланда Cloudy 94. Полученные в результате интегральные спектры анализировались обычным методом диагностики небулярного газа. Рассчитанные таким способом относительные содержания различных ионов были использованы для определения аналитических выражений для ICF. При анализе спектров брались во внимание эмиссионные линии, наименее чувствительные к наличию флуктуаций плотности газа. В результате были найдены новые ионизационно-коррекционные факторы, которые планируется использовать для уточнения химического содержания галактических планетарных туманностей.

IONIZATION-CORRECTION FACTORS FOR THE CHEMICAL COMPOSITION DETERMINATION OF PLANETARY NEBULAE WITH DENSITY GAS FLUCTUATIONS TAKING INTO ACCOUNT, by Havrylova N.V. — 270 photoionization models of planetary nebulae luminescence was calculated. Free parameters for the models grid were energy distribution at the wavelengths $\lambda \leq 912\text{\AA}$, filling factor and chemical composition. T_* and r_* in 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, which was derived by approximating surface brightness distribution for the real planetary nebulae. Density fluctuations were randomly imposed on this distribution. 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 determination of analytical expressions for ICFs. Under this spectra analysis the emission lines, for which the

influence of density fluctuations may be neglected, were taken into account. As a result, new ICFs were found, and we would going to use these ICFs for obtaining chemical abundances of galactic planetary nebulae more exactly.

1. РОЗРАХУНОК ФОТОІОНІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СВІЧЕННЯ ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

В цій статті ми продовжуємо дослідження хімічного вмісту галактичних планетарних туманностей (ПТ) з врахуванням різного типу неоднорідностей густини газу в їх оболонках. Визначення хімічного вмісту цих об'єктів є важливим для вивчення зоряного нуклеосинтезу, історії зореутворення та особливостей хімічної еволюції речовини в Галактиці. Звичайно для визначення хімічного складу ПТ використовували т.з. іонізаційно-корекційні фактори (ICF), основані на близькості потенціалів іонізації. Однак вони не враховують відмінностей ефективних перерізів фотоіонізації та умов збудження свічення різних іонів. Очевидно, що більш точним методом визначення ICF є їх пошук з розрахунків сітки фотоіонізаційних моделей свічення (ФМС) ПТ.

Для побудови сітки ФМС ПТ ми використали програму Г.Ферланда CLOUDY 94 [9,10], оскільки в ній використані найновіші дані про ймовірності атомних процесів. Використовуючи Per15 [11], нами був написаний 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 [3].

Параметри ФМС, які підлягали розрахунку, ми взяли з еволюційних треків Блокера [5, 6]. Ми використали розподіл енергії в спектрі випромінювання ядер за $\lambda \leq 912\text{Å}$ з моделей зоряних атмосфер Клегга–Міддлемасса [7], який було скореговано за присутність зоряного вітру [1]. Для побудови сітки ФМС за основу був взятий середній для ПТ хімічний вміст:

$$\begin{aligned} \text{H} : \text{He} : \text{C} : \text{N} : \text{O} : \text{Ne} : \text{Mg} : \text{Si} : \text{S} : \text{Ar} = 1 : 0.12 : 3.93 \cdot 10^{-4} : 1.21 \cdot 10^{-4} : \\ : 3.89 \cdot 10^{-4} : 6.76 \cdot 10^{-5} : 4.20 \cdot 10^{-6} : 1.00 \cdot 10^{-5} : 7.99 \cdot 10^{-6} : 1.59 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (1)$$

При розрахунку кожної з ФМС ми використали також хімічний вміст в два рази більший і в два рази менший середнього. Відносний вміст гелію був змінним і брався рівним 0.07, 0.12 та 0.20 відповідно.

В результаті була побудована сітка ФМС, вільними параметрами якої були прийняті: 1) розподіл енергії, який відповідає температурам кожної з 30 вибраних моделей; 2) хімічний вміст небулярного газу в моделях; 3) фактор наповнення [12], значення якого для кожної з моделей приймалися рівними 0.1, 0.5 та 1.

Всі моделі приймалися сферично-симетричними. Щоб врахувати різного типу неоднорідності густини газу в оболонках ПТ, в першому наближенні ми використали розподіл, близький до реального. Цей радіальний розподіл густини газу в оболонках туманностей задавався емпіричним співвідношенням, отриманим з аналізу карт ізотоп реальних планетарних туманностей [4] :

$$n(r) = \frac{x^2(1 + 3e^{-1.2x})}{(x^2 - 1) + 0.36r_c^{-0.43}x^2r_c^2} \frac{A}{r_c^2} \text{ см}^{-3}, \quad (2)$$

де $x = r/r_c$ та $r_c = \langle V_{\text{exp}} \rangle t$. Тут r — відстань від центральної зірки до певної точки туманності, n — густина газу в цій точці, $\langle V_{\text{exp}} \rangle$ — середня швидкість розширення оболонки (біля 15 км/с), а t — вік оболонки (в (2) величини r та r_c задаються в парсеках). Параметер r_c характеризує вік оболонки, а параметер A є близьким до 1.6 для більшості ПТ з центральними зорями низьких мас і зростає при збільшенні маси ядра туманності.

Наступним кроком було врахування наявності флуктуацій густини газу в оболонках ПТ. Була побудована програма, яка на розподіл (2) накладала неоднорідності випадковим чином, використовуючи стандартний генератор випадкових чисел (модифікована версія програми з [2]). Вхідними параметрами програми є:

1) параметри оболонки туманності: r_c та A (див. рівняння (2)), внутрішній та зовнішній радіуси оболонки r_{in} , r_{out} (ми приймали $r_{\text{in}} = r_c/3$, $r_{\text{out}} = 3r_c$),

2) параметри неоднорідностей: n_{min} , n_{max} — кількість флуктуацій (від 5 до 15), d_{min} , d_{max} —

Таблиця 1. Іонізаційно-корекційні фактори для визначення хімічного складу планетарних туманностей з врахуванням флуктуацій густини газу в їх оболонках

№	A^{+i}/H^+	X^{+k+1}/X^{+k}	Коефіцієнти поліному				R	$calc/mod$
			C_0	C_1	C_2	C_3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
He/H								
1($x \in [-3.696 \dots 0.178]$); 2($x \in [-3.523 \dots -0.050]$)								
1	He^+	He^{2+}/He^+	-0.22559	-0.53991	-0.26862	-0.04109	0.74	1.014
2	He^{2+}	He^{2+}/He^+	-0.13271	0.77099	-0.04971		0.99	1.011
O/H								
3($x \in [-0.332 \dots 1.029]$); 4($x \in [-0.236 \dots 1.098]$); 5($x \in [-2.081 \dots -0.177]$); 6($x \in [-0.843 \dots 1.315]$); 7($x \in [-0.351 \dots 0.7263]$)								
3	O^0	S^{2+}/S^+	-0.41273	-0.83224	-0.98153	-0.14280	0.86	1.047
4	O^+	O^{2+}/O^+	-0.28347	-0.60137	-0.41236		0.89	1.105
5	O^+	Ar^{3+}/Ar^{2+}	-1.35031	-2.19380	-1.37347	-0.30467	0.84	1.043
6	O^{2+}	O^{2+}/O^+	-0.29168	0.46012	-0.39720	-0.07055	0.94	1.040
7	O^{2+}	S^{2+}/S^+	-0.38583	0.78229	-0.68946	-0.13053	0.67	1.006
N/H								
8,10($x \in [-0.360 \dots 0.668]$); 9($x \in [-0.794 \dots 1.414]$); 11($x \in [-2.081 \dots -0.052]$)								
8	N^0	S^{2+}/S^+	-0.85448	-0.90346	-1.21136	-0.409510	0.81	0.660
9	N^+	O^{2+}/O^+	-0.27858	-0.62863	-0.34379		0.96	1.145
10	N^+	S^{2+}/S^+	-0.18648	-0.68632	-0.76086		0.87	1.177
11	N^+	Ar^{3+}/Ar^{2+}	-1.28947	-2.09108	-1.34620	-0.31297	0.84	0.872
S/H								
12($x \in [-0.769 \dots 1.340]$); 13($x \in [-0.351 \dots 1.098]$); 14($x \in [-2.050 \dots -0.021]$); 15($x \in [-0.601 \dots 1.340]$)								
12	S^+	O^{2+}/O^+	-0.32238	-0.65139	-0.32790		0.93	1.031
13	S^+	S^{2+}/S^+	-0.19761	-0.85607	-0.76149	0.12733	0.95	1.012
14	S^+	Ar^{3+}/Ar^{2+}	-1.36016	-2.31242	-1.65119	-0.41463	0.79	1.095
15	S^{2+}	O^{2+}/O^+	-0.18345	-0.03747	-0.31307	-0.00846	0.76	1.014
Ar/H								
16($x \in [-0.794 \dots 1.196]$); 17($x \in [-2.081 \dots 0.062]$); 18($x \in [-0.754 \dots 0.621]$); 19($x \in [-2.092 \dots -0.167]$);								
16	Ar^{2+}	O^{2+}/O^+	-0.08066	-0.22004	-0.20368		0.74	1.022
17	Ar^{2+}	Ar^{3+}/Ar^{2+}	-0.55086	-1.00056	-0.62990	-0.13395	0.78	1.015
18	Ar^{3+}	O^{2+}/O^+	-0.98865	1.05557	-0.57037	-0.06337	0.88	1.051
19	Ar^{3+}	Ar^{3+}/Ar^{2+}	-0.55086	-5.68722	-0.62990	-0.13395	0.96	1.013

розміри флуктуацій в процентах відносно радіусу болонки $r = r_{out} - r_{in}$ (0.5%–5%), ρ_{min}, ρ_{max} — величина відхилення густини неоднорідності від основного розподілу (2) (від 5% до 30%) та N — величина накладання самих флуктуацій (до 20%).

Задані параметри неоднорідностей узгоджуються зі спостережуваними даними.

Флуктуації густини газу представлялися кульовим поясом (при факторі наповнення, рівним 1), а також ми накладали інший тип неоднорідності (зі зміною фактора наповнення). Флуктуації накладалися таким чином, щоб загальна маса оболонки моделі туманності зберігалась. Результатом програми є файл з розподілом густини газу вздовж радіусу оболонки туманності із заданою кількістю точок виводу. Для прикладу на рис. 1 ми навели по два розподіли густини газу в радіальному напрямку оболонки ФМС з різними значеннями параметрів r_c та A (без та при наявності флуктуацій густини). Взагалі при моделюванні значення параметру r_c змінювалось від $1.23 \cdot 10^{-2}$ до $7.30 \cdot 10^{-2}$ пк, а параметр A набував значень в проміжку від 0.312 до 32.7.

В результаті була побудована сітка ФМС, вільними параметрами якої були прийняті: 1) розподіл енергії, який відповідає температурам кожної з 30 вибраних моделей; 2) хімічний вміст небуляр-

ного газу в моделях; 3) фактор наповнення [12], значення якого для кожної з моделей приймалися рівними 0.1, 0.5 та 1. Параметри кожної з 30 обраних моделей (маса ядра моделі туманності, вік, ефективна температура та радіус) містяться на FTP сервері Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету за адресою <ftp://astro.franko.lviv.ua/pub/PN/Modparameters.tar.gz>

Розрахунок емісійного лінійчатого спектру в кожній з моделей продовжувався до досягнення іонізаційної межі, що відповідає $T_e \approx 4000^\circ K$. Дифузне іонізуюче випромінювання розраховувалося комбінованим “outward only” – “on-the-spot” методом [8]. При аналізі спектрів до уваги приймалися емісійні лінії, найменш чутливі до наявності флуктуацій густини газу [2].

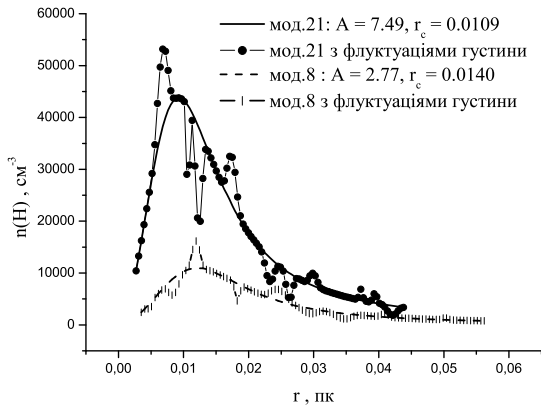


Рис. 1. Радіальні розподіли густини газу в оболонках двох моделей планетарних туманностей
вважаємо, що $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$ є більш точними, оскільки зі спостережень вони визначаються саме таким способом.

Знайдені таким чином усереднені відносні іонні вмісти, електронні концентрації та температури всіх 270 моделей розташовані на FTP сервері Астрономічної обсерваторії Львівського національного університету за адресою <ftp://astro.franko.lviv.ua/pub/PN/PNGridfluct.tar.gz>

2. НОВІ ICF ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНОГО ВМІСТУ НЕБУЛЯРНОГО ГАЗУ

Для визначення хімічного вмісту газу в ПТ ми розглянули залежності, що пов'язують іонні вмісти $(A^{+i}/H^+)_{\text{diagn}}$ з повним вмістом A/H , наступним чином [4]:

$$\lg \frac{(A^{+i}/H^+)}{(A/H)} = f(x), \quad x = \lg \frac{X^{+k+1}}{X^{+k}}, \quad (3)$$

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

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

Були розглянуті різні залежності типу (3) для іонів, лінії яких спостерігаються в спектрах ПТ. Дві з цих залежностей, які можуть бути використані для визначення вмістів S/H та Ar/H за спостережуваним відношенням інтенсивностей ліній $[SII]/H_\beta$ і $[ArIII]/H_\beta$, показані на рис. 2. Вони були апроксимовані поліноміальною функцією:

$$f(x) = \sum_{n=0}^3 C_n x^n, \quad (4)$$

де C_n – коефіцієнти поліному, які приведені в табл. 1. В цій таблиці приведені поліноміальні апроксимації для визначення вмістів також інших хімічних елементів. Тут в кол.1 наведено порядковий номер виразу для ICF, в кол.2 – відносний вміст i -тої стадії іонізації A^{+i}/H^+ хімічного елемента A , в кол.3 – іонні вмісти елементів сусідніх стадій іонізації X^{+k+1}/X^{+k} , в кол.4–7 – коефі-

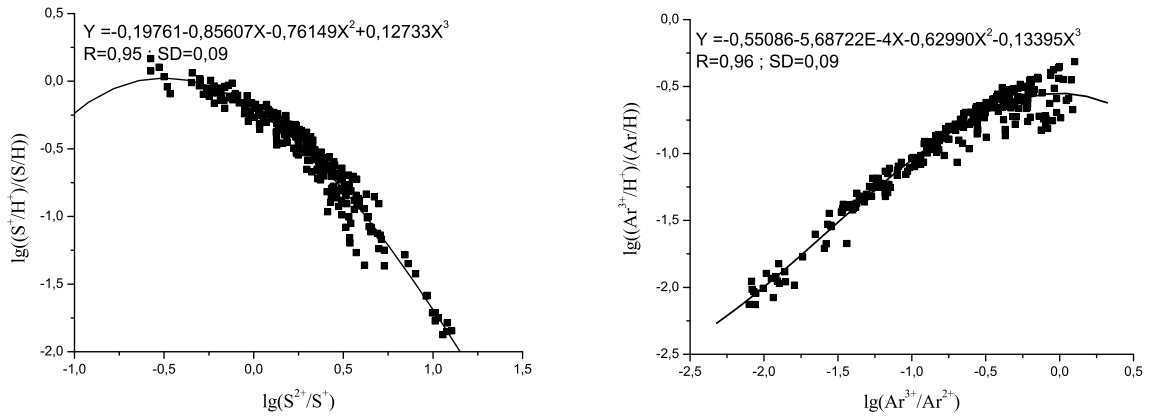


Рис. 2. Залежність між $\lg \frac{S^+/H^+}{S/H}$ та $\lg \frac{S^{2+}}{S^+}$; $\lg \frac{Ar^{3+}/H^+}{Ar/H}$ та $\lg \frac{Ar^{3+}}{Ar^{2+}}$

цієнти поліноміального розкладу C_0, C_1, C_2, C_3 , в кол.8 — коефіцієнт кореляції (R) для кожного виразу відповідно. Подані також межі застосування кожного виразу, тобто межі зміни величин $x = \lg(X^{+k+1}/X^{+k})$. Перевага цього методу визначення хімічного вмісту полягає в тому, що величини A/H можна визначати з відповідних інтенсивностей ліній, що спостерігаються лише в одній стадії іонізації.

Всі отримані апроксимаційні вирази були протестовані наступним чином. Спочатку для кожної моделі сітки ФМС за кожним з виразів для ICF ми визначали хімічний вміст $(A/H)_{\text{calc}}$ за іонними концентраціями, отриманими методом DIAGN. Потім знайдені таким чином $(A/H)_{\text{calc}}$ порівнювались із відповідними модельними значеннями $(A/H)_{\text{mod}}$. Отримані таким чином співвідношення $(A/H)_{\text{calc}}/(A/H)_{\text{mod}}$ за кожним з виразів усереднювались за всією кількістю моделей сітки, для якої визначалося A/H . Результат такого тестування приведений в кол.9 табл.1. Чим ближче відношення $(A/H)_{\text{calc}}/(A/H)_{\text{mod}}$ до 1, тим відповідні апроксимаційні вирази є більш точними. Зрозуміло, що для визначення хімічного вмісту реальних ПТ будуть використані вирази з табл.1 з найменшим відхиленням від одиниці.

Автор висловлює особливу подяку м.н.сп. Львівської астрономічної обсерваторії Б.Я.Мелеху за допомогу в розробці програмного забезпечення, а також доценту кафедри астрофізики ЛНУ імені Івана Франка В.В.Головатому за корисні поради та зауваження під час роботи над даною статтею.

1. Гаврилова Н.В., Рокач О.В. // Вісник Астрон. Школи. — 2001. — **2**, № 1. — С. 82.
2. Гаврилова Н.В., Тишко Н.Л. // Вісник Астрон. Школи. — 2000. — **1**, № 2. — С. 115.
3. Головатий В.В., Геріберг Р.Е., Ю.Ф.Мальков, В.И.Проник // Известия Крым. астрофиз. обсерв. — 1999. — **96**. — С. 1.
4. Головатий В.В., Дмитерко В.И., Мальков Ю.Ф., Рокач О.В. // Астрон. журн. — 1993. — **70**, в.4. — С. 691.
5. Bloecker T. // Astron. Astrophys. — 1995. — **297**. — P. 727.
6. Bloecker T. // Astron. Astrophys. — 1995. — **299**. — P. 755.
7. Clegg R.E.S., Middlemass D. // MNRAS. — 1987. — **229**. — P. 759.
8. Ferland G.J. Hazy, a Brief Introduction to Cloudy, University of Kentucky, Department of Physics and Astronomy Internal Report, 1996.
9. Ferland G.J. Hazy, a Brief Introduction to Cloudy 94, University of Kentucky, Physics Department Internal Report, 1999.
10. <http://www.pa.uky.edu/~gary/cloudy>
11. <http://www.per1.com/pub>
12. Osterbrock D.E., Flather E. // Astrophys. J. — 1959. — **129**. — P. 26.

Надійшла до редакції 19.05.2003