ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 12, № 1 (2008) 1902(8 с.)

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 12, No. 1 (2008) 1902(8 p.)

ОПТИМІЗОВАНЕ ФОТОЙОНІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СВІТІННЯ ПЛАНЕТАРНОЇ ТУМАННОСТИ NGC 6826

Н. В. Гаврилова, В. В. Головатий, Б. Я. Мелех
Кафедра астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, UA–79005, Україна
(Отримано 25 грудня 2006 р.; в остаточному вигляді — 20 жовтня 2007 р.)

Зображення багатьох планетарних туманностей показують їхню неоднорідну структуру. Наше дослідження проведено на прикладі туманності NGC 6826, спектр якої є добре вивченим. Хемічний склад цієї туманності, який ми знайшли методом розрахунку оптимізованих фотойонізаційних моделей світіння, порівняно з відповідними даними, отриманими з використанням емпіричних виразів. При порівнянні результатів видно, що значення, одержані в наслідок оптимізаційного моделювання, в основному є більшими, ніж за допомогою діягностичного методу. Ми вважаємо, що результати оптимізаційного моделювання точніші, оскільки вони відтворюють спостережуваний спектр NGC 6826. Зміна оптимальних значень вільних параметрів за об'ємом туманности вказує на однорідний розподіл умістів різних хемічних елементів.

Ключові слова: планетарні туманності, оптимізовані фотойонізаційні моделі світіння, хемічний уміст.

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

I. ВСТУП

Планетарні туманності (ПТ) є одним з найпоширеніших типів астрофізичних об'єктів. Вони утворюються на пізніх стадіях еволюції зір проміжної маси (1–8 сонячних мас) при їх переході від асимптотичної гілки гігантів до стадії білого карлика.

Дослідження хемічного вмісту ПТ є важливим для вивчення проблем зоряного нуклеосинтезу, історії зореутворення та особливостей хемічної еволюції речовини в галактиках. Зображення багатьох туманностей показують їхню неоднорідну структуру. Однією з причин цього може бути неоднорідний розподіл хемічних елементів за об'ємом туманности [1], що є предметом нашого дослідження.

Трудність визначення хемічного складу ПТ полягає в тому, що не всі емісійні лінії і не всіх йонів хемічних елементів спостерігаються в їхніх спектрах. Тому для врахування неспостережуваних стадій йонізацій конкретних йонів використовують так звані йонізаційно-корекційні множники (ЙКМ), які пов'язують йонний уміст певного хемічного елемента з його повним хемічним умістом [2, 3]. Але як було показано при обчисленнях, проведених із використанням незалежної від ЙКМ методики розрахунку оптимізованих фотойонізаційних моделей світіння (ОФМС) ПТ, отримані за ЙКМ хемічні вмісти посередньо відтворюють емісійні лінійчасті спектри реальних об'єктів [4]. Тоді як методика розрахунку ОФМС базується на пошуку оптимальної фотойонізаційної моделі світіння (ФМС) конкретної туманности, яка б найліпше відтворювала її спостережувані характеристики. Цей метод, що започаткував Ван Гоф [5], пізніше був вдосконалений і застосований до розрахунку ОФМС зон HII в блакитних компактних карликових галактиках [6] та планетарних туманностей [4].

У цій праці наше дослідження хемічного складу небулярного газу в оболонках ПТ ми вирішили продовжити на прикладі об'єкта NGC 6826. За основу взяли спостережувані спектри, які отримав Баркер [7] у різних місцях туманности. Це дає змогу знайти розподіл хемічних елементів (та інших фізичних характеристик об'єкта) в об'ємі туманности.

У розділі II описано методику розрахунку ОФМС ПТ та розраховано сім ОФМС туманности NGC 6826 для різних позицій апертури, у розділі III проаналізовано результати та порівняно їх з результатами інших авторів.

II. РОЗРАХУНОК ОПТИМІЗОВАНИХ ФОТОЙОНІЗАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СВІТІННЯ NGC 6826

Метою розрахунку ОФМС ПТ є пошук оптимальних значень вільних параметрів, які вибираються з вхідних параметрів моделі і при яких модель давала б у результаті найближчі до спостережуваних значення таких параметрів, як відносні інтенсивності ліній, потік у лінії H_β, розмір туманности. Критерієм відповідности між предбачуваними та спостережуваними даними є χ^2-функція, записана для кожної спостережуваної й відповідної модельної величини. Для оцінки величини χ^2-функції в ОФМС ми використали середню величину, отриману з χ^2 для окремих параметрів i [9]:

$$\chi_i^2 = \left(\frac{\mathrm{Obs}^i - \mathrm{Mod}^i}{\sigma^i} \right)^2 , \qquad (1)$$

де Obs^i та Mod^i — спостережувані та модельні величини, σ^i — абсолютна похибка спостережуваних величин.

Вільні парам.	P1	P2	P3	P4
$\log R_{\rm in}$, см	$16.366^{+0.015}_{-0.021}$	$16.827^{+0.031}_{-0.144}$	$16.615^{+0.143}_{-0.050}$	$16.896^{+0.056}_{-0.160}$
$\log F^{*}_{912}$	$-13.773^{+0.153}_{-0.098}$	$-13.688^{+0.190}_{-0.155}$	$-13.944^{+0.091}_{-0.122}$	$-14.092^{+0.244}_{-0.201}$
$\log F^{(1)}_{504}$	$-13.843^{+0.135}_{-0.114}$	$-13.921^{+0.159}_{-0.167}$	$-13.988^{+0.206}_{-0.316}$	$-13.649^{+0.238}_{-0.201}$
$\log F^{(2)}_{504}$	$-14.497^{+0.224}_{-0.389}$	$-14.358^{+0.199}_{-0.281}$	$-13.441^{+0.277}_{-0.199}$	$-13.925^{+0.000}_{-0.876}$
$\log F^{(1)}_{228}$	$-15.410^{+0.209}_{-0.071}$	$-15.351^{+0.077}_{-0.339}$	$-15.947^{+0.354}_{-0.145}$	$-15.769^{+0.263}_{-0.214}$
$\log F^{(2)}_{228}$	$-16.253^{+0.045}_{-0.293}$	$-16.263^{+0.038}_{-0.451}$	$-17.800^{+0.944}_{-0.055}$	$-16.672^{+0.429}_{-0.108}$
$\log F_{30}$	$-38.235^{+0.052}_{-0.197}$	$-37.812^{+0.103}_{-0.316}$	$-38.322^{+1.145}_{-0.207}$	$-38.396^{+0.429}_{-0.153}$
$\log Q_{\rm totl}$	$46.234^{+0.278}_{-0.012}$	$46.514^{+0.158}_{-0.142}$	$46.252^{+0.109}_{-0.143}$	$46.165^{+0.107}_{-0.170}$
$\log n_{\rm H}$, см$^{-3}$	$3.065^{+0.016}_{-0.018}$	$2.960^{+0.030}_{-0.022}$	$2.814^{+0.057}_{-0.062}$	$2.582^{+0.107}_{-0.010}$
γ	$-0.805^{+0.017}_{-0.020}$	$-0.816^{+0.035}_{-0.077}$	$-0.873^{+0.034}_{-0.036}$	$-0.862^{+0.036}_{-0.059}$
$\log \epsilon$	$-0.355^{+0.051}_{-0.053}$	$-0.322^{+0.025}_{-0.027}$	$-0.193^{+0.029}_{-0.090}$	$-0.089^{+0.052}_{-0.160}$
$\log$ He/H	$-0.853^{+0.085}_{-0.017}$	$-0.830^{+0.092}_{-0.107}$	$-0.889^{+0.137}_{-0.203}$	$-0.864^{+0.111}_{-0.104}$
$\log$ C/H	$-3.445^{+0.157}_{-0.017}$	$-3.224^{+0.014}_{-0.341}$	$-3.248^{+0.199}_{-0.200}$	$-3.186^{+0.049}_{-0.405}$
$\log$ O/H	$-3.337^{+0.052}_{-0.048}$	$-3.290^{+0.008}_{-0.139}$	$-3.251^{+0.066}_{-0.074}$	$-3.215^{+0.093}_{-0.088}$
$\log$ N/H	$-4.061^{+0.084}_{-0.247}$	$-3.918^{+0.011}_{-0.396}$	$-3.679^{+0.013}_{-0.237}$	$-3.822^{+0.014}_{-0.640}$
$\log$ Ne/H	$-4.072^{+0.048}_{-0.053}$	$-4.040^{+0.059}_{-0.140}$	$-3.979^{+0.135}_{-0.205}$	$-3.925^{+0.083}_{-0.168}$
$\log$ S/H	$-5.531^{+0.307}_{-0.007}$	$-5.500^{+0.128}_{-0.112}$	$-5.688^{+0.200}_{-0.199}$	$-5.243^{+0.176}_{-0.068}$
$\log$ Ar/H	$-6.060^{+0.004}_{-0.289}$	$-6.377^{+0.170}_{-0.039}$	$-5.801^{+0.185}_{-0.214}$	$-5.940^{+0.126}_{-0.220}$
$\log$ Cl/H	$-7.118^{+0.237}_{-0.015}$	$-6.951^{+0.116}_{-0.084}$	—	$-6.899^{+0.228}_{-0.085}$
Вільні парам.	P5	P6	P7	
$\log R_{\rm in}$, см	$16.938^{+0.034}_{-0.099}$	$16.988^{+0.013}_{-0.109}$	$16.991^{+0.016}_{-0.126}$	
$\log F_{912}$	$-13.688^{+0.185}_{-0.228}$	$-13.890^{+0.124}_{-0.161}$	$-13.836^{+0.137}_{-0.336}$	
$\log F^{(1)}_{504}$	$-13.664^{+0.124}_{-0.262}$	$-13.837^{+0.062}_{-0.294}$	$-13.665^{+0.092}_{-0.116}$	
$\log F^{(2)}_{504}$	$-14.300^{+0.368}_{-0.484}$	$-13.402^{+0.057}_{-0.276}$	$-14.008^{+0.195}_{-0.582}$	
$\log F^{(1)}_{228}$	$-15.258^{+0.464}_{-0.242}$	$-15.566^{+0.063}_{-0.518}$	$-16.267^{+0.088}_{-0.497}$	
$\log F^{(2)}_{228}$	$-16.240^{+0.186}_{-0.725}$	$-17.186^{+0.289}_{-0.692}$	$-15.950^{+0.079}_{-0.658}$	
$\log F_{30}$	$-38.321^{+0.976}_{-0.300}$	$-37.928^{+0.464}_{-0.241}$	$-38.983^{+0.538}_{-0.227}$	
$\log Q_{totl}$	$46.054^{+0.128}_{-0.128}$	$46.058^{+0.122}_{-0.105}$	$46.172^{+0.120}_{-0.160}$	
$\log n_{\rm H}$, см$^{-3}$	$2.441^{+0.073}_{-0.058}$	$2.488^{+0.017}_{-0.037}$	$2.611^{+0.018}_{-0.105}$	
γ	$-0.980^{+0.185}_{-0.083}$	$-0.776^{+0.034}_{-0.202}$	$-0.921^{+0.094}_{-0.069}$	
$\log \epsilon$	$-0.099^{+0.091}_{-0.157}$	$-0.308^{+0.044}_{-0.044}$	$-0.214^{+0.125}_{-0.026}$	
$\log$ He/H	$-0.904^{+0.150}_{-0.127}$	$-0.850^{+0.167}_{-0.081}$	$-0.844^{+0.084}_{-0.145}$	
$\log$ C/H	$-3.244^{+0.191}_{-0.208}$	$-3.258^{+0.010}_{-0.388}$	$-3.320^{+0.015}_{-0.400}$	
$\log$ O/H	$-3.362^{+0.034}_{-0.141}$	$-3.224^{+0.001}_{-0.220}$	$-3.230^{+0.016}_{-0.155}$	
$\log$ N/H	$-3.960^{+0.285}_{-0.050}$	$-3.737^{+0.067}_{-0.365}$	$-3.827^{+0.150}_{-0.307}$	
$\log$ Ne/H	$-4.118^{+0.103}_{-0.268}$	$-3.980^{+0.034}_{-0.364}$	$-3.997^{+0.065}_{-0.271}$	
$\log$ S/H	$-5.379^{+0.231}_{-0.130}$	$-5.134^{+0.034}_{-0.283}$	$-5.310^{+0.112}_{-0.223}$	
$\log$ Ar/H	$-5.728^{+0.149}_{-0.314}$	$-5.705^{+0.124}_{-0.275}$	$-5.768^{+0.138}_{-0.197}$	
$\log$ Cl/H	$-7.075^{+0.240}_{-0.225}$	$-6.294^{+0.040}_{-0.376}$	$-6.933^{+0.080}_{-0.286}$	

* — Значення F_ν дано в одиницях ерґ см$^{-2}$ с$^{-1}$ Гц$^{-1}$.

Таблиця 1. Оптимальні значення вільних параметрів, отримані в результаті розрахунку ОФМС туманности NGC 6826.

Лінії, Å	P1		P2		P3		P4	
	Спостереження	ОФМС	Спостереження	ОФМС	Спостереження	ОФМС	Спостереження	ОФМС
1909 C III]	54.00 ± 21.60	49.239	53.00 ± 21.20	65.813	47.00 ± 18.8	50.969	46.00 ± 18.40	44.373
3727 [O II]	15.90 ± 4.770	18.686	14.50 ± 2.900	15.947	15.10 ± 3.02	17.845	25.40 ± 5.08	28.531
3869 [Ne III]	54.50 ± 5.450	54.362	52.00 ± 5.200	51.727	51.00 ± 5.10	51.092	48.40 ± 9.68	48.931
4267 C II	0.25 ± 0.075	0.256	0.62 ± 0.186	0.418	0.50 ± 0.15	0.474	0.53 ± 0.15	0.541
4363 [O III]	3.94 ± 1.182	3.879	4.00 ± 0.800	3.483	4.05 ± 1.215	2.948	2.98 ± 0.89	2.451
4471 He I	4.70 ± 1.410	5.083	4.61 ± 1.440	4.836	4.65 ± 1.395	5.004	4.80 ± 1.44	5.212
4740 [Ar IV]	0.49 ± 0.147	0.592	0.20 ± 0.060	0.229	0.40 ± 0.12	0.520	0.20 ± 0.06	0.239
4959 [O III]	265.00 ± 26.50	259.66	263.00 ± 26.30	259.80	270.00 ± 27.0	264.99	242.0 ± 24.20	244.776
5007 [O III]	798.00 ± 79.80	781.59	799.00 ± 79.90	782.00	807.00 ± 80.7	797.62	742.0 ± 74.20	736.777
5518 [Cl III]	0.27 ± 0.081	0.270	0.35 ± 0.105	0.358	—	—	0.40 ± 0.12	0.420
5538 [Cl III]	0.21 ± 0.063	0.210	0.32 ± 0.096	0.296	—	—	0.33 ± 0.09	0.315
5876 He I	12.20 ± 3.660	14.395	12.40 ± 2.480	13.601	13.00 ± 2.60	13.699	12.70 ± 3.81	14.599
6312 [S III]	0.45 ± 0.135	0.468	0.45 ± 0.135	0.461	0.27 ± 0.081	0.264	0.72 ± 0.21	0.743
6584 [N II]	6.20 ± 1.860	6.141	6.80 ± 2.040	6.515	5.90 ± 1.77	5.856	9.90 ± 2.97	9.611
6716 [S II]	0.37 ± 0.110	0.354	0.34 ± 0.102	0.302	—	—	0.47 ± 0.14	0.514
6731 [S II]	0.35 ± 0.105	0.340	0.34 ± 0.102	0.350	—	—	0.56 ± 0.16	0.466
7065 He I	3.70 ± 1.110	2.758	3.90 ± 1.170	2.766	4.20 ± 1.26	2.630	4.00 ± 1.20	2.546
7135 [Ar III]	9.60 ± 2.880	4.469	7.20 ± 2.160	2.065	10.40 ± 2.08	8.173	11.00 ± 3.30	5.853
$\log[F(H_\beta)]$	-11.47 ± 0.05	-11.474	-11.50 ± 0.05	-11.500	-11.49 ± 0.05	-11.500	-11.59 ± 0.05	-11.590
R_{out}	1.16E17	1.22E17	1.16E17	8.97E16	1.16E17	1.22E17	1.16E17	1.22E17
$\chi^2_{\min}$	—	0.359	—	1.834	—	0.464	—	0.931

Лінії, Å	P5		P6		P7			
	Спостереження	ОФМС	Спостереження	ОФМС	Спостереження	ОФМС		
1909 C III]	55.00 ± 22.00	62.879	35.00 ± 14.00	38.805	33.00 ± 13.20	41.814		
3727 [O II]	24.30 ± 4.86	24.146	24.90 ± 4.98	27.958	77.00 ± 7.70	76.874		
3869 [Ne III]	43.90 ± 8.78	43.857	43.60 ± 8.72	43.337	44.30 ± 8.86	42.696		
4267 C II	0.51 ± 0.15	0.456	0.50 ± 0.15	0.462	0.66 ± 0.19	0.407		
4363 [O III]	2.88 ± 0.86	2.850	3.19 ± 0.95	2.435	3.26 ± 0.97	2.620		
4471 He I	4.54 ± 1.36	4.750	4.81 ± 1.44	5.281	4.60 ± 1.30	4.979		
4740 [Ar IV]	—	—	0.30 ± 0.09	0.357	—	—		
4959 [O III]	227.00 ± 22.70	227.451	244.00 ± 24.40	243.265	234.00 ± 23.40	232.048		
5007 [O III]	694.00 ± 69.40	684.630	747.00 ± 74.70	732.229	717.00 ± 71.70	698.467		
5518 [Cl III]	0.31 ± 0.09	0.334	1.49 ± 0.44	1.729	0.39 ± 0.11	0.464		
5538 [Cl III]	0.27 ± 0.08	0.247	1.74 ± 0.52	1.290	0.51 ± 0.15	0.353		
5876 He I	12.60 ± 2.52	13.357	13.80 ± 2.76	14.407	13.00 ± 2.60	14.032		
6312 [S III]	0.80 ± 0.24	0.714	0.93 ± 0.27	0.957	0.74 ± 0.22	0.848		
6584 [N II]	10.50 ± 2.10	10.579	9.50 ± 1.90	9.438	29.50 ± 5.90	28.890		
6716 [S II]	0.64 ± 0.19	0.765	0.66 ± 0.19	0.735	1.00 ± 0.30	0.979		
6731 [S II]	0.82 ± 0.24	0.654	0.84 ± 0.25	0.655	1.20 ± 0.36	0.927		
7065 He I	2.90 ± 0.87	2.283	3.50 ± 1.05	2.578	3.60 ± 1.08	2.450		
7135 [Ar III]	11.00 ± 3.30	10.952	11.70 ± 2.34	10.308	10.80 ± 2.16	10.346		
$\log[F(H_\beta)]$	-11.96 ± 0.05	-11.96	-12.05 ± 0.05	-12.05	-11.75 ± 0.05	-11.75		
R_{out}	1.16E17	1.22E17	1.16E17	1.22E17	1.16E17	1.22E17		
$\chi^2_{\min}$	—	0.183	—	0.312	—	0.435		

* — Значення F_ν дано в одиницях ерґ см$^{-2}$ с$^{-1}$ Гц$^{-1}$.

Таблиця 2. Порівняння модельних (результати розрахунку ОФМС) та спостережуваних інтесивностей ліній [7], наведених у відношенні до інтенсивности лінії H_β, потоків $\log F(H_\beta)$ та зовнішніх радіусів моделей R_{out}. Наведено також відповідні значення χ^2-функцій.

Суть алґоритму оптимізації або χ^2-мінімізації полягає у зміні вільних параметрів моделі так, щоб χ^2-функція досягла найменшого значення.

Як було зазначено вище, для розрахунків ми використали дані, які отримав Т. Баркер (1984–1985 роки) на 2.1 м телескопі Національної Обсерваторії Кіт Пік (оптичний діяпазон, діяметр апертури $2''.7$), та дані з УФ-діяпазону (супутник IUE, 1985 рік, діяметр апертури $3''.2$) — разом 7 спектрів, одержаних з різних місць NGC 6826 [7]. На рис. 1 показана контурна діяграма туманности в лінії H_β [7]. Координати позицій апертур щодо центральної зорі: P1 — 3W,3N; P2 — 6N; P3 — 6S; P4 — 7W, 5N; P5 — 12N; P6 — 12S; P7 — 10W, 8N.

Для наших розрахунків ми використали код *Cloudy 05.07* [8] і код PHYMIR [9], який входить у код *Cloudy* як функція.

Ми прийняли степеневий закон зміни густини в оболонці туманности ($n_{\rm H}(R) = n_{\rm H}(R_{\rm in}) \left(\frac{R}{R_{\rm in}}\right)^\gamma$, де $R_{\rm in}$ — внутрішній радіус небулярної оболонки). Форма цієї туманности близька до сферичної, тому ми прийняли сферично-симетричне наближення для розрахунку її ОФМС. Потік $F(H_\beta)$, відстань до об'єкта ($D = 1690$ світлових років), $R_{\rm in}$ для кожної із семи позицій та інші необхідні параметри взято також із праці [7].

Для розрахунку ОФМС NGC 6826 ми ініціялізували розподіли енерґії в спектрі випромінювання йонізуючого ядра даної ПТ за $\lambda \le 912$ Å відповідним розподілом, який знайшли на основі моделей зоряних атмосфер Клєґґа–Міддлємасса [10] з урахуванням зоряного вітру [11]. Йонізуючий спектр ядра туманности (L_c-спектр) задавали степеневим законом:

$$F_\nu = F_{\nu_0} \left(\frac{E_\nu}{E_{\nu_0}}\right)^\alpha, \qquad (2)$$

де F_{ν_0} і F_ν — потоки на початку (ν_0) і всередині (ν) відповідного інтервалу частот; E_{ν_0} і E_ν — енерґії квантів на початку і всередині цього інтервалу; α — спектральний індекс, який визначає нахил L_c-спектра. Ми використовували три інтервали довжин хвиль (504 Å $\le \lambda_1 \le$ 912 Å, 228 Å $\le \lambda_1 \le$ 504 Å, 30 Å $\le \lambda_1 \le$ 228 Å).

Вільними параметрами при розрахунку ОФМС ПТ в загальному випадку були прийняті такі 19 величин:

- Внутрішній радіус $R_{\rm in}$ оболонки туманности для кожної із семи позицій зняття спектра.
- Параметри енерґетичного спектра ядра туманности: потік на 912 Å (F_{912}).
- Потік на 504 Å ($F^{(1)}_{504}$).
- Потік на 504.1 Å ($F^{(2)}_{504}$).
- Потік на 228 Å ($F^{(1)}_{228}$).
- Потік на 228.1 Å ($F^{(2)}_{228}$).
- Потік на 30 Å (F_{30}).
- Кількість йонізуючих квантів $Q_{\rm tot}$.
- Густина водню на $R_{\rm in}$: $n_{\rm H}(R_{\rm in})$.
- Показник степеня в радіяльному законі зміни густини: γ.
- Фактор наповнення об'єму ПТ газом: ϵ.
- Хемічні вмісти He/H, C/H, N/H, O/H, Ne/H, S/H, Ar/H, Cl/H.

Параметрами для розрахунку χ^2-функції в загальному випадку були потік в H_β лінії на відстані Землі, відносні інтенсивності 18 спектральних ліній та зовнішній радіус оболонки туманности $R_{\rm out}$, тобто всього 20 параметрів. Абсолютні похибки для відносних інтенсивностей спостережуваних спектральних ліній становили 10–30% та 40% для лінії вуглецю λ 1909 Å [7].

Початковий уміст важких елементів приймали рівним знайденому Баркером за допомогою методу ЙКМ [7], початкові значення внутрішніх та зовнішніх радіусів для кожної з позицій узгоджені з відповідними даними з рис. 1. При розрахунку ОФМС межі змін на хемічні вмісти були в 5 разів більше та менше від заданого вмісту, межі змін інших вільних параметрів не фіксувалися.

У таблиці 1 наведено оптимальні значення вільних параметрів, отримані в результаті розрахунку семи ОФМС NGC 6826, обчислених для різних позицій апертури. Оскільки ступінь вільности нашої задачі дорівнює одиниці (20 параметрів оптимізації мінус 19 вільних параметрів), то похибки значень вільних параметрів, одержаних у результаті розрахунку ОФМС, знаходили за максимальними відхиленнями (в бік більших та менших значень) кожного вільного параметра від кінцевого значення за аналізом моделей з $\chi^2 \le \chi^2 + 1$ [4].

У таблиці 2 зроблено порівняння модельних (результати розрахунку ОФМС) та спостережуваних інтесивностей ліній [7], даних у відношенні до інтенсивности лінії H_β (наведено також похибки спостережуваних спектрів Т. Баркера), а також потоків $\log F(H_\beta)$ та зовнішніх радіусів моделей $R_{\rm out}$. Показано кількість ітерацій, зроблених під час розрахунку кожної ОФМС, та відповідні мінімальні значення χ^2-функцій.

III. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНШИХ АВТОРІВ.

На рис. 2 показано розподіл отриманих у результаті розрахунку ОФМС ПТ оптимальних значень вільних параметрів (для кожної із семи позицій P1–P7) в різних частинах туманности (рис. 1) та проведено

порівняння даних оптимізації з відповідними даними Баркера, отриманими методом діягностики плазми [7]. Зауважимо, що значення внутрішнього радіуса $R_{\rm in}$, параметрів енергетичного спектра ядра туманности, кількости йонізуючих квантів $Q_{\rm tot}$, густини водню $n_{\rm H}(R_{\rm in})$, фактора наповнення об'єму туманности газом ϵ та вміст хлору були розраховані тільки методом оптимізації.

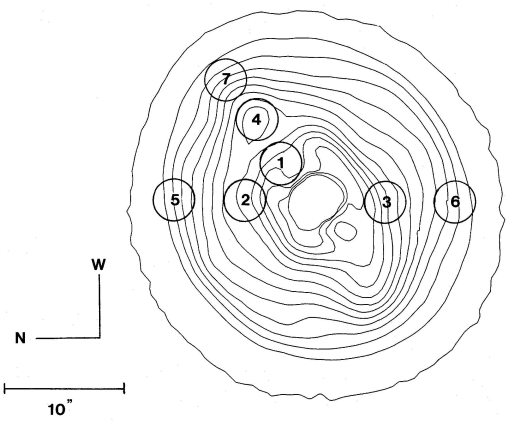
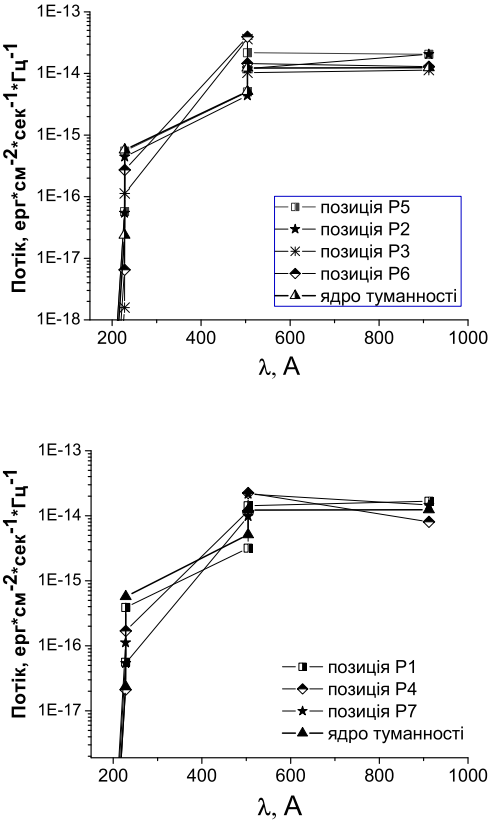


Рис. 1. Контурна діяграма туманности NGC 6826 в лінії H_β [7]. Наведено також розташування апертур, що були використані для зняття спостережуваних спектрів (1–7).



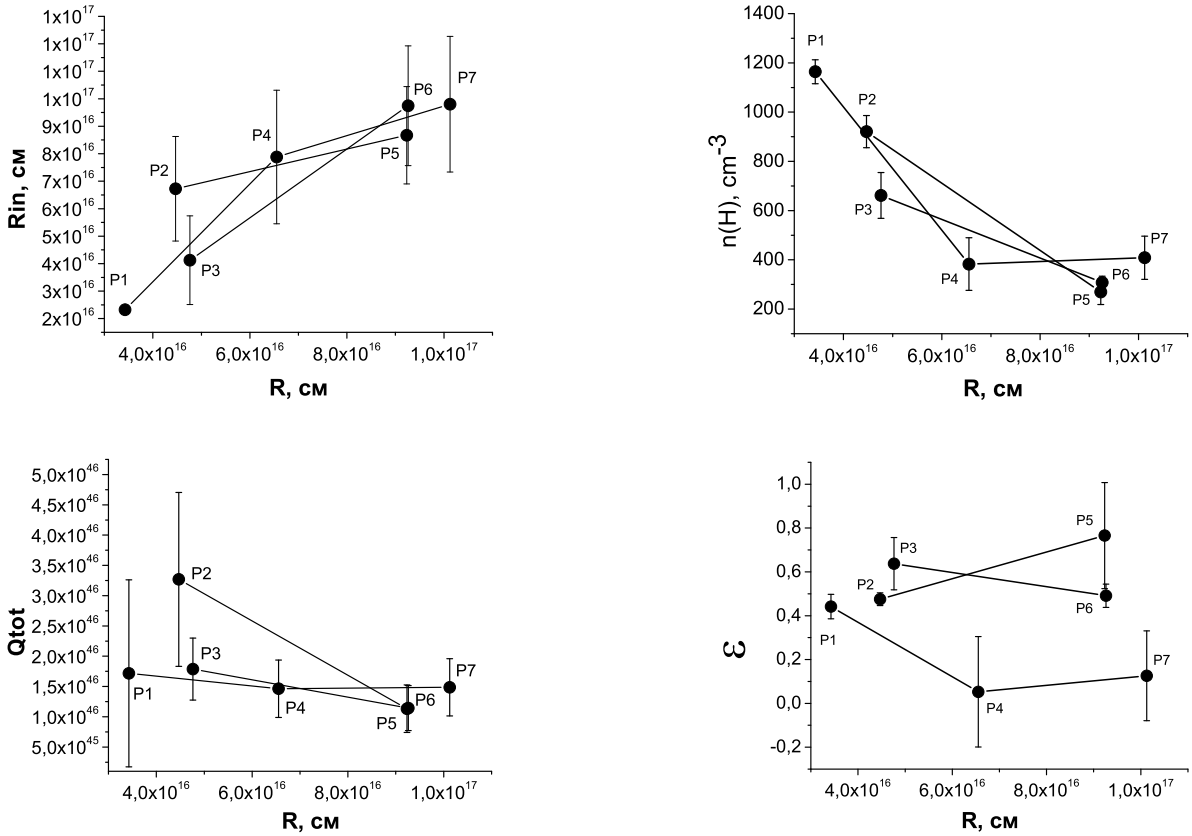


Рис. 2. Розподіл отриманих у результаті розрахунку ОФМС NGC 6826 оптимальних значень вільних параметрів за об'ємом туманности та порівняння даних оптимізації (кружечки) з відповідними даними, отриманими методом діягностики плазми [7] (трикутники). R — відстань від центру туманности, позначено також розташування апертур P1–P7.

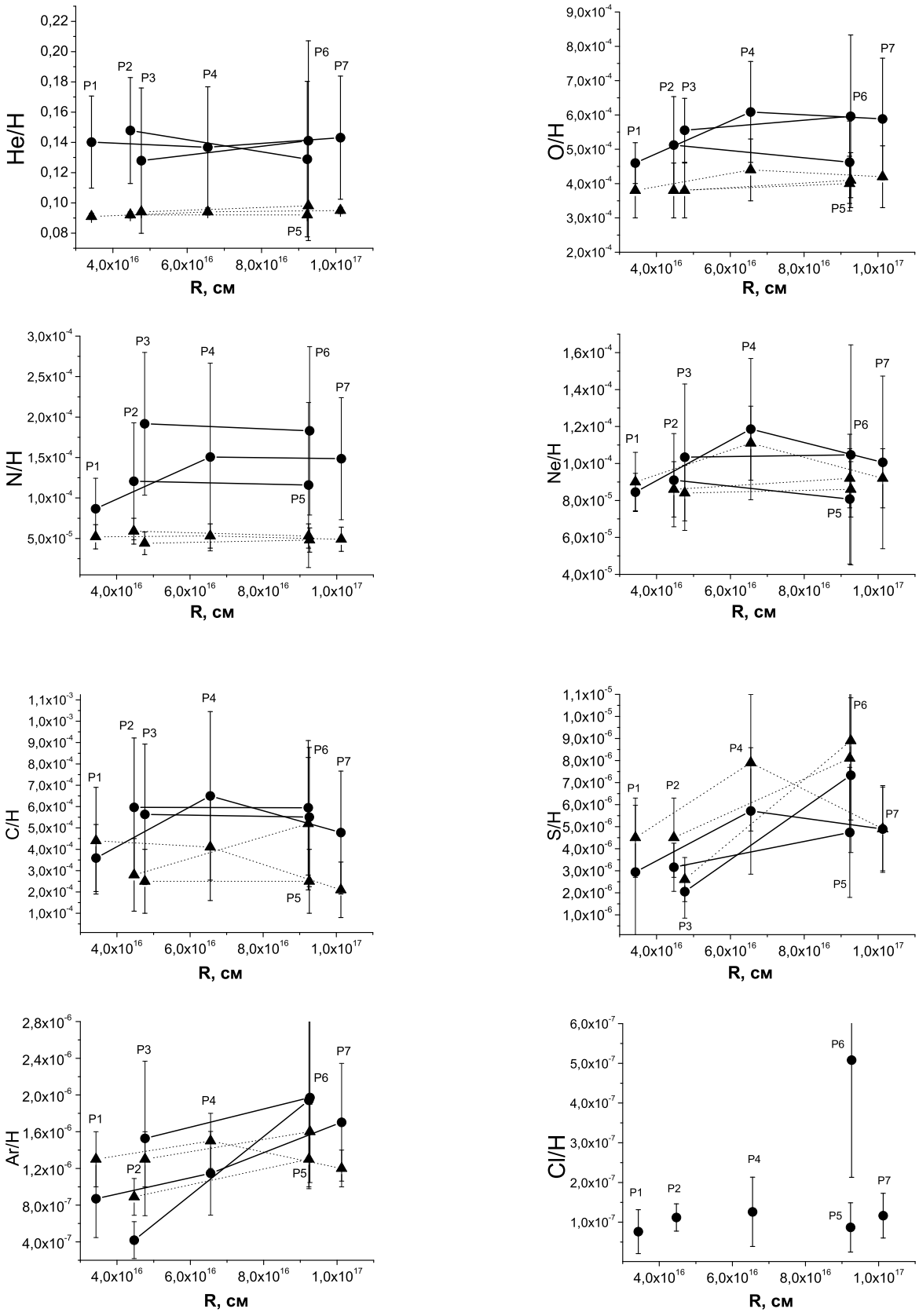


Рис. 2. (Продовження)

Проаналізуємо розподіл кожного вільного, параметра (рис. 2).
1). $R_{\rm in}$: чим ближче місце розташування апертури (рис. 2) до центру ПТ, тим більше внутрішніх шарів дає внесок у вислідний потік, і навпаки. В центрі ми отримуємо суперпозицію всіх шарів. Межі зміни параметра $R_{\rm in}$ не фіксувалися, і результати оптимізації для кожної з семи позицій є фізичними ($R_{\rm in} \leq R_{\rm out}$).
2). L_c-спектр: в центральних позиціях (P1, P2, P3) енергетичний спектр є ближчим до ініціялізуючого спектра ядра туманности (позначений на рисунках як "ядро туманности"), який ми отримали з моделей зоряних атмосфер Клеґґа–Міддлємасса [10], відкоректованих за наявности зоряного вітру [11]. Розбіжності між ініціялізуючим L_c-спектром (ядро туманности) та одержаними з ОФМС позицій P1, P2, P3 можна пояснити поглинанням йонізуючого випромінювання в проміжках між ядром і ділянками ПТ, які відповідають згаданим позиціям апертури.
3). Густина $n_{\rm H}$ та фактор наповнення ϵ: густина $n_{\rm H}$ є більшою в центральних частинах об'єкта (P1, P2, P3), У ділянці позиції P4 спостерігаємо невелике розрідження. Ближче до краю газ стає менш фраґментованим і зменшується концентрація газу (ϵ більше), а до центру — менш густо розташовані згустки речовини (ϵ менше), але кожен згусток характеризується високою концентрацією.
4). $Q_{\rm tot}$: спостерігається збільшення кількости йонізуючих квантів $Q_{\rm tot}$ в центральних частинах оболонки туманности.
5) He/H: метод оптимізації дає більший уміст гелію, ніж той, що можна отримати методом діягностики. Зауважимо, що на величину похибок при оптимізаційному моделюванні впливають похибки спостережень Баркера (формула 1).
6). Вмісти важких елементів (O/H, N/H, Ne/H, S/H, C/H, Ar/H, Cl/H): зміна величин умістів хемічних елементів є подібною для обох методів визначення (метод фотойонізаційного моделювання та метод діягностики). Метод оптимізації дає більші вмісти, але в основному спостерігається перекриття відповідних значень у межах похибок. Уміст Cl/H обчислено лише оптимізаційним методом. Оптимальні значення вмісту кожного хемічного елемента, отримані ОФМС у різних ділянках даної ПТ, в межах похибок залишаються сталими, що вказує на відсутність неоднорідности в розподілі вмістів різних хемічних елементів у NGC 6826.

Як видно з таблиці 2, інтенсивності більшости спостережуваних ліній добре (в межах похибки) відтворюються ОФМС. Однак інтенсивності лінії 7135 [Ar III], отримані ОФМС для позицій P1 та P2, набагато менші від відповідних спостережуваних значень. Пояснити це можна, по-перше, тим, що в цих позиціях ми маємо найбільш суперпозиційований спектр (практично від усіх шарів ПТ), а отже, усереднений за цими шарами вміст Ar/H (який одержує для всіх шарів ОФМС у цьому випадку) не може відтворити спостережуваної інтенсивности 7135 [Ar III]. Для точнішого відтворення стратифікації ПТ та зон HII тепер ми розробляємо мультикомпонентну ОФМС цих об'єктів, яку плануємо представити найближчим часом. По-друге, потенціял йонізації Ar^{2+} становить 2.994 Ry, тобто він є майже посередині другого інтервалу довжин хвиль, у яких ми припускали степеневий розподіл потоку випромінювання за енергіями квантів (див. Розділ II, та вираз (2)). Можливо, у вихідному L_c-спектрі ядра ПТ існує певна особливість поблизу згаданого потенціялу йонізації Ar^{2+}, яка залишилася знехтуваною ОФМС через прийняту степеневу апроксимацію. Для перевірки цього припущення ми плануємо найближчим часом розрахувати ОФМС даної ПТ з більшою кількістю інтервалів L_c-спектра.

Слід також зауважити, що хоча для більшости позицій апертури ОФМС відтворює лінію 4363 [O III] в межах похибки, проте її модельна інтенсивність майже завжди систематично нижча від спостережуваної. Ця лінія використостовується в діяґностичному співвідношенні $\lambda 4363[{\rm OIII}]/\lambda(4959+5007)[{\rm OIII}]$ для визначення електронної температури газу. Це можна пояснити тим, що для точнішого відтворення таких діяґностичних співвідношень оптимальною моделлю необхідно розрахувати двостадійну ОФМС для ПТ, у якій відтворюватимуться всі важливі діяґностичні співвідношення й інтенсивності спостережуваних емісійних ліній ПТ.

Отже, можна зробити такі висновки:

1. При порівнянні результатів діягностичного методу [7] та методу ОФМС ПТ видно, що, в основному, значення вмістів хемічних елементів, які ми отримали в результаті оптимізаційного моделювання, є більшими, ніж за допомогою діягностичного методу. Спостерігаємо перекриття значень умістів у межах похибок.

2. Помітно зменшення густини небулярного газу до країв оболонки туманности. Ближче до краю газ стає менш фраґментованим і менш концентрованим, а до центру — менш густо розташовані згустки речовини (ϵ менше), але кожен згусток характеризується високою концентрацією.

3. Оптимальні значення вмісту кожного хемічного елемента, отримані ОФМС у різних ділянках даної ПТ, в межах похибок залишаються сталими, що вказує на відсутність неоднорідности в розподілі вмістів різних хемічних елементів у NGC 6826.

4. Ми вважаємо, що отримані результати (хемічні вмісти та інші фізичні параметри туманности) є ліпшими, оскільки вони дають змогу досить добре відтворити спостережуваний спектр об'єкта.

[1] http://babbage.sissa.it/ps/astro-ph/0207500.
[2] R. L. Kinsburg, M. J. Barlow, Mon. Not. R. Astron. Soc. **271**, 257 (1994).
[3] Н. В. Гаврилова, В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, Журн. фіз. досл. **6**, 451 (2002).
[4] Н. В. Гаврилова, дисерт. канд. фіз.-мат. наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів (2005).
[5] P. A. M. van Hoof, Ph.D. Thesis, Rijskuniversiteit Groningen (1997).
[6] В. В. Головатый, Б. Я. Мелех, Астрон. журн. **82**, 755 (2005).
[7] T. Barker, Astrophys. J. **326**, 164 (1988).
[8] http://www.nublado.org.
[9] P. A. M. Van Hoof, G. C. Van de Steen, Mon. Not. R. Astron. Soc. **308**, 623 (1999).
[10] R. E. S. Clegg, D. Middlemass, Mon. Not. R. Astron. Soc. **229**, 759 (1987).
[11] Н. В. Гаврилова, О. В. Рокач, Вісн. астрон. шк. молод. вч. **2**, н.1, 82 (2001).

THE OPTIMIZED PHOTOIONIZATION MODELLING OF PLANETARY NEBULA NGC 6826

N. V. Havrylova[1], V. V. Holovatyy[2], B. Ya. Melekh[3]
Ivan Franko National University of Lviv, Department for Astrophysics,
8 Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA–79005, Ukraine,
e-mail: [1] *gavrylova@physics.wups.lviv.ua,* [2] *gol@physics.wups.lviv.ua,* [3] *melekh@physics.wups.lviv.ua*

The images of many planetary nebulae have inhomogeneity structure. Our investigations were held using the nebula NGC 6826 because its spectrum was examined very well. The chemical composition of this nebula derived using the empirical expressions were compared with the corresponding one derived by the optimized photoionization models calculations. By comparing these results it is shown that data obtained from calculations of the optimization models are larger than the corresponding data obtained by the diagnostic method. We suggest that the results of optimized modelling are more accurate because they reproduce the observed spectra of NGC 6826. The variations of the optimal values of free parameters over the nebula volume indicate the homogeneity distribution of abundances of different chemical elements.