

УДК 524.37
PACS 98.58.Li

ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНОГО ВМІСТУ ГАЗОПИЛОВИХ ОБОЛОНОК ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

Б. Мелех

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

Розраховано сітку фотоіонізаційних моделей світіння оболонок планетарних туманностей (ПТ), що містять карбонатний, або силікатний пил. Моделі побудовано вздовж еволюційних треків зір-попередниць ПТ для двох значень металічності, що відповідають середньому вмісту важких елементів у ПТ Галактики та Великої Магелланової Хмари. Здійснено синтетичну фотометрію в ІЧ-діапазоні модельних спектрів та порівняно її результати з відповідними даними спостережень, отриманими на ІЧ космічних телескопах *IRAS* та *Spitzer*, а також у рамках проекту *2MASS*. Отримано нові вирази для іонізаційно-корекційних множників, що дозволяють враховувати неспостережувані стадії іонізації хімічних елементів у газовому компоненті газопилових оболонок ПТ. Перевизначено хімічний склад понад сто оболонок ПТ Галактики.

Ключові слова: Планетарні туманності, пил, фотоіонізаційне моделювання, хімічний вміст

1 Вступ

Планетарні туманності (ПТ) є зручними об'єктами для вивчення хімічної еволюції матерії у Галактиці. Завдяки їх відносно простій структурі, хімічний склад в оболонках ПТ визначається відносно точно [1, 2]. Порівняння металічностей ПТ та інших небулярних середовищ дозволяє отримати більш точну інформацію про вміст догалактичного гелію та темпу його збагачення в процесі зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті. Точне визначення вмісту хімічних елементів в оболонках ПТ є дуже важливим для вивчення зоряного нуклеосинтезу та історії зореутворення в Галактиці. Однак, результати такого визначення часто виявляються неоднозначними, а часом і протирічать одне одному. На нашу думку основною причиною таких неточностей може бути некоректна процедура врахування неспостережуваних стадій іонізації під час визначення хімічного вмісту в оболонках ПТ.

Проблема визначення повного хімічного вмісту елемента в небулярних середовищах (до яких належать і оболонки ПТ) полягає у тому, що лінії не всіх його іонів є наявними у спостережуваних спектрах. Для врахування неспостережуваних стадій іонізації на сьогоднішній день використовують сіткове фотоіонізаційне моделювання світіння (ФМС) відповідних небулярних середовищ. Це спричинене тим, що фотоіонізаційні моделі містять всю необхідну інформацію, яка відсутня у даних спостережень. Такі моделі, однак, мають бути максимально відповідними фізичним умовам у реальних НС.

У попередніх працях (див. напр. [3–5]), з метою виведення виразів для ІКМ, використовувалася розрахунок сітки *газових* фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ. Однак, наявність пилових зерен різних сортів може впливати на результат ФМС. Тому постає задача оцінки впливу наявності пилових зерен в оболонці ПТ на результат її ФМС.

Також більшість попередніх сіток моделей розраховувалися для діапазонів значень вхідних параметрів ФМС, характерних для ПТ. Однак, ядро ПТ з часом переміщається вздовж свого еволюційного треку (змінюється його світність та температура), а оболонка ПТ розширюється (змінюється розподіл густини). Тому постає також задача розрахунку еволюційного ФМС оболонки ПТ.

Саме цим задачам присвячена дана робота.

Дуже важливим є також оцінка відповідності результатів ФМС даним спостережень. Оскільки пил найбільше впливає на ІЧ-спектр [6], то у даній праці здійснено синтетичну фотометрію модельних спектрів у діапазонах довжин хвиль, що відповідають фотометричним фільтрам, використаним на космічних ІЧ-телескопах *IRAS* та *Spitzer*, а також в проекті *2MASS*, з урахуванням їх коефіцієнтів пропускання, після чого порівняно отримані результати з даними спостережень.

У даній праці ми проаналізуємо, як наявність пилу впливає на визначення хімічного складу газового компонента оболонки ПТ. З цією метою ми розраховували сітку газопилових фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ і на основі їх результатів вивели вирази для іонізаційно-корекційних множників (ІКМ), кожен з яких був протестований на відтворення хімічного складу заданого в моделях. Далі, вибравши найбільш точні вирази, ми визначимо з їх допомогою хімічний склад реальних ПТ і порівняємо з попередньо визначеним вмістом, отриманим з використанням ІКМ, що виведені на основі результатів безпилових фотоіонізаційних моделей.

2 Газопилове фотоіонізаційне моделювання світіння оболонок планетарних туманностей

ФМС ПТ дозволяє нам отримати іонний вміст неспостережуваних стадій іонізації хімічних елементів. У поєднанні з хімічним складом, закладеним у моделях, ми отримуємо всі дані, необхідні для виведення виразів для ІКМ, які дозволяють врахувати неспостережувані стадії іонізації під час визначення хімічного вмісту на основі іонного вмісту, отриманого шляхом діагностики світіння оболонки ПТ [7, 8].

У цій частині роботи представлено алгоритм сіткового ФМС (СФМС) сферично-симетричних оболонок ПТ.

2.1 Іонізуєче випромінювання ядра планетарної туманності.

Для задання розподілу енергії в спектрі іонізуєчого випромінювання ($\lambda \leq 912\text{\AA}$) ядра оболонки ПТ ми вибрали маси зір-попередниць ПТ з масами 0.95, 1.0 та 1.5 маси Сонця, оскільки більшість ПТ має попередниками зорі саме в такому діапазоні мас. 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 [9]:

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

Таким чином ми здійснили СФМС вздовж еволюційних треків ядер ПТ від Вассіліадіса та Вуда [9] з кроком 500 р., до 50000 р. Для цього нами було використано еволюційні треки для ядер, масою $M_c/M_\odot = 0.557, 0.561, 0.603$ і металічністю $Z = 0.014$ та для $M_c/M_\odot = 0.576, 0.580, 0.622$ з металічністю $Z = 0.006$ (див. рис. 1).

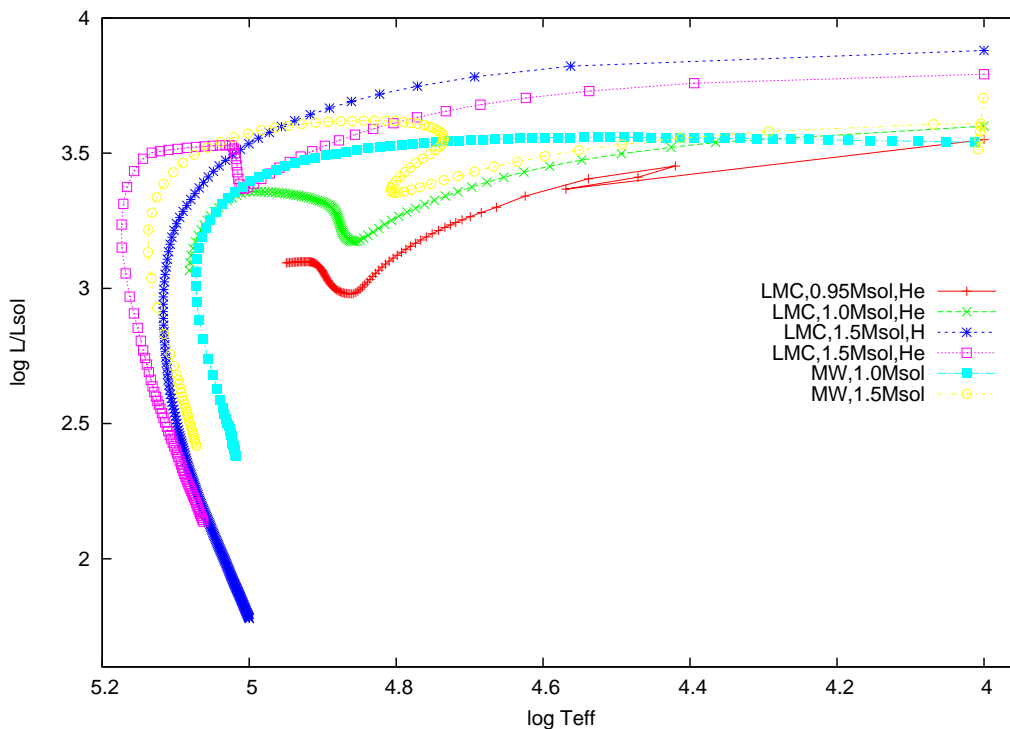


Рис. 1: Еволюційні треки для зір-попередниць ПТ на стадії ПТ, які були використані для СФМС оболонки ПТ.

У якості нульового віку оболонки ПТ ми використали момент, коли T_{eff} ядра масою M_c стає рівною $10000^\circ K$. Форма Лус-спектрів ядра ПТ визначалася наступним чином:

1. Лус-спектр задавався функцією Планка для $10000^\circ K \leq T_{eff} < 30000^\circ K$;

2. у діапазоні температур ядер ПТ $30000^{\circ}K \leq T_{eff} < 50000^{\circ}K$ використовувалися моделі зоряних атмосфер Паулдраха [10];
3. у діапазоні температур ядер ПТ $50000^{\circ}K \leq T_{eff} < 190000^{\circ}K$ використовувалися 3d-моделі зоряних атмосфер Рауха [11];
4. у діапазоні температур ядер ПТ $190000^{\circ}K \leq T_{eff} \leq 200000^{\circ}K$ використовувалися моделі зоряних атмосфер Вернера [12].

2.2 Радіальний розподіл густини в оболонці ПТ та її розширення.

Для СФМС оболонок ПТ ми використали радіальний розподіл густини в них, отриманий Головатим та Мальковим [13] на основі аналізу мап ізофот в лінії H_{β} 12 реальних ПТ у припущенні їх сферичної симетрії за допомогою рівняння Абеля:

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

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 зробили припущення, що при нульовому віці ($t = 0$) оболонки ПТ концентрація водню в туманності на відстані $r = r_c$ від центру туманності становить 100000 см^{-3} з наступних причин. Головатий та Мальков [13] вибрали 12 ПТ для ізофот. Всі ці ПТ мають різний розмір оболонок, а тому ними було зроблено припущення, що найбільш компактна туманність є найбільш молодого, а найбільш протяжна – найстарішою. Для цієї вибірки ПТ найбільш компактною і молодого виявилась ПТ IC5117. У вищезгаданій праці для цієї ПТ було отримано концентрацію гідрогену 100000 см^{-3} при $r = r_c$. Далі, величина r_c для $t = 0$ визначалася за допомогою виразу (1) при $r = r_c$. Еволюція r_c розраховувалася як $r_c = V_{exp} \cdot t$, де $V_{exp} = 10 \text{ км/с}$ для $T_{eff} \leq 2 \cdot 10^4 K$ і $V_{exp} = 20 \text{ км/с}$ для $T_{eff} > 2 \cdot 10^4 K$.

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 [13]:

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

Сумарна маса туманності у моделях сітки визначалася як різниця між масою зорі-попередниці ПТ, M_* , та масою ядра ПТ, M_c . Таким чином зовнішній радіус оболонки ПТ (r_o) визначався шляхом інтегрування розподілу $n(r)$ (1) за об'ємом туманності до радіусу, при якому досягається маса ПТ.

2.3 Хімічний склад газової компоненти оболонок ПТ.

Для Молочного Шляху хімічний склад газової компоненти оболонок ПТ був взятий з праці [14], у якій автор вивела його усередненням вмісту елементів, отриманих з праць різних авторів (див. табл. 1).

Табл. 1: Усереднений хімічний склад оболонки ПТ в Галактиці та Великій Магеллановій Хмарі (ВМХ) з праці [14] у форматі $12 + \log(X/H)$.

Елементи	Галактичні ПТ	ПТ у ВМХ
He	11.06 ¹	11.00 ²
C	8.70 ¹	8.56 ³
N	8.32 ¹	7.75 ²
O	8.64 ¹	8.24 ²
Ne	8.19 ¹	7.62 ²
Na	6.28 ⁴	5.98 ⁵
Mg	6.21 ⁴	5.90 ⁵
Si	7.00 ⁴	6.70 ⁵
S	7.00 ¹	6.44 ²
Cl	5.23 ⁴	5.67 ²
Ar	6.52 ¹	5.90 ²
K	5.08 ⁴	4.78 ⁵
Ca	4.08 ⁴	3.78 ⁵

¹ Компіляція даних Потташа та Бернарда-Саласа ([15], [16]), Потташа та ін. [17], Гілесса та ін. [18]

² Чаппіні та ін. [19]

³ Лейсі та Деннефельда [20]

⁴ Ферланда [21]

⁵ Половина від відповідного вмісту для ПТ у Галактиці від Ферланда [21].

2.4 Відношення маси пилу до газу.

Процедуру врахування пилу під час ФМС НС за допомогою програми *Cloudy* [21] (саме ця програма використана у даній праці для ФМС оболонки ПТ) розробив Пітер ван Гуф (Peter van Hoof) [22]. Основні властивості даної процедури наступні:

- вона враховує розподіл пилинок за розміром, а також такі параметри, як їх температура, та розподіл їх кількості за електричним зарядом;
- для опису розсіювання випромінювання на пилинках застосована теорія Мі для сферичного пилу [23];
- також модель можна порахувати з врахуванням квантового нагрівання пилу [24];
- модель враховує фотоелектричний ефект і взаємодію пилу між собою і з газом.

Детальний опис врахування пилу у ФМС оболонки ПТ можна знайти також у праці [6].

Відношення маси пилу до газу для нашої Галактики розраховане [14] для двох видів пилу, описаних вище: карбонатного та силікатного. Відношення маси пилу до маси газу: $\Phi = \frac{m_d}{m_g}$. Загальна маса газу в ПТ рівна сумі мас окремих газових

компонент: $m_g = m_H n_H + m_{He} n_{He} + m_C n_C + m_N n_N + m_O n_O + \dots$. Основну частину газу в туманності складає гідроген і гелій ($n_{He} \approx 11\% n_H$). Тому масу газу в оболонці можна переписати в вигляді: $m_g = 1.44 m_H n_H$. Концентрацію карбону в пилинках отримано на основі даних табл. 1 та використовуючи частку карбону в пилі, 0.58, отриману в праці [25]: $n_C = 0.58 \cdot 5.0 \cdot 10^{-4} n_H \approx 2.9 \cdot 10^{-4} n_H$. Отже, маса пилу $m_d = n_C m_C = 3.48 \cdot 10^{-3} m_H n_H$. Таким чином відношення маси пилу до газу для ПТ Галактики $\Phi_{(MW,C)} \approx 2.42 \cdot 10^{-3}$.

Для силікатних пилин ми використали частку атомів, що переходять у пил, рівну 0.82, з праці Дрейна та Лі [26]. Силікатні пилинки поділяються на форстерити (Mg_2SiO_4) та фаяліти (Fe_2SiO_4), тому маса силікатів у цих двох молекулах $m_{Si} = m(Mg_2SiO_4) + m(Fe_2SiO_4) = 344 m_H$. Беручи до уваги вміст силікатів для Галактики з табл. 1, з урахування згаданої вище частки цих пилин, отримуємо відповідне відношення масу пилу до газу в них [14]: $\Phi_{(MW,Si)} \approx 1.96 \cdot 10^{-3}$.

Відношення маси пилу у карбонатних та силікатних пилинках до газу при вмісті складових хімічних елементів у пилинках, прийнятому за замовчуванням у програмі *Cloudy* рівне $\Phi_{(MW,C)}^{Cloudy} \approx 2.253 \cdot 10^{-3}$ та $\Phi_{(MW,Si)}^{Cloudy} \approx 3.806 \cdot 10^{-3}$ відповідно. Тому, ми розраховували сітку фотоіонізаційних моделей світіння оболонок ПТ Галактики, використовуючи відповідні нормуючі множники: $GF_{(MW,C)} = 1.074$, $GF_{(MW,Si)} = 0.515$.

3 Синтетична фотометрія модельних спектрів та порівняння результатів моделювання із спостережуваними даними.

У випадку газопилових моделей для порівняння модельних даних із спостережуваними даними значну роль відіграє саме ГЧ-діапазон спектру, оскільки пилинки поглинають в основному оптичні кванти і перевипромінюють в ГЧ-діапазоні. У якості спостережуваних даних ми використали діаграми “колір-колір” в ГЧ діапазоні, отримані в праці [14] на основі результатів спостережень на ГЧ космічних телескопах *Spitzer* та *IRAS*, а також в рамках проекту *2MASS* [27, 28].

Ми також використали метод синтетичної фотометрії модельних спектрів, представлений також у праці [14], для співставлення результатів моделювання із спостережуваними даними в формі діаграм “колір-колір”. На рис. 2–5 для прикладу показано такі діаграми для випадку оболонок ПТ Галактики (MW) та відповідних наших моделей. Зокрема, на рис. 2–3 показано порівняння модельних та спостережуваних діаграм “колір-колір” у випадку зір-передниць цим ПТ з масами $1M_\odot$ та $1.5M_\odot$ для моделей з карбонатними пилинками, а на рис. 4–5 – для моделей з силікатними пилинками. З рисунків видно, що результати моделювання з карбонатними пилинками добре співпадають з даними спостережень. Це, зокрема, означає, що закон розподілу густини, отриманий Головатим та Мальковим [13] з аналізу ізотопів в емісійних лініях H_β та H_α оболонок реальних ПТ та використані у наших моделях є добрим наближенням до реального розподілу густини.

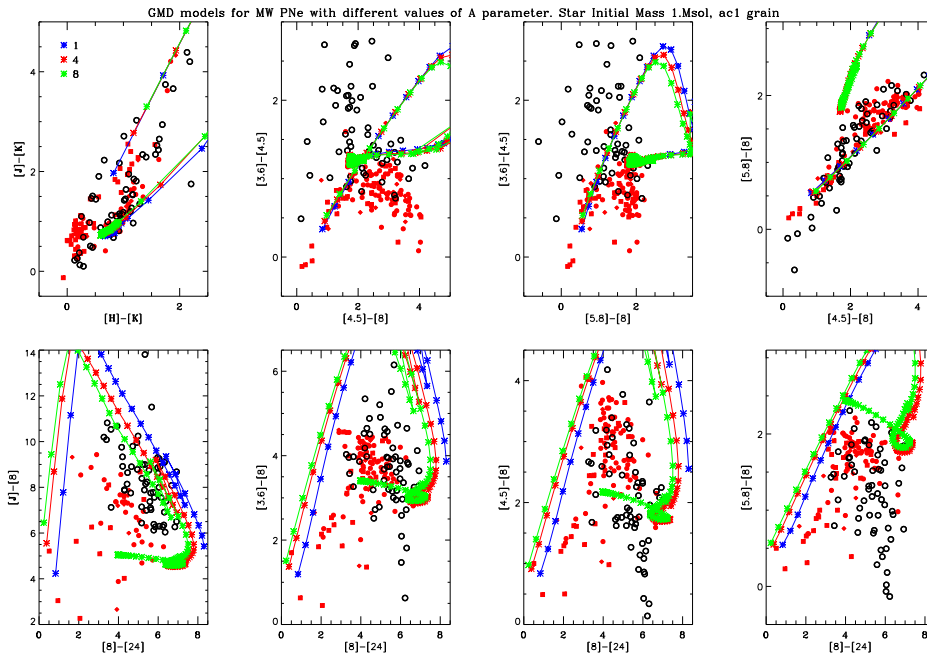


Рис. 2: Порівняння спостережуваних та модельних діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні для зорі-попередниці ПТ масою $1M_{\odot}$ на Головній послідовності для випадку карбонатного пилу.

Тим не менше, у випадку силікатного пилу є деякі проблеми з відтворенням моделями деяких спостережуваних діаграм. Це вказує, зокрема, на необхідність вдосконалення даних, що задають рецепт суміші цих пилинок.

4 Перевизначення хімічного складу оболонок ПТ Галактики

4.1 Вивід іонізаційно-корекційних множників.

Для виводу виразів для іонізаційно-корекційних множників (ІКМ) ми використали йонні вмісти, усереднені за об'ємом та зважені за електронну концентрацію, що були отримані під час розглянутого вище СФМС оболонок ПТ.

А саме, ми розглянули кореляції між величинами типу $\log X^{+k+1}/X^{+k}$ та $\log[(A^{+i}/H^+)/(A/H)]$, де A/H – відносний вміст елемента A (заданий під час СФМС), (A^{+i}/H^+) – відносний вміст в i -й стадії іонізації цього ж елемента (визначений, як вже згадувалось вище шляхом усереднення за об'ємом та зважуванням за електронною концентрацією), а X^{+k+1}/X^{+k} – є одним із співвідношень Ne^{++}/Ne^+ ,

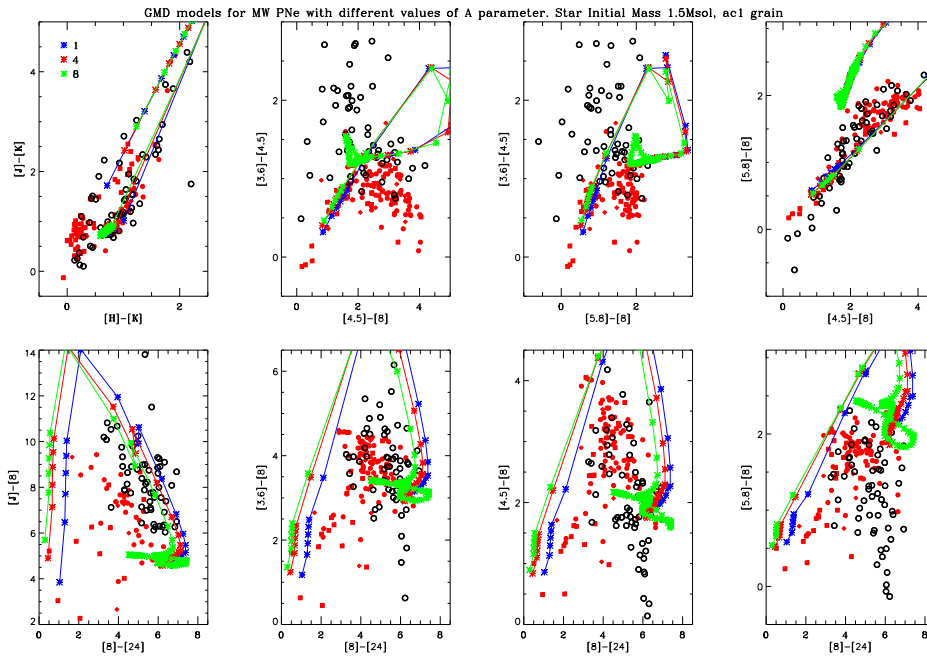


Рис. 3: Порівняння спостережуваних та модельних діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні для зорі-попередниці ПТ масою $1.5M_{\odot}$ на Головній послідовності для випадку карбонатного пилу.

C^{++}/C^{+} , O^{++}/O^{+} , S^{++}/S^{+} , або Ar^{3+}/Ar^{2+} . Такі кореляції використовують (див. напр. [4]) для визначення повного хімічного вмісту елемента A/H з його іонного вмісту (A^{+i}/H^{+}), тобто вони дозволяють врахувати неспостережувані стадії іонізації елемента A . Ми дослідили всеможливі кореляції такого типу, дві з яких представлені для прикладу на рис. 6. Отримані залежності апроксимувалися поліномами до 8 степеня:

$$\begin{aligned} \log[(A^{+i}/H^{+})/(A/H)] &= f(x), \\ x &= X^{+k+1}/X^{+k}, \\ f(x) &= \sum_{n=0}^8 C_n x^n, \end{aligned} \quad (2)$$

де C_n – коефіцієнти полінома, а $f(x)$ – апроксимаційна функція, що використовується для розрахунку ІКМ:

$$ICF(A_{obs}^{+i}/H^{+}) = 10^{-f(x)},$$

де A_{obs}^{+i}/H^{+} – відносний іонний вміст елемента A в оболонці реальної ПТ, визначений з діагностики її спостережуваного спектру. Тоді повний відносний хімічний вміст

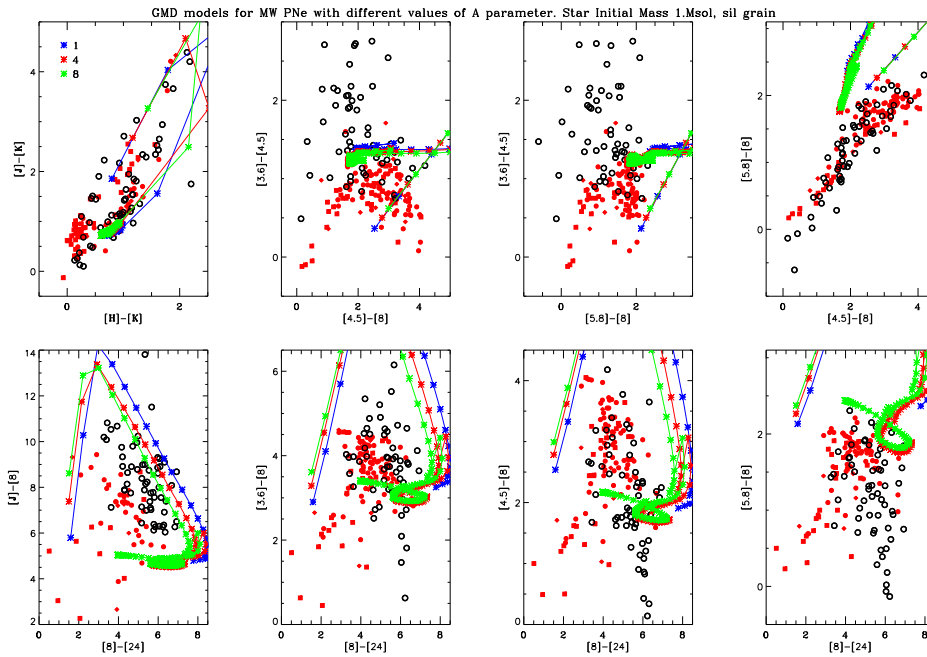


Рис. 4: Порівняння спостережуваних та модельних діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні для зорі-попередниці ПТ масою $1M_{\odot}$ на Головній послідовності для випадку силікатного пилу.

цього елемента визначається наступним чином:

$$\frac{A}{H} = ICF(A_{obs}^{+i}/H^+) \cdot \frac{A_{obs}^{+i}}{H^+}. \quad (3)$$

4.2 Діагностика небулярних спектрів.

Спостережувані емісійні лінії у спектрах оболонок ПТ Галактики були проаналізовані методом DIAGN [7], який дозволяє отримати електронні концентрацію, n_e , та температуру, T_e , методом перетину кривих залежностей для всіх важливих та доступних із спектру діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній. Кожне з таких співвідношень, $I(\lambda_1, X^{+i})$ та $I(\lambda_2, X^{+i})$ іона X^{+i} залежить від n_e та T_e :

$$\frac{I(\lambda_1, A^{+i})}{I(\lambda_2, A^{+i})} = F(n_e, T_e).$$

Функція $F(n_e, T_e)$ залежить також від заселеностей рівнів іона A^{+i} , які розраховуються шляхом розв'язку системи рівнянь статистичної рівноваги (стаціонарності). Таким чином, для кожного із діагностичних співвідношень з спостережуваного емісійного лінійчатого спектру небулярного середовища (у даному випадку – оболонки

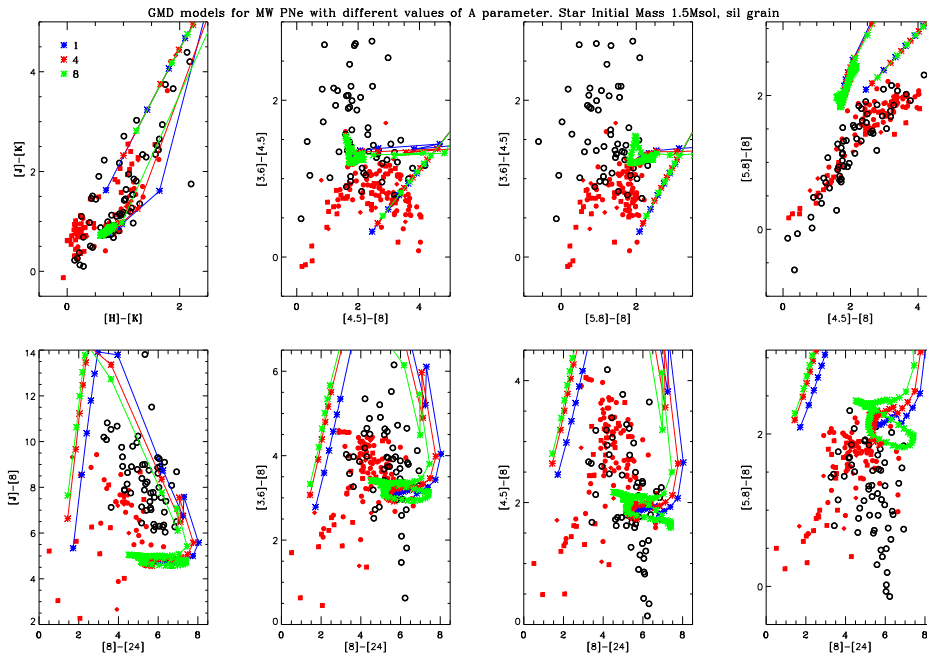


Рис. 5: Порівняння спостережуваних та модельних діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні для зорі-попередниці ПТ масою $1.5M_{\odot}$ на Головній послідовності для випадку силікатного пилу.

ПТ) ми можемо отримати залежність T_e-n_e . Аналогічні залежності розраховуються і для інших іонів. З перетину різних залежностей T_e-n_e визначаються значення T_e та n_e . У випадку доступності із спектрів відповідних діагностичних співвідношень програма DIAGN дозволяє визначити T_e та n_e для максимум чотирьох зон іонізації. Після цього програма розраховує відносні іонні вмісти всіх іонів, лінії яких доступні у спектрі.

4.3 Перевизначення хімічного вмісту оболонки планетарних туманностей Галактики та порівняння з попередніми результатами.

Усереднений вміст 9-ти хімічних елементів був визначений, використовуючи вирази (2–3) та нові ІКМ (див. табл. 2, 3), на основі відносного іонного вмісту, отриманого попередньо Мальковим [29] за допомогою програми DIAGN із спостережуваних спектрів.

На рис. 7 показано порівняння хімічного складу, отриманого у даній праці на основі ІКМ, виведених з газопилових моделей оболонки ПТ, з відповідними даними, отриманими Мальковим [29], який використовував ІКМ, що виведені з моделей, які

були розраховані ним без врахування вмісту пилу. Видно, що нові ІКМ дозволяють отримати хімічний склад з набагато більшою точністю, ніж старі. Відмінності між вмістом, отриманим за допомогою різних ІКМ, спричинені, в основному, наявністю пилу в нових моделях.

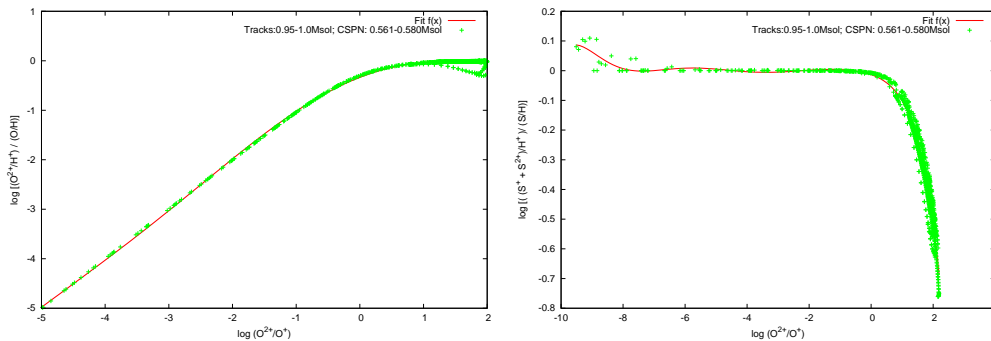


Рис. 6: Приклади визначення ІКМ для визначення вмісту кисню та сірки, використовуючи їх залежність від O^{++}/O^+ . Залежності були отримані з результатів СФМС оболонки ПТ вздовж еволюційних треків їх зір-попередниць з масами $0.95-1M_{\odot}$, яким відповідають ядра оболонки ПТ (CSPN – від англ. Central Star of Planetary Nebulae) в діапазоні мас $0.561-0.580M_{\odot}$.

Також, слід відзначити, що адекватність нашого СФМС оболонки ПТ перевірена шляхом порівняння модельних діаграм колір-колір в ІЧ-діапазоні з відповідними спостережуваними даними (див. вище). Це дозволяє нам стверджувати, що хімічний склад оболонки ПТ Галактики, отриманий нами, є більш достовірним.

З рис. 7 також видно, що врахування вмісту пилу у ФМС, які використовуються для виводу ІКМ, не впливає суттєво на визначення вмісту Ne/H , O/H та Ar/H , а на визначення вмісту інших елементів врахування пилу впливає суттєво.

5 Висновки

Розраховано сітку фотоіонізаційних моделей світіння газопилових оболонки ПТ вздовж еволюційних треків їх зір-попередниць найбільш поширених мас. Відповідність результатів моделювання даним спостережень перевірялася за допомогою діаграм “колір-колір” в ІЧ-діапазоні. При цьому використовувалися дані фотометричних спостережень, отримані в рамках проекту *2MASS*, а також на космічних телескопах *Spitzer* та *IRAS*.

Вперше зроблено оцінку впливу пилу на визначення хімічного складу газової складової оболонки ПТ. Показано, що врахування вмісту пилу у ФМС, які використовуються для виводу ІКМ, не впливає суттєво на визначення вмісту Ne/H , O/H та Ar/H , а на визначення вмісту інших елементів врахування пилу впливає суттєво.

Подяки. Автор висловлює глибоку подяку проф. Рішарду Шербі та докт. Агаті Карській (Центр Астрономії ім. М. Коперника, Республіка Польща) за надання та обробку результатів спостережень оболонок ПТ в ІЧ-діапазоні, отриманих у рамках проекту *2MASS*, а також на космічних телескопах *Spitzer* та *IRAS*.

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. Головатый, В. И. Дмитерко, Ю. Ф. Мальков, О. В. Рокач, *Астрономический журнал*. **70**, 691 (1993).
4. V. V. Holovaty, B. Ya. Melekh, M. M. Sokil, N. V. Havrylova, *Astronomy Reports*. **57**, 366 (2013).
5. В. В. Головатий, Н. В. Гаврилова, *Астрономический журнал*. **82**, 437 (2005).
6. Б. Я. Мелех, А. Р. Кузьмак, *Журнал фізичних досліджень*. **16**, 1902 (2012).
7. В. В. Головатий, Р. Е. Гершберг, Ю. Ф. Мальков, В. И. Проник, *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории*. **96**, 72 (1999).
8. R. A. Shaw & R. J. Dufour, *Publ. of the Astr. Soc. of the Pac.* **107**, 896 (1995).
9. E. Vassiliadis, P. R. Wood, *Astrophys. J. Supp.* **92**, 125 (1994).
10. A. W. A. Pauldrach, T. L. Hoffmann, & M. Lennon *Astron. Astroph.* **375**, 161 (2001).
11. T. Rauch, *Astron. Astroph.* **403**, 709 (2003).
12. K. Werner & U. Heber in *Stellar Atmospheres: Beyond Classical Models*. (NATO ASI Series C, eds. L. Crivellari, I. Hubney, & D. G. Hummer, Dordrecht: Kluwer, 1991).
13. В. В. Головатый, Ю. Ф. Мальков, *Астрон. журн.* **69**, 1166 (1992).
14. A. Karska *Porownanie własności podczerwonych mgławic planetarnych w Drodze Mlecznej i Wielkim Obłoku Magellana* (Torun: Praca magisterska na kierunku astronomia, 2009).
15. S. R. Pottash & J. Bernard-Salas, *Astron. Astroph.* **457**, 189 (2006).
16. S. R. Pottash & J. Bernard-Salas, *Astron. Astroph.* **490**, 715 (2008).
17. S. R. Pottash, J. Bernard-Salas & T.L. Roeling, *Astron. Astroph.* **481**, 393 (2008).
18. S. Guiles, J. Bernard-Salas, S. R. Pottash & T. L. Roeling, *Astrophys. J.* **660**, 1282 (2007).
19. C. Chiappini, S. K. Gorny, G. Stasinska & B. Barbuy, *Astron. Astroph.* **494**, 591 (2009).
20. P. Leisy & M. Dennefeld, *Astron. Astroph.* **456**, 451 (2006).
21. G. J. Ferland *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy* (University of Kentucky: Physics Department Internal Report, 2008), <http://www.nublado.org>.
22. P. A. M. van Hoof *Photo-Ionization Studies of Nebulae* (Ph.D. thesis, Rijksuniversiteit Groningen, 1997).

23. *J. E. Hansen, L. D. Travis*, Space Sci. Rev. **16**, 527 (1974).
24. *P. Guhathakurta, B. T. Draine*, Astrophys. J. **345**, 230 (1989).
25. *F. Rouleau & P. G. Martin*, Astrophys. J. **377**, 526 (1991).
26. *B. T. Draine & H. M. Lee.*, Astrophys. J. **285**, 89 (1984).
27. *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).
28. *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. Markwich-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).
29. *Yu. F. Mal'kov*, Astronomy Reports. **42**, 293 (1998).

Табл. 2: Вирази для визначення хімічного складу A/H газової компоненти в газопилових оболонках ПТ за співвідношеннями між сусідніми стадіями іонізації гелію, карбону, кисню та сірки, отримані шляхом поліноміальної апроксимації результатів СФМС.

$A/H = 10^{\log(A^{+i}/H^+) - f(x)}, f(x) \equiv \sum_{n=0}^8 C_n x^n$													
№	A/H	A^{+i}/H^+	x range	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	SD
$x = \log(\text{He}^{++}/\text{He}^+)$:													
PN1Ma*	He/H	$\text{He}^{++}/\text{H}^+$	-5..0.5	-0.3000	0.501542	-0.2928	-0.01565	0.0673	0.03729	0.00925	0.00114	0.00006	0.0004
PN1Mb**	He/H	$\text{He}^{++}/\text{H}^+$	-4.75..1	-0.2991	0.502261	-0.2828	-0.01828	0.0428	0.01626	0.00168	0.00123	0.00002	0.0018
PN2Ma	Cl/H	$\frac{\text{Cl}^+ + \text{Cl}^{++} + \text{Cl}^{3+}}{\text{H}^+}$	-5..0.5	-0.01533	-0.03725	-0.03416	-0.01505	-0.00358	-0.00071	-0.00020	-0.00004	-0.000003	0.0015
PN2Mb	Cl/H	$\frac{\text{Cl}^+ + \text{Cl}^{++} + \text{Cl}^{3+}}{\text{H}^+}$	-4.75..1	-0.01367	-0.04122	-0.03079	-0.00750	-0.01038	-0.01183	-0.00509	-0.00094	-0.000064	0.0081
$x = \log(\text{C}^{++}/\text{C}^+)$:													
PN3Mb	C/H	C^+/H^+	-3.8..1	-0.29743	0.50925	-0.30246	-0.04850	0.03180	0.01373	-0.00027	-0.00088	-0.00011	0.011
PN4Ma	N/H	N^{++}/H^+	-3.8..1	-0.52628	0.72102	-0.27864	0.10456	-0.04671	-0.04899	0.00637	0.00723	0.00096	0.098
$x = \log(\text{O}^{++}/\text{O}^+)$:													
PN5Mb	N/H	N^+/H^+	-5..2.2	-0.34874	-0.49432	-0.26430	-0.02005	0.01210	0.00176	-0.00017	-0.00004	-0.000002	0.086
PN6Ma	N/H	N^{++}/H^+	-5..2.2	-0.12744	0.20145	-0.11386	0.00574	0.00148	-0.00147	-0.00043	-0.00004	-0.000002	0.095
PN7Ma	O/H	O^+/H^+	-5..1.2	-0.33531	-0.50201	-0.20008	-0.00425	0.00878	0.00028	-0.00035	-0.00005	-0.000002	0.05
PN8Ma	O/H	O^{++}/H^+	-9.5..0.1	-0.30303	0.51962	-0.26514	-0.04277	0.01240	0.00622	0.00103	0.00008	0.000002	0.004
PN8Mb	O/H	O^{++}/H^+	-9.5..0.1	-0.30689	0.4816	-0.29535	-0.03157	0.02896	0.01191	0.00191	0.00014	0.000004	0.011
PN9Ma	O/H	$\frac{\text{S}^+ + \text{S}^{++}}{\text{H}^+}$	-9.5..1	-0.013389	-0.03577	-0.02857	-0.01479	-0.00669	-0.00202	-0.00033	-0.00003	-0.000001	0.034
PN9Mb	O/H	$\frac{\text{S}^+ + \text{S}^{++}}{\text{H}^+}$	-2.8..0.1	-0.010428	-0.08991	-0.06122	0.04064	0.00962	-0.0207	-0.0041	0.00185	0.00036	0.058
PN10Ma	S/H	S^{++}/H^+	-1..0.3	-0.021341	-0.032755	-0.065861	-0.011609	0.00695	0.000424	-0.00181	-0.00055	-0.00005	0.04
PN10Mb	S/H	S^{++}/H^+	-2..0.5	-0.106286	-0.1243	0.0473	0.07593	-0.04537	-0.02898	0.00654	0.00255	-0.00037	0.064
PN11Ma	Si/H	$\frac{\text{Si}^+ + \text{Si}^{++}}{\text{H}^+}$	-7..0.5	-0.017559	-0.03411	-0.02218	-0.01202	-0.00644	-0.00209	-0.00035	-0.00003	-0.0000009	0.022
PN11Mb	Si/H	$\frac{\text{Si}^+ + \text{Si}^{++}}{\text{H}^+}$	-8..0	-0.020717	-0.050522	-0.02739	-0.008636	-0.00522	-0.00198	-0.00035	-0.00003	-0.0000009	0.023

* - a означає, що ІКМ отримано для ПТ з зірками-попередницями в діапазоні мас $0.95-1M_{\odot}$

** - b означає, що ІКМ отримано для ПТ з зірками-попередницями в діапазоні мас $1.5M_{\odot}$

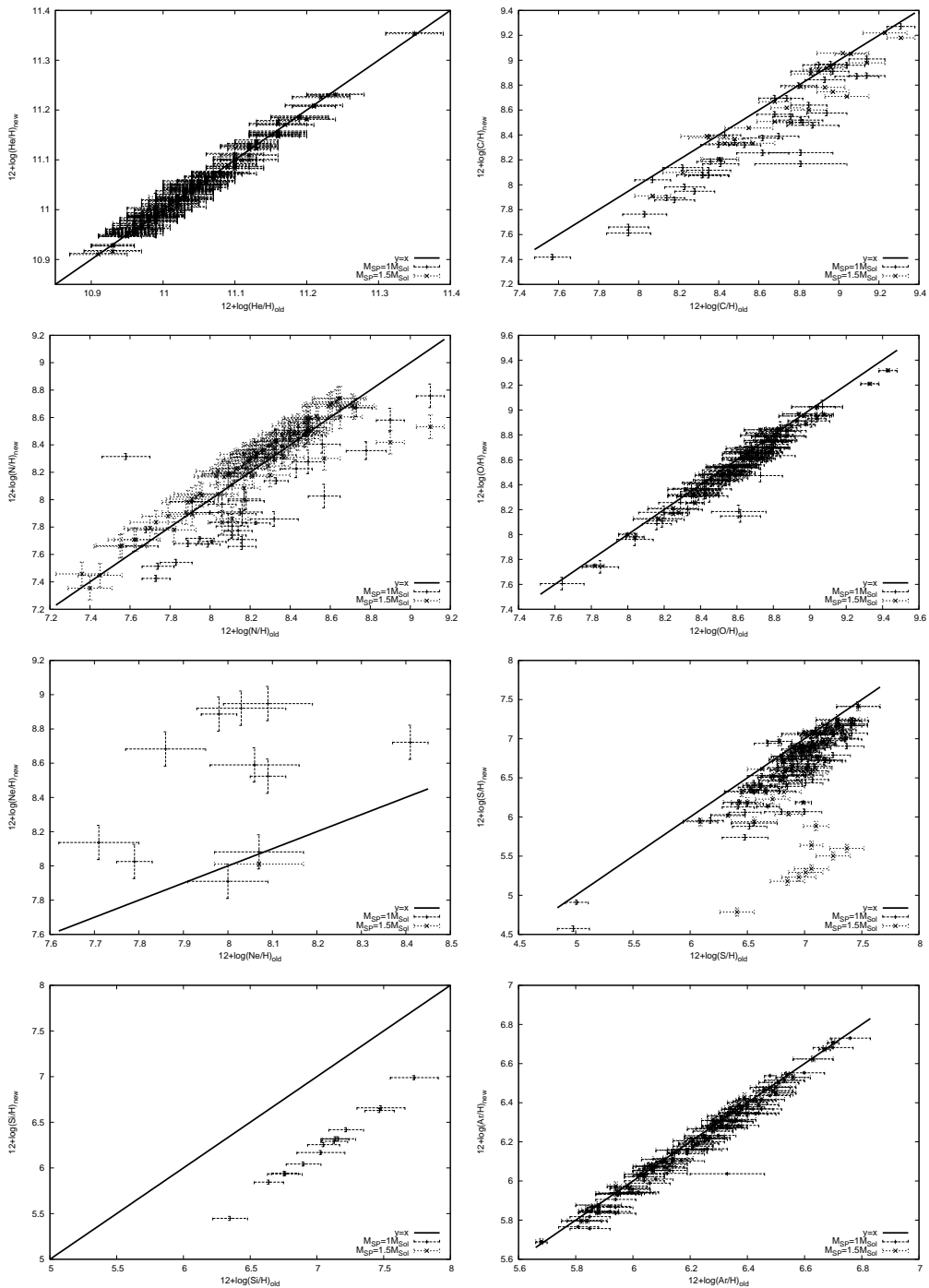


Рис. 7: Порівняння хімічного складу, отриманого з і без врахування вмісту пилу.

Табл. 3: Вирази для визначення хімічного складу A/H газової компоненти в газопилових оболонках ПТ за співвідношеннями між сусідніми стадіями іонізації аргону, отримані шляхом поліноміальної апроксимації результатів СФМС. N – номер виразу.

A/H = 10 ^{log(A⁺/H⁺)-f(x)} , f(x) ≡ ∑ _{n=0} ⁸ C _n x ⁿ													
N [*]	A/H	A ⁺ /H ⁺	x range	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	SD
x = log(S ⁺⁺ /S ⁺):													
PN12Ma	S/H	S ⁺ /H ⁺	-1.7..0.6	-0.29982	-0.49609	-0.31542	-0.05868	0.18654	0.22309	-0.11268	-0.26281	-0.09055	0.007
PN12Mb	S/H	S ⁺ /H ⁺	-1.8..0.7	-0.29375	-0.42369	-0.32412	-0.52851	-0.22452	0.57634	0.44111	-0.05083	-0.06775	0.013
PN13Ma	Cl/H	$\frac{Cl^{++}+Cl^{3+}}{H^+}$	-1.6..1.0	-0.58406	0.78399	-0.22466	-0.05418	0.00361	-0.0053	0.00948	0.0016	-0.00139	0.014
PN13Mb	Cl/H	$\frac{Cl^{++}+Cl^{3+}}{H^+}$	-1.7..-0.5	-0.47658	0.93091	-0.41013	-0.26583	0.1331	0.08442	-0.03381	-0.00966	0.00366	0.025
PN14Ma	Cl/H	Cl ⁺⁺ /H ⁺	-1.6..0.7	-0.57766	0.77457	-0.31437	-0.11428	0.18291	0.20944	-0.0892	-0.21511	-0.07414	0.022
PN14Ma	Cl/H	Cl ⁺⁺ /H ⁺	-1.75..-0.5	-0.597	1.037	0.30807	-0.71417	-1.55916	-0.06263	1.1314	0.63359	0.09461	0.016
A/H = 10 ^{log(A⁺/H⁺)-f(x)} , f(x) ≡ ∑ _{n=0} ⁸ C _n x ⁿ													
N	A/H	A ⁺ /H ⁺	x range	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	SD
x = log(Ar ³⁺ /Ar ²⁺):													
PN15Ma	C/H	$\frac{C^++C^{2+}}{H^+}$	-4.8..0.2	-0.1371	-0.36949	-0.59178	-0.66793	-0.47278	-0.19782	-0.04731	-0.00597	-0.00031	0.023
PN16Ma	Ne/H	Ne ⁺ /H ⁺	-4.8..0	-1.96231	-1.12968	-1.13781	-2.29915	-1.85001	-0.71177	-0.14268	-0.01431	-0.00056	0.10
PN16Mb	Ne/H	Ne ⁺ /H ⁺	-4..-1.5	-177.742	-540.839	-709.016	-521.549	-235.33	-66.7267	-11.6202	-1.13737	-0.04795	0.01
PN17Ma	S/H	$\frac{S^++S^{++}}{H^+}$	-4.8..-1.8	-0.49078	-0.6182	-0.16712	0.01904	-0.09847	-0.10962	-0.04157	-0.00692	-0.00043	0.03
PN17Mb	S/H	$\frac{S^++S^{++}}{H^+}$	-4.3..-2	-0.455921	-0.670061	-0.303322	-0.04513	-0.0272	-0.0184	-0.00271	0.00042	0.00009	0.04
PN18Ma	Si/H	$\frac{Si^++Si^{++}}{H^+}$	-4.8..-2	-0.45013	-0.55928	0.04797	0.56875	0.467955	0.176803	0.03483	0.00343	0.00013	0.03
PN18Mb	Si/H	$\frac{Si^++Si^{++}}{H^+}$	-4.2..-2	-0.398103	-0.515315	-0.256602	-0.315172	-0.41131	-0.242585	-0.068906	-0.00933	-0.00048	0.08
PN19Ma	Ar/H	Ar ²⁺ /H ⁺	-2..0.3	-0.304022	-0.527558	-0.398528	-0.188899	-0.106178	-0.0654	-0.0167	0.003418	0.00169	0.005
PN19Mb	Ar/H	Ar ²⁺ /H ⁺	-1.25..-0.25	-0.31701	-0.551158	-0.315634	0.076766	0.075543	-0.046033	0.062252	0.111985	0.035026	0.021
PN20Ma	Ar/H	Ar ³⁺ /H ⁺	-1.8..0.7	-0.304022	0.472442	-0.398528	-0.188899	-0.106178	-0.0654	-0.016658	0.003418	0.00169	0.005
PN20Mb	Ar/H	Ar ³⁺ /H ⁺	-1.4..-0.25	-0.31701	0.448842	-0.315634	0.07677	0.07554	-0.04603	0.06225	0.111985	0.035026	0.021
PN21Ma	Cl/H	$\frac{Cl^++Cl^{2+}}{H^+}$	-4.8..0.2	-0.301825	-0.543079	-0.489448	-0.336574	-0.188125	-0.073271	-0.017351	-0.00221	-0.00012	0.011
PN21Mb	Cl/H	$\frac{Cl^++Cl^{2+}}{H^+}$	-4.3..-1.1	-0.311255	-0.525784	-0.303739	0.019301	0.132046	0.08356	0.0254	0.00387	0.000236	0.023

* - a означає, що ІКМ отримано для ПТ з зірками-попередницями в діапазоні мас 0.95-1M_⊙

** - b означає, що ІКМ отримано для ПТ з зірками-попередницями в діапазоні мас 1.5M_⊙

Стаття надійшла до редакції 10.05.2015

прийнята до друку 0.0.2016

CHEMICAL COMPOSITION DETERMINATION IN THE DUSTY GAS ENVELOPE OF THE PLANETARY NEBULAE

B. Melekh

Ivan Franko National University of Lviv

Astrophysics Department

8 Kyrylo and Methody Str., 79000 Lviv, Ukraine

e-mail: bmelekh@gmail.com

The photoionization models grid for planetary nebulae (PNe) which contain the carbonaceous or silicate dust grains was calculated. Models were calculated along evolutionary tracks of the stars-predecessor of PNe at the two various values of metallicity which correspond to the averaged heavy elements abundances of Milky Way and Large Magellanic Cloud. The synthetic photometry of the modelling spectra in IR wavelength region was done and obtained results were compared with observed data from *IRAS* and *Spitzer* IR space telescopes as well as from *2MASS* project. The new expressions for ionization-correction factors were derived which allow to take into account the unobserved ionization stages of the chemical elements in gaseous component of the dusty gas envelope of the PNe. The chemical compositions in more than 100 planetary nebulae of Milky Way were redetermined.

Key words: planetary nebulae, dust grains, photoionization modelling, chemical composition

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
ГАЗОПЫЛЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ПЛАНЕТАРНЫХ
ТУМАННОСТЕЙ**

Б. Мелех

Львовский Национальный университет имени Ивана Франка

кафедра астрофизики

ул. Кирила и Мефодия, 8, 79000, Львов, Украина

e-mail: bmelekh@gmail.com

Рассчитана сетка фотоионизационных моделей свечения оболочек планетарных туманностей (ПТ), содержащих углеродную или силикатную пыль. Модели рассчитаны вдоль эволюционных треков звезд-предшественниц ПТ для двух значений металличности, соответствующих средним значениям содержания тяжелых элементов в ПТ Галактики и Большого Магелланового Облака. Осуществлена синтетическая фотометрия в ИЧ-диапазоне модельных спектров, полученные результаты сравниваются с соответствующими данными наблюдений, полученными на ИК космических телескопах *IRAS* и *Spitzer*, а также в рамках проекта *2MASS*. Получены новые выражения для ионизационно-коррекционных множителей, которые позволяют учитывать ненаблюдательные стадии ионизации химических элементов в газовой компоненте газопылевой оболочки ПТ. Переопределен химический состав более ста оболочек ПТ.

Ключевые слова: Планетарные туманности, пыль, фотоионизационное моделирование, химический состав