ФОТОЙОНІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБОЛОНОК ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ З УРАХУВАННЯМ ПИЛУ. II. ВИЗНАЧЕННЯ МАС НЕБУЛЯРНОЇ ОБОЛОНКИ ТА ЇЇ ЗОРІ-ПОПЕРЕДНИЦІ ЗА ЕЛЕКТРОННОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ У ВИПАДКУ ОДНОРІДНОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ НЕБУЛЯРНОЇ РЕЧОВИНИ

А. Р. Кузьмак¹ , Б. Я. Мелех²

¹Кафедра теоретичної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 12, Львів, 79005, Україна,
e-mail: andrijkuzmak@gmail.com

²Кафедра астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна,
e-mail: bmelekh@gmail.com

(Отримано 26 грудня 2019 р.; в остаточному вигляді — 13 лютого 2020 р.; прийнято до друку — 17 лютого 2020 р.; опубліковано онлайн — 02 квітня 2020 р.)

Розраховано сітку фотойонізаційних моделей світіння газових оболонок однорідних галактичних планетарних туманностей з урахуванням пилу вздовж еволюційних треків центральних зір. На основі цих розрахунків побудовано залежності електронної температури світіння туманності в ділянці ліній двічі йонізованого кисню ($O\ III$) від віку. Для туманностей, зорі-попередниці яких є досить маломасивні (до $\approx 1.5M_{\odot}$), ці залежності містять ділянки, вздовж яких електронна температура майже не змінюється з віком. Проте ця температура чутлива до маси зорі-попередниці й маси оболонки туманності. Така поведінка електронної температури в ділянці світіння ліній двічі йонізованого кисню може бути використана для визначення маси планетарної туманності. У цій статті ми пропонуємо метод визначення маси планетарної туманності на основі значень усередненої електронної температури в ділянці світіння ліній двічі йонізованого кисню для туманностей з однорідним розподілом густини в оболонці. Цей метод складається з двох кроків. На першому кроці для конкретної планетарної туманності ми визначаємо відношення інтенсивностей в ділянці світіння ліній йонізованого сульфору $I_{[SII]\lambda 6716}/I_{[SII]\lambda 6731}$. Це співвідношення досить чутливе до віку туманності, що дає нам обмеження на значення цього параметра. На другому кроці на основі інтенсивностей світіння планетарної туманності в ділянці ліній двічі йонізованого кисню діагностичними методами визначаємо електронну температуру. Враховуючи обмеження на вік планетарної туманності, отриманий результат порівнюємо із залежностями електронної температури від віку для різних значень мас зорі-попередниці та оболонки планетарної туманності. Перетин рівня отриманої температури з конкретною кривою у відповідному віковому проміжку дозволяє визначити масу зорі-попередниці та оболонки планетарної туманності. Ця процедура була перевірена за допомогою двох методів визначення електронної температури світіння туманності в ділянці ліній двічі йонізованого кисню, а саме: за допомогою таких діагностичних методів, як перетин кривих “ $n_e - T_e$ ” та T_e -метод. У результаті показано, що за допомогою нашого методу можна з певною точністю визначити масу зорі-попередниці. Маса ж оболонки туманності обчислюється з точністю $\pm 0.1 M_{\odot}$.

Ключові слова: планетарні туманності, фотойонізаційні моделі світіння (ФМС), електронна температура, маса оболонки ПТ.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.24.1905>

I. ВСТУП

Визначення мас оболонок планетарних туманностей (ПТ) є досить давньою і важливою проблемою в астрофізиці [1–22]. Як показано у праці [23], результати визначення мас оболонок ПТ різноманітними методами відрізняються інколи на порядок. Це свідчить про необхідність пошуку нових, достовірніших методів оцінки цієї величини, які б можна було перевірити.

У попередній праці [26] ми розраховували сітку фотойонізаційних моделей світіння (ФМС) галактичних ПТ з різними характеристиками пилу вздовж еволюційних треків центральних зір. У цій статті було прийнято, що розподіл густини в туманності є однорідним. У результаті досліджено вплив наявності пилу

на спектр світіння оболонки ПТ. Також зауважено, що величина електронної температури залежить від маси оболонки туманності. А саме: що менш масивна оболонка туманності, то вища її температура. Ця властивість дозволяє пов'язати масу ПТ з електронною температурою, яку можна визначати зі спостережуваних даних відносно простими та швидкими діагностичними методами. У теперішній праці за результатами розрахунку сітки ФМС для однорідного розподілу густини в оболонці ПТ ми пропонуємо спосіб визначення маси туманності на основі її електронної температури в ділянці світіння ліній $O\ III$.

Робота складається з таких розділів. У розділі II ми дали загальний теоретичний опис методики визначення об'єму і маси оболонки ПТ. Діагностичні методи

визначення електронної температури оболонки ПТ за перетином кривих “ $n_e - T_e$ ” (підрозділ III А) та T_e -методом (підрозділ III Б) описані в розділі III. Опис сітки ФМС галактичних ПТ — у розділі IV. У розділі V ми подаємо аналіз результатів визначення маси ПТ на основі значень електронної температури. Висновки подано в розділі VI.

II. ОБ’ЄМ ТА МАСА ОБОЛОНКИ ПЛАНЕТАРНОЇ ТУМАННОСТІ

Загалом оболонка ПТ складається з атомів і йонів гідрогену та гелію. Внесок від пилового складника, який головню містить кремній та карбон, становить лише 0.1–0.5% від повної маси оболонки. Тому масу оболонки туманності можна визначити так:

$$m_{\text{PN}} = \int_V \left(m_{\text{H}}(n_{\text{H}^0} + n_{\text{H}^+}) + m_{\text{He}}(n_{\text{He}^0} + n_{\text{He}^+} + n_{\text{He}^{++}}) + \dots \right) dV, \quad (1)$$

де n_i — концентрація відповідного елемента чи йона в туманності, m_i — маса відповідного елемента. Оскільки маси всіх інших компонент, зокрема й важких елементів (металів), є мізерні (наприклад, у наших моделях $\text{C}/\text{H} = 5 \cdot 10^{-4}$, а $\text{O}/\text{H} = 4.4 \cdot 10^{-4}$) і не роблять помітного внеску в загальну масу туманності, то ми їх явно не виписували, а позначили трикрапкою. Інтегрування ведеться за всім об’ємом V туманності. Зауважимо, що частка гелію щодо частки гідрогену в ПТ становить 11% ($n_{\text{He}^0} + n_{\text{He}^+} + n_{\text{He}^{++}} \approx 0.11(n_{\text{H}^0} + n_{\text{H}^+})$). Враховуючи, що $m_{\text{He}} \approx 4m_{\text{H}}$, формулу (1) можна записати так:

$$m_{\text{PN}} \approx 1.44m_{\text{H}} \int_V (n_{\text{H}^0} + n_{\text{H}^+}) dV. \quad (2)$$

Визначаючи об’єм V , можна врахувати, що випромінювання в лінії H_β відбувається практично за всім об’ємом туманності. Його обчислюємо так:

$$V \approx V_{\text{H}^+} = 4\pi D^2 F(\text{H}_\beta) / \epsilon(\text{H}_\beta), \quad (3)$$

де V_{H^+} — об’єм, що займає йонізований гідроген, D — відстань від спостерігача до туманності, $F(\text{H}_\beta)$ — випромінюваний на міжзоряне поглинання потік у лінії H_β , $\epsilon(\text{H}_\beta)$ — випромінювальна здатність (емісійність) у відповідній лінії. Детальний опис визначення об’єму ПТ можна знайти, для прикладу, в роботі [22]. Отже, знаючи концентрацію гідрогену та розміри туманності, за формулою (2) знаходимо її масу. Для прикладу, в роботі [24] емпіричним способом, на основі аналізу мап ізотопів у лінії H_β дванадцяти реальних туманностей у припущенні їх сферичної симетрії Головатий та Мальков отримали радіальний розподіл густини в ПТ. Коли просторовий розподіл густини в туманності є однорідним ($n_{\text{H}^0} + n_{\text{H}^+} = \text{const}$), а оболонка є сферично-симетричною, формула (2) набере такого вигляду:

$$m_{\text{PN}} \approx 1.44m_{\text{H}}(n_{\text{H}^0} + n_{\text{H}^+}) \frac{4}{3}\pi (R_o^3 - R_i^3), \quad (4)$$

де R_o і R_i — зовнішній і внутрішній радіуси оболонки ПТ відповідно, які пов’язані між собою таким співвідношенням [25]:

$$\frac{R_o - R_i}{2R_o} = 0.3. \quad (5)$$

У наших моделях розподіл густини за об’ємом туманності однорідний для кожного віку. Однак кожному прийнятому значенню густини можна знайти відповідне усереднене за об’ємом значення густини, приймаючи радіальний розподіл концентрації з праці [24]. Під час розрахунку моделей сітки маса оболонки ПТ була одним із вільних параметрів. Зовнішній радіус визначався швидкістю розширення оболонки ПТ, а внутрішній — за допомогою виразу (5). На основі заданої маси туманності та значень R_o та R_i визначали концентрацію гідрогену в ній.

III. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ В ПТ

За допомогою фотойонізаційного моделювання оболонки ми визначили електронну температуру оболонки ПТ в ділянці світіння ліній О III залежно від її віку. Ми отримали результати для моделей зі значеннями маси зорі-попередниці ПТ 1 і 1.5 $M_\odot$, а також, для оболонки ПТ з масами 0.1, 0.2, 0.3 і 0.4 $M_\odot$. Саме таких зір-попередниць ПТ найбільше, тому в цій праці ми не розглядатимемо масивніших зір.

У випадку малих мас зорі-попередниці в туманностях переважає карбонний пил, тому в моделюванні враховано тільки цей вид пилу. Детальний опис сітки ФМС оболонки ПТ наведено в розділі IV. На рис. 1 показано вікову залежність електронної температури в ділянці світіння ліній О III. Видно чітке розділення температурних еволюційних розподілів, отриманих для різних мас зорі-попередниці.

Також ці залежності мають ділянки з майже сталою електронною температурою оболонки туманності. Для моделей із масою зорі-попередниці 1 $M_\odot$ ця ділянка припадає приблизно на віки від 5000 до 12000 років, а для моделей із масою зорі-попередниці 1.5 $M_\odot$ вона трохи ширша і припадає на віки від 8000 до 22000 років. У межах цих ділянок можемо спостерігати розділення температури за масами оболонки ПТ. Отже, маючи інформацію про електронну температуру в туманності в межах цих віків, ми можемо з досить великою точністю визначити масу зорі-попередниці, а також із певною точністю — масу оболонки ПТ. Наші припущення ми проаналізували за допомогою двох методів, які дають змогу визначити електронну температуру оболонки ПТ в ділянці світіння ліній О III. Перший ґрунтується на діагностиці світіння оболонки ПТ шляхом побудови залежностей $n_e - T_e$ для різних діагностичних співвідношень між інтенсивностями емісійних ліній (див. напр. [27]), які світяться в одній зоні йонізації, та на аналізі ділянки їх перетину (див. опис у підрозділі III А), а другий

(так званий T_e -метод, або ж двозонний метод Пейджела [31]) базується на діагностичному співвідношенні $\lambda 4363\text{\AA}/(\lambda 4959\text{\AA} + \lambda 5007\text{\AA})[\text{O III}]$ (див. опис у підрозділі ПБ), яке дуже чутливе до значень електронної температури й мало чутливе до значень електронної концентрації. Також для аналізу ми використали діагностичне співвідношення $\lambda 6716\text{\AA}/\lambda 6731\text{\AA}[\text{S II}]$, яке, навпаки, — чутливе до значень електронної концентрації і майже нечутливе до електронної температури.

Отримані результати ми подали в розділі V.

Рис. 1. (Кольоровий онлайн.) Залежності електронної температури в зоні світіння ліній [O III], отримані за допомогою фотойонізаційного моделювання оболонок ПТ для 1 і $1.5 M_{\odot}$ зорі-попередниці, а також для оболонок із масами 0.1, 0.2, 0.3 і $0.4 M_{\odot}$ усередненням за об'ємом зі зважуванням за електронною концентрацією. Різні типи ліній вказують на масу зорі-попередниці, а саме: суцільна лінія відповідає $M_{\text{star}} = 1 M_{\odot}$, а штрихова — $M_{\text{star}} = 1.5 M_{\odot}$. Видно чітке розділення залежностей за масами зір-попередниць ПТ. Кольори ліній вказують на маси оболонок ПТ.

А. Визначення електронної температури за допомогою діагностики світіння ПТ

Метод діагностики світіння ПТ дозволяє розрахувати електронну температуру T_e та концентрацію n_e через аналіз ділянки “перетину кривих” $n_e - T_e$, побудованих для різних відношень інтенсивностей заборонених ліній одного й того ж йона хімічного елемента. За знайденими в такий спосіб значеннями T_e та n_e (для багатьох емісійних лініями спектра — у декількох зонах йонізації) розраховують йонний A^{+i}/H^{+} , а з використанням йонізаційно-корекційних множників — і хімічний A/H вміст. Однією з комп'ютерних реалізацій цього методу є програма *Diagn* [27]. Цей метод ґрунтується на виведенні залежностей T_e від n_e для різних відношень інтенсивностей ліній. Відношення інтенсивностей ліній того самого йона A^{+i} залежатиме від n_e і T_e так:

$$\frac{I(\lambda_1, A^{+i})}{I(\lambda_2, A^{+i})} = f(n_e, T_e), \quad (6)$$

де λ_1 і λ_2 — довжини хвиль відповідних ліній, а функція $f(n_e, T_e)$ залежить від заселеностей рівнів йона A^{+i} , які розраховуються розв'язком системи рівнянь статистичної рівноваги. Отже, інформація про інтенсивності відповідних ліній, що отримується зі спостережуваного спектра, дозволяє для кожного відношення розрахувати залежність T_e від n_e , а з перетину різних залежностей визначаємо значення n_e та T_e . Програма *Diagn* дає змогу визначити T_e і n_e для чотирьох зон йонізації, що зумовлено доступністю зі спектрів відповідних діагностичних співвідношень. У результаті програма розраховує відносні йонні вмісти всіх йонів, лінії яких доступні у спектрі. Детальний алгоритм цього методу описано в посібнику [28].

Б. T_e -метод для визначення електронної температури світіння ПТ

Одним із найбільш популярних методів для діагностики електронної температури та йонного вмісту в небулярних середовищах є так званий T_e -метод. Він базується на залежності від електронної температури відношень інтенсивностей авроральних до небулярних ліній. Зауважимо, що він майже не чутливий до електронної концентрації. Якщо врахувати залежність між значеннями електронної температури у двох різних зонах йонізації (наприклад, O^{+} та O^{++}), то метод можна розширити до двозонного.

Ми використаємо реалізацію T_e -методу під назвою двозонний метод Пейджела [31] (див. також опис методу в [28–30]). Цей метод ґрунтується на відношенні інтенсивностей авроральної лінії двічі йонізованого оксигену $I_{\text{O III}}\lambda 4363$ до суми інтенсивностей небулярних ліній $I_{\text{O III}}\lambda 4959 + \lambda 5007$ цього ж йону. Для визначення електронної температури в межах зони світіння лінії O III існують так співвідношення [28, 31]:

$$t_3 = t_e(\text{O III}) = 1.432 \left[\log \frac{I_{\text{O III}}\lambda 4959 + \lambda 5007}{I_{\text{O III}}\lambda 4363} - 0.85 + 0.03 \log t_3 + \log (1 + 0.0433 t_3^{0.06}) \right]^{-1}, \quad (7)$$

$$x = 10^{-4} n_e t_2^{-1/2}, \quad (8)$$

де n_e — електронна концентрація в одиницях cm^{-3} ; $t_3 = t_e(\text{O III})$ — електронна температура в межах зони світіння лінії [O III] в одиницях 10^4 K ; $t_2 = t_e(\text{O II})$ — електронна температура в межах зони світіння лінії [O II] в одиницях 10^4 K . Для однорідних за густиною оболонок ПТ із сітки моделей, описаної нижче, ми отримали такий зв'язок між t_2 та t_3 :

$$t_2 = 1.01 t_3 - 0.03. \quad (9)$$

Отже, в ітеративний спосіб з рівняння (7) із урахуванням рівнянь (8) і (9) визначаємо електронну температуру в ділянках світіння ліній [O II] та [O III] для ПТ.

IV. ОПИС СІТКИ ОБОЛОНОК ПТ

З метою визначення маси зорі-попередниці та оболонки ПТ на основі електронної температури останньої в ділянці світіння ліній двічі йонізованого оксигену, ми розрахували сітку ФМС галактичних ПТ з карбонним типом пилу. Моделі розраховано вздовж еволюційних треків ядер ПТ [32]. Швидкість розширення оболонки ПТ вважалась рівною 10 км/с за ефективної температури зорі $T_{\text{eff}} < 20000$ К (скидання оболонки ПТ) та 20 км/с за $T_{\text{eff}} \geq 20000$ К, і ця швидкість разом із віком визначала зовнішній радіус оболонки ПТ. У припущенні сталої густини внутрішній радіус туманності визначали за формулою (5). Для кожної такої вибраної точки на еволюційному треці розраховували окрему сітку ФМС за такими вільними параметрами, як маса зорі-попередниці і маса ПТ. Хімічний склад газу приймали для всіх моделей однаковим, і він дорівнював середньому від складу оболонок ПТ нашої Галактики (див. попередню нашу роботу [26]).

Фотойонізаційні моделі світіння були розраховані вздовж еволюційних треків ядер ПТ [32], які відрізняються від інших тим, що розраховані для різних значень металічності.

З метою прискорення розрахунку моделей час переходу з асимптотичної гілки гігантів (АГГ) до пост-АГГ прийнято рівним нулеві. Моделі за відсутності такого припущення не відповідають даним спостережень [33].

Перші точки, з яких ми починали розрахунок сітки ФМС на згаданих вище еволюційних треках (нульовий час для сітки ФМС), вибирали за допомогою умови, що ефективна температура центральної зорі становить 10000 К. Наступні отримували шляхом інтерполяцією з кроком 500 років. У більшості моделей оболонка ПТ йонізується протягом перших 500 років.

Для Молочного Шляху (Milky Way, MW) брали треки з металічністю $Z = 0.016$. Хімічний склад газової компоненти оболонок ПТ для Молочного Шляху взято з праці [34], у якій автор вивела його на основі компіляції й усереднення вмісту елементів, отриманих із праць різних авторів.

Концентрація карбонного пилу $n_C(\text{MW})$ відносно концентрації гідрогену n_H для галактичних ПТ отримана у праці [34]:

$$n_C(\text{MW}) \approx 2.9 \cdot 10^{-4} n_H. \quad (10)$$

Відношення мас пилу та газу будуть [26]:

$$\Phi(C, \text{MW}) \approx 2.42 \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

Геометрія моделей — сферично-симетрична. Вважається, що густина туманності для цього віку є однакою в кожній точці оболонки. Під час розрахунку сітки ФМС ми задали дві маси зорі-попередниці: 1 і 1.5 $M_\odot$ — і чотири маси оболонки ПТ: 0.1, 0.2, 0.3 і 0.4 $M_\odot$ відповідно.

V. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МАС ОБОЛОНОКИ ПТ І Ї ЗОРІ-ПОПЕРЕДНИЦІ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

Досить молоді ПТ (до ≈ 15000 років) є доволі чутливими до відношення інтенсивностей світіння туманності в області світіння ліній йонізованого сульфуру S II, а саме до співвідношення $I_{[\text{S II}]\lambda 6716}/I_{[\text{S II}]\lambda 6731}$ (див. рис. 2). Наш метод придатний для визначення мас зір-попередниць ПТ для віків від 5000 до 15000 років. Отже, щоб визначити масу ПТ і масу зорі-попередниці, необхідно:

1. З діагностичного співвідношення емісійних ліній $I_{[\text{S II}]\lambda 6716}/I_{[\text{S II}]\lambda 6731}$ визначити обмеження на вік ПТ.
2. На основі інтенсивностей заборонених емісійних ліній [O III] визначити електронну температуру $T_e([\text{O III}])$ в зоні їх виникнення.
3. Зіставити $T_e([\text{O III}])$ з віковими залежностями $T_e(\text{O III})$, отриманими з сітки моделей для різних мас зорі-попередниці і мас оболонок.

Проаналізуємо цей метод для визначення електронної температури за результатами методів, розглянутих у розділі III.

Рис. 2. (Кольоровий онлайн.) Відношення інтенсивностей модельних емісійних ліній [S II]. Різні типи ліній указують на різні значення маси зорі-попередниці ПТ: суцільна лінія відповідає $M_{\text{star}} = 1 M_\odot$, а штрихова — $M_{\text{star}} = 1.5 M_\odot$. Різні кольори ліній відповідають різним значенням маси оболонки ПТ.

A. Аналіз результатів, отриманих на основі діагностики світіння ПТ

За допомогою програми Diagn [27] ми провели діагностику світіння всіх моделей оболонок ПТ у віковому діапазоні від 8000 до 13000 років. У цій ділянці електронні температури моделей майже не змінюються з віком. На рис. 3 зображено отримані електронні температури в зоні світіння ліній [O III]. Як і у випадку температурних залежностей, одержаних

за допомогою моделювання, тут так само спостерігаємо добре розшарування електронних температур за масами зір-попередниць. У масах оболонок розшарування є слабшим.

Рис. 3. (Кольоровий онлайн.) Вікова залежність електронних температур модельних ПТ в зоні світіння ліній [O III], отримана двома методами. На панелі (а) зображені залежності електронних температур, одержані за допомогою програми *Diagn*, а на панелі (b) — залежності, отримані за допомогою T_e -методу. Різні типи ліній указують на масу зорі-попередниці, а саме: суцільна лінія відповідає $M_{\text{star}} = 1 M_{\odot}$, а штрихова — $M_{\text{star}} = 1.5 M_{\odot}$. Кольори ліній визначають маси оболонок ПТ.

Для перевірки точності нашого методу визначення маси оболонки ПТ ми застосували його до температурних залежностей, отриманих за допомогою програми *Diagn*. Наш метод ми розглянули на прикладі двох моделей. На основі співвідношення $I_{[\text{SII}]\lambda 6716}/I_{[\text{SII}]\lambda 6731}$ для конкретної ПТ ми маємо обмеження на вік цих моделей (див. рис. 4). Далі для цих туманностей на основі діагностики світіння ПТ визначаємо температуру в ділянці світіння ліній [O III] і зіставляємо її із залежностями, зображеними на рис. 3а. З урахуванням обмеження на вік ми одержимо графік 5а, що відповідає співвідношенню, зображеному на рис. 4а, і графік 5b, що відповідає співвідношенню, зображеному на рис. 4b відповідно. Із цих рисунків видно, що таким методом можна ду-

же точно визначити масу зорі-попередниці. Проте, як видно, чорна пряма, яка задає значення електронної температури, перетинає по три вікові залежності, що відповідають різним масам оболонки ПТ. Це означає, що цей метод дозволяє визначити масу оболонки ПТ з точністю до $\pm 0.1 M_{\odot}$.

Рис. 4. (Кольоровий онлайн.) Відношення інтенсивностей світіння ПТ в лініях [S II] для двох різних моделей. Чорною прямою зображено відношення інтенсивностей світіння для конкретної ПТ, а червоні прямі задають обмеження на вік цих туманностей.

Б. Аналіз результатів, отриманих на основі T_e -методу

Як і в попередньому підрозділі, будемо визначати масу ПТ, але на основі вікових залежностей електронної температури отриманих за допомогою T_e -методу (рис. 3b). Моделі беремо такі самі, що й у попередньому підрозділі. У цьому випадку визначення вікових обмежень залишається таким самим (див. рис. 4). Проте дістанемо нові значення електронної температури в ділянці світіння ліній [O III], які наносимо на графіки, що на рис. 3b. У результаті отримаємо перетини, зображені на рис. 6). Як і в попередньому випадку, лінія значення електронної температури перетинає по три вікові залежності електронної температури, що відповідають різним масам оболонок ПТ.

(a)

(a)

(b)

(b)

Рис. 5. (Кольоровий онлайн.) Визначення маси ПТ із встановленої електронної температури в зоні світіння ліній [O III] за допомогою діагностики світіння ПТ й обмеження на вік, визначеного на основі відношення інтенсивностей світіння ПТ в лініях [S II] (див. рис. 4). Чорною прямою зображено температуру туманності в зоні світіння ліній [O III], а червоні прямі задають обмеження на вік цих туманностей.

Це означає, що масу оболонки ПТ, як і в попередньому випадку, ми можемо визначити з точністю до $\pm 0.1 M_{\odot}$. Маса зорі-попередниці визначається також з певною точністю. Проте ми провели моделювання тільки для двох мас зорі-попередниці, що не дозволяє нам проаналізувати точність визначення її маси.

VI. ВИСНОВКИ

Метою цієї праці було продемонструвати, що такі важливі для еволюції ПТ параметри, як маса її зорі-попередниці та маса її оболонки, можуть бути отримані на основі результатів розрахунку сітки ФМС цих об'єктів. Основою запропонованого у цій статті підходу є вікові залежності усередненої за об'ємом електронної температури, які можна за певних віків чітко розрізнити за згаданими вище масами. У цій роботі ми продемонстрували, що, застосовуючи два методи для визначення електронної температури,

Рис. 6. (Кольоровий онлайн.) Визначення маси ПТ з установленної електронної температури в ділянці світіння ліній [O III] за допомогою T_e -методу і обмеження на вік, визначеного на основі відношення інтенсивностей світіння ПТ в лініях [S II] (див. рис. 4). Чорною прямою зображено температуру туманності в зоні світіння ліній [O III], а червоні прямі задають обмеження на вік цих туманностей.

ри, а саме: метод перетину кривих $n_e - T_e$ (підрозділ IIIA) і метод Пейджела (підрозділ IIIB), та звужуючи віковий діапазон пошуку за допомогою спостережуваного значення діагностичного співвідношення $I_{[SiII]\lambda 6716}/I_{[SiII]\lambda 6731}$, чутливого до електронної концентрації (а отже, і густини, яка змінюється з віком), можна для молодих ПТ із точністю до $\pm 0.1 M_{\odot}$ отримати масу оболонки ПТ, а також ще точніше — масу зорі-попередниці ПТ. Перевірку згаданих точностей зроблено на модельних спектрах, оскільки в моделях ми апіорі знаємо маси оболонки ПТ та її зорі-попередниці.

У наших наступних роботах ми плануємо перевірити можливість визначення згаданих вище мас для складніших розподілів густини небулярної речовини газу в оболонці ПТ, а також із застосуванням діагностики, яка враховує заселеність енергетичних рівнів атомів та йонів, з яких відбуваються заборонені переходи не тільки за рахунок електронного удару, але й за рахунок рекомбінації та процесів перезарядки.

Подяки. Публікація містить результати досліджень, проведених за підтримки Міністерства освіти і науки України в межах держбюджетних тем ФФ-63Нр (No. 0117U007190) та ФА-71Ф (No. 0118U003607).

- [1] Г. С. Хромов, Астрон. журн. **39**, 468 (1962).
- [2] G. Vauclair, Ann. Astrophys. **31**, **199** (1968).
- [3] Р. Е. Гершберг, А. Коровяковская, Ю. Коровяковский, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **43**, 49 (1971).
- [4] M. Perinotto, Astron. Astrophys. **39**, 383 (1975).
- [5] W. Maciel, S. R. Pottash, Astron. Astrophys. **88**, 1 (1980).
- [6] S. R. Pottash, Astron. Astrophys. **89**, 336 (1980).
- [7] J. P. Phillips, S. R. Pottash, Astron. Astrophys. **130**, 91 (1984).
- [8] S. R. Pottash, *Planetary Nebulae* (Reidel, Dordrecht–Boston–Lancaster, 1984).
- [9] Г. С. Хромов, *Планетарные туманности. Физика. Эволюция. Космогония* (Наука, Москва, 1985).
- [10] C. Giovanardi, A. Natta, F. Palla, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **70**, 269, (1987).
- [11] B. E. J. Pagel, E. A. Simonson, R. J. Terlevich, M. G. Edmunds, Mon. Not. R. Astron. Soc. **255**, 325 (1992); <https://doi.org/10.1093/mnras/255.2.325>.
- [12] F. R. Boffi, L. Stangellini, Astron. Astrophys. **284**, 248 (1994).
- [13] D. Buckley, S. E. Schneider, Astrophys. J. **446**, 279 (1995); <https://doi.org/10.1086/175787>.
- [14] R. A. Benjamin, E. D. Skillman, D. P. Smits, Astrophys. J. **514**, 307 (1999); <https://doi.org/10.1086/306923>.
- [15] G. Stasińska, Yu. Izotov, Astron. Astrophys. **397**, 71 (2003); <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021510>.
- [16] V. Luridiana, A. Peimbert, M. Peimbert, M. Cervino, Astrophys. J. **592**, 846 (2003); <https://doi.org/10.1086/375774>.
- [17] D. E. Osterbrock, G. J. Ferland, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, 2nd edition (University Science Books Sausalito, California, 2006).
- [18] Yu. Izotov, T. Thuan, G. Stasińska, Astrophys. J. **662**, 15 (2007); <https://doi.org/10.1086/513601>.
- [19] M. Peimbert, V. Luridiana, A. Peimbert, Astrophys. J. **666**, 636 (2007); <https://doi.org/10.1086/520571>.
- [20] V. Luridiana, Astrophys. Space. Sci. **324**, 361 (2009); <https://doi.org/10.1007/s10509-009-0095-6>.
- [21] V. V. Sagun, Yu. I. Izotov, Kinem. Phys. Celest. Bodies **28**, 103 (2012); <https://doi.org/10.3103/S0884591312030075>.
- [22] V. V. Holovaty, A. V. Demchyna, J. Phys. Stud. **17**, 1902 (2013).
- [23] B. Ya. Melekh, A. V. Demchyna, V. V. Holovaty, Kinem. Phys. Celest. Bodies **31**, 73 (2015); <https://doi.org/10.3103/S088459131502004X>.
- [24] В. В. Головатый, Ю. Ф. Мальков, Астрон. журн. **69**, 1166 (1992).
- [25] R. Szczerba, Astron. Astrophys. **181**, 365 (1987).
- [26] B. Ya. Melekh, A. R. Kuzmak, J. Phys. Stud. **16**, 1902 (2012).
- [27] В. В. Головатый, Р. Е. Гершберг, Ю. Ф. Мальков, В. И. Проник, Изв. Крым. астрофиз. обсерватории **96**, 72 (1999).
- [28] В. В. Головатый, Б. Я. Мелех, Н. В. Гаврилова, *Фізика світіння газових туманностей* (ЛНУ імені Івана Франка, Львів, 2013).
- [29] В. В. Соболев, *Курс теоретической астрофизики* (Наука, Москва, 1967).
- [30] Г. С. Хромов, *Планетарные туманности: физика, эволюция, космогония* (Наука, Москва, 1985).
- [31] D. R. Garnet, Astron. J. **103**, 1330 (1992).
- [32] E. Vassiliadis, P. R. Wood, Astrophys. J. Suppl. Ser. **92**, 125 (1994); <http://doi.org/10.1086/191962>.
- [33] R. Tylenda, G. Stasińska, Astron. Astrophys. **228**, 897 (1994).
- [34] A. Karska, Praca magisterska na kierunku astronomia (Toruń, 2009).

PHOTOIONIZATION MODELING OF PLANETARY NEBULAE WITH THE DUST GRAINS PRESENCE. II. DETERMINATION OF THE MASSES OF A NEBULAR ENVELOPE AND ITS PROGENITOR STAR USING ELECTRON TEMPERATURE IN THE CASE OF HOMOGENEOUS DISTRIBUTION OF THE NEBULAR MATTER

A. R. Kuzmak¹, B. Ya. Melekh²

¹Department for Theoretical Physics, Ivan Franko National University of Lviv,
12, Drahomanov St., Lviv, UA-79005, Ukraine,
e-mail: andriykuzmak@gmail.com,

²Department for Astrophysics, Ivan Franko National University of Lviv,
8, Kyrylo and Mefodiy St., Lviv, UA-79005, Ukraine,
e-mail: bmelekh@gmail.com

The study has calculated the grid of photoionization models for the homogeneous planetary nebulae in the Milky Way galaxy with the dust grain along the evolutionary tracks of their central stars. Based on these calculations, the age dependencies of the electron temperature of doubly-ionized oxygen atoms (O III) were obtained.

For nebulae with low-mass progenitor stars (up to $\approx 1.5 M_{\odot}$), these age dependencies contain domains with an almost constant temperature. However, this temperature is sensitive to the masses of both the progenitor star and the nebular envelope. Thus, the behavior of the electron temperature obtained for the doubly-ionized oxygen ionization zone can be used to determine the masses mentioned above. Here we test our assumptions in the case of the Milky Way homogeneous planetary nebulae. As a result, a method for the determination of the masses of

a planetary nebula envelope as well as its progenitor star using the value of the electron temperature within the doubly-ionized oxygen ionization zone is proposed. This method consists of two steps. At the first step, for a given planetary nebula we define the ratio of the emission line intensities of ionized sulfur atoms $I_{[\text{SII}]\lambda 6716}/I_{[\text{SII}]\lambda 6731}$. This ratio is sensitive to the age of the nebula, which allows us to obtain constraints on the value of this parameter. At the second step, based on the temperature diagnostic ratio $\lambda 4363\text{\AA}/(\lambda 4959\text{\AA}+\lambda 5007\text{\AA})$ between the emission line intensities of the doubly-ionized oxygen in the planetary nebula envelope, the value of the electron temperature is determined.

Taking into account the limit on the age of the planetary nebula mentioned above, the obtained result is compared with the age dependencies of the averaged electron temperature within the nebular gas for different masses of the progenitor star and the planetary nebula envelope.

Matching this value with a specific curve within the respective age range allows us to determine the masses of both the progenitor star and the planetary nebula envelope. This procedure is verified for two cases of the electron temperature determination: using the method of crossing of $n_e - T_e$ dependences obtained for various diagnostic ratios between emission lines as well as the popular two-zones Pagel's method (the so-called T_e -method), that is based on diagnostic ratios between auroral and nebular emission lines of the doubly-ionized oxygen. As a result, using this method the mass of a progenitor star is determined with some accuracy. However, the mass of a planetary nebula envelope is determined within the accuracy of $\pm 0.1 M_\odot$.