

## ОПТИМІЗОВАНЕ ФОТОІОНІЗАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СВІТІННЯ НII ЗОНИ У БЛАКИТНІЙ КОМПАКТНІЙ КАРЛИКОВІЙ ГАЛАКТИЦІ SBS 0940+544

Б. Я. Мелех

*Львівський національний університет імені Івана Франка, кафедра астрофізики  
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005, Україна*

(Отримано 19 червня 2006 р; в остаточному вигляді 24 жовтня 2006 р.)

Запропоновано метод пошуку оптимальних фотойонізаційних моделей світіння НII зон у блакитних компактних карликових галактиках. Метод складається із двох стадій розрахунку. Метою першої є пошук іонізаційної структури туманності при фіксованому вмісті важких елементів. Вільними параметрами при цьому є іонізуючий неперервний лайманівський спектр, параметри радіального розподілу густини водню в НII зоні, фактор наповнення газом об'єму туманності та вміст гелію щодо водню. На другій стадії моделювання при знайденій іонізаційній структурі НII зони оптимізується вміст хемічних елементів. Метод апробовано на розрахунку фізичних характеристик та хемічного вмісту найяскравішої НII зони у блакитній компактній карликовій галактиці SBS 0940+544. Для врахування ефектів фонові зоряної абсорбції на основі одержаних значень вільних параметрів першої стадії моделювання вміст гелію оптимізований так, щоб модельні відносні інтенсивності ліній HeI  $\lambda 4026\text{\AA}$ ,  $\lambda 4471\text{\AA}$ ,  $\lambda 5876\text{\AA}$ ,  $\lambda 6678\text{\AA}$ ,  $\lambda 7065\text{\AA}$  були більшими від відповідних спостережуваних значень або дорівнювали їм. Відтак модельні значення відносних інтенсивностей згаданих ліній HeI приймали рівними спостережуваним й обидві стадії методу перераховували ще раз. Проведено порівняльний аналіз результатів без і з урахуванням фонові зоряної абсорбції. Проаналізовано відмінності методу від інших — як модельних, так і емпіричних методів визначення фізичних характеристик та хемічного вмісту НII зон.

**Ключові слова:** НII зони, блакитні компактні карликові галактики, оптимізовані фотойонізаційні моделі світіння, хемічний вміст.

PACS number(s): 98.58.Hf, 98.52.Wz, 98.54.Ep, 98.56.Wm

### I. ВСТУП

Блакитні компактні карликові галактики (БККГ) характеризуються двома особливостями: активними процесами зореутворення та найнижчим з усіх типів небулярних об'єктів вмістом важких елементів. Завдяки першій із них вони є прекрасною лабораторією для вивчення процесів хемічної зоряної еволюції речовини, а завдяки другій БККГ є основними об'єктами для визначення вмісту первинного (догалактичного) гелію  $Y_p$  та темпу його збагачення впродовж зоряної хемічної еволюції речовини  $dY/dZ$ .

Спалахи зореутворення в БККГ відбуваються у компактних згустках радіусом близько 100 пк, навколо яких, унаслідок іонізації навколишнього газу, виникають гігантські зони іонізованого водню, — так звані НII зони. Вивчення хемічного вмісту цих зон дає змогу отримати залежність вмісту гелію  $Y$  від вмісту важких елементів  $Z$  [1–7]. Лінійна екстраполяція такої залежності на  $Z = 0$  визначає вміст первинного гелію  $Y_p$ , а її нахил  $dY/dZ$  — темп збагачення гелію важкими елементами.

Зі сказаного видно, що ключову роль у задачі визначення  $Y_p$  та  $dY/dZ$  відіграє точність визначення хемічного вмісту в НII зонах. Для задачі ж дослідження спалахів зореутворення особливо важливим стає розподіл енергії у спектрі випромінювання іонізую-

чих ядер (скупчень молодих зір) НII зон у БККГ — так званий *Lyc*-спектр (від англ. Lyman continuum).

Від НII зон навіть на найбільших телескопах світу (таких, як 4-м телескоп КНРО [1, 2], 8.2-м VLT та 10-м Кеєк-телескопи [8, 9]) спостерігають лінії одного й того ж елемента в одній-двох, найбільше у трьох стадіях іонізації. Однак для того, щоб отримати повний вміст хемічного елемента, необхідно знати його вміст у всіх стадіях іонізації. Для визначення повного хемічного вмісту елемента на основі його вмісту в одній або декількох стадіях іонізації зазвичай використовують так звані іонізаційно-корекційні множники (в англ. абревіатурі — ICFs).

Ізотов і Туан [1, 2] та більшість інших дослідників у своїх працях використовують ICFs, отримані на основі розрахунку сіток фотойонізаційних моделей світіння (ФМС) НII зон (наприклад, [10]). Ми також у своїх працях [5, 11], щоб вивести нові ICFs для НII зон, використовували розрахунок сіток ФМС. Однак, як зазначено у працях [5, 6], практичний розрахунок сіток ФМС вимагає значних спрощень: 1) вміст гелію зазвичай приймається сталим; 2) нехтується декрементом між вмістами важких елементів (вміст усіх важких елементів змінюється на однакову величину); 3) для розрахунку *Lyc*-спектрів іонізуючого зоряного скупчення використовують або просте підсумовування за спектрами одного й того ж спектрального типу ([10]),

або ж з цією метою застосовують початкову функцію мас йонізуючого зоряного скупчення (в англ. аббревіатурі — IMF), параметри якої, точно кажучи, не є відомими і беруться наближено [12, 13]. Однак найбільшим недоліком розрахунку сіток ФМС небулярних об'єктів є відсутність алгоритму узгодження модельних результатів із відповідними спостережуваними даними. В основному, це зумовлено тим, що метод розрахунку сіток ФМС по суті, застосовується до цілого конкретного типу небулярних об'єктів (НІ зони, планетарні туманності тощо). Через відсутність такого алгоритму виникає питання адекватності моделей сітки ФМС реальним об'єктам.

Окрім того, ICFs різні автори виводять по-різному. Наприклад, у працях [1, 2] для виведення виразів для ICFs використано йонні вмісти, отримані безпосередньо під час розрахунку сітки ФМС, а у працях [4, 5, 11] — вмісти, отримані діагностикою модельних спектрів ФМС-сітки. Одержані йонні вмісти інколи досить сильно відрізняються [5, 11].

Усі ці міркування привели нас до висновку, що розрахунок сітки ФМС і виведені на основі її результатів вирази для ICFs можуть давати хемічні вмісти, далекі від реальних, а тому результати, отримані за допомогою ICFs, потребують серйозної перевірки.

Для такої перевірки у працях [5, 6] ми запропонували використати розрахунок оптимізованих фотойонізаційних моделей світіння (ОФМС). Метод ОФМС базується на пошуку оптимальної ФМС конкретного небулярного об'єкта (у нашому випадку НІ) зони, яка б найкраще відтворювала його спостережувані характеристики. Критерієм відповідності модельних результатів спостережуваним даним було вибрано  $\chi^2$ -функцію. У працях [5, 6] у ролі таких характеристик вибрано відносні інтенсивності в емісійних лініях, виправлені за міжзоряне поглинання та світність у лінії  $H_{\beta}$ . Усі моделі розраховано в наближенні сферичної симетрії. У ролі вільних параметрів вибрано максимальну кількість йонізуючих квантів, концентрацію водню, фактор наповнення об'єму туманності небулярним газом та вміст більшості з тих елементів, лінії йонів яких наявні у спектрах. Для розрахунку *Lyc*-спектрів ми використали наш метод NLENI [5, 15], який повністю незалежний від параметрів IMF і базується на рівняннях балансу квантів та енергетичного балансу.

Однак метод NLENI залежить від відносного вмісту  $He/H$  та  $H^+/H^0$ , суми інтенсивностей заборонених ліній тощо. Значення цих параметрів у роботах [5, 6, 15] визначено наближеними оцінками та на основі розрахунку сіток ФМС. Однак усі ці параметри можна отримати під час фотойонізаційного моделювання. Це привело нас до створення ітераційно-оптимізаційного методу визначення фізичних характеристик та хемічного вмісту в НІ зонах БККГ [14]. У цьому методі розрахунку *Lyc*-спектрів та ОФМС ітеративно по чергово повторюються аж до збіжності *Lyc*-спектрів. У тій же праці ми застосували цей метод до визначення *Lyc*-спектрів та ОФМС найяскравішої НІ зони у БККГ SBS0940+544, запропонували

стратегію визначення похибок оптимальних значень вільних параметрів ОФМС та перевірили єдиність розв'язку таких ОФМС. У результаті виявлено виродження оптимальних значень тих вільних параметрів, від яких залежить йонізаційна структура туманності (причому оптимальна йонізаційна структура НІ зони залишалась незмінною) і відсутність виродження в оптимальних значеннях умістів більшості хемічних елементів. Нашу увагу привернув систематично більший уміст більшості важких елементів, отриманих за допомогою ОФМС, порівняно з відповідними вмістами, одержаними в роботі [9], автори якої використовували ICFs. Причинами такої розбіжності, зокрема у відносному вмісті кисню  $O/H$ , яка досягла 10% для цієї НІ зони, можуть бути різні електронні температури  $T_e(O^+)$  та  $T_e(O^{2+})$ . У праці [9] автори використовують для визначення  $T_e(O^{2+})$  широко відоме діагностичне співвідношення між інтенсивностями ліній  $I(\lambda 4959[OIII]) + \lambda 4959[OIII] / I(\lambda 4363[OIII])$ , а для визначення  $T_e(O^+)$  використано співвідношення, яке отримали автори за результатами сітки ФМС Стасінської [10]. Якщо з методом визначення  $T_e(O^{2+})$  це можна погодитися, то визначення  $T_e(O^+)$ , у світлі всього сказаного про сітки ФМС, потребує перевірки.

У цій статті ми пропонуємо метод розрахунку ОФМС НІ зон у БККГ, який дає змогу визначати *Lyc*-спектри, фізичні характеристики та хемічний вміст на рівні ОФМС, без залучення ітераційності. Це дозволяє суттєво зменшити час розрахунку. Також для коректного визначення оптимальної йонізаційної структури НІ зони метод має дві стадії розрахунку: на першій на основі діагностичних співвідношень (які не залежать або слабо залежать від хемічного вмісту) між інтенсивностями ліній виводиться оптимальна йонізаційна структура НІ зони, а на другій стадії за відносними інтенсивностями ліній (віднесеними до  $I(H_{\beta})$ ) уточнюються значення хемічного вмісту елементів.

У розділі II докладно описано алгоритм методу, у розділі III подано розрахунок ОФМС найяскравішої НІ зони у БККГ SBS0940+544, у розділі IV проаналізовано та порівняно їх результати із результатами інших авторів.

## II. ОПИС МЕТОДУ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОЇ ФОТОЙОНІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СВІТІННЯ НІ ЗОН У БККГ

Метою пошуку оптимальної фотойонізаційної моделі світіння (ОФМС) є знаходження таких значень вільних параметрів, при яких модель давала б у результаті найближчі до спостережуваних значення таких параметрів, як відносні інтенсивності ліній, потік у лінії  $H_{\beta}$ , розмір НІ зони тощо. Вільними вибрано входні параметри моделі, а параметрами, за якими проводиться оптимізація для ОФМС, є інтегральні спектри моделей і спостережуваний потік у лінії  $H_{\beta}$ . Критерієм узгодження спостережуваних і модельних значень параметрів, за якими проводиться оптимізація, є так звана  $\chi^2$ -функція, яка для ОФМС записується для  $i$ -

го параметра категорії параметрів  $C$  так [19]:

$$\chi_C^2 = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} \left( \frac{C_i^O - C_i^M}{\sigma(C_i^O)} \right)^2, \quad (2.1)$$

де  $C_i^O$  і  $C_i^M$  — спостережувані й модельні значення відповідно  $i$ -го параметра категорії  $C$ ,  $N_C$  — кількість вільних параметрів категорії  $C$ . Питання поділу параметрів, за якими розраховується  $\chi^2$ -функція на категорії, обговоримо нижче. Тут  $\sigma(C_i^O)$  — похибка спостережень для значення  $C_i^O$ . Остаточне значення  $\chi^2$ -функції отримуємо підсумовуванням її значень за всіма категоріями.

Суть алгоритму оптимізації (або  $\chi^2$ -мінімізації) полягає у зміні вільних параметрів моделі так, щоб  $\chi^2$ -функція досягла найменшого значення.

Однак, як показують результати, отримані у праці [14], оптимальна модель, одержана шляхом узгодження зі спостереженнями лише інтенсивностей ліній і світності (або потоку) в лінії  $H\beta$ , інколи не дають спостережуваних розмірів НІ зони. Це приводить до виродження йонізаційної структури НІ зони. Тому у праці [14] ми включили до вільних параметрів показник степеня прийнятого степеневого радіально-го розподілу концентрації густини водню, а до параметрів, за якими проводилась оптимізація, включили зовнішній радіус НІ зони  $R_{out}$ . Однак, як показує порівняльний аналіз хемічного вмісту, отриманого в результаті розрахунку таких ОФМС із відповідним вмістом, отриманим за допомогою ICFs [9], різниці в електронних температурах деяких йонів, одержаних з ОФМС і за допомогою діагностичних методів, можуть досягати значень, достатніх для спричинення суттєвої різниці в йонних вмістах [14]. Так, наприклад, Ізотов та ін. [9] для визначення електронної температури  $T_e(O^{2+})$  використовували відоме діягностичне співвідношення між інтенсивностями ліній  $I(\lambda 4959[OIII]) + \lambda 4959[OIII] / I(\lambda 4363[OIII])$ . Таке співвідношення інтенсивностей є незалежним від хемічного вмісту, і його не використовували під час моделювання ОФМС у праці [14]. Є багато інших діагностичних співвідношень, незалежних від хемічного вмісту, які визначають електронні температури й концентрації для різних йонів. Останні сильно впливають на йонний і, відповідно, хемічний вміст елементів. Тому ми доходимо висновку, що діагностичні співвідношення між інтенсивностями ліній необхідно використовувати, шукаючи оптимальну ФМС.

Водночас добре було б розраховувати  $Lyc$ -спектр йонізуючих ядер НІ зон, розраховуючи ОФМС. Це позбавило б нас необхідності використовувати для визначення  $Lyc$ -спектра параметри IMF, які не є добре відомими і визначення яких є окремою задачею. У наших попередніх працях [5, 11] для визначення  $Lyc$ -спектра ми використовували метод NLEPHI [15], який не залежить від параметрів IMF. Однак цей метод залежить від електронних температур та концентрацій у зонах  $He^+$  та  $He^{++}$ , суми інтенсивностей заборонених ліній, відношення вмістів  $H^+/H^0$  тощо. Для визначення цих параметрів у

працях [5, 11] ми використовували різноманітні припущення, а також результати розрахунку сітки ФМС. Проте всі ці параметри можна отримати в результаті розрахунку ФМС. Тому у праці [14] ми застосували ітеративний підхід для розрахунку  $Lyc$ -спектра, який являє собою почерговий ітеративний розрахунок  $Lyc$ -спектра і ОФМС до досягнення задовільної збіжності  $Lyc$ -спектра.

Але і метод NLEPHI містить у собі ряд спрощень. Зокрема, вмістом важких елементів у ньому нехтується. Тому найбільш коректним способом виведення  $Lyc$ -спектра є, на нашу думку, ОФМС. Для цього слід включити параметри, які представляють  $Lyc$ -спектр в ОФМС, до вільних параметрів. Однак до  $Lyc$ -спектра є дуже чутливими відношення інтенсивностей ліній будь-якого елемента в сусідніх стадіях йонізації. Такі відношення слабо залежать від хемічного вмісту, і їх слід теж використовувати розраховуючи ОФМС НІ зон.

Для представлення  $Lyc$ -спектра зручно використовувати, як і у працях [5, 14, 15], степеневий розподіл:

$$F_\nu = F_{\nu_0} \left( \frac{E_\nu}{E_{\nu_0}} \right)^\alpha, \quad (2.2)$$

де  $F_{\nu_0}$  і  $F_\nu$  — потоки на початку ( $\nu_0$ ) і всередині ( $\nu$ ) відповідного інтервалу частот;  $E_{\nu_0}$  і  $E_\nu$  — енергії квантів на початку і всередині цього інтервалу;  $\alpha$  — спектральний індекс, який визначає нахил  $Lyc$ -спектра. Ми будемо використовувати чотири енергетичні інтервали, межі яких визначаються потенціалами йонізації різноманітних атомів і йонів, вміст яких ми будемо визначати, розраховуючи ОФМС:

1. Межа  $E_{\nu_0} = 1 \text{ Ry}$  відповідає потенціалові йонізації водню нейтрального  $H^0$  і близька до потенціалів йонізації нейтрального кисню  $O^0$  ( $1.001 \text{ Ry}$ ) та нейтрального азоту  $N^0$  ( $1.068 \text{ Ry}$ ). Відносно близькі до енергетичної межі цього інтервалу значення потенціалу йонізації йона заліза  $Fe^+$  ( $1.190 \text{ Ry}$ ).
2. Межа  $E_{\nu_0} = 1.8 \text{ Ry}$  відповідає потенціалові йонізації нейтрального гелію  $He^0$  і близька до потенціалів йонізації однойонізованої сірки ( $1.715 \text{ Ry}$ ) та однойонізованого аргону ( $2.031 \text{ Ry}$ ).
3. Межа  $E_{\nu_0} = 2.57 \text{ Ry}$  знаходиться між потенціалами йонізації двічі йонізованої сірки  $S^{++}$  ( $2.56 \text{ Ry}$ ) та однойонізованого кисню ( $2.581 \text{ Ry}$ ).
4. Межа  $E_{\nu_0} = 4 \text{ Ry}$  відповідає потенціалові йонізації однойонізованого гелію  $He^+$ . Відносно близькими до цієї межі є потенціал йонізації йона кисню  $O^{++}$  ( $4.038 \text{ Ry}$ ).
5. Межа  $E_{\nu_0} = 30.4 \text{ Ry}$  відповідає високоенергетичній межі, до якої ми задаємо зміну форму  $Lyc$ -спектра.

Тут згадано потенціали йонізації тільки тих йонів/атомів, вміст яких є значним і/або лінії яких

спостерігаються в оптичному діапазоні. На другій і четвертій межах наша модель має розрив (скачок). Значення потенціалів йонізації взято з [19]. Отже *Lyc*-спектр у нашому зображенні задаватиметься сімома значеннями потоку:  $F_{\nu_0}(1 \text{ Ry})$ ,  $F_{\nu_0}^{(1)}(1.8 \text{ Ry})$ ,  $F_{\nu_0}^{(2)}(1.8 \text{ Ry})$ ,  $F_{\nu_0}(2.57 \text{ Ry})$ ,  $F_{\nu_0}^{(1)}(4 \text{ Ry})$ ,  $F_{\nu_0}^{(2)}(4 \text{ Ry})$  та  $F_{\nu_0}(30.4 \text{ Ry})$ .

Пошук оптимальної ФМС, на нашу думку, слід розбити на дві стадії.

Метою першої стадії ОФМС є розрахунок оптимальної йонізаційної структури НІ зони. Вільними параметрами при цьому будуть:

- внутрішній радіус НІ зони ( $R_{\text{in}}$ );
- сім згаданих вище *Lyc*-потоків, які визначатимуть форму йонізуючого *Lyc*-спектра;
- загальна кількість йонізуючих квантів  $Q_{\text{ion}}$ , яка виконує роль нормуючого множника для форми *Lyc*-спектра, визначеної потоками  $F_{\nu_0}(1 \text{ Ry})$ - $F_{\nu_0}(30.4 \text{ Ry})$ ;
- концентрація водню на внутрішній межі туманности  $n_{\text{H}}(R_{\text{in}})$ ;
- показник степеня  $\gamma$  прийнятого радіального розподілу густини в НІ зоні ( $n_{\text{H}}(R) = n_{\text{H}}(R_{\text{in}}) \left(\frac{R}{R_{\text{in}}}\right)^{\gamma}$ );
- фактор наповнення об'єму НІ зони небулярним газом ( $\epsilon$ );
- відносний вміст гелію  $\text{He}/\text{H}$ .

Загальна кількість вільних параметрів дорівнює 13. Однак не всі вони є незалежними. Зокрема, в роботі [14] показано, що деякі з параметрів, які визначають йонізаційну структуру туманности, можна пов'язати за допомогою співвідношення  $P = \frac{U}{(R_{\text{out}}^{\text{obs}}/R_{\text{in}})^{2+\gamma}\epsilon}$ , де  $U = \frac{Q_{\text{ion}}}{4\pi R_{\text{in}}^2 n_{\text{H}}(R_{\text{in}})c}$  — йонізаційний параметр,  $R_{\text{out}}^{\text{obs}}$  — спостережуваний зовнішній радіус НІ зони, а  $c$  — швидкість світла. Це зменшує кількість незалежних вільних параметрів на одиницю щодо їхньої загальної кількості. Крім того, як видно з результатів праць [5, 11, 15], більшість параметрів, які визначають *Lyc*-спектр, залежать від усіх інших вільних параметрів, що визначають йонізаційну структуру туманности, а також від відносного вмісту  $\text{He}/\text{H}$  (саме останній факт спричинив уключення вмісту гелію до вільних параметрів першої стадії пошуку оптимальної ФМС). Виняток становить тільки потік  $F_{\nu_0}(2.57 \text{ Ry})$ , визначення якого вимагає знання  $N_e$  і  $T_e$  у зонах  $\text{O}^+$  та  $\text{O}^{2+}$ . Цю межу ( $E_{\nu_0} = 2.57 \text{ Ry}$ ) у згаданих працях [5, 11, 15] не розглядали.

Отже кількість незалежних вільних параметрів ОФМС першої стадії дорівнює 6. Уміст важких елементів приймається рівним знайденому за допомогою інших емпіричних та напівемпіричних методів [1, 2, 9]. Критерієм неузгодженості результату чергової ФМС із спостережуваними даними є  $\chi^2$ -функція, яку для першої стадії пошуку ОФМС визначимо як:

$$\begin{aligned}\chi_{\text{Diagn}}^2 &= \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \left( \frac{\text{DiagnRatio}_i^{\text{O}} - \text{DiagnRatio}_i^{\text{M}}}{\sigma(\text{DiagnRatio}_i^{\text{O}})} \right)^2, \\ \chi_{\text{RI}}^2 &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left( \frac{[I_i/I(\text{H}\beta)]^{\text{O}} - [I_i/I(\text{H}\beta)]^{\text{M}}}{\sigma([I_i/I(\text{H}\beta)]^{\text{O}})} \right)^2, \\ \chi_{L(\text{H}\beta)}^2 &= \left( \frac{L(\text{H}\beta)^{\text{O}} - L(\text{H}\beta)^{\text{M}}}{\sigma(L(\text{H}\beta)^{\text{O}})} \right)^2, \\ \chi_{\text{Rout}}^2 &= \left( \frac{R_{\text{out}}^{\text{O}} - R_{\text{out}}^{\text{M}}}{\sigma(R_{\text{out}}^{\text{O}})} \right)^2, \\ \chi_{\text{I}}^2 &= \chi_{\text{Diagn}}^2 + \chi_{\text{RI}}^2 + \chi_{L(\text{H}\beta)}^2 + \chi_{\text{Rout}}^2.\end{aligned}\quad (2.3)$$

Тут  $\chi_{\text{Diagn}}^2$  відповідає за порівняння модельних і спостережуваних значень 9-ти діагностичних співвідношень ( $\text{DiagnRatio}$ ) між інтенсивностями ліній  $\lambda 4959[\text{OIII}] / \lambda 4363[\text{OIII}]$ ,  $\lambda 5007[\text{OIII}] / \lambda 4363[\text{OIII}]$ ,  $\lambda 6716[\text{SII}] / \lambda 6731[\text{SII}]$ ,  $\lambda 4026 \text{ HeI} / \lambda 4686 \text{ HeI}$ ,  $\lambda 4471 \text{ HeI} / \lambda 4686 \text{ HeI}$ ,  $\lambda 5876 \text{ HeI} / \lambda 4686 \text{ He II}$ ,  $\lambda 6678 \text{ HeI} / \lambda 4686 \text{ HeII}$ ,  $\lambda 7065 \text{ HeI} / \lambda 4686 \text{ HeII}$ , і  $\lambda 5007[\text{OIII}]/\lambda 3727[\text{OII}]$ ;  $\chi_{\text{RI}}^2$  представляє порівняння модельних і спостережуваних значень інтенсивностей п'яти  $\text{HeI}$ -ліній ( $\lambda 4026$ ,  $\lambda 4474$ ,  $\lambda 5876$ ,  $\lambda 6678$ ,  $\lambda 7065$ ) і однієї  $\text{HeII}$ -лінії ( $\lambda 4686$ );  $\chi_{L(\text{H}\beta)}^2$  представляє неузгодженість між модельною світністю в лінії  $\text{H}\beta$  та отриманою зі спостережень ( $L(\text{H}\beta) = 4\pi CF D^2 F(\text{H}\beta)$ ), де  $F(\text{H}\beta)$  — спостережуваний потік у лінії ( $\text{H}\beta$ ) на відстані Землі,  $D$  — відстань до НІ зони,  $CF = \frac{\Omega}{4\pi}$  — фактор покриття небулярним газом центру НІ зони;  $\chi_{\text{Rout}}^2$  відповідає за порівняння модельних і спостережуваних значень зовнішнього радіуса НІ зони ( $R_{\text{out}}^{\text{M}}$  визначає йонізаційний фронт туманности: ФМС зупиняється при падінні електронної температури до значень  $T_e \leq 4000^\circ \text{K}$ );  $\chi_{\text{I}}^2$  представляє сумарне значення  $\chi^2$ -функції під час першої стадії розрахунку ОФМС, яке і буде мінімізуватися. Не всі 17 параметрів, що використовуватимуться під час розрахунку  $\chi_{\text{I}}^2$ , є незалежними. Як показано у працях [5, 6, 14], за інтенсивністю однієї лінії одного й того ж йона при наявності йонізаційної структури туманности (яку отримуємо, розраховуючи ФМС) можна одержати інтенсивності ліній усіх інших елементів. Звичайно, для цієї мети слід вибирати лінії, атомні дані для яких є достатньо надійно визначені. Також параметри, які визначаються через різні комбінації одних і тих самих інтенсивностей ліній, не збільшують кількості незалежних параметрів. Таким чином, у нашому випадку кількість незалежних параметрів, які використовувались для розрахунку  $\chi_{\text{I}}^2$ , дорівнює 7. Отже, кількість ступенів вільності в задачі першої стадії пошуку оптимальної ФМС НІ зони у БККГ дорівнює одиниці. Цей висновок ми використаємо при визначенні похибок оптимальних значень вільних параметрів.

Метою другої стадії пошуку оптимальної ФМС є корекція хемічного вмісту для відтворення відносних інтенсивностей у лініях йонів шуканих елементів при заданій йонізаційній структурі туманности, яку отримано на першій стадії пошуку. Вільними параметрами при цьому є вмісти  $\text{He}/\text{H}$ ,  $\text{O}/\text{H}$ ,  $\text{N}/\text{H}$ ,  $\text{Ne}/\text{H}$ ,  $\text{S}/\text{H}$ ,

Ar/H та Fe/H, що визначають потоки в лініях їх йонів/атомів. Для розрахунку значень  $\chi^2$ -функції другої стадії пошуку ОФМС  $\chi_{\Pi}^2$  ми використовуємо ті ж параметри, що й в ОФМС  $\chi_{\Gamma}^2$  плюс додаткові параметри, якими є відносні інтенсивності  $I(\lambda)/I(H_{\beta})$  21 лінії 13 йонів:

$$\chi_{\Pi}^2 = \chi_{\text{Diagn}}^2 + \chi_{L(H_{\beta})}^2 + \chi_{\text{Rout}}^2 + \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{21} \left( \frac{[I_i/I(H_{\beta})]^O - [I_i/I(H_{\beta})]^M}{\sigma([I_i/I(H_{\beta})]^O)} \right)^2. \quad (2.4)$$

На перший погляд, при розрахунку другої стадії пошуку ОФМС маємо 13 нових додаткових незалежних параметрів. Однак оптимальна йонізаційна структура, а отже і співвідношення між інтенсивностями ліній у сусідніх стадіях йонізації, визначені на першій стадії пошуку. Тому потоки випромінювання (виправлені за міжзоряне та міжгалактичне поглинання, — ММП) у лініях різних стадій йонізації одного і того ж елемента є між собою зв'язаними. Виправлені за ММП потоки в лініях визначаються відносними інтенсивностями  $I(\lambda)/I(H_{\beta})$ , помноженими на виправлений за ММП потік у лінії  $H_{\beta}$ , який, своєю чергою визначає світність у лінії  $H_{\beta}$ . Таким чином, світність у лінії  $H_{\beta}$  також пов'язана з відносними інтенсивностями. Будь-які діагностичні співвідношення у другій стадії пошуку ОФМС визначаються відношеннями згаданих потоків у відповідних лініях. Тому, поперше, ці співвідношення слабо змінюватимуться під час розрахунку другої стадії пошуку ОФМС, оскільки вони є незалежними від невеликих варіацій хемічного вмісту. Лише дуже значна зміна хемічного вмісту може суттєво змінити оптичну товщину туманності, яка, своєю чергою, вплине на її йонізаційну структуру. Перевірку суттєвості чи несуттєвості корекції хемічного вмісту можна зробити, перерахувавши йонізаційну структуру туманності (першої стадії пошуку) на основі нових вмістів хемічних елементів: якщо йонізаційна структура туманності збережеться, то поділ пошуку ОФМС на дві стадії був цілком коректним. По-друге, навіть якщо такі слабкі зміни будуть наявні, то вони визначатимуть через відношення згаданих відповідних потоків у відповідних лініях. Єдиним параметром для розрахунку значень  $\chi^2$ -функції, який зберігає свою незалежність, є зовнішній радіус НІ зони  $R_{\text{out}}$ . Таким чином, кількість ступенів вільності на другій стадії пошуку ОФМС другої стадії дорівнюватиме, як і під час пошуку ОФМС першої стадії, одиниці.

Спектр БККГ має два складники: емісійний від НІ зон та абсорбційний від зірок. Під час спостережень отримують суперпозиційний складник. Отже, інтенсивність емісійних ліній від НІ зон БККГ є дещо заниженою порівняно з випадком, коли б зоряні спектри були відсутніми. Цей ефект називають фоновою зоряною абсорбцією (ФЗА) [1–3, 5, 7, 14]. Найсильніше цей ефект може впливати на визначення вмісту гелію [18]. Тому, якщо ФЗА не враховувати, то визначений за інтенсивностями спостережуваних рекомбінаційних ліній вміст гелію в НІ зоні БККГ буде заниженим. Це

може згодом сильно вплинути на визначення вмісту первинного гелію  $Y_p$ . У працях [5, 7, 14, 16, 17] запропоновано багато способів корекції ефектів ФЗА. Усі вони базуються на виведенні еквівалентної ширини абсорбційного складника ліній HeI  $EW_a(\text{HeI})$  за наявності спостережуваних еквівалентних ширин відповідних емісійних ліній  $EW_o(\text{HeI})$ . У цій статті ми пропонуємо метод, який не потребує наявності  $EW_o(\text{HeI})$ . Він базується на тому, що корекція ефекту ФЗА однозначно тільки збільшує інтенсивність HeI-ліній. Тому на основі результатів першої стадії пошуку ОФМС ми будемо отримувати відносні інтенсивності відкоректованих за ФЗА ліній HeI шляхом збільшення вмісту гелію (при фіксованих усіх інших вільних параметрах) доти, поки інтенсивність *ycia* вибраних для розрахунку ОФМС HeI-ліній не буде більшою від різниці між їх спостережуваними відносними інтенсивностями  $\left(\frac{I(\text{HeI})}{I(H_{\beta})}\right)_{\text{obs}}$  та похибками їх вимірювання або ж дорівнювали їм. Звичайно, такою методикою ми зробимо лише мінімальну корекцію інтенсивностей ліній HeI за ФЗА. Однак за наявності  $EW_o(\text{HeI})$  і відкоректованих пропонованим методом відносних інтенсивностей  $\left(\frac{I(\text{HeI})}{I(H_{\beta})}\right)_{\text{corr}}$  ми можемо легко оцінити для кожної з ліній  $EW_a(\text{HeI})$  [14, 16, 17]:

$$EW_a(\text{HeI}) = EW_o(\text{HeI}) \times \left( \frac{(I(\text{HeI})/I(H_{\beta}))_{\text{corr}}}{(I(\text{HeI})/I(H_{\beta}))_{\text{obs}}} - 1 \right). \quad (2.5)$$

У праці [18] автори побудували синтетичні моделі спалахів зореутворень і в результаті привели залежності  $EW_a(\lambda 4026 \text{ \AA HeI})$  та  $EW_a(\lambda 4471 \text{ \AA HeI})$  від віку спалаху зореутворення. Ці залежності мають чіткі максимуми, які становлять  $EW_a^{\text{max}}(\lambda 4026 \text{ \AA HeI}) \approx 1.20 \text{ \AA}$  і  $EW_a^{\text{max}}(\lambda 4471 \text{ \AA HeI}) \approx 1.25 \text{ \AA}$  відповідно. Таким чином, ми маємо обмеження зверху на значення  $EW_a(\lambda 4026 \text{ \AA HeI})$  та  $EW_a(\lambda 4471 \text{ \AA HeI})$ , а отже і на збільшення вмісту гелію. Ми розрахуємо дві двостадійні ОФМС НІ зони в БККГ SBS 0940+544: першу без корекції ФЗА, другу — з корекцією. Це дасть змогу нам проаналізувати вплив ефектів ФЗА на розрахунок ОФМС.

### III. МОДЕЛЮВАННЯ НІ ЗОНИ У БККГ SBS 0940+544

Для розрахунку ФМС ми використали програму CLOUDY 05.07 [19], яку модифікували для застосування нашого методу, а для реалізації оптимізації — метод RHYMIR [20], що використаний у версії CLOUDY як функція оптимізації.

Для апробації пропонованого методу ОФМС ми знайдемо за його допомогою оптимальну ФМС найяскравішої північно-західної НІ зони у БККГ SBS 0940+544, спектр якої отримали Гусева та ін. [9] на 10-му телескопі Кескп.

Форма цієї НІ зони близька до сферичної з діаметром  $\approx 625$  пк. Тому ми прийняли сферично-симетричне наближення для розрахунку її ОФМС, а також степеневий закон радіального розподілу концентрації водню в НІ зоні з від'ємним показником степеня, оскільки зона з найактивнішим спалахом зореутворення знаходиться в центрі цього об'єкта.

Потік  $F(H\beta)$ , показник екстинкції  $C(H\beta)$ , відстань до об'єкта ( $D = 26.7$  Мпк), а також відносні інтенсивності емісійних ліній та еквівалентні ширини HeI ліній узяті з праці [9].

У праці [14] ми також проводили оптимізаційне моделювання цієї НІ зони, однак при цьому в ітераційний спосіб виводили *Lyc*-спектр та не використовували діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній. У цій же роботі ми дослідили єдність розв'язку ОФМС НІ зон. Тому для ініціалізації всіх вільних параметрів, крім хемічного вмісту елементів, ми використовуємо відповідні значення з оптимальної ФМС цього об'єкта, яку ми отримали у праці [14]. З оптимальної ФМС праці [14] взято значення фактора покриття ( $CF = 0.2$ ).

Хемічний вміст елементів ініціалізуємо відповідними значеннями, одержаними у праці [9], оскільки її автори використали для його пошуку діагностичні емпіричні та напівемпіричні методи, які на сьогодні мають широке застосування. Це дасть змогу, аналізуючи результати, прослідкувати, наскільки метод ОФМС відкоректував відповідний хемічний вміст елементів, знайдений при допомозі загальноприйнятих методів.

У таблиці 1 наведено початкові значення вільних параметрів ОФМС і дозволені межі їх зміни. У таблиці 2 подано оптимальні значення вільних параметрів, отримані в результаті розрахунку першої та другої стадій ОФМС. Моделі з корекцією за фонову зоряну абсорбцію (КФЗА) розраховано з відкоректованими за ФЗА відносними інтенсивностями ліній HeI. У таблицях 3 і 4 зіставлено діагностичні співвідношення між відносними інтенсивностями емісійних ліній, відносних інтенсивностей емісійних ліній, світності  $L(H\beta)$  та зовнішнього радіуса  $R_{out}$  з відповідними значеннями, отриманими зі спостережень. Тут також наведено значення  $\chi^2_{min}$  ( $\chi^2_I$  та  $\chi^2_{II}$ ) для кожної зі знайдених оптимальних ФМС. Ми вибрали для розрахунку ОФМС інтенсивності п'яти ліній HeI:  $\lambda 4026\text{\AA}$ ,  $\lambda 4471\text{\AA}$ ,  $\lambda 5876\text{\AA}$ ,  $\lambda 6678\text{\AA}$ ,  $\lambda 7065\text{\AA}$ . Лінію  $\lambda 3889\text{\AA}$  не використовували для розрахунку  $\chi^2$ -функції, оскільки вона блендується лінією H8. Як видно з таблиці 2, урахування ФЗА не змінює суттєво оптимальних значень вільних параметрів, за винятком, як і очікувалося, вмісту гелію.

У стовбцях "Тест ОФМС без КФЗА" та "Тест ОФМС з КФЗА" таблиць 3 і 4 подано результати перерахунку ОФМС для стадії I з хемічним вмістом, одержаним у результаті розрахунку другої стадії. Як видно з таблиці 2, оптимальні значення вільних параметрів, отримані в результаті розрахунку першої стадії, збігаються в межах похибок із відповідними значеннями, отриманими в результаті перерахунку цієї

стадії. Це свідчить про недоцільність подальшого ітераційного перерахунку двостадійної ОФМС для НІ зони.

Стадія	Вільні параметри	Поч.зн.	MIN	MAX
I	$\log R_{in}$ , см	19.14	15	20.98
I	$n_H(R_{in})$ , $\text{cm}^{-3}$	178	10	1000
I	$\gamma$	-1.06	-2	0
I	$\log F_\nu(1 \text{ Ry})^*$	-13.052	—	—
I	$\log F_\nu(1.809 \text{ Ry})^*$	-12.542	—	—
I	$\log F_\nu(1.810 \text{ Ry})^*$	-12.424	—	—
I	$\log F_\nu(2.570 \text{ Ry})^*$	-12.982	—	—
I	$\log F_\nu(4.000 \text{ Ry})^*$	-14.786	—	—
I	$\log F_\nu(4.002 \text{ Ry})^*$	-13.886	—	—
I	$\log F_\nu(30.40 \text{ Ry})^*$	-28.783	—	—
I	$\log Q_{tot}^{**}, \text{c}^{-1}$	52.12	—	—
I	$\epsilon$	0.326	0.001	1
I,II	He/H	0.0829***	0.056	0.11
II	O/H $\times 10^5$	3.14	—	—
II	N/H $\times 10^7$	7.04	—	—
II	Ne/H $\times 10^6$	5.47	—	—
II	S/H $\times 10^6$	8.93	—	—
II	Ar/H $\times 10^7$	1.89	—	—
II	Fe/H $\times 10^7$	9.43	—	—

Таблиця 1. Вільні параметри ОФМС, їх початкові значення (Поч.Зн.) та дозволені межі зміни (MIN, MAX). Прочерк означає, що межі зміни відповідного параметра обмежені лише розрядністю комп'ютера.

\* — Значення  $F_\nu$  дано в одиницях  $\text{erg cm}^{-2} \text{c}^{-1} \text{G}^{-1}$ .

\*\* — Кількість йонізуючих квантів  $Q_{tot}$  є величиною нормуючою для форми йонізуючого спектра, заданої, зокрема, за  $\lambda \leq 912\text{\AA}$  значеннями величин  $F_\nu$ :  $Q_{tot}$  збільшує або зменшує кількість йонізуючих квантів на внутрішній межі НІ зони, залишаючи форму спектра незмінною.

\*\*\* — Початкові значення He/H для стадії II визначаються результатом стадії I.

Стадія	Параметр	ОФМС	Тест ОФМС	ОФМС	Тест ОФМС
		без КФЗА	без КФЗА	з КФЗА	з КФЗА
I	$R_{in}$ , пк	$4.46^{+0.17}_{-0.09}$	4.46	$4.48^{+0.41}_{-0.43}$	4.48
	$\log F_{\nu}(1 \text{ Ry})^*$	$-13.04^{+0.03}_{-0.01}$	-13.04	$-13.05^{+0.05}_{-0.02}$	-13.06
	$\log F_{\nu}(1.809 \text{ Ry})^*$	$-12.54^{+0.02}_{-0.05}$	-12.54	$-12.55^{+0.02}_{-0.04}$	-12.55
	$\log F_{\nu}(1.810 \text{ Ry})^*$	$-12.41^{+0.04}_{-0.07}$	-12.41	$-12.42^{+0.03}_{-0.06}$	-12.42
	$\log F_{\nu}(2.570 \text{ Ry})^*$	$-12.98^{+0.05}_{-0.05}$	-12.98	$-12.95^{+0.02}_{-0.08}$	-12.95
	$\log F_{\nu}(4.000 \text{ Ry})^*$	$-14.86^{+0.18}_{-0.21}$	-14.86	$-14.91^{+0.21}_{-0.21}$	-14.91
	$\log F_{\nu}(4.002 \text{ Ry})^*$	$-13.88^{+0.07}_{-0.07}$	-13.88	$-13.89^{+0.09}_{-0.09}$	-13.89
	$\log F_{\nu}(30.40 \text{ Ry})^*$	$-29.16^{+0.87}_{-0.50}$	-29.16	$-29.16^{+0.88}_{-0.41}$	-29.25
	$\log Q_{tot}$ , $\text{c}^{-1}$	$52.11^{+0.01}_{-0.01}$	52.11	$52.11^{+0.01}_{-0.01}$	52.11
	$n_{\text{H}}(R_{in})$ , $\text{cm}^{-3}$	$184^{+2}_{-12}$	184	$181^{+6}_{-8}$	184
	$\gamma$	$-1.07^{+0.03}_{-0.01}$	-1.07	$-1.06^{+0.02}_{-0.02}$	-1.07
	$\epsilon$	$0.33^{+0.01}_{-0.01}$	0.33	$0.33^{+0.02}_{-0.01}$	0.33
	$\text{He}/\text{H} \times 10^2$	$8.20^{+0.28}_{-0.23}$	8.16	$8.41^{+0.17}_{-0.24}$	8.37
II	$\text{He}/\text{H} \times 10^2$	$8.16^{+0.40}_{-0.43}$	—	$8.37^{+0.42}_{-0.07}$	—
	$\text{O}/\text{H} \times 10^5$	$3.42^{+0.14}_{-0.06}$	—	$3.42^{+0.13}_{-0.12}$	—
	$\text{N}/\text{H} \times 10^6$	$1.22^{+0.07}_{-0.45}$	—	$1.24^{+0.32}_{-0.46}$	—
	$\text{Ne}/\text{H} \times 10^6$	$5.72^{+0.34}_{-0.34}$	—	$5.73^{+0.44}_{-0.41}$	—
	$\text{S}/\text{H} \times 10^6$	$0.98^{+0.05}_{-0.09}$	—	$0.97^{+0.09}_{-0.07}$	—
	$\text{Ar}/\text{H} \times 10^7$	$1.03^{+0.06}_{-0.17}$	—	$1.03^{+0.11}_{-0.16}$	—
	$\text{Fe}/\text{H} \times 10^6$	$0.74^{+0.45}_{-0.28}$	—	$0.76^{+0.51}_{-0.28}$	—

Таблиця 2. Оптимальні значення вільних параметрів ОФМС.

\* — Значення  $F_{\nu}$  дано в одиницях  $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Gc}^{-1}$ .

#### IV. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЇХ ПОРІВНЯННЯ З РЕЗУЛЬТАТАМИ ІНШИХ АВТОРІВ

На рис. 1 показано порівняння початкового *Lyc*-спектра (Init) з одержаними в результаті розрахунку ОФМС без КФЗА (NoUSAC) та з урахуванням корекції за ФЗА (USAC). Як видно з рисунка *Lyc*-спектри USAC і NoUSAC майже не відрізняються. Початковий *Lyc*-спектр (Init) ми отримали у праці [14] у результаті ітераційно-оптимізаційної методики пошуку ОФМС без використання діагностичних співвідношень інтенсивностей ліній. Також у цій роботі ми ділили *Lyc*-спектр на три діапазони енергій фотонів, а не на чотири, як у цій статті: межу  $E_{\nu_0} = 2.57 \text{ Ry}$  не використовували. У результаті видно, що основ-

ні відмінності між *Lyc*-спектрами USAC і NoUSAC, з одного боку, та Init, з іншого, досягаються між потенціалами йонізації  $\text{He}^0$  та  $\text{He}^+$ . Зрозуміло, що використання діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній та використання додаткової межі у визначенні *Lyc*-спектра робить його коректнішим.

На рис. 2 показано порівняння хемічного вмісту, отриманого в нашій праці, з вмістом, одержаним у працях [9] (GIPC2001) та [14] (MNI2006). На обох рисунках показано також пряму однакових значень хемічного вмісту. Як бачимо з порівняння наших результатів з результатами GIPC2001, найбільше неузгодження виникає для вмісту O/H та Ar/H. І якщо неузгодженість в Ar/H можна пояснити різними атомними даними або ж тим, що ми не використовували під час розрахунку наших ОФМС лінії [Ar IV], то у випадку O/H ситуація потребує пояснень.

Параметри	Спостереження	ОФМС	Тест ОФМС	ОФМС	Тест ОФМС
		без КФЗА	без КФЗА	з КФЗА	з КФЗА
$\lambda 4959[\text{OIII}]/\lambda 4363[\text{OIII}]$	$10.95 \pm 0.24$	10.97	11.12	10.94	11.05
$\lambda 5007[\text{OIII}]/\lambda 4363[\text{OIII}]$	$32.84 \pm 0.70$	33.01	33.48	32.93	33.27
$\lambda 6716[\text{SII}]/\lambda 6731[\text{SII}]$	$1.25 \pm 0.06$	1.41	1.41	1.41	1.41
$\lambda 4026\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$2.33 \pm 0.42$	2.78	2.76		
$\lambda 4026\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(2.83 \pm 0.50^*)$			2.92	2.90
$\lambda 4471\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$6.17 \pm 1.04$	5.80	5.77		
$\lambda 4471\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(6.17 \pm 1.04^*)$			6.09	6.05
$\lambda 5876\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$16.17 \pm 2.72$	15.99	15.88		
$\lambda 5876\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(16.50 \pm 2.77^*)$			16.78	16.66
$\lambda 6678\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$4.50 \pm 0.77$	4.49	4.46		
$\lambda 6678\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(4.67 \pm 0.80^*)$			4.72	4.68
$\lambda 7065\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$4.00 \pm 0.69$	3.70	3.67		
$\lambda 7065\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(4.00 \pm 0.69^*)$			3.89	3.86
$\lambda 5007[\text{OIII}]/\lambda 3727[\text{OII}]$	$8.93 \pm 0.20$	8.94	8.91	8.93	8.96
$\lambda 4026 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.014 \pm 0.001$	0.017	0.017		
$\lambda 4026 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.017 \pm 0.001^*)$			0.017	0.017
$\lambda 4471 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.037 \pm 0.001$	0.036	0.035		
$\lambda 4471 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.037 \pm 0.001^*)$			0.036	0.036
$\lambda 5876 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.097 \pm 0.002$	0.098	0.098		
$\lambda 5876 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.099 \pm 0.002^*)$			0.100	0.100
$\lambda 6678 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.027 \pm 0.001$	0.028	0.027		
$\lambda 6678 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.028 \pm 0.001^*)$			0.028	0.028
$\lambda 7065 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.024 \pm 0.001$	0.023	0.022		
$\lambda 7065 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.024 \pm 0.001^*)$			0.023	0.023
$\lambda 4686 \text{HeII}/\text{H}\beta$	$0.006 \pm 0.001$	0.006	0.006	0.006	0.006
$\log L(\text{H}\beta)$	$38.40 \pm 0.02$	38.40	38.40	38.40	38.40
$R_{out,pc}$	$312.5 \pm 20.0$	312.4	310.8	312.0	314.6
$\chi^2_{\Gamma}$	...	3.29	3.47	1.14	1.23

Таблиця 3. Порівняння модельних (першої стадії пошуку ОФМС) та спостережуваних інтенсивностей ліній (за даними стосовно інтенсивності лінії  $\text{H}\beta$ ), діагностичних відношень інтенсивностей ліній, світностей  $\log L(\text{H}\beta)$  та зовнішніх радіусів  $\text{HII}$  зон. Наведено також результати тестування (тест ОФМС) на збіжність йонізаційної структури межі  $\text{HII}$  зони під час розрахунку двостадійної ОФМС.  $I(\text{H}\beta)=1$ .

\* — У дужках подано інтенсивності  $\text{HeI}$ -ліній, відкоректованих за ФЗА.



Параметри	Спостереження	ОФМС	ОФМС
		без КФЗА	з КФЗА
$\lambda 4959[\text{OIII}]/\lambda 4363[\text{OIII}]$	$10.95 \pm 0.24$	11.12	11.09
$\lambda 5007[\text{OIII}]/\lambda 4363[\text{OIII}]$	$32.84 \pm 0.70$	33.48	33.39
$\lambda 6716[\text{SiII}]/\lambda 6731[\text{SiII}]$	$1.25 \pm 0.06$	1.41	1.41
$\lambda 4026\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$2.33 \pm 0.42$	2.76	
$\lambda 4026\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(2.83 \pm 0.50^*)$		2.90
$\lambda 4471\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$6.17 \pm 1.04^*$	5.77	
$\lambda 4471\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(6.17 \pm 1.04^*)$		6.06
$\lambda 5876\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$16.17 \pm 2.72^*$	15.88	
$\lambda 5876\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(16.50 \pm 2.77^*)$		16.69
$\lambda 6678\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$4.50 \pm 0.77^*$	4.46	
$\lambda 6678\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(4.67 \pm 0.80^*)$		4.69
$\lambda 7065\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$4.00 \pm 0.69^*$	3.67	
$\lambda 7065\text{HeI}/\lambda 4686\text{HeII}$	$(4.00 \pm 0.69^*)$		3.86
$\lambda 5007[\text{OIII}]/\lambda 3727[\text{OII}]$	$8.93 \pm 0.20^*$	8.91	8.91
$\lambda 3727 [\text{OII}]/\text{H}\beta$	$0.471 \pm 0.008$	0.474	0.474
$\lambda 3869 [\text{NeIII}]/\text{H}\beta$	$0.356 \pm 0.006$	0.356	0.356
$\lambda 4363 [\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$0.128 \pm 0.002$	0.126	0.127
$\lambda 4026 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.014 \pm 0.001$	0.017	
$\lambda 4026 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.017 \pm 0.001^*)$		0.017
$\lambda 4471 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.037 \pm 0.001$	0.035	
$\lambda 4471 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.037 \pm 0.001^*)$		0.036
$\lambda 4686 \text{HeII}/\text{H}\beta$	$0.006 \pm 0.001$	0.006	0.006
$\lambda 4959 [\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$1.402 \pm 0.021$	1.404	1.404
$\lambda 5007 [\text{OIII}]/\text{H}\beta$	$4.204 \pm 0.061$	4.225	4.226
$\lambda 5876 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.097 \pm 0.002$	0.098	
$\lambda 5876 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.099 \pm 0.002^*)$		0.100
$\lambda 6678 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.027 \pm 0.001$	0.027	
$\lambda 6678 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.028 \pm 0.001^*)$		0.028
$\lambda 7065 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$0.024 \pm 0.001$	0.022	
$\lambda 7065 \text{HeI}/\text{H}\beta$	$(0.024 \pm 0.001^*)$		0.023
$\lambda 6300 [\text{OI}]/\text{H}\beta$	$0.010 \pm 0.001$	0.005	0.005
$\lambda 6363 [\text{OI}]/\text{H}\beta$	$0.004 \pm 0.001$	0.002	0.002
$\lambda 6312 [\text{SiII}]/\text{H}\beta$	$0.011 \pm 0.001$	0.019	0.019
$\lambda 6584 [\text{NII}]/\text{H}\beta$	$0.012 \pm 0.001$	0.012	0.012
$\lambda 4070 [\text{SiII}]/\text{H}\beta$	$0.009 \pm 0.001$	0.005	0.005
$\lambda 6716 [\text{SiII}]/\text{H}\beta$	$0.035 \pm 0.001$	0.034	0.034
$\lambda 6731 [\text{SiII}]/\text{H}\beta$	$0.028 \pm 0.001$	0.024	0.024
$\lambda 7135 [\text{ArIII}]/\text{H}\beta$	$0.026 \pm 0.001$	0.026	0.026
$\lambda 4658 [\text{FeIII}]/\text{H}\beta$	$0.005 \pm 0.001$	0.005	0.005
$\lambda 5270 [\text{FeIII}]/\text{H}\beta$	$0.004 \pm 0.001$	0.003	0.003
$\log L(\text{H}\beta)$	$38.40 \pm 0.02$	38.40	38.40
$R_{\text{out,pc}}$	$312.5 \pm 20.0$	310.8	310.4
$\chi^2_{\text{II}}$	...	8.40	7.41

Таблиця 4. Порівняння модельних (другої стадії пошуку ОФМС) та спостережуваних інтенсивностей ліній (по даних стосовно інтенсивності лінії  $\text{H}\beta$ ), діагностичних відношень інтенсивностей ліній, світностей  $\log L(\text{H}\beta)$  та зовнішніх радіусів НІІ зон.  $I(\text{H}\beta)=1$ .

Параметри	USAC	GIPC2001
$T_e(\text{OIII}), \text{K}$	18600	18830±220
$T_e(\text{OII}), \text{K}$	14900	15320±170
$N_e, \text{cm}^{-3}$	5.37	10±10
$\text{O}^0/\text{H}^+ \times 10^{-7}$	4.15	—
$\text{O}^+/\text{H}^+ \times 10^{-6}$	3.97	3.89±0.13
$\text{O}^{++}/\text{H}^+ \times 10^{-5}$	3.01	2.73±0.08
$\text{O}^{3+}/\text{H}^+ \times 10^{-7}$	2.47	2.01±0.33
$\text{O}^{4+}/\text{H}^+ \times 10^{-10}$	3.79	—
$\text{H}^+/\text{H} \times 10^{-01}$	9.86	—
$\text{O}/\text{H} \times 10^{-5}$	3.42	3.14±0.08

Таблиця 5. Порівняння деяких фізичних характеристик, йонного та хемічного вмісту кисню, отриманих у цій статті (USAC) з відповідними даними, одержаними у [9] (GIPC2001).

У праці [9] автори використовували двозонну фотойонізаційну модель НП зони для визначення хемічного вмісту: електронну температуру  $T_e(\text{OIII})$  у зоні високої йонізації визначали за допомогою діагностичного співвідношення  $[\text{OIII}] \lambda 4363 / (\lambda 4959 + 5007)$  з використанням п'ятирівневої моделі атома [21] з атомними даними з праці [22]; електронну температуру ж у зоні низької йонізації  $T_e(\text{OII})$  визначали за допомогою апроксимаційного співвідношення між температурами  $T_e(\text{OII})$  і  $T_e(\text{OIII})$ , яке отримали автори [9] за результати розрахунку сітки ФМС НП зон Стасінської [10]; для визначення електронної концентрації  $N_e$  автори [9] використовували діагностичне співвідношення  $[\text{SII}] \lambda 6716 / \lambda 6731$ .

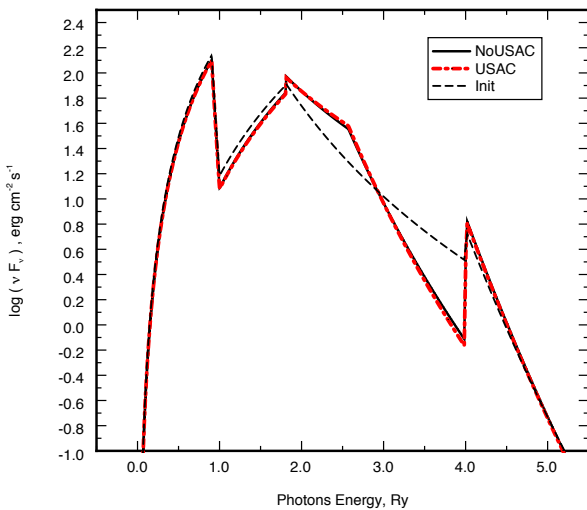


Рис. 1. Лус-спектри: початковий (Init), одержаний у праці [14], та остаточні, отримані в результаті розрахунку двостадійної ОФМС без урахування ФЗА (NoUSAC) і з урахуванням ФЗА (USAC) в емісійних лініях Ней.

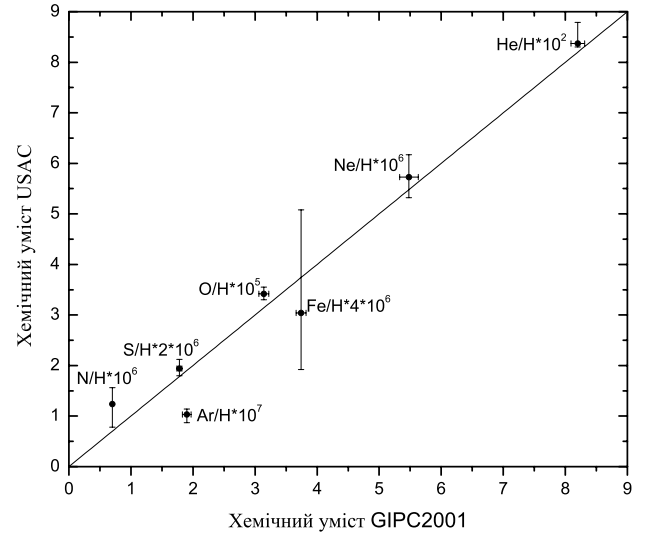


Рис. 2. Порівняння хемічних вмістів, отриманих у результаті розрахунку ОФМС з урахуванням ФЗА з відповідним умістом, одержаним 1) у праці [9] з використанням апроксимаційних співвідношень (GIPC2001) та 2) у праці [14], де застосовувано ітераційно-оптимізаційний метод пошуку ОФМС без використання діагностичних співвідношень.

У таблиці 5 наведено порівняння значень електронних концентрацій і температур, а також вмісту кисню в різних стадіях йонізації, які ми отримали зі зважування їхніх радіальних розподілів за об'ємом і  $N_e$  із ОФМС з урахуванням ФЗА (USAC) із відповідними даними, одержаними у [9] (GIPC2001). З таблиці видно, що основний внесок в вміст кисню  $\text{O}/\text{H}$  робить уміст  $\text{O}^{++}/\text{H}^+$ . З порівняння вмісту  $\text{O}^{++}/\text{H}^+$ , отриманого з ОФМС USAC, з відповідним вмістом, одержаним у [9] (GIPC2001), видно, що різниця між ними перевищує похибку. Це спричинено різницею між відповідними значеннями  $T_e(\text{OIII})$ . На достовірність отриманого в ОФМС USAC значення  $T_e(\text{OIII})$  вказує добре відтворення відповідних діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній  $[\text{OIII}] \lambda 4959 / \lambda 4363$  і  $[\text{OIII}] \lambda 5007 / \lambda 4363$  (див. таблицю 4). Окрім того, під час розрахунку ФМС акуратно враховано всі процеси, що приводять до заселення (через ударне збудження електроном) і деактивації рівнів [23], при переході з яких виникають лінії  $[\text{OIII}] \lambda 4363, \lambda 4959, \lambda 5007$ . Також у ФМС узято до уваги змінність  $T_e(\text{OIII})$  і  $N_e$  з відстанню від центра. Під час розрахунку ФМС акуратно розраховано значення  $\text{H}^+/\text{H}$  вздовж радіуса моделі. Щоб отримати вміст кисню не стосовно  $\text{H}^+$ , а щодо  $\text{H}$ , необхідно підсумоване за всіма стадіями йонізації кисню значення помножити на  $\text{H}^+/\text{H}$  (усі значення, звичайно, мають бути зважені перед цим за об'ємом і  $N_e$ ). Також значення  $N_e$  для ОФМС отримано саме для йона  $\text{O}^{++}$  шляхом зважування значень  $N_e$  за об'ємом і вмістом  $\text{O}^{++}/\text{H}^+$ , а не для  $\text{SII}$ , як у випадку GIPC2001. Усі ці фактори у кінцевому рахунку приводять до невеликої, але все ж таки суттєвої різниці в вмістах  $\text{O}/\text{H}$ , яка виходить за межі похибок.

Тому для точного визначення вмісту кисню (та й усіх інших елементів) необхідно використовувати акуратно моделювання світіння НП зон, яке враховувало б усі процеси, що приводять до утворення відповідних діагностичних ліній. Звичайно, до проблеми різниці в хемічному вмісті, отриманому за допомогою оптимізаційного фотойонізаційного моделювання і звичних апроксимаційних емпіричних залежностей із використанням діагностичних співвідношень між інтенсивностями заборонених ліній, можна підійти і з іншого боку: сказати, що причиною різниці є неадекватність моделі. Однак, якщо у процесі пошуку ОФМС використовуються ті ж самі, що і в емпіричних співвідношеннях, діагностичні співвідношення і ці співвідношення добре відтворюються ОФМС, то постає питання про те, як порівняти акуратність емпіричного й ОФМС методів? У будь-якому випадку відсутність наближень під час розрахунку заселеностей рівнів у ФМС робить метод ОФМС привабливішим. Також з отриманих результатів можна зробити висновок про те, що похибки, одержані в емпіричному методі, є явно заниженими, оскільки основними їх джерелами є похибки у відносних інтенсивностях відповідних діагностичних ліній. Однак порівняння результатів моделювання з відповідними результатами емпіричного методу показують, що джерелом похибок може бути постійність значень  $N_e$  та  $T_e$  за всім об'ємом відповідних зон йонізації в емпіричному методі та адекватність вибраного шаблону моделей під час пошуку ОФМС. Однак оцінити адекватність моделі можна тільки на основі достатньо точних морфологічних спостережуваних даних для кожного модельованого об'єкта.

Отриманий у процесі пошуку ОФМС вміст гелію є

дещо вищим, ніж одержаний у [9]. Така різниця спричинена, з одного боку, процедурою корекції за ФЗА (див. розділ II) та точнішим розрахунком інтенсивностей рекомбінаційних ліній HeI у програмі Cloudy 05.07 ([19]; див. також [24, 25]). Якщо подібна тенденція збережеться і після пошуку оптимальних ФМС інших НП зон БККГ, то це приведе до суттєвого збільшення оцінки значення вмісту первинного гелію  $Y_p$  у Всесвіті. Тому такий розрахунок ОФМС інших НП зон БККГ є необхідним для коректного визначення  $Y_p$ .

З рис. 2 видно також, що хемічний вміст, отриманий двостадійною ОФМС, для більшості елементів збігається з відповідним вмістом, які ми одержали, застосовуючи ітераційно-оптимізаційну методику розрахунку *Lyc*-спектра та ОФМС. Єдиний виняток становить сірка S. Різниця в її вмісті може бути спричинена, в основному, тим, що у двостадійній ОФМС використовували діагностичне співвідношення  $\lambda 6716[\text{SiII}] / \lambda 6731[\text{SiII}]$ , яке дозволило коректніше врахувати значення  $N_e$  у межі НП зони, де світяться лінії [SiII].

Отже, можна зробити висновок, що пошук оптимальних ФМС є необхідним для коректного визначення фізичних умов та хемічного вмісту в НП зонах БККГ. Коректніше визначення хемічного вмісту за допомогою оптимізаційного фотойонізаційного моделювання дасть змогу точніше визначати вміст первинного гелію у Всесвіті  $Y_p$  та темп його збагачення  $dY/dZ$  у процесі зоряної хемічної еволюції речовини у БККГ. Застосування під час розрахунку ОФМС діагностичних співвідношень між інтенсивностями ліній йонів дозволяє визначати точніше *Lyc*-спектр,  $N_e$ ,  $T_e$ , йонні вмісти і вресі-решт — хемічний вміст.

- 
- [1] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, *Astrophys. J.* **435**, 10 (1994).
- [2] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, *Astrophys. J.* **108**, 1 (1997).
- [3] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, *Astrophysical J.* **511**, 639 (1999).
- [4] В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, *Астрон. журн.* **79**, №10, 867 (2002).
- [5] Б. Я. Мелех, дисерт. канд. фіз.-мат. наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів (2002).
- [6] В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, *Астрон. журн.* **82**, №8, 668 (2005).
- [7] В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, *Астрон. журн.* **82**, №9, 755 (2005).
- [8] Yu. I. Izotov, F. H. Chaffee, C. B. Foltz, R. F. Green, N. G. Guseva, T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **527**, 757 (1999).
- [9] N. G. Guseva, Yu. I. Izotov, P. Papaderos, F. H. Chaffee, C. B. Foltz, R. F. Green, T. X. Thuan, J. Fricke, K. G. Noeske, *Astron. Astrophys.* **378**, 756 (2005).
- [10] G. Stasinska, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **83**, 501 (1990).
- [11] В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, *Кинем. физ. небес. тел.* **18**, №4, 362 (2002).
- [12] V. Luridiana, A. Peimbert, M. Peimbert, M. Cervino, *Astrophys. J.* **592**, 846 (2003).
- [13] G. Stasinska, D. Shaerer, *Astron. Astrophys.* **351**, 72 (1999).
- [14] В. Я. Мелех, V. V. Holovaty, Yu. I. Izotov, *Astron. Astrophys.* (in press).
- [15] Б. Я. Мелех, *Журн. фіз. дослідж.* **4**, 225 (2000).
- [16] K. A. Olive, E. D. Skillman, arXiv: astro-ph/0007081 (2000).
- [17] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **602**, 200 (2005).
- [18] R. G. Delgado, C. Leitherer, T. M. Heckman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1999, **125**, 489 (1999).
- [19] G. J. Ferland, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy* (University of Kentucky, Physics Department Internal Report 200, 2005), <http://www.nublado.org>.
- [20] P. A. M. van Hoof, Ph.D. thesis (Rijksuniversiteit Groningen, 1997).
- [21] L. H. Aller, *Physics of Thermal Gaseous Nebulae* (Dor-

- drecht, Reidel, 1984).
- [22] C. Mendoza, *IAU Symp. 103, Planetary Nebulae*, edited by D. R. Flower (Dordrecht, Reidel, 1983).
- [23] D. E. Osterbrock, G. J. Ferland, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. 2-nd Ed.* (University Science Books, Sausalito, California, 2006).
- [24] R. L. Porter, R. P. Bauman, G. J. Ferland, K. B. MacAdam, arXiv: astro-ph/0502224 (2005).
- [25] R. L. Porter, R. P. Bauman, G. J. Ferland, K. B. MacAdam, arXiv: astro-ph/0504083 (2005).

**OPTIMIZED PHOTOIONIZATION MODELLING OF HII REGION IN BLUE COMPACT DWARF GALAXY SBS 0940+544**

B. Ya. Melekh

*Department for Astrophysics, Ivan Franko National University of Lviv,  
8 Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine,  
E-mail: melekh@physics.wups.lviv.ua*

A method for the optimal photoionization model search of HII regions in blue compact dwarf galaxies is proposed. The method consists of two calculation stages. The goal of the first stage is to search for the ionization structure of the nebula at the fixed chemical abundance. The free parameters at this stage are the Lyman continuum spectrum, the radial hydrogen density distribution parameters in HII region, the filling factor, and the helium abundance relative to hydrogen. At the second modelling stage, the optimization of the chemical abundance at the found nebular ionization structure is under search. The method is aimed at determining the physical characteristics and chemical composition of the brightest HII region in blue compact dwarf galaxy SBS 0940+544. So as to take into account an underlying stellar absorption effects the helium abundance at the optimal values of the first stage free parameters was optimized in such a way that resulting models relative line intensities of the HeI lines  $\lambda 4026\text{\AA}$ ,  $\lambda 4471\text{\AA}$ ,  $\lambda 5876\text{\AA}$ ,  $\lambda 6678\text{\AA}$ ,  $\lambda 7065\text{\AA}$  were higher than or equal to previous observational values. The models values of the relative line intensities were adopted equivalent to the corresponding observational values and both stages were recalculated. A comparative analysis of the results with and without taking into account the underlying stellar absorption was done. The differences between this method and other modelling techniques as well as empirical methods for determining physical characteristics and chemical abundance of HII regions are analysed.