

УДК 524.7

В. В. Головатий<sup>1</sup>, Б. Я. Мелех<sup>2</sup><sup>1</sup>Кафедра астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка<sup>2</sup>Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,  
79005, м. Львів, вул. Кирила і Мефодія, 8

### Іонізаційно-корекційні фактори для визначення хімічного вмісту областей Н II у блакитних компактних карликових галактиках

*Розраховано розподіл енергії у спектрі випромінювання іонізуючих ядер областей Н II в блакитних компактних карликових галактиках для  $\lambda \leq 91.2$  нм. Побудовано сітку фотоіонізаційних моделей свічення 270 областей Н II. Вільними параметрами сітки моделей є густина  $n_{\text{H}}$  водню в небулярному газі, фактор наповнення, енергетичний  $L_{\text{c}}$ -спектр іонізуючого випромінювання і металічність. Хімічний вміст, яким ініціалізувалась сітка моделей, був взятий з робіт Ю. І. Изотова та ін. Розраховані інтегральні лінійчасті спектри фотоіонізаційних моделей використані для визначення електронних концентрацій  $n_{\text{e}}$ , температур  $T_{\text{e}}$ , іонних концентрацій  $n(A^{+})/n(H^{+})$  звичайним методом діагностики небулярного газу. За значеннями іонних концентрацій отримано нові вирази для іонізаційно-корекційних факторів, що уточнюють хімічний вміст областей Н II в блакитних компактних карликових галактиках.*

*ИОНИЗАЦИОННО-КОРРЕКЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОБЛАСТЕЙ Н II В ГОЛУБЫХ КОМПАКТНЫХ КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ, Головатый В. В., Мелех Б. Я. — Рассчитано распределение энергии в спектре излучения ядер областей Н II в голубых компактных карликовых галактиках для  $\lambda \leq 91.2$  нм. Построена сетка фотоионизационных моделей свечения 270 областей Н II. Свободными параметрами сетки моделей являются плотность  $n_{\text{H}}$  водорода в небулярном газе, фактор наполнения, энергетический  $L_{\text{c}}$ -спектр и металличность. Инициализирующий сетку моделей химический состав был взят из работ Ю. И. Изотова и др. Вычисленные интегральные линейчатые спектры различных моделей использованы для определения электронных концентраций  $n_{\text{e}}$  и температур  $T_{\text{e}}$ , а также ионных концентраций  $n(A^{+})/n(H^{+})$  обычным методом диагностики небулярного газа. По значениям ионных концентраций получены новые выражения для ионизационно-коррекционных факторов, которые рекомендуются использовать для уточнения химического состава областей Н II в голубых компактных карликовых галактиках.*

*IONIZATION CORRECTION FACTORS FOR H II REGIONS IN BLUE COMPACT DWARF GALAXIES, by Holovatyi V. V., Melekh B. Ya. — Energy distributions in the spectra of the ionizing nuclei of H II regions beyond  $\lambda \leq 91.2$  nm were calculated. A grid of photoionization models of 270 H II regions was constructed. The free parameters of the model grid are the hydrogen density  $n_{\text{H}}$  in the nebular gas, filling factor, energy  $L_{\text{c}}$ -spectrum of ionizing nuclei, and metallicity. The chemical composition from the studies of Izotov et al. were used for model grid initialization. The integral linear spectra calculated for the photoionization models were used to determine the concentration  $n_{\text{e}}$ , temperatures  $T_{\text{e}}$  of electrons, and ionic concentrations  $n(\text{A}^{+})/n(\text{H}^{+})$  by the nebular gas diagnostic method. The averaged relative ionic abundances  $n(\text{A}^{+})/n(\text{H}^{+})$  thus calculated were used to determine new expressions for ionization correction factors which we recommend for the determination of abundances in the H II regions of blue compact dwarf galaxies.*

## ВСТУП

Для блакитних компактних карликових галактик (БККГ) характерні активні процеси зореутворення у компактних згустках радіусом близько 100 пк, навколо яких внаслідок іонізації навколишнього газу утворюються гігантські області Н II.

БККГ мають низьку металічність і еволюціонують з матерії, яка ще не брала участі в зоряній еволюції. Тому вони є особливо важливими об'єктами для дослідження проблеми визначення вмісту первинного гелію в нашій Метагалактиці. Порівняння металічності БККГ з металічністю, наприклад, планетарних туманностей може дати повнішу інформацію про темп збагачення важкими елементами і його можливі зміни у процесі хімічної еволюції речовини у Всесвіті. Тому задача точного визначення хімічного вмісту небулярного газу гігантських областей Н II в БККГ дуже важлива і повинна бути коректно поставлена.

Від реальних областей Н II у більшості випадків спостерігається невелика кількість ліній іонів одного і того ж хімічного елемента, тому кількість іонів більшості стадій іонізації визначити неможливо. Для визначення повного вмісту хімічного елемента з його іонного вмісту використовують так звані іонізаційно-корекційні фактори (ICF). Як правило їх знаходять з емпіричних співвідношень, які базуються на близькості потенціалів іонізації різних іонів, але слід зауважити, що вони не враховують різниці ефективних перерізів фотоіонізації. Очевидно, що точнішим методом визначення ICF є пошук відповідних аналітичних виразів з розрахунків фотоіонізаційних моделей свічення (ФМС) областей Н II в БККГ. В результаті можна знайти відносний вміст іонів  $n(\text{A}^{+})/n(\text{H}^{+})$  різних стадій іонізації і спробувати знайти їхній зв'язок з повним вмістом.

За параметр, який визначає поле іонізуючого випромінювання, більшість авторів використовує ефективну температуру ядра області Н II, хоча з моделей атмосфер О-В-зірок Шарера і де Котера [15] відомо, що випромінювання гарячих зірок не відповідає чорнотільному, особливо для  $\lambda \leq 91.2$  нм. Така різниця може бути дуже суттєвою для визначення точного вмісту як  $\text{He}^{++}$ , так і інших високоіонізованих атомів. Крім цього, для визначення ICF з ФМС, як правило, використовуються повні вмісти іонів  $n(\text{A}^{+})/n(\text{H}^{+})$ , що некоректно, тому що зі спостережень реальних областей Н II ці вмісти визначаються методом діагностики небулярного газу.

В цій роботі обговорюється методика визначення енергетичного  $L_{\text{c}}$ -спектру ядер областей Н II для  $\lambda \leq 91.2$  нм, описана процедура розрахунку сітки ФМС областей Н II та оптимізації розподілів енергії. Визначено відносні

вмісти іонів H, He, N, O, Ne, S и Ar, які використані для пошуку аналітичних виразів для ICF.

#### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ

Розподіл енергії в спектрі випромінювання ядер областей H II для  $\lambda \leq 91.2$  нм. Для розрахунку ФМС областей H II в БККГ необхідно задати розподіл енергії їхніх іонізуючих ядер у спектрі випромінювання для  $\lambda \leq 91.2$  нм. Якщо в оптичному і в близькому УФ-діапазонах такий розподіл можна знайти із спостережень, то за лайманівською межею таким методом його визначити неможливо. Це випромінювання, як відомо, поглинається міжзоряним воднем і може спостерігатися лише від Сонця і близьких зірок. Розрахувати  $L_c$ -спектр, виходячи з характеристик іонізуючих джерел, важко, оскільки морфологія таких об'єктів в більшості випадків невідома, тобто невідома кількість іонізуючих зір у кожному окремому кластері. Тому для знаходження  $L_c$ -спектру ми використали метод, запропонований в роботах В. В. Головатого і В. І. Проника [2, 5] і модифікований нами в роботі [6]. Метод базується на спостережуваних потоках в емісійних лініях H $\beta$ , He I  $\lambda$  447.1 і He II  $\lambda$  468.6 від областей H II.

Використана нами методика базується на припущенні про іонізаційно-рекомбінаційну і термічну рівновагу небулярного газу областей H II. Спостережуваною основою для розрахунків є інтегральні потоки від областей H II БККГ в згаданих вище лініях H і He, а також сума інтенсивностей заборонених ліній  $I(\lambda)/I(H\beta)$  [9, 11, 12, 18], виправлених за міжзоряне поглинання.

У відповідності з потенціалами іонізації H $^0$ , He $^0$  і He $^+$  область для  $\lambda$  91.2 нм ми розбили на три інтервали довжин хвиль:  $\lambda\lambda = 91.2...50.4$ ,  $50.4...22.8$ ,  $22.8...3$  нм. Кванти першого інтервалу поглинаються тільки атомами H $^0$ , другого — He $^0$ , H $^0$ , третього — атомами H $^0$ , He $^0$ , He $^+$  (важкими елементами ми знехтували). Розподіл енергії в кожному інтервалі визначався потоком випромінювання на початку інтервалу ( $F_{91.2}$ ,  $F_{50.4}$ ,  $F_{22.8}$ ) і параметром  $\alpha$ , який характеризує зміну потоку з частотою.

Метод [2, 5] застосовується для визначення енергетичного  $L_c$ -спектру ядер планетарних туманностей, тому ми модифікували його для випадку іонізуючих ядер областей H II в БККГ [6]. Суть модифікації полягає в знайденій нами залежності форми спектру в інтервалі  $\lambda\lambda = 50.4...91.2$  нм і  $3...22.8$  нм від ефективної температури зірки:

$$T_{\text{еф}} = 60479.07 + 20817.78\alpha + 6531.68\alpha^2 + \\ + 1196.33\alpha^3 + 108.07\alpha^4 + 3.67\alpha^5, \quad (1)$$

де  $\alpha$  — спектральний індекс в інтервалі  $\lambda = 50.4\text{—}91.2$  нм. Ця залежність була отримана нами апроксимацією результатів розрахунків моделей зоряних атмосфер [15] (SdK) для металічності  $Z = 0.004$ . По знайденому з виразу (1) значенню  $T_{\text{еф}}$  визначалася величина скачка на  $\lambda$  50.4 нм з моделі SdK з температурою, найближчою до неї. Ця різниця між знайденою і модельною  $T_{\text{еф}}$  визначалася температурними інтервалами між двома сусідніми моделями SdK. Після цього аналогічно знаходився розподіл енергії в інтервалі  $\lambda\lambda$  3—22.8 нм. Прив'язка знайденого таким чином розподілу енергії для  $\lambda < 22.8$  нм до отриманого нашим методом в інтервалі  $91.2 \text{ нм} \geq \lambda \geq 22.8$  нм здійснювалась через відношення відповідних потоків на  $\lambda = 91.2$  нм. Відзначимо, що формула (1) точніша, ніж приведена в [6], і охоплює весь діапазон моделей SdK з  $T_{\text{еф}} = 18000...54000$  К. Крім того, в

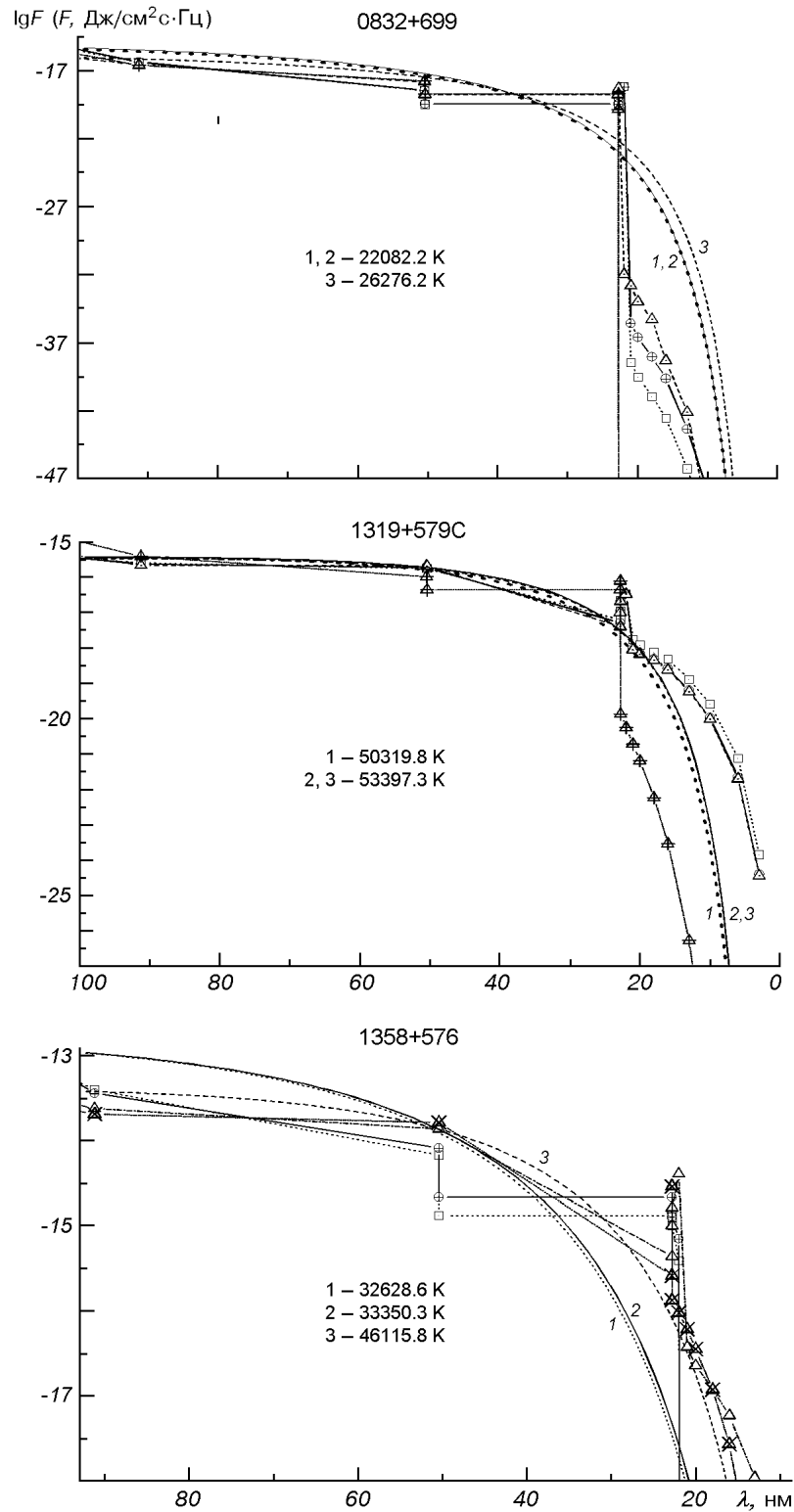


Рис. 1. Оптимізовані розподіли енергії в спектрі трьох об'єктів для трьох значень вмісту важких елементів:  $0.5M$  (квадратики),  $M$  (кружки),  $2M$  (трикутники); перекреслені трикутники — початкові розподіли. Криві 1, 2, 3 — планківські спектри для кожного із знайдених нами розподілів при  $T_{\text{еф}}$  для відповідних моделей SdK

роботі [6] були використані імовірності ударного збудження та іонізації  $\text{H}^0$  з [1], а нижче використовуються нові значення ймовірностей [16].

Для побудови сітки ФМС з вибірки 37 об'єктів [11, 18, 12] ми відібрали розподіли енергії об'єктів 0832+699, 1319+579С, 1358+576, які відповідають мінімальному, середньому і максимальному в енергетичній шкалі потокам іонізуючого випромінювання. Оскільки верхня межа температури для моделей SdK становить 53397.7 К, то об'єкти, для яких різниця  $T_{\text{ef}} - 53397.7 > 3000$  К, з аналізу були виключені. Знайдений енергетичний  $L_c$ -спектр іонізуючих джерел трьох згаданих областей Н II в БККГ показаний на рис. 1. Чітко видно відхилення знайденого розподілу енергії від чорнотільного, особливо для  $\lambda < 22.8$  нм.

**Сітка фотоіонізаційних моделей свічення.** Для побудови сітки ФМС областей Н II ми використали програму Г. Ферланда CLOUDY-94 (<http://www.pa.uky.edu/~gary/cloudy>) [8], у якій використовуються найновіші значення ймовірностей атомних процесів. Також нами був написаний драйвер для CLOUDY-94 методами Perl5 (<http://www.perl.com/pub>) для автоматизації розрахунку сітки ФМС, а також введені додаткові функції в CLOUDY-94 для формування вхідних файлів програми діагностики небулярного газу областей Н II DIAGN [3].

Вільними параметрами сітки були: 1) розподіл енергії для  $\lambda < 91.2$  нм для згаданих вище об'єктів; 2) фактор  $F$  наповнення небулярного газу [13], значення якого змінюються в діапазоні 0.0001—1 за законом  $F_i = 10F_{i-1}$ ; 3) відносний вміст  $M$  важких елементів; 4) концентрація атомів водню  $n_{\text{H}} = 10, 100, 500, 1000, 2000, 2500 \text{ см}^{-3}$ , що приймається однаковою по всьому об'єму області Н II.

За основу ми взяли середній хімічний вміст  $M = A/\text{H}$  з роботи [10]:

$$\begin{aligned} \text{H} : \text{He} : \text{O} : \text{C} : \text{N} : \text{Ne} : \text{Si} : \text{S} : \text{Ar} : \text{Fe} = \\ = 1 : 8.01 \cdot 10^{-2} : 7.27 \cdot 10^{-5} : 1.71 \cdot 10^{-5} : 2.46 \cdot 10^{-6} : 1.39 \cdot 10^{-5} : 2.41 \cdot 10^{-6} : \\ 2.00 \cdot 10^{-6} : 4.00 \cdot 10^{-7} : 1.45 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Розрахунки вмісту важких елементів провадилися для трьох варіантів:  $M_1 = 0.5M$ ,  $M_2 = M$ ,  $M_3 = 2M$ . Всі ФМС розраховувалися в сферично-симетричному наближенні з внутрішнім радіусом 0.01 пк. Розрахунок кожної моделі продовжувався до досягнення електронної температури  $T_e \leq 4000$  К. Дифузне іонізуюче випромінювання обчислювалось комбінованим “outward only” — “on-the-spot” методом [7].

**Оптимізація розподілів енергії для  $\lambda \leq 91.2$  нм.** Більш точний метод пошуку енергетичного  $L_c$ -спектру ядер областей Н II [6] вимагає суми відносних інтенсивностей заборонених ліній  $\sum [I_\lambda]/H_\beta$  і відношення концентрацій  $\text{H}^+/\text{H}^0$ , які зі спостережень для даних об'єктів невідомі. У більшості випадків емісійні лінії спостерігаються лише в оптичному діапазоні спектру, а нейтральний водень в областях Н II взагалі не світиться. В роботі [6] ми використали залежність  $\sum [I_\lambda]/H_\beta$  від суми інтенсивностей ліній  $(I_{372.7[\text{OIII}]} + I_{495.9+500.7[\text{OIII}]} + I_{658.4[\text{NII}]})/H_\beta$  для планетарних туманностей, і приймалась відома рівність  $\text{H}^+/\text{H}^0 = \text{O}^+/\text{O}^0$ , обумовлена перевагою реакцій обміну зарядом між  $\text{O}^+ + \text{H}^0 \Leftrightarrow \text{O}^0 + \text{H}^+$  порівняно з іншими процесами. Відношення іонів кисню може бути знайдено з аналізу результатів спостережень і їхні значення приведені в роботі [6].

Згадане вище припущення було прийнято за першу ітерацію для оптимізації потоків  $L_c$ -спектру. Процес оптимізації ми здійснили наступним чином. Спочатку розраховували сітку ФМС. Потім для кожної моделі ми обчислили значення  $\sum [I_\lambda]/H_\beta$  в УФ-, оптичному та ІЧ-діапазонах, за-

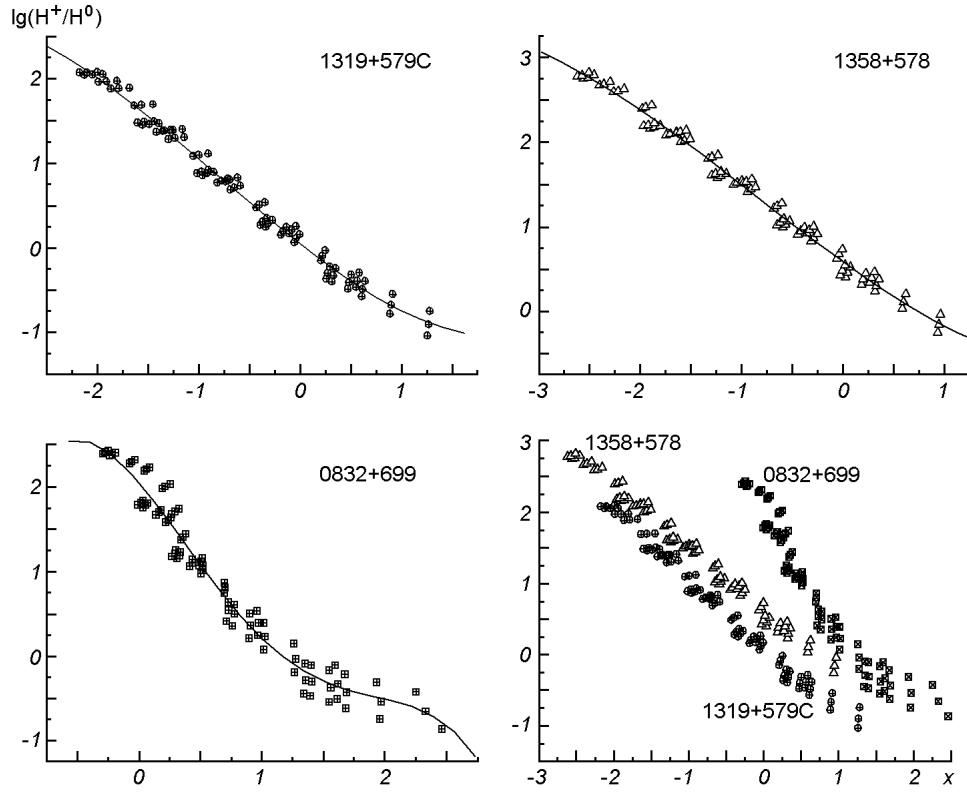


Рис. 2. Залежності  $\lg(H^+/H^0)$  від  $x = \lg(I_{372.7[\text{OII}]} / I_{(495.9+500.7)[\text{OIII}]})$

лежність якого від суми інтенсивностей ліній  $(I_{372.7[\text{OII}]} + I_{(495.9+500.7)[\text{OIII}]} + I_{658.4[\text{NII}]}) / I_{H\beta}$  показана на рис. 3. Видно три складові залежності, зумовлені різною металічністю. Для порівняння показана апроксимація аналогічної залежності для планетарних туманностей (лінія ПТ), знайдена нами за відповідними даними, розрахованими з ФМС [4]. Вона стала першим наближенням для розрахунків енергетичного  $L_c$ -спектру. Аналогічно були знайдені залежності для  $\lg(H^+/H^0)$  від  $\lg(I_{372.7[\text{OII}]} / I_{(495.9+500.7)[\text{OIII}]})$ , показані на рис. 2 для вибраних нами трьох областей Н II, де також видно три складові залежності, обумовлені різними розподілами енергії для різних об'єктів. Відповідні апроксимаційні вирази і стандартні відхилення  $\sigma$  для кожного з цих об'єктів приведені нижче:

$$\begin{aligned}
 0832+699: \quad & \lg(H^+/H^0) = 2.04176 - 1.73757x - 0.88416x^2 + \\
 & + 0.99066x^3 - 0.21706x^4, \quad \sigma = 0.17849; \\
 1319+579C: \quad & \lg(H^+/H^0) = 0.04981 - 0.94224x + 0.10781x^2 + 0.0444x^3, \\
 & \sigma = 0.09843; \\
 1358+576: \quad & \lg(H^+/H^0) = 0.57702 - 0.8621x + 0.07556x^2 + 0.0288x^3, \\
 & \sigma = 0.08767,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $x = \lg(I_{372.7[\text{OII}]} / I_{(495.9+500.7)[\text{OIII}]})$ .

На основі цих апроксимацій ми перерахували розподіли енергії у спектрі випромінювання ядер областей Н II для  $\lambda \leq 91.2$  нм для кожного з трьох об'єктів і для різної металічності.

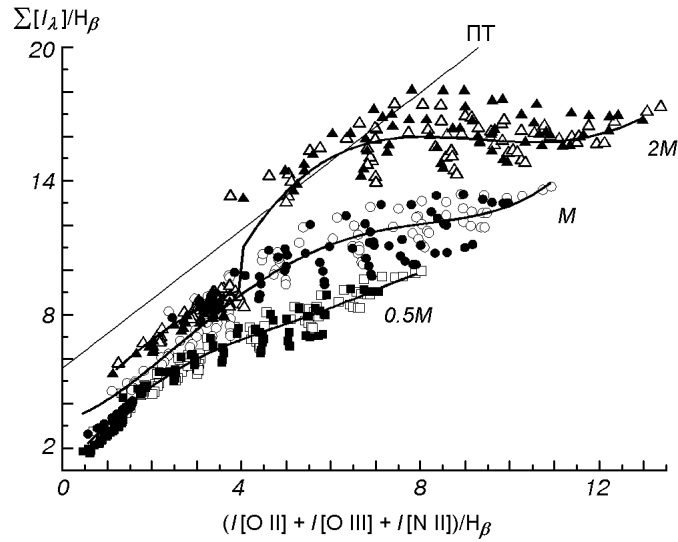


Рис. 3. Залежність суми відносних інтенсивностей заборонених ліній  $\Sigma[I_\lambda]/H_\beta$  від суми відносних інтенсивностей ліній [O II]  $\lambda$  372.7 нм і [O III]  $\lambda$  (495.9 + 500.7 нм), отриманих з першої (світлі символи) і з другої (темні символи) ітерації методу оптимізації. Лінія ПТ — апроксимація аналогічної залежності для планетарних туманностей

Процедура оптимізації розподілів енергії для  $\lambda \leq 91.2$  нм повторювалася до тих пір, поки значення суми, знайдене в останній ітерації, не буде збігатися з попереднім значенням із заданою точністю. Вже після другої ітерації ця процедура дає задовільний результат (рис. 3). Видно, що вищезгадані залежності для першої і другої ітерацій збігаються для різної металічності, що стає причиною зупинки ітераційного процесу.

Показані на рис. 3 залежності для металічностей  $M_1 = 0.5M$ ,  $M_2 = M$ ,  $M_3 = 2M$  були апроксимовані поліномами:

$$\Sigma [I_\lambda]/H_\beta = 1.01168 + 2.16317x - 0.017x^2 - 0.09029x^3 + 0.01605x^4 - 0.00082x^5$$

для  $x \in [0.5...8]$ ,  $M_1 = 0.5M$ ;

$$\Sigma [I_\lambda]/H_\beta = 3.22566 + 0.51613x + 0.50416x^2 - 0.08552x^3 + 0.00396x^4$$

для  $x \in [0.5...11]$ ,  $M_2 = M$ ;

$$\Sigma [I_\lambda]/H_\beta = 3.05641 + 2.294x - 0.19497x^2$$

для  $x \in [1.2...4]$ ,  $M_3 = 2M$ ;

$$\Sigma [I_\lambda]/H_\beta = -16.98725 + 11.69582x - 1.44626x^2 + 0.07032x^3 - 0.00099x^4$$

для  $x \in [4...14]$ ,

де  $x = (I_{372.7[\text{OII}]} + I_{(495.9+500.7)[\text{OIII}]} + I_{658.4[\text{NII}]})/I_{H\beta}$ .

Величина відношення іонів  $\text{H}^+/\text{H}^0$  була знайдена за даними спостережень на основі апроксимаційних виразів (2) з останньої ітерації.

В результаті на рис. 1 подано всі початкові і кінцеві розподіли енергії для  $\lambda \leq 91.2$  нм, розраховані після оптимізації для трьох вибраних об'єктів. Використовувалась ідентифікація точок сітки ФМС. Всі потоки для кожного об'єкта відповідають відстані до Землі. Для порівняння приведені також планківські розподіли енергії для кожного із знайдених нами розподілів при

Таблиця 1. Поправочні множники для розподілів енергій для  $\lambda \leq 22.8$  нм, необхідні для відтворення спостережуваної відносної інтенсивності лінії  $\lambda$  468.6 He II

M	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
1319+579C					
M <sub>1</sub>	19.54	8.89	8.51	8.81	9.02
M <sub>2</sub>	33.11	15.00	14.16	14.59	14.93
M <sub>3</sub>	36.31	15.89	14.66	15.14	15.60
1358+576					
M <sub>1</sub>	1629.30	1581.25	1599.56	1610.65	1618.08
M <sub>2</sub>	763.84	737.90	751.62	758.58	763.84
M <sub>3</sub>	35.08	34.75	35.73	36.64	37.32

$T_{e\text{ф}}$  для відповідних моделей SdK. Підтверджується зроблений нами вище висновок те, що енергетичний  $L_c$ -спектр відрізняється від планківського, особливо для  $\lambda \leq 22.8$  нм.

Для відтворення спостережуваної відносної інтенсивності лінії  $I_{468.6\text{HeII}}/H_\beta$  фотоіонізаційною моделлю свічення ми склали програму, яка на основі методу Брента [14] мінімізує модуль різниці модельних і спостережуваних відношень  $I_{468.6\text{HeII}}/H_\beta$ . Вільним параметром слугував поправочний множник на потоки для  $\lambda < 22.8$  нм. Програма, змінюючи цей множник, заново розраховує ФМС за алгоритмом CLOUDY-94 з новим розподілом енергії для  $\lambda \leq 22.8$  нм. Розрахунок проводиться доти, поки спостережувані і розраховані відносні інтенсивності He II не співпадуть з точністю до  $10^{-5}$ . Таким чином, ми отримуємо поправочний множник, на який необхідно помножити всі значення потоків для  $\lambda < 22.8$  нм, щоб ФМС відтворювала спостережувану інтенсивність лінії  $\lambda$  468.6 He II. Оскільки значень фактора наповнення і хімічного вмісту ми точно не знаємо, ми отримали поправочні множники для всіх значень нашої сітки ФМС по параметрах  $M$  і  $F$  (табл. 1). Даних для об'єкта 0832+699 немає, бо у нього лінія He II не зареєстрована.

В результаті за знайденими оптимізованими енергетичними  $L_c$ -спектрами ядер областей H II в БККГ, була розрахована сітка ФМС, інтегральні спектри якої використовувались для подальшого аналізу.

#### ІОНІЗАЦІЙНО-КОРЕКЦІЙНІ ФАКТОРИ

**Діагностика небулярного газу.** Для визначення  $n_e$ ,  $T_e$ , відносних іонних концентрацій  $A^{+1}/H^{+}$  і хімічного вмісту  $A/H$  ми використали програму DIAGN, описану в роботі [3]. Для даного випадку ми переробили її таким чином, щоб імовірності переходів  $A_{ij}$  і ефективні параметри удару  $\gamma(T_e)$  відповідали тим, які використовуються в CLOUDY-94. Значення цих параметрів ( $n_e$ ,  $T_e$ ,  $A^{+1}/H^{+}$ ) визначалися зі спостережуваного спектру областей H II методом перетину кривих, рівних відношень інтенсивностей емісійних ліній одного і того ж іона.

Розрахований описаним вище методом емісійний лінійчатий спектр сітки ФМС областей H II ми вважали «спостережуваним» і використали його для визначення іонних концентрацій  $(A^{+1}/H^{+})_{\text{diag}}$ . Саме таким методом визначається відносний іонний вміст в реальних об'єктах. В результаті для всіх 270 інтегральних спектрів сітки ФМС були отримані значення  $(A^{+1}/H^{+})_{\text{diag}}$ . Усереднені значення іонного вмісту  $(A^{+1}/H^{+})_{\text{diag}}$ , а також



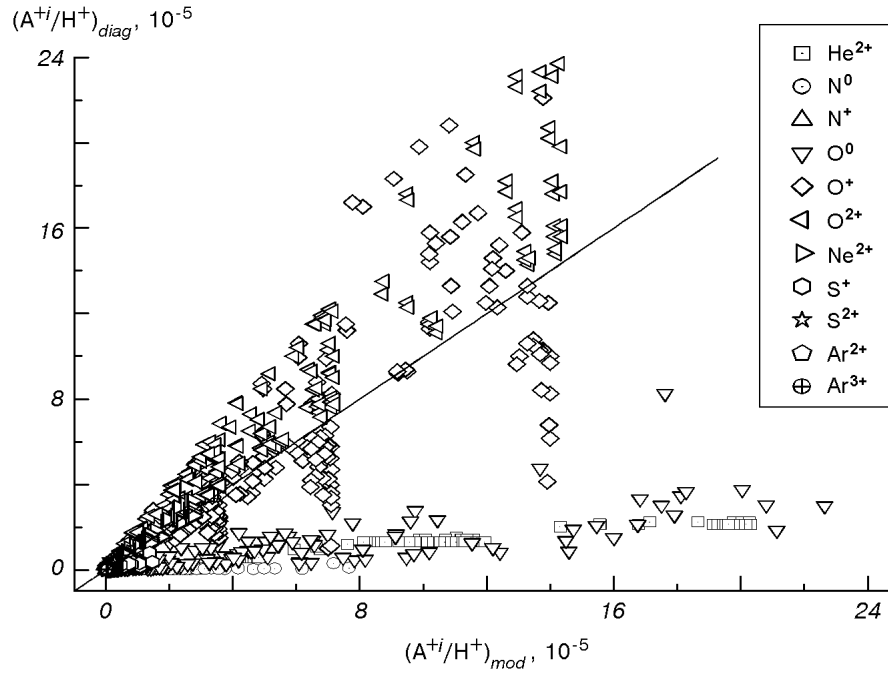


Рис. 4. Залежність між  $(A^{+i}/H^+)_{mod}$  і  $(A^{+i}/H^+)_{diag}$  для різних іонів

значення  $n_e$  і  $T_e$  можна знайти за адресою:

[ftp://astro.franko.lviv.ua/pub/BCDG/DG\\_Grid.tar.gz](ftp://astro.franko.lviv.ua/pub/BCDG/DG_Grid.tar.gz)

Відзначимо, що наша методика відрізняється від описаної в роботі [17], де приведено повні відносні іонні вмісти  $(A^{+i}/H^+)_{mod}$  з ФМС. Як показують наші розрахунки, значення  $(A^{+i}/H^+)_{mod}$  і  $(A^{+i}/H^+)_{diag}$  сильно відрізняються (рис. 4). Ми вважаємо, що значення  $(A^{+i}/H^+)_{diag}$  точніші, оскільки зі спостережень вони визначаються саме таким методом.

Нові значення ICF для визначення хімічного вмісту небулярного газу. Для визначення хімічного вмісту газу в областях Н II ми розглянули залежності між іонними вмістами  $(A^{+i}/H^+)_{diag}$  та повним вмістом  $A/H$ , як і в роботі [4]:

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

звідки

$$\lg(A/H) = \lg[(A^{+i}/H^+)_{diag}] - f(x),$$

або

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

Тут  $f(x)$  — відповідні апроксимаційні функції для різних іонів а відношення  $X^{+k+1}/X^{+k}$  відповідають  $He^{++}/He^+$ ,  $O^{++}/O^+$ ,  $S^{++}/S^+$  або  $Ar^{3+}/Ar^{2+}$ .

Для визначення  $f(x)$  ми розглянули всі можливі залежності типу (3) для іонів, лінії яких спостерігаються в спектрах областей Н II. Деякі з них показані на рис. 5. Вони були апроксимовані поліномом

$$f(x) = \sum_{n=0}^8 C_n x^n.$$

В табл. 2 приведено коефіцієнти полінома  $C_n$  та всі поліноміальні апроксимації (позначені символом G) для визначення вмісту  $A/H$ . Вирази, від-

Таблиця 2. Вирази для визначення хімічного вмісту A/H областей II в БККГ;  $A/H = 10^{\lg(A^{+i}/H^{+i}) - f(x)}$ ,  $f(x) \equiv \sum_{n=0}^8 C_n x^n$

Номер формули	x	A/H	A <sup>+i</sup> /H <sup>+</sup>	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	σ
G1*	-2.1...-1.5	He/H	He <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	1043.89904	2950.07858	3318.23594	1858.49255	518.06345	57.48887	0	0	0	0.02
				$x = \lg(\text{He}^{++}/\text{He}^{+})$									
G2	-1...2.36	O/H	O <sup>0</sup> /H <sup>+</sup>	-1.232	-0.710	-0.068	0.023	0	0	0	0	0	0.14
G3*	-2...2.36	O/H	O <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	-0.279	-0.432	-0.258	0.014	0.008	0	0	0	0	0.08
G4*	-2...2.36	O/H	O <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	-0.279	0.568	-0.258	0.014	0.008	0	0	0	0	0.08
G5	-1.8...1.8	N/H	N <sup>0</sup> /H <sup>+</sup>	-1.673	-1.008	-0.292	0.068	0.081	0	0	0	0	0.18
G6*	-2...1	N/H	N <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	-0.367	-0.489	-0.242	0.018	0.008	0	0	0	0	0.09
G7*	-1.72...2.36	Ne/H	Ne <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	-0.210	0.459	-0.286	0.007	0.022	0	0	0	0	0.14
G8	-1.65...2.36	S/H	S <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	-0.547	-0.563	-0.131	0.015	0	0	0	0	0	0.13
				$x = \lg(\text{O}^{++}/\text{O}^{+})$									
G9*	-1.76...2.33	S/H	S <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	-0.167	0.062	0.014	0.158	-0.231	-0.05	0.07	0.006	-0.007	0.12
G10	-1.65...2.33	Ar/H	Ar <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	-0.098	0.092	-0.117	0.001	0.003	-0.008	0	0	0	0.07
G11	-1.06...2.37	Ar/H	Ar <sup>3+</sup> /H <sup>+</sup>	-1.413	1.056	-0.258	-0.077	0.09	-0.009	-0.005	0	0	0.07
				$x = \lg(\text{S}^{++}/\text{S}^{+})$									
G12	-0.91...1.54	He/H	He <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	0.04347	0.01673	0.01253	0.01465	0	0	0	0	0	0.03
G13	-0.37...1.54	O/H	O <sup>0</sup> /H <sup>+</sup>	-0.904	-0.893	-1.087	3.226	5.31	-22.53	20.58	-5.796	0	0.20
G14*	-1.4...1.54	O/H	O <sup>+</sup> /H <sup>+</sup>	-0.207	0.091	0.779	-0.817	-2.844	0.376	2.083	-0.047	-0.467	0.29
G15*	-1.4...1.54	O/H	O <sup>++</sup> /H <sup>+</sup>	-0.743	0.885	-0.055	-0.031	-0.058	0	0	0	0	0.18

\* — Вирази отримані з урахуванням точок сітки ФМС для об'єкта 0832+699 (для розподілів енергії з  $\alpha > -4.9$ )

Закінчення табл. 2

Номер формули	$x$	$A/H$	$A^+/H^+$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$\sigma$
						$x = \lg(S^{++}/S^+)$							
G16	-0.9...1.5	N/H	$N^0/H^+$	-1.273	-0.971	-0.456	-0.148	0.179	0	0	0	0	0.17
G17*	-1.55...1.56	N/H	$N^+/H^+$	-0.234	-0.028	0.641	-0.663	-2.585	0.266	1.904	-0.027	-0.426	0.26
G18*	-1.55...1.56	Ne/H	$Ne^{++}/H^+$	-0.589	0.643	-0.117	0.03	0.045	0	0	0	0	0.23
G19*	-1.41...1.54	S/H	$S^+/H^+$	-0.339	-0.402	0.362	-0.292	-1.799	0.099	1.34	0.001	-0.301	0.18
G20*	-1.56...0.61	S/H	$S^{++}/H^+$	-0.296	0.602	-0.359	-0.301	-0.051	0.102	0.024	0	0	0.18
G21	-0.89...1.51	Ar/H	$Ar^{++}/H^+$	-0.177	0.164	-0.196	1.259	0.603	-4.37	0.382	3.666	-1.601	0.16
G22*	-0.61...1.54	Ar/H	$Ar^{3+}/H^+$	-1.998	1.224	0.565	-0.416	0	0	0	0	0	0.26
						$x = \lg(Ar^{3+}/Ar^{2+})$							
G23	-2.4...-0.88	He/H	$He^+/H^+$	0.126	0.05	-0.052	-0.05	-0.011	0	0	0	0	0.03
G24*	-2.48...1.02	O/H	$O^0/H^+$	-2.436	-0.725	0.201	0.074	0	0	0	0	0	0.20
G25	-2.48...1.02	O/H	$O^+/H^+$	-1.497	-0.953	0.394	0.114	-0.365	-0.199	-0.028	0	0	0.10
G26	-2.48...1.02	O/H	$O^{++}/H^+$	0.075	0.067	0.014	0.006	-0.156	-0.051	0	0	0	0.09
G27*	-2.41...0.2	N/H	$N^0/H^+$	-3.168	-0.132	1.618	0.852	0.132	0	0	0	0	0.24
G28*	-2.4...0.9	N/H	$N^+/H^+$	-1.543	-1.416	0.53	0.827	-0.344	-0.489	-0.111	0	0	0.30
G29	-2.4...0.9	Ne/H	$Ne^{++}/H^+$	-0.014	-0.036	-0.053	0.097	0.024	0	0	0	0	0.06
G30	-1.38...0.79	S/H	$S^{++}/H^+$	-0.369	-0.700	-0.431	0.310	0.161	-0.259	-0.212	-0.043	0	0.09
G31	-2.4...0.88	Ar/H	$Ar^{++}/H^+$	-0.299	-0.485	-0.212	0.113	-0.018	-0.160	-0.101	-0.019	0	0.06
G32*	-2.4...0.88	Ar/H	$Ar^{3+}/H^+$	-0.299	0.515	-0.212	0.113	-0.018	-0.160	-0.101	-0.019	0	0.06

\* — Вирази отримані з урахуванням точок сітки ФМС для об'єкта 0832+699 (для розподілів енергії з  $\alpha > -4.9$ )

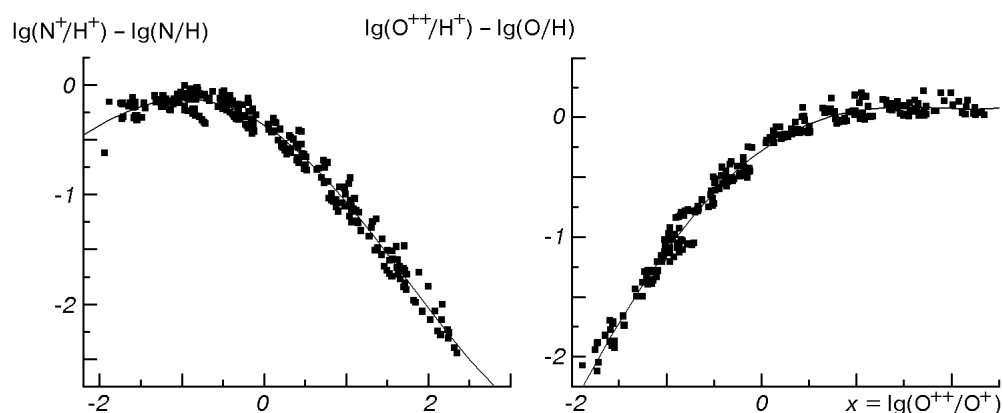


Рис. 5. Залежності  $\lg(N^+/H^+) - \lg(N/H)$  і  $\lg(O^{++}/H^+) - \lg(O/H)$  від  $\lg(O^{++}/O^+)$

Таблиця 3. Відношення значень  $(A/H)_{calc}$ , обчислених за виразами табл. 2 і значень  $(A/H)_{mod}$ , заданих при побудові сітки ФМС;  $(A/H)_{calc}$  — розрахований при допомозі відповідного виразу (номер якого приведений в стовбці  $N$ ) хімічний вміст. Відношення  $\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$  усереднювались по відповідній кількості точок сітки ( $N_{mod}$ ) і представлені разом із стандартними похибками ( $\sigma$ ) і процентними відхиленнями (%) від одиниці

$N$	$\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$	$\sigma$	%	$N_{mod}$	$N$	$\frac{(A/H)_{calc}}{(A/H)_{mod}}$	$\sigma$	%	$N_{mod}$
G1	0.98	0.01	1.6	179	G17	1.2	0.07	19.9	255
G2	1.06	0.03	5.73	172	G18	1.33	0.04	32.8	180
G3	1.01	0.01	0.71	256	G19	1.06	0.02	6.1	255
G4	1.01	0.01	0.71	256	G20	1.00	0.01	0.26	149
G5	1.09	0.04	8.95	143	G21	1.05	0.02	5	170
G6	1.01	0.01	1.15	195	G22	1.21	0.06	20.8	206
G7	1.04	0.02	4.32	250	G23	0.99	0.01	0.57	170
G8	1.05	0.03	4.65	180	G24	1.12	0.04	11.6	207
G9	1.03	0.02	3.47	253	G25	1.02	0.02	2.37	171
G10	1.01	0.01	0.68	180	G26	1.02	0.02	1.68	171
G11	1.01	0.01	0.93	171	G27	1.16	0.06	16.3	157
G12	0.99	0.00	0.61	180	G28	1.33	0.10	32.8	206
G13	1.09	0.04	9.4	170	G29	1	0.01	0.47	170
G14	1.22	0.07	22.5	254	G30	1.03	0.01	3.41	169
G15	1.08	0.03	8.08	254	G31	1	0.01	0.35	170
G16	1.07	0.03	6.85	143	G32	1	0.01	0.35	170

значені зірочкою, знайдено з урахуванням розподілів енергії для різних металічностей, обчислених для об'єкта 0832+699. У цього об'єкта спектральні індекси в діапазоні  $91.2 \text{ nm} > \lambda > 50.4 \text{ nm}$  менші від  $-4.9$  для трьох типів розподілів енергії. Ці вирази мають задовільні значення  $\sigma$  і можуть використовуватись також для об'єктів, у яких лінія He II  $\lambda 468.6 \text{ nm}$  не спостерігається. Всі інші вирази можуть бути використані для визначення  $A/H$  лише для тих об'єктів, у яких лінія He II  $\lambda 468.6 \text{ nm}$  спостерігається.

Приведені в табл. 2 апроксимаційні вирази були протестовані нами наступним чином. Спочатку для кожної моделі сітки ФМС по кожному з виразів для  $ICF$  ми визначали значення хімічного вмісту  $(A/H)_{calc}$  за іонними концентраціями, отриманими методом DIAGN. Після цього вони порівнювались з відповідним модельним значенням  $(A/H)_{mod}$ . Отримані відношення  $(A/H)_{calc}/(A/H)_{mod}$  для кожного виразу усереднювались по

відповідних значеннях із всієї кількості моделей сітки ( $N_{\text{mod}}$ ). Чим ближче відношення  $(A/H)_{\text{calc}}/(A/H)_{\text{mod}}$  до одиниці, тим точніші апроксимаційні вирази (див. табл. 3).

Зауважимо, що перевага цього методу визначення хімічного вмісту полягає в тому, що величини  $A/H$  можна визначати з відповідних інтенсивностей ліній, які спостерігаються лише в одній стадії іонізації.

## ВИСНОВКИ

Для розрахунку ФМС використано розподіл енергії у спектрі випромінювання іонізуючих ядер областей Н II в БККГ для  $\lambda \leq 91.2$  нм не чорнотільний, а розрахований за допомогою методу [6]. Ця методика не потребує параметрів функції початкових мас іонізуючих кластерів і використовує тільки потоки в спостережуваних лініях  $H_{\beta}$ , He I  $\lambda$  447.1, He II  $\lambda$  468.6, [O II]  $\lambda$  372.7 нм і [O III]  $\lambda$  (495.9 + 500.7 нм) від областей Н II. Показано, що отримані розподіли енергії відрізняються від чорнотільних, особливо в області  $\lambda \leq 22.8$  нм. На основі цих розподілів енергії побудовано моделі свічення 270 областей Н II. Вільними параметрами сітки моделей є густина водню в небулярному газі, фактор наповнення, енергетичний  $L_c$ -спектр іонізуючого випромінювання і металічність. Розраховані інтегральні лінійчасті спектри ФМС були використані для визначення електронних концентрацій та температур, іонних концентрацій звичайним методом діагностики небулярного газу. Обчислені таким чином відносні іонні вмісти  $(n(A^+)/n(H^+))_{\text{diag}}$  вперше були використані для визначення нових виразів для  $ICF$  з метою уточнення хімічного вмісту областей Н II в БККГ. Саме таким методом визначається іонний вміст різних хімічних елементів від реальних об'єктів. Кожен з отриманих виразів для  $ICF$  був протестований на відтворення хімічного вмісту, заданого у відповідних ФМС. Показано, що запропонованим нами методом можна відтворити хімічний вміст з похибкою 10 %, тому з табл. 3 слід вибирати саме ті вирази для  $ICF$ , які відповідають цій точності.

Автори вдячні Ю. І. Ізотову (ГАО НАНУ) і В. І. Пронику (КраО) за корисні дискусії.

1. Гершберг Р. Е., Коровяковская А., Коровяковский Ю. Коэффициенты ударного возбуждения и ионизации водорода // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1971.—43.—С. 49—51.
2. Головатый В. В. Распределение энергии в спектре излучения ядер планетарных туманностей за лаймановским пределом // Письма в Астрон. журн.—1987.—13, № 7.—С. 589—596.
3. Головатый В. В., Гершберг Р. Е., Мальков Ю. Ф., Проник В. И. Количественный анализ ультрафиолетовых, оптических и инфракрасных эмиссионных спектров небесных тел с целью определения физических параметров и химического состава излучающего диффузного вещества и межзвездного поглощения до него // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1999.—96.—С. 72—138.
4. Головатый В. В., Дмитерко В. И., Мальков Ю. Ф., Рокач О. В. Новый метод определения химического состава планетарных туманностей и его применение к туманностям галактического гало // Астрон. журн.—1993.—70, вып. 4.—С. 691—706.
5. Головатый В. В., Проник В. И. Непрерывный спектр за лаймановским пределом и эффективные температуры ядер планетарных туманностей // Астрофизика.—1990.—32.—С. 99—116.
6. Мелех Б. Я. Розподіл енергії в спектрі випромінювання іонізуючих ядер областей Н II в голубих компактних карликових галактиках для  $\lambda$  912 Е // Журн. фіз. досліджень.—2000.—4, № 2.—С. 225—235.
7. Ferland G. J. Hazy, a brief introduction to cloudy. — Levington: Univ. of Kentucky, Physics Department Internal Report, 1996.—750 p.

8. *Ferland G. J.* Hazy, a brief introduction to cloudy 94. — Levington: Univ. of Kentucky, Physics Department Internal Report, 1999.—750 p.
9. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* Reexamining the helium abundance of I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1998.—**497**, N 1.—P. 227—237.
10. *Izotov Yu. I., Thuan T. X.* Heavy-Element Abundances in Blue Compact Galaxies // *Astrophys. J.*—1999.—**511**, N 1.—P. 639—659.
11. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**435**, N 2.—P. 647—667.
12. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance: systematic effects and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**108**, N 1.—P. 1—39.
13. *Osterbrock D. E., Flather E.* Electron Densities in the Orion NEBULA. II. // *Astrophys. J.*—1959.—**129**, N 1.—P. 26—43.
14. *Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P.* Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing. — Cambridge: Univ. press, 1992.
15. *Schaerer D., de Koter A.* Combined stellar structure and atmosphere models for massive stars. III. Spectral evolution and revised ionizing fluxes of O3-B0 stars // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**322**, N 2.—P. 598—619.
16. *Scholz T. T., Walters H. R. J.* Collisional rates and cooling within atomic hydrogen plasmas // *Astrophys. J.*—1991.—**380**, N 10.—P. 302—306.
17. *Stasinska G.* A grid of model H II regions for extragalactic studies // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1990.—**83**, N 3.—P. 501—538.
18. *Thuan T. X., Izotov Y. I., Lipovetsky V. A.* Heavy element abundances in a new sample of low-metallicity blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**445**, N 1.—P. 108—123.

Надійшла до редакції 18.02.02