ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 11, № 4 (2007) с. 468–472

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 11, No. 4 (2007) p. 468–472

ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ПЕРВИННОГО ГЕЛІЮ Y_p ТА ТЕМПУ ЙОГО ЗБАГАЧЕННЯ dY/dZ НА ОСНОВІ ХЕМІЧНОГО СКЛАДУ ЗОН HII В БЛАКИТНИХ КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИКАХ ТА ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

В. В. Головатий, Б. Я. Мелех, Н. В. Гаврилова
Кафедра астрофізики Львівського національного університету імені Івана Франка, Кирила і Мефодія, 8, 79005, Львів, Україна

(Отримано 25 грудня 2006 р.; в остаточному вигляді — 6 лютого 2007 р.)

Хемічний склад зон HII у блакитних компактних карликових галактиках та планетарних туманностей (ПТ), який ми отримали за допомогою нових виразів для йонізаційно-корекційних множників та оптимізованих фотойонізаційних моделей світіння небулярного газу, використано для уточнення вмісту первинного гелію Y_p та темпу його збагачення dY/dZ під час хемічної еволюції речовини. Показано, що одночасне використання хемічного складу зон HII та ПТ для визначення Y_p та dY/dZ збільшує точність останнього.

Ключові слова: зони HII, блакитні компактні карликові галактики, оптимізовані фотойонізаційні моделі світіння, хемічний уміст.

PACS number(s): 98.58.Hf, 98.52.Wz, 98.54.Ep, 98.56.Wm, 97.10.Ex

I. ВСТУП

Ядра більшости елементів синтезувалися під час термоядерних реакцій у надрах зір або ж під час вибухів Наднових. Лише водень, деяка частка гелію, дейтерію, літію та їх ізотопів мають "незоряне" походження. Значна частина згаданих легких елементів (крім водню) мала б синтезуватися під час нуклеосинтезу Великого Вибуху (НВВ) у перші хвилини життя Всесвіту. Існують різні моделі НВВ, і для того, щоб їх протестувати, необхідно мати дані, які можна визначити зі спостережень. Таким параметром, зокрема, є вміст первинного гелію за масовою часткою Y_p.

Якщо X, Y та Z є масовими частками водню, гелію та важких елементів відповідно, тоді можна записати очевидну умову:

$$X + Y + Z = 1, \tag{1.1}$$

або

$$X = \frac{1}{1 + Y/X + Z/X}, \quad Y = \frac{Y/X}{1 + Y/X + Z/X}, \quad Z = \frac{Z/X}{1 + Y/X + Z/X}. \tag{1.2}$$

Для Z маємо [1, 2, 5, 6]:

$$Z = \frac{Z_a}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H} + Z_a}, \tag{1.3}$$

де в нашому випадку

$$Z_a \approx 12\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{H}} + 14\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{H}} + 16\frac{\mathrm{O}}{\mathrm{H}} + 20\frac{\mathrm{Ne}}{\mathrm{H}} + 32\frac{\mathrm{S}}{\mathrm{H}} + 40\frac{\mathrm{Ar}}{\mathrm{H}} + 56\frac{\mathrm{Fe}}{\mathrm{H}}. \tag{1.4}$$

Отже, ми отримуємо:

$$X = \frac{1}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H} + Z_a}, \quad Y = \frac{4\mathrm{He}/\mathrm{H}}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H} + Z_a}, \quad Z = \frac{Z_a}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H} + Z_a}. \tag{1.5}$$

У кінцевому підсумку параметри Y та Z задаються як

$$Y = \frac{4\mathrm{He}/\mathrm{H}\,(1 - Z)}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H}}, \quad Z = \frac{Z_a}{1 + 4\mathrm{He}/\mathrm{H} + Z_a}. \tag{1.6}$$

Ми знаємо, що під час НВВ важкі елементи не синтезувалися. Тому на епоху НВВ $Z = 0$. Отже, маючи хемічний уміст астрофізичних об'єктів на сучасну епоху, ми можемо побудувати для них залежність $Y - Z$, і екстраполяція її на $Z = 0$ дає вміст Y_p. Найкращими об'єктами для взначення Y_p є зони HII у блакитних компактних галактиках (БККГ), оскільки вони мають найнижчу металічність з усіх типів небулярних об'єктів.

Порівнюючи вміст гелію в різних астрофізичних об'єктах, які суттєво різняться за вмістом важких елементів, ми можемо, з одного боку, точніше визначити темп його збагачення в процесі зоряної хемічної еволюції речовини dY/dZ, а з іншого — уточнити значення Y_p. Як такі "додаткові" об'єкти ми вибрали планетарні туманності (ПТ).

II. ВИЗНАЧЕННЯ ХЕМІЧНОГО СКЛАДУ ЗОН HII В БККГ

Докладно процедуру визначення хемічного вмісту зон HII в БККГ описано в наших працях [5, 7–9, 12]. Тому тут ми зупинимося лише на загальному огляді методів визначення хемічного складу, а також на аналізі їхніх основних відмінностей від інших методів.

Для виведення нових виразів для йонізаційно-корекційних множників (ЙКМ) БККГ ми розрахували сітку фотойонізаційних моделей світіння (ФМС) [7] на основі йонізуючих лайманівських (Lyc) спектрів у зонах HII БККГ, які ми отримали методом NLEHII [13], незалежним від початкової функції мас (IMF) та еволюційних параметрів спалахів зореутворення. Унаслідок отримано Lyc-спектри йонізуючих ядер [5,13], які мають значний надлишок йонізуючих квантів у діяпазоні $\lambda < 228$ Å порівняно з їхнього очікуваною кількістю від зір спектральних класів O–B. Такий надлишок вимагає окремої постановки задачі пошуку їхніх "незоряних" джерел (напр., ударних хвиль або каверн зоряного вітру).

Для розрахунків усіх ФМС і ОФМС як базовий використано код Ґ. Ферланда *Cloudy* [15]. Отримані інтеґральні спектри сітки ФМС застосовано для виведення йонного вмісту тим самим діягностичним методом [14], який використовували далі для виведення йонного вмісту в реальних зонах HII. Одержаний йонний уміст використано для виведення нових ЙКМ для БККГ, вирази для яких опубліковані в нашій праці [7]. Відмінності цього методу виведення виразів для ЙКМ полягають у застосуванні точніших Lyc-спектрів та у способі виведення: у працях інших авторів (див., наприклад [1, 2]) використано з цією метою йонні вмісти, одежані безпосередньо з результатів розрахунку сітки ФМС (напр., [16]). Наш спосіб виведення ЙКМ дає змогу протестувати кожен із виразів на відтворення хемічного вмісту, заданого під час розрахунку сітки ФМС. Таке тестування здійснено в працях [7,8], і внаслідок відібрано для визначення хемічного вмісту в реальних об'єктах ті вирази для ЙКМ, похибка яких не перевищує 10%. Результати визначення хемічного вмісту зон HII наведено у праці [8].

У статті [9] ми перевизначили хемічний уміст He/H з урахуванням нових атомних даних для гелію [10,11] та розглядом ефектів фонової зоряної абсорбції та переносу випромінювання в лініях HeI.

Оскільки сітка ФМС містить ряд спрощень, то щоб перевірити їх правильність, у праці [12] ми розрахували так звані оптимізовані ФМС (ОФМС) десяти вибраних зон HII. ОФМС шукає оптимальну ФМС, інтеґральний емісійний лінійчатий спектр якої найліпше відтворював би спостережуваний. Критерієм відбору при цьому була вимога, щоб всі відселектовані зони HII відтворювали в межах похибок на діяграмі $Y - Z$ значення Y_p та dY/dZ, отримані за допомогою всієї вибірки, використаної у праці [8]. Такий відбір зроблено з двох причин. По-перше, ОФМС розраховують дуже довго навіть на сучасних комп'ютерах (для пошуку однієї оптимальної моделі необхідно розрахувати декілька тисяч фотойонізаційних моделей) і, по-друге, обмежену вибірку зон HII використовують для перевірки стійкости розв'язку (докладніше це питання обговорено в праці [12]). Там же [12] ми також визначили кількість ступеней вільности ОФМС, що дало нам змогу визначити похибки оптимальних значень вільних параметрів.

III. ВИЗНАЧЕННЯ ХЕМІЧНОГО СКЛАДУ ПЛАНЕТАРНИХ ТУМАННОСТЕЙ

Визначення хемічного складу ПТ проведено [17] для двох основних типів неоднорідностей густини газу в оболонках туманностей. Для першого типу неоднорідностей I (макронеоднорідності) густина газу в радіяльному напрямку оболонки ПТ описана емпіричною формулою, знайденою в роботі [18] із карт ізофоту лінії H_β для реальних ПТ. У другому типі неоднорідностей II (мікронеоднорідності) на радіяльну залежність із праці [18] накладали флуктуації густини газу випадково, використовуючи стандартний ґенератор випадкових чисел [19], а прийняті параметри мікронеоднорідностей узгоджували з даними спостережень.

Для виведення нових виразів для ЙКМ ПТ ми розрахували дві сітки ФМС [17] з урахуванням двох згаданих вище типів неоднорідности газу на основі Lyc-спектрів ядер ПТ, які ми отримали з моделей зоряних атмосфер Клеґґа і Міддлемасса [20] шляхом корекції їх за наявність зоряного вітру [21]. Одержані інтеґральні спектри сітки ФМС ми використали для виведення йонного вмісту тим самим діягностичним методом [14], який використовували далі для виведення йонного вмісту в реальних ПТ. Одержаний йонний уміст застосували для виведення нових ЙКМ для ПТ, вирази для яких опубліковані в наших працях [6,17]. Як і з виведенням ЙКМ для БККГ, такий підхід дає змогу протестувати кожен із виразів на відтворення хемічного вмісту, заданого під час розрахунку сітки ФМС. Таке тестування здійснено в працях [6,17]. Унаслідок відселектовано для визначення хемічного вмісту в реальних об'єктах ті вирази для ЙКМ, похибка яких не перевищує 10%. Результати визначення хемічного вмісту ПТ наведені у працях [6,17].

Як і для зон HII в БККГ, для перевірки сітки ФМС ми розрахували ОФМС ПТ [6, 21], використовуючи згадані вище правила селекції для ПТ.

IV. ВИЗНАЧЕННЯ Y_p ТА dY/dZ

Одержаний хемічний склад зон HII та ПТ використано для визначення вмісту первинного гелію Y_p та темпу його збагачення в процесі зоряної хемічної еволюції речовини.

На рис. 1 показано залежність $Y - Z$, отриману на основі хемічного складу зон HII, знайденого за допомогою нових ЙКМ. Як видно, значення вмісту первинного гелію $Y_p = 0.244 \pm 0.004$, а темп його збагачення $dY/dZ = 8.8 \pm 4.6$. Значення Y_p у межах похибки збігається зі значеннями, які отримали Ізотов та ін. [1–4]. Натомість, значення dY/dZ суттєво відрізняється від тих, що передбачають більшість моделей хемічної еволюції речовини. Також похибка знайденого значення dY/dZ є досить великою.

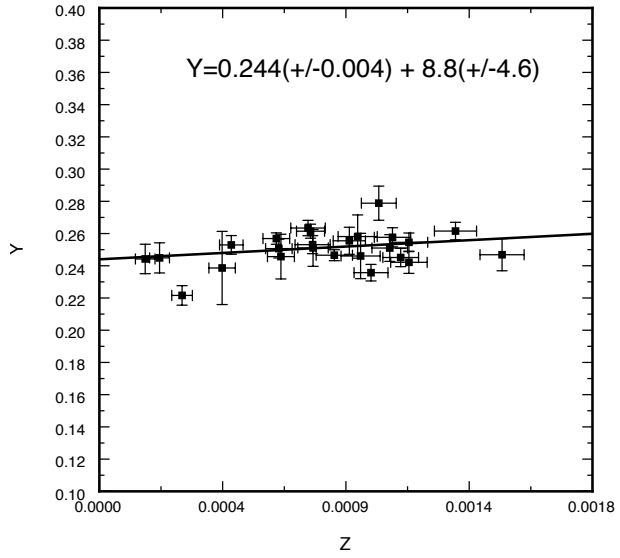

Рис. 1. $Y - Z$-залежність, отримана на основі хемічного складу зон HII в БККГ, визначеного за допомогою нових ЙКМ.

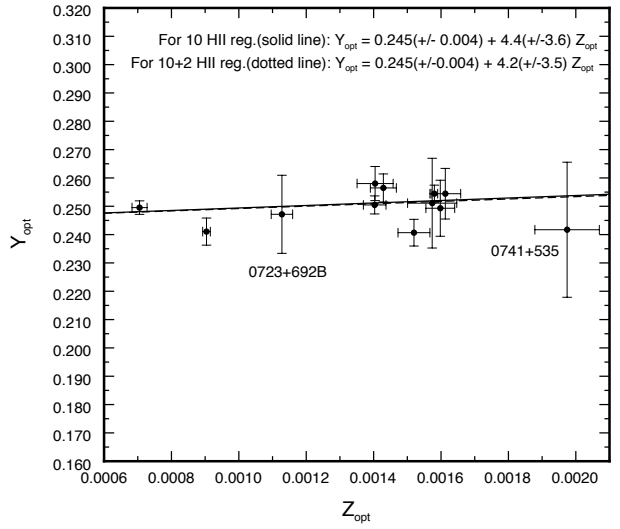

Рис. 2. $Y - Z$-залежність, отримана на основі хемічного складу зон HII в БККГ, визначеного за допомогою ОФМС.

На рис. 2 показано залежність $Y_{\rm opt} - Z_{\rm opt}$ за результатами ОФМС 10 вибраних зон HII, а також із додаванням результатів ОФМС для двох додаткових об'єктів з метою дослідження стійкости отриманого результату. Як видно, в обох випадках $Y_p = 0.245 \pm 0.004$, а значення dY/dZ за результатами ОФМС 10 об'єктів дорівнює 4.4 ± 3.6, а за результатами 12 — $dY/dZ = 4.2 \pm 3.5$. Значення Y_p добре узгоджуються як між собою, так і з відповідними значеннями, одержаними за допомогою ЙКМ [7, 8], а значення dY/dZ відрізняються вдвічі, однак через великі похибки збігаються в межах похибок.

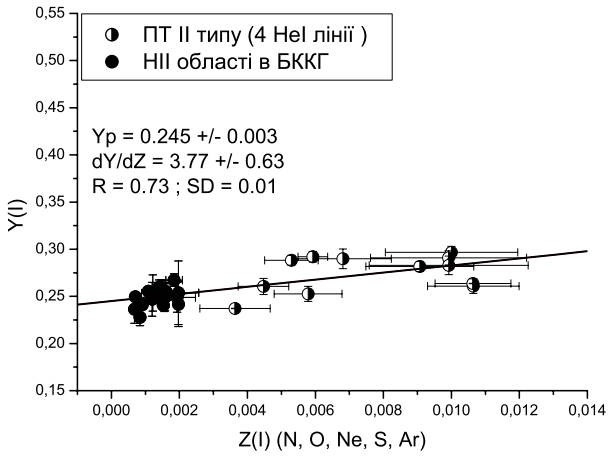

Рис. 3. $Y - Z$-залежність, отримана на основі хемічного складу зон HII в БККГ та планетарних туманностей II типу, визначеного за допомогою нових ЙКМ, одержаних для першого типу врахування неоднорідностей густини в ПТ (див. текст).

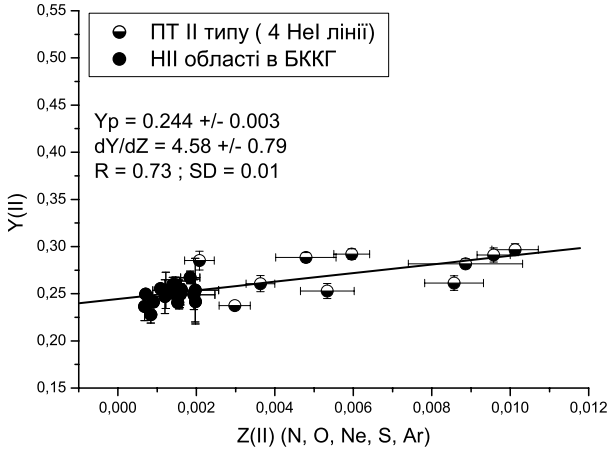

Рис. 4. $Y - Z$-залежність, отримана на основі хемічного складу зон HII в БККГ та планетарних туманностей II типу, визначеного за допомогою нових ЙКМ, одержаних для другого типу врахування неоднорідностей густини в ПТ (див текст).

Ми вирішили використати хемічний уміст ПТ, який отримали описаними вище методами ЙКМ та ОФМС, щоб перевірити, чи таке додавання збільшить точність визначення Y_p та dY/dZ. На рис. 3 та 4 показано залежності $Y - Z$, одержані на основі хемічних умістів зон HII та ПТ II типу, визначених за допомогою ЙКМ для двох типів неоднорідности густини газу ($Y(\rm I) - Z(\rm I)$ та $Y(\rm II) - Z(\rm II)$ відповідно). На рисунках наведено також значення Y_p та dY/dZ, які, як видно, є точнішими, ніж коли ми не використовували хемічного складу ПТ (рис. 1, 2). Таке збільшення точности зумовлене, насамперед, більшим розкидом ПТ за значеннями Z, ніж зон HII у БККГ. Тобто ПТ відіграють на діяграмі $Y - Z$ роль своєрідних "стабілізаторів". Слід також зауважити, що значення Y_p з і без урахування даних ПТ збігаються в межах похибок.

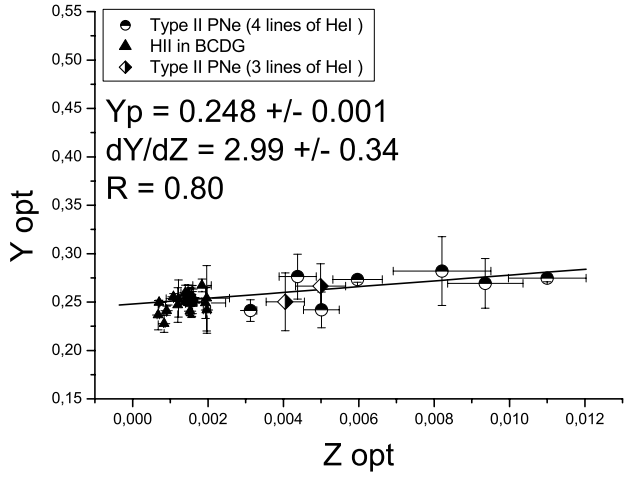

Рис. 5. $Y - Z$-залежність, отримана на основі хемічного складу зон HII в БККГ та планетарних туманностей II типу, визначеного за допомогою ОФМС.

На рис. 5 наведено діяграму $Y_{\rm opt} - Z_{\rm opt}$ за результатами ОФМС зон HII в БККГ та ПТ. І в цьому випадку, як видно з рисунка, додавання хемічного складу для визначення Y_p та dY/dZ значно збільшує точність результату. Бачимо також, що таке додавання хемічного складу ПТ на діяграмі $Y_{\rm opt} - Z_{\rm opt}$ збільшило значення Y_p та зменшило dY/dZ (порівняйте з рис. 2), хоча слід також зазначити, що ці дані перекриваються в межах похибок.

V. ВИСНОВКИ

На основі наведених у попередньому розділі результатів можна зробити такі висновки:

1. Значення Y_p та dY/dZ, отримані двома різними методами (ЙКМ та ОФМС), для зон HII в БККГ збігаються в межах похибок, що збільшує достовірність одержаного результату.

2. Додавання хемічного складу ПТ для визначення Y_p та dY/dZ значно збільшує точність останніх.

3. Отримані значення Y_p близькі до тих, які одержали Ізотов *та ін.* [3].

Подяки. Ця робота виконана в межах держбюджетної фундаментальної науково-дослідної теми ФА–56Ф міністерства освіти і науки України, номер держреєстрації 0106U001295. Автори висловлюють вдячність Ю. І. Ізотову (Головна астрономічна обсерваторія НАН України) за корисні дискусії під час написання цієї роботи.

[1] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, Astrophys. J. **435**, 647 (1994).
[2] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, V. A. Lipovetsky, Astrophys. J. **108**, 1 (1997).
[3] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, Astrophys. J. **500**, 188 (1998).
[4] Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, Astrophys. J. **511**, 639 (1999).
[5] Б. Я. Мелех, дисерт. канд. фіз.-мат. наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів (2002).
[6] Н. В. Гаврилова, дисерт. канд. фіз.-мат. наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів (2005).
[7] V. V. Holovatyy, B. Ya. Melekh, Kinem. Fiz. Nebes. Tel **18**, 362 (2002).
[8] В. В. Головатый, Б. Я. Мелех, Астрон. журн. **79**, 867 (2002).
[9] В. В. Головатый, Б. Я. Мелех, Астрон. журн. **82**, 668 (2005).
[10] R. A. Benjamin, E. D. Skillman, D. P. Smits, Astrophys. J. **514**, 307 (1999).
[11] R. A. Benjamin, E. D. Skillman, D. P. Smits, arXiv preprint: astro-ph/0202227.
[12] В. В. Головатый, Б. Я. Мелех, Астрон. журн. **82**, 755 (2005).
[13] Б. Я. Мелех, Журн. фіз. досл. **4**, 225 (2000).
[14] В. В. Головатый, Р. Е. Гершберг, Ю. Ф. Мальков, В. И. Проник, Изв. Крым. астрофиз. обсерв. **96**, 1 (1999).
[15] G. J. Ferland, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy 94*, (University of Kentucky Internal Report, 2004).
[16] G. Stasinska, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **83**, 501 (1990).
[17] V. V. Holovatyy, N. V. Havrylova, Astron. Rep. **49**, 390 (2005).
[18] В. В. Головатый, Ю. Ф. Мальков, Астрон. журн. **69**, 1166 (1992).
[19] Н. В. Гаврилова, Н. Л. Тишко, Вісн. астроном. школи молодих вч. **1**, № 2, 115 (2000).
[20] R. E. S. Clegg, D. Middlemass, Mon. Not. R. Astron. Soc. **229**, 759 (1987).
[21] Н. В. Гаврилова, О. В. Рокач, Вісн. астроном. школи молодих вч. **2**, № 1, 82 (2001).

DETERMINATION OF THE PRIMORDIAL HELIUM ABUNDANCE Y_p AND ITS ENRICHMENT dY/dZ ON THE BASIS OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE HII REGION IN BLUE COMPACT GALAXIES AND PLANETARY NEBULAE

V. V. Holovatyy, B. Ya. Melekh, N. V. Havrylova
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

The chemical compositions of HII regions in blue compact dwarf galaxies and planetary nebulae obtained using new ionization-correction factors and optimized photoionization models of the nebular gas were used for the determination of the primordial helium abundance Y_p and its enrichment dY/dZ values. It was found that a simultaneous use of the chemical composition of HII regions in the blue compact dwarf galaxies and planetary nebulae increases the accuracy of Y_p and dY/dZ determination.