

ПЕРЕВІРКА НАДІЙНОСТІ КАЛІБРУВАЛЬНИХ ВИРАЗІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ОКСИГЕНУ В ЗОНАХ ІОНІЗОВАНОГО ГІДРОГЕНУ МОДЕЛЬНИМ МЕТОДОМ

Б. Мелех, М. Шевченко, Д. Шелестюк.

*Львівський національний університет імені Івана Франка
кафедра астрофізики
вул. Кирила і Мефодія, 8, 79000, Львів, Україна
e-mail: bohdan.melekh@lnu.edu.ua*

Здійснено перевірку надійності популярних калібрувальних виразів для визначення хімічного вмісту в зонах іонізованого Гідрогену, що оточують області активного зореутворення. З цією метою використано модельні спектри, отримані шляхом моделювання світіння даних об'єктів, що враховує неоднорідну структуру зон іонізованого газу навколо джерел іонізації на основі результатів хемодинамічних симуляцій їх еволюції. Емісії в лініях використано для розрахунку спектру у малій (набагато меншій від кутових розмірів зони іонізованого Гідрогену), центрованій на ядро "спостережуваного" об'єкта, синтетичній апертурі. Модельні емісійні лінійчаті спектри використано для обчислення відносного вмісту Оксигену за допомогою вибірки популярних калібрувальних виразів. Отримані таким чином значення вмісту Оксигену порівнювались з відповідним значенням, отриманим шляхом усереднення за "спостережуваним" в синтетичній апертурі модельним об'ємом.

Ключові слова: Зони іонізованого Гідрогену, карликові галактики, активне зореутворення, калібрувальні методи, хімічний вміст, фотоіонізаційне моделювання, хемодинамічні симуляції

1. Вступ

Для визначення хімічного вмісту зон іонізованого Гідрогену найбільш надійним вважається так званий двозонний T_e -метод [1–3], який використовує діагностичне співвідношення між інтенсивностями авроральної та небулярних ліній, чутливих до значення електронної температури, T_e , та на співвідношенні між температурами в зонах вищої та нижчої іонізації, яке отримується модельним чином. Маючи значення електронної температури, можна розрахувати іонний вміст елемента у двох

стадіях іонізації. Наприклад, для визначення вмісту Оксигену використовується діагностичне співвідношення між інтенсивностями $[O\ III] \lambda 4363 / (\lambda 4959 + \lambda 5007)$ (тут і далі цифри біля λ означають довжини хвиль в \AA), за яким визначається значення T_e в зоні O^{++} , а для зв'язку між температурами в зонах O^{++} та O^+ використовуються, в основному, результати розрахунку фотоіонізаційних моделей світіння зон іонізованого Гідрогену Стасінської [4]. Маючи температури у двох вищезгаданих зонах іонізації, визначають іонний вміст O^+/H^+ та O^{++}/H^+ , а далі, в припущенні, що весь Оксиген знаходиться у цих двох стадіях іонізації, а Гідроген повністю іонізований, отримують повний хімічний вміст Оксигену, O/H , як суму O^+/H^+ та O^{++}/H^+ .

Однак, авроральна лінія має низьку інтенсивність, а тому спостерігається не у всіх зонах іонізованого Гідрогену. Зокрема, зі збільшенням металічності зони іонізованого Гідрогену інтенсивність авроральної лінії швидко спадає і в спектрах багатьох зон іонізованого Гідрогену високої металічності (наприклад, в дисках спіральних галактик) не спостерігається. У такому випадку T_e -метод неможливо застосувати для визначення хімічного вмісту. Це надало поштовх розвитку так званих калібрувальних методів, які базуються на отриманні прямої залежності вмісту Оксигену від інтенсивностей його сильних емісійних ліній (спостерігаються у всіх зонах іонізованого Гідрогену). Такі залежності виводять або на основі даних, отриманих за результатами спостережень тих зон іонізованого Гідрогену, у яких вдалося отримати авроральну лінію $[O\ III] \lambda 4363$, а отже і застосувати T_e -метод, або ж за допомогою фотоіонізаційного моделювання.

Калібрувальні методи широко застосовуються до обробки даних спостережень спектроскопічних оглядів неба, на зразок SDSS (<https://www.sdss.org/>), CALIFA (<https://califa.caha.es/>) та MaNGA (<https://www.sdss4.org/surveys/manga/>), де потрібно обробляти дані від сотень до тисяч зон іонізованого Гідрогену. Калібрувальні методи швидкі, оскільки являють собою апроксимаційні формули, доповнені, інколи, низкою умов, відповідно до значень інтенсивностей емісійних ліній. На основі результатів, отриманих з їх допомогою, робляться висновки щодо зоряної хімічної еволюції речовини у Всесвіті та хемодинаміки. Однак, наскільки коректні ці методи? Адже вони базуються на припущенні однорідності розподілу хімічного вмісту у зоні іонізованого Гідрогену, згаданий вище T_e -метод виходить з припущення про сталість фізичних умов та іонного вмісту у відповідній зоні іонізації, а фотоіонізаційні моделі, які використовувалися для виведення калібрувальних залежностей, часто доволі прості (сферично-симетричні, або ж плоскопаралельні, не враховують хемодинаміки всередині зони іонізованого Гідрогену внаслідок дії супервітру та еволюції їх морфології під впливом цієї зміни).

У даній роботі ми вирішили перевірити коректність застосування вибірки популярних калібрувальних методів для визначення хімічного вмісту на основі результатів розрахунку моделей, що враховують неоднорідну структуру зон іонізованого Гідрогену навколо джерел іонізації (так званого методу мультикомпонентного фотоіонізаційного моделювання світіння – МФМС), які оточують області активного зореутворення (див. опис алгоритму у праці [5]), розрахованих на основі результатів хемодинамічних симуляцій (ХДС) [6] еволюції таких об'єктів, які були поправлені нами з метою відтворення важливих відношень між емісійними лініями в діапазоні їх спостережуваних значень.

У другому розділі описано вибірку калібрувальних методів, які ми вибрали для тестування з огляду на їх важливість для всієї астрофізики. У третьому розділі коротко описано алгоритм МФМС та процедуру корекції результатів ХДС, а також усереднення модельного вмісту за "спостережуваним" у синтетичних апертурах об'ємом зони іонізованого Гідрогену. У четвертому розділі порівнюються результати визначення вмісту Оксигену калібрувальними методами з модельним усередненим та аналізуються отримані результати. Робота завершується підсумком здійсненого модельного тестування калібрувальних співвідношень, аналізом переваг методу моделювання світіння даних об'єктів, який враховує неоднорідну структуру зон іонізованого газу навколо джерел іонізації, що оточують області активного зореутворення. Обговорюються шляхи ще більш точного підходу до модельного тестування калібрувальних методів, засновані на детальному врахуванні у МФМС дифузного іонізуючого випромінювання.

2. Вибірка калібрувальних співвідношень

Пейджел та ін. [7] першими запропонували у якості індикатора відносного вмісту вмісту Оксигену інтенсивність сильних ліній [O III] та [O II]: $R_{23} = (I_{[O II] \lambda 3726 + \lambda 3729} + I_{[O III] \lambda 4959 + \lambda 5007}) / I_{H\beta}$. Одними з широкоживаних перших калібрувань є апроксимаційні вирази між залежністю O/H та $x = \log R_{23}$ для високометалічних зон іонізованого Гідрогену ($12 + \log(O/H) > 8.2$), запропоновані Едмундсом та Пейджелом [8],

$$12 + \log(O/H) = 9.302 - 0.403x - 0.675x^2 - 0.701x^3 + 0.666x^4. \quad (1)$$

Одна з альтернативних версій апроксимації для калібрування Едмундса-Пейджела [8], яка має деяку популярність, окремо для високо- та низькометалічних зон іонізованого Гідрогену виглядає наступним чином:

$$12 + \log(O/H)_u = 9.342 - 0.454x - 0.843x^2 - 0.401x^3 + 0.545x^4 \quad (2)$$

для високометалічних, та

$$12 + \log(O/H)_l = 1.81x + 6.24 \quad (3)$$

для низькометалічних.

Серед інших калібрувальних співвідношень, що ґрунтуються на R_{23} -методі варто згадати наступні: калібрування МакГоха [9], з окремими співвідношеннями для низько- та високометалічних зон іонізованого Гідрогену. МакГох отримав своє калібрування на основі набору фотоіонізаційних моделей з урахуванням зміни іонізаційного параметра як у високо-, так і в низькометалічних зонах. З даних, наданих МакГохом, було отримано наступні вирази:

$$12 + \log(O/H)_l = 12 - 4.944 + 0.767x + 0.602x^2 - y(0.29 + 0.332x - 0.331x^2) \quad (4)$$

для низькометалічних зон іонізованого Гідрогену, та

$$12 + \log(O/H)_u = 12 - 2.939 - 0.2x - 0.237x^2 - 0.305x^3 - 0.0283x^4 - y(0.0047 - 0.221x - 0.102x^2 - 0.0817x^3 - 0.00717x^4) \quad (5)$$

для високометалічних. В обох випадках

$$y = \log(I_{[O III] \lambda 4959,5007} / I_{[O III] \lambda 3727}). \quad (6)$$

Подані вище напівемпіричні аналітичні вирази мають середньоквадратичне відхилення від моделей, використаних МакГохом, не більше 0.05 декс. Проте, варто зазначити, що точність розрахунків моделей з того часу значно покращилась, тому не можна одразу робити жодних висновків.

Серед калібрувань також є запропоноване Скілманом [10] співвідношення, яке застосовне до низькометалічних зон іонізованого Гідрогену. Для отримання своєї формули, Скілман використовував спостережувані дані для об'єктів з вмістом Оксигену не вище 0.1 сонячного. Лінійна апроксимація для низькометалічних зон була вибрана для простоти побудови та розрахунків. Звичайно, не можна стверджувати, що лінійна апроксимація є достатньо точною для забезпечення надійних результатів, особливо враховуючи постійні уточнення параметрів використаних Скілманом об'єктів, а також значне збільшення їх кількості. Незважаючи на це, для свого часу калібрування досить точно описує залежність $12 + \log(O/H) - \log(R_{23})$. Калібрувальне співвідношення, отримане автором, виглядає наступним чином:

$$12 + \log(O/H) = 1.21x + 6.64. \quad (7)$$

Допіта та Еванс [11] розрахували сітку фотоіонізаційних моделей, на основі яких побудували власне калібрувальне співвідношення для високометалічних зон іонізованого Гідрогену. Сітка моделей складається зі сферично-симетричних безпилових небулярних середовищ зі сталою концентрацією атомів Гідрогену (яка є достатньо низькою, щоб виключити можливість ударно збуджених та оптичних заборонених ліній) та сталою часткою Гелію, які знаходяться в рівноважному стані.

$$12 + \log(O/H) = 9.072 - 0.170x - 0.0037x^2 - 0.371x^3 - 0.330x^4. \quad (8)$$

Аналогічну роботу провели МакКол, Рибський та Шиєлдс [12], отримавши наступне калібрування для високометалічних зон іонізованого Гідрогену. Відбір небесних тіл проводився на основі аналізу їх зображень в різних фільтрах. Спектроскопічні спостереження переважно проводилися для тіл, у яких контраст між зображеннями в континуумі та в лінії H_{α} , здавалися найбільшими. Спостереження галактик, для яких не було зображень в H_{α} , проводилися методом проб та помилок, іноді просто вибиралися навмання імовірні кандидати. Для кожної галактики автори старалися зробити спостереження для кількох різних зон іонізованого Гідрогену, на різній відстані від центру галактики. В результаті аналізу даних було отримано наступне калібрувальне співвідношення:

$$12 + \log(O/H) = 9.327 - 0.171x + 0.113x^2 - 0.561x^3 - 0.593x^4. \quad (9)$$

Варто зазначити, що інші автори ставили під сумнів надійність отриманого співвідношення. Наприклад, у вищезгаданій роботі Скілмана автор зазначає, що хоча і було отримано неперервну криву, яка описує залежність $12 + \log(O/H) - \log(R_{23})$, проте ця крива не відповідає спостережуваним даним.

Ще одне подібне калібрування було запропоноване Тремонті та ін. [13]. Використовуючи дані, отримані SDSS (Sloan Digital Sky Survey), автори відібрали 53400

галактик з активним зореутворенням із червоним зміщенням від 0.005 до 0.3. На жаль, у вибірці було лише 940 галактик з $12 + \log(O/H) < 8.5$, і серед них лише третина мали достатньо сильну лінію $[O\ II]\lambda 3727$, тому з впевненістю можна говорити лише про результати, які стосуються високометалічних зон іонізованого Гідрогену. Отриманий групою результат можна апроксимувати наступним поліномом:

$$12 + \log(O/H) = 9.185 - 0.313x - 0.264x^2 - 0.321x^3. \quad (10)$$

Для низькометалічних зон також було запропоновано калібрування U_{ina} та ін. [14], яке ґрунтується на вимірюваннях спектрів 120 об'єктів з металічністю, визначеною T_e -методом, в межах $7 < 12 + \log(O/H) < 7.9$, адже в цьому діапазоні параметр R_{23} мало залежить від іонізаційного параметру і сильно – від вмісту Оксигену. В результаті лінійної апроксимації результатів було отримано наступний вираз:

$$12 + \log(O/H) = 1.401x + 6.486. \quad (11)$$

Проте, калібрування не обмежуються лише R_{23} -методом. Серед методів, що використовуються для побудови калібрувальних співвідношень також є і P -метод, одним з найвідоміших калібрувань якого є співвідношення, запропоноване Пілюгіним у роботі [15]. Цей метод базується на використанні параметра збудження P , де $P = I_{[O\ III]\lambda 4959 + \lambda 5007} / (I_{[O\ II]\lambda 3726 + \lambda 3729} + I_{[O\ III]\lambda 4959 + \lambda 5007})$. Цей параметр є гарним показником характеристик іонізуючого випромінювання, тому його можна використовувати для розрахунку відношення Оксигену до Гідрогену. Співвідношення для параметра збудження, запропоноване Пілюгіним, виглядає наступним чином:

$$12 + \log(O/H) = (R_{23} + 54.2 + 59.45P + 7.31P^2) / (6.07 + 6.71P + 0.371P^2 + 0.243R_{23}). \quad (12)$$

Для об'єктів з високим червоним зміщенням методи по типу R_{23} не є ефективними, адже деякі важливі лінії виявляються занадто слабкими, щоб їх вимірювання були достовірними, або зовсім не реєструються. Задля вирішення цієї проблеми різними авторами пропонувалися альтернативні індикатори визначення вмісту Оксигену. Серед таких індикаторів добре себе проявили індикатор $N2 = \log([N\ II]\lambda 6584 / H_{\alpha})$ [16] та індикатор $O3N2 = \log([O\ III]\lambda 5007 / H_{\beta}) / ([N\ II]\lambda 6583 / H_{\alpha})$ [17]. На основі $N2$ -індикатора було побудовано лінійно апроксимоване співвідношення

$$12 + \log(O/H) = 8.90 + 0.57N2, \quad (13)$$

та поліноміальний вираз

$$12 + \log(O/H) = 9.37 + 2.03N2 + 1.26N2^2 + 0.32N2^3. \quad (14)$$

Для обидвох виразів робочий діапазон визначений умовою $-2.5 < N2 < -0.3$.

Для $O3N2$ -індикатора побудовано наступне лінійне співвідношення, яке працює за умови $O3N2 < 2$, а за вищих значень перестає бути корисним:

$$12 + \log(O/H) = 8.73 - 0.32O3N2. \quad (15)$$

Обидва методи мають певні переваги порівняно з R_{23} -методом: монотонну залежність від відносного вмісту Оксигену; через використання близьких емісійних ліній

кожного йона відсутня потреба в корекції через червоне зміщення; завдяки високій чутливості до вмісту Оксигену ці калібрування добре показують себе у випадку не дуже високої інтенсивності випромінювання ліній, які використовуються у даних виразах.

Також явні недоліки класичного T_e - та R_{23} -методів спонукали пошук калібрувальних співвідношень, що ґрунтуються на $R_2 = I_{[O II]\lambda 3727+\lambda 3729}/I_{H\beta}$ та $S_2 = I_{[S II]\lambda 6717+\lambda 6731}/I_{H\beta}$, з використанням параметру $N_2 = I_{[N II]\lambda 6548+\lambda 6584}/I_{H\beta}$. Однією з робіт, в якій розглядається доцільність та ефективність таких калібрувань, є праця Пілюгіна та Гребеля [18], у якій розглядається побудова калібрувань, залежних від даних величин. У результаті обробки спектрів для R_2 було отримано пару тривимірних калібрувань, розділених на високо- та низькометалічний варіанти

$$12 + \log(O/H) = 8.589 + 0.022 \log(R_3/R_2) + 0.399 \log(N_2) + (-0.137 + 0.164 \log(R_3/R_2) + 0.589 \log(N_2)) \log(R_2), \quad (16)$$

що працює за $\log N_2 \geq -0.6$ (високометалічні зони іонізованого Гідрогену), та

$$12 + \log(O/H) = 7.932 + 0.944 \log(R_3/R_2) + 0.695 \log(N_2) + (0.970 - 0.291 \log(R_3/R_2) - 0.019 \log(N_2)) \log(R_2). \quad (17)$$

Для S_2 було отримано наступні вирази:

$$12 + \log(O/H) = 8.424 + 0.030 \log(R_3/S_2) + 0.751 \log(N_2) + (-0.349 + 0.182 \log(R_3/S_2) + 0.508 \log(N_2)) \log(S_2), \quad (18)$$

та

$$12 + \log(O/H) = 8.072 + 0.789 \log(R_3/S_2) + 0.726 \log(N_2) + (1.069 - 0.170 \log(R_3/S_2) + 0.022 \log(N_2)) \log(S_2). \quad (19)$$

для, відповідно, високо- та низькометалічних зон та за аналогічної до $R3D$ -калібрувань умови поділу. Враховуючи фактичну незалежність вмісту Оксигену від параметру збудження P , можна побудувати спрощені двовимірні калібрування для обох методів. Вони будуть виглядати наступним чином:

$$12 + \log(O/H) = 8.589 + 0.329 \log(N_2) + (-0.205 + 0.549 \log(N_2)) \log(R_2), \quad (20)$$

та

$$12 + \log(O/H) = 8.445 + 0.699 \log(N_2) + (-0.253 + 0.217 \log(N_2)) \log(S_2). \quad (21)$$

3. Моделювання, що враховує неоднорідну структуру зон іонізованого газу навколо джерел іонізації карликової галактики з активним зореутворенням

У підході МФМС небулярного середовища, що оточує ОАЗ, представленого у праці [5], весь модельний об'єм, у якому попередньо здійснено ХДС еволюції [6] карликової галактики, розділено на вкладені одне в одного конусні кутові сектори зі

спільним центром, у якому знаходиться ОАЗ. Центральний переріз таких секторів, який перпендикулярний до екваторіальної площини та містить їх центр виглядатиме так, як зображено на Рис. 1, взятому з праці [5]. Таким чином дані можна задавати у циліндричній 2D – геометрії, у якій і виконано ХДС. Тому для розрахунку МФМС необхідно задавати, у якості вхідних параметрів, дані, отримані в результаті ХДС, лише в одному прямокутнику – у площині R-z. Як і в праці [5], ми розділили цей прямокутник на 20 кутових секторів. При цьому сектор 1 буде сусіднім з галактичною площиною, а сектор 20 прилягає до осі z (вісь симетрії). Кожен сектор, у свою чергу, рівномірно розділений на 200 радіальних компонентів, протяжність яких не перевищувала 11.5 пк. У таких комірках, шляхом інтерполяції результатів ХДС, задавалися вхідні дані для МФМС.

Як і в праці [5], за основу фотоіонізаційного моделювання був обраний модифікований код Cloudy 08.00 [19]. Для розрахунку МФМС використовувався спеціалізований драйвер з праці [5], з невеликими модифікаціями для врахування тонкого шару високої густини (див. нижче), а для розрахунку спектрів ліній випромінювання у синтетичних апертурах із визначеними користувачем розмірами та положеннями – програма *DiffRay* [5].

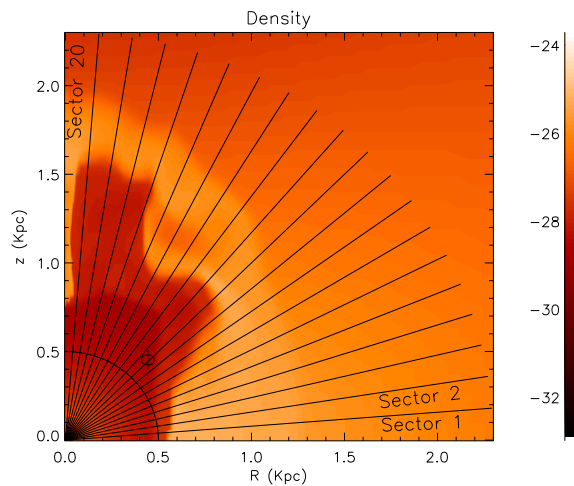


Рис. 1: Центральний зріз, перпендикулярний до екваторіальної області, модельного об'єму обчислювальної рамки на конусні сектори, у яких здійснювалося МФМС небулярного середовища. Рисунок взято з праці [5].

Вхідні параметри із ХДС у драйвер МФМС після переведення координат є наступними:

- електронна температура всередині секторів в області супервітру;
- концентрація Гідрогену;
- хімічний вміст досліджуваних елементів (H, He, C, N, O, Mg, S, Si, Fe) відносно Гідрогену.

У МФМС джерелами іонізуючих фотонів були зорі в області активного зореутворення (ОАЗ), а також небулярний газ (дифузне іонізуюче випромінювання), в якому іонізуючі кванти утворюються внаслідок радіаційної рекомбінації електронів на основний рівень іонів H^+ , He^+ , He^{++} та $Ly\alpha$ -випромінювання $He\ I$, $He\ II$.

Дифузне випромінювання обиралось у наближенні 'outward-only' (іонізуюче випромінювання поширюється у радіальному напрямку лише назовні), згідно з яким рекомбінаційний потік від кожного компонента (з урахуванням усіх важливих джерел непрозорості) додається до падаючого континуального потоку з центральної ОАЗ. Із міркувань вищесказаного кожний кутовий сектор моделі МФМС є ізольованим від інших. Для усунення цього наближення необхідно детально розрахувати потоки дифузного іонізуючого випромінювання з використанням на основі інтегрування їх складових, що приходять з різних напрямів, а не лише радіального у секторі. Це ми плануємо зробити у наших наступних працях. У будь-якому випадку розрахунки у наближенні 'outward-only' необхідні для ініціалізації детальних розрахунків дифузного іонізуючого випромінювання.

Табл. 1: Порівняння модельних спектрів, розрахованих для малої центральної синтетичної апертури, з відповідними даними спостережень для віків (задані у млн. років – Мрк), при яких вдалося відтворити спектр у межах спостережуваних значень.

Відносні інтенсивності	Спостережувані межі	70	100	110	140	150	160	170	180	190
		Мрк	Мрк	Мрк	Мрк	Мрк	Мрк	Мрк	Мрк	Мрк
[OII] λ 5007/ $H\beta$	0.22 .. 7.84	0.33	2.15	2.74	2.27	1.98	3.11	1.84	2.81	1.57
[OII] λ 4363/ $H\beta$	0.02 .. 0.30	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
[OII] λ 3727/ $H\beta$	0.40 .. 7.19	0.96	3.48	3.41	3.45	2.00	1.44	0.74	1.10	2.04
[OII] λ 5007/[OII] λ 3727	0.12 .. 14.5	0.35	0.62	0.80	0.66	0.99	2.16	2.47	2.55	0.77
[SII] λ 6716/ $H\beta$	0.05 .. 5.04	0.70	0.39	0.39	0.40	0.22	0.21	0.07	0.11	0.20
[SII] λ 6731/ $H\beta$	0.03 .. 4.25	0.49	0.28	0.27	0.28	0.15	0.14	0.05	0.08	0.14
$H\alpha$ / $H\beta$	1.87 .. 18.6	3.13	2.91	2.89	2.92	2.90	2.92	2.90	2.88	2.90
[NII] λ 6584/ $H\alpha$	0.01 .. 0.69	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02
[SII] λ 6716/ $H\alpha$	0.02 .. 0.47	0.23	0.13	0.13	0.14	0.07	0.07	0.02	0.04	0.07
[SII] λ 6731/ $H\alpha$	0.01 .. 0.34	0.16	0.10	0.09	0.10	0.05	0.05	0.02	0.03	0.05
[SII] $(\lambda$ 6716 + λ 6731)/ $H\alpha$	0.03 .. 0.81	0.38	0.23	0.23	0.23	0.13	0.12	0.04	0.06	0.12

Як зазначено у [5], підхід ХДС має роздільну здатність (4 пк), якої недостатньо для коректного МФМС. Некоректність проявляється в тому, що ХДС "пропускають" ударну хвилю супервітру, яка формує тонкий шар високої густини (ТШВГ), що може суттєво впливати на іонізаційну структуру [5]. Нехтування ТШВГ може привести до іонізаційної структури у периферійній частині галактики, відмінної від реальної, що можна перевірити через порівняння модельних спектрів із спостережуваними. Адже більшість важливих емісійних ліній формуються саме в цих периферійних частинах галактики. Більш детальний опис та аналіз проблеми можна знайти у [5].

Для вирішення вищезгаданої проблеми у праці [5] вперше було введено ТШВГ на межі області супервітру та периферійної зони НІ в екваторіальній секторі галактики для віку 140 Мрк. У такий спосіб було отримано коректний синтетичний спектр, який узгодився із даними спостережень, сформованими на основі вибірки Керіга [20].

Основними параметрами, які описують ТШВГ є: 1) максимальна густина небулярного газу та 2) товщина шару при максимальній густині.

У даній роботі здійснено підбір параметрів ТШВГ для усіх віків (у діапазоні від 10 до 200 Мрк). Аналогічно до того, як це було зроблено у праці [5], було знайдено на-

бір оптимальних параметрів ТШВГ у першому секторі. Критерієм відтворюваності спостережуваних спектрів була вимога потрапляння значень відносних інтенсивностей ліній, наведених у таблиці 1 в область спостережуваних значень.

Знайдені таким чином співвідношення концентрацій у ТШВГ та визначених за допомогою ХДС, $n(TDS)/n(ChDS)$, у перших секторах для кожного віку карликової галактики використовувалися для збільшення концентрації в інших секторах, де ми використали дане співвідношення, як множник для концентрацій на внутрішній межі “стіни” (згребеного супервітром газу), отриманих у процесі ХДС. В останніх секторах (19, 20) ТШВГ не додавався через особливості задання граничних умов у коді для ХДС (див. [5]). Оптимальні значення максимальної густини, $n(TDS)$, у ТШВГ першого (екваторіального) сектора для різних віків, а також відношення $n(TDS)/n(ChDS)$ представлені у Таблиці 2.

Наступним кроком при підборі оптимальних параметрів ТШВГ було корегування товщини самого шару при максимумі густини, при цьому товщина шару задавалася у межах від 0 до 1 пк. Оптимальною виявилася товщина рівна 1пк. Підхід виявився ефективним для наступних віків галактики: 70, 100, 110, 140, 150, 160, 170, 180 та 190 млн. років (Мрк). Саме на основі цих результатів ми здійснюємо тестування калібрувальних співвідношень для вмісту Оксигену, представлене у даній роботі.

Табл. 2: Оптимальні значення максимальної густини, $n(TDS)$, у ТШВГ першого (екваторіального) сектора для різних віків, а також відношення $n(TDS)/n(ChDS)$, які приймалися однаковими для всіх секторів. Товщина ТШВГ на рівні максимальної густини, $n(TDS)$, у всіх моделях прийнята рівна 1 пк.

Вік, Мрк	$n(TDS)$, cm^{-3}	$n(TDS)/n(ChDS)$
70.0	18.00	80.31
100.0	9.45	97.15
110.0	9.20	155.56
140.0	7.00	36.29
150.0	7.00	60.37
160.0	6.20	297.23
170.0	6.50	79.71
180.0	6.00	555.97
190.0	7.00	39.21

4. Перевірка калібрувань на відтворюваність модельного хімічного вмісту

Для перевірки вибраних калібрувальних співвідношень використовувались вхідні дані інтенсивностей спектральних ліній та вміст Оксигену у змодельованій у [5]

карликової галактики на різних етапах її еволюції. Використовуючи отриману інформацію, було проведено порівняння модельних результатів з розрахунками різних калібрувань. Порівняння проводилося за даними центральної малої квадратної апертури. Для відбору достатньо ефективних калібрувань було вибрано умову відхилення в 0.5 декс для будь-якого з віків карликової галактики. Варто одразу зазначити, що для роботи використовувалися калібрування як для високометалічних, так і для низькометалічних зон, хоча для переважної більшості віків карликової галактики в обох апертурах величина $12 + \log(O/H)$ була меншою 8. Для розрахунків використовувався власний код, який за спектральними даними одночасно рахував результати для всіх калібрувальних співвідношень, описаних в розділі 1.

Табл. 3: Порівняння вмісту Оксигену, отриманого за допомогою МФМС (усереднений за модельним об'ємом, спостережуваним в апертурі та зважений за масою), з даними розрахунків різних калібрувань (у дужках наведено номери виразів для відповідних калібрувань, наведені у розділі 2). Усі значення вмісту Оксигену подані у формі $12 + \log(O/H)$.

Вік, Mrk	МФМС	EP1 (1)	MGL (4)	MGU (5)	EP2U (2)	EP2L (3)	Sk (7)	DE (8)	MRS (9)	Tr (10)
70	8.37	9.23	7.29	9.03	9.26	6.51	6.82	9.05	9.30	9.13
100	7.66	8.46	8.08	8.57	8.45	7.69	7.61	8.61	8.73	8.60
110	7.71	8.39	8.13	8.52	8.39	7.78	7.67	8.53	8.61	8.53
140	7.84	8.45	8.09	8.56	8.44	7.71	7.62	8.59	8.71	8.59
150	7.70	8.66	7.79	8.74	8.65	7.45	7.45	8.78	8.98	8.76
160	7.69	8.54	7.80	8.69	8.54	7.59	7.54	8.69	8.85	8.67
170	7.52	8.88	7.40	8.88	8.88	7.15	7.25	8.92	9.16	8.92
180	7.37	8.63	7.67	8.75	8.63	7.48	7.47	8.76	8.95	8.74
190	7.52	8.73	7.75	8.77	8.73	7.36	7.39	8.83	9.05	8.82
Вік, Mrk	МФМС	Yin (11)	PP (12)	N2L (13)	O3N2 (15)	N2P (14)	R2D (20)	S2D (21)	R3D (16)	S3D (18)
70	8.37	6.69	8.77	8.04	8.41	8.07	8.30	7.78	8.64	8.44
100	7.66	7.61	8.29	8.04	8.14	8.08	7.90	7.88	8.26	8.66
110	7.71	7.68	8.27	8.08	8.13	8.11	7.96	7.93	8.31	8.67
140	7.84	7.62	8.29	8.14	8.19	8.15	8.02	8.00	8.35	8.69
150	7.70	7.42	8.54	7.93	8.09	7.99	7.98	7.88	8.39	8.84
160	7.69	7.53	8.56	8.04	8.09	8.08	8.18	8.01	8.55	8.83
170	7.52	7.19	8.79	7.73	7.99	7.75	8.24	7.97	8.73	9.29
180	7.37	7.45	8.64	7.81	7.97	7.85	8.11	7.91	8.58	9.08
190	7.52	7.35	8.55	7.91	8.11	7.96	7.95	7.87	8.36	8.87

У якості індикатора відхилення результатів визначення вмісту Оксигену за допомогою вибраних калібрувальних виразів, $\log(O/H)_{calc}$, від заданого в моделях, $\log(O/H)_{mod}$, ми обрали різницю $\log(O/H)_{mod} - \log(O/H)_{calc}$, що відповідає відношенню відповідних вмістів, вираженому у дексах. Зважаючи на сучасні вимоги щодо точності визначення хімічного вмісту на основі результатів цифрових оглядів, ми прийняли допустимими значення вищезгаданої різниці до 0.5 включно.

Найперше слід зауважити, що калібрування EP1, MGU, EP2U, DE, MRS, Tr для

всіх віків не задовільнили вищезгаданої вимоги надійності.

На Рис. 2 видно, що калібрування MGL (4), EP2L (3), Sk (7), Yin (11) досить точно відтворюють вміст Оксигену у вищезгаданих межах для більшості віків. Лише для віку 70 Mrk всі ці калібрування дали сильно занижений вміст, а також при 170 Mrk калібрування EP2L дало невеличке перевищення відхилення значення 0.5. Таким чином, ці калібрування показують добрий результат тестування для випадку неперервного зореутворення для розвинутих структур, утворених супервітром (коли небулярний газ, виметений супервітром на значну відстань, оскільки вік великий).

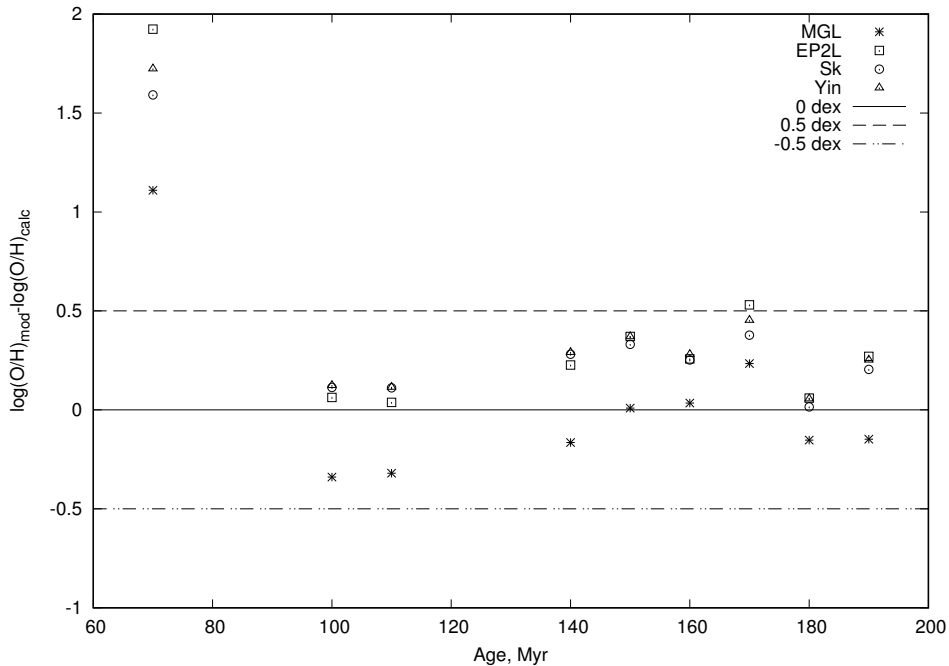


Рис. 2: Порівняння вмісту Оксигену, отриманого за допомогою МФМС (усереднений за модельним об'ємом, спостережуваним в апертурі та зважений за масою), з даними розрахунків за допомогою калібрувань MGL (4), EP2L (3), Sk (7) та Yin (11).

Рис. 3 демонструє явно незадовільний результат тестування для калібрування PP (12), адже лише для 70 Mrk він показав задовільний результат відтворення модельного вмісту. Невеличке перевищення відхилення у 0.5 для віків 180 та 190 Mrk демонструє калібрування O3N2 (15). Решта результатів його тестування на надійність показують задовільний результат. Слід відзначити, що калібрування N2L (13) та N2P (14) показали відмінний результат тестування для всіх моделей.

І нарешті на Рис. 4 видно результати перевірки найновіших калібрувань. Найкращий результат показали калібрування R2D (20) та S2D (21): у них видно тільки два невеликі виходи (з дев'яти) за дозволені межі відхилень. R3D- та S3D-калібрування у 8-ми з 9-ти випадків показали негативний результат.

Підведемо підсумки. Найкращий (відмінний) результат на перевірку надійності показали калібрування, що використовують N2-індикатор – N2P (14) та N2L (13),

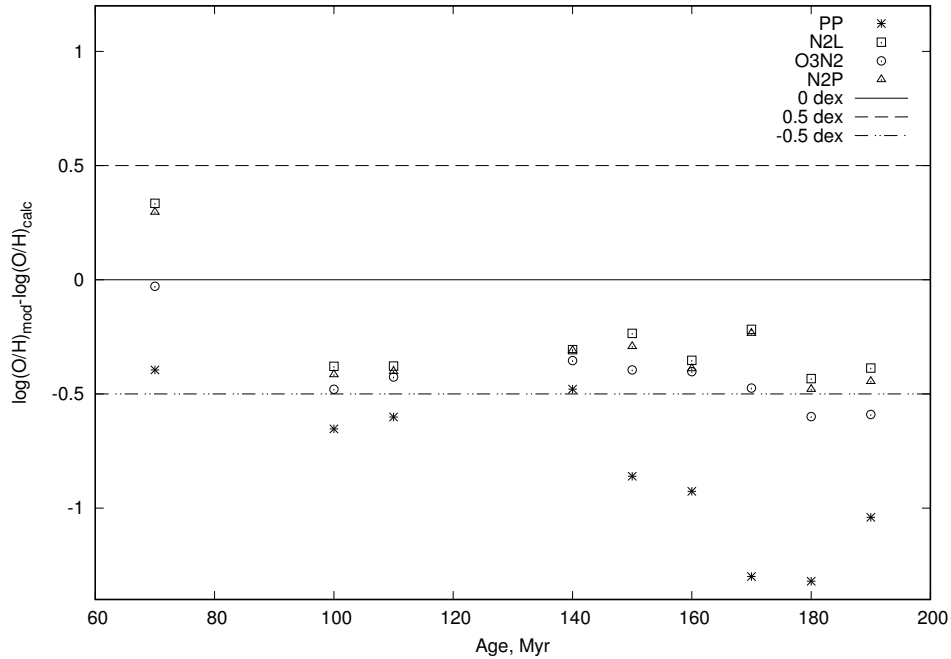


Рис. 3: Порівняння вмісту Оксигену, отриманого за допомогою МФМС (усереднений за модельним об'ємом, спостережуваним в апертурі та зважений за масою), з даними розрахунків за допомогою калібрувань PP (12), N2L (13), O3N2 (15) та N2P (14).

адже вони відтворили модельний вміст Оксигену у зазначених межах. Це – найбільш надійні калібрування з точки зору розглянутого тесту. Добрий результат показали MGL (4), Sk (7) та Yin (11) калібрування, які мають лише по одному (з дев'яти) незадовільному результату тестування. Задовільний результат тестування у калібрувань EP2L (3), O3N2 (15), R2D (20) та S2D (21), кожен з яких має по два відхиленнями за дозволені межі. Решта калібрувань показали незадовільний результат тестування, а тому не можуть бути нами рекомендовані до застосування визначення хімічного вмісту небулярних середовищ, що оточують ОАЗ.

5. Висновки

Сучасні цифрові спектральні огляди неба забезпечили нас високоякісними спектрами тисяч зон H II в інших галактиках. Для швидкого визначення хімічного вмісту Оксигену в них найчастіше застосовують так звані калібрувальні вирази, які є апроксимаціями залежності вмісту даного елемента від інтенсивностей сильних емісійних ліній, які присутні у більшості зон іонізованого Гідрогену. Такі залежності отримують за допомогою фотоіонізаційного моделювання світіння зон іонізованого Гідрогену, а також за допомогою діагностичного T_e -методу (у тих випадках, коли вдалося виміряти інтенсивність авроральної емісійної лінії [O III] $\lambda 4363$). Від-

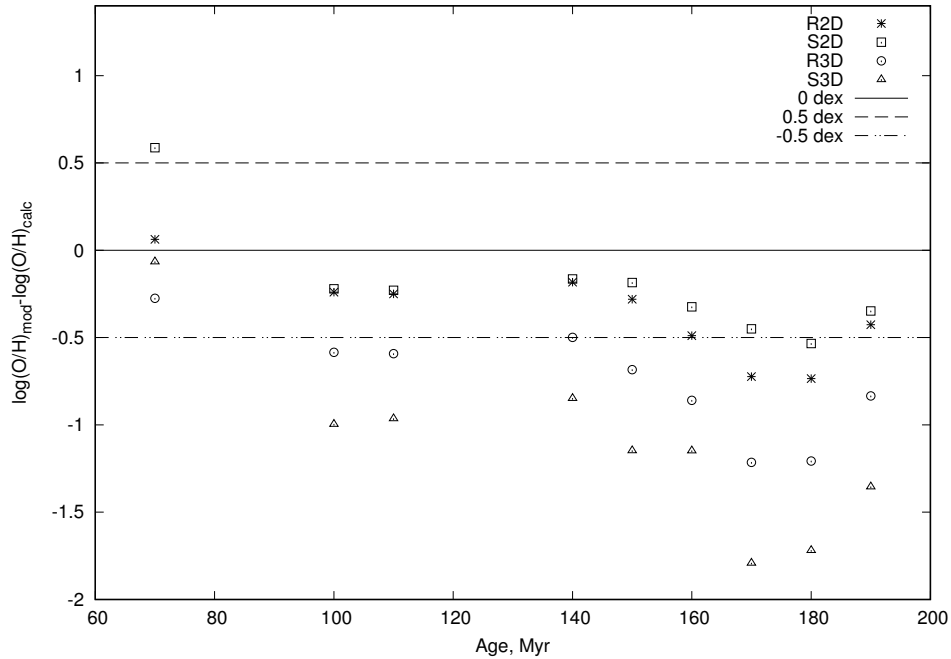


Рис. 4: Порівняння вмісту Оксигену, отриманого за допомогою МФМС (усереднений за модельним об'ємом, спостережуваним в апертурі та зважений за масою), з даними розрахунків за допомогою калібрувань R2D (20), S2D (21), R3D (16) та S3D (18).

хилення шаблонів фотоіонізаційних моделей від реальних умов в зонах іонізованого Гідрогену, а також значні похибки у визначенні вищезгаданої слабкої лінії можуть вилитись у помилковість деяких калібрувальних співвідношень.

У даній роботі ми перевіряємо вибірку популярних калібрувальних співвідношень для визначення вмісту Оксигену на відтворення усередненого хімічного вмісту цього елемента за модельним об'ємом, із зважуванням за масою, заданим за результатами хемодинамічних симуляцій еволюції карликових галактик з активним зореутворенням, під час моделювання, що враховує неоднорідну структуру зон іонізованого газу навколо джерел іонізації, який оточує область активного зореутворення. Таким чином, за основу для тестування ми взяли моделі, які найбільш прецизійно, на сьогоднішній день, відтворюють складну морфологію вищезгаданих об'єктів. Особливою вимогою для наших досліджень було те, що всі ці моделі повинні забезпечувати відтворення спектрів позагалактичних зон іонізованого Гідрогену у межах спостережуваних значень. До результатів хемодинамічних симуляцій нами був доданий, на межі між областю супервітру та зовнішньою частиною небулярного середовища, тонкий шар високої густини, параметри якого були ретельно підібрані, керуючись вищезгаданою вимогою щодо відтворення спостережуваного спектру в межах спостережуваних значень.

У результаті вищезгаданого тестування 18-ти вибраних калібрувальних співвідношень для визначення вмісту Оксигену в небулярних середовищах, що оточують

область спостережуваних значень, два показали відмінний результат, три – добрий, а чотири – задовільний. Решта співвідношень показали незадовільний результат тестування. В сумі, половину з вибраних калібрувальних методів можна використовувати для визначення вмісту Оксигену з необхідною для сучасних досліджень точністю, з урахуванням усіх вище згаданих зауважень.

На сьогоднішній день ми здійснемо громіздкі розрахунки МФМС, які детально враховують дифузне іонізуюче випромінювання в зоні іонізованого Гідрогену зі складною морфологією. На основі результатів цих моделей ми плануємо провести остаточний тест вищезгаданих калібрувальних виразів для визначення вмісту Оксигену за інтенсивностями сильних емісійних ліній. Отримані у даній роботі результати будуть основою для аналізу впливу застосування наближеного вищезгаданого методу ‘outward-only’ на результати тестування калібрувальних методів.

1. Pagel B. E. J. The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions / B. E. J. Pagel, E. A. Simonson, R. J. Terlevich, M. G. Edmunds // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1992. – Vol. 255. – P. 325. doi: 10.1093/mnras/255.2.325.
2. Izotov Y. I. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov, G. Stasinska, G. Meynet, N. G. Guseva, T. X. Thuan // *Astron. & Astroph.* – 2006. – Vol. 448. – P. 955. doi: 10.1051/0004-6361:20053763.
3. Pilyugin L. S. On the relation between electron temperatures in the O⁺ and O⁺⁺ zones in high-metallicity HII regions / L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, T.X. Thuan // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2006. – Vol. 370. – P. 1928–1934. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10618.x.
4. Stasinska G. A catalogue of model HII regions / G. Stasinska // *Astron. & Astroph. Supp. Series* – 1982. – Vol. 48. – P. 299–304. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982A%26AS...48..299S>.
5. Melekh B. Ya. Photoionization analysis of chemodynamical dwarf galaxies simulations / B. Ya. Melekh, S. Recchi, G. Hensler, O. Buhajenko // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* – 2015. – Vol. 450. – P. 111–127. doi: 10.1093/mnras/stv569.
6. Recchi S. The fate of heavy elements in dwarf galaxies – the role of mass and geometry / S. Recchi & G. Hensler // *Astron. & Astroph.* – 2013. – Vol. 551. – P. A41. doi: 10.1051/0004-6361/201220845.
7. Pagel B. E. J. n the composition of H II regions in southern galaxies – I. NGC 300 and 1365 / B. E. J. Pagel, M. G. Edmunds, D. E. Blackwell et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1979. – Vol. 189, N 1. – P. 95–113. doi: 10.1093/mnras/189.1.95.
8. Edmunds M.G. On the composition of H II regions in southern galaxies – III. NGC 2997 and 7793 / M. G. Edmunds, B. E. J. Pagel // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1984. – Vol. 211, N 3. – P. 507–519. doi: 10.1093/mnras/211.3.507.
9. McGaugh S. S. H II Region Abundances: Model Oxygen Line Ratios / S. S. McGaugh // *Astrophys. J.* – 1991. – Vol. 380, N 1. – P. 140. doi: 10.1086/170569.

10. Skillman E. D. Empirical Oxygen Abundances and Physical Conditions for Relatively Low Abundance H II Regions / E. D. Skillman // *Astrophys. J.* – 1989. – Vol. 347, N 1. – P. 883. doi: 10.1086/168179.
11. Dopita M. A. Theoretical Models for H II Regions. II. The Extragalactic H II Region Abundance Sequence / M. A. Dopita, I. N. Evans // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* – 1986. – Vol. 307. – P. 431. doi: 10.1086/164432.
12. McCall M. A. The chemistry of galaxies. I. The nature of giant extragalactic H II regions / M. A. McCall, P. M. Rybski, G. A. Shields // *Astrophys. J. S. S.* – 1985. – Vol. 57, N 1. – P. 1–62. doi: 10.1086/190994.
13. Tremonti C. The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey / C. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann et al. // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 613, N 2. – P. 898. doi: 10.1086/423264.
14. Yin S. Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements / S. Yin, Y. F. Liang, F. Hammer et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2007. – Vol. 462, N 2. – P. 535–546. doi: 10.1051/0004-6361:20065798.
15. Pilyugin L. S. On the oxygen abundance determination in HII regions / L. S. Pilyugin // *Astron. and Astrophys.* – 2001. – Vol. 369. – P. 594–604. doi: 10.1051/0004-6361:20010079.
16. Denicolo G. New light on the search for low-metallicity galaxies — I. The N2 calibrator / G. Denicolo, R. Terlevich, E. Terlevich // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* – 2002. – Vol. 330, N 1. – P. 69–74. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05041.x.
17. Pettini M. $[O^{iii}]/[N^{ii}]$ as an abundance indicator at high redshift / M. Pettini, B. E. J. Pagel // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 348, N 3. – P. L59–L63. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07591.x.
18. Pilyugin L. S. New calibrations for abundance determinations in H?ii regions / L. S. Pilyugin, E. K. Grebel // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* – 2016. – Vol. 457, N 4. – P. 3678–3692. doi: 10.1093/mnras/stw238.
19. Ferland G. J. 2008, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy*. University of Kentucky, Lexington, Available at: <http://www.nublado.org>, <http://viewvc.nublado.org/index.cgi/tags/release/c08.00/docs/?root=cloudy>
20. Kehrig C. Spectrophotometry of Star-forming Regions in H II Galaxies / C. Kehrig, E. Telles, F. Cuisinier // *Astronom. J.* – 2004. – Vol. 128. – P. 1141. doi: 10.1086/422922.

References

1. B. E. J. Pagel, E. A. Simonson, R. J. Terlevich, M. G. Edmunds, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **255**, 325 (1992). doi: 10.1093/mnras/255.2.325.
2. Y. I. Izotov, G. Stasinska, G. Meynet, N. G. Guseva, T. X. Thuan, *Astron. & Astroph.* **448**, 955 (2006). doi: 10.1051/0004-6361:20053763.
3. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, T.X. Thuan, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370**, 1928 (2006). doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10618.x.
4. G. Stasinska, *Astron. & Astroph. Supp. Series* **48**, 299 (1982). <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982A%26AS...48..299S>.

5. B. Ya. Melekh, S. Recchi, G. Hensler, O. Buhajenko, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **450**, 111 (2015). doi: 10.1093/mnras/stv569.
6. S. Recchi & G. Hensler, *Astron. & Astroph.* **551**, A41 (2013). doi: 10.1051/0004-6361/201220845.
7. B. E. J. Pagel, M. G. Edmunds, D. E. Blackwell et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **189**, N1, 95 (1979). doi: 10.1093/mnras/189.1.95.
8. M. G. Edmunds, B. E. J. Pagel, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **211**, N3, 507 (1984). doi: 10.1093/mnras/211.3.507.
9. S. S. McGaugh, *J. Astrophys.* **380**, N 1, 140 (1991). doi: 10.1086/170569.
10. E. D. Skillman, *Astrophys. J.* **347**, N 1, 883 (1989). doi: 10.1086/168179.
11. M. A. Dopita, I. N. Evans, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **307**, 431 (1986). doi: 10.1086/164432.
12. M. A. McCall, P. M. Rybski, G. A. Shields, *Astrophys. J. S. S.* **57**, N 1, 1 (1985). doi: 10.1086/190994.
13. C. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann et al., *Astrophys. J.* **613**, N 2, 898 (2004). doi: 10.1086/423264.
14. S. Yin, Y. F. Liang, F. Hammer et al., *Astron. and Astrophys.* **462**, N 2, 535 (2007). doi: 10.1051/0004-6361:20065798.
15. L.S. Pilyugin, *Astron. and Astrophys.* **369**, 594 (2001). doi: 10.1051/0004-6361:20010079.
16. G. Denicolo, R. Terlevich, E. Terlevich, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **330**, N 1, 69 (2002). doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05041.x
17. M. Pettini, B. E. J. Pagel, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **348**, N 3, L59 (2004). doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07591.x.
18. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **457**, N 4, 3678 (2016). doi: 10.1093/mnras/stw238.
19. G. J. Ferland, 2008, *Hazy, a Brief Introduction to Cloudy*. University of Kentucky, Lexington, Available at: <http://www.nublado.org>, <http://viewvc.nublado.org/index.cgi/tags/release/c08.00/docs/?root=cloudy>.
20. C. Kehrig, E. Telles, F. Cuisinier, *Astronom. J.* **128**, 1141 (2004). doi: 10.1086/422922.

Статтю отримано: 21.06.2023
Прийнято до друку: 13.07.2023

CHECKING THE RELIABILITY OF CALIBRATION EXPRESSIONS FOR DETERMINING THE OXYGEN ABUNDANCES IN REGIONS OF IONIZED HYDROGEN USING MODELLING METHOD

B. Melekh, M. Shevchenko, D. Shelestiuk

*Ivan Franko National University of Lviv
Astrophysics Department
8 Kyrylo and Methody Str., 79000 Lviv, Ukraine
e-mail: bohdan.melekh@lnu.edu.ua*

Calibration relationships for determining the oxygen abundance in regions of ionized hydrogen are frequently used in the analysis of observed nebular emission line spectra. These relationships, based on strong emission lines present in all observed spectra, play a crucial role in testing chemodynamical theories of galaxies and we have to be sure that they are reliable indicators. We performed a verification of 18 popular calibration methods for determining oxygen abundance in regions of ionized hydrogen surrounding the star-forming regions. To achieve this, we selected modelling spectra generated through multicomponent photoionization modelling of these objects, using data obtained from chemodynamical simulations (ChDSs) of their evolution. To reproduce important emission line ratios within the observed range, we introduced a thin dense shell (TDS) in the modelling volume situated between the internal superwind regions (consisting of rarefied but highly heated shocked gas) and the outer photoionized gas of the nebula. The thickness of the TDS at its maximum density does not exceed 4 pc, corresponding to the resolution of the employed ChDSs. By calculating the spectra within a small central synthetic aperture (with a size smaller than the angular size of the region of ionized hydrogen), we were able to determine the oxygen abundances. These abundances were compared with corresponding values obtained by averaging over the modelling volume observed within the synthetic aperture, weighted by mass. Two calibrations based on N2 indicators showed excellent testing result, three ones demonstrated good results, four methods showed acceptable results, and nine calibrations yielded unacceptable result.

Key words: Regions of ionized hydrogen, dwarf galaxies, active star formation, calibration methods, chemical abundances, photoionization modelling, chemodynamical simulations