

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.037>

УДК 524.7

І. Ю. Ізотова¹, Ю. І. Ізотов²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка
01601 Київ, вул. Володимирська, 60
i.izotova@knu.ua

²Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
вул. Метрологічна 146, Київ, Україна, 03043
yizotov@bitp.kiev.ua

Компактні галактики з активним зореутворенням із 16-го випуску огляду SDSS: темпи зореутворення, визначені за світністю в заборонених емісійних лініях оптичного діапазону

Отримано вирази для визначення темпів зореутворення у локальних компактних галактиках із зореутворенням із 16-го випуску цифрового огляду неба Слоан з використанням світностей у заборонених лініях [O II] 372.7 нм, [Ne III] 386.8 нм, [O III] 495.9 нм, [O III] 500.7 нм та їхніх комбінацій. В основу покладено припущення про рівність значень темпів зореутворення, визначених за світністю в заборонених лініях та в емісійній лінії водню H γ . Корисність такого підходу полягає у тому, що спостереження емісії в лінії H γ не завжди є можливим. Наприклад, у галактиках з червоними зміщеннями $z > 1$ ця лінія виходить за межі оптичного діапазону, і замість неї можуть використовуватись лінії [O II] 372.7 нм, [Ne III] 386.8 нм та їхня комбінація. З іншого боку, є велика кількість досліджень дуже слабких об'єктів за даними низькодисперсних спектрів, в яких лінія H γ зливається з сильнішими лініями [O III] 495.9 нм, [O III] 500.7 нм. У цих випадках лінії [O III] та їхні комбінації можуть бути використані для визначення темпу зореутворення. Отримані вирази можуть знайти застосування для компактних галактик із зореутворенням у широкому діапазоні червоних зміщень.

Ключові слова: карликові галактики із зореутворенням, області іонізованого водню, міжзоряний пил, інфрачервоне випромінювання.

ВСТУП

Компактні карликові галактики із зореутворенням являють собою цікавий клас об'єктів, дослідження яких знаходить своє застосування для вирішення проблем космології, еволюції хімічних елементів у Всесвіті з часом та ін. Однією з важливих характеристик цих галактик є активне зореутворення, яке відбувається упродовж коротких проміжків часу — спалахів, та більш протяжних проміжків часу спокійного стану з низьким зореутворенням [13]. У періоди активного зореутворення в оптичних спектрах цих галактик спостерігаються інтенсивні емісійні лінії водню, гелію та заборонені лінії важчих елементів, головним чином кисню та подекуди неону. За своїми властивостями компактні галактики із зореутворенням є ймовірними аналогами галактик на великих червоних зміщеннях $z \approx 6$, які своїм випромінюванням могли спричинити вторинну іонізацію Всесвіту [15].

Темп зореутворення (SFR) є однією з вагомих характеристик галактик. За визначенням це маса зір, що утворились за один рік. З темпом зореутворення пов'язана низка важливих процесів, що протікають у галактиках, зокрема зростання їхньої зоряної маси, тепловий та іонізаційний стан міжзоряного середовища і його збагачення продуктами процесу нуклеосинтезу. При цьому в областях зореутворення формуються зорі у широкому діапазоні мас, зокрема масивні зорі з масами понад $10M_{\odot}$ і віком життя менше 20 млн років, які роблять основний внесок в інтегральний потік іонізаційного випромінювання, що призводить до формування областей H II іонізованого водню, у спектрах яких спостерігається низка сильних емісійних ліній, зокрема рекомбінаційних ліній водню. Якщо задано характер процесу зореутворення (неперервний або спалаховий), вік, металічність (вміст кисню) та початкову функцію мас зір (IMF), що формуються, то з використанням моделей еволюційного синтезу зоряної популяції (evolution population synthesis) темп зореутворення SFR визначається як величина, пропорційна світності певних індикаторів цього процесу [17]. Зазвичай для визначення темпу зореутворення використовуються світності в лініях H α та H β . За наявності даних спостережень для визначення SFR можуть використовуватись інші індикатори процесу зореутворення в галактиках, а саме: випромінювання в континуумі УФ-діапазону, випромінювання пилу, що нагрівається молодим зоряним населенням, у різних смугах інфрачервоного діапазону, вільно-вільне (free-free) випромінювання у радіоконтинуумі та їхні окремі комбінації (див., наприклад, [3, 4, 6—8, 10, 17, 18, 20—23, 29, 32]). У використанні кожного з індикаторів чи їхніх комбінацій для визначення темпу зореутворення є свої *pro* та *con*: різна залежність від вибраних параметрів (історія зореутворення, IMF, металічність) при калібруванні SFR для конкретного індикатора зореутворення [31], необхідність та/чи можливість врахування екстинкції тощо. Для коректного визначення темпу зореутворення важливим є належне врахування у необхідних випадках екстинкції випромінювання.

Спостережні дані свідчать про те, що зореутворення у компактних галактиках з активним зореутворенням відбувається переважно у спалаховому режимі [13].

В окремих випадках визначити темп зореутворення за лініями H чи H немає можливості. Наприклад, при достатньо великому червоному зміщенні $z > 1$ ці лінії переміщуються у близький ГЧ-діапазон, в якому складніше проводити спостереження, зокрема внаслідок значного поглинання випромінювання земною атмосферою, яке часом складно врахувати. У цих випадках для визначення темпу зореутворення можуть використовуватись світності в яскравих заборонених лініях [O II] 372.7 нм та [Ne III] 386.8 нм [17], які зазвичай спостерігаються в оптичному діапазоні спектрів компактних галактик з активним зореутворенням, якщо значення їхніх червоних зміщень менші від $z = 2$. При цьому перевагу слід віддати комбінації цих ліній з різними потенціалами іонізації для зменшення залежності темпу зореутворення від іонізаційного параметра. Це пов'язано з тим, що зазвичай інтенсивність лінії іону низького ступеня іонізації [O II] 372.7 нм зменшується зі збільшенням іонізаційного параметра, тоді як інтенсивність лінії іона [Ne III] 386.8 нм вищого ступеня іонізації — збільшується. Використання суми світностей в лініях [O II] 372.7 нм і [Ne III] 386.8 нм значно менше залежить від іонізаційного параметра і призводить до більш тісної калібрувальної залежності між темпом зореутворення і сумою світностей ліній іонів різного ступеня іонізації.

З іншого боку, до цього часу проведено велику кількість спектральних спостережень слабких об'єктів з низьким спектральним розділенням, наприклад призмових спостережень на Космічному телескопі Габбла. Особливість цих спостережень полягає в тому, що вони дозволяють отримувати спектри слабкіших об'єктів. Але водночас сильні лінії H 486.1 нм, [O III] 495.9 нм та [O III] 500.7 нм бледнуть і не можуть бути розділені. У цих випадках для отримання темпу зореутворення виникає потреба використання суми світностей цих ліній. Для зменшення впливу іонізаційного параметра і отримання тіснішої залежності необхідно також додати світність в лінії [O II] 372.7 нм, якщо вона є у тих же спектрах.

Метою цієї роботи є отримання калібрувальних залежностей між темпом зореутворення та значеннями світностей компактних галактик з активним зореутворенням (CSFG) в сильних заборонених лініях оптичного діапазону та їхніми комбінаціями.

ВИБІРКА КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИК ІЗ SDSS

Об'єкти до вибірки компактних галактик з активним зореутворенням (CSFG) були відібрані з 16-го випуску SDSS [2]. Вибірка налічує близько 25000 галактик на червоних зміщеннях $z = 0...1$. Для відбору

галактик використовувались критерії, наведені в роботі [12]. Переважна частина галактик — компактні об'єкти з діаметрами, меншими від $6''$. У спектрах усіх відібраних галактик лінія H спостерігається в емісії та має еквівалентні ширини $EW(H) \approx 1$ нм. Це свідчить про процес активного зореутворення в галактиках та наявність гарячих масивних зір. У спектрах галактик вибірки відсутні ознаки активних галактичних ядер, наприклад немає сильної спектральної лінії високої іонізації [Ne V] $\lambda 342.6$ нм. Усі відібрані галактики на діагностичній діаграмі [O III] $\lambda 500.7/H$ — [N II] $\lambda 658.4/H$ лежать в області галактик із зореутворенням, а не в області активних галактичних ядер. Спектри галактик із SDSS DR16 було використано для визначення низки інтегральних характеристик галактик, зокрема еквівалентної ширини $EW(H)$ та світності $L(H)$ в лінії H, світності в заборонених лініях $L([O II] \lambda 372.7 \text{ нм})$, $L([Ne III] \lambda 386.8 \text{ нм})$, $L([O III] \lambda 500.7 \text{ нм})$ та темпів зореутворення за названими світностями — $SFR(H)$, $SFR([O III])$, $SFR([O II])$ та $SFR([Ne III])$. Зазначимо, що світності в усіх названих лініях для визначення темпу зореутворення було виправлено за повну міжзоряну екстинкцію, що складається з двох компонентів — екстинкції від Молочного Шляху (виправлено за даними NED), та екстинкції власне від галактики дослідження, яку враховано згідно з даними спостережного декременту емісійних ліній водню серії Бальмера. Також шляхом порівняння зоряних величин об'єкта — повної у смузі g та величини всередині апертури спектральних спостережень (за даними SDSS) — було внесено корекції за спектральну апертуру.

Відзначимо, що мультихвильовим дослідженням вибірок компактних галактик з активним зореутворенням з різних випусків огляду неба SDSS було присвячено цілу низку робіт (див. роботи [5, 8—16, 21, 22] та посилання в них). Було встановлено, що вміст кисню $12 + \lg(O/H)$ є нижчим за сонячний та лежить у межах $7.8 \dots 8.2$ (максимум розподілу на 8.05) для більшості галактик, що маси зоряного компонента галактик вибірок розподілено в широкому інтервалі від $10^5 M_{\odot}$ до $10^{11} M_{\odot}$ (максимум розподілу на $10^9 M_{\odot}$). Показано, що еквівалентні ширини лінії H в компактних галактиках можуть сягати високих значень $EW(H) > 10$ нм, що свідчить про «молодий» спалах зореутворення. Темпи зореутворення галактик $SFR(H)$ були визначені згідно із залежністю з роботи [17]. Вони змінюються у широкому діапазоні та можуть перевищувати $100 M_{\odot}/\text{рік}$. Компактні галактики також характеризуються високим питомим темпом зореутворення, що сягає значень $sSFR = 10 \dots 100 \text{ Гігарік}^{-1}$. Повна зоряна маса галактики з такими значеннями $sSFR$ може сформуватися за $10 \dots 100$ млн років. При дослідженні вибірок компактних галактик з активним зореутворенням було отримано низку регресійних залежностей між інтегральними характеристиками галактик, виявлено галактики з гарячим пилом, а також показано, що функція світності галактик вибірки не описується функцією Schechter [26].

З космологічними параметрами $H_0 = 67.1 \text{ км с}^{-1}\text{Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.682$ та $\Omega_b = 0.318$ [1] за червоними зміщеннями визначено відстані до галактик, які враховувались при розрахунках маси та світностей.

ТЕМПИ ЗОРЕУТВОРЕННЯ ЗА СВІТНОСТЯМИ В ЗАБОРОНЕНИХ ЛІНІЯХ ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ

У роботі [17] з моделей еволюційного синтезу зоряної популяції для умов сталого зореутворення, сонячного вмісту кисню і початкової функції мас [25] (діапазон мас зір $(0.1 \dots 100)M_\odot$) було отримано калібрування темпу зореутворення галактик ($SFR, M_\odot/\text{рік}$) як функції світності в лінії H ($L(\text{H})$), ерг/с):

$$SFR = 7.9 \cdot 10^{-42} L(\text{H}). \quad (1)$$

З рівняння (1) за відношеннями світностей $L([\text{O II}])/L(\text{H})$, визначеними для двох вибірок галактик (75 блакитних іррегулярних та 90 нормальних і пекулярних), було отримано калібрування для темпу зореутворення $SFR([\text{O II}])$ за світністю $L([\text{O II}])$ в забороненій лінії $[\text{O II}] \lambda 372.7$:

$$SFR = (1.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-41} L([\text{O II}]). \quad (2)$$

У роботі [19] на основі залежності (1) було отримано вираз для визначення темпу зореутворення $SFR([\text{O II}] \lambda 372.7)$ з урахуванням металічності (для галактик з $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.5$).

На основі спектральних даних з SDSS DR4 у роботі [30] досліджувався зв'язок між двома емісійними лініями, які використовуються як індикатори процесу зореутворення, — H та $[\text{O II}]$. Зокрема, було виявлено сильну бімодальність відношення $[\text{O II}]/\text{H}$, яка відповідає різним значенням показника кольору $g - r$ галактик у системі спокою.

А у роботі [24] проаналізовано «стандартні» методи оцінок темпу зореутворення $SFR(\text{H})$, $SFR([\text{O II}])$ (згідно з даними [17]), $SFR(\text{UV})$ та $SFR(\text{FIR})$. Зокрема показано, що при гарній узгодженості темпів $SFR(\text{H})$ та $SFR(\text{FIR})$, який визначено за випромінюванням у ІЧ-діапазоні, темпи $SFR([\text{O II}])$ та $SFR(\text{UV})$, які визначені відповідно за світністю у забороненій лінії $[\text{O II}]$ та УФ-діапазоні, систематично перевищують значення $SFR(\text{FIR})$. Автори пояснюють це ефектами, пов'язаними з врахуванням абсорбції у емісійних лініях.

Дослідження унікальної вибірки з 10 галактик на великих червоних зміщеннях $z \sim 4.5$ з лінією $[\text{O II}] \lambda 372.7$ в їхніх спектрах проведено у роботі [28]. Показано, що залежність між світністю $L([\text{O II}])$, скоригованою за екстинкцію, та темпом зореутворення $SFR([\text{O II}])$ найкраще описується залежністю, отриманою у роботі [19] для моделі з вмістом кисню, що становить приблизно 50 % від сонячного.

У цій роботі для вибірки компактних галактик з активним зореутворенням (CSFG) в основу отримання виразів для калібрувальних за-

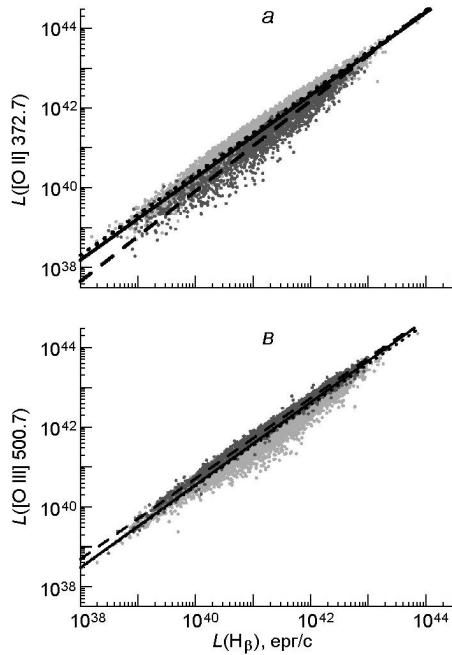


Рис. 1. Залежності між світностями в окремих заборонених лініях [O II] 372.7 (а), [Ne III] 386.8 (б), [O III] 500.7 (в) та світністю в лінії H α . Неперервні лінії — апроксимація для повної вибірки, пунктири та світлі точки — для галактик з $EW(H\alpha) < 10$ нм, штрихові лінії та темні точки — для галактик з $EW(H\alpha) > 10$ нм за даними огляду Слоана. (Усі значення світностей тут і нижче — у erg/s)

лежностей темпу зореутворення покладено припущення, що значення SFR , отримані з цих калібрувань за світністю в заборонених лініях, повинні дорівнювати темпу зореутворення, визначеному за світністю в лінії H α . Таким чином, отримуючи регресії між світностями в лінії H α і світностями в заборонених лініях та їхніх комбінаціях, ми одразу знаходимо вирази для темпів зореутворення в заборонених лініях, оскільки згідно з [17] темп зореутворення в лінії H α є пропорційним світності в цій лінії (прийнято $L(H\alpha)/L(H\beta) = 2.8$).

Спочатку розглянемо залежності між світностями в лінії H α та окремих заборонених лініях [O II] 372.7 нм, [Ne III] 386.8 і [O III] 500.7 нм, скоригованими за екстинкцію. Ці залежності наведено на рис. 1. Світло- та темно-сірими точками позначено компактні галактики з зореутворенням з огляду Слоана, які мають відповідно еквівалентні ширини емісійної лінії H α $EW(H\alpha) < 10$ нм та $EW(H\alpha) > 10$ нм. На цьому рисунку регресії для усієї вибірки зображено неперервними лініями, а регресії для галактик з $EW(H\alpha) < 10$ нм та $EW(H\alpha) > 10$ нм — відповідно пунктирними та штриховими лініями.

Для порівняння залежності в лінії [O II] (рис. 1а), отриманої для повної вибірки CSFG, з аналогічними залежностями робіт [17, 19], приймемо, що темпи зореутворення, які визначаються за світністю в лінії [O II] згідно з калібруванням [17] (вираз (2)) та [19], дорівнюють темпу зореутворення, визначеному за світністю в лінії H α згідно з калібруванням [17] (рівняння (1) з відношенням $L(H\alpha)/L(H\beta) = 2.8$). На рис. 2 залежність для всієї вибірки CSFG приведена неперервною лінією, штриховою та пунктирною лініями — залежності згідно робіт [17] та [19] відповідно. Було знайдено добре узгодження між залежністю, отриманою для галактик вибірки CSFG з низькими світностями

Рис. 2. Порівняння залежностей між світністю в $[\text{O II}] \lambda 372.7$ та світністю в лінії H . Чорна суцільна пряма — залежність, отримана у цій роботі для повної вибірки CSFG, штрихова та пунктирна — відповідно залежності з робіт [17] та [19]. Для галактик вибірки позначення світло- та темно-сірими точками те ж саме, що і на рис. 1

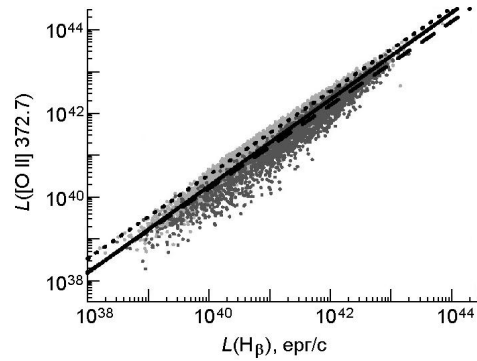
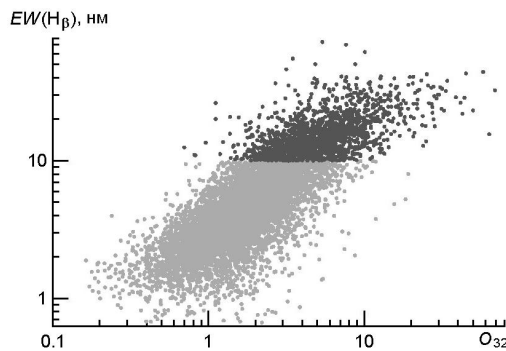


Рис. 3. Залежність між відношенням інтенсивностей ліній $O_{32} = [\text{O III}] \lambda 500.7 : [\text{O II}] \lambda 372.7$ та еквівалентною шириною $EW(\text{H})$ лінії H . Для галактик вибірки позначення світло- та темно-сірими точками те ж саме, що і на рис. 1



у лінії H , та аналогічною згідно [17]. Узгодження погіршується для галактик з великими світностями. Протилежна тенденція спостерігається при порівнянні залежності, отриманої для галактик CSFG, з залежністю згідно з роботою [19]. Але загалом узгодження отриманого результату для лінії $[\text{O II}]$ з залежністю з роботи [19] гірше, ніж при порівнянні з залежністю згідно [17].

З рис. 1 видно, що дисперсія спостережних даних велика (особливо на рис. 1а та рис. 1б), а галактики з великими значеннями $EW(\text{H})$ (темно-сірі точки) зміщені відносно галактик з малими значеннями $EW(\text{H})$ (світло-сірі точки). Ці зміщення пов'язані з залежністю відношення інтенсивностей заборонених ліній до інтенсивності лінії H від іонізаційного параметра. Характеристиками іонізаційного параметра в оптичному діапазоні можуть слугувати як $EW(\text{H})$, так і відношення інтенсивностей ліній $[\text{O III}] \lambda 500.7 / [\text{O II}] \lambda 372.7$, яке позначається як O_{32} . Між ними спостерігається майже лінійна залежність (рис. 3). Відповідні залежності відношень інтенсивностей окремих заборонених ліній до інтенсивності лінії H від O_{32} зображено на верхній панелі рис. 4, де інтенсивність лінії $[\text{O II}] \lambda 372.7$ іона низького ступеня іонізації зменшується (рис. 4а), а інтенсивності ліній $[\text{Ne III}] \lambda 386.8$ та $[\text{O III}] \lambda 500.7$ високого ступеня іонізації збільшуються зі збільшенням O_{32} (рис. 4б та рис. 4в відповідно).

Компенсувати залежність від іонізаційного параметра можна, якщо розглянути залежність між світністю в лінії H та сумою світностей заборонених ліній двох іонів різних ступенів іонізації. На нижній панелі рис. 4 зображено залежності відношень сум інтенсивностей

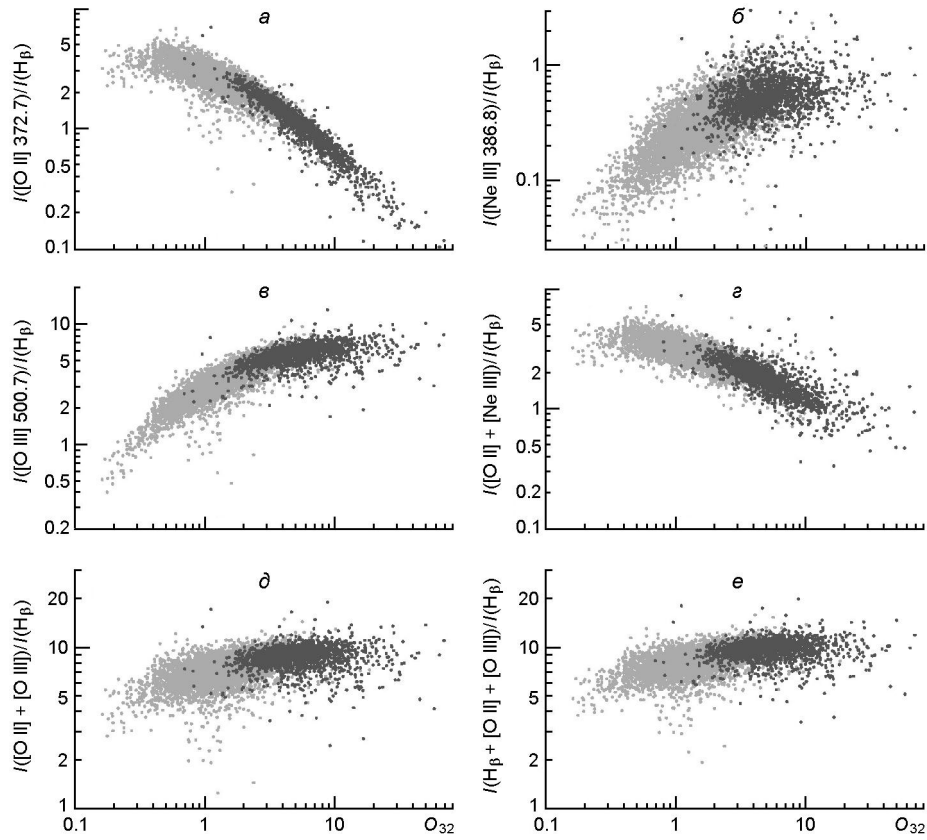


Рис. 4. Залежності відношень інтенсивностей окремих заборонених ліній (а — в) та їхніх комбінацій до інтенсивності лінії Н (г — е) від величини $O_{32} = [O III] 500.7 / [O II] 372.7$. Для галактик вибірки позначення світло- та темно-сірими точками те ж саме, що і на рис. 1

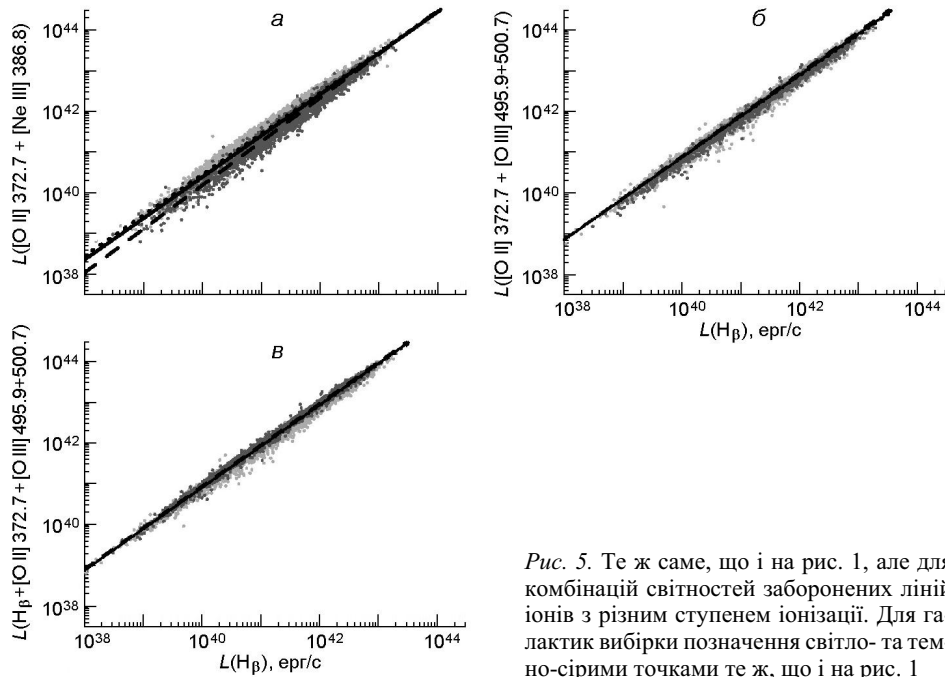


Рис. 5. Те ж саме, що і на рис. 1, але для комбінацій світностей заборонених ліній іонів з різним ступенем іонізації. Для галактик вибірки позначення світло- та темно-сірими точками те ж, що і на рис. 1

Вирази для темпів зореутворення (SFR — в M_{\odot} /рік, L — в ерг/с)

Параметр	Вираз
$SFR(H)$	$2.21 \cdot 10^{41} L(H) [17]$
<u>ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ СВІТНОСТЕЙ, СКОРИГОВАНИХ ЗА ЕКСТИНКЦІЮ</u>	
$SFR([O II] 372.7)$	$(3.36 \pm 2.02) \cdot 10^{40} L([O II] 372.7)^{0.96}$
$SFR([Ne III] 386.8)$	$(1.04 \cdot 0.75) \cdot 10^{37} L([Ne III] 386.8)^{0.92}$
$SFR([O III] 500.7)$	$(2.30 \cdot 1.03) \cdot 10^{40} L([O III] 500.7)^{0.96}$
$SFR([O II] 372.7 + [Ne III] 386.8)$	$(3.85 \cdot 1.49) \cdot 10^{41} L([O II] 372.7 + [Ne III] 386.8)^{0.98}$
$SFR([O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)$	$(9.77 \cdot 2.24) \cdot 10^{42} L([O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)^{0.99}$
$SFR(H + [O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)$	$(1.53 \cdot 0.29) \cdot 10^{41} L(H + [O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)^{0.98}$
<u>ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ СПОСТЕРЕЖНИХ СВІТНОСТЕЙ</u>	
$SFR([O II] 372.7)$	$(6.38 \cdot 4.01) \cdot 10^{41} L([O II] 372.7)^{0.98}$
$SFR([Ne III] 386.8)$	$(7.38 \cdot 6.44) \cdot 10^{37} L([Ne III] 386.8)^{0.90}$
$SFR([O III] 500.7)$	$(8.41 \cdot 5.06) \cdot 10^{40} L([O III] 500.7)^{0.95}$
$SFR([O II] 372.7 + [Ne III] 386.8)$	$(1.01 \cdot 0.40) \cdot 10^{42} L([O II] 372.7 + [Ne III] 386.8)^{1.00}$
$SFR([O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)$	$(2.48 \cdot 0.63) \cdot 10^{41} L([O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)^{0.98}$
$SFR(H + [O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)$	$(1.48 \cdot 0.32) \cdot 10^{41} L(H + [O II] 372.7 + [O III] 495.9 + [O III] 500.7)^{0.98}$

ліній іонів з різними ступенями іонізації до інтенсивності лінії H від O_{32} (рис. 4a—e), які є не такими стрімкими, значно слабшими, ніж залежності для окремих ліній (рис. 4a—b). Відповідні залежності для комбінацій світностей заборонених ліній від світності в лінії H наведено на рис. 5. Як і очікувалось, дисперсії спостережних даних виявились значно меншими, а регресії для галактик з низькими та великими $EW(H)$ (пунктирні та штрихові лінії) — ближчими за своїми значеннями, ніж дисперсії та регресії на рис. 1. Вирази для регресій, отримані для даних рис. 1 та 5 та для деяких інших комбінацій ліній оптичного діапазону, наведено в таблиці.

Аналогічним чином було розглянуто залежності між спостережними світностями, тобто між світностями, які не виправлялись за екстинкцію. Внаслідок невеликої екстинкції в компактних галактик із зореутворенням ці залежності не дуже відрізняються від наведених вище. Відповідні вирази для темпів зореутворення у випадку спостережних світностей також наведено в таблиці.

ВИСНОВКИ

У цій роботі з використанням великої вибірки компактних галактик із зореутворенням із 16-го випуску огляду Слоана отримано вирази для визначення темпів зореутворення з використанням світностей сильних заборонених емісійних ліній оптичного діапазону. Ці вирази можна використовувати для визначення темпів зореутворення в широкому діапазоні червоних зміщень як на доповнення до темпів зореутворення, отриманих із світностей ліній H та/або H водню, так і у випадках, коли використання ліній водню неможливе.

ПОДЯКИ

І.І. виконувала роботу у рамках програми “Астрономія та фізика космосу” Київського національного університету імені Тараса Шевченка (тема 22БФ023-04). У дослідженні використано the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), яка фінансується National Aeronautics та Space Administration та керується California Institute of Technology. У роботі використовуються дані Sloan Digital Sky survey (SDSS). Фінансову підтримку проєкту SDSS-III здійснили Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, і the U.S. Department of Energy Office of Science (<http://www.sdss3.org/>). SDSS-III адмініструється через the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions of the SDSS-III Collaboration, який включає the University of Arizona, the Brazilian Participation Group, Brookhaven National Laboratory, University of Cambridge, Carnegie Mellon University, University of Florida, the French Participation Group, the German Participation Group, Harvard University, the Instituto de Astrofísica de Canarias, the Michigan State/Notre Dame/JINA Participation Group, Johns Hopkins University, Lawrence Berkeley National Laboratory, Max Planck Institute for Astrophysics, Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, New Mexico State University, New York University, Ohio State University, Pennsylvania State University, University of Portsmouth, Princeton University, the Spanish Participation Group, University of Tokyo, University of Utah, Vanderbilt University, University of Virginia, University of Washington, and Yale University.

1. Ade P. A. R., Aghanim N., Armitage-Caplan C., et al. (2014) Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron. and Astrophys.* 571. 16. 66.
2. Ahumada R., Allende Prieto C., Almeida A., et al. (2020) The 16th data release of the Sloan Digital Sky Surveys: First release from the APOGEE-2 southern survey and full release of eBOSS spectra. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 249. 3. 21.
3. Battisti A. J., Calzetti D., Johnson B. D., Elbaz D. (2015) Continuous mid-infrared star formation rate indicators: Diagnostics for $0 < z < 3$ star-forming galaxies. *Astrophys. J.* 800. 143. 21.
4. Calzetti D., Wu S.-Y., Hong S., et al. (2010) The calibration of monochromatic far-infrared star formation rate indicators. *Astrophys. J.* 714. 1256—1279.

5. Cardamone C., Schawinski K., Sarzi M., et al. (2009) Galaxy Zoo Green Peas: discovery of a class of compact extremely star-forming galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 399. 1191—1205.
6. Hao C.-N., Kennicutt R. C., Johnson B. D., Calzetti D., Dale D. A., Moustakas J. (2011) Dust-corrected star formation rates of galaxies. II. Combinations of ultraviolet and infrared tracers. *Astrophys. J.* 741. 124. 22.
7. Iglesias-Pàramo J., Buat V., Takeuchi T. T., et al. (2006) Star formation in the nearby universe: the ultraviolet and infrared point of view. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 164. 38—51.
8. Izotova I. Y., Izotov Y. I. (2018) Star-formation rate in compact star-forming galaxies. *Astrophys. Space. Sci.* 363. 47. 9.
9. Izotova I. Y., Izotov Y. I. (2019) Properties of star-forming galaxies in the mid-infrared range from the data obtained with the WISE space telescope. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 35(6). 253—260.
10. Izotova I. Y., Izotov Y. I. (2021) Compact galaxies with active star formation from SDSS DR14: star formation rates derived from combinations of luminosities in different wavelength ranges. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 37(2). 53—63.
11. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2011) Star-forming galaxies with hot dust emission in the Sloan Digital Sky Survey discovered by the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). *Astron. and Astrophys.* 536. L7. 4.
12. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2014) Multi-wavelength study of 14 000 star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Astron. and Astrophys.* 561. A33. 30.
13. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2016) The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 462 (4). 4427—4434.
14. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C., Schaerer D. (2017) The efficiency of ionizing photon production and the radiation energy balance in compact star-forming galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 467. 4118—4130.
15. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C., Schaerer D., Thuan T. X. (2021) Low-redshift compact star-forming galaxies as analogues of high-redshift star-forming galaxies. *Astron. and Astrophys.* 646. 138. 19.
16. Izotov Y. I., Guseva N. G., Thuan T. X. (2011) Green Pea Galaxies and Cohorts: Luminous compact emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* 728. 161, 16.
17. Kennicutt R. C., Jr. (1998) Star formation in galaxies along the Hubble Sequence. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 36. 189—231.
18. Kennicutt R. C., Hao C.-N., Calzetti D., Moustakas J., Dale D. A., Bendo G., Engelbracht C. W., Johnson B. D., Lee J. C. (2009) Dust-corrected star formation rates of galaxies. I. Combinations of H and infrared tracers. *Astrophys. J.* 703. 1672—1695.
19. Kewley L., Geller M., Jansen R. (2004) O II as star formation rate indicator. *Astron. J.* 127. 2002—2030.
20. Murphy E. J., Condon J. J., Schinnerer E., et al. (2011) Calibrating extinction-free formation rate diagnostics with 33 GHz free-free emission in NGC6946. *Astrophys. J.* 737. 67. 16.
21. Parnovsky S. L., Izotova I. Y., Izotov Y. I. (2013) H and UV luminosities and star formation rates of large sample of luminous compact galaxies. *Astrophys. Space. Sci.* 343. 361—376.
22. Parnovsky S. L., Izotova I. Y. (2015) Radio emission at 1.4 GHz from luminous compact galaxies. *Astron. Nachr.* 336. 276—283.
23. Rieke G. H., Alonso-Herrero A., Weiner B. J., Pérez-González P. G., Blaylock M., Donley J. L., Marcilla D. (2009) Determining star formation rates for infrared galaxies. *Astrophys. J.* 692. 556—573.
24. Rosa-González D., Terlevich E., Terlevich R. (2002) An empirical calibration of the star formation rate estimators. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 332. 283—295.

25. Salpeter E. E. (1955) The luminosity function and stellar evolution. *Astrophys. J.* 121. 161—167.
26. Schechter P. (1976) An analytic expression for the luminosity function of galaxies. *Astrophys. J.* 203. 297.
27. Treyer M., Schimidovich D., Johnson B. D., O'Dowd M., Martin C. D., Wyder T., Charlot S., Heckman T., Martins L., Seibert M., van der Hulst J. M. (2010) Mid-infrared spectral indicators of star formation and active galactic nucleus activity in normal galaxies. *Astrophys. J.* 719. 1191—1211.
28. Vanderhoof B. N., Faisst A. L., Shen L., Lemaux B. C., et al. (2022) The ALPINE-ALMA [CII] survey: Investigation of 10 galaxies at $z \sim 4.5$ with [O II] and [CII] line emission — ISM properties and [OII]-SFR relation. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 511. 1303—1316.
29. Wu H., Cao C., Hao C.-N., Liu F.-S., Wang J.-L., Xia X.-Y., Deng Z.-G., Young C. K.-S. (2005) PAH and mid-infrared luminosities as measured of star formation rate in SPITZER First Look Survey galaxies. *Astrophys. J. Lett.* 632. L79—L82.
30. Yan R., Newman J., Faber S. M., Konidaris N., Koo D., Davis M. (2006) On the origin of [OII] emission in red-sequence and poststarburst galaxies. *Astrophys. J.* 648. 281—298.
31. Zhang F., Li L., Kang X., Zhuang Y., Hanet Z. (2013) Uncertainties in the calibrations of star formation rate. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 433. 1039—1053.
32. Zhu Y.-N., Wu H., Cao C., Li H.-N. (2008) Correlations between mid-infrared, far-infrared, H α , and FUV luminosities for SPITZER SWIRE field galaxies. *Astrophys. J.* 686. 155—171.

I. Y. Izotova¹, Y. I. Izotov²

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

²Bogolyubov Institute for Theoretical Physics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

COMPACT GALAXIES WITH ACTIVE STAR FORMATION
FROM THE SDSS DATA RELEASE 16: STAR FORMATION RATES
BASED ON THE LUMINOSITIES OF FORBIDDEN EMISSION LINES
IN THE OPTICAL RANGE

We obtained expressions for star formation rates in local compact star-forming galaxies from the SDSS Data Release 16 using luminosities in forbidden emission lines [O II] 372.7 nm, [Ne III] 386.8 nm, [O III] 495.9 nm, [O III] 500.7 nm and their combinations. For this purpose the star formation rates derived from forbidden lines are assumed to be equal to those derived from the H α emission line. The reason for such approach is that the observations of H α emission are not always possible. For example, this line appears outside the spectrum in the optical range in galaxies with redshifts $z > 1$. [O II] 372.7 nm, [Ne III] 386.8 nm emission lines and their combination can be used in this case to derive star formation rates. On the other hand, there is a large number of studies of very faint objects with the use of the low-resolution spectra, in which H α emission line is blended with stronger [O III] 495.9 nm, [O III] 500.7 nm emission lines. In these cases [O III] lines and their combination can be used for the determination of the star formation rate. Obtained expressions can be applied for compact star-forming galaxies in a broad range of redshifts.

Key words: dwarf star-forming galaxies, galaxy H II regions, interstellar dust, infrared emission.

Стаття надійшла до редакції 13.07.2022

Після доопрацювання 13.07.2022

Прийнята до друку 12.10.2022