

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.02.034>

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 Національної академії наук України
вул. Метрологічна 146, Київ, Україна, 03043
yizotov@bitp.kiev.ua

LyC-галактики з вибоком іонізаційного випромінювання: властивості в середньому інфрачервоному діапазоні за даними космічного телескопа WISE

Досліджуються фотометричні характеристики у середньому інфрачервоному діапазоні компактних галактик з вибоком іонізаційного випромінювання (LyC-галактик) з метою пошуку залежностей, які б дозволили зробити кількісну оцінку іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики. Зокрема, досліджено залежності між характеристиками кольору галактик за даними космічного телескопа WISE та часткою випромінювання в лайманівському континуумі $f_{esc}(LyC)$ і часткою випромінювання $f_{esc}(Ly)$ в лінії Ly, які виходять за межі галактики. Встановлено залежності часток випромінювання $f_{esc}(LyC)$ та $f_{esc}(Ly)$ від показника кольору W1 – W4, де W1 і W4 — відповідно видимі зоряні величини на довжинах хвиль 3.4 і 22 мкм за даними космічного телескопа WISE. Це робить показник кольору W1 – W4 корисним індикатором для кількісної оцінки $f_{esc}(LyC)$ і $f_{esc}(Ly)$, на додаток до встановлених раніше окремих характеристик LyC-галактик в оптичному та ультрафіолетовому діапазонах. Таким чином, випромінювання галактик в середньому інфрачервоному діапазоні можна використовувати для пошуку кандидатів у LyC-галактики з метою їхніх подальших спостережень.

Ключові слова: компактні галактики із зореутворенням, галактики з вибоком іонізаційного випромінювання, міжзоряний пил, інфрачервоне випромінювання.

ВСТУП

За даними Космічного телескопа Planck останній фазовий перехід у Всесвіті стався у короткій шкалі часу на червоних зміщеннях $z \sim 6$, коли речовина перейшла із нейтрального в іонізований стан. Однак природа головних джерел вторинної іонізації залишається невідомою. Було запропоновано два головних типи об'єктів як джерел реіонізації: активні ядра галактик [28] та галактики із зореутворенням (SFG) [33]. У низці робіт [9, 26, 30] було показано, що внесок активних ядер галактик є незначним. З іншого боку, вважається, що численні маломасивні SFG з низькою світністю були головним джерелом іонізаційного випромінювання [2, 3, 27, 30, 32]. Зокрема, було показано [29], що внесок від галактик з низькою світністю є необхідним, щоб відтворити спостережуване зменшення непрозорості міжгалактичного середовища на $z \sim 6$.

LyC-галактики, які до цього часу найбільш надійно зареєстровано на великих червоних зміщеннях, ймовірно, мають частку іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики, $f_{esc}(\text{LyC}) = 10\text{...}20\%$. Цього має бути достатнім для повної реіонізації Всесвіту. Однак прямі спостереження галактик на великих червоних зміщеннях є складними з декількох причин, зокрема через їхню низьку яскравість, збільшення непрозорості міжгалактичного середовища для випромінювання у лайманівському континуумі із збільшенням червоного зміщення та наявність галактик з меншими червоними зміщеннями у напрямку на галактики з великими червоними зміщеннями, які своїм випромінюванням на $\lambda > 91.2$ нм імітують випромінювання далеких галактик на $\lambda < 91.2$ нм [7, 10, 35, 36]. Тому важливо виявити та дослідити такі галактики на відносно близьких червоних зміщеннях, які за своїми властивостями були б подібними до галактик на великих червоних зміщеннях. У низці робіт [25, 31] було наведено аргументи на користь того, що маломасивні компактні галактики з активним зореутворенням на $z < 1$ можуть бути ймовірними кандидатами у галактики такого типу, іонізаційне випромінювання яких виходить у міжгалактичне середовище. Ці галактики, завдяки відносно невеликій відстані, можна дослідити детальніше, ніж далекі галактики, і частку іонізаційного випромінювання z , що виходить за межі досліджуваних галактик, можна виміряти з більшою достовірністю.

Загальною характеристикою компактних SFGs є наявність сильних емісійних ліній в оптичних спектрах їхніх областей H II, які утворюються за рахунок потужного іонізаційного випромінювання від численних молодих зір спектрального класу O. Різні підвибірки компактних SFG, в залежності від червоного зміщення, фотометричних характеристик та світностей мають назви «блакитні компактні карликові галактики» (blue compact dwarf galaxies, BCDG) [21, 22, 34], галактики «чорниці» (blue berry, BB) [37], галактики «зелені горошини» (green peas, GP) [4], або компактні галактики з великою світ-

ністю (luminous compact galaxies, LCG) [17] та компактні карликові галактики з активним зореутворенням (compact star-forming galaxies, CSFG) [16].

В останні роки було проведено низку спостережень випромінювання в лайманівському континуумі галактик на червоних зміщеннях $z = 0.3...0.4$ на Hubble Space Telescope (HST) та знайдено близько 90 LyC-галактик [5, 6, 12, 16, 18—20, 23]. Незважаючи на це, навіть на невеликих червоних зміщеннях спостерігати LyC-випромінювання галактик є непростою задачею. Тому виникає потреба в розробці непрямих методів визначення частки іонізаційного випромінювання $f_{esc}(\text{LyC})$, що витікає у міжгалактичний простір, за допомогою окремих характеристик галактик без безпосереднього спостереження LyC-випромінювання від цих галактик. Наприклад, в роботі [23] розглянуто три індикатори для діагностики частки іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики, такі як відстань V_{sep} між піками лінії Ly, відношення $O_{32} = I([\text{O III}] \ 500.7) / I([\text{O II}] \ 372.7)$ та зоряна маса M_{star} . Було виявлено тісну антикореляцію між $f_{esc}(\text{LyC})$ та V_{sep} . Натомість показано, що залежність $f_{esc}(\text{LyC})$ від O_{32} є значно слабшою, а залежності від M_{star} майже немає. Отже, відстань V_{sep} між піками лінії Ly на сьогодні є найкращим непрямим індикатором частки іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики.

Усі ці дослідження виконувались з використанням даних, отриманих в ультрафіолетовому та оптичному діапазонах. Натомість не було досліджень LyC-галактик у середньому інфрачервоному діапазоні з метою визначення характеристик цих галактик та пошуку можливих індикаторів іонізаційного випромінювання та випромінювання в лінії Ly, що виходить за межі галактики.

Створення у 2011 р. фотометричного каталогу джерел усього неба за даними спостережень на космічному телескопі Wide-Field Infrared Survey Explore (WISE) у чотирьох смугах на 3.4 мкм ($W1$), 4.6 мкм ($W2$), 12 мкм ($W3$) та 22 мкм ($W4$) робить таке дослідження можливим. Перші результати у цьому напрямі отримано в роботах [8, 13, 14], де було досліджено велику вибірку компактних карликових галактик із цифрового огляду неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Було встановлено, що в цих галактиках температура пилу за даними випромінювання на довжинах хвиль 12 та 22 мкм внаслідок інтенсивного зореутворення є вищою від температури пилу у спіральних та інших спокійних галактиках. Було також виявлено незначну кількість галактик, в яких задетектовано суттєвий внесок гарячого пилу у випромінювання на довжинах хвиль 3.4 та 4.6 мкм. З іншого боку, було показано, що у більшості галактик головними джерелами випромінювання на довжинах хвиль 3.4 та 4.6 мкм є зорі та іноді вільно-вільне випромінювання іонізованого газу (у галактиках з молодими спалахами зореутворення). Але в цих дослідженнях не розглядалися галактики із втратами іонізаційного випромінювання, які було ідентифіковано пізніше в результаті спостережень на HST, починаючи з 2016 р.

Дослідження галактик з витоком іонізаційного випромінювання шляхом порівняння характеристик їхнього кольору в середньому інфрачервоному діапазоні з окремими характеристиками випромінювання в інших діапазонах довжин хвиль та з аналогічними характеристиками великої вибірки компактних карликових галактик із активним зореутворенням з 16-го випуску огляду SDSS провадяться з метою пошуку можливих індикаторів кількісної оцінки частки іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактик. В роботі використовуються лише такі характеристики галактик, які визначаються безпосередньо із спостережень.

ВИБІРКА ГАЛАКТИК

Для дослідження у середньому інфрачервоному діапазоні за даними архіву спостережень HST було відібрано близько 90 компактних галактик на червоних зміщеннях $z = 0.3...0.4$ з витоком іонізаційного випромінювання (LyC-галактики). Ці дані було доповнено оцінками часток іонізаційного випромінювання в лайманівському континуумі $f_{esc}(\text{LyC})$ і випромінювання $f_{esc}(\text{Ly})$ в лінії Ly, що виходять у міжгалактичне середовище, згідно з даними [5, 6, 12, 16, 18—20, 23]. В усіх цих роботах величина $f_{esc}(\text{LyC})$ визначалась як відношення спостережного потоку LyC-випромінювання до потоку LyC-випромінювання, що генерується галактикою. Останню величину в роботах [5, 6, 12, 16, 18—20, 23] визначено двома методами: 1) з модельованого розподілу енергії галактики в оптичному діапазоні та його екстраполяції в ультрафіолетовому діапазоні і 2) з використанням даних про потік випромінювання в лінії H. З іншого боку, $f_{esc}(\text{Ly})$ визначено з відношення потоків у лініях Ly і H, виправлених за екстинкцію.

Усі галактики для виконаних спостережень [5, 6, 12, 16, 18—20, 23] було відібрано із огляду неба SDSS за певними критеріями, дещо різними в різних роботах. Але загальною рисою відібраних галактик є активне зореутворення. Галактики перебувають на червоних зміщеннях $z = 0.3...0.4$, тому їхній лайманівський континуум з $\lambda = 91.2$ нм, якому притаманне суттєве поглинання нейтральним міжзоряним середовищем, зміщується в діапазон довших довжин хвиль $\lambda > 110$ нм, на яких HST стає чутливим для випромінювання. Спостереження провадились на спектрографі Cosmic Origins Spectrograph (COS) з низькодисперсною ґраткою G140L, що дозволило отримати спектри у широкому діапазоні довжин хвиль включно з лайманівським континуумом і лінією Ly. В результаті досліджень лайманівський континуум було зареєстровано для понад 50 галактик і визначено частку іонізаційного випромінювання $f_{esc}(\text{LyC})$, яке виходить за межі галактики. Для решти галактик було визначено верхню межу $f_{esc}(\text{LyC})$. В окремих випадках знайдено галактики з великою втратою іонізаційного випромінювання з максимальним значенням $f_{esc}(\text{LyC})$ близько 72 % [23]. Крім того, у

спектрах майже всіх цих галактик спостерігалась сильна емісійна лінія Ly α . За цими даними було визначено частку $f_{esc}(Ly\alpha)$ випромінювання в лінії Ly α , яке виходить за межі галактики.

Відібрані LyC-галактики було ототожнено з даними спостережень космічного телескопа WISE в середньому інфрачервоному діапазоні. Відзначимо, що LyC-галактики мають низьку яскравість, тому не всі вони були зареєстровані телескопом WISE. Так, у смугах W1, W2, W3 і W4 було зареєстровано 54, 48, 34 і 27 LyC-галактик відповідно.

Для порівняння використовується вибірка компактних карликових галактик з активним зореутворенням [16], яку створено на базі 16-го випуску SDSS [1]. Ця вибірка складається з 25 тис. галактик на червоних зміщеннях $z = 0...1$. Головні властивості галактик: 1) у спектрах усіх відібраних галактик спостерігаються емісійні лінії H α з еквівалентними ширинами $EW(H\alpha) > 1$ нм, що вказує на активне зореутворення і наявність гарячих масивних зір; 2) відібрані галактики є компактними об'єктами з кутовими діаметрами менше 6''; 3) усі відібрані галактики на діагностичній діаграмі $I([OIII] 500.7)/I(H\alpha) > I([NII] 658.4)/I(H\alpha)$ лежать в області галактик із зореутворенням. Емісійна лінія [O III] 436.3 нм наявна у спектрах більшості галактик. Хімічний склад іонізованого газу в цих галактиках визначено з використанням прямого T_e -методу, а для решти галактик — методом сильних ліній з використанням ліній [O II] 372.7, [O III] 495.9, [O III] 500.7 нм. SDSS-спектри також використовувались для визначення світності $L(H\alpha)$ в лінії H α , темпу зореутворення SFR і зоряної маси M_{star} .

Вибірку порівняння SDSS-галактик було також доповнено зоряними величинами у чотирьох смугах W1, W2, W3 та W4 середнього інфрачервоного діапазону за даними спостережень на космічному телескопі WISE.

Однак необхідно мати на увазі, що для галактик з вибірки порівняння немає прямих спостережень лайманівського континууму. Це пояснюється складністю таких спостережень, які можна здійснити лише для незначної кількості галактик за допомогою HST з використанням багатогодинних експозицій для кожної галактики.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬОРУ LyC-ГАЛАКТИК У СЕРЕДНЬОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

LyC-галактики, розташовані на малих червоних зміщеннях, викликають значний інтерес, оскільки вони, як уже зазначалось, ймовірно, є аналогами галактик на великих червоних зміщеннях, які своїм випромінюванням могли призвести до вторинної іонізації Всесвіту. Важливими задачами дослідження LyC-галактик є визначення частки іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики, та пошук механізмів виходу цього випромінювання. Для вирішення першої

проблеми було проведено низку прямих спостережень з довгими експозиціями на HST у діапазоні, що включає лайманівський континуум [5, 6, 12, 16, 18—20, 23].

Пошук механізмів витоку іонізаційного випромінювання за межі галактик є складнішою задачею і потребує додаткових досліджень галактик у різних діапазонах довжин хвиль, отриманні їхніх характеристик та порівнянні цих характеристик з часткою іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики, а також пошуку індикаторів, які дозволили б непрямим методом визначити f_{esc} (LyC). На додаток до вже проаналізованих індикаторів витоку іонізаційного випромінювання [23] розглянемо характеристики LyC-галактик у середньому інфрачервоному діапазоні, зокрема індекси кольору $W1 - W2$ та $W1 - W4$, де $W1$, $W2$, $W4$ — видимі зоряні величини галактик у відповідних смугах за даними спостережень на космічному телескопі WISE. Ми також будемо базуватись на характеристиках в оптичному діапазоні, таких як $I([OIII] 500.7)/I(H\beta)$, яка залежить від ступеня збудження зони H II, а також металічності, і $O_{32} = I([OIII] 500.7)/I([OII] 372.7)$, яка залежить лише від ступеня збудження зони H II.

На рис. 1a і 1б приведено залежності показника кольору $W1 - W2$ від двох характеристик оптичного діапазону — відношення інтенсивностей $I([OIII] 500.7)/I(H\beta)$ і $O_{32} = I([OIII] 500.7)/I([OII] 372.7)$. LyC-галактики з вимірними потоками лайманівського континууму та галактики з верхніми межами LyC-потоків зображено відповідно темними і світлими кружками [12, 16, 18—20, 23] і трикутниками [5, 6]. Темно-сірими точками зображено компактні карликові галактики з активним зореутворенням із огляду SDSS зі значеннями еквівалентних ширин емісійної лінії H $EW(H\beta) > 10$ нм, світло-сірими точками — зі значеннями $EW(H\beta) < 10$ нм. Оскільки характеристики кольору галактик залежать від червоного зміщення, на рис. 1 для порівняння приведено лише галактики з червоними зміщеннями в інтервалі 0.3...0.4, щоб виключити ефект червоного зміщення при порівнянні з LyC-галактиками. Як видно, розподіл LyC-галактик практично не відрізняється від розподілу SDSS-галактик з вибірки порівняння з великими еквівалентними ширинами $EW(H\beta) > 10$ нм і показує таке ж збільшення (почервоніння) показника кольору $W1 - W2$ із ступенем збудження зони H II. Це зростання пов'язане з більшим нагрівом пилу в галактиках з більшими показниками кольору $W1 - W2$ [11, 15]. Відсутність принципової різниці розподілів SDSS- і LyC-галактик на рис. 1 свідчить про те, що виток іонізаційного випромінювання, ймовірно, не залежить від властивостей галактик на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм. З іншого боку, з відсутності залежності можна припустити, що більша частина галактик з вибірки порівняння також втрачає випромінювання лайманівського континууму. Кількість галактик з зареєстрованим випромінюванням лайманівського континууму постійно зростає, але перевірити це припущення можливо лише прямими спостереженнями великої кількості галактик, що видається малоімовірним.

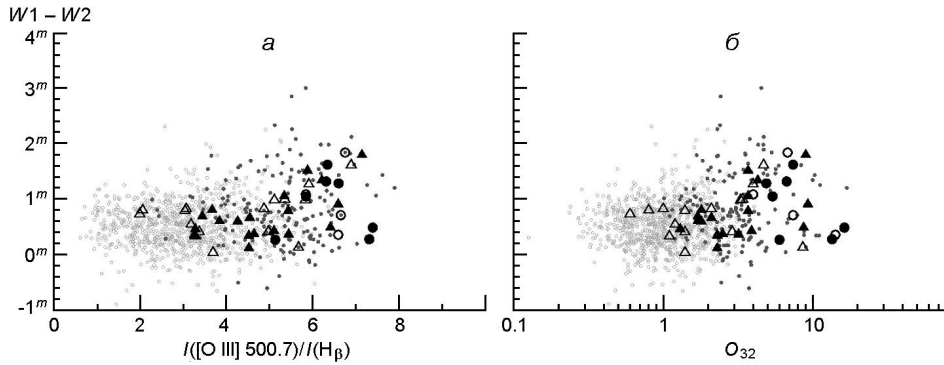


Рис. 1. Залежність показників кольору $W1 - W2$ за даними WISE для LyC-галактик: *a* — від відношення інтенсивностей емісійних ліній $I([\text{O III}] 500.7)/I(\text{H}\beta)$; *б* — від відношення $O_{32} = I([\text{O III}] 500.7)/I([\text{O III}] 436.3)$. Кружки — дані [12, 16, 18—20, 23], трикутники — дані [5, 6] (темні символи — для галактик з вимірними потоками LyC-випромінювання, світлі — лише з їхньою верхньою межею). Сірі точки — для компактних карликових галактик з активним зореутворенням з огляду SDSS на червоних зміщеннях $z = 0.3 \dots 0.4$ (темно-сірі — для $EW(\text{H}\gamma) > 10$ нм, світло-сірі — для $EW(\text{H}\gamma) < 10$ нм)

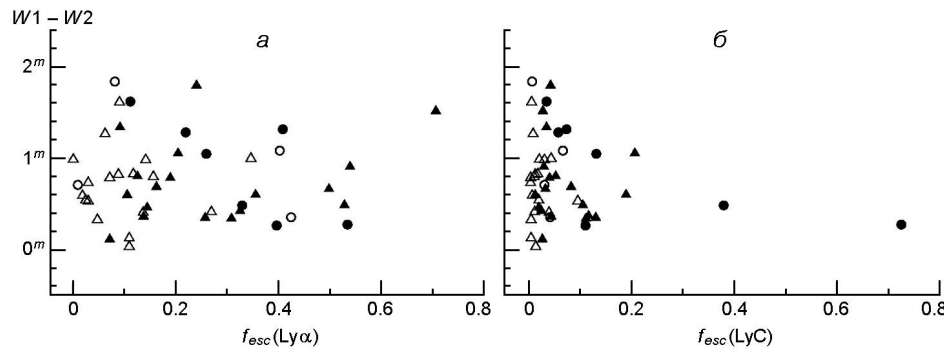


Рис. 2. Залежність показників кольору $W1 - W2$ від частки випромінювання, що виходить за межі галактики: *a* — в лінії Ly α , *б* — в лайманівському континуумі. Позначення ті ж, що і на рис. 1

Частки Ly - і LyC-випромінювання, що виходять за межі галактики, також не залежать від $W1 - W2$ (рис. 2). Великі значення показників кольору $W1 - W2$ свідчать про наявність гарячого пилу з температурою, що може сягати значень у декілька сотень кельвін [13]. Ймовірно, такий пил може бути у щільних оболонках з нейтрального газу, які розташовані близько до області зореутворення. Відсутність кореляцій на рис. 1 вказує на те, що наявність гарячого пилу, ймовірно, не пов'язана з витоком іонізаційного випромінювання за межі галактики.

На рис. 3 приведено залежності показника кольору $W1 - W4$, який є характеристикою теплого пилу з температурою не більше 100 K [15], від $I([\text{O III}] 500.7)/I(\text{H}\gamma)$ та O_{32} . Маса теплого пилу є значно більшою за масу гарячого пилу, і він розташований на більших відстанях від області зореутворення. Як і у випадку з показником кольору $W1 - W2$, показник кольору $W1 - W4$ збільшується (стає червонішим) із збіль-

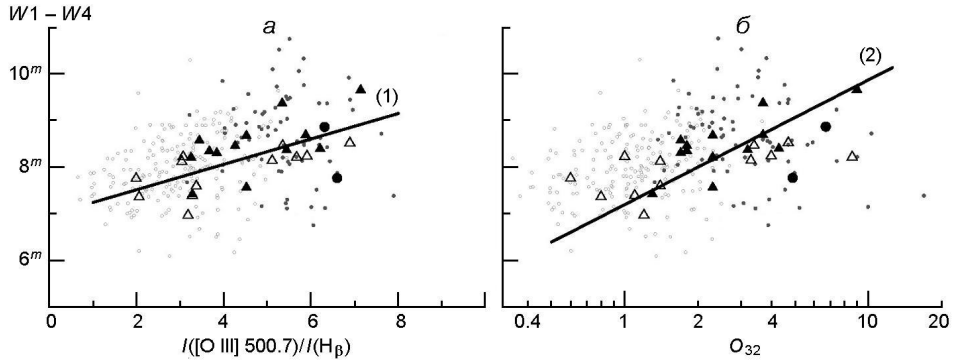


Рис. 3. Те ж, що і на рис. 1, для розподілу показника кольору $W1 - W4$. Додатково суцільними лініями приведено кореляційні залежності (1) і (2), отримані методом максимальної правдоподібності

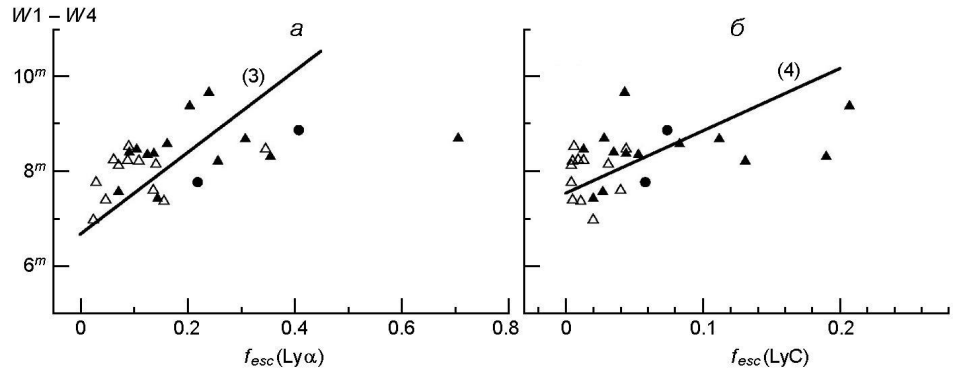


Рис. 4. Те ж, що і на рис. 2, для розподілу показника кольору $W1 - W4$. Додатково суцільними лініями приведено кореляційні залежності (3) і (4), отримані методом максимальної правдоподібності

шенням $I([\text{O III}] \ 500.7)/I(\text{H} \)$ та O_{32} , що вказує на збільшення температури теплового пилу із зростанням ступеня збудження зони Н ІІ і на те, що головним джерелом нагріву пилу в цих галактиках є випромінювання від молодих масивних зір.

Апроксимації розподілів LyC-галактик на рис. 3а і 3б отримано методом максимальної правдоподібності у вигляді

$$W1 - W4 = 0.272 \frac{I([\text{O III}] \ 500.7)}{I(\text{H} \)} + 6.97 \quad (1)$$

$$(r = 0.60, \text{prob} = 99.915 \%)$$

та

$$W1 - W4 = 2.66 \lg O_{32} + 7.19 \quad (2)$$

$$(r = 0.64, \text{prob} = 99.964 \%).$$

Отримані значення коефіцієнтів кореляції r , а також високі значення достовірності апроксимацій $prob$ свідчать про те, що ці кореляційні залежності є статистично достовірними.

Іншою особливістю розподілів LyC-галактик на рис. 3а і 3б є те, що LyC-галактики з зареєстрованим іонізаційним випромінюванням (темні символи) у середньому мають червоніший колір, ніж галактики з верхньою межею LyC-потоків (світлі символи), що свідчить про вищу температуру пилу. Однак є і певна відмінність між розподілами LyC-галактик на рис. 3а і 3б, яка полягає в тому, що галактики із зареєстрованим іонізаційним випромінюванням мають систематично вищі значення O_{32} , тоді як розподіли галактик з зареєстрованим і незареєстрованим LyC-випромінюванням розподілені більш однорідно в залежності від $I([OIII] \lambda 500.7)/I(H \alpha)$.

Залежності $W1 - W4$ від $f_{esc}(Ly \alpha)$ та $f_{esc}(LyC)$ для LyC-галактик наведено на рис. 4а і 4б. Відзначимо збільшення кольору $W1 - W4$ зі збільшенням величин $f_{esc}(Ly \alpha)$ та $f_{esc}(LyC)$. Ці залежності свідчать про те, що в галактиках з більшими значеннями $f_{esc}(Ly \alpha)$ та $f_{esc}(LyC)$ температура теплового пилу вища, що у поєднанні з залежностями на рис. 3 дозволяє зробити висновок, що витік іонізаційного випромінювання вищий у галактиках з молодшими спалахами зореутворення. Рівняння залежностей, приведених на рис. 4 (суцільні лінії), отримано методом максимальної правдоподібності у вигляді

$$W1 - W4 = 8.56 f_{esc}(Ly \alpha) - 6.66 \quad (3)$$

$$(r = 0.46, prob = 98.350 \%)$$

та

$$W1 - W4 = 13.12 f_{esc}(LyC) - 7.53 \quad (4)$$

$$(r = 0.40, prob = 96.365 \%).$$

Коефіцієнти кореляції r для залежностей (3) і (4) нижчі, ніж для залежностей (1) і (2) на рис. 3, але достатньо високі значення достовірності $prob$ вказують на їхню реальність. Також достовірність всіх отриманих кореляційних залежностей було перевірено та підтверджено згідно з t -критерієм Стьюдента.

Отримані залежності на рис. 3 та рис. 4 вказують на можливість використання показника кольору $W1 - W4$ для відбору галактик, принаймні на $z = 0.3 \dots 0.4$, які потенційно можуть мати відносно високі значення часток випромінювання $f_{esc}(Ly \alpha)$ та $f_{esc}(LyC)$, що виходить за межі галактик, якщо їхні індекси кольору $W1 - W4$ перевищують значення 8.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджувались окремі фотометричні характеристики у середньому інфрачервоному діапазоні за даними спостережень космічного телескопа WISE вибірки галактик з вибоком іонізаційного випро-

мінювання на червоних зміщеннях $z = 0.3...0.4$ (LyC-галактик), котрі спостерігались на Hubble Space Telescope. Виконано порівняння отриманих характеристик кольору LyC-галактик та великої вибірки компактних карликових галактик із зореутворенням із 16-го випуску огляду SDSS. Однак відмітимо, що для SDSS-галактик відсутні спостереження лайманівського континууму. В середньому інфрачервоному діапазоні було виконано пошук індикаторів частки витоку іонізаційного випромінювання. Отримано такі результати.

1. У LyC-галактиках показники кольору $W1 - W2$ та $W1 - W4$ в середньому ІЧ-діапазоні показують збільшення з ростом характеристик випромінювання в оптичному діапазоні $I([\text{OIII}] \ 500.7)/I(\text{H} \ \beta)$ та $O_{32} = I([\text{OIII}] \ 500.7)/I([\text{OII}] \ 372.7)$ завдяки більшому нагріву пилу випромінюванням молодого спалаху зореутворення, при якому спостерігаються вищі значення відношень $I([\text{OIII}] \ 500.7)/I(\text{H} \ \beta)$ та O_{32} у порівнянні зі спалахом зореутворення з більшим віком.

2. Частки $f_{esc}(\text{Ly} \ \alpha)$ та $f_{esc}(\text{LyC})$ випромінювання в лінії Ly та LyC-континуумі, що виходить за межі галактики, не залежать від показника кольору $W1 - W2$, високі значення якого (понад 2) є індикатором наявності гарячого пилу в галактиці. Це може свідчити про те, що нагрівання пилу до температури у декілька сотень градусів, ймовірно, здійснюється випромінюванням молодих масивних зір, але залежить також і від інших факторів, зокрема просторового розподілу пилових хмар у галактиці та їхньої відстані від скупчень молодих зір тощо. Відсутність залежностей $f_{esc}(\text{Ly} \ \alpha)$ та $f_{esc}(\text{LyC})$ від показника кольору $W1 - W2$ свідчить про те, що цей показник не може слугувати індикатором частки іонізаційного випромінювання, що виходить за межі галактики.

3. Частки Ly - та LyC-випромінювання, що виходять за межі LyC-галактики, збільшуються зі збільшенням показника кольору $W1 - W4$, який є характеристикою наявності теплого пилу з температурою не вище 100 K. Це вказує на те, що необхідною умовою нагріву пилу та витоку іонізаційного та Ly -випромінювання є наявність великої кількості молодих масивних зір у галактиці. Встановлено, що галактики з $W1 - W4 > 8$ можуть втрачати понад 10 відсотків LyC-випромінювання. Таким чином, показник кольору $W1 - W4$ випромінювання галактик в середньому інфрачервоному діапазоні можна використовувати для пошуку кандидатів у LyC-галактики з метою їхніх подальших спостережень.

ПОДЯКИ

І.І. виконувала роботу у рамках програми «Астрономія та фізика космосу» Київського національного університету імені Тараса Шевченка (тема 22БФ023-01). У публікації використовуються дані спостережень Wide-field Infrared Survey Explorer, який є спільним проектом

University of California, Los Angeles, і the Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology, що фінансується National Aeronautics and Space Administration. Фінансову підтримку проєкту SDSS-III надали Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, і the U.S. Department of Energy Office of Science. Вебсайт The SDSS-III — <http://www.sdss3.org/>. SDSS-III адмініструється the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions of the SDSS-III Collaboration, яка 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. 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.
2. Bouwens R. J., Illingworth G. D., Oesch, P. A., et al. (2015) UV luminosity functions at redshifts $z \sim 4$ to $z \sim 10$: 10,000 galaxies from HST Legacy fields. *Astrophys. J.* 803. 34. 49.
3. Finkelstein S. L., D'Aloisio A., Paardekooper J.-P., et al. (2019) Conditions for reionizing the Universe with a low galaxy ionizing photon escape fraction. *Astrophys. J.* 879. 36. 34.
4. 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.
5. Flury S. R., Jaskot A. E., Ferguson H. C., et al. (2022) The low-redshift Lyman continuum survey. I. New, diverse local Lyman continuum emitters. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 260. 1. 17.
6. Flury S. R., Jaskot A. E., Ferguson H. C., et al. (2022) The low-redshift Lyman continuum survey. II. New insights into LyC diagnostics. *Astrophys. J.* 930. 126. 21.
7. Grazian A., Giallongo E., Gerbasi R., et al. (2016) The Lyman continuum escape fraction of galaxies at $z = 3.3$ in the VUDS-LBC/COSMOS field. *Astron. and Astrophys.* 585. 48. 18.
8. Griffith R. L., Tsai C.-W., Stern D., et al. (2011) WISE discovery of low-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Astrophys. J.* 736. L22. 5.
9. Hassan S., Romeel Dav'e R., Mitra S., Finlator K., Ciardi B., Santos M. G. (2018) Constraining the contribution of active galactic nuclei to reionization. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 473. 227—240.
10. Inoue A. K., Shimizu I., Iwata I., Tanaka M. (2014) An updated analytic model for attenuation by the intergalactic medium. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 442. 1805—1820.

11. 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. 253—260.
12. Izotov Y. I., Chisholm J., Worseck G., et al. (2022) Lyman alpha and Lyman continuum emission of Mg II-selected star-forming galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 515. 2864—2881.
13. 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.
14. 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.* 2014. 561. 33. 30.
15. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., et al. (2014) Dust emission in star-forming dwarf galaxies: General properties and the nature of the submm excess. *Astron. and Astrophys.* 570. 97. 21.
16. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., et al. (2021) Low-redshift compact star-forming galaxies as analogues of high-redshift star-forming galaxies. *Astron. and Astrophys.* 646. 138. 19.
17. 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.
18. Izotov Y. I., Orlov'а I., Schaerer D., et al. (2016) Eight per cent leakage of Lyman continuum photons from a compact, star-forming dwarf galaxy. *Nature*. 529. 178—180.
19. Izotov Y. I., Schaerer D., Thuan T. X., et al. (2016) Detection of high Lyman continuum leakage from four low-redshift compact star-forming galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 461. 3683—3701.
20. Izotov Y. I., Schaerer D., Worseck G., et al. (2018) J1154+2443: a low-redshift compact star-forming galaxy with a 46 per cent leakage of Lyman continuum photons. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 474. 4514—4527.
21. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G., Liss S. E. (2018) J0811+4730: the most metal-poor star-forming dwarf galaxy known. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 473. 1956—1966.
22. Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A. (1994) The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies. *Astrophys. J.* 435. 647—667.
23. Izotov Y. I., Worseck G., Schaerer D., et al. (2018) Low-redshift Lyman continuum leaking galaxies with high [O III]/[O II] ratios. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 478. 4851—4865.
24. Izotov Y. I., Worseck G., Schaerer D., et al. (2021) Lyman continuum leakage from low-mass galaxies with $M_{star} < 10^8 M_{\odot}$. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 503. 1734—1752.
25. Jaskot A. E., Oey M. S. (2013) The origin and optical depth of ionizing radiation in the “Green Pea” galaxies. *Astrophys. J.* 766. 91. 23.
26. Kulkarni G., Worseck G., Hennawi J. F. (2019) Evolution of the AGN UV luminosity function from redshift 7.5. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 488. 1035—1065.
27. Lewis J. S. W., Ocvirk P., Aubert D., et al. (2020) Galactic ionizing photon budget during the epoch of reionization in the Cosmic Dawn II simulation. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 496. 4342—4357.
28. Madau P., Haardt F. (2015) Cosmic reionization after Planck: could quasars do it all? *Astrophys. J.* 813. L8. 6.

29. Meyer R. A., Kakiichi K., Bosman S. E. I., et al. (2020) The role of galaxies and AGN in reionizing the IGM — III. IGM-galaxy cross-correlations at $z \sim 6$ from eight quasar fields with DEIMOS and MUSE. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 494. 1560—1578.
30. Mitra S., Ferrara A., Choudhury T. R. (2013) The escape fraction of ionizing photons from high-redshift galaxies from data-constrained reionization models. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett.* 428. L1—L5.
31. Nakajima K., Ouchi M. (2014) Ionization state of inter-stellar medium in galaxies: evolution, SFR- M^* - Z dependence, and ionizing photon escape. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 442. 900—916.
32. Ouchi M., et al. (2009) Large area survey for $z = 7$ galaxies in SDF and GOODS-N: implications for galaxy formation and cosmic reionization. *Astrophys. J.* 706. 1136—1151.
33. Stark D. P. (2016) Galaxies in the first billion years after the Big Bang. *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 54. 761—803.
34. Thuan T. X., Martin G. E. (1981) Blue compact dwarf galaxies. I. Neutral hydrogen observations of 115 galaxies. *Astrophys. J.* 247. 823—848.
35. Vanzella E., Giavalisco M., Inoue A. K., et al. (2010) The Great Observatories Origins Deep Survey: constraints on the Lyman continuum escape fraction distribution of Lyman-break galaxies at $3.4 < z < 4.5$. *Astrophys. J.* 725. 1011—1031.
36. Vanzella E., Guo Y., Giavalisco M., et al. (2012) On the detection of ionizing radiation arising from star-forming galaxies at redshift $z \sim 3-4$: looking for analogs of “stellar re-ionizers”. *Astrophys. J.* 751. 70. 14.
37. Yang H., Malhotra S., Rhoads J. E., Wang J. (2017) Blueberry galaxies: the lowest mass young starbursts. *Astrophys. J.* 847. 38. 9.

*I. Y. Izotova*¹, *I. I. Izotov*²

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

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

LYC LEAKING GALAXIES: PROPERTIES IN THE MID-INFRARED RANGE BASED ON THE WISE SPACE TELESCOPE DATA

We study the photometric properties in the mid-infrared range of the sample of compact star-forming galaxies leaking radiation in the Lyman continuum (LyC) and Ly α line aiming to find characteristics which can be used as quantitative indicators of the escape fractions $f_{esc}(\text{Ly}\alpha)$ and $f_{esc}(\text{LyC})$. Possible relations are analysed between colour indices of galaxies in the mid-infrared range based on WISE data, on the one hand, and escape fractions of LyC and Ly α emission, on the other hand. We find dependencies of escape fractions $f_{esc}(\text{Ly}\alpha)$ and $f_{esc}(\text{LyC})$ on the colour index $W1 - W4$, where $W1$ and $W4$ are apparent WISE magnitudes at wavelengths 3.4 and 22 μm , respectively. This makes $W1 - W4$ useful quantitative characteristic for estimating of the escape fractions $f_{esc}(\text{Ly}\alpha)$ and $f_{esc}(\text{LyC})$ along with some characteristics of LyC leakers revealed earlier in the optical and UV ranges. Thus, emission of galaxies in the mid-infrared range can be used to search for candidates to LyC leaking galaxies for their future observations.

Key words: compact star-forming galaxies, LyC leaking galaxies, interstellar dust, infrared radiation.

Стаття надійшла до редакції 17.10.2022

Після доопрацювання 03.11.2022

Прийнята до друку 20.12.2022