

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.003>

УДК 524.7

І. Ю. Ізотова¹, Ю. І. Ізотов²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 60, Київ, Україна, 01601
ijzotova@ukr.net

²Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України
вул. Метрологічна 14б, Київ, Україна, 03043
yizotov@bitp.kiev.ua

Компактні галактики з активним зореутворенням з SDSS DR14: темпи зореутворення, визначені за комбінаціями світностей у різних діапазонах

У роботі наведено фізичні характеристики великої вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з огляду неба SDSS DR14. Вибірка включає понад 30 тисяч компактних ізольованих галактик з кутковими діаметрами менш ніж $6''$. У спектрах відібраних галактик спостерігаються емісійні лінії H з еквівалентними ширинами $EW(H) < 1$ нм. Зоряні маси галактик вибірки розподілено у широкому діапазоні від $10^5 M_{\odot}$ до $10^{11} M_{\odot}$, з максимумом розподілу на $10^9 M_{\odot}$. Вміст кисню $12 + \lg(O/H)$ визначено в діапазоні 7.8...8.2 для більшості галактик, з максимумом розподілу на 8.05. Компактні галактики характеризуються високим питомим темпом зореутворення, що сягає значень $10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ рік}^{-1}$. Спектральні дані SDSS для галактик вибірки було доповнено фотометричними даними про випромінювання у ближньому та дальньому ультрафіолетовому діапазоні і середньому інфрачервоному діапазоні на 22 мкм згідно оглядів неба GALEX та WISE відповідно. Для галактик вибірки було визначено темпи зореутворення, які для скорочення названі «композитними», при розрахунках яких використано комбінації двох з п'яти спостережуваних світностей: $L(H)$ в емісійній лінії H, ультрафіолетовому континуумі $L(FUV)$ та $L(NUV)$, континуумі в середньому інфрачервоному діапазоні $L(22 \text{ мкм})$, а також повної світності в інфрачервоному діапазоні $L(TIR)$. Проведено порівняння «композитних» темпів зореут-

ворення з темпами зореутворення, визначеними за світностями в емісійній лінії H α , які виправлені за екстинкцію і спектральну апертуру SDSS. Для вибірки компактних галактик з активним зореутворенням отримано залежності «композитних» темпів зореутворення від розглянутих індикаторів, що узгоджуються між собою та з темпами зореутворення SFR(H α), визначеними за світностями в лінії H α , відкоригованими за екстинкцію і спектральну апертуру.

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

ВСТУП

Темп зореутворення (SFR — star formation rate), який визначається як маса зір, утворених за одиницю часу, є важливою величиною, яка характеризує швидкість зростання маси зоряного компонента галактики, збагачення речовини галактики продуктами нуклеосинтезу, тепловий та іонізаційний стан міжзоряної речовини галактики.

Зазвичай в областях зореутворення відбувається формування зір у широкому діапазоні мас, який включає масивні зорі, що іонізують міжзоряне середовище, створюючи області іонізованого водню, у спектрах яких спостерігаються сильні рекомбінаційні лінії водню. Світності у лініях водню, як правило у лініях H α та H β , дають можливість визначити темп зореутворення, якщо зафіксовано характер (історію) зореутворення, наприклад неперервне з постійним темпом або спалахове зореутворення, початкову функцію мас (IMF).

Іншими індикаторами процесу зореутворення можуть бути випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні, інфрачервоне випромінювання пилу, що нагрівається молодим зоряним населенням, вільно-вільне (free-free) випромінювання у радіоконтинуумі. Залежності темпу зореутворення від світностей галактик у названих діапазонах вивчались, наприклад, у роботах [5, 9, 13, 18, 21, 25, 28]. Зазначимо, що світності у цих залежностях, як правило, є спостережними величинами. Лише в деяких випадках їх виправлено за екстинкцію.

Як уже відмічено, коефіцієнти в залежностях, які пов'язують світності галактик та темп зореутворення, залежать від низки факторів. Детальний аналіз впливу таких факторів, як вміст важких елементів, початкова функція мас, різні моделі еволюційного синтезу зоряного населення (EPS-моделі), на коефіцієнти у залежностях, що пов'язують світність галактики у вибраному діапазоні довжин хвиль та SFR, зроблено, наприклад, у роботі [27]. При визначенні темпу зореутворення за світністю в емісійній лінії H α коефіцієнт у відповідній їй залежності може змінюватись на 0.43...0.61 dex від зміни прийнятого вмісту важких елементів, при цьому він менше залежить від варіацій IMF (0.06...0.33 dex) та EPS-моделей (~0.2 dex). При визначенні SFR за

світністю в інфрачервоному діапазоні вплив прийняття різних EPS-моделей (~ 1.2 dex) на відповідний коефіцієнт удвічі більший, ніж вплив прийняття різних значень IMF (~ 0.3 dex) або вмісту важких елементів ($0.3 \dots 0.6$ dex). Для світності в ультрафіолетовому діапазоні як індикатора темпу зореутворення вплив ефектів EPS-моделей, IMF та вмісту важких елементів порівняно однаковий та становить приблизно 0.2 dex. Оцінки максимального впливу, отримані у роботі [27] для УФ-діапазону та лінії H як індикаторів зореутворення, у декілька разів вищі від аналогічних оцінок роботи [13].

Разом із залежностями, в яких SFR визначається за світністю в одній лінії чи смугі випромінювання, з'явилися такі, які пов'язують темп зореутворення з комбінацією світностей у двох діапазонах довжин хвиль, наприклад в ультрафіолетовому та інфрачервоному [8], в емісійній лінії H та інфрачервоному діапазоні [5, 15]. Перевага такого підходу полягає у тому, що при розрахунку темпу зореутворення враховується повне іонізаційне та неіонізаційне ультрафіолетове випромінювання — як те, що виходить за межі галактики, так і те, що було поглинуте пилом і перевипромінене. У цих залежностях використовується спостережувана світність, тобто світність без корекцій за екстинкцію. У літературі у контексті обговорення проблеми визначення темпу зореутворення в галактиках на основі композиції індикаторів — світностей в різних діапазонах — часто використовується термін «композитний» (див., наприклад, [8, 15]). Тому у подальшому для стислості викладення темп зореутворення в галактиках, який визначено за комбінацією світностей галактик у різних діапазонах, умовно називатимемо «композитним» темпом зореутворення.

В останні десятиріччя з використанням наземних та космічних телескопів було проведено спостереження декількох сотень нормальних галактик на невеликих червоних зміщеннях у широкому діапазоні довжин хвиль — від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного (наприклад, SINGS — SPITZER Nearby Galaxies Survey, SSGSS — спектральний огляд SPITZER-SDSS-GALEX), метою яких було детальне дослідження розподілу енергії у спектрах галактик та отримання залежностей темпів зореутворення від різних індикаторів, зокрема «композитних» [6, 14, 17, 19, 23].

У роботі [10] проведено дослідження властивостей компактних галактик з активним зореутворенням (CSFG-вибірка), інтегральні характеристики яких суттєво відрізняються від характеристик близьких нормальних галактик, але водночас багато у чому схожі з характеристиками галактик на великих червоних зміщеннях $z > 2$. Мета даної роботи — перевірити можливість використання для вибірки компактних галактик із зореутворенням (CSFG) залежностей між «композитними» темпами зореутворення та різними комбінаціями світностей, які отримано для близьких нормальних галактик [5, 8, 15], і у випадку їхньої відмінності отримати нові залежності для визначення SFR по вибірці. У роботі обговорюються критерії селекції вибірки CSFG і її

деякі характеристики та отримано оцінки «композитних» темпів зореутворення для вибірки CSFG.

ВИБІРКА КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ З SDSS DR14

Об'єкти до вибірки компактних галактик з активним зореутворенням (CSFG) було відібрано з 14-го випуску SDSS [1]. Вибірка включає приблизно 30000 галактик на червоних зміщеннях $z = 0...1$. Відбір галактик проводився на основі критеріїв, описаних у роботі [10]. Переважна частина відібраних галактик — компактні (з діаметрами менше $6''$) ізольовані об'єкти на відстанях, як правило, значно більших ніж 50 Мпк, навколо яких відсутні інші галактики. У спектрах усіх відібраних галактик лінія H δ спостерігається в емісії з еквівалентними ширинами $EW(H\delta) > 1$ нм, що свідчить про активне зореутворення і наявність гарячих масивних зір. Галактики вибірки на діагностичній діаграмі $[O III] \lambda 500.7/H\beta - [N II] \lambda 658.4/H\alpha$ [3] з демаркаційною кривою з [12] лежать в області галактик із зореутворенням, а не активних галактичних ядер. SDSS-спектри галактик використовувалися для визначення деяких інтегральних характеристик галактик, зокрема вмісту кисню $12 + \lg(O/H)$, світності $L(H\delta)$ в емісійній лінії H δ , маси зір M_{star} , темпу зореутворення $SFR(H\delta)$ і питомого темпу зореутворення $sSFR = SFR(H\delta)/M_{star}$. Відзначимо, що світності $L(H\delta)$ в лінії H δ для визначення $SFR(H\delta)$ було виправлено за повну міжзоряну екстинкцію, визначену як з урахуванням впливу Чумацького Шляху (за даними NED), так і власне галактики згідно з даними спостережуваного декременту емісійних ліній водню серії Бальмера. Корекції за спектральну апертуру були внесені шляхом порівняння повної зоряної величини об'єкта у смузі r і зоряної величини r_{ap} всередині спектральної апертури (за даними SDSS).

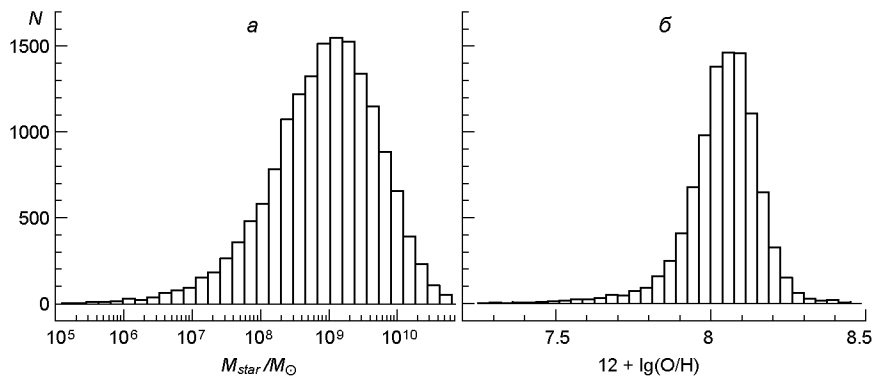


Рис. 1. Гістограми розподілів компактних галактик з активним зореутворенням з SDSS DR14: *a* — по значеннях маси зоряного компонента M_{star} ; *b* — по значеннях вмісту кисню $12 + \lg(O/H)$

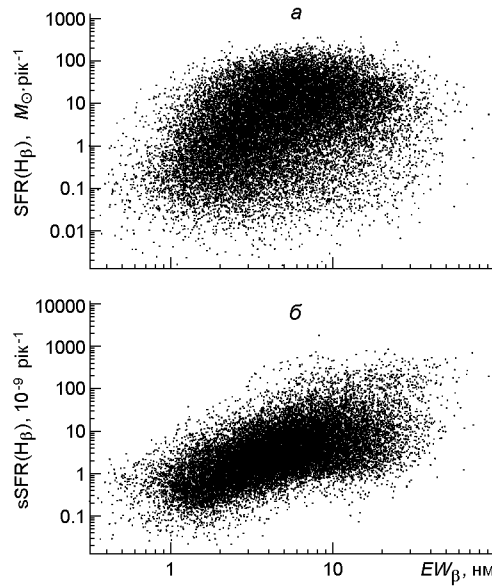


Рис. 2. Компактні галактики з активним зореутворенням з SDSS DR14: залежність від еквівалентної ширини $EW(H)$: a — темпу зореутворення $SFR(H)$; b — питомого темпу зореутворення $sSFR = SFR(H)/M_{star}$

Вибірку CSFG також було доповнено фотометричними даними у п'яти смугах u , g , r , i , z оптичного діапазону з SDSS, у двох смугах FUV і NUV ультрафіолетового діапазону за спостереженнями на космічному телескопі GALEX, а також в чотирьох смугах 3.4, 4.6, 12 і 22 мкм середнього інфрачервоного діапазону за спостереженнями на космічному телескопі WISE.

Деякі характеристики вибірки CSFG галактик з SDSS DR14 наведено на рис. 1 і 2. Отримано, що зоряні маси галактик вибірки розподілено в широкому діапазоні від $10^5 M_{\odot}$ до $10^{11} M_{\odot}$ з максимумом розподілу приблизно на $10^9 M_{\odot}$ (рис. 1а). Вміст кисню $12 + \lg(O/H)$ нижчий від сонячного і лежить в діапазоні 7.8...8.2 для більшості галактик з максимумом розподілу на 8.05 (рис. 1б).

Темп зореутворення галактик $SFR(H)$ було визначено згідно із залежністю [13], яку розраховано для моделі неперервного з постійним темпом зореутворення, сонячного вмісту кисню і початкової функції мас Солпітера [22] (діапазон мас зір $(0.1...100)M_{\odot}$), але помножено на 1.5 при використанні функції мас Кроупа [16] з нахилом -2.3 і -1.3 для мас зір у діапазонах $(0.5...100)M_{\odot}$ та $(0.1...0.5)M_{\odot}$ відповідно. Темпи зореутворення і еквівалентні ширини емісійної лінії H в компактних галактиках можуть сягати великих значень, понад $100 M_{\odot}/\text{рік}$ та більш ніж 10 нм відповідно, що вказує на активне поточне зореутворення (рис. 2а). Компактні галактики також характеризуються високим питомим темпом зореутворення, що сягає значень $sSFR = 10^{-8}...10^{-7} \text{ рік}^{-1}$. З цими значеннями sSFR повна зоряна маса галактики може бути сформована за 10...100 млн років (рис. 2б).

Відстані до галактик, що використовуються при розрахунках маси і світностей, визначено з червоних зміщень, з космологічними параметрами $H_0 = 67.1 \text{ км с}^{-1}\text{Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.682$, $\Omega_b = 0.318$ [2].

ТЕМПИ ЗОРЕУТВОРЕННЯ, ВИЗНАЧЕНІ ЗА КОМБІНАЦІЯМИ СВІТНОСТЕЙ У РІЗНИХ ДІАПАЗОНАХ

У роботах [4, 5, 8, 15] наведено залежності для визначення темпів зореутворення, в яких використовуються комбінації світностей галактик, отримані зі спостережень на космічних телескопах GALEX в ультрафіолетовому діапазоні на довжинах хвиль $\lambda = 145.0 \text{ нм}$ (FUV) і 220.0 нм (NUV) та SPITZER в інфрачервоному діапазоні на довжинах хвиль $\lambda = 3.6, 8, 24, 70$ і 160 мкм . Ці залежності було отримано для локальних нормальних галактик в рамках моделі неперервного з постійним темпом зореутворення, сонячного вмісту кисню та початкової функції мас Кроупа [16]. Наявність даних в широкому діапазоні інфрачервоного спектру дозволило авторам окрім монохроматичних світностей визначити повну світність в інфрачервоному діапазоні (TIR — total infrared). Крім того, було використано дані спектральних спостережень з широкою щільною для отримання повної світності в лінії H α . Ці дані і було покладено в основу залежностей між темпом зореутворення і комбінаціями світностей.

Однак для вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з SDSS DR14 практично немає даних спостережень з телескопа SPITZER. Тому замість світностей на довжині хвилі $\lambda = 24 \text{ мкм}$ ми використали значення світностей на довжині хвилі $\lambda = 22 \text{ мкм}$ за даними фотометричних спостережень на космічному телескопі WISE.

Заміна потоків випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 22 \text{ мкм}$ замість 24 мкм у залежностях для визначення «композитних» темпів зореутворення, отриманих в роботах [4, 5, 8, 15], вимагає обґрунтування і може бути здійснена лише за умови близькості потоків. Після отождолення галактик з огляду SPITZER Infrared Nearby Galaxies Survey (SINGS) [14] з даними спостережень місії WISE на основі даних робіт [5—7, 14, 24, 26] було розглянуто співвідношення потоків випромінювання на довжинах хвиль $\lambda = 22$ і 24 мкм для галактик з різним вмістом кисню. На рис. 3а наведено залежність між потоками випромінювання на довжинах хвиль $\lambda = 22$ і 24 мкм в галактиках з високим вмістом кисню $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.2$. Виявлено, що потоки випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 24 \text{ мкм}$ систематично перевищують потоки на $\lambda = 22 \text{ мкм}$, що можна пояснити низькою температурою пилу. З іншого боку, ці потоки випромінювання практично однакові в галактиках з $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ (рис. 3б). З огляду на те що більшість галактик у нашій вибірці має низький вміст кисню $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.2$ (рис. 1б), ми вважаємо прийнятним розглянути заміну потоків випро-

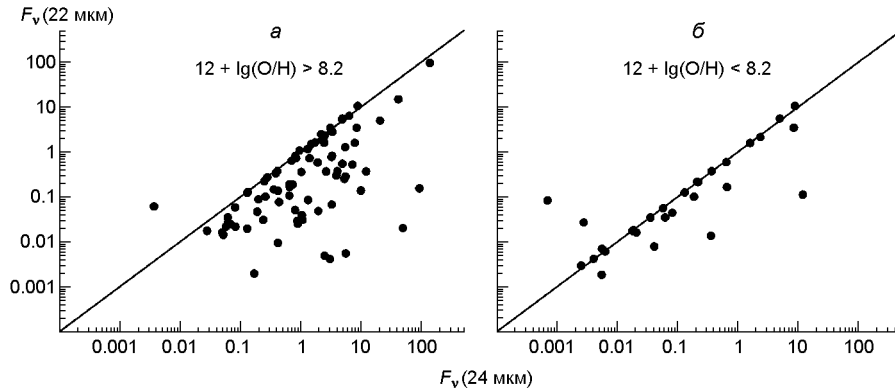


Рис. 3. Корелятивна залежність між потоками випромінювання на 24 мкм (дані SINGS) та 22 мкм (дані WISE) для галактик з вмістом кисню: *a* — $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.2$, *b* — $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.2$

мінювання на довжині хвилі 24 мкм на потоки на довжині хвилі 22 мкм у виразах для композитних темпів зореутворення з [4, 5, 8, 15].

У зв'язку з тим що для переважної більшості компактних галактик із зореутворенням відсутні дані про випромінювання на довжинах хвиль > 22 мкм, для визначення світностей в інфрачервоному діапазоні на 60, 100 мкм було використано кореляційні залежності відношення світностей $L(> 22 \text{ мкм})/L(= 22 \text{ мкм})$ від показника кольору $m(3.4 \text{ мкм}) - m(22 \text{ мкм})$ з роботи [11] для галактик даного типу. Для визначення потоків випромінювання на більших довжинах хвиль було використано кореляційні залежності з роботи [20]. Таким чином, повні TIR-світності випромінювання CSFG-галактик в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль $= 8 \dots 500$ мкм було отримано з використанням потоків випромінювання в середньому ІЧ-діапазоні за даними WISE, а також згаданих кореляційних залежностей.

Залежності для визначення «композитних» темпів зореутворення з робіт [5, 8, 15], які підсумовано в роботі [4], з урахуванням зазначених відмінностей було використано в такому вигляді:

$$\lg \text{SFR}(\text{FUV}, 22 \text{ мкм}) = \lg[L(\text{FUV})_{\text{obs}} + 3.89 L(22 \text{ мкм})] - 43.35, \quad (1)$$

$$\lg \text{SFR}(\text{NUV}, 22 \text{ мкм}) = \lg[L(\text{NUV})_{\text{obs}} + 2.26 L(22 \text{ мкм})] - 43.17, \quad (2)$$

$$\lg \text{SFR}(\text{H}, 22 \text{ мкм}) = \lg[L(\text{H})_{\text{obs}} + 0.031 L(22 \text{ мкм})] - 41.27, \quad (3)$$

$$\lg \text{SFR}(\text{FUV}, \text{TIR}) = \lg[L(\text{FUV})_{\text{obs}} + 0.46 L(\text{TIR})] - 43.35, \quad (4)$$

$$\lg \text{SFR}(\text{NUV}, \text{TIR}) = \lg[L(\text{NUV})_{\text{obs}} + 0.27 L(\text{TIR})] - 43.17, \quad (5)$$

$$\lg \text{SFR}(\text{H}, \text{TIR}) = \lg[L(\text{H})_{\text{obs}} + 0.0024 L(\text{TIR})] - 41.27, \quad (6)$$

де $L(\text{FUV}) = L = (145 \text{ нм}) L_{145}$, $L(\text{NUV}) = L = (220 \text{ нм}) L_{220}$, $L(22 \text{ мкм}) = L = (22 \text{ мкм}) L_{22}$, а L — монохроматичні світності в

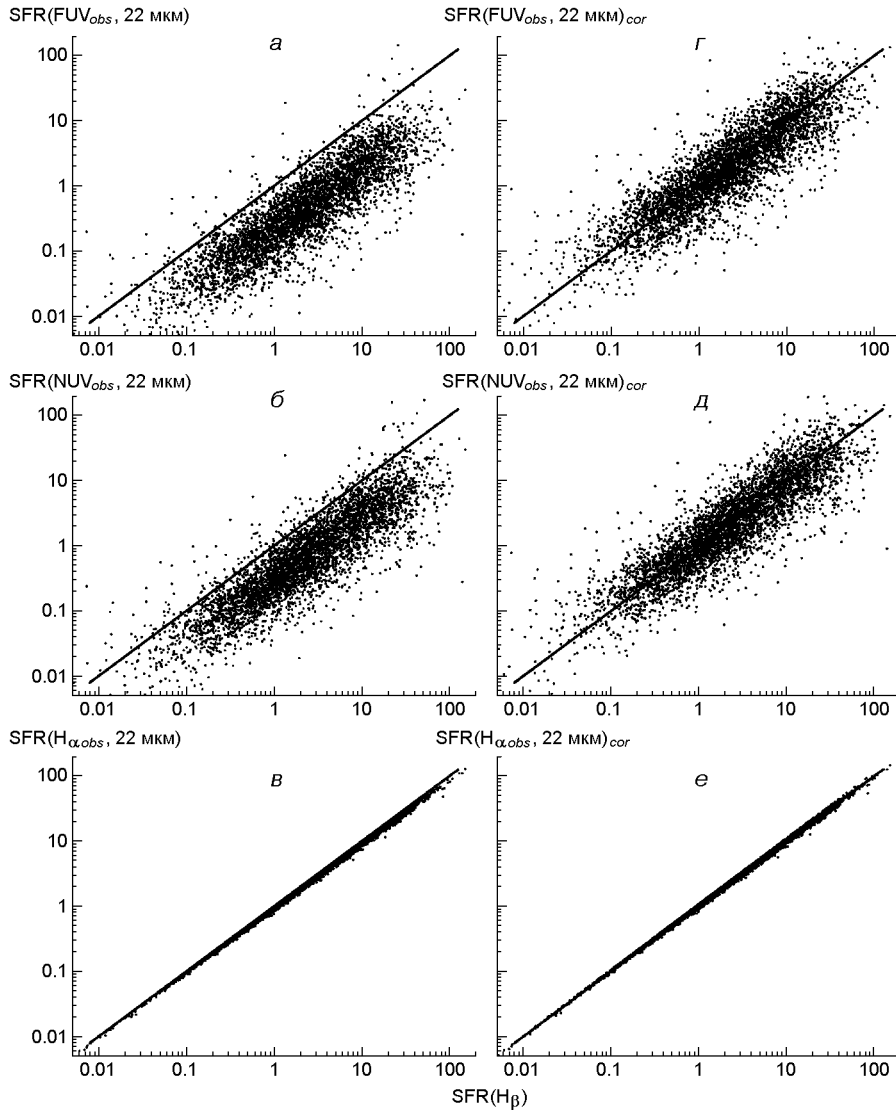


Рис. 4. Ліворуч — корелятивні залежності «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV_{obs}, 22 \text{ мкм})$, $SFR(NUV_{obs}, 22 \text{ мкм})$ та $SFR(H_{obs}, 22 \text{ мкм})$, розрахованих за формулами (1)—(3), від темпів зореутворення $SFR(H)$, отриманих за світностями в лінії H , з належним врахуванням екстинкції та спектральної апертури, для CSFG-галактик з SDSS DR14. Праворуч — залежності від $SFR(H)$ «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV_{obs}, 22 \text{ мкм})_{cor}$, $SFR(NUV_{obs}, 22 \text{ мкм})_{cor}$ і $SFR(H_{obs}, 22 \text{ мкм})_{cor}$, розрахованих за формулами (7)—(9) та відкоригованих таким чином, щоб вони дорівнювали темпам зореутворення, отриманим за світністю в лінії H (суцільні лінії — лінії рівних значень)

одинарних $\text{erg s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ для FUV і NUV та в $\text{erg s}^{-1} \text{mkm}^{-1}$ для 22 мкм. Відзначимо, що світності в УФ-діапазоні та в лінії H в рівняннях (1)—(6) не виправлено за екстинкцію, тоді як в інфрачервоному діапазоні екстинкція незначна, і немає необхідності її враховувати.

На рис. 4а—4в для вибірки компактних галактик з SDSS наведено залежності «композитних» темпів зореутворення, отриманих з вико-

ристанням рівнянь (1)—(3), від темпу зореутворення $SFR(H\beta)$, отриманого за світністю в лінії $H\beta$. Як уже зазначалося, світності $L(H\beta)$ виправлено за екстинкцію та спектральну апертуру SDSS. Темп зореутворення $SFR(H\beta)$ в лінії $H\beta$ було отримано згідно з роботою [13] з урахуванням відношення $L(H\beta)/L(H\alpha) = 2.8$ і корекційного множника за спектральну апертуру $2.5^{r_{\text{ан}} - r}$, де $r_{\text{ан}}$ — зоряні величини всередині спектральної апертури, r — повні зоряні величини, наведені у базі даних SDSS. На рис. 4а—4в суцільна пряма — лінія рівних значень.

Компактні галактики з SDSS на рис. 4а—4в розташовані нижче лінії рівних значень темпів зореутворення, визначених за комбінацією спостережуваних світностей галактик, та темпів зореутворення, визначених за світністю в лінії $H\beta$. Причиною цього, ймовірно, можуть бути відмінності фізичних характеристик близьких галактик, для яких в роботах [4, 5, 8, 15] отримано залежності для розрахунку «композитних» темпів зореутворення, та компактних галактик з SDSS. У першому випадку галактики мають велику масу зір $M_{\text{star}} = (10^{10} \dots 10^{11}) M_{\odot}$, високий вміст кисню $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.3 \dots 8.6$, а тому і велику кількість пилу, а також відносно невисокі темпи зореутворення [4]. З іншого боку, компактні галактики з SDSS розподілені в широкому діапазоні $M_{\text{star}} = (10^5 \dots 10^{11}) M_{\odot}$ (рис. 1а), з характерним вмістом кисню $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.0$ (рис. 1б), високими темпами зореутворення $SFR = 10 \dots 100 M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$ та великими значеннями еквівалентної ширини лінії $H\beta$ для значної частини галактик (рис. 2а). На рис. 2б показано залежність питомого темпу зореутворення $sSFR$ від $EW(H\beta)$ для компактних галактик з SDSS. Середнє значення розподілу становить близько 10^{-8} рік^{-1} , що на два порядки вище, ніж характерні $sSFR \sim 10^{-10} \text{ рік}^{-1}$ для галактик, які розглядаються в роботах [4, 5, 8, 15]. Ці відмінності призводять до різних розподілів спостережуваних світностей на різних довжинах хвиль в цих двох типах галактик, наприклад через більше поглинання пилом ультрафіолетового випромінювання в нормальних галактиках і більшу температуру пилу в компактних галактиках через інтенсивніше ультрафіолетове випромінювання.

Привертає увагу той факт, що галактики на рис. 4в розташовані дуже близько до лінії рівних значень з дуже малим розкидом. Це може бути зумовлено двома причинами: 1) на обох осях відкладено величини, пов'язані зі світностями у лініях водню; 2) екстинкція в галактиках з нашої вибірки мала, тому корекція за неї призводить до незначних змін світності ліній водню.

У даній роботі шляхом мінімізації відхилень від ліній рівних значень темпів зореутворення введено поправки до рівнянь (1)—(3), які базуються на залежностях, отриманих у [4, 5, 8, 15], таким чином, щоб в компактних галактиках з SDSS «композитні» темпи зореутворення, які визначено з урахуванням світності на довжині хвилі 22 мкм, були рівними значенням темпів зореутворення, отриманим за світностями в лінії $H\beta$, виправленими за екстинкцію і спектральну апертуру. Відкориговані залежності (1)—(3) отримано у вигляді:

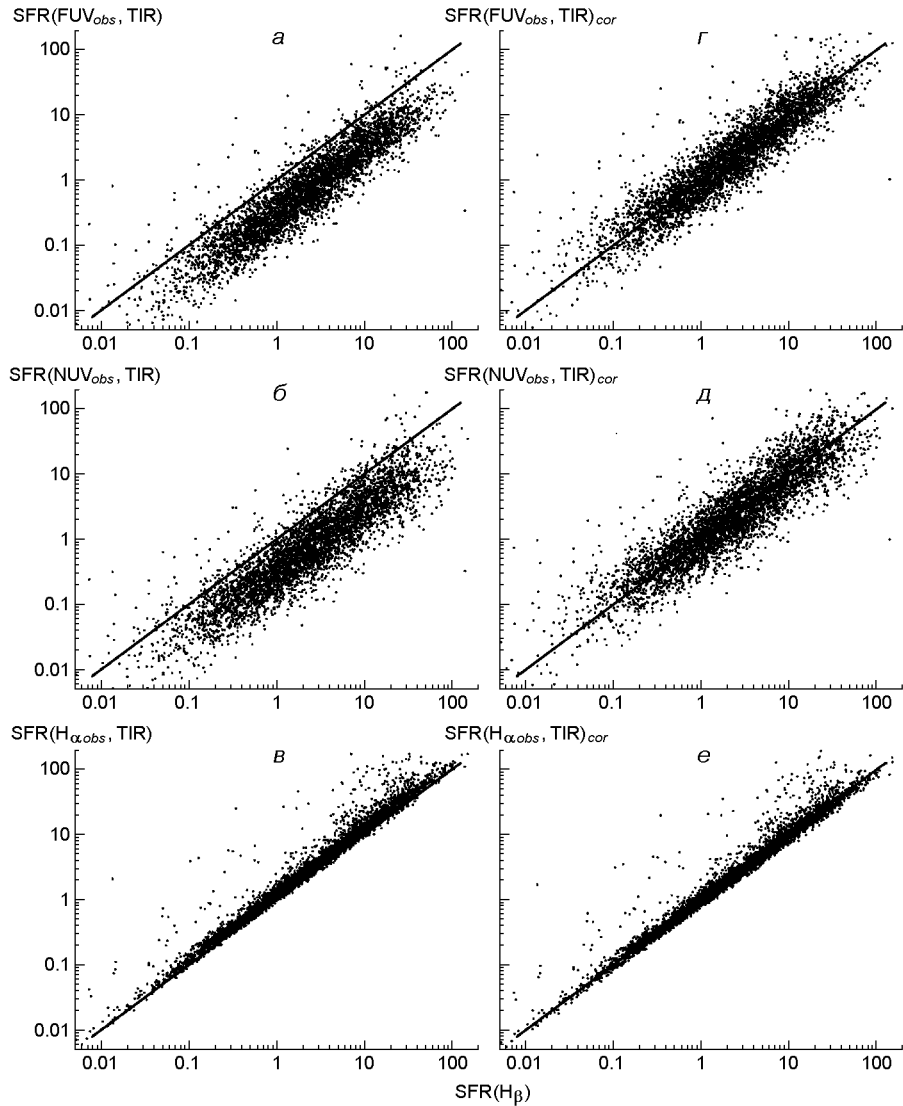


Рис. 5. Ліворуч — корелятивні залежності «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV_{obs}, TIR)$, $SFR(NUV_{obs}, TIR)$ і $SFR(H_{\alpha,obs}, TIR)$, розрахованих за формулами (4)—(6), від темпів зореутворення $SFR(H_{\beta})$, отриманих за світностями в лінії H, з належним врахуванням екстинкції та спектральної апертури, для CSFG-галактик з SDSS DR14. Праворуч — залежності від $SFR(H_{\beta})$ «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV_{obs}, TIR)_{cor}$, $SFR(NUV_{obs}, TIR)_{cor}$ і $SFR(H_{\alpha,obs}, TIR)_{cor}$, розрахованих за формулами (10)—(12) і відкоригованих таким чином, щоб бути рівними темпам зореутворення в лінії H (суцільні лінії — лінії рівних значень)

$$\lg SFR(FUV, 22 \text{ мкм})_{cor} = \lg[L(FUV)_{obs} + 3.89L(22 \text{ мкм})] - 42.70, \quad (7)$$

$$\lg SFR(NUV, 22 \text{ мкм})_{cor} = \lg[L(NUV)_{obs} + 2.26L(22 \text{ мкм})] - 42.66, \quad (8)$$

$$\lg SFR(H_{\alpha}, 22 \text{ мкм})_{cor} = 1.01 \lg[L(H_{\alpha})_{obs} + 0.031L(22 \text{ мкм})] - 41.25. \quad (9)$$

На рис. 4a—4e наведено розподіли компактних галактик з SDSS DR14 на залежностях «композитний» темп зореутворення — темп

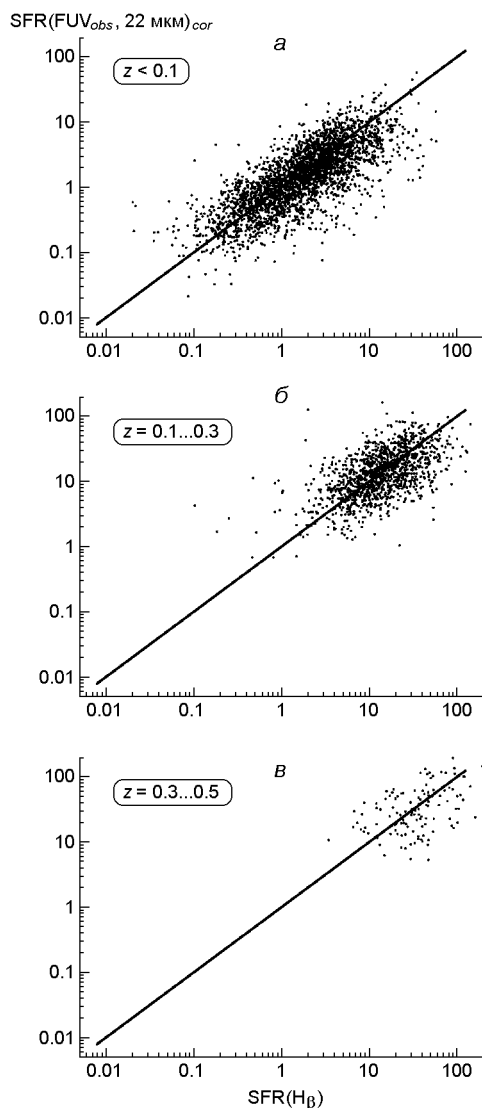


Рис. 6. Залежності відкоригованих «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV_{obs}, 22 \text{ мкм})_{cor}$ від темпів зореутворення $SFR(H\beta)$ для CSFG-галактик в різних діапазонах червоних зміщень

зореутворення $SFR(H\beta)$ з урахуванням відкоригованих рівнянь. Спостерігається добре узгодження темпів зореутворення, визначених за різними індикаторами — монохроматичним та композитними.

Подібні розподіли «композитних» темпів зореутворення, визначених з використанням повної світності в інфрачервоному діапазоні $L(TIR)$ згідно з рівняннями (4)—(6), які базуються на залежностях [4, 5, 8, 15], наведено на рис. 5а—5в, де світності в лінії H також виправлено за екстинкцію і спектральну апертуру. Як і у випадку «композитних» темпів зореутворення, визначених з урахуванням світності на довжині хвилі 22 мкм (рис. 4а—4в), спостерігається систематичне

зміщення положень компактних галактик з SDSS відносно ліній рівних значень темпів зореутворення, позначених суцільними прямими.

Подібно до поправок до «композитних» темпів зореутворення, отриманих з використанням світностей на довжині 22 мкм, введено поправки до «композитних» темпів зореутворення, визначених з використанням повної світності $L(\text{TIR})$ в інфрачервоному діапазоні. В результаті отримано такі залежності для визначення відкоригованих «композитних» темпів зореутворення:

$$\lg\text{SFR}(\text{FUV}, \text{TIR})_{\text{cor}} = 0.98\lg[L(\text{FUV})_{\text{obs}} + 0.10 L(\text{TIR})] - 42.81, \quad (10)$$

$$\lg\text{SFR}(\text{NUV}, \text{TIR})_{\text{cor}} = 0.99\lg[L(\text{NUV})_{\text{obs}} + 0.02 L(\text{TIR})] - 42.66, \quad (11)$$

$$\lg\text{SFR}(\text{H}, \text{TIR})_{\text{cor}} = 0.98\lg[L(\text{H})_{\text{obs}} + 0.0024 L(\text{TIR})] - 41.33. \quad (12)$$

Для відкоригованих визначень «композитних» темпів зореутворення розподіл CSFG-галактик на залежностях «композитний» темп зореутворення — темп зореутворення $\text{SFR}(\text{H})$ наведено на рис. 5а—5е. Положення CSFG-галактик добре описується лініями рівних значень «композитних» темпів зореутворення і темпів зореутворення, отриманих з використанням світності в лінії H.

В принципі спостережувані монохроматичні світності в FUV, NUV і на довжині хвилі 22 мкм повинні залежати від червоного зміщення, оскільки в цьому випадку в смуги пропускання зазначених діапазонів потрапляють інші ділянки спектра в системі спокою. Наприклад, у роботі [4] відзначено, що цей ефект в середньому інфрачервоному діапазоні може сягати до 30 %. Нехтування залежності спостережуваних монохроматичних світностей від червоного зміщення може вплинути як на саму величину, так і розкид значень обчислюваних темпів зореутворення.

Компактні галактики з SDSS, досліджувані в цій роботі, мають червоні зміщення у діапазоні $z = 0 \dots 1$. Щоб з'ясувати вплив червоних зміщень на визначення «композитних» темпів зореутворення, розглянемо розподіл галактик на залежності $\text{SFR}(\text{FUV}, 22 \text{ мкм})_{\text{cor}}$ — $\text{SFR}(\text{H})$, поділивши вибірку на три підвибірки на червоних зміщеннях $z < 0.1$, $z = 0.1 \dots 0.3$ та $z = 0.3 \dots 0.5$ (рис. 6). Як видно, немає систематичного відхилення положення CSFG-галактик від лінії рівних значень темпів зореутворення в усіх інтервалах червоного зміщення від $z = 0.0$ до 0.5 . Це свідчить про невеликий вплив червоного зміщення на визначення «композитних» темпів зореутворення для галактик вибірки. Однак на більших червоних зміщеннях ефект може бути суттєвим. На жаль, ми не можемо цього перевірити через незначну кількість компактних галактик на $z > 0.5$.

ВИСНОВКИ

У роботі наведено фізичні характеристики великої вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з 14-го випуску огляду неба

SDSS та визначено темпи зореутворення, названі для стислості «композитними», при розрахунках яких використано комбінації двох з п'яти спостережуваних світностей: $L(H)$ в емісійній лінії H , ультрафіолетовому континуумі $L(FUV)$ та $L(NUV)$, континуумі в середньому інфрачервоному діапазоні $L(22 \text{ мкм})$, а також повної світності в інфрачервоному діапазоні $L(TIR)$. Проведено порівняння «композитних» темпів зореутворення з темпами зореутворення, визначеними за світностями в емісійній лінії H , виправленими за екстинкцію і спектральну апертуру SDSS.

Основні результати проведеного дослідження такі.

1. Показано, що у компактних галактиках з активним зореутворенням в разі використання для визначення «композитних» темпів зореутворення залежностей з [4, 5, 8, 15], отриманих для локальних нормальних галактик, на залежностях «композитний» темп зореутворення — темп зореутворення $SFR(H)$, де $SFR(H)$ розраховано за світністю в лінії H з урахуванням корекцій за екстинкцію і спектральну апертуру, положення компактних галактик систематично зміщені відносно лінії рівних значень SFR у бік менших значень «композитних» темпів зореутворення при фіксованому значенні темпу зореутворення, визначеного за світністю в лінії H . Зроблено висновок, що таке зміщення може бути пов'язане з відмінностями у фізичних характеристиках близьких нормальних галактик, яким притаманні великі маси, високий вміст кисню, а також низькі темп і ефективність зореутворення, і компактних галактик з SDSS, у яких маси на порядок менші, вміст кисню $12 + \lg(O/H)$ на 0.3...0.5 нижчий, а ефективності зореутворення на два порядки вищі.

2. Для вибірки компактних галактик з активним зореутворенням на основі виразів з робіт [4, 5, 8, 15] отримано залежності для розрахунку «композитних» темпів зореутворення $SFR(FUV, 22 \text{ мкм})_{cor}$, $SFR(NUV, 22 \text{ мкм})_{cor}$, $SFR(H, 22 \text{ мкм})_{cor}$, $SFR(FUV, TIR)_{cor}$, $SFR(NUV, TIR)_{cor}$, $SFR(H, TIR)_{cor}$, які узгоджуються між собою та з темпами зореутворення $SFR(H)$, визначеними за світностями в лінії H , відкоригованими за екстинкцію і спектральну апертуру.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

І.І. виконувала роботу у рамках програми “Астрономія та фізика космосу” Київського національного університету імені Тараса Шевченка (тема 19БФ023-01). У публікації використано дані спостережень Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), 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. В роботі використано дані NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), яка адмініструється the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, у контракті з the National Aeronautics and Space Administration.

GALEX є місією NASA, яка адмініструється the Jet Propulsion Laboratory.

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. SDSS-III адмініструється 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, Yale University.

REFERENCES

1. Abolfathi B., Aguado D. S., Aguilar G., et al. (2018) The fourteenth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First spectroscopic data from the extended baryon oscillation spectroscopic survey and from the second phase of the Apache Point Observatory galactic evolution experiment. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 235. 42. 19.
2. Ade P. A. R., Aghanim N., Armitage-Caplan C., et al. (2014) Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron. and Astrophys.* 571. 16. 66.
3. Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. (1981) Classification parameters for the emission line spectra of extragalactic objects. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 93. 5—19.
4. 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.
5. 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.
6. Dale D.A., Bendo G. J., Engelbracht C. W., et al. (2005) Infrared spectral energy distributions of nearby galaxies. *Astrophys. J.* 633. 857—870.
7. Engelbracht C. W., Rieke G. H., Gordon K. D., et al. (2008) Metallicity effects on dust properties in starbursting galaxies. *Astrophys. J.* 678. 804—827.
8. Hao C.-N., Kennicutt R. C., Jr., Johnson B. D., et al. (2011) Dust-corrected star formation rates of galaxies. II. Combinations of ultraviolet and infrared tracers. *Astrophys. J.* 741. 124. 22.
9. Iglesias-Paramo J., Buat V., Takeuchi T. T., et al. (2006) Star formation in the nearby universe: the ultraviolet and infrared points of view. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 164. 38—51.

* <http://www.sdss3.org/>

10. 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. 33. 30.
11. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., et al. (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.
12. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., et al. (2003) The host galaxies of active galactic nuclei. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 346. 1055—1077.
13. Kennicutt R. C., Jr. (1998) Star formation in galaxies along the Hubble sequence. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 36. 189—231.
14. Kennicutt R. C., Jr., Armus L., Bendo G., et al. (2003) SINGS: the SIRTf nearby galaxies survey. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 115. 928—952.
15. Kennicutt R. C., Jr., Hao C.-N., Calzetti D., et al. (2009) Dust-corrected star formation rates of galaxies. I. Combinations of H α and infrared tracers. *Astrophys. J.* 703. 1672—1695.
16. Kroupa P. (2001) On the variation of the initial mass function. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 322. 231—246.
17. Lonsdale C. J., Smith H. E., Rowan-Robinson M., et al. (2003) SWIRE: The SIRTf wide-area infrared extragalactic survey. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 115. 897—927.
18. Murphy E. J., Condon J. J., Schinnerer E., et al. (2011) Calibrating extinction-free star formation rate diagnostics with 33 GHz free-free emission in NGC6946. *Astrophys. J.* 737. 67. 16.
19. O’Dowd M. J., Schiminovich D., Johnson B. D., et al. (2011) SSGSS: The Spitzer-SDSS-GALEX spectroscopic survey. *Astrophys. J.* 741. 79. 39.
20. Rémy-Ruyer A., Madden S. C., Galliano F., et al. (2013) Revealing the cold dust in low-metallicity environments. I. Photometry analysis of the Dwarf Galaxy Survey with Herschel. *Astron. and Astrophys.* 557. 95. 32.
21. Rieke G. H., Alonso-Herrero A., Weiner B. J., et al. (2009) Determining star formation rates for infrared galaxies. *Astrophys. J.* 692. 556—573.
22. Salpeter E. E. (1955) The luminosity function and stellar evolution. *Astrophys. J.* 121. 161—167.
23. Treyer M., Schiminovich D., Johnson B. D., et al. (2005) Mid-infrared spectral indicators of star formation and active galactic nucleus activity in normal galaxies. *Astrophys. J.* 719. 1191—1211.
24. Walter F., Cannon J. M., Roussel H., et al. (2007) Dust and atomic gas in dwarf irregular galaxies of the M81 Group: the SINGS and THINGS view. *Astrophys. J.* 661. 102—114.
25. Wu H., Cao C., Hao C.-N., Liu F.-S., et al. (2005) PAH and mid-infrared luminosities as measures of star formation rate in SPITZER First Look Survey galaxies. *Astrophys. J. Lett.* 632. L79—L82.
26. Wu Y., Charmandaris V., Hao L., et al. (2006) Mid-infrared properties of low-metallicity blue compact dwarf galaxies from the SPITZER infrared spectrograph. *Astrophys. J.* 639. 157—172.
27. Zhang F., Li L., Kang X., et al. (2013) Uncertainties in the calibrations of star formation rate. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 433. 1039—1053.
28. 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. Izotova*¹, *Y. 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

COMPACT GALAXIES WITH ACTIVE STAR FORMATION FROM SDSS DR14:
STAR FORMATION RATES DERIVED FROM COMBINATIONS
OF LUMINOSITIES IN DIFFERENT WAVELENGTH RANGES

Physical characteristics of large sample of compact galaxies with active star formation from the SDSS DR14 are derived. The sample includes about 30000 compact isolated galaxies with angular diameters $\leq 6''$. The emission lines H δ with equivalent widths $EW(H\delta) \geq 1$ nm are observed in the spectra of selected galaxies. The stellar masses of compact galaxies are distributed in the wide range from $10^5 M_\odot$ to $10^{11} M_\odot$ with a maximum at $\sim 10^9 M_\odot$. The oxygen abundances for the bulk of compact galaxies are distributed in the range 7.8...8.2 with a maximum at ~ 8.05 . Compact galaxies are characterized with high specific star formation rates of 10...100 Gyr^{-1} . The SDSS spectroscopic data were supplemented by photometric data in the far- and near-ultraviolet ranges from the GALEX and in the mid-infrared range at 22 μm from the WISE all-sky surveys. We determine the star formation rate, concisely named "composite" one, using combinations of two out of five observed luminosities: luminosity $L(H\delta)$ in the emission line H δ , monochromatic luminosities in the ultraviolet continuum $L(\text{FUV})$ and $L(\text{NUV})$ and in the mid-infrared continuum $L(22 \mu\text{m})$, as well as the total luminosities in the infrared range $L(\text{TIR})$. "Composite" star formation rates in compact galaxies with active star formation are compared with those determined from the extinction- and spectral aperture-corrected luminosities of galaxies in the hydrogen emission line H α . We obtain relations for "composite" star formation rates with different combinations of indicators, which are mutually consistent and correspond to star formation rates derived from the luminosities of galaxies in the hydrogen emission line H α corrected for extinction and spectral aperture.
Key words: dwarf star-forming galaxies, galaxy H II regions, interstellar dust, ultraviolet and infrared emission.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2020

Після доопрацювання 30.11.2020

Прийнята до друку 17.12.2020