

УДК 524.7

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
І. Ізотова, канд. фіз.-мат. наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СПЕКТРАЛЬНИЙ ІНДЕКС ВИПРОМІНЮВАННЯ У РАДІОКОНТИНУУМІ 140 МГц – 1,4 ГГц КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ

Проведено ототожнення вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з об'єктами каталогів радіоджерел. Для галактик з відомими потоками випромінювання в радіоконтинуумі на частотах 1,4 ГГц за даними FIRST або NVSS та в діапазоні 120–168 МГц за даними LOFAR, а також у емісійних лініях водню, оцінено спектральний індекс, а також спектральний індекс нетеплового випромінювання для цих частот. Отримано значення спектральних індексів, які притаманні плоским спектрам. Обговорюються можливі причини отримання такого результату.

Ключові слова: галактики з активним зореутворенням, випромінювання у радіоконтинуумі, теплове випромінювання, спектральний індекс.

Вступ. Робота є продовженням мультимасштабних досліджень, зокрема у радіоконтинуумі, вибірок галактик з активним зореутворенням. Свідченням процесів зореутворення, усереднених на різних масштабах часу, у таких галактик є випромінювання в емісійних лініях водню (H α та H β), радіо- та ультрафіолетовому континуумі, а також середньому і далекому інфрачервоному діапазонах. Вона базується на результатах, отриманих у попередніх роботах [1–3], для вибірки компактних галактик з активним зореутворенням (CSFGs), яка детально описана у [4]. Це вибірка виключно галактик з активним зореутворенням, що підтверджується їх положенням на діагностичній діаграмі [O III] λ 5007Å/H β λ 4861Å – [N II] λ 6583/ H α λ 6563 Å, і вона не включає об'єкти зі спектральними ознаками наявності активних галактичних ядер (відсутні об'єкти із широкими емісійними лініями, як у спектрах галактик Sy1, та лініями високої іонізації [Ne V] λ 3485 Å і He II λ 4686 Å, як у спектрах Sy2). Важливими для дослідження характерними особливостями галактик вибірки є компактність об'єктів, еквівалентна ширина емісійної лінії H β в областях іонізованого водню EW(H β) \geq 10 Å та наявність зареєстрованої лінії [O III] λ 4363 Å (з похибкою у визначенні потоку у лінії < 50 % величини) для надійного визначення вмісту важких елементів.

У роботах [1–2] проведено дослідження випромінювання у радіоконтинуумі на 1.4 ГГц двох різних вибірок галактик з активним зореутворенням. Для 52 галактик великої світності за випромінюванням у радіоконтинуумі визначено темп зореутворення (0.85–114 M \odot рік $^{-1}$, медіана 10.4 M \odot рік $^{-1}$). За значеннями світності в емісійній лінії H α , скорегованій за екстинкцію та спектральну апертуру SDSS також розраховано частку теплового (free-free) компонента у загальному випромінюванні у радіоконтинуумі на 1.4 ГГц і показано, що її розподіл близький до нормального, а медіанне значення складає 15–17 %. Для 193 компактних галактик з вибірки CSFGs отримано близький результат (медіана 6 % та 14 % для двох різних варіантів корекції світності в емісійній лінії H α).

Випромінювання галактик у радіодіапазоні. Випромінювання галактик у радіоконтинуумі є переважно нетепловим, хоча і має, як показують дослідження, незначний тепловий (free-free) компонент. Кожний із чинників теплового чи нетеплового випромінювання у радіоконтинуумі має свій спектр, і його можна представити у вигляді (тут S – густина потоку радіовипромінювання)

$$S(\nu) = S_T(\nu) + S_{NT}(\nu) \quad (1)$$

де індекси T та NT відповідають тепловому та нетепловому компонентам випромінювання, відповідно.

Останній, зокрема, складається з синхротронного випромінювання від активних галактичних ядер. За їхньої відсутності, випромінювання галактик у радіоконтинуумі теж має переважно нетеплове походження, але воно обумовлене випромінюванням релятивістських електронів у залишках наднових зір, які у свою чергу є результатом еволюції зір із масами понад 8 M \odot , які іонізують HII області. У цьому контексті випромінювання галактик у радіоконтинуумі пов'язано з процесами зореутворення на масштабах часу, що співвідносяться із часом еволюції таких масивних зір (близько \leq 3 \cdot 10 7 років) та ймовірним часом життя релятивістських електронів (близько \leq 10 8 років) [5]. Відтак є значна низка робіт, у яких для галактик різних вибірок досліджується зв'язок випромінювання у радіоконтинуумі, зокрема на 1.4 ГГц та інших діапазонах, які є індикаторами процесів зореутворення, та визначається швидкість зореутворення, причому світність L $_{1.4\text{GHz}}$ може використовуватись і як окремий індикатор, і входити у комбінацію з іншими (лише за останні 20 років див., наприклад [6–12] та наведені там посилання).

Спектральний індекс. Зазвичай спектр густини потоку випромінювання S(ν) апроксимується степеневу функцією частоти ν :

$$S(\nu) = S_0 \nu^\alpha, \quad (2)$$

де константа α – це так званий спектральний індекс. Якщо відомі густини потоків на двох частотах, спектральний індекс можна розрахувати таким чином:

$$\alpha = \frac{\lg(S(\nu_1)) - \lg(S(\nu_2))}{\lg(\nu_1) - \lg(\nu_2)}. \quad (3)$$

Величина α зветься спектральним індексом для інтервалу частот ν_1 – ν_2 . Якщо відомо густини потоків випромінювання об'єкта для більш ніж двох частот, то усереднюють отримані індекси для певних інтервалів частот, або вираз (1) використовується для апроксимації даних. Приклад застосування такого методу наведено далі.

У роботах [13–14] проведено дослідження випромінювання у радіоконтинуумі на λ 6.3 см деяких блакитних компактних карликових галактик (BCDGs). Для окремих галактик із вибірки додатково отримано густини потоків випромінювання у континуумі на λ 2.8 см, 1.2 см. Для дослідження спектрального індексу галактик вибірки також залучено опубліковані дані. Для 14 BCDGs (повна вибірка 52 BCDGs) отримано, що середній спектральний індекс α

(густина потоку $S_\nu \sim \nu^\alpha$) складає $\langle \alpha \rangle = -0.33 \pm 0.05$, і їхній спектр більш плаский, ніж у нормальних галактик порівняння, де $\langle \alpha \rangle = -0.75 \pm 0.05$ [13].

Повернемося до виразу (3). Спектр нетеплового компонента випромінювання представимо у вигляді на кшталт виразу (1), а саме $S_{NT}(\nu) \propto \nu^{\alpha_{NT}}$, де α_{NT} – спектральний індекс нетеплового випромінювання.

Спектр теплового випромінювання можна оцінити за розрахунками з [15]. Відношення потоків теплового компонента випромінювання у радіоконтинуумі й у емісійній лінії H β можна розрахувати залежно від конкретних параметрів, якщо для опису фізичного стану області іонізованого водню реалізується так званий випадок B, електронна густина середовища становить 100 cm^{-3} , а густина He $^+$ складає 8.1 % густини протонів. Такі характеристики є типовими для вибірки досліджень – компактних галактик з активним зореутворенням. Більш грубо можна вважати, що у радіодіапазоні спектральний індекс теплового компонента випромінювання $\alpha_T = -0.1$ [14].

$$S_T(\nu) = S_T(1.4\text{GHz}) \left(\frac{\nu}{1.4\text{GHz}} \right)^{-0.1}, \quad S_{NT}(\nu) \propto \nu^{\alpha_{NT}}. \quad (4)$$

Для того, щоб визначити спектральний індекс для нетеплового випромінювання у радіоконтинуумі конкретної галактики, потрібно не тільки мати густину потоків випромінювання у різних частотах, але і розділяти тепловий і нетепловий компоненти. Це можна зробити за опрацювання даних випромінювання для мінімум трьох різних частот, використовуючи апроксимацію даних залежностями (1), (4) для визначення трьох вільних параметрів, що сюди входять, а саме густину потоків теплового та нетеплового випромінювання на певній частоті та α_{NT} .

У цій роботі визначено спектральний індекс випромінювання переважно з використанням даних спостережень на мережах із високим кутовим розділенням FIRST, NVSS та LOFAR. Про Very Large Array (VLA) огляди неба FIRST (Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters) [16] та NVSS (NRAO-VLA Sky Survey) [17], що виконані у континуумі на довжині хвилі $\sim 20 \text{ cm}$ (1.4 ГГц), детально йшлося у роботі [2].

LOFAR Two-metre Sky Survey (LoTSS) – огляд неба високої чутливості та роздільної здатності на 120–168 МГц, перші отримані дані якого представлено у [18], з наведеними посиланнями, де повідомляється про проведення спостережень області неба площею 424 кв. град. (HETDEX Spring Field, пряме сходження від 10h45m00s до 15h30m00s та схилення від 45°00'00" до 57°00'00"), зареєстровано 325 694 радіоджерела з відношенням сигнал/шум > 5 , значення медіани чутливості – $S_{144\text{MHz}} = 71 \text{ мЯн}/(\text{beam})$, а повнота огляду точкових джерел становить 90 % для інтегральної густини потоку 0.45 мЯн. Роздільна здатність зображень складає 6", а точність визначення координат у межах 0.2". У роботі [18] описано каталог, який містить, зокрема, координати об'єкта та густину потоку випромінювання.

Ототожнення. Перехресне ототожнення об'єктів вибірки [4] з даними випромінювання у радіоконтинуумі з різних каталогів, зокрема каталогів FIRST, NVSS та LOFAR, було проведено з використанням бази даних VizieR (див. опис [19]). Пошук позиційних партнерів проведено з граничною кутовою відстанню $\leq 15''$.

Лише у незначній кількості CSFG галактик було виявлено потенційних кандидатів у радіопартнери, для яких є дані про випромінювання у континуумі принаймні на двох частотах. Потенційних кандидатів у радіопартнери оптичних джерел було візуально перевірено на пошукових картах огляду SDSS, сумнівні ототожнення було відкинуто. Виявилось, що для не дуже близьких компактних галактик ототожнення є проблематичним через те, що для багатьох радіотелескопів (але не радіоінтерферометричних мереж) діаграма спрямованості є вельми широкою, що ускладнює коректне ототожнення радіовипромінювання від різних джерел. У результаті всебічного аналізу у списку для розгляду залишилось лише декілька об'єктів з надійним ототожненням. Відібрані об'єкти візуально компактні, але не точкові, у центрі містять чітко виділену яскраву ділянку зореутворення на тлі більшого за розмірами оптичного випромінювання, для яких відомо густину потоків випромінювання у радіоконтинуумі на двох і більше частотах.

Опрацювання даних. Зокрема, для галактики SDSS J133124.13+124444.6 у каталогах наведено такі значення густини потоків: $164 \pm 33 \text{ мЯн}$ на частоті 1.4 ГГц за даними FIRST [16]; $125 \pm 25 \text{ мЯн}$ на частоті 4.84 ГГц за даними спостережень у Green Bank (каталоги (Gregory+, 1996) і більш ранній (Gregory et al., 1991) та (Becker+, 1991)) [20–22]; $72.2 \pm 14 \text{ мЯн}$ на частоті 8.4 ГГц за даними каталогу CLASS (Myers+, 2003) [23]; $220 \pm 44 \text{ мЯн}$ на частоті 365 МГц за даними 87GB/ MITG/ TXS (каталоги (Gregory+, 1991) [21], VizieR Online Data Catalog: The MIT-Green Bank 5GHz Survey (Bennett+, 1986–91) та Texas Survey of radio sources at 365MHz (Douglas+, 1996)) [24]; та $213 \pm 22 \text{ мЯн}$ на частоті 150 МГц за даними VizieR Online Data Catalog: Complete 150MHz GMRT source catalogue (Ghosh+, 2012). На рис. 1. для галактики SDSS J133124.13+124444.6 зображено спектр випромінювання у радіоконтинуумі у діапазоні частот 150 МГц–8.4 ГГц і його апроксимації степеневою функцією (суцільна лінія).

$$S(\nu) = 161 \left(\frac{\nu}{1\text{GHz}} \right)^{-0.246} \text{ mJy}. \quad (5)$$

Але значно краще залежність від частоти апроксимується експонентою (штрихова лінія на рис. 1)

$$S(\nu) = 228 \exp \left(-0.133 \frac{\nu}{1\text{GHz}} \right) \text{ mJy}. \quad (6)$$

Однак під час застосування МНК до апроксимації даних спостережень галактики SDSS J133124.13+124444.6 залежностями (1), (4) виникає певна проблема. Вона полягає в тому, що сума квадратів відхилень є мінімальною при таких коефіцієнтах перед степенями частоти, один з яких є від'ємним, що не має сенсу. Це пов'язано як із великими похибками спостережень, так і з тим, що густини потоків вимірюють на різних радіотелескопах, що мають різні кутові розміри діаграми спрямованості. Існують також додаткові проблеми через те, що при значеннях α_{NT} , близьких до -0.1 , апроксимації (1), (4) двома регресорами, що мають велику взаємну кореляцію, значно збільшують похибки визначення кожного з них. Це свідчить про те, що з подібних даних спостережень на різних радіотелескопах можна надійно оцінити спектральний індекс, але не частку теплового випромінювання та спектральний індекс нетеплового випромінювання, що є більш цікавим.

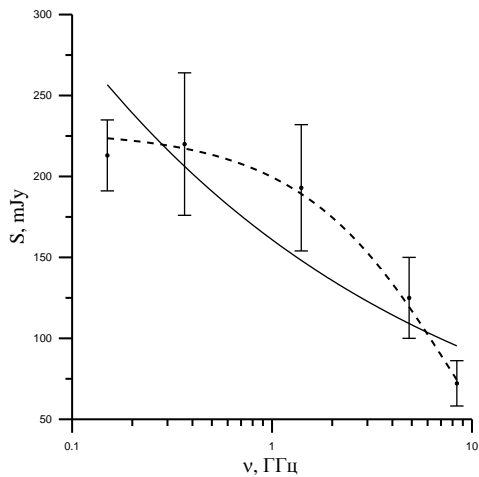


Рис. 1. Галактика SDSS J133124.13+124444.6: спектр випромінювання у радіоконтинуумі у діапазоні частот 159 МГц–8.4 ГГц і його апроксимації степеневую функцією (5) та експонентою (6)

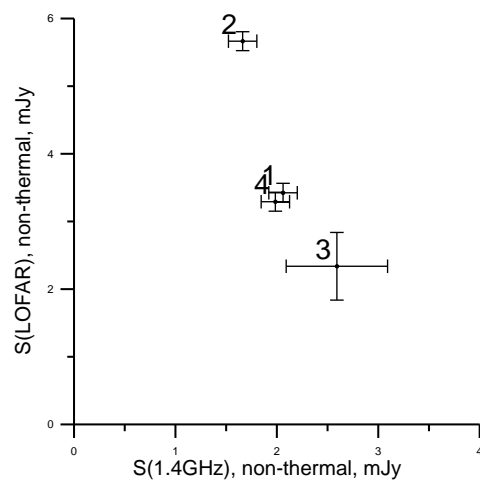


Рис. 2. Густина потоків нетеплового компонента випромінювання на частотах 1.4 ГГц (дані FIRST) та 140 МГц (дані LOFAR). Номери відповідають порядковому номеру у таблиці

Таблиця

Характеристики випромінювання галактик у радіоконтинуумі

№ з/п	Координати радіоджерела RA J2000 DE J2000 h:m:s d:m:s	S (1.4 ГГц), мЯн	A, %	S (140 МГц), мЯн	α	α_{NT}
1	11:43:33.10 53:30:00.69	2.28±0.14	9.6	3.7±0.1	-0.21±0.03	-0.22±0.03
2	13:07:08.44 53:57:44.59	1.85±0.14	10.1	5.9±0.1	-0.504±0.03	-0.53±0.03
3	14:47:21.01 48:54:04.62	2.80±0.50	7.4	2.6±0.1	0.032±0.08	0.045±0.09
4	15:08:40.09 52:27:13.61	2.15±0.14	7.7	3.5±0.2	-0.21±0.03	-0.22±0.03

Для визначення спектрального індексу випромінювання у радіоконтинуумі у чотирьох галактик (див. таблицю), для яких густини потоків випромінювання відомі лише на двох частотах, був застосований інший підхід. Густина потоків теплових компонентів у загальному монохроматичному випромінюванні галактик у радіоконтинуумі на частотах 1.4 ГГц та 140 МГц були визначені за співвідношенням із роботи [15] з використанням даних опрацювання спектрів та дослідження спектрального розподілу енергії з [4]. Корекції оптичних спостережних даних за спектральну апертуру SDSS та екстинкцію, які було внесено при обчисленнях, та використання даних оглядів FIRST і NVSS детально обговорено у [2, 3]. З різниці повної густини потоку випромінювання та густини потоку теплового компонента було визначено густину потоку нетеплового компонента випромінювання у радіоконтинуумі для кожної галактики. За обчислень світності прийнято, що стала Габбла дорівнює $H_0 = 75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$. На рис. 2 для галактик дослідження наведено густини потоків нетеплового випромінювання на частотах 1.4 ГГц (дані FIRST) і близьких до 140 МГц (за даними LOFAR). З порівняння густини потоків на частотах 1.4 ГГц та 140 МГц було оцінено значення як спектрального індексу α повного випромінювання за формулою (3), так і спектрального індексу α_{NT} нетеплового компонента випромінювання, які наведено у таблиці разом із координатами радіоджерела та часткою A теплового компонента у загальному випромінюванні у радіоконтинуумі (на 1.4 ГГц). Окреме зауваження слід зробити стосовно галактики під номером 3 (таблиця). У каталогах VizieR Online Data Catalog: Group catalogues of the local universe (Saulder+, 2016) та VizieR Online Data Catalog: Merging groups and clusters from the SDSS data (Tempel+, 2017) її віднесено до групи радіоджерел. За візуального огляду карт видно, що вона має меншого компаньйона, кутова відстань до нього є більшою, ніж апертура спостережень LOFAR, але меншою за апертуру спостережень на частоті 1.4 ГГц. Через це визначені спектральні індекси випромінювання α та α_{NT} не можуть вважатися надійними.

Висновки. Отримано оцінки спектрального індексу нетеплового випромінювання для 4 галактик. Для них випромінювання у радіоконтинуумі у діапазоні 140 МГц–1.4 ГГц є переважно нетепловим, тобто, внеском теплового випромінювання на частотах нижче 1.4 ГГц можна знехтувати. Причому спектральні індекси і нетеплового, і повного випромінювання (вони мають бути близькими для галактик із низькою часткою теплового випромінювання) у трьох випадках є досить плоскими, не стрімкими (таблиця). Значення спектральних індексів випромінювання α , отримані для окремих компактних галактик з активним зореутворенням із вибірки CSFGs, близькі до тих, що були одержані для блакитних компактних галактик з вибірки BCDGs [13] при розгляді в іншому діапазоні довжин хвиль. А от значення α_{NT} , отримані для розглянутих галактик, значно нижчі (за модулем) від тих, які одержано для п'яти BCDGs галактик у роботі [14].

Спектральний індекс нетеплового випромінювання залежить від співвідношення потужності різних його джерел, що мають різні нахили спектра випромінювання. Наприклад, спектр синхротронного випромінювання залежить від

напруженості магнітного поля та від енергії частинок, що рухаються в ньому. Релятивістські електрони, продуковані спалахами зореутворення або залишками наднових зір, втрачають енергію через це магнітно-гальмівне випромінювання і його спектр змінюється із часом. Чим більше магнітне поле, тим швидше це відбувається, і тим сильніша потужність синхротронного випромінювання. Інші джерела нетеплового випромінювання мають спектри з іншими нахилами, тому спектральні індекси для різних галактик можуть значно відрізнятися.

Значення α для галактик, отримане в роботі [14], міститься в межах від -1.11 до $+0.71$. Середнє значення -0.33 є значно більшим за типове для нормальних галактик значення -0.75 . Зазначимо, що плоскі значення спектрального індексу (близько $\alpha = -0.2$) притаманні синхротронному випромінюванню, яке виникає у залишках наднових зір певного типу, схожих на Крабподібну туманність. Це тип так званих плеріонів, що характеризуються аморфною структурою, високим ступенем поляризації та плоским спектром ($\alpha = 0$ – -0.2). Радіовипромінювання плеріонів пов'язують з активністю залишку зорі: нейтронна зоря, що дуже швидко обертається, є джерелом магнітного поля та релятивістських часток [25]. Не виключено, що подібні об'єкти дають певний внесок у радіовипромінювання розглянутих у роботі галактик.

А ще слід зазначити, що маси зоряного компонента галактик вибірки CSFG розподілено в широкому діапазоні $10^5 \dots 10^{11} M_{\odot}$ із максимумом на $10^9 M_{\odot}$ [26]. Можливо, розглянуті галактики є "радіотихими", саме таким притаманні незначні маси.

Вплив селекції. Обмеженість кількості розглянутих об'єктів не дає можливості узагальнити висновок для всієї вибірки CSFG. Крім міркувань, пов'язаних із фізикою нетеплового випромінювання, слід враховувати також вплив селекції даних. Зазначимо, що лише FIRST або NVSS є оглядами у радіоконтинуумі всього неба, а решта спостережень у радіоконтинуумі проводилися для окремих об'єктів або ділянок неба. Близько 40 % радіоджерел із каталогу FIRST мають оптичних партнерів в SDSS, з них близько 60 % – на кутовій відстані $\sim 10''$ [27]. Ще треба згадати про порогові значення густини потоків детектування об'єктів. Галактики можуть мати густину потоку випромінювання на частотах 140 МГц та 1.4 ГГц нижче порогу детектування радіотелескопа, тоді вони гарантовано не потраплять до таблиці. Додатково, галактика може бути настільки близькою, що спектри, отримані в SDSS, будуть відноситься до окремих областей HII усередині галактики. Такі близькі галактики теж не включалися до розгляду через неможливість виділити густину потоку у радіоконтинуумі саме від цих HII областей. Усі ці чинники, разом із критеріями відбору галактик до вибірки, привели до того, що з вихідної вибірки [4] тисяч галактик після ототожнення з каталогами джерел LOFAR, FIRST або NVSS залишилось 4 галактики, одна з яких насправді може бути компонентою пари.

Залишаються галактики не дуже близькі, але зі значним радіовипромінюванням. Його левову частку складає нетеплове радіовипромінювання. Це пояснює, чому частка теплового випромінювання галактик з таблиці є невеликою. Тепер подумки проведемо на рис. 2 вертикальну та горизонтальну лінії, що відповідають порогам чутливості LOFAR, FIRST або NVSS. Усі об'єкти, що можуть потрапити в нашу вибірку, мають більші густини потоків. Через те галактики, що мали би великі за модулем від'ємні або додатні величини α , просто не ввійдуть у вибірку через те, що густина потоку випромінювання на одній із частот 140 МГц або 1.4 ГГц буде нижче порогу чутливості.

Подяка. Автори вдячні рецензентам за слушні та корисні зауваження. Роботу виконано у рамках теми 19БФ023-01 НДЧ Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Під час виконання роботи було використано інформацію з бази даних позагалактичних джерел NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), яка функціонує під керівництвом Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, при контракті з National Aeronautics and Space Administration; огляди Sloan Digital Sky Survey (SDSS) та SDSS-II, які виконуються та функціонують завдяки Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, the U.S. Department of Energy, the National Aeronautics and Space Administration, the Japanese Monbukagakusho, the Max Planck Society та the Higher Education Funding Council for England; огляди NVSS (National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey), FIRST, LOFAR та астрономічна база даних Vizier.

Список літератури

1. Parnovsky S. L. Radio emission at 1.4 GHz from luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova // *Astronomische Nachrichten* // *Astronomical Notes*, 2015. – Vol. 336, No. 3. – P. 276–283.
2. Parnovsky S. L. Compact star-forming galaxies: the fraction of thermal emission in the radio continuum at 1.4 GHz / S.L.Parnovsky, I.Y. Izotova // *Bulletin of National Taras Shevchenko University of Kyiv*, 2018. – Vol. 57(1). – P. 42–48.
3. Parnovsky S. L. Study of the thermal emission in the radio continuum at 1.4 GHz in selected compact galaxies with active star formation / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova // *Bulletin of National Taras Shevchenko University of Kyiv*, 2019. – Vol. 59(1). – P. 9–12.
4. The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey / I. Y. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, C. Henkel // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2016. – Vol. 462, Issue 4. – P. 4427–4434.
5. Condon J. J. Radio emission from normal galaxies/ J. J. Condon // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 1992. – Vol. 30. – P. 575–611.
6. Bell E. F. Estimation star formation rates from infrared and radio luminosities: the origin of the radio-infrared correlation / E. F. Bell // *Astrophys. J.*, 2003. – Vol. 586. – P. 794–813.
7. Calzetti D. Star Formation Rate Indicators / D. Calzetti // *Secular Evolution of Galaxies*, by Jesús Falcón-Barroso, and Johan H. Knapen. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. – 419 p.
8. Dust-corrected Star Formation Rates of Galaxies. I. Combinations of H α and Infrared Tracers / R. C. Jr. Kennicutt, C.-N. Hao, D. Calzetti et al. // *Astrophys. J.*, 2009. – Vol. 703, Issue 2. – P. 1672–1695.
9. Dust-corrected Star Formation Rates of Galaxies. II. Combinations of Ultraviolet and Infrared Tracers / C.-N. Hao; R. C. Kennicutt, B. D. Johnson et al. // *Astrophys. J.*, 2011. – Vol. 741, Issue 2. – id. 124, 22 p.
10. Hopkins A. M. Star-Formation Rates of Local Blue Compact Dwarf Galaxies. I: 1.4 GHz and 60 μ m luminosities / A. M. Hopkins, R. E. Schulte-Ladbeck, I. O. Drozdovsky // *Astron. J.*, 2002. – Vol. 124. – P. 862–876.
11. Sargsyan L. A. Star Formation Rates for Starburst Galaxies from Ultraviolet, Infrared and Radio Luminosities / L. A. Sargsyan, D. W. Weedman // *Astron. J.*, 2009. – Vol. 701. – 1398–1414.
12. The effect of star formation on the far-infrared–radio correlation within galaxies / E. J. Murphy, G. Helou, R. Braun et al. // *Astrophys. J.*, 2006. – Vol. 651, Issue 2. – P. L111–L115.
13. Klein U. Radio continuum observations of blue compact dwarf galaxies / U. Klein, R. Wielebinski, T. X. Thuan // *Astron. Astrophys.*, 1984. – Vol. 141. – P. 241–247.
14. Klein U. A radio-optical study of blue compact dwarf galaxies. I. Radio continuum observations / U. Klein, H. Weiland, E. Brinks // *Astron. Astrophys.*, 1991. – Vol. 246. – P. 323–340.
15. Caplan J. Extinction and reddening of HII regions in the Large Magellanic Cloud / J. Caplan, L. Deharveng // *Astron. Astrophys.*, 1986. – Vol. 155. – P. 297–313.
16. Becker R. H. The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters / R. H. Becker, R. L. White, D. J. Helfand // *Astrophys. J.*, 1995. – Vol. 450. – P. 559.
17. The NRAO VLA sky survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // *Astron. J.*, 1998. – Vol. 115, No. 5. – P. 1693–1716.

18. The LOFAR Two-metre Sky Survey. II. First data release / T. W. Shimwell, C. Tasse, M. J. Hardcastle et al. // *Astron. Astrophys.*, 2019.– Vol. 622.– A1, 21 pp.
19. Ochsnein F. The VizieR database of astronomical catalogues / F. Ochsnein, P. Bauer, J. Marout // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 2000.– Vol. 143. – P. 23–32.
20. The GB6 catalog of radio sources / P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1996.– Vol. 103. – P. 427–432.
21. Gregory P. C. The 87GB catalog of radio sources covering delta between O and+ 75 deg at 4.85 GHz / P. C. Gregory, J. J. Condon // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1991. – Vol. 75. – P. 1011–1291.
22. Becker R. H. A new catalog of 53522 4.85GHz sources / R. H. Becker, R. White, A. L. Edwards // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 1991.– Vol. 75. – P. 1–229.
23. A Cosmic Lens All-Sky Survey – I. Source selections and observations / S. T. Myers, N. J. Jackson, I. W. A. Browne et al. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2003. – Vol. 341. – P. 1–12.
24. The Texas Survey of Radio Sources Covering –35.5 degrees <declination>71.5 degrees at 365 MHz / J. N. Douglas, F. N. Bash, F. A. Bozyan et al. // *Astron. J.*, 1996. – Vol. 111. – P. 1945–1963.
25. Остатки вспышек сверхновых / Т. А. Лозинская и др. // *Физика космоса : кол. моногр. – М. : Советская энциклопедия, 1986. – С. 469–473.*
26. Izotova I. Y. Compact galaxies with active star formation from the SDSS DR14: star formation rates derived from combinations of luminosities in different wavelength ranges / I. Y. Izotova, Y. I. Izotov // *Kinem. Fiz. Neb. Tel. 2021. – 37(2). – P. 1–16.*
27. Kimball A. E. A unified Catalog of Radio Objects Detected by NVSS, FIRST, WENSS, GB6 and SDSS / A. E. Kimball, Ž. Ivezić // *Astron. J.*, 2008.– Vol. 136, Issue 2. – P. 684–712.

Надійшла до редколегії 15.02.21

С. Парновский, д-р физ.-мат. наук, проф.,
И. Изотова, канд. физ.-мат. наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ИНДЕКС ИЗЛУЧЕНИЯ В РАДИОКОНТИНУУМЕ 140 МГц – 1.4 ГГц КОМПАКТНЫХ ГАЛАКТИК С АКТИВНЫМ ЗВЕЗДОБРАЗОВАНИЕМ

Проведено отождествление выборки компактных галактик с активным звездообразованием с объектами каталогов радиосисточников. Для галактик с известными потоками излучения в радиоконтинууме на частотах 1.4 ГГц по данным FIRST или NVSS и в диапазоне 120–168 МГц по данным LOFAR, а также в эмиссионных линиях водорода, оценены спектральный индекс, а также спектральный индекс нетеплового излучения для этих частот. Значения полученных спектральных индексов характерны для плоских спектров излучения. Обсуждаются причины получения такого результата.

Ключевые слова: галактики с активным звездообразованием, излучение в радиоконтинууме, тепловое излучение, спектральный индекс.

S. Parnovsky, Dr Hab., Prof.,
I. Izotova, PhD
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

SPECTRAL INDEX IN THE RADIO CONTINUUM 140 MHz–1.4 GHz EMISSION FOR COMPACT STAR-FORMING GALAXIES

The sample of compact star-forming galaxies (CSFGs) has been identified with sources in the catalogues of radio sources. It includes only galaxies with active star formation without objects with spectral signs of active galactic nuclei. For CSFGs with known flux densities in radiokontinuum at frequencies of 1.4 GHz from the FIRST or the NVSS and in the range of 120–168 MHz from the LOFAR, as well as in hydrogen emission lines from the SDSS, the spectral index and the spectral index of non-thermal emission component for these frequencies have been estimated.

Note that obtaining the spectral index of nonthermal emission component is a much more difficult task than determining the spectral index of total emission. It is shown that the approximation by the model dependence using the least squares method can lead to unreliable estimates of the fraction of thermal (free-free) emission. Therefore, the flux densities of the thermal component are derived from the extinction- and aperture corrected fluxes of the H α emission line. This method of estimation without using a fitting is more reliable.

It is shown that the fact that derived spectra in radio range are quite flat is due, in particular, to the influence of selection effects caused by limited sensitivity of radio telescopes. For the same reason, only galaxies with a small fraction of thermal emission were included in the sample. Therefore, the spectral index is not much different from the spectral index of non-thermal emission.

Keywords: star-forming galaxies, continuum radio emission, thermal emission, spectral index.

УДК 523.68

П. Козак, канд. фіз.-мат. наук
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
С. Старий, канд. фіз.-мат. наук
Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВАТОРІАЛЬНИХ КООРДИНАТ БОЛІДА ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЗІ СТАЦІОНАРНОЮ МАЛОЧУТЛИВОЮ ПОБУТОВОЮ ОХОРОННОЮ ВІДЕОКАМЕРОЮ

Наведено метод визначення екваторіальних координат яскравого боліда, зареєстрованого 9 серпня 2020 р. у Києві ширококутною малочутливою побутовою охоронною відеокамерою. Через малу чутливість камери в кадрах із болідом не було жодного об'єкта порівняння, а небосхил закрито кроною дерев більше ніж наполовину. Для пошуку об'єктів порівняння з відомими екваторіальними координатами запропоновано використати зображення Місяця та Марса, які систематично попадали в кадр у наступному місяці – вересні. Наведено відповідні формули. Точність визначення екваторіальних координат боліда склала десяти долі градуса при полі зору камери 100°, а кутова довжина його траєкторії – близько 15°. Болід був дуже повільний та, як показали розрахунки, не належав до метеорного потоку Персеїди, який був активний на час спостереження.

Ключові слова: метеори, відеоспостереження метеорів, спостереження з побутовою охоронною камерою, методи опрацювання спостережень метеорів.

Вступ. Яскраві метеори – боліди – відносно рідкісне явище й вони нечасто потрапляють до об'єктива професійної спостережної камери. Однак останнім часом, через розвиток побутової відеотехніки та широке використання відеокамер (як контролю в охоронних системах) суттєво збільшується ймовірність випадкової реєстрації болідів, навіть досить малочутливими приладами. Інший випадок – реєстрація болідів автомобільними відеореєстраторами. Як відомо, саме за допомогою стаціонарних охоронних відеокамер та автомобільних відеореєстраторів було отримано знімки Челябінського боліда 15 лютого 2013 р., що дало змогу обчислити параметри

© Козак П., Старий С., 2020