

А. Александров, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
 А. Сташко, аспирант,
 В. Жданов, д-р физ.-мат. наук, проф.
 Астрономическая обсерватория
 Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ НА БОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Рассмотрено сферически симметрическое пространство-время в квазиглобальных координатах в присутствии скалярного поля (СП), которое минимально связано с гравитацией с мономным потенциалом $V(\varphi) = \varphi^n$, $n > 4$. Доказана сходимость итерационной процедуры для решения общей системы уравнений Эйнштейна и скалярного поля на достаточно больших расстояниях от центра. Результат может быть использован для численного нахождения метрики и скалярного поля путём обратного интегрирования от больших до меньших значений радиальной переменной.

Ключевые слова: сферически симметрическое пространство-время, скалярное поле, мономный потенциал, численное интегрирование.

УДК 524.7

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В РАДІОКОНТИНУУМІ НА ЧАСТОТІ 1.4 ГГц ВИБРАНИХ КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ

Досліджено частки теплового випромінювання у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для підвибірки з 92 компактних галактик з активним зореутворенням, створеної за умови жорсткішого критерію компактності. Як і для повної вибірки зі 193 галактик, отримано, що розподіл частки теплового випромінювання у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц близький до лог-нормального з медіанним значенням близько 15%; встановлено залежність частки від еквівалентної ширини емісійної лінії H β . Єдина суттєва відмінність полягає в тому, що частка теплового випромінювання для підвибірки з 92 галактик не корелює з індексом кольору $g-r$, як це встановлено для галактик повної вибірки. Обговорюються причини такої відмінності.

Ключові слова: галактики з активним зореутворенням, випромінювання в радіоконтинуумі, теплове випромінювання.

Вступ

Ця робота продовжує дослідження, результати яких детально викладено в наших попередніх статтях [1, 8]. Вони пов'язані з вивченням випромінювання різних вибірок галактик, у яких перебігають активні процеси зореутворення, у широкому діапазоні довжин хвиль, зокрема в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Відомо, що це випромінювання переважно має нетеплове походження, але в зонах іонізованого водню його тепловий компонент (free-free випромінювання) може бути помітним і розглядатися як опосередкований індикатор процесів зореутворення [5]. Детальний огляд літератури та посилання наведено в роботах [1, 5, 6, 8].

У роботі [8] нами було проаналізовано випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц 52 галактик з активним зореутворенням з вибірки LCG (Luminous Compact Galaxies), яким притаманні високі світності та еквівалентні ширини EW(H β) емісійної лінії H β . Було показано, що незважаючи на високу активність та відносну молодість спалаху зореутворення в LCG галактиках, про що свідчили значення EW(H β) $\geq 100 \text{ \AA}$, випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц залишалося переважно нетепловим, а частка A теплового компонента у загальному випромінюванні в радіоконтинуумі становила у середньому 17 %.

Вибірка та її первинне опрацювання

У роботі [1] було оцінено частку A теплового випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для 193 компактних галактик з активним зореутворенням із вибірки CSFG (compact star-forming galaxies) [11], створеної на основі цифрового огляду неба SDSS DR12 [10]. Детальний опис CSFG вибірки та її опрацювання наведено в роботах [6, 11]. Нагадаємо лише принципові позиції критерію відбору галактик до вибірки: наявність у спектрі емісійних ліній H β з еквівалентною шириною EW(H β) $\geq 10 \text{ \AA}$; компактність (розмір $\leq 10''$); відсутність спектральних ознак наявності активних галактичних ядер. На діагностичній діаграмі [OIII] $\lambda 5007\text{\AA}$ /H β $\lambda 4861\text{\AA}$ – [NII] $\lambda 6583\text{\AA}$ /H α $\lambda 6563\text{\AA}$ [2] галактики CSFG вибірки займають позиції, притаманні галактикам з активним зореутворенням, а не з активними галактичними ядрами. Галактики для дослідження випромінювання в радіоконтинуумі було відібрано шляхом перехресного ототожнення списку CSFG із переліком радіоджерел каталогів NVSS [12] і FIRST [3] та подальшої візуальної ревізії. Пошук оптичних та радіопартнерів проводився із граничною кутвою відстанню $\leq 15''$. Для відібраних 193 галактик отримано, що як нижня, так і верхня межі частки A теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі мають лог-нормальні розподіли із середніми значеннями, що відповідають часткам у 5,9 та 14,5 %, відповідно. Частка зростає при збільшенні еквівалентної ширини емісійної лінії H β при постійному індексові кольору $g-r$ (g та r – модельні значення зоряної величини у відповідних смугах із бази даних SDSS) або при збільшенні індексу кольору при постійній еквівалентній ширині емісійної лінії H β .

Про нижню й верхню межі, а не про точні значення частки теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі йдеться з такої причини. За даними про радіовипромінювання було визначено повний потік і світність у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Електронна температура та електронна густина, що притаманні галактикам із CSFG

вибірки, відповідають умовам, декларованим у роботі [4], та дозволяють визначити потік теплового компонента випромінювання в радіоконтинуумі на основі випромінювання галактик у лінії H β за встановленим там співвідношенням. Усе це разом дозволило оцінити частку A теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі. Для проведення розрахунків до світності галактик у лінії H β було внесено дві належні корекції: за екстинкцією випромінювання та апертурою спостережень (див. докладніше у [6, 9, 11]). В останній корекції використовувався корекційний множник $2.512^{m(ap)-m}$, де m та $m(ap)$ – це модельна повна видима SDSS зоряна величина у смузі, яка обиралась залежно від червоного зміщення z галактики, і відповідна зоряна величина у спектроскопічній апертурі 3 arcsec (для об'єктів класичного SDSS огляду) та 2 arcsec (для об'єктів BOSS огляду). Така корекція базується на припущенні, що розподіл яскравості у щілині та по всій поверхні галактики однаковий. Для неточкових об'єктів, якими згідно з візуальним аналізом виявились галактики вибірки, це припущення є не зовсім коректним. Тому в роботі [1] розрахунки частки A теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі проводились у двох варіантах: а) поправку на апертуру враховано, але її обмежено величиною $m(ap) - m = 1^m$ (верхня межа частки); б) без урахування апертури спостережень, що веде до недооцінювання величини $F(H\beta)$ потоку випромінювання в лінії H β , а отже, і частки теплового компонента (нижня межа частки).

Для того, щоб отримати більш надійний результат та зменшити невизначеність обчислень, пов'язану із селекцією неточкових джерел, було створено підвибірку галактик із жорсткішим критерієм компактності. До підвибірки ввійшли 92 галактики, для яких різниця повної зоряної величини та аналогічної у щілині обмежена 1 зоряною величиною. Розрахунки частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц для цієї підвибірки проводились аналогічно виконаним у роботах [1, 8].

Результати

Таким чином, ми маємо повну вибірку зі 193 галактик і переглянута підвибірку з 92 галактик із жорсткішим критерієм компактності, а отже, більш надійною корекцією за апертурою. Результати опрацювання першої описано у статті [1], тому ми зосередимось на результатах, отриманих для підвибірки. Основний результат, такий як розподіл частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц, близький до лог-нормального з медіаною близько 15 % і залишається незмінним. Це можна наочно побачити на рис. 1, де дано розподіл величини $\lg(A)$ для двох вибірок. Залишається також залежність $\lg(A)$ від $EW(H\beta)$ – еквівалентної ширини лінії H β у вигляді

$$\lg(A) = C_1 + C_2(EW(H\beta) - EW(H\beta)_0). \tag{1}$$

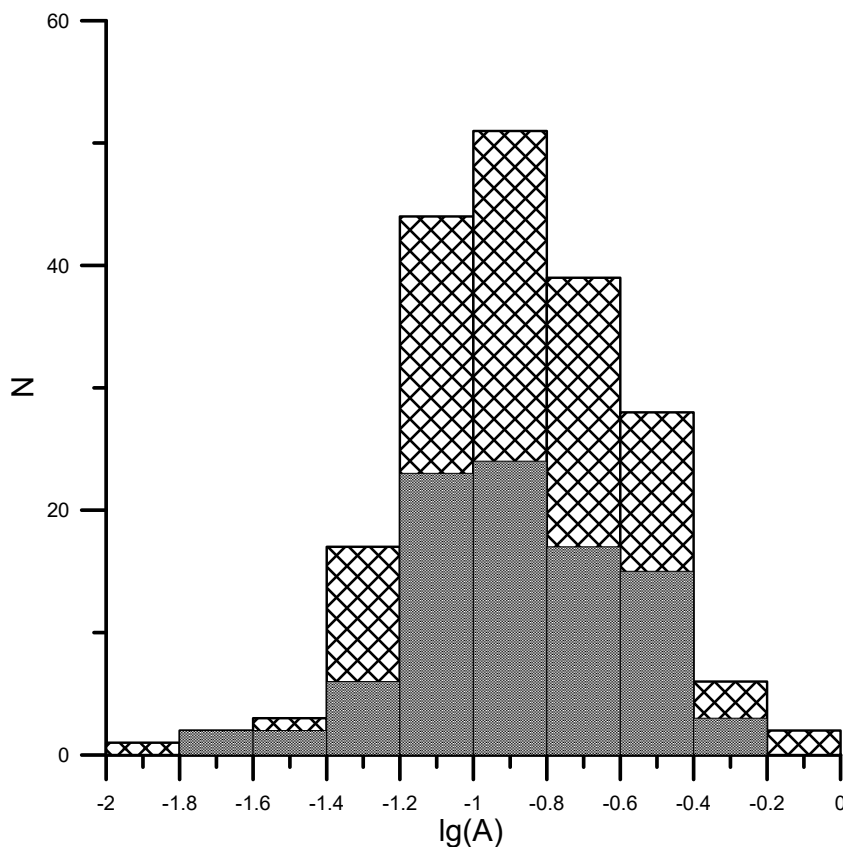


Рис. 1. Розподіл логарифма частки теплового компонента A в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. На гістограмах зі штриховкою наведено результати, отримані для повної вибірки зі 193 галактик, темнішим – для підвибірки з 92 галактик

Тут $EW(H\beta)_0 = 36.93$ є середнім значенням $EW(H\beta)$. Розрахунок дає таку апроксимацію: $C_1 = -0.899 \pm 0.029$, $C_2 = -0.33 \pm 0.11$. Імовірність того, що залежність від $EW(H\beta)$ є статистично значущою, дорівнює 92 % за критерієм Фішера [7]. Однак для підвибірки є певна відмінність від статистичних властивостей повної вибірки: залежність $\lg(A)$ від індексу кольору $g-r$ стає статистично незначущою. Це може бути пов'язано з тим, що як індекс кольору, так і корекція за апертурою використовує повну зоряну величину галактики, тому ці величини можуть бути певною мірою зкорельовані. Для повної вибірки зі 193 галактик, яка містить галактики з більшими корекціями випромінювання в емісійній лінії $H\beta$ за апертурою, цей ефект більше виражений. Він може призводити до виявлення хибної кореляції частки теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі та індексу кольору $g-r$.

Висновки

Дослідження статистичних властивостей ревізованої підвибірки галактик з активним зореутворенням, створеної за більш жорстким критерієм щодо компактності, виявило, що основні результати залишаються такими самими, як отримані в роботі [1], як кількісно, так і якісно. Однак дослідження властивостей підвибірки дозволяє уточнити функціональну залежність частки теплового випромінювання від інших спостережних характеристик галактик. Показано, що статистично значуща залежність частки теплового випромінювання від індексу кольору, встановлена в роботі [1], є хибною й може виникати через взаємні кореляції різних показників для кожної галактики. Це в черговий раз підтверджує, що статистичне опрацювання даних потребує всебічного аналізу вибірок досліджень і ретельного контролю з боку дослідника. При збільшенні віку спалаху зореутворення частка теплового випромінювання зменшується. Не виявлено статистично значущої залежності частки теплового випромінювання від вмісту важких елементів.

Роботу виконано в 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 виконані 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) та FIRST.

Література

1. Парновський С. Л. Теплове випромінювання галактик з активним зореутворенням у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц / С. Л. Парновський, І. Ю. Ізотова // Вісн. Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2018. – Вип. 57(1). – С. 42–48.
2. Baldwin J. A. Classification parameters for the emission line spectra of extragalactic objects / J. A. Baldwin, M. M. Phillips, R. Terlevich // PASP. – 1981. – V. 93, No 551. – P. 5–19.
3. 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. – V. 450. – P. 559.
4. Caplan J. Extinction and reddening of HII regions in the Large Magellanic Cloud / J. Caplan, L. Deharveng // Astron. Astrophys. – 1986. – V. 155. – P. 297–313.
5. Condon J. J. Radio emission from normal galaxies / J. J. Condon // Ann. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. – V. 30. – P. 575–611.
6. Izotova I. Y. Star formation rate in star-forming galaxies / I. Y. Izotova, Y. I. Izotov // Astrophys. and Space Sci. – 2018. – V. 363, Issue 3. – Id. 47, P. 9.
7. Fisher R. A. Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – London: Oliver and Boyd, 1950.
8. Parnovsky S. L. Radio emission at 1.4 GHz from luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Y. Izotova // Astron. Nach. / Astron. Notes. – 2015. – V. 336, № 3. – P. 276–283.
9. Parnovsky S. L. H α and UV luminosities and star formation rates of large sample of luminous compact galaxies / S. L. Parnovsky, I. Yu. Izotova, Y. I. Izotov // Astrophys. and Space Sci. – 2013. – N 343. – P. 361–376.
10. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III / S. Alam, F. D. Albareti, P. Allende et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 2015. – V. 219, Issue 1. – Id. 12. – 27 p.
11. The bursting nature of star formation in compact star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey / Y. I. Izotov, N. G. Guseva, K. J. Fricke, C. Henkel // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2016. – V. 462, Issue 4. – P. 4427–4434.
12. The NRAO VLA sky survey / J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen et al. // Astron. J. – 1998. – V. 115, No 5. – P. 1693–1716.

Надійшла до редколегії 15.05.19

S. Parnovsky, Dr.Sci., prof.,
I. Izotova, Ph.D.,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STUDY OF THE THERMAL EMISSION IN THE RADIO CONTINUUM AT 1.4 GHz IN SELECTED COMPACT GALAXIES WITH ACTIVE STAR FORMATION

The fraction of thermal (free-free) emission in the radio continuum at the frequency of 1.4 GHz is derived in subsample of 92 compact star-forming galaxies (CSFGs). These galaxies with detected radio emission and selected with a more strong compactness criterion represent the subsample of a larger sample of 193 galaxies (Parnovsky, S., & Izotova, I.: 2018, BTSNU, 57(1), 41). We use the 1.4 GHz fluxes from the FIRST (Becker R.H., White R.L., & Helfand D.J.: 1995, ApJ, 450, 559). The fluxes of the thermal component at 1.4 GHz are derived from the extinction- and aperture-corrected fluxes of the $H\beta$ emission line in the SDSS spectra following to (Caplan, J., & Deharveng, L.: 1986, A&A, 155, 297) and are compared with the total fluxes in radio continuum.

As well as for a complete sample of 193 galaxies, the distribution of the fraction of thermal emission A in the radio continuum at 1.4 GHz in subsample of 92 CSFGs is similar to the log-normal one with a median value of about 15 %. We find that the fraction of thermal emission at 1.4 GHz is lower for the older starbursts. However, the results of the statistical analysis of the dependence of A on various parameters have been changed. For the complete sample, correlations of A with the equivalent width $EW(H\beta)$ of the $H\beta$ emission line and the $g-r$ colour index are revealed. For the subsample of 92 galaxies, the statistical significance of the correlation A with the colour index becomes negligible, and it corresponds to a confidence level of 92 % for dependence of A on the equivalent width $EW(H\beta)$. The reasons for the differences in the properties of these samples are discussed.

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