

ГУСТИНА СЕРЕДОВИЩА ВЕЛЕТЕНСЬКОЇ РАДІОСТРУКТУРИ ДЛЯ ГАЛАКТИК І КВАЗАРІВ З КРУТИМИ РАДІОСПЕКТРАМИ

Присвячується 110-річчю Семена Яковича Брауде
та 50-річчю радіотелескопа УТР-2

Предмет і мета роботи: Оцінка густини середовища велетенських (з лінійним розміром близько мегапарсека) радіоструктур для галактик і квазарів з крутими низькочастотними спектрами із каталогу УТР-2. Дослідження космологічної еволюції густини середовища велетенських радіоджерел. Визначення залежності внеску радіопелюсток у випромінювання велетенських джерел від густини їхнього середовища.

Методи і методологія: Для оцінки густини середовища велетенських джерел з крутими низькочастотними спектрами використовуємо вибірку джерел із каталогу позагалактичних джерел УТР-2. Критерії відбору досліджуваних об'єктів: 1) значення спектрального індекса дорівнює або більше 1; 2) густина потоку випромінювання на частоті 25 МГц перевищує 10 Ян; 3) джерела з вибірки оптично ототожені. Значення густини середовища розглянутих джерел отримані у припущенні рівності світності джета джерела (при синхротронному механізмі радіовипромінювання) та його відповідної кінетичної світності. Виконується аналіз отриманих оцінок густини середовища різних класів джерел вибірки (для галактик з лінійним крутим спектром, галактик з крутим спектром зі зломом, квазарів з лінійним крутим спектром, квазарів з крутим спектром зі зломом).

Результати: Отримано оцінки густини середовища велетенських радіоструктур, утворених джетами джерел з крутим радіоспектром із каталогу УТР-2. В середньому густина середовища для радіоструктур квазарів ($\sim 10^{-28}$ г/см³) менша, ніж для галактик ($\sim 10^{-27} \div 10^{-26}$ г/см³). Для галактик та квазарів з крутим спектром зі зломом характерна більша густина середовища джетів, ніж для галактик і квазарів з лінійним крутим спектром. Виявлено обернену степеневу залежність густини середовища джетів від червоного зміщення джерел (космологічну еволюцію густини середовища джетів). Знайдено обернену степеневу залежність внеску радіопелюсток (утворених джетами) у випромінювання джерел від густини середовища відповідних радіоструктур.

Висновок: Середні значення отриманих оцінок густини середовища велетенських джетів радіоджерел з крутими низькочастотними спектрами свідчать про меншу густину середовища джетів квазарів, ніж джетів галактик. Велетенські радіоджерела з крутим низькочастотним спектром (особливо з крутим спектром зі зломом) виявляють значну еволюцію густини середовища джетів. Більший внесок радіопелюсток (джетів) у випромінювання джерел відповідає меншій густині середовища розглянутих джерел з каталогу УТР-2. Це може бути обумовлене тим, що від потужних радіоджерел поширюються джети (оточені радіопелюстками) на відстані близько мегапарсека, доки не настає баланс між густиною середовища джерела і густиною міжгалактичного середовища.

Ключові слова: крутий низькочастотний радіоспектр, велетенська радіоструктура, джети, радіопелюстки, галактики, квазари, густина середовища

1. Вступ

В каталозі позагалактичних джерел (каталог УТР-2), отриманому з огляду північного неба в декаметровому діапазоні на радіотелескопі УТР-2, присутні об'єкти з різними типами радіоспектрів [1–6]. Досить значним (близько третини зареєстрованих в каталозі УТР-2 джерел) є клас позагалактичних джерел з крутим низькочастотним спектром (значення спектрального індекса ≥ 1). В попередніх роботах [7–10] ми отримали основні фізичні параметри (лінійний розмір, світність, напруженість магнітного поля, характерний вік)

галактик і квазарів, ототожнених з джерелами з крутим спектром із каталогу УТР-2. Цікаво, що таким джерелам, як правило, притаманна велетенська радіоструктура (їхні лінійні розміри складають близько мегапарсека) [7, 8]. Велетенські розміри джерел можуть бути обумовлені як високою швидкістю поширення їхніх джетів ($\sim 10^9$ см/с), так і низькою густиною міжгалактичного середовища [11].

Раніше низка авторів [12–16] відзначили, що галактики з велетенською радіоструктурою можуть знаходитись в середовищі з низькою гус-

тиною. Звісно, що оцінки густини міжгалактичного середовища, в якому поширюються мегапарсекові джети радіоджерел, отримують непрямими методами. Зокрема, припускається, що тиск релятивістського газу в радіопелюстках (джетах) джерел врівноважується тиском міжгалактичного газу [12]. Можна також оцінити густину міжгалактичного газу з аналізу деполяризації випромінювання джерела [14]. Крім того, оцінка густини міжгалактичного газу визначається з припущенням про рівність потоку імпульсу джета та лобового тиску міжгалактичного середовища [17].

2. Оцінка густини середовища радіоструктури джерел з крутим спектром із каталогу УТР-2

З метою визначення густини середовища велетенських джерел з крутим низькочастотним спектром скористаємось нашою вибіркою з каталогу УТР-2. Вибірка містить 132 галактики та 91 квазар з велетенськими радіоструктурами (з наступними критеріями відбору об'єктів: значення низькочастотного спектрального індекса $\alpha \geq 1$ та густина потоку радіовипромінювання $S_{25} \geq 10$ Ян на частоті 25 МГц). При цьому до вибірки входять 78 галактик з крутим лінійним спектром (тип радіоспектра S), 54 галактики з крутим спектром зі зломом (тип радіоспектра C⁺), 55 квазарів з типом крутого радіоспектра S і 36 квазарів з типом крутого радіоспектра C⁺ [8, 10, 11]. Приклади таких радіоспектрів з каталогу УТР-2 наведені на рис. 1.

Ми одержуємо оцінку густини радіоструктури (джетів) розглянутих джерел з крутим радіоспектром, припускаючи, що світність джета джерела L_j (при синхротронному механізмі радіовипромінювання) дорівнює його відповідній кінетичній світності L_k [11]. Застосуємо вираз для світності джета [18]:

$$L_j = \frac{4}{3} \pi r_j^2 V_j U, \quad (1)$$

де r_j – радіус джета; V_j – швидкість поширення джета; $U = \frac{7 B^2}{3 \cdot 8\pi}$ – густина мінімальної енергії джерела, B – напруженість магнітного поля джерела.

Кінетичну світність джета L_k [11] можна виразити як потік його кінетичної енергії:

$$L_k = \frac{\dot{M}_j V_j^2}{2}, \quad (2)$$

де \dot{M}_j – потік речовини в джеті.

Вважаємо, що потік речовини \dot{M}_j в джеті (при радіусі джета r_j і густині джета ρ_j), який поширюється зі швидкістю V_j , складає:

$$\dot{M}_j = \pi r_j^2 V_j \rho_j. \quad (3)$$

Отже, вираз для кінетичної світності джета має вигляд:

$$L_k = \frac{\pi}{2} r_j^2 V_j^3 \rho_j. \quad (4)$$

Таким чином, прирівнюючи світності L_j і L_k з виразів (1) і (4), отримуємо оцінку густини джета ρ_j , який утворює мегапарсекову радіоструктуру джерела:

$$\rho_j = \frac{7 B^2}{9 V_j^2}. \quad (5)$$

Значення напруженості магнітного поля B і швидкості поширення джетів V_j джерел вибірки визначені нами раніше [8, 9, 11]. Ураховуючи, що ми розглядаємо джети з лінійним розміром мегапарсекового масштабу, вважаємо, що густина джета відповідає густині середовища такого радіоджерела. В результаті, із (5) маємо для галактик і квазарів нашої вибірки оцінки густини середовища велетенської радіоструктури (густини джетів ρ_j), що вказують на широкий інтервал значень цієї густини [11]. А саме, по кожному класу об'єктів вибірки ($G_S, G_{C^+}, Q_S, Q_{C^+}$) середні значення густини радіоструктури $\langle \rho_j \rangle$ складають:

$$G_S \quad \langle \rho_j \rangle = 1.32(\pm 0.36) \cdot 10^{-27} \text{ г/см}^3,$$

$$G_{C^+} \quad \langle \rho_j \rangle = 1.30(\pm 0.32) \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3,$$

$$Q_S \quad \langle \rho_j \rangle = 6.29(\pm 1.32) \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3,$$

$$Q_{C^+} \quad \langle \rho_j \rangle = 1.08(\pm 0.43) \cdot 10^{-28} \text{ г/см}^3.$$

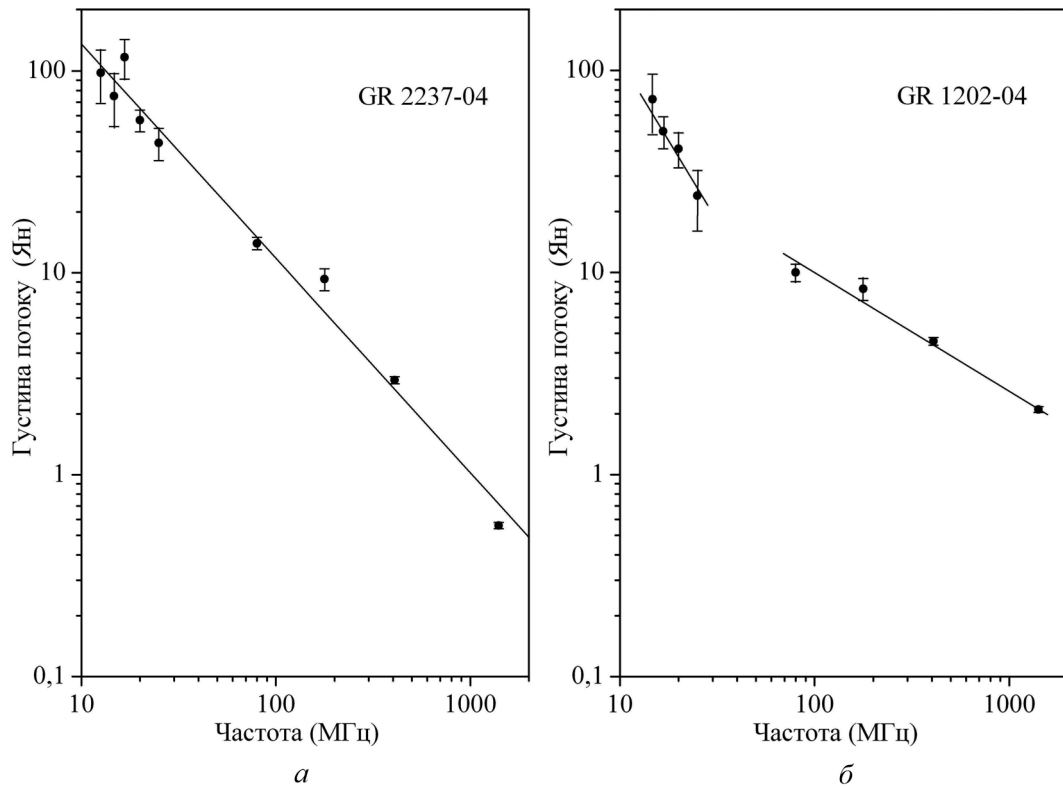


Рис. 1. Приклади крутого лінійного радіоспектра S (а) та крутого спектра зі зломом S^+ (б) для джерел з каталогу УТР-2

З наведених середніх значень $\langle \rho_j \rangle$ випливає, що менша густина середовища джерел спостерігається для квазарів, якщо порівнювати з галактиками. При цьому виявляється також, що густина середовища для об'єктів з крутими лінійними спектрами відрізняється від густини середовища для об'єктів, що мають круті спектри зі зломом (значення $\langle \rho_j \rangle$ менше для галактик G_S , ніж для G_{C^+} , і, відповідно, для квазарів значення $\langle \rho_j \rangle$ менше для Q_S , ніж для Q_{C^+}). Отримані оцінки густини середовища велетенських радіоджерел узгоджуються з аналогічними даними інших авторів [12–14, 17, 19–21].

Оскільки джерела нашої вибірки мають значення червоного зміщення z у великому інтервалі (від $z = 0.006$ до $z = 3.570$), можна дослідити космологічну еволюцію густини їхнього середовища. Тобто розглядаємо залежність густини ρ_j від червоного зміщення z для кожного класу джерел з крутим радіоспектром. Ми виявили обернену степеневу залежність густини середовища джерел від червоного зміщення цих джерел:

$$G_S \quad \rho_j \sim (1+z)^{-6.28(\pm 0.25)},$$

$$G_{C^+} \quad \rho_j \sim (1+z)^{-11.49(\pm 0.87)},$$

$$Q_S \quad \rho_j \sim (1+z)^{-5.10(\pm 0.32)},$$

$$Q_{C^+} \quad \rho_j \sim (1+z)^{-9.54(\pm 1.04)}.$$

Зазначимо, що знайдена космологічна еволюція густини джетів джерел нашої вибірки (особливо з крутим спектром C^+) може свідчити про циклічність активності ядер галактик і квазарів.

3. Залежність внеску випромінювання радіопелюсток від густини середовища велетенських радіоджерел

Як ми встановили, велетенські джерела з крутим радіоспектром з каталогу УТР-2 мають високу світність в декаметровому діапазоні (монохроматична світність на частоті 25 МГц становить $\sim 10^{28}$ Вт/(Гц·ср) [7, 8]). Це вказує на інтенсивне випромінювання радіопелюсток розглянутих джерел, яке зосереджене головним чином на низьких частотах. Отже, радіопелюстки, утво-

рені джетами, забезпечують значний внесок у випромінювання джерел з велетенською радіо-структурою. Мегапарсеківі розміри радіопелюсток джерел з крутими спектрами можуть бути обумовлені не лише потужністю їхніх центральних активних ядер, але також балансом густини джета джерела та густини міжгалактичного середовища. Тому цікаво дослідити залежність внеску випромінювання радіопелюсток, утворених джетами, від густини середовища джетів. Ми розглядаємо відносний внесок випромінювання радіопелюсток в джерелах з крутим спектром і велетенською радіоструктурою. Вказану величину представляємо в двох формах: 1) внесок випромінювання радіопелюсток (декаметровий діапазон) відносно випромінювання акреційного диску активного ядра джерела (оптичний діапазон), який відповідає відношенню $\frac{S_{25}}{S_{opt}}$;

2) внесок випромінювання радіопелюсток (декаметровий діапазон) відносно випромінювання газово-пилового тору активного ядра джерела (інфрачервоний діапазон), який відповідає відношенню $\frac{S_{25}}{S_{IR}}$. Позначення S_{25} , S_{opt} , S_{IR} – це густини потоків випромінювання джерела на частотах 25 МГц (декаметровий діапазон), $5 \cdot 10^{14}$ Гц (оптичний діапазон), $1.38 \cdot 10^{14}$ Гц (інфрачервоний діапазон). Відповідні дані в оптичному та інфрачервоному діапазонах для джерел вибірки отримано з астрофізичної бази даних NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>). Середні значення відношень вказаних густин потоків випромінювання по кожному типу об'єктів вибірки (G_S , G_{C^+} , Q_S , Q_{C^+}) наступні:

$$G_S \quad \left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right) \right\rangle = 5.64(\pm 0.12),$$

$$\left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right) \right\rangle = 4.58(\pm 0.17);$$

$$G_{C^+} \quad \left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right) \right\rangle = 5.15(\pm 0.12),$$

$$\left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right) \right\rangle = 3.67(\pm 0.19);$$

$$Q_S \quad \left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right) \right\rangle = 5.33(\pm 0.06),$$

$$\left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right) \right\rangle = 4.71(\pm 0.14);$$

$$Q_{C^+} \quad \left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right) \right\rangle = 5.00(\pm 0.10),$$

$$\left\langle \lg \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right) \right\rangle = 4.30(\pm 0.11).$$

Як ми отримали, відношення $\left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right)$ та $\left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right)$,

що характеризують внесок випромінювання радіопелюсток, виявляють обернену степеневу залежність від густини середовища джетів джерел ρ_j (див. табл. 1 та рис. 2–7 з наведеною апроксимованою залежністю вказаних величин).

Із залежностей, наведених в табл. 1, а також з рис. 2–7 можна зробити висновок, що більшому внеску випромінювання радіопелюсток (джетів) відповідає менша густина середовища велетенської радіоструктури (джета) джерела. Причому характер знайдених залежностей подібний для галактик і квазарів з обома типами крутих радіо-

Таблиця 1. Залежність густини ρ_j від внеску

випромінювання радіопелюсток $\left(\left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right), \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right) \right)$ для галактик (G_S, G_{C^+}) і квазарів (Q_S, Q_{C^+}) з крутими спектрами із каталогу UTP-2

Тип джерела з крутим радіоспектром	Апроксимована залежність	Апроксимована залежність
G_S	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right)^{-0.95(\pm 0.09)}$	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right)^{-1.16(\pm 0.14)}$
G_{C^+}	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right)^{-0.78(\pm 0.20)}$	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right)^{-1.36(\pm 0.22)}$
Q_S	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right)^{-0.38(\pm 0.16)}$	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right)^{-0.56(\pm 0.19)}$
Q_{C^+}	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{opt}} \right)^{-0.81(\pm 0.33)}$	$\rho_j \sim \left(\frac{S_{25}}{S_{IR}} \right)^{-0.70(\pm 0.62)}$

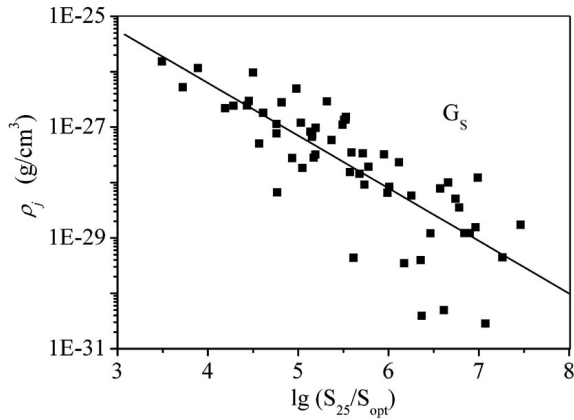


Рис. 2. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно акреційного диску) для галактик з крутим лінійним спектром

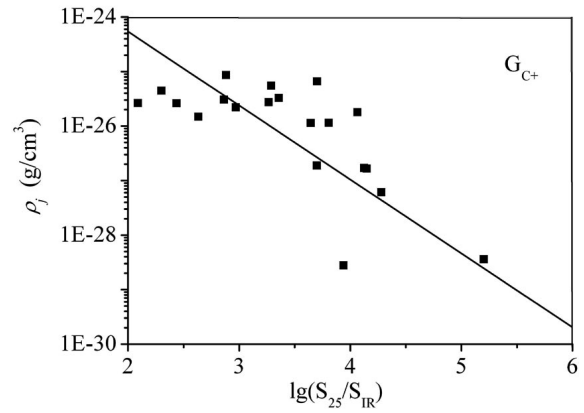


Рис. 5. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно газопопилового тору) для галактик з крутим спектром зі зломом

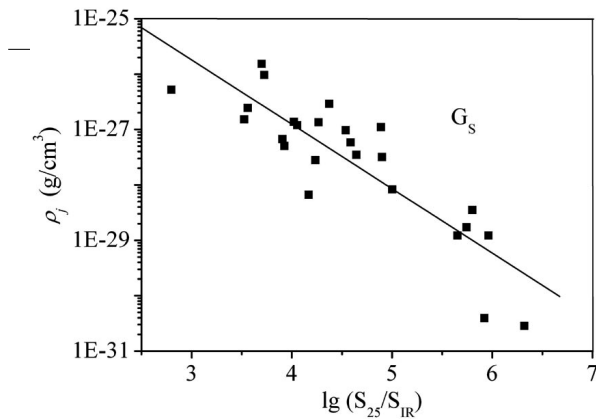


Рис. 3. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно газопопилового тору) для галактик з крутим лінійним спектром

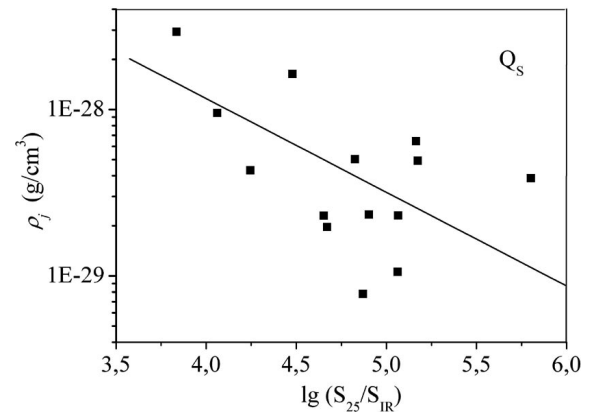


Рис. 6. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно газопопилового тору) для квазарів з крутим лінійним спектром

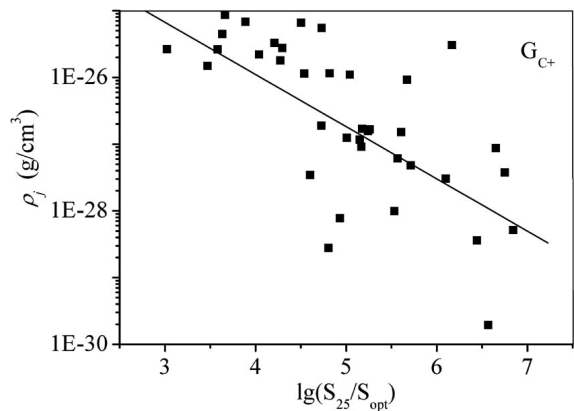


Рис. 4. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно акреційного диску) для галактик з крутим спектром зі зломом

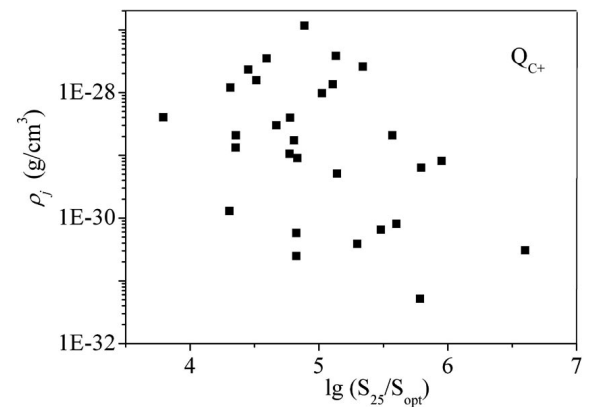


Рис. 7. Залежність густини середовища джета від внеску випромінювання радіопелюсток (відносно акреційного диску) для квазарів з крутим спектром зі зломом

спектрів (з крутим лінійним спектром S і з крутим спектром зі зломом C⁺).

4. Висновки

На основі вибірки галактик і квазарів з крутим радіоспектром з каталогу УТР-2 отримано оцінки густини середовища мегапарсекової радіоструктури (джетів) цих джерел. Меншу густину середовища велетенської радіоструктури мають квазари ($\sim 10^{-28}$ г/см³) в порівнянні з галактиками ($\sim 10^{-27} \div 10^{-26}$ г/см³).

Велетенські радіоджерела з крутим низькочастотним спектром (особливо з крутим спектром зі зломом) виявляють значну космологічну еволюцію густини середовища джетів.

Знайдено обернену степеневу залежність густини середовища джетів від внеску випромінювання радіопелюсток (джетів) як для галактик, так і для квазарів. Це може бути зумовлене тим, що від потужних радіоджерел поширюються джети (оточені радіопелюстками) на відстані близько мегапарсека, доки не настане баланс між густиною середовища джерела і густиною міжгалактичного середовища. Отже, джети потужних радіоджерел з крутим низькочастотним спектром здатні утворити велетенську радіоструктуру при низькій густині середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Braude S. Ya., Megn A. V., Rashkovski S. L., Ryabov B. P., Sharykin N. K., Sokolov K. P., Tkachenko A. P., and Zhouk I. N. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. II. Source catalogue in the range of declinations +10° to +20°. *Astrophys. Space Sci.* 1978. Vol. 54, Is. 1. P. 37–128. DOI: 10.1007/BF00637903
2. Braude S. Ya., Megn A. V., Sokolov K. P., Tkachenko A. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. V. Source catalogue in the range of declinations 0° to +10°. *Astrophys. Space Sci.* 1979. Vol. 64, Is. 1. P. 73–126. DOI: 10.1007/BF00640035
3. Braude S. Ya., Miroshnichenko A. P., Sokolov K. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources. VII. Source catalogue in the range of declinations -2° to -13°. *Astrophys. Space Sci.* 1981. Vol. 74, Is. 2. P. 409–451. DOI: 10.1007/BF00656446
4. Braude S. Ya., Miroshnichenko A. P., Sokolov K. P., and Sharykin N. K. Decametric survey of discrete sources. VIII. Spectra of discrete sources in the range 12.6 to 1400 MHz for declinations -2° to -13°. *Astrophys. Space Sci.* 1981. Vol. 76, Is. 2. P. 279–299. DOI: 10.1007/BF00687495
5. Брауде С. Я., Мірошніченко А. П., Рашковський С. Л., Сидорчук К. М., Сидорчук М. А., Шарькин Н. К. Декаметровий обзор источников Северного неба XIIIб. Спектры дискретных источников для интервала склонений 30°–40°. *Кинематика и физика небесных тел.* 2003. Т. 19, № 4. С. 291–306.
6. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Tokarsky P., Melnik V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Koliadin V., Shepelev V., Dorovskyy V., Ryabov V., Koval A., Bubnov I., Yerin S., Gridin A., Kulishenko V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Reznik A., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Khristenko A., Shevchenko V. V., Shevchenko V. A., Belov A., Rudavin E., Vasylieva I., Miroshnichenko A., Vasilenko N., Olyak M., Mylostna K., Skoryk A., Shevtsova A., Plakhov M., Kravtsov I., Volvach Y., Lytvinenko O., Schevchuk N., Zhouk I., Bovkun V., Antonov A., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshein O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., Griebmeier J.-M., Tagger M., Girard J., Charrier D., Briand C., and Mann G. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* 2016. Vol. 42, Is. 1. P. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
7. Miroshnichenko A. P. Luminosity and space distributions of radio sources with steep spectra at the decameter band. In: S. K. Chakrabarti, A. I. Zhuk, and G. S. Bisnovaty-Kogan, eds. *Astrophysics and Cosmology after Gamow. AIP Conference Proceedings.* Vol. 1206. New York: AIP, 2010. P. 335–345. DOI: 10.1063/1.3292538
8. Miroshnichenko A. P. Physical parameters of radio sources with steeply rising decameter wavelength spectra. *Radio Phys. Radio Astron.* 2012. Vol. 3, Is. 3. P. 215–221. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i3.40
9. Miroshnichenko A. P. The timing scale of the steep-spectrum sources. *Odessa Astronomical Publications.* 2013. Vol. 26, Is. 2. P. 248–250.
10. Miroshnichenko A. P. Luminosity-linear size relation for galaxies and quasars with steep radio spectrum. *Odessa Astronomical Publications.* 2015. Vol. 28, Is. 2. P. 238–241. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71032
11. Miroshnichenko A. P. Jet propagation velocity and environmental density of giant radio sources with steep radio spectrum. *Astrophys. Space Sci.* 2019. Vol. 364, Is. 5. id. 92. DOI: 10.1007/s10509-019-3580-6
12. Daly R. A. Powerful extended radio sources as tools to estimate ambient gas densities, jet luminosities, and other key physical parameters. *Astrophys. J.* 1995. Vol. 454. P. 580–592. DOI: 10.1086/176511
13. Klein U., Mack K.-H., and Saripalli L. General properties of giant radio galaxies. In: R. Ekers, C. Fanti, and L. Padrielli, eds. *Extragalactic Radio Sources. International Astronomical Union, vol 175.* Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1996. P. 311–312. DOI: 10.1007/978-94-009-0295-4_109
14. Mack K.-H., Klein U., O’Dea C. P., Willis A. G., and Saripalli L. Spectral indices, particle ages, and the ambient medium of giant radio galaxies. *Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 329. P. 431–442.
15. Shoenmakers A. P., Mack K.-H., de Bruyn A. G., Röttgering H. J. A., Klein U., and van der Laan H. A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey. II. A multifrequency radio study of a complete sample: pro-

- erties of the radio lobes and their environment. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. Vol. 146, No. 2. P. 293–322. DOI: 10.1051/aas:2000267
16. Machalski J., Chyzy K., and Jamroz M. Giant radio sources in view of the dynamical evolution of FR II-type population. I. Observational data and basic physical parameters of sources derived from the analytical model. *Acta Astron.* 2004. Vol. 54. P. 249–279.
17. Lacy M., Rawlings S., Saunders R., and Warner P. J. 8C 0821+695: a giant radio galaxy at $z=0.538$. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1993. Vol. 264, Is. 3. P. 721–728. DOI: 10.1093/mnras/264.3.721
18. Leahy J. Interpretation of large scale extragalactic jets. In: P. Hughes, ed. *Beams and Jets in Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. P. 100–186. DOI: 10.1017/CBO9780511564703.004
19. Machalski J., Koziel-Wierzbowska D., Jamroz M., and Salkia D. J. J1420–0545: The radio galaxy larger than 3C 236. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 679, No. 1. P. 149–155. DOI: 10.1086/586703
20. O’Dea C. P., Daly R. A., Kharb P., Freeman K. A., and Baum S. A. Physical properties of very powerful FR II radio galaxies. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 494, No. 2. P. 471–488. DOI: 10.1051/0004-6361:200809416
21. Hunik D. and Jamroz M. Discovery of ultra-steep spectrum giant radio galaxy with recurrent radio jet activity in Abell 449. *Astrophys. J. Lett.* 2016. Vol. 817, No. 1. id. L1. DOI: 10.3847/2041-8205/817/1/L1
2. BRAUDE, S. YA., MEGN, A. V., RASHKOVSKI, S. L., RYABOV, B. P., SHARYKIN, N. K., SOKOLOV, K. P., TKACHENKO, A. P. and ZHOUCK, I. N., 1978. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. II. Source catalogue in the range of declinations $+10^\circ$ to $+20^\circ$. *Astrophys. Space Sci.* vol. 54, is. 1, pp. 37–128. DOI: 10.1007/BF00637903
3. BRAUDE, S. YA., MEGN, A. V., SOKOLOV, K. P., TKACHENKO, A. P. and SHARYKIN, N. K., 1979. Decametric survey of discrete sources in the northern sky. V. Source catalogue in the range of declinations 0° to $+10^\circ$. *Astrophys. Space Sci.* vol. 64, is. 1, pp. 73–126. DOI: 10.1007/BF00640035
4. BRAUDE, S. YA., MIROSHNICHENKO, A. P., SOKOLOV, K. P. and SHARYKIN, N. K., 1981. Decametric survey of discrete sources. VII. Source catalogue in the range of declinations -2° to -13° . *Astrophys. Space Sci.* vol. 74, is. 2, pp. 409–451. DOI: 10.1007/BF00656446
5. BRAUDE, S. YA., MIROSHNICHENKO, A. P., SOKOLOV, K. P. and SHARYKIN, N. K., 1981. Decametric survey of discrete sources. VIII. Spectra of discrete sources in the range 12.6 to 1400 MHz for declinations -2° to -13° . *Astrophys. Space Sci.* vol. 76, is. 2, pp. 279–299. DOI: 10.1007/BF00687495
6. BRAUDE, S. YA., MIROSHNICHENKO, A. P., RASHKOVSKII, S. L., SIDORCHUK, K. M., SIDORCHUK, M. A. and SHARYKIN, N. K., 2003. Decametric survey of discrete sources in the Northern sky. XIIIb. Spectra of discrete sources in the declination zone from $+30^\circ$ to $+40^\circ$. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* vol. 19, no. 4, pp. 291–306. (in Russian).
6. KONOVALENKO, A., SODIN, L., ZAKHARENKO, V., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEP-KIN, S., TOKARSKY, P., MELNIK, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., KOLIADIN, V., SHEPELEV, V., DOROVSKYY, V., RYABOV, V., KOVAL, A., BUBNOV, I., YERIN, S., GRIDIN, A., KULISHENKO, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., REZNIK, A., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., KHRISTENKO, A., SHEVCHENKO, V. V., SHEVCHENKO, V. A., BELOV, A., RUDAVIN, E., VASYLIEVA, I., MIROSHNICHENKO, A., VASILENKO, N., OLYAK, M., MYLOSTNA, K., SKORYK, A., SHEVTSOVA, A., PLAKHOV, M., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., LYTVINENKO, O., SCHEVCHUK, N., ZHOUK, I., BOVKUN, V., ANTONOV, A., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHIN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A., GRIEBMEIER, J.-M., TAGGER, M., GIRARD, J., CHARRIER, D., BRIAND, C. and MANN, G., 2016. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Exp. Astron.* vol. 42, is. 1, pp. 11–48. DOI: 10.1007/s10686-016-9498-x
7. MIROSHNICHENKO, A. P., 2010. Luminosity and space distributions of radio sources with steep spectra at the decimeter band. In: S. K. CHAKRABARTI, A. I. ZHUK and G. S. BISNOVATYI-KOGAN, eds. *Astrophysics and Cosmology after Gamow. AIP Conference Proceedings*. Vol. 1206. New York: AIPC, pp. 335–345. DOI: 10.1063/1.3292538
8. MIROSHNICHENKO, A. P., 2012. Physical parameters of radio sources with steeply rising decimeter wavelength spectra. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 3, is. 3, pp. 215–221. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i3.40
9. MIROSHNICHENKO, A. P., 2013. The timing scale of the steep-spectrum sources. *Odessa Astronomical Publications*. vol. 26, is. 2, pp. 248–250.
10. MIROSHNICHENKO, A. P., 2015. Luminosity-linear size relation for galaxies and quasars with steep radio spectrum. *Odessa Astronomical Publications*. vol. 28, is. 2, pp. 238–241. DOI: 10.18524/1810-4215.2015.28.71032
11. MIROSHNICHENKO, A. P., 2019. Jet propagation velocity and environmental density of giant radio sources with steep radio spectrum. *Astrophys. Space Sci.* vol. 364, is. 5, id. 92. DOI: 10.1007/s10509-019-3580-6
12. DALY, R. A., 1995. Powerful extended radio sources as tools to estimate ambient gas densities, jet luminosities, and other key physical parameters. *Astrophys. J.* vol. 454, pp. 580–592. DOI: 10.1086/176511
13. KLEIN, U., MACK, K.-H. and SARIPALLI, L., 1996. General properties of giant radio galaxies. In: R. EKER, C. FANTI, and L. PADRIELI, eds. *Extragalactic Radio Sources. International Astronomical Union*, vol 175. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., pp. 311–312. DOI: 10.1007/978-94-009-0295-4_109
14. MACK, K.-H., KLEIN, U., O’DEA, C. P., WILLIS, A. G. and SARIPALLI, L., 1998. Spectral indices, particle ages, and the ambient medium of giant radio galaxies. *Astron. Astrophys.* vol. 329, pp. 431–442.

15. SHOENMAKERS, A. P., MACK, K.-H., DE BRUYN, A. G., RÖTTGERING, H. J. A., KLEIN, U. and VAN DER LAAN, H., 2000. A new sample of giant radio galaxies from the WENSS survey. II. A multifrequency radio study of a complete sample: properties of the radio lobes and their environment. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* vol. 146, no. 2, pp. 293–322. DOI: 10.1051/aas:2000267
16. MACHALSKI, J., CHYZY, K. and JAMROZY, M., 2004. Giant radio sources in view of the dynamical evolution of FR II-type population. I. Observational data and basic physical parameters of sources derived from the analytical model. *Acta Astron.* vol. 54, pp. 249–279.
17. LACY, M., RAWLINGS, S., SAUNDERS, R. and WARNER, P. J., 1993. 8C 0821+695: a giant radio galaxy at $z=0.538$. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 264, is. 3, pp. 721–728. DOI: 10.1093/mnras/264.3.721
18. LEAHY, J., 1991. Interpretation of large scale extragalactic jets. In: P. HUGHES, ed. *Beams and Jets in Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 100–186. DOI: 10.1017/CBO9780511564703.004
19. MACHALSKI, J., KOZIEŁ-WIERZBOWSKA, D., JAMROZY, M. and SAIKIA, D. J., 2008. J1420–0545: The radio galaxy larger than 3C 236. *Astrophys. J.* vol. 679, no. 1, pp. 149–155. DOI: 10.1086/586703
20. O'DEA, C. P., DALY, R. A., KHARB, P., FREEMAN, K. A. and BAUM, S. A., 2009. Physical properties of very powerful FR II radio galaxies. *Astron. Astrophys.* vol. 494, no. 2, pp. 471–488. DOI: 10.1051/0004-6361:200809416
21. HUNIK, D. and JAMROZY, M., 2016. Discovery of ultra-steep spectrum giant radio galaxy with recurrent radio jet activity in Abell 449. *Astrophys. J. Lett.* vol. 817, no. 1, id. L1. DOI: 10.3847/2041-8205/817/1/L1

A. P. Miroshnichenko

Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine,
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

ENVIRONMENT DENSITY OF A GIANT RADIO STRUCTURE FOR GALAXIES AND QUASARS WITH STEEP RADIO SPECTRA

Purpose: Estimate of the environment density of giant (with the linear size of about megaparsec) radio structures for galaxies and quasars with steep low-frequency spectra taken from the UTR-2 catalogue. Study of the cosmological evolution of environment density of giant radio sources. Determination of dependence of contribution of radio lobes into the emission of giant sources with respect to their environment density.

Design/methodology/approach: We use the sample of sources from the UTR-2 catalogue of extragalactic sources to estimate the environment density for giant sources with steep low-frequency spectra. The selection criteria for the examined objects are the following: 1) the spectral index value is equal or larger than 1; 2) the flux density of emission at the frequency of 25 MHz is larger than 10 Jy; 3) the sample sources are optically identified. The value of environment density of examined sources is obtained with the assumption of equality of source jet luminosity (at the synchrotron mechanism of radio emission) and its corresponding kinetic luminosity. The analysis of the estimates of environment densities is made for different classes of the sample objects (for galaxies and quasars with linear steep spectra and with break steep spectra).

Findings: The estimates of environment density have been derived for giant radio structures formed by the jets of sources with steep spectrum from the UTR-2 catalogue. On the average, the environment density for the quasar structure ($\sim 10^{-28}$ g/sm³) is lesser than the one for the galaxies ($\sim 10^{-27}$ g/sm³ to $\sim 10^{-26}$ g/sm³). The larger jet environment density is typical for the galaxies and quasars with the break steep spectra than for those with the linear steep spectra. The inverse power relation of the jet environment density and the source redshift (the cosmological evolution of the jet environment density) has been derived. The contribution of jet-related radio lobes into the emission of sources displays the inverse power relation for the environment density of the corresponding radio structures.

Conclusions: The mean values of obtained estimates of environment density of giant jets of radio sources with steep low-frequency spectra indicate the lesser environment density of quasar jets than that for the galaxy jets. Giant radio sources with steep low-frequency spectrum (especially, with break steep spectrum) reveal considerable evolution of environment density of jets. The larger contribution of radio lobes (jets) into the emission of sources corresponds to the lesser environment density of sources taken from the UTR-2 catalogue. It can be due to propagation of jets (surrounded by radio lobes) from powerful radio sources to distances of about megaparsec, until the balance of source's environment density and extragalactic environment density is reached.

Key words: steep low-frequency radio spectrum, giant radio structure, jets, radio lobes, galaxies, quasars, environment density

Стаття надійшла до редакції 01.02.2021 р.