

## ГАЛАКТИКИ ТА КВАЗАРИ ЗІ ДЖЕТОВОЮ СТРУКТУРОЮ

А. П. Мірошніченко

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
вул. Червонопрапорна, 4, Харків, 61002

(Отримано 22 січня 2007 р.; в остаточному вигляді — 26 вересня 2007 р.)

За радіоінтерферометричними даними для трьох вибірок галактик і квазарів отримано низку фізичних характеристик об'єктів із джетами. Зокрема, знайдено оцінку фактора Лоренца, напруженість магнетного поля, характерний вік, світність радіоджерел. Установлено, що швидкості джетів квазарів і потужних радіогалактик мають субсвітлові величини, на відміну від слабких радіогалактик. Знайдено зв'язок характерного віку з відношенням світностей джетового та ядерного компонентів радіоджерел.

**Ключові слова:** галактики, квазари, джети, фактор Лоренца, світність.

PACS number(s): 98.54.Aj, 98.54.Cm, 98.62.Nx

### ВСТУП

Релятивістські джети — струменеві потоки плазми — наявні в радіоджерелах як з потужною, так і з низькою радіосвітністю. Вони є каналами передачі енергії від активних ядер до протяжних радіопелюсток. Інтерферометричні радіоспостереження джетів активних ядер галактик і квазарів виявляють їхню колімовану структуру на масштабах від парсек до сотень кілопарсек, що вказує на високі швидкості джетів. При цьому більшість джетів мають кінчну форму. Розповсюдження джетів характеризується фактором Лоренца [1,2]:

$$\Gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

де  $v$  — швидкість релятивістської плазми,  $c$  — швидкість світла.

Як показано в [3], для релятивістських електронів справедливе співвідношення:

$$\frac{v}{c} = \cos \varphi, \quad (2)$$

де  $\varphi$  — характерний кут між напрямком магнетного поля та вектором швидкості електронів, що рухаються в магнетному полі, фактично, кут розкриття джета. Отже, з виразів (1) та (2) отримуємо залежність фактора Лоренца від кута розкриття джета  $\varphi$ :

$$\Gamma = 1/\sin \varphi. \quad (3)$$

Таким чином, можна оцінити величину фактора Лоренца, визначивши кути їх розкриття за радіозображенням джерел на високих частотах. Видається важливим співвідношення фактора Лоренца та ключових характеристик радіогалактик і квазарів.

### I. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОДЖЕРЕЛ

Ми розглянули три вибірки радіогалактик і квазарів, утворених за даними спостережень різних авторів на радіотелескопі VLA на частотах 1.4 ГГц та 5 ГГц [4,5,6,7]. Вибірка I містить дані для 79 велетенських радіогалактик — об'єктів, лінійні розміри яких сягають величин близько 1 Мпк [4]. У вибірку II входять дані для 57 об'єктів (27 радіогалактик, 25 квазарів, 5 неототожнених об'єктів) із [5]. Ці радіоджерела мають помірні лінійні розміри. Вибірка III містить дані для 83 квазарів і 7 лацертид із [6,7], які вирізняються особливо яскравими ядрами з плоскими радіоспектрами.

Вибірка I характеризується середнім червоним зміщенням  $\langle z \rangle = 0.158 \pm 0.015$ , середнім спектральним індексом  $\langle \alpha \rangle = 0.89 \pm 0.10$ ; у вибірці II маємо відповідні величини  $\langle z \rangle = 0.859 \pm 0.136$  та  $\langle \alpha \rangle = 0.71 \pm 0.13$ . Зокрема, для радіогалактик з вибірки II відповідні значення  $\langle z \rangle = 0.155 \pm 0.070$  і  $\langle \alpha \rangle = 0.68 \pm 0.04$ , для квазарів із вибірки II маємо  $\langle z \rangle = 1.282 \pm 0.150$  та  $\langle \alpha \rangle = 0.70 \pm 0.05$ , а для 5 неототожнених об'єктів у цій вибірці  $\langle \alpha \rangle = 0.93 \pm 0.13$ . Для вибірки III середні величини такі:  $\langle z \rangle = 1.090 \pm 0.060$ ,  $\langle \alpha \rangle = 0.22 \pm 0.06$ , зокрема для квазарів:  $\langle z \rangle = 1.130 \pm 0.060$ ,  $\langle \alpha \rangle = 0.27 \pm 0.06$ , для лацертид  $\langle z \rangle = 0.584 \pm 0.127$ ,  $\langle \alpha \rangle = -0.43 \pm 0.16$ .

Використовуючи радіозображення галактик і квазарів на високих частотах у вказаних вибірках, визначаємо кути розкриття джетів  $\varphi$  із співвідношення (3). Для цього знаходимо відношення поперечного ( $d$ ) та повздовжнього ( $l$ ) розмірів джетів для об'єктів вибірок:

$$\operatorname{tg}(\varphi/2) = d/2l. \quad (4)$$

Уважаємо, що орієнтація джетів об'єктів відповідає випадковому розподілу. Ефектів проєкції джетів на небесну сферу не враховуємо, оскільки вони впливають як на довжину  $l$ , так і на ширину  $d$  джетів, а ми використовуємо лише відношення  $d/l$  у виразі (4).

У результаті, визначивши кути розкриття  $\varphi$ , отримуємо оцінку фактора Лоренца  $\Gamma$  для джетів об'єктів із вибірок I, II, III:

$$\begin{aligned} \langle \Gamma \rangle &= 3.49 \pm 0.20 \text{ (Вибірка I, велетенські галактики);} \\ \langle \Gamma \rangle &= 3.43 \pm 0.33 \text{ (Вибірка II, галактики + квазари);} \\ \langle \Gamma \rangle &= 3.86 \pm 0.33 \text{ (Вибірка III, квазари + лацертиди).} \end{aligned}$$

Відзначимо, що середні величини фактора Лоренца для галактик морфологічних типів FR1 та FR2 у вибірці I становлять:  $\langle \Gamma \rangle = 3.49 \pm 0.27$  для FR1,  $\langle \Gamma \rangle = 3.52 \pm 0.32$  для FR2, а для проміжного типу FR1/FR2 величина  $\langle \Gamma \rangle = 3.37 \pm 0.41$ . У вибірці II маємо для галактик  $\langle \Gamma \rangle = 3.86 \pm 0.53$ , для квазарів  $\langle \Gamma \rangle = 2.64 \pm 0.32$ , а для неототожнених об'єктів  $\langle \Gamma \rangle = 4.96 \pm 1.64$ . Із вибірки III ми отримали  $\langle \Gamma \rangle = 3.85 \pm 0.34$  для квазарів та  $\langle \Gamma \rangle = 4.06 \pm 1.25$  для лацертид.

Отже, середня величина фактора Лоренца в межах статистичних похибок практично однакова для різних типів радіоджерел. Розкид значень  $\Gamma$ -величин може бути зумовлений різною орієнтацією джетів щодо спостерігача. Водночас, з  $\Gamma$ -величинами може бути пов'язана власна еволюція радіоджерел.

При загальноприйнятій умові рівнорозподілу енергії магнетного поля та релятивістських частинок для джерел синхротронного радіовипромінювання [1] ми отримали оцінки напруженості магнетного поля  $B$  та характерного віку  $t_\nu$  для об'єктів вибірок I, II, III:

$$B = \left[ 48\kappa A(\gamma, \nu) \frac{S_\nu}{r\theta^3} \right]^{2/7}, \quad (5)$$

де  $\kappa = 100$  (відношення енергій протонів та електронів);  $A(\gamma, \nu)$  — заґабульована функція;  $\gamma$  — показник розподілу електронів за енергіями;  $S_\nu$  — густина потоку на частоті  $\nu$ ;  $r$  — відстань до об'єкта;  $\theta$  — кутовий розмір об'єкта;

$$t_\nu = \left( \frac{340B^{-3}}{\nu} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

де  $t_\nu$  — в роках,  $B$  — в гаусах,  $\nu$  — в МГц.

Також ми визначили світності  $L_\nu$  на кількох частотах  $\nu$  та лінійні розміри  $R$  для галактик і квазарів в наших вибірках. Крім того, ми знайшли відношення густин потоків випромінювання  $S_\nu$  (тотожне відношенню світностей) на низьких та високих частотах для розглянутих радіоджерел. Це співвідношення може свідчити про внесок радіосвітності джета стосовно компактного (ядерного) компонента об'єкта.

Фізичні параметри для об'єктів вибірок мають такі середні величини:

Вибірка I, велетенські радіогалактики:

$$\begin{aligned} \langle B \rangle &= 3.94 \cdot 10^{-5} (\pm 1.97 \cdot 10^{-6}) \text{ Гс;} \\ \langle t_{178} \rangle &= 7.83 \cdot 10^6 (\pm 6.76 \cdot 10^5) \text{ років;} \\ \langle L_{178} \rangle &= 1.40 \cdot 10^{25} (\pm 6.22 \cdot 10^{24}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{1400} \rangle &= 1.14 \cdot 10^{24} (\pm 5.37 \cdot 10^{21}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle R \rangle &= 2.05 \cdot 10^{24} (\pm 1.54 \cdot 10^{23}) \text{ см;} \\ \langle \log(S_{178}/S_{1400}) \rangle &= 0.85 \pm 0.08. \end{aligned}$$

Вибірка II,  $Q$  +  $G$ :

$$\begin{aligned} \langle B \rangle &= 1.5 \cdot 10^{-3} (\pm 5 \cdot 10^{-4}) \text{ Гс;} \\ \langle t_{178} \rangle &= 6.53 \cdot 10^5 (\pm 3.98 \cdot 10^5) \text{ років;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle L_{5000} \rangle &= 1.14 \cdot 10^{26} (\pm 3.64 \cdot 10^{25}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{1400} \rangle &= 2.07 \cdot 10^{26} (\pm 6.6 \cdot 10^{25}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{178} \rangle &= 1.32 \cdot 10^{27} (\pm 4.4 \cdot 10^{26}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{25} \rangle &= 3.01 \cdot 10^{27} (\pm 2.52 \cdot 10^{27}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle R \rangle &= 4.04 \cdot 10^{23} (\pm 4.27 \cdot 10^{22}) \text{ см;} \\ \langle \log(S_{178}/S_{1400}) \rangle &= 0.67 \pm 0.04; \\ \langle \log(S_{25}/S_{5000}) \rangle &= 1.98 \pm 0.10. \end{aligned}$$

Вибірка III,  $Q$  + лацертиди:

$$\begin{aligned} \langle B \rangle &= 1.0 \cdot 10^{-3} (\pm 1 \cdot 10^{-4}) \text{ Гс;} \\ \langle t_{178} \rangle &= 1.6 \cdot 10^5 (\pm 2.4 \cdot 10^4) \text{ років;} \\ \langle L_{5000} \rangle &= 1.25 \cdot 10^{26} (\pm 1.77 \cdot 10^{25}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{1400} \rangle &= 1.87 \cdot 10^{26} (\pm 3.9 \cdot 10^{25}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{178} \rangle &= 7.56 \cdot 10^{26} (\pm 1.36 \cdot 10^{26}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle L_{25} \rangle &= 3.92 \cdot 10^{27} (\pm 8.37 \cdot 10^{26}) \text{ Вт} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1}; \\ \langle R \rangle &= 3.3 \cdot 10^{23} (\pm 3.3 \cdot 10^{22}) \text{ см;} \\ \langle \log(S_{178}/S_{5000}) \rangle &= 0.73 \pm 0.06; \\ \langle \log(S_{25}/S_{5000}) \rangle &= 1.44 \pm 0.10. \end{aligned}$$

Наведені значення фізичних параметрів указують на те, що потужні радіогалактики та квазари (вибірки II, III) мають сильніше магнетне поле та менший характерний вік, ніж велетенські радіогалактики (вибірка I). Це узгоджується з припущенням, що велетенські радіогалактики є старими об'єктами, джети яких за характерний час існування радіоджерел поширилися до відстаней близько мегарсек від активного ядра. Про значний вік велетенських галактик свідчать їхні круті радіоспектри, які є наслідком синхротронного висвічування релятивістських електронів.

Можна відзначити, що величина відношення густин радіопотоків на низьких і високих частотах, наприклад на частотах 178 МГц і 1400 МГц, помітно зменшується для квазарів і лацертид (вибірка III) порівняно з аналогічною величиною для велетенських радіогалактик (вибірка I). Отже, це вказує на компактність квазарів та лацертид і свідчить про більший внесок джетового компонента у світність велетенських галактик порівняно з внеском центрального компонента (ядра) цих галактик.

## II. ОЦІНКИ ШВИДКОСТІ ДЖЕТІВ ГАЛАКТИК І КВАЗАРІВ

При визначенні фізичних параметрах радіоджерел можна кількома методами оцінити швидкість розповсюдження джетів [8]. Наприклад, вважаємо, що світність джета  $L_j$  приблизно дорівнює кінетичній світності  $L_k$ . Величину  $L_j$  можна виразити у вигляді

$$L_j = \frac{4}{3} \pi r_j^2 v_j U, \quad (7)$$

де  $U = \frac{7}{8} \frac{B^2}{8\pi}$ ,  $r_j$  — радіус джета,  $v_j$  — швидкість джета.

Величину кінетичної світності  $L_k$  можна зобразити як темп зміни кінетичної енергії джета:

$$L_k = \frac{\pi r_j^2 \rho_j v_j^3}{2}, \quad (8)$$

де  $\rho_j$  — густина джета.

Із (7) та (8) маємо вираз для оцінки швидкості джета:

$$v_j = \sqrt{\frac{7}{\pi\rho_j}} \cdot \frac{B}{3}. \quad (9)$$

Приймаємо, що густина джетів велетенських галактик має величину  $\rho_j = 10^{-27} \text{ г/см}^3$ , а густина джетів квазарів і потужних радіогалактик  $\rho_j = 10^{-25} \text{ г/см}^3$ . Проведені обчислення дають такі середні значення для швидкості джетів різних типів об'єктів:

Вибірка I, велетенські радіогалактики:

$$\begin{aligned} \langle v_j \rangle &= 6.20 \cdot 10^8 (\pm 3.1 \cdot 10^7) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_{\text{FR1}} &= 5.53 \cdot 10^8 (\pm 3.92 \cdot 10^7) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_{\text{FR2}} &= 6.41 \cdot 10^8 (\pm 4.44 \cdot 10^7) \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Вибірка II,  $Q + G$ :

$$\begin{aligned} \langle v_j \rangle &= 2.35 \cdot 10^9 (\pm 8.5 \cdot 10^8) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_G &= 2.55 \cdot 10^9 (\pm 1.8 \cdot 10^9) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_Q &= 2.23 \cdot 10^9 (\pm 8.65 \cdot 10^8) \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Вибірка III,  $Q + BL$ :

$$\begin{aligned} \langle v_j \rangle &= 1.680 \cdot 10^9 (\pm 1.58 \cdot 10^8) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_Q &= 1.71 \cdot 10^9 (\pm 1.67 \cdot 10^8) \text{ см/с}; \\ \langle v_j \rangle_{BL} &= 1.29 \cdot 10^9 (\pm 2.7 \cdot 10^8) \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Отримані результати показують, що швидкості джетів квазарів і галактик досягають субсвітлових значень. При цьому повільніші, як слід очікувати, джети велетенських радіогалактик. Очевидно, величини швидкості джетів можуть визначатися як властивостями радіоджерел, так і властивостями середовища, у якому розповсюджуються джети.

Цікаво оцінити швидкість розповсюдження передбачуваного джета нашої Галактики [9]. Згідно з нашою гіпотезою [9,10], великомасштабна особливість галактичного фону — Північний Полярний Шпур (ППШ) — є джетом нашої Галактики. Будемо вважати, що спостережуване збільшення спектрального індексу від  $\alpha_0$  до  $\alpha$  вздовж центральної довготи ППШ зумовлене синхротронним висвічуванням релятивістських електронів у джеті за характерний час  $t_\alpha$ . У цьому випадку можна скористатися відповідним методом визначення швидкості джета [8]:

$$t_\alpha = \frac{(\nu_2/\nu_1)^{(\alpha-\alpha_0)/(2\alpha_0-1)} - 1}{\mu B^2 [E_2 (\nu_2/\nu_1)^{(\alpha-\alpha_0)/(2\alpha_0-1)} - E_1]}, \quad (10)$$

де  $\mu = 1.57 \cdot 10^{-3}$ ;  $E_i = (\nu_i/1.41 \cdot 10^{18} B)^{1/2}$ ;  $\nu_1, \nu_2$  — частоти, в інтервалі яких визначаються спектральні індекси  $\alpha_0$  та  $\alpha$  для радіоспектра джета.

Очевидно, що:

$$v_j = \frac{\Delta r}{t_\alpha}, \quad (11)$$

де  $v_j$  — швидкість джета,  $\Delta r$  — лінійна відстань між ділянками джета, яким відповідають спектральні індекси  $\alpha_0$  та  $\alpha$ .

За картами галактичного фону на 10 МГц і 200 МГц ми обчислили значення спектрального індексу ППШ [9] на рівнях галактичних широт  $b = 10^\circ$  та

$b = 20^\circ$  уздовж центральної довготи ППШ відповідно:  $\alpha_0 = 0.43$  і  $\alpha = 0.56$ . Напруженість магнетного поля ППШ, згідно з нашими оцінками [9],  $B \sim 10^{-5}$  Гс. Отже, із (10) знаходимо, що характерний час  $t_\alpha \sim 10^8$  років, значення якого є типовим для більшості радіогалактик. При відстані до осі ППШ  $\sim 8$  кпк [9] одержуємо, що величина  $\Delta r = 1.4$  кпк. Тоді з виразу (11) отримуємо оцінку швидкості розповсюдження джета нашої Галактики:  $v_j = 2.7 \cdot 10^6$  см/с, тобто  $v_j \sim 10^{-4} c$ , де  $c$  — швидкість світла. Ця величина відповідає джетові слабкої радіогалактики, а саме такою і є наша Галактика.

### III. СПІВВІДНОШЕННЯ ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ У ВИБІРКАХ

Ми проаналізували співвідношення швидкостей джетів та інших фізичних параметрів радіоджерел. Відзначимо, що в наших вибірках спостерігається залежність швидкості джетів від лінійних розмірів галактик і квазарів із високим коефіцієнтом кореляції ( $\sim 0.9$ ) (див. рис. 1). Також ми встановили кореляцію швидкості джетів та внеску в радіосвітності галактик і квазарів їх джетового компонента (тобто відношення світностей джетового та ядерного компонентів) (рис. 2). Позитивний тренд наявний у залежності швидкості джетів від монохроматичної світності галактик і квазарів на різних частотах (рис. 3). Виявилось, що характерний вік галактик і квазарів корелює з величиною відношення радіосвітностей джетового та ядерного компонентів (рис. 4).

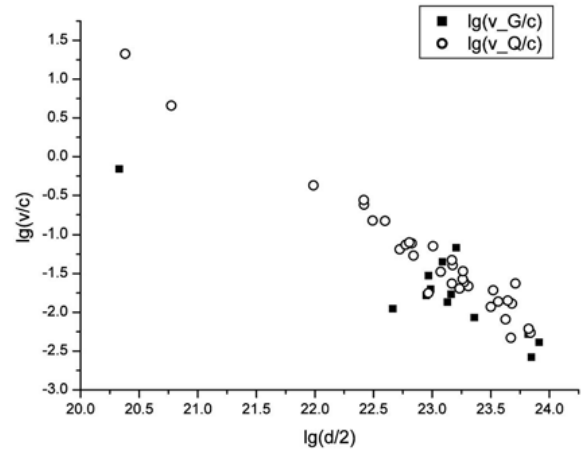


Рис. 1. Залежність швидкості джетів від лінійних розмірів галактик і квазарів.

Із розгляду співвідношення фактора Лоренца  $\Gamma$  та отриманих фізичних параметрів радіоджерел ми знайшли залежність величини  $\Gamma$  від напруженості магнетного поля галактик і квазарів (рис. 5). Водночас, залежність величин  $\Gamma$  та світностей  $L_\nu$ , а також величин  $\Gamma$  і червоного зміщення  $z$  має велику дисперсію.

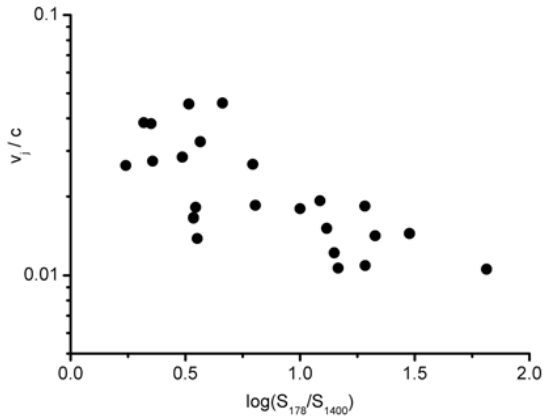


Рис. 2. Залежність швидкості джетів від відношення світностей джетового та ядерного компонентів радіоджерел.

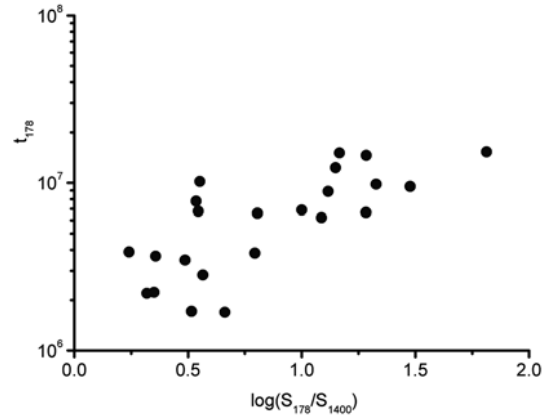


Рис. 4. Залежність характерного віку галактик і квазарів від внеску джетового компонента в радіосвітність джерел.

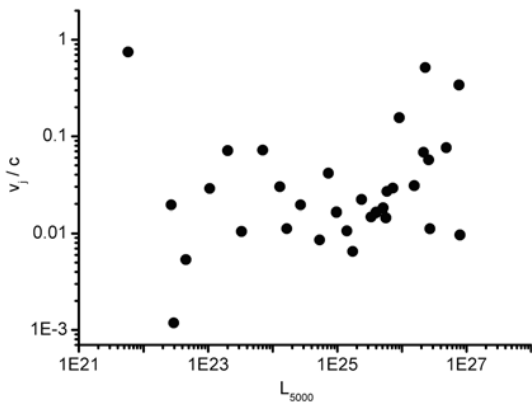


Рис. 3. Залежність швидкості джетів від монохроматичної світності галактик і квазарів.

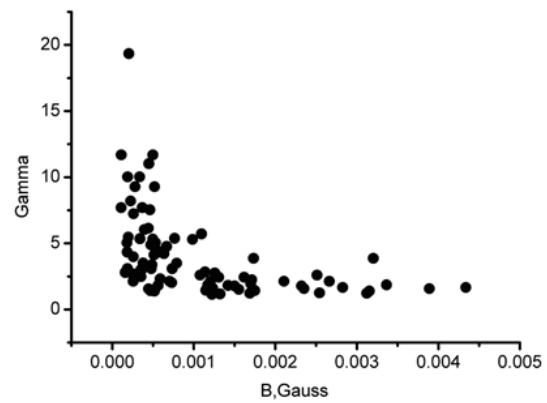


Рис. 5. Залежність фактора Лоренца від величини напруженості магнетного поля галактик і квазарів.

## ВИСНОВКИ

Безпосередньо з радіоінтерферометричних даних для галактик і квазарів отримано оцінку фактора Лоренца для джетів на кілопарсеківих масштабах. Установлено залежність фактора Лоренца від напруженості магнетного поля об'єктів, яка може бути зумовлена зв'язком магнетного поля з колімацією джетів.

Знайдено, що швидкості джетів квазарів і потужних радіогалактик, на відміну від слабких радіогалактик, мають субсвітлові величини.

Оцінка швидкості передбачуваного джета нашої Галактики відповідає величині швидкості джетів слабких радіогалактик.

Виявлено, що швидкості джетів більші в компактніших радіоджерелах.

Зв'язок характерного віку радіоджерел з відношенням світностей їхніх джетового та ядерного компонентів свідчить про більший внесок джетового компонента в радіосвітність старих об'єктів.

Автор висловлює подяку рецензентові за корисні зауваження.

[1] В. Л. Гинзбург, *Теоретическая физика и астрофизика* (Наука, Москва, 1987).  
 [2] R. Blandford, A. Königl, *Astrophys. J.* **232**, 34 (1979).  
 [3] А. Пахольчик, *Радиогалактики* (Мир, Москва, 1980).  
 [4] L. Lara *et al.*, NRAO Preprint 3, Charlottesville, Virginia, USA, 2001.  
 [5] C. Lawrence *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **61**, 105 (1986).  
 [6] D. Murphy, I. Brown, R. Perley, *Mon. Not. R. Astron.*

*Soc.* **264**, 298 (1993).  
 [7] A. Reid *et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl.* **110**, 213 (1995).  
 [8] A. P. Miroshnichenko, *Astron. Astrophys. Trans.* **24**, 409 (2006).  
 [9] A. P. Miroshnichenko, in *Abstract book of the IAU XXV General Assembly, Sydney, 2003*, p. 248.  
 [10] A. P. Miroshnichenko, *Baltic Astronomy* **14**, 443 (2005).

**GALAXIES AND QUASARS WITH JETS**

A. P. Miroshnichenko

*Institute of Radio Astronomy of NAS of Ukraine*

*4, Chervonopraporna St., Kharkov, 61002*

*e-mail: mir@ira.kharkov.ua*

A number of physical characteristics of jet objects were obtained from the radio interferometry data for three samples of galaxies and quasars. The estimate of Lorentz factor, the magnetic field strength, the characteristic age, the luminosity of radio sources were found among others. As we determined, jet velocities of quasars and powerful radio galaxies have sublight values, unlike weak radio galaxies. A relation of the characteristic age with the ratio of luminosities of jet and nucleus components of radio sources was derived.