

УДК 524.7-733

Н. Г. Чеснок¹, С. Г. Сергеев², І. Б. Вавилова^{3, 4}¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Астрономічна обсерваторія
вул. Обсерваторна 3, Київ, 04053²НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія»
Наукове, Крим, 98409³Головна астрономічна обсерваторія НАН України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, 03680⁴Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ
вул. Академіка Глушкова 40, Київ, 03680**Оптическая та рентгенівська змінність галактик Сейферта
NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151,
Mrk 509, Mrk 79, Akn 564 та квазара 1E 0754**

Подаються результати крос-кореляційного аналізу оптичних та рентгенівських кривих блиску восьми галактик Сейферта: NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Akn 564 та оптичних спектрів квазара 1E 0754. Для галактик Сейферта NGC 5548 та NGC 7469 отримано високе максимальне значення коефіцієнта кореляції між зміною потоку в оптичному та рентгенівському діапазонах (0.73 та 0.79 відповідно) і час затримки, розрахований на максимумі крос-кореляційної функції, ($2.800_{-1.58}^{+3.12}$ діб і $0.6_{-4.3}^{+0.9}$ діб відповідно). Цей результат свідчить, що рентгенівський потік перевипромінюється в оптичному діапазоні через механізм прямого ефекту Комптона. Для шести об'єктів (за виключенням Akn 564 та NGC 4151) крім основного максимуму спостерігається крило в тій частині крос-кореляційної функції, що відповідає затримці в рентгенівському діапазоні відносно оптичного приблизно на 10 діб. Наведено один із методів визначення маси центральної чорної діри в АЯГ за шириною спектральних ліній та визначено масу центральної чорної діри в квазарі 1E 0754 ($M_{BH} = 1.01 \cdot 10^8 M_{Sun}$). Положення квазара 1E 0754 на діаграмі маса — світність відповідає положенню інших галактик типу NLS1.

ОПТИЧЕСКАЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, MRK 509, MRK 79, AKN 564 И КВАЗАРА 1E 0754, ЧЕСНОК Н. Г., СЕРГЕЕВ С. Г., ВАВИЛОВА И. Б. — Представлены результаты кросс-корреляционного анализа оптических и рентгеновских кривых блеска восьми галактик Сейферта: NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Akn 564 и оптических спектров квазара 1E 0754. Для галактик Сейферта NGC 5548 и NGC 7469 получено высокое максимальное значение коэффициента корреляции между изменением потока в

оптичском и рентгеновском диапазонах (0.73 и 0.79 соответственно). Время запаздывания, рассчитанное по максимуму кросс-корреляционной функции ($2.800_{-1.58}^{+3.12}$ сут и $0.6_{-4.3}^{+0.9}$ сут соответственно). Этот результат свидетельствует о том, что для галактик Сейферта NGC 5548 и NGC 7469 характерно переизлучение рентгеновского потока в оптическом диапазоне (механизм прямого эффекта Комптона). Для шести объектов (кроме Akn 564 и NGC 4151) кроме основного максимума, который соответствует запаздыванию изменения потока в оптическом диапазоне относительно рентгеновского, наблюдается крыло в той части кросс-корреляционной функций, которое соответствует задержке в рентгеновском диапазоне относительно оптического примерно на 10 сут. Приводится один из методов определения массы центральной черной дыры в АЯГ по ширине спектральных линий, с помощью которого определена масса центральной черной дыры в квазаре 1E 0754 ($M_{BH} = 1.01 \cdot 10^8 M_{Sun}$). Положение квазара 1E 0754 на диаграмме масса — светимость соответствует положению других галактик типа NLS1.

OPTICAL AND X-RAY VARIABILITY OF THE SEYFERT GALAXIES NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, MRK 509, MRK 79, AKN 564 AND QUASAR 1E 0754, by Chesnok N. G., Sergeev S. G., Vavilova I. B. — We present our results of cross-correlation analysis of the optical and X-ray light curves for eight Seyfert galaxies: NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Akn 564 and for the optical spectrum of the quasar 1E 0754. We obtained a high maximum value of the cross-correlation coefficient between variations in the optical and X-ray spectral regions for the Seyfert galaxies NGC 5548 and NGC 7469 (0.73 and 0.79, respectively). The time of lag calculated at the maximum of the cross-correlation function is $2.800_{-1.58}^{+3.12}$ days for NGC 5548 and $0.6_{-4.3}^{+0.9}$ days for NGC 7469. The result is an evidence in favour of the assumption on the Compton scattering of the X-ray flux variation in the optical region for these galaxies. The wing (except for the main maximum corresponding to the delay in optical region in relation to X-ray region) exists in the part of the cross-correlation functions which corresponds to the delay in the X-ray region in relation to optical one for the whole sample (except for Akn 564 and NGC 4151) with the time of lag of about 10 days. We present one of the methods for determination of the mass of a central black hole in AGN through the spectral line width. Using this method the mass of the central black hole in the quasar 1E 0754 is estimated to be $M_{BH} = 1.01 \cdot 10^8 M_{Sun}$. The position of 1E 0754 is in a good agreement with the position of other NLS1 galaxies in mass-to-luminosity diagram.

ВСТУП

Активні ядра галактик (АЯГ) є одними з кандидатів в об'єкти, що містять в собі баріонну темну матерію Всесвіту. Одним із пояснень енергетики та особливостей випромінювання АЯГ є акреція речовини на центральне джерело — надмасивну чорну діру.

Оцінки діапазону мас чорних дір в АЯГ залежать від їхніх типів. Так, для галактик Сейферта I типу (NLS1) однією з характерних особливостей є відносно мала маса центральної чорної діри, яка складає близько $M_{BH} = (10^6 \dots 10^8) M_{Sun}$, та висока світність ядра, яка наближається до границі Еддінгтона [26, 39]. Загалом для галактик Сейферта I типу характерна маса

центральної чорної діри становить $M_{BH} = (10^6 \dots 10^9) M_{Sun}$ [18]. Для галактик Сейферта II типу нижній діапазон мас центральних чорних дір на порядок вищий ($M_{BH} = (10^8 \dots 10^9) M_{Sun}$). Для квазарів характерна маса центральної чорної діри становить $M_{BH} = (10^8 \dots 10^{12}) M_{Sun}$ [2, 15].

Спостереження в усіх діапазонах електромагнітних хвиль дають можливість встановити зв'язок між зміною потоку (в спектральних лініях та континуумі) зі спектральним індексом та іншими параметрами. Саме зв'язок між зміною потоку в різних діапазонах електромагнітних хвиль дозволяє ввести обмеження на різні механізми активності АЯГ та встановити зв'язок між внеском темної та звичайної матерії.

З цією метою ми виконали дослідження оптичної і рентгенівської змінності потоку випромінювання для дев'яти галактик Сейферта: NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Acp 564, 1E 0754. Фотометричні та спектральні (для 1E 0754) спостереження цих галактик проводяться в Кримській астрофізичній обсерваторії з 1990-х років. Для побудови оптичних кривих блиску були використані дані спостережень, отриманих за допомогою 70-см телескопа АЗТ-8; оптичні спектри квазара 1E 0754 були отримані під час спостережень на 2.6-м телескопі ЗТШ. Для проведення крос-кореляційного аналізу були використані також криві блиску у рентгенівському діапазоні з бази даних супутника RXTE.

Коротко опишемо основні фізичні характеристики досліджуваних об'єктів.

NGC 5548. Класифікується як галактика Сейферта I типу. Масу центральної чорної діри $M_{BH} = 6.54^{+0.26}_{-0.25} \cdot 10^7 M_{Sun}$ знайдено за областю широких емісійних ліній. Світність у довжині хвилі $\lambda = 510$ нм становить $L_{510} = 4.7 \cdot 10^{35}$ Дж/с, час затримки між змінами потоку в континуумі та лінії H_{β} — $6.3^{+2.6}_{-2.3}$ діб [39].

При дослідженні властивостей спектрів в оптичному та УФ-діапазонах виявлено змінність емісійної лінії Fe II та кореляцію змін у лінії зі змінами у континуумі. Амплітуда зміни потоку в лінії Fe II в оптичному та УФ-діапазонах перевищує амплітуду зміни потоку в лінії H_{β} [35]. Знайдено кореляцію між зміною потоку у смугах k ($\lambda = 2.2$ мкм) та v ($\lambda = 0.55$ мкм) за двома мінімумами: $\delta t = 48^{+3}_{-2}$ діб за першим мінімумом та $\delta t = 47^{+5}_{-6}$ діб за другим мінімумом. Цей час затримки відповідає відстані в світлових добах від центрального джерела до пилового тору навколо галактики. При порівнянні з розмірами області широких емісійних ліній (ШЕЛ) встановлено, що внутрішній радіус пилового тору навколо галактики відповідає зовнішньому радіусу області ШЕЛ [32].

NGC 7469. Червоне зміщення $z = 0.01632$ [28], видима зоряна величина $V = 13.0^m$ [22]. Газ, який поглинає випромінювання в рентгенівському діапазоні, переносить відповідно 90 % маси та 95 % кінетичної енергії [4]. NGC 7469 є одним із небагатьох об'єктів, для яких обчислено час затримки між змінами потоку в УФ- та оптичному континуумах [7, 36].

Знайдено кореляцію між зміною потоку в рентгенівському діапазоні на частоті 2—4 та 4—10 кеВ з часом затримки 3.5 год. Подібний час затримки та період визначено при порівнянні кривих блиску 2—4 кеВ та 10—15 кеВ [24]. Згідно з іншими даними знайдено можливу кореляцію між зміною потоку в рентгені між діапазонами 2—4, 4—10, та 10—15 кеВ з часом затримки 0.5 діб. На цих даних ґрунтується ідея, що жорстке рентгенівське випромінювання в АЯГ виникає за рахунок оберненого ефекту Комптона,

тобто розсіяння фотонів на електронах, внаслідок чого їхня енергія зростає [20]. Знайдено надлишок випромінювання у м'якому рентгені в області 0.8 кеВ [9].

NGC 3227. Класифікується як галактика Сейферта I типу (NLS 1). Початкова оцінка маси $M_{BH} = 2 \cdot 10^8 M_{Sun}$ [28]. Інші оцінки маси $M_{BH} = 4.9 \cdot 10^7 M_{Sun}$ обчислено WPM [34]. Значення, отримане за шириною лінії H_{β} , становить $M_{BH} = 3.8 \cdot 10^7 M_{Sun}$ [32]. В роботі [12] отримано нижню границю маси $M_{BH} = 1.5 \cdot 10^7 M_{Sun}$, визначену за кінематикою газу CO.

NGC 3516. Червоне зміщення $z = 0.00884 \pm 0.00002$ [14], видима зоряна величина $V = 12.5^m$ [22]. Обчислена маса центральної чорної діри дорівнює $M_{BH} = 16.8^{+3.8} \cdot 10^6 M_{Sun}$ [22]. Маса, отримана із застосуванням моделі нагрітого поглинача рентгенівського випромінювання, оцінюється як $M_{BH} = 1.12^{+0.05} \cdot 10^7 M_{Sun}$. Інші моделі, в яких маса знаходиться за особливостями випромінювання в рентгенівському діапазоні, дають оцінку близько $M_{BH} = 10^8 M_{Sun}$ [13] та $M_{BH} = 42.7^{+14.6} \cdot 10^6 M_{Sun}$ [25]. В роботі [18] не було виявлено кореляції між зміною потоку в оптичному та рентгенівському діапазонах; спростовано попередній результат, згідно з яким зміни потоку в рентгенівському діапазоні затримуються відносно змін потоку в оптичному діапазоні на 100 діб.

NGC 4051. Червоне зміщення $z = 0.00234$ [28], видима зоряна величина $V = 10.8^m$ [22]. Класифікується як галактика Сейферта I типу (NLS 1). Маса центральної чорної діри $M_{BH} = 3_{-1}^{+2} \cdot 10^5 M_{Sun}$, знайдена за спостереженнями в рентгенівському діапазоні, добре узгоджується з оцінкою маси $M_{BH} = 5_{-3}^{+6} \cdot 10^5 M_{Sun}$, отриманою ревербераційним методом. Світність становить близько 30 % світності Еддінгтона для цього об'єкта [19]. Віріальна маса центральної чорної діри, обчислена за ревербераційним методом, складає $M_{BH} = 0.13_{-0.08}^{+0.13} \cdot 10^7 M_{Sun}$ [38] (за даними [25] вона складає $M_{BH} = 1.91^{+0.78} \cdot 10^6 M_{Sun}$).

NGC 4151. Червоне зміщення $z = 0.00332$ [29], видима зоряна величина $V = 11.5^m$ [22]. Віріальна маса центральної чорної діри, обчислена за ревербераційним методом, складає $M_{BH} = 1.53_{-0.89}^{+1.06} \cdot 10^7 M_{Sun}$ [38] (за даними [25] $M_{BH} = 13.3^{+4.6} \cdot 10^6 M_{Sun}$).

Ark 546. Класифікується як галактика Сейферта I типу (NLS 1). Червоне зміщення $z = 0.024$. Маса центральної чорної діри $M_{BH} = 2.6 \cdot 10^6 M_{Sun}$ [5]. Для пояснення змінності, що спостерігається, запропоновано модель диску з двома окремими джерелами змінності. Ці джерела не є областями, що випромінюють в рентгенівському діапазоні, а змінність відповідає флуктуаціям швидкості акреції [16]. Це теоретичне припущення узгоджується з висновком про відсутність кореляції між зміною потоку в оптичному та рентгенівському діапазонах, отриманим у наших розрахунках. Спектр в рентгенівському діапазоні характеризується швидкою змінністю та наявністю широкої та несиметричної лінії Fe K_{α} з еквівалентною шириною в 550 еВ, збільшення потужності випромінювання в області 1 кеВ та наявність сильних ліній Fe в оптичному діапазоні вказує на надлишок Fe в цій та, можливо, і в інших галактиках Сейферта типу NLS1 [33].

Mrk 79. Класифікується як галактика Сейферта типу 1.2 [23]. Червоне зміщення $z = 0.022189 \pm 0.000027$, видима зоряна величина $V = 13.9^m$ [28]. Віріальна маса центральної чорної діри, обчислена за ревербераційним методом, складає $M_{BH} = 5.2_{-2.889}^{+2.0} \cdot 10^7 M_{Sun}$ [38] (за даними [25] вона складає $M_{BH} = 52.4^{+14.4} \cdot 10^6 M_{Sun}$).

Mrk 509. Класифікується як галактика Сейферта I типу. Червоне зміщення $z = 0.03440$ [28], видима зоряна величина $V = 13.0^m$ [22]. Маса центральної чорної діри, обчислена за ревербераційним методом, складає $M_{BH} = 7.96^{+0.05}_{-0.06} \cdot 10^7 M_{Sun}$ [6], що узгоджується з іншими отриманими результатами, наприклад, за шириною лінії H_{β} ($M_{BH} = 14.3^{\pm 12} \cdot 10^7 M_{Sun}$ [25]).

МЕХАНІЗМИ АКРЕЦІЇ НА ЧОРНІ ДІРИ В АЯГ

Згідно з сучасними уявленнями про будову активних ядер галактик в їхньому центрі знаходиться надмасивна чорна діра, навколо якої обертаються зоряні системи, газ та інші галактичні складові. Активність галактики визначається потужністю випромінювання з її центральних областей, яке відбувається за рахунок виділення енергії під час акреції газу та пилу областей, близьких до центральної чорної діри.

Ще донедавна розглядалося декілька механізмів енерговиділення АЯГ, зокрема: 1) зоряне скупчення кулястого типу, але з більш високою щільністю зір; 2) надзоря — намагнічений нахилений ротатор (магнетоїд) та 3) дискова акреція на надмасивну чорну діру. В моделі зоряного скупчення механізмом енерговиділення вважалися випадкові потужні спалахи окремих зір, типу спалаху наднової. Такими спалахами намагалися пояснити вид кривих блиску, але для цього потрібно було вводити вільні параметри моделі. Крім того, в рамках цієї моделі складно пояснити тривалі мінімуми активності АЯГ. Модель магнетоїда — аналог пульсара, максимум випромінювання якого знаходиться в ІЧ-області, — дозволяв пояснити так звані ІЧ-надлишки. Але після того, як було виконано оцінки мас та розмірів центральних джерел в АЯГ, стало зрозуміло, що в цих моделях ні зоряне скупчення, ні магнітоїд не можуть претендувати на роль «центрального джерела», оскільки його розміри не перевищують $(10...20)r_g$.

Найбільш ймовірно вважається модель АЯГ, в центрі якого перебуває надмасивна чорна діра (НЧД), а енерговиділення відбувається за рахунок дискової акреції навколишньої речовини на НЧД. Така модель пояснює, перш за все, великі маси і малі розміри центральних джерел, а також потужне енерговиділення (достатньо акреції речовини приблизно однієї сонячної маси за рік, щоб підтримувати потужну світність АЯГ). Для пояснення енерговиділення за рахунок дискової акреції на НЧД спочатку розглядалася модель геометрично тонкого акреційного диску [27, 30], але при детальнішому дослідженні було виявлено, що втрата маси та конвекційні процеси у диску призводять до його розширення [3]. Детальні моделі акреції описані в роботах [11, 31]. У сучасних моделях розглядаються механізми геометрично товстого акреційного диску [10], оскільки вони підтверджуються даними спостережень [8].

Поки що немає однозначної відповіді на запитання, чому ядра одних галактик є активними, а інших — ні. Також не існує однозначного пояснення зв'язку темної матерії, що міститься в галактиці, з активністю її ядра. У деяких працях галактики з активними ядрами розглядаються як проміжний етап еволюції кожної галактики, де припускається, що в результаті згоряння достатньої кількості «палива» галактика перетворюється на звичайну. Але ця теорія має багато слабких місць. За рахунок акреції на чорну діру її маса повинна збільшуватись, тобто у галактик з активними ядрами маси центральних чорних дір повинні бути менші, ніж у звичайних, але за статистикою маси центральних чорних дір в активних галактиках

більші. У більш реалістичній моделі вважається, що у певних галактиках після їхнього утворення в центральних областях виявилось більше «палива», ніж у звичайних, за рахунок чого такі галактики стали активними.

Для оцінки маси центральної чорної діри в АЯГ використовують рівняння

$$M_{BH} = \frac{f c \tau \sigma_{line}^2}{G},$$

де G — гравітаційна стала, c — швидкість світла, f — множник порядку одиниці, який залежить від структури та кінематики області широких ліній. Для розрахунків зручно оцінювати масу чорної діри в масах Сонця, ширину області широких ліній σ_{line} — в одиницях швидкості світла, розмір області широких ліній τ — в добах, а гравітаційний радіус Сонця — у світлових добах ($1.14 \cdot 10^{10}$). Враховуючи це, отримуємо

$$M_{BH} = \frac{k \tau \sigma_{line}^2}{1.14 \cdot 10^{10}}, \quad (1)$$

де $k \equiv 2f$. Коефіцієнт f чи k можна розрахувати аналітично, застосовуючи ревербераційний метод та вводячи припущення щодо геометрії області широких ліній. Також цей множник визначають, використовуючи для калібрування емпіричне співвідношення між масою чорної діри та дисперсією швидкостей в балджи [38]. Згідно з [38] такий шлях розрахунків надійніший, оскільки можна усунути систематичне зміщення статистичного походження між вірйальним добутком $f c \tau \sigma_{line}^2 / G$ та масою чорної діри, яка була визначена за допомогою ревербераційного методу. У роботі [21] отримано значення коефіцієнта $f = 5.5$.

ОПТИЧНА ЗМІННІСТЬ КВАЗАРА 1E 0754 ТА ОЦІНКА МАСИ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧОРНОЇ ДІРИ

Для аналізу та розрахунків оптичної змінності ми використовували результати спектральних та фотометричних спостережень АЯГ 1E 0754+3928, що були отримані в КраО на 2.6-м телескопі ім. Шайна в 1998—2004 рр. Всього протягом цього періоду було отримано 37 спектрів в області H_{β} з характерним часом експозиції 1 год. Спектри були отримані за допомогою спектро-

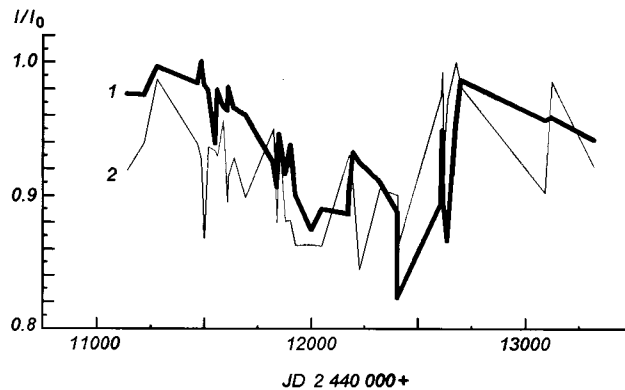


Рис. 1. Запізнення максимумів інтенсивності випромінювання в лінії H_{β} (лінія 1) відносно максимумів у континуумі (лінія 2) для квазара 1E0754. Запізнення складає 29 днів. Коефіцієнт кореляції $r = 0.35$

графа з ПЗЗ-матрицею «Astro-550» розміром 580×520 пкл. Ширина вхідної щілини — 3".

Фотометричний моніторинг ядра галактики 1E 0754+3928 проводився з 2001 р. у спектральних смугах *bvri* на 70-см телескопі. Була побудована зведена крива блиску, що складається з 110 точок, де до спектральних потоків в континуумі $F(\lambda = 510 \text{ нм})$ додано фотометричні дані у смузі *b*.

Протягом періоду спостережень ядро галактики 1E 0754+3928 показало досить малу амплітуду зміни потоку як у лінії, так і у континуумі. Середня квадратична амплітуда зміни потоку в лінії $H\beta$ становить 4.2 % (3.5 % при врахуванні похибок вимірювань), а континууму — 3.6 % за спектральними та 3.1 % за зведеними спектральними та фотометричними даними, тобто 3.3 % (з урахуванням похибок вимірювання — 2.9 %).

Розмір області широких ліній в АЯГ визначено за часом затримки між змінами потоку в широких лініях відносно змін потоку в континуумі. Запізнення дорівнює $\tau_{peak} = 72^{+265}_{-35}$ діб за максимумом крос-кореляційної функції та $\tau_{cent} = 112^{+215}_{-67}$ діб за центром тяжіння функції, який визначається за тими значеннями часу затримки, для яких коефіцієнт кореляції $r > 0.8r_{max}$.

Для розрахунку маси чорної діри в квазарі 1E 0754+3928 за кінематикою області ШЕЛ (формула (1)) параметр σ_{line} розраховувався по значенню ширини *rms* профіля, виправленому за похибки спостережень; часом затримки вважалось значення τ_{cent} , виправлене за ефект сповільнення часу; коефіцієнт, що описує геометрію області ШЕЛ, дорівнює $k = 11$. Використання параметра τ_{cent} для розрахунків маси чорної діри дозволяє отримати точніші дані. Коли крос-кореляційна функція має широкий пік у випадку коротких часових інтервалів, для яких крила крос-кореляційної функції визначені не настільки точно, використання цього параметра дає менш точні оцінки маси чорної діри. Отже, маса чорної діри в квазарі 1E 0754+3928 становить $M_{BH} = 1.01 \cdot 10^8 M_{Sun}$, монохроматична оптична світність 1E 0754+3928 на довжині хвилі $\lambda = 500.7 \text{ нм}$ (в системі відліку, що пов'язана зі спостерігачем) становить $\lambda L_{500.7} = 7.20 \cdot 10^{37} \text{ Дж/с}$, положення 1E 0754+3928 на діаграмі відповідає положенню інших галактик типу NLS1 (крім NGC 4051) [29].

КРОС-КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНОЇ І РЕНТГЕНІВСЬКОЇ ЗМІННОСТІ ГАЛАКТИК СЕЙФЕРТА NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, MRK 509, MRK 79, AKN 564

За результатами аналізу кривих блиску галактик Сейферта NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Akn 564 було побудовано крос-кореляційні функції для кривих блиску в оптичному (смуга *b*) та рентгенівському (2—10 кеВ) діапазонах.

Для галактик NGC 5548 і NGC 7469 отримано високе максимальне значення коефіцієнта кореляції r_{max} (0.73 та 0.79 відповідно). Час затримки τ_{peak} між змінами потоку в оптичному і рентгенівському діапазонах для цих галактик, розрахований на максимумі крос-кореляційної функції, становить $2.800^{+3.12}_{-1.58}$ і $0.6^{+0.9}_{-4.3}$ діб відповідно; час затримки τ_{cent} , розрахований при коефіцієнті кореляції $r > 0.8r_{max}$, становить $4.13^{+2.9}_{-4.8}$ і $-0.93^{+2.1}_{-2.1}$ діб відповідно. Досить значна різниця між τ_{peak} та τ_{cent} пояснюється несиметричністю крос-кореляційної функції. Зауважимо, що додатне або від'ємне значення

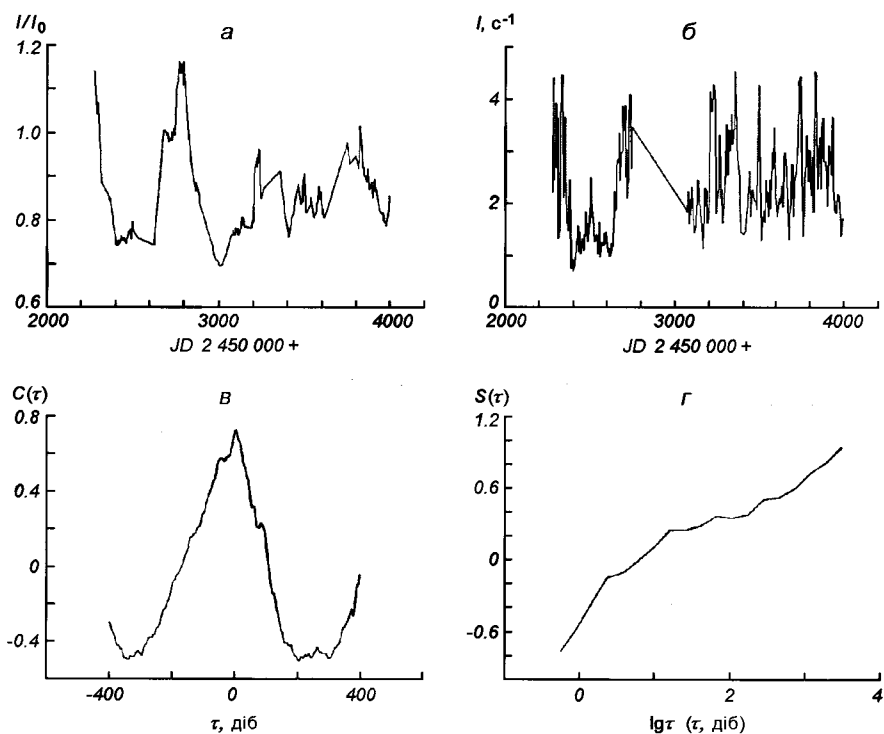


Рис. 2. Криві блиску NGC 5548 в оптичному (а) та рентгенівському (б) діапазонах, а також їхня крос-кореляційна функція $C(\tau)$ (в) та структурна функція $S(\tau)$ (г)

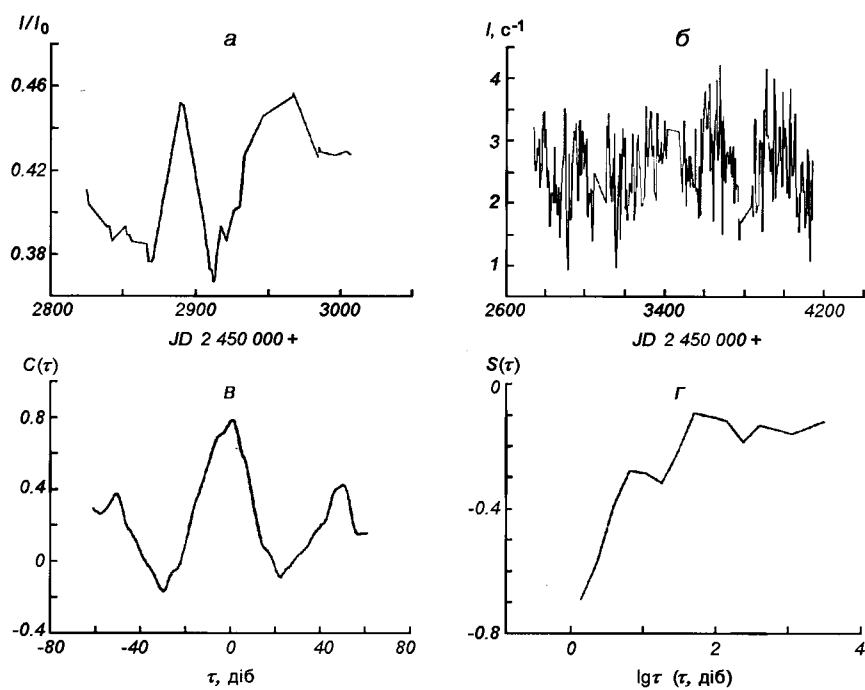


Рис. 3. Те ж для NGC 7469

часу затримки вказує на зв'язок між випромінюванням в оптичному та рентгенівському діапазонах, а саме на те, що частина потоку в одному діапазоні перевипромінюється в іншому діапазоні. Запізнення потоку в оптичному діапазоні відносно рентгенівського вказує на процес перевипромінювання в результаті прямого ефекту Комптона, коли енергія фотона при зіткненні з електроном зменшується. Запізнення потоку в рентгенівському діапазоні відносно оптичного вказує на перевипромінювання в результаті дії оберненого ефекту Комптона, коли енергія фотона при зіткненні з електроном збільшується. В наших розрахунках додатне значення часу затримки потоку вказує на те, що частина потоку рентгенівського діапазону перевипромінюється в оптичному, від'ємне — на те, що частина потоку оптичного діапазону перевипромінюється в рентгенівському.

Для NGC 3227 коефіцієнт кореляції становить $r_{\max} = 0.47$, часи затримки становлять $\tau_{\text{peak}} = 0.8^{+0.8}_{-1.3}$ діб, $\tau_{\text{cent}} = -0.42^{+0.7}_{-1.2}$ діб. Для NGC 4051, Mrk 509, Mrk 79, кореляція слабка ($r_{\max} \leq 0.4$). Для Acp 564 кореляції між зміною потоку в оптичному (у смузі *b*) та рентгенівському діапазонах немає. Для NGC 4151 одночасних спостережень в оптичному та рентгенівському діапазонах не було.

Для всіх розглянутих кривих блиску побудовано автокореляційні та структурні функції, обчислено амплітуду змінності (зокрема для галактик NGC 5548 і NGC 7469 див. рис. 2, 3).

Ширина автокореляційної функції для кривих блиску в оптичному діапазоні більша для усіх обраних об'єктів, крім NGC 5548. Коефіцієнт нахилу структурної функції в оптичному діапазоні більший для усіх кривих блиску як при виборі ділянок, лінійних в оптичному діапазоні, так і при виборі ділянок, лінійних в рентгенівському діапазоні. Амплітуда змінності в оптичному діапазоні є найменшою для Acp 564 і становить 2.77 %, а найбільшою — для NGC 4151 (18.4 %). Але ця амплітуда змінності залишається меншою, ніж амплітуда змінності в рентгенівському діапазоні (від 19.61 % у Mrk 509 до 54.40 % у NGC 4051).

ВИСНОВОК

В роботі розглянуто зв'язок зміни потоку випромінювання в оптичному (за спостереженнями у Кримській астрофізичній обсерваторії) та рентгенівському (за даними спостережень супутника RXTE) діапазонах для вибірки галактик Сейферта: NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, Acp 564. Для галактик Сейферта NGC 5548 і NGC 7469 виявлено кореляцію між змінами потоку в оптичному та рентгенівському діапазонах. Час затримки змін потоку в оптичному діапазоні відносно змін потоку у рентгенівському діапазоні становив приблизно одну добу. Для шести об'єктів вибірки, крім NGC 4151 (недостатньо даних) та Acp 564 (відсутня кореляція потоків в оптичному та рентгенівському діапазонах) спостерігається ймовірна кореляція між зміною потоку в оптичному та рентгенівському діапазонах, причому запізнення у рентгенівському діапазоні відносно оптичного становить близько 10 днів. Оцінено масу центральної чорної діри в квазарі 1E 0754 ($M_{\text{BH}} = 1.01 \cdot 10^8 M_{\text{Sun}}$).

Робота виконана в рамках цільової комплексної програми «Космомікрофізика» Національної академії наук України (2007—2009 рр.).

1. Bentz Misty C., Denney K. D., Cackett E. M., et al. NGC 5548 in a low-luminosity state: Implications for the broad-line region // *Astrophys. J.*—2007.—662.—P. 205—212.
2. Bian W., Zhao Y. Masses, accretion rates and inclinations of AGNs // *Astron. and Astrophys.*—2002.—395.—P. 465—473.
3. Blandford R. D., Begelman M. C. Two-dimensional adiabatic flows on to a black hole. I. Fluid accretion // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—349.—P. 68—86.
4. Blustin A. J., Kriss G. A., Holczer T., et al. The mass-energy budget of the ionised outflow in NGC 7469 // *Astron. and Astrophys.*—2007.—466.—P. 107—118.
5. Botte V., Ciroi S., Rafanelli P., Di Mille F. Exploring narrow-line Seyfert 1 galaxies through the physical properties of their hosts // *Astron. J.*—2004.—127.—P. 3168—3179.
6. Charles H., Nelson C., Bower G., et al. The relationship between black hole mass and velocity dispersion in Seyfert 1 galaxies // *Astrophys. J.*—2004.—615, N 2.—P. 652—661.
7. Collier S., Horne K., Kaspi S., et al. Steps toward determination of the size and structure of the broad-line region in active galactic nuclei. XIV. Intensive optical spectrophotometric observations of NGC 7469 // *Astrophys. J.*—1998.—500.—P. 162—172.
8. Crenshaw D. M., Kraemer S. B., George I. M. Mass loss from the nuclei of active galaxies // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2003.—41.—P. 117—167.
9. De Rosa A., Fabian A. C., Piro L. The complex iron line in NGC 7469 observed by BeppoSAX // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—334.—P. L21—L25.
10. Gaskell C. M., Klimek E. S., Nazarova L. S. NGC 5548: The AGN energy budget problem and the geometry of the broad-line region and torus // *Astrophys. J.* submitted.—7 Nov. 2007 [astro-ph/0711.1025]—16 pages.
11. Hawley J. F., Krolik J. H. Global MHD simulation of the inner accretion disk in a pseudo-newtonian potential // *Astrophys. J.*—2001.—548.—P. 348—367.
12. Ho L. C. The spectral energy distributions of low-luminosity active galactic nuclei // *Astrophys. J.*—1999.—516.—P. 672—682.
13. Kazanas D., Nayakshin S. Modeling the X-ray-optical correlations in NGC 3516 // *Astrophys. J.*—2001.—550.—P. 655—667.
14. Keel W. C. Seyfert galaxies with companions: orbital and kinematic clues to AGN triggering // *Astronomical J.*—1996.—11.—P. 696—717.
15. Lu Youjun, Yu Qingjuan. Two different accretion classes in Seyfert 1 galaxies and QSOS // *Astrophys. J.*—1999.—526.—P. L5—L8.
16. Lyubarskii Y. E. Flicker noise in accretion discs // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—292.—P. 679—685.
17. Maoz D., Markowitz A., Edelson R., Nandra K. X-ray versus optical variations in the Seyfert 1 nucleus NGC 3516: A puzzling disconnectedness // *Astron. J.*—2002.—124, N 4.—P. 1988—1994.
18. Markowitz A., Edelson R., Vaughan S. Long-term X-ray spectral variability in Seyfert 1 galaxies // *Astrophys. J.*—2003.—598, N 2.—P. 935—955.
19. McHardy I. M., Papadakis I. E., Uttley P., et al. Combined long and short time-scale X-ray variability of NGC 4051 with RXTE and XMM-Newton // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—348, N 3.—P. 783—801.
20. Nandra N. K., Papadakis I. E. Temporal characteristics of the X-ray emission of NGC 7469 // *Astrophys. J.*—2001.—554, N 2.—P. 710—724.
21. Onken C. A., Ferrarese L., Merrit D., et al. Supermassive black holes in active galactic nuclei. II. Calibration of the black hole mass-velocity dispersion relationship for active galactic nuclei // *Astrophys. J.*—2004.—615.—P. 645—657.
22. Onken C. A., Peterson B. M., Dietrich M., et al. Black hole masses in three Seyfert galaxies // *Astrophys. J.*—2003.—585.—P. 121—127.
23. Osterbrock D. E. Spectrophotometry of Seyfert 1 galaxies // *Astrophys. J.*—1977.—215.—P. 733—745.
24. Papadakis I. E., Nandra K., Kazanas D. Frequency-dependent time lags in the X-Ray emission of the Seyfert galaxy NGC 7469 // *Astrophys. J.*—2001.—554, N 2.—P. 133—137.
25. Peterson B. M., Ferrarese L., Gilbert K. M., et al. Central masses and broad-line region sizes of active galactic nuclei. II. A homogeneous analysis of a large reverberation-mapping database // *Astrophys. J.*—2004.—613.—P. 682—699.
26. Peterson B. M., McHardy I. M., Wilkes B. J., et al. X-Ray and optical variability in NGC 4051 and the nature of narrow-line Seyfert 1 galaxies // *Astrophys. J.*—2000.—542, N 1.—P. 161—174.
27. Pringle J. E., Rees M. J. Accretion disc models for compact X-ray sources // *Astron. and Astrophys.*—1972.—21.—P. 1—9.
28. Salamanca I. M., Alloin D., Baribaud T., et al. Spectroscopic monitoring of active galactic nuclei. 3: Size of the broad line region in NGC 3227 // *Astron. and Astrophys.*—1994.—282,

- N 3.—P. 742—752.
29. *Sergeev S. G., Klimanov S. A., Chesnok N. G., Pronik V. I.* Optical variability of the active galactic nucleus 1E 0754+3928 and reverberation-based mass estimate for the central black hole // *Astron. Lett.*—2007.—33, N 7.—P. 429—436.
 30. *Shakura N. I., Syunyaev R. A.* Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. and Astropys.*—1973.—24.—P. 337—355.
 31. *Stone J. M., Pringle J. E., Begelman M. C.* Hydrodynamical non-radiative accretion flows in two dimensions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1999.—310.—P. 1002—1016.
 32. *Suganuma M., Yoshii Yu., Kobayashi Yu., et al.* The reverberation radius of the central dust hole in NGC 5548 // *Astrophys. J.*—2004.—612.—P. L113—L116.
 33. *Turner T. J., George I. M., Netzer H.* Akn 564: An unusual component in the X-ray spectra of NLSy1 galaxies // *arXiv:astro-ph/9906294v1* — 1999.—15 p.
 34. *Uttley P., McHardy I. M.* X-ray variability of NGC 3227 and 5506 and the nature of active galactic nucleus “states” // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—363, N 2.—P. 586—596.
 35. *Vestergaard M., Peterson B. M.* Variability of Fe II emission features in the Seyfert 1 galaxy NGC 5548 // *Astrophys. J.*—2005.—625.—P. 688—698.
 36. *Wanders I., Peterson B. M., Alloin D., et al.* Steps toward determination of the size and structure of the broad-line region in active galactic nuclei. XI. Intensive monitoring of the ultraviolet spectrum of NGC 7469 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—113.—P. 69—88.
 37. *Winge C., Peterson B. M., Horne K., et al.* Spectroscopic monitoring of active galactic nuclei from CTIO. 1: NGC 3227 // *Astrophys. J.*—1995.—445.—P. 680—671.
 38. *Wu X.-B., Han J. L.* Inclinations and black hole masses of Seyfert 1 galaxies // *Astrophys. J.*—2001.—561.—P. L59—L62.
 39. *Wu X.-B., Wang R., Kong M. Z., et al.* Black hole mass estimation with a relation between the BLR size and emission line luminosity of AGN // *Astron. and Astropys.*—2004.—424.—P. 793—798.

Надійшла до редакції 24.11.08