

## РАДІОАСТРОНОМІЯ І АСТРОФІЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra23.04.235>

УДК 523.163;  
524.316.7.082-2

PACS number: 98.54.Aj

Л. А. БЕРДИНА<sup>1,2</sup>, В. С. ЦВЕТКОВА<sup>1,2</sup>, В. М. ШУЛЬГА<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: lberdina@rian.kharkov.ua

<sup>2</sup> НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,  
ул. Сумская 35, г. Харьков, 61022, Украина

<sup>3</sup> Международный центр науки будущего, Цзилинский университет,  
ул. Цяньцзинь, 2699, г. Чанчунь, 130012, Китай

### РЕВЕРБЕРАЦИОННЫЕ ОТКЛИКИ В КРИВЫХ БЛЕСКА КВАЗАРА Q2237+0305

*Предмет и цель работы: Изучение пространственной структуры квазара гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 в оптическом диапазоне; оценка массы центральной черной дыры.*

*Методы и методология: Применен метод реверберационного картирования, предполагающий измерение времени запаздывания между колебаниями собственного блеска квазара в разных спектральных диапазонах. Используются кривые блеска макроизображений системы Q2237+0305 в спектральных полосах V ( $\lambda_{\text{eff}} = 547.7$  нм) и R ( $\lambda_{\text{eff}} = 634.9$  нм) фотометрической системы Джонсона–Коузинса. Метод реверберационного картирования позволяет получать прямые оценки расстояний между областями квазара, ответственными за излучение в выбранных спектральных диапазонах.*

*Результаты: Получена оценка времени запаздывания между кривыми блеска в спектральных полосах V и R, составляющая  $5.58 \pm 1.69$  сут, что более чем на порядок превосходит значение запаздывания, предсказываемое стандартной моделью тонкого аккреционного диска Шакура–Сюняева. В качестве возможной причины высказывается предположение, что стандартная модель диска не совсем точно описывает реальную картину.*

*Заключение: Столь большое время запаздывания означает, что реверберационные отклики возникают в протяженных структурах, располагающихся за пределами аккреционного диска. Предположение о существовании вокруг аккреционного диска некоторой протяженной структуры, эффективно излучающей в оптическом диапазоне, неоднократно высказывалось в ряде работ, посвященных анализу аномалий отношения блеска и событий микролинзирования в гравитационно-линзированных квазарах. Аболмасов и Шакура показали аналитически, что для некоторых квазаров возможен сверхэддингтоновский режим аккреции, приводящий к образованию некоторой оболочки, которая рассеивает излучение от диска, увеличивая таким образом его видимые размеры. Для дальнейшего развития работ по исследованию пространственной структуры квазара Q2237+0305 методом реверберационного картирования предполагается использовать кривые блеска в спектральной полосе I. Это обеспечит две дополнительные спектральные базы, что позволит исследовать характер зависимости размера рассматриваемой структуры от длины волны.*

*Ключевые слова: квазар, черная дыра, пространственная структура, аккреционный диск, реверберационное картирование*

#### 1. Введение

Несмотря на интенсивные многосторонние исследования квазаров и активных ядер галактик (АЯГ) и серьезные успехи в изучении связанных с ними физических процессов, их пространственная структура, спектральные особенности и механизм переменности все еще остаются не совсем понятными. В настоящее время большие ожидания

связываются с проектами, предполагающими синхронные наблюдения изменений блеска квазаров и АЯГ в нескольких спектральных диапазонах.

Согласно модели квазара, развитой в работе [1], источником наблюдаемого излучения является геометрически тонкий оптически толстый аккреционный диск со сверхмассивной черной дырой в центре. Модель предсказывает, что температура аккреционного диска меняется вдоль радиуса как  $T \sim R^{-3/4}$ , т. е. более коротковолно-

© Л. А. Бердина, В. С. Цветкова, В. М. Шульга, 2018

вая радиация возникает ближе к центру диска. Согласно модели переработки излучения, предложенной в работе [2], всплески жесткого излучения, возникающие в центральных областях диска, при распространении во внешние области переизлучаются в них с временными запаздываниями, пропорциональными удаленности от центра, одновременно подвергаясь при этом замытию во времени в соответствии с размерами и геометрией переизлучающих областей. При этом для аккреционного диска с температурой, изменяющейся как  $T \sim R^{-3/4}$ , в случае чернотельного излучения можно ожидать зависимости запаздываний от длины волны вида  $\tau \sim \lambda^{4/3}$ . Таким образом, измеряя временные запаздывания между колебаниями блеска в разных участках спектра, мы получаем возможность исследовать пространственную структуру квазаров и АЯГ с разрешением, недоступным в обозримом будущем прямым измерениям современными наблюдательными средствами. Такой метод исследования структуры удаленных источников получил название реверберационного картирования [3].

Реверберационное картирование (далее РК) первоначально предполагало измерение временных запаздываний между излучением в жестком континууме от центральных областей квазара и излучением областей широких эмиссионных линий. Такие измерения требовали довольно трудоемких спектральных наблюдений и использования достаточно крупных инструментов. В последнее время стало широко применяться так называемое фотометрическое РК [4, 5], при котором выполняется фотометрический мониторинг изменений блеска в двух или нескольких фильтрах, один из которых содержит эмиссионную линию.

Однако еще в конце 90-х при РК Сейфертовской галактики NGC 7469 [6, 7] было замечено, что колебания блеска в оптическом континууме отстают от колебаний в УФ континууме. Дальнейшие проекты фотометрического РК подтвердили, что между колебаниями блеска в различных диапазонах континуума для многих АЯГ и квазаров действительно существуют значимые запаздывания, [5, 8–10].

Помимо непосредственной оценки размеров излучающих областей квазара, метод фотометрического РК позволяет выполнить оценку массы центральной черной дыры и скорости аккреции, исследовать закон изменения температуры

вдоль радиуса аккреционного диска, что важно для проверки существующей модели квазара и понимания механизма его переменности. Интерес к РК квазаров и АЯГ в настоящее время чрезвычайно велик, ему посвящено несколько крупных ныне действующих проектов, таких как SDSS-RM (Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping), STORM (Space Telescope and Optical Reverberation Mapping), LAMP (Lick AGN Monitoring Project), [11, 12].

В настоящей статье описываются применение метода фотометрического РК для изучения пространственной структуры квазара гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 и попытки использовать полученные результаты для оценки массы черной дыры.

## 2. Исходные данные и метод обработки

Система Q2237+0305 представляет собой квазар с красным смещением  $z = 1.69$ , квадрупольно линзированный галактикой с  $z = 0.039$ . Все четыре макроизображения системы обнаруживают значительную переменность, обусловленную как изменениями собственного блеска квазара, так и событиями микролинзирования.

Первая попытка измерить временные запаздывания между колебаниями блеска квазара Q2237+0305 в фильтрах  $V$  и  $R$  была сделана в 2006 г. по данным наблюдений 2003 г. [13], и повторно – в 2010 г. [14] по данным того же сезона обработанным, по словам авторов, более тщательно. Дальнейших попыток РК этого объекта, насколько нам известно, не предпринималось.

В настоящей работе используются кривые блеска системы Q2237+0305, полученные в 2005 г. в рамках программы длительного мониторинга в спектральных полосах  $V$  ( $\lambda_{eff} = 547.7$  нм) и  $R$  ( $\lambda_{eff} = 634.9$  нм) фотометрической системы Джонсона–Коузинса, с помощью 1.5-метрового телескопа Майданакской высокогорной обсерватории. Со всеми данными этого мониторинга, охватывающего период с 2001 по 2008 г., можно ознакомиться в работе [15]. Результаты фотометрии размещены на сайте Института астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина.

Кривые блеска, полученные в 2005 г., были выбраны нами из-за формы колебаний собственного блеска квазара в этом сезоне: известно, что

для успешного измерения временных запаздываний чрезвычайно важно наличие в сравниваемых кривых блеска четкого максимума или минимума и/или быстрых вариаций блеска.

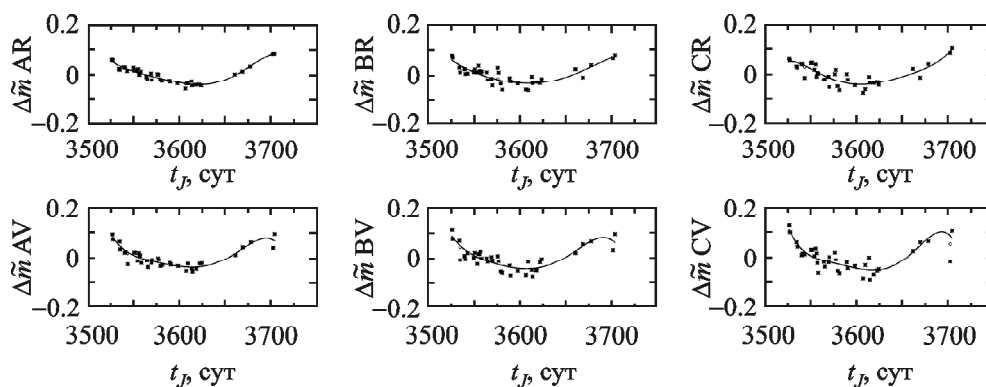
При измерении времен запаздывания между кривыми блеска в полосах  $V$  и  $R$  был применен метод, подробно описанный в работе [16]. Важной особенностью этого метода является использование при аппроксимации исходных данных (построении модели процесса) ортогональных полиномов. Известно, что представление исходных данных в виде разложения в ряд по нормированным ортогональным функциям обладает некоторыми полезными свойствами, упрощающими процедуру дальнейших вычислений.

На рис. 1 сплошными линиями показаны аппроксимации, представляющие собой разложения в ряд по ортонормированным полиномам Лежандра. Порядок полиномов равен 5, при этом исключен член нулевого порядка (средний уровень блеска, несущественный при измерении времени запаздывания). Дальнейшая обработка состоит в вычислении кросс-корреляционных функций для пар кривых блеска, представленных их аппроксимациями. Значение текущего временного сдвига сравниваемых функций, при котором кросс-корреляционная функция достигает максимума, принимается в качестве оценки искомого времени запаздывания.

Табл. 1 содержит результаты измерения времен запаздывания между колебаниями блеска в спектральных полосах  $V$  и  $R$ , полученные нами по кривым блеска линзированных изображений А, В

и С системы Q2237+0305. Кривые блеска самого слабого компонента D не использовались из-за сравнительно большой погрешности фотометрии. Так как нет серьезных оснований ожидать разных времен запаздывания для разных компонентов, отдельные оценки  $\Delta t_{R-V}$  в последнем столбце объединены.

Для оценки погрешности запаздываний сравнивались результаты вычислений, полученные по реализациям исходных данных, в которые вносились следующие изменения. Из исходной пары кривых блеска случайным образом последовательно исключалось до 30 % точек, затем для каждой такой новой реализации пары кривых блеска процедура повторялась и получалась соответствующая новая оценка времени запаздывания. Число испытаний доводилось до двух десятков, затем для последовательности полученных оценок вычислялось среднее значение, и среднеквадратичное отклонение от среднего принималось в качестве оценки погрешности временных запаздываний. Заметим, что наш подход к оценке погрешности измерения временного запаздывания отличается от общепринятого. Обычно для этого синтезируется пара модельных искусственных сигналов, на которые затем накладываются различные реализации случайного шума, имитирующие погрешности исходных кривых блеска. Не подвергая сомнению правомерность такого подхода, отметим, что наш подход также имеет право на существование. Он обладает по крайней мере тем преимуществом, что нет необходимости заботиться о соответствии параметров моде-



**Рис. 1.** Исходные кривые блеска компонентов А, В и С гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 (точки) в спектральных полосах  $R$  (верхний ряд) и  $V$  (нижний ряд) и соответствующие аппроксимации полиномом пятого порядка (сплошные кривые); устранен член нулевого порядка;  $t_J$  – время ( $t_J = \text{JD} - 2450000$ ,  $\text{JD}$  – юлианская дата),  $\Delta \bar{m}$  – вариации блеска в звездных величинах относительно среднего за данный сезон уровня

Таблица 1. Значения времен запаздывания между колебаниями блеска в спектральных полосах  $V$  и  $R$ , полученные по кривым блеска линзированных изображений А, В и С системы Q2237+0305

Объект	$\Delta t_{R-V}$	$\Delta t_{R-V}^{ABC}$
Компонент А	$5.97 \pm 1.02$	$5.58 \pm 1.69$
Компонент В	$5.18 \pm 2.10$	
Компонент С	$5.58 \pm 1.68$	

Примечание:  $\Delta t_{R-V}$  – оценки, полученные для компонентов А, В и С отдельно,  $\Delta t_{R-V}^{ABC}$  – совместная оценка для трех компонентов.

ли случайного шума (скажем, дисперсии и плотности распределения вероятностей ошибок) реальным характеристикам фотометрических погрешностей сравниваемых процессов.

### 3. Анализ и интерпретация результатов

Теория тонкого аккреционного диска Шакуры–Сюняева [1], излучающего как черное тело, позволяет получить следующую зависимость радиуса диска  $R_\lambda$  от длины волны  $\lambda_{eff}$ , при которой достигается максимум излучения, соответствующий, согласно закону смещения Вина, некоторой температурой  $T$ , [17, 18]:

$$R_\lambda = \left( \frac{45G\lambda^4 M_{BH} \dot{M}}{16\pi^6 hc^2} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

Здесь  $G$  – гравитационная постоянная,  $M_{BH}$  – масса черной дыры,  $\dot{M}$  – скорость аккреции,  $h$  – постоянная Планка и  $c$  – скорость света. Длина волны  $\lambda$  измеряется в собственной системе координат источника.

Переходя к безразмерным величинам  $\tilde{M}_{BH}$  и  $\tilde{\lambda}$  (например,  $\tilde{M}_{BH} = M_{BH}/(10^9 M_\odot)$  и  $\tilde{\lambda} = \lambda/\lambda_0$ ,  $\lambda_0 = 1$  мкм) и учитывая что  $\dot{M} = L/\eta c^2$  (см. работу [17]), выражение (1) можно записать в виде:

$$R_\lambda = A \tilde{\lambda}^{4/3} \tilde{M}_{BH}^{2/3} \left( \frac{L}{\eta L_E} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где в коэффициент  $A$  включены все входящие в выражение (1) постоянные, а светимость аккреционного диска  $L$  нормирована на эддингтоновский предел светимости  $L_E$ ;  $\eta$  – эффективность аккреции.

Записав выражение (2) для двух значений  $\lambda$ , соответствующих максимумам полос пропускания, использованных в настоящей работе светофильтров  $V$  и  $R$  (547.7 нм и 634.9 нм в плоскости наблюдателя), и поделив его на скорость света, получим следующее выражение для оценки ожидаемого для этих длин волн времени запаздывания:

$$\Delta t_{R-V} = \frac{A}{c} M_{BH}^{2/3} \left( \frac{L}{\eta L_E} \right)^{1/3} (\tilde{\lambda}_R^{4/3} - \tilde{\lambda}_V^{4/3}). \quad (3)$$

Обычно при расчетах полагают  $L = L_E$  и  $\eta = 0.1$ . Что касается выбора значения  $M_{BH}$ , то здесь наблюдается некоторая неопределенность. Существующие оценки величины  $M_{BH}$  демонстрируют существенный разброс значений, причем различие между минимальными и максимальными значениями достигает одного порядка.

Пользуясь выражением (3), оценим ожидаемое время запаздывания между кривыми блеска в фильтрах  $V$  и  $R$ , например для значения  $M_{BH} = 2 \cdot 10^9 M_\odot$  [19]. Оно оказывается слишком малым – 11.3 ч, что противоречит полученному нами значению  $\Delta t_{R-V}^{ABC} \approx 5.5$  сут. Такое различие между результатом измерений и ожидаемым значением запаздывания, найденным с использованием классической модели Шакуры–Сюняева, достаточно велико и нуждается в объяснении.

Прежде всего, необходимо оценить достоверность наших результатов. Обратим внимание на прекрасное согласие оценок запаздывания, полученных независимо по кривым блеска разных макроизображений. Отметим далее, что весьма близкие к нашим оценкам значения запаздываний между такими же фильтрами получены в работе Коптеловой и др. [14], а именно: 5.1 ÷ 5.6 сут для компонента А и 5.1 ÷ 5.2 сут для компонента С системы Q2237+0305. Основания считать полученные оценки достоверными тем более веские, что в обеих работах использовались кривые блеска разных сезонов наблюдений – сезона 2003 г. в [14] и 2005 г. в настоящей работе. Отметим, что предварительная обработка данных сезонов 2003 и 2004 гг., результаты которой не включены в настоящую работу, также дала весьма близкий результат. Таким образом, мы не видим оснований не доверять полученным оценкам запаздываний.

Что касается расхождений между теоретически предсказанными значениями запаздываний и результатами реальных измерений, то, как оказалось, мы не первые, кто с этим столкнулся. В частности, в самых последних работах участников проекта STORM [11] неоднократно указывается, что измеренные значения запаздываний между колебаниями блеска существенно больше ожидаемых значений, полученных на основе стандартной модели тонкого аккреционного диска Шакуры–Сюняева. Аналогичный результат отмечен в работе [20]. Авторы этих работ отмечают, что для устранения наблюдаемого расхождения необходимо внести существенные изменения в значения параметров модели аккреционного диска, принимаемые при расчетах, – массы черной дыры  $M_{BH}$ , эффективности аккреции  $\eta$  и/или отношения светимости к пределу Эддингтона. При этом Морган [20] не видит оснований пересматривать зависимости радиуса диска от длины волны  $R_\lambda \sim \lambda^{4/3}$  и от массы черной дыры  $R_\lambda \sim M_{BH}^{2/3}$ , вытекающие из классической модели аккреционного диска. Отметим, что неоднократно предлагались и другие модели диска, в которых показатель степени в соотношении  $R_\lambda \sim \lambda^\zeta$  меняется от  $\zeta = 8/7$  [21] до  $\zeta = 1.75$  [22]. Кроме того, анализ длительных спектральных наблюдений Q2237+0305 [23] приводит к значению  $\zeta = 1.2$ , в то время как авторы [24] на основе наблюдений в среднем инфракрасном диапазоне получили  $\zeta = 0.79$ .

Принимая для левой части выражения (3) измененную нами величину  $\Delta t_{R-V} \approx 5.5$  сут (табл. 1), найдем из этого выражения значение  $M_{BH} \approx 139 \cdot 10^9 M_\odot$ , которое более чем на порядок превышает даже верхний предел существующих оценок, полученный в работе [19]. Допуская, что квазар Q2237+0205 действительно излучает с очень низкой эффективностью (согласно [20],  $\eta = 0.017$ ), и принимая для зависимости  $R_\lambda \sim \lambda^\zeta$  значение  $\zeta = 1$ , получим для массы черной дыры заметно меньшую оценку,  $M_{BH} \approx 40 \cdot 10^9 M_\odot$ , но все еще на порядок больше значения, принятого для вычисления ожидаемого запаздывания 11.3 ч.

#### 4. Выводы

Таким образом, варьируя параметры соотношения (3), но оставаясь при этом в рамках стандартной модели аккреционного диска Шакуры–Сюняева [1], мы получили по измеренному значению

запаздывания между колебаниями блеска в полосах  $V$  и  $R$  оценку массы центральной черной дыры в квазаре Q2237+0305, отличную от полученных ранее. Здесь уместно вспомнить ряд эмпирических моделей пространственной структуры квазара (например, [25, 26]), согласно которым аккреционный диск является важным, но не единственным структурным элементом квазара. Еще в 1992 г. в работе [27], посвященной анализу кривых блеска микролинзирования, впервые допускается существование протяженной внешней структуры квазара, вносящей заметный (до 100 %) вклад в его излучение в видимом диапазоне. Аналогичный вывод сделан в работах [28, 29]. Анализируя аномалии блеска в некоторой выборке квазаров, Пули [30] также пришел к выводу, что область квазара, излучающая оптический континуум, должна быть во много раз (от 10 до 100) больше, чем это предсказывают основные теоретические модели диска. В работах [18, 20, 31] отмечается несоответствие между измеренными размерами квазаров и их светимостями. Авторы этих работ полагают, что менее крутой температурный профиль (что аналогично рассеянию заметной доли оптического излучения на большие расстояния) мог бы устранить наблюдаемое несоответствие.

Интересно отметить, что Аболмасов и Шакура [32] показали аналитически, что для некоторых квазаров возможен сверхэддингтоновский режим аккреции, приводящий к формированию некоторой обширной оболочки (фотосферы или сферического ветра). Такая оболочка способна весьма эффективно рассеивать излучение от диска, увеличивая таким образом его видимые размеры. Численное моделирование [33] подтверждает вероятность такого сценария.

Таким образом, большие времена запаздывания могут означать, что реверберационные отклики возникают в протяженных структурах, располагающихся за пределами аккреционного диска. Такой вывод был бы чрезвычайно важным для уточнения существующих моделей квазара, так как, в отличие от большинства методов оценки размеров квазаров, требующих использования определенных параметров и априорных соображений, РК является прямым методом. Он трансформирует нерешаемую пока проблему изучения пространственной структуры источников на микросекундных масштабах в хорошо разработанную задачу анализа временных сигналов.

Дальнейшее развитие начатых исследований видится в обнаружении и измерении реверберационных откликов для других спектральных диапазонов. В нашем распоряжении в дополнение к данным в  $V$  и  $R$  имеются кривые блеска в фильтре  $I$  фотометрической системы Джонсона–Коузинса ( $\lambda_{\text{eff}} = 879.7$  нм), которые пока не были использованы для РК по причине больших и нерегулярных промежутков между датами наблюдений. Имеет смысл попытаться использовать данные в фильтре  $I$ , так как это означало бы увеличение числа спектральных баз на две, что может оказаться весьма важным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Shakura N. I. and Sunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astron. Astrophys.* 1973. Vol. 24. P. 337–355.
- Krolik J. H., Horne K., Kallman T. R., Malkan M. A., Edelson R. A., and Kriss G. A. Ultraviolet variability of NGC 5548 – Dynamics of the continuum production region and geometry of the broad-line region. *Astrophys. J.* 1991. Vol. 371, Is. 2. P. 541–562. DOI: 10.1086/169918
- Blandford R. D. and McKee C. F. Reverberation mapping of the emission line regions of Seyfert galaxies and quasars. *Astrophys. J.* 1982. Vol. 255. P. 419–439. DOI: 10.1086/159843
- Edri H., Rafter S. E., Chelouche D., Kaspi Sh., and Behar E. Broadband Photometric Reverberation Mapping of NGC 4395. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 756, Is. 1. id. 73. DOI: 10.1088/0004-637X/756/1/73
- Bachev R. S. Quasar optical variability: searching for interband time delays. *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 493, Is. 3. P. 907–911. DOI: 10.1051/0004-6361:200810993
- Wanders I., Peterson B. M., Alloin D., Ayres T. R., Clavel J., Crenshaw D. M., Horne K., Kriss G. A., Krolik J. H., Malkan M. A., Netzer H., O'Brien P. T., Reichert G. A., Rodríguez-Pascual P. M., Wamsteker W., Alexandre T., Anderson K. S. J., Benitez E., Bochkarev N. G., Burenkov A. N., Cheng F.-Z., Collier S. J., Comastri A., Dietrich M., Dultzin-Hacyan D., Espey B. R., Filippenko A. V., Gaskell C. M., George I. M., Goad M. R., Ho L. C., Kaspi S., Kollatschny W., Korista K. T., Laor A., MacAlpine G. M., Mignoli M., Morris S. L., Nandra K., Penton S., Pogge R. W., Ptak R. L., Rodríguez-Espinoza J. M., Santos-Lleó M., Shapovalova A. I., Shull J. M., Snedden S. A., Sparke L. S., Stirpe G. M., Sun W.-H., Turner T. J., Ulrich M.-H., Wang T.-G., Wei C., Welsh W. F., Xue S.-J., and Zou Z.-L. 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. Vol. 113, Is. 1. P. 69–88.
- Collier S., Horne K., Wanders I., and Peterson B. M. A new direct method for measuring the Hubble constant from reverberating accretion discs in active galaxies. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1999. Vol. 302, Is. 1. P. L24–L28. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1999.02250.x
- Collier S. Evidence for accretion disc reprocessing in QSO 0957+561. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2001. Vol. 325, Is. 4. P. 1527–1532. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04568.x
- Sergeev S. G., Doroshenko V. T., Golubinskiy Yu. V., Merkulova N. I., and Sergeeva E. A. Lag-luminosity relationship for interband lags between variations in b, v, r, and i bands in active galactic nuclei. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 622, Is. 1. P. 129–135. DOI: 10.1086/427820
- Cackett E. M., Horne K., and Winkler H. Testing thermal reprocessing in active galactic nuclei accretion discs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. Vol. 380, Is. 2. P. 669–682. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12098.x
- Fausnaugh M. M., Starkey D. A., Horne K., Kochanek C. S., Peterson B. M., Bentz M. C., Denney K. D., Grier C. J., Grupe D., Pogge R. W., De Rosa G., Adams S. M., Barth A. J., Beatty T. G., Bhattacharjee A., Borman G. A., Boroson T. A., Bottorff M. C., Brown J. E., Brown J. S., Brotherton M. S., Coker C. T., Crawford S. M., Croxall K. V., Eftekharzadeh S., Eracleous M., Joner M. D., HENDERSON C. B., Holoien T. W.-S., Hutchison T., Kaspi S., Kim S., King A. L., Li M., Lochhaas C., Ma Z., MacInnis F., Manne-Nicholas E. R., Mason M., Montuori C., Mosquera A., Mudd D., Musso R., Nazarov S. V., Nguyen M. L., Okhmat D. N., Onken C. A., Ou-Yang B., Pancoast A., Pei L., Penny M. T., Poleski R., Rafter S., Romero-Colmenero E., Runnoe J., Sand D. J., Schimoia J. S., Sergeev S. G., Shappee B. J., Simonian G. V., Somers G., Spencer M., Stevens D. J., Tayar J., Treu T., Valenti S., Van Saders J., Villanueva Jr. S., Villforth C., Weiss Y., Winkler H., and Zhu W. Continuum Reverberation Mapping of the Accretion Disks in Two Seyfert 1 Galaxies. *Astrophys. J.* 2018. Vol. 854, Is. 2. id. 107. DOI: 10.3847/1538-4357/aaaa2b
- Grier C. and SDSS-RM Collaboration. The Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping Project: Quasar Reverberation Mapping Studies. *American Astronomical Society Meeting.* 2017. Vol. 229. id.b414.01.
- Koptelova E. A., Oknyanskij V. L., and Shimanovskaya E. V. Determining time delay in the gravitationally lensed system QSO2237+0305. *Astron. Astrophys.* 2006. Vol. 452, Is. 1. P. 37–46. DOI: 10.1051/0004-6361:20054050
- Koptelova E., Oknyanskij V., Artamonov B., and Chen W.-P. Multiwavelength observations of lensed quasars: interband time delays. *Mem. S. A. It.* 2010. Vol. 81. P. 138–143.
- Дудинов В. Н., Смирнов Г. В., Вакулик В. Г., Сергеев А. В., Кочетов А. Е. Гравитационно-линзовая система Q2237+0305 в 2001–2008 гг.: результаты наблюдений на горе Майданак. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2010. Т. 15, № 4. С. 387–398.
- Tsvetkova V. S., Shulga V. M., and Berdina L. A. A simple method to determine time delays in the presence of microlensing: application to HE 0435-1112 and PG 1115+080. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2016. Vol. 461, Is. 4. P. 3714–3723. DOI: 10.1093/mnras/stw1540
- Frank J., King A., and Raine D. J. *Accretion Power in Astrophysics.* Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 398 p.

18. Poindexter S. and Kochanek C. S. Microlensing Evidence that a Type 1 Quasar is Viewed Face-On. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 712, Is. 1. P. 668–673. DOI: 10.1088/0004-637X/712/1/668
19. Agol E., Jones B., and Blaes O. Keck Mid-Infrared Imaging of QSO 2237+0305. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 545, Is. 2. P. 657–663. DOI: 10.1086/317847
20. Morgan C. W., Kochanek C. S., Morgan N. D., and Falco E. E. The Quasar Accretion Disk Size-Black Hole Mass Relation. *Astrophys. J.* 2010. Vol. 712, Is. 2. P. 1129–1136. DOI: 10.1088/0004-637X/712/2/1129
21. Agol E. and Krolik J. H. Magnetic Stress at the Marginally Stable Orbit: Altered Disk Structure, Radiation, and Black Hole Spin Evolution. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 528, Is. 1. P. 161–170. DOI: 10.1086/30817
22. Gaskell C. M., Goosmann R. W., and Klimek E. S. Structure and kinematics of the broad-line region and torus of Active Galactic Nuclei. *Mem. S. A. It.* 2008. Vol. 79. P. 1090–1095.
23. Eigenbrod A., Courbin F., Meylan G., Agol E., Anguita T., Schmidt R. W., and Wambsganss J. Microlensing variability in the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305  $\equiv$  the Einstein Cross. II. Energy profile of the accretion disk. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 490, Is. 3. P. 933–943. DOI: 10.1051/0004-6361:200810729
24. Vives-Arias H., Muñoz J. A., Kochanek C. S., Mediavilla E., and Jiménez-Vicente J. Observations of the Lensed Quasar Q2237+0305 with CanariCam at GTC. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 831, Is. 1. id. 43. DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/43
25. Elvis M. A Structure for Quasars. *Astrophys. J.* 2000. Vol. 545, Is. 1. P. 63–76. DOI: 10.1086/317778
26. Urry C. M. and Padovani P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 1995. Vol. 107, No. 715. P. 803–845.
27. Jaroszynski M., Wambsganss J., and Paczynski B. Microlensed light curves for thin accretion disks around Schwarzschild and Kerr black holes. *Astrophys. J.* 1992. Vol. 396, Is. 2. P. L65–L68. DOI: 10.1086/186518
28. Witt H. J. and Mao S. Interpretation of microlensing events in Q2237+0305. *Astrophys. J.* 1994. Vol. 429, Is. 1. P. 66–76. DOI: 10.1086/174302
29. Vakulik V. G., Schild R. E., Smirnov G. V., Dudinov V. N., and Tsvetkova V. S. Q2237+0305 source structure and dimensions from light-curve simulation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. Vol. 382, Is. 2. P. 819–825. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12422.x
30. Pooley D., Blackburne J. A., Rappaport S., and Schechter P. L. X-ray and optical flux ratio anomalies in quadruply lensed quasars. I. Zooming in on quasar emission regions. *Astrophys. J.* 2007. Vol. 661, Is. 1. P. 19–29.
31. Poindexter S., Morgan N., and Kochanek C. S. The Spatial Structure of an Accretion Disk. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 673, Is. 1. P. 34–38. DOI: 10.1086/524190
32. Abolmasov P. and Shakura N. I. Microlensing evidence for super-Eddington disc accretion in quasars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2012. Vol. 427, Is. 3. P. 1867–1876. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21881.x
33. Ohsuga K. and Mineshige S. Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows around Black Holes from Two-dimensional Radiation-magnetohydrodynamic Simulations. *Astrophys. J.* 2011. Vol. 736, Is. 1. id. 2. DOI: 10.1088/0004-637X/736/1/2

## REFERENCES

- SHAKURA, N. I. and SUNYAEV, R. A., 1973. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astron. Astrophys.* vol. 24, pp. 337–355.
- KROLIK, J. H., HORNE, K., KALLMAN, T. R., MALKAN, M. A., EDELSON, R. A. and KRISS, G. A., 1991. Ultraviolet variability of NGC 5548 – Dynamics of the continuum production region and geometry of the broad-line region. *Astrophys. J.* vol. 371, is. 2, pp. 541–562. DOI: 10.1086/169918
- BLANDFORD, R. D. and MCKEE, C. F., 1982. Reverberation mapping of the emission line regions of Seyfert galaxies and quasars. *Astrophys. J.* vol. 255, pp. 419–439. DOI: 10.1086/159843
- EDRI, H., RAFTER, S. E., CHELOUCHE, D., KASPI, SH. and BEHAR, E., 2012. Broadband Photometric Reverberation Mapping of NGC 4395. *Astrophys. J.* vol. 756, is. 1, id. 73. DOI: 10.1088/0004-637X/756/1/73
- BACHEV, R. S., 2009. Quasar optical variability: searching for interband time delays. *Astron. Astrophys.* vol. 493, is. 3, pp. 907–911. DOI: 10.1051/0004-6361:200810993
- WANDERS, I., PETERSON, B. M., ALLOIN, D., AYRES, T. R., CLAVEL, J., CRENSHAW, D. M., HORNE, K., KRISS, G. A., KROLIK, J. H., MALKAN, M. A., NETZER, H., O'BRIEN, P. T., REICHERT, G. A., RODRÍGUEZ-PASCUAL, P. M., WAMSTEKER, W., ALEXANDE, T., ANDERSON, K. S. J., BENITEZ, E., BOCHKAREV, N. G., BURENKOV, A. N., CHENG, F.-Z., COLLIER, S. J., COMASTRI, A., DIETRICH, M., DULTZIN-HACYAN, D., ESPEY, B. R., FILIPPENKO, A. V., GASKEL, C. M., GEORGE, I. M., GOAD, M. R., HO, L. C., KASPI, S., KOLLATSCHNY, W., KORIST, A. K. T., LAOR, A., MACALPINE, G. M., MIGNOLI, M., MORRIS, S. L., NANDRA, K., PENTON, S., POGGE, R. W., PTAK, R. L., RODRÍGUEZ-ESPINOZA, J. M., SANTOS-LLEÓ, M., SHAPOVALOVA, A. I., SHULL, J. M., SNEDDEN, S. A., SPARKE, L. S., STIRPE, G. M., SUN, W.-H., TURNER, T. J., ULRICH, M.-H., WANG, T.-G., WEI, C., WELSH, W. F., XUE, S.-J. and ZOU, Z.-L., 1997. 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.* vol. 113, is. 1, pp. 69–88.
- COLLIER, S., HORNE, K., WANDERS, I. and PETERSON, B. M., 1999. A new direct method for measuring the Hubble constant from reverberating accretion discs in active galaxies. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 302, is. 1, pp. L24–L28. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1999.02250.x
- COLLIER, S., 2001. Evidence for accretion disc reprocessing in QSO 0957+561. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 325, is. 4, pp. 1527–1532. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04568.x
- SERGEEV, S. G., DOROSHENKO, V. T., GOLUBINSKIY, YU. V., MERKULOVA, N. I. and SERGEEVA, E. A., 2005. Lag-luminosity relationship for interband lags

- between variations in b, v, r, and i bands in active galactic nuclei. *Astrophys. J.* vol. 622, is. 1, pp. 129–135. DOI: 10.1086/427820
10. CACKETT, E. M., HORNE, K. and WINKLER, H., 2007. Testing thermal reprocessing in active galactic nuclei accretion discs. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 380, is. 2, pp. 669–682. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12098.x
  11. FAUSNAUGH, M. M., STARKEY, D. A., HORNE, K., KOCHANNEK, C. S., PETERSON, B. M., BENTZ, M. C., DENNEY, K. D., GRIER, C. J., GRUPE, D., POGGE, R. W., DE ROSA, G., ADAMS, S. M., BARTH, A. J., BEATTY, T. G., BHATTACHARJEE, A., BORMAN, G. A., BOROSON, T. A., BOTTORFF, M. C., BROWN, J. E., BROWN, J. S., BROTHERTON, M. S., COKER, C. T., CRAWFORD, S. M., CROXALL, K. V., EFTEKHARZADEH, S., ERACLEOUS, M., JONER, M. D., HENDERSON, C. B., HOLOIEN, T. W.-S., HUTCHISON, T., KASPI, S., KIM, S., KING, A. L., LI, M., LOCHHAAS, C., MA, Z., MACINNIS, F., MANNE-NICHOLAS, E. R., MASON, M., MONTUORI, C., MOSQUERA, A., MUDD, D., MUSSO, R., NAZAROV, S. V., NGUYEN, M. L., OKHMAT, D. N., ONKEN, C. A., OUYANG, B., PANCOAST, A., PEI, L., PENNY, M. T., POLESKI, R., RAFTER, S., ROMERO-COLMENERO, E., RUNNOE, J., SAND, D. J., SCHIMOIA, J. S., SERGEEV, S. G., SHAPPEE, B. J., SIMONIAN, G. V., SOMERS, G., SPENCER, M., STEVENS, D. J., TAYAR, J., TREU, T., VALENTI, S., VAN SADERS, J., VILLANUEVA JR, S., VILLFORTH, C., WEISS, Y., WINKLER, H. and ZHU, W., 2018. Continuum Reverberation Mapping of the Accretion Disks in Two Seyfert 1 Galaxies. *Astrophys. J.* vol. 854, is. 2, id. 107. DOI: 10.3847/1538-4357/aaaa2b
  12. GRIER, C. and SDSS-RM Collaboration, 2017. The Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping Project: Quasar Reverberation Mapping Studies. *American Astronomical Society Meeting.* vol. 229, id. 414.01.
  13. KOPTILOVA, E. A., OKNYANSKIJ, V. L. and SHIMANOVSKAYA, E. V., 2006. Determining time delay in the gravitationally lensed system QSO2237+0305. *Astron. Astrophys.* vol. 452, is. 1, pp. 37–46. DOI: 10.1051/0004-6361:20054050
  14. KOPTILOVA, E., OKNYANSKIJ, V., ARTAMONOV, B., and CHEN, W.-P., 2010. Multiwavelength observations of lensed quasars: interband time delays. *Mem. S. A. It.* vol. 81, pp. 138–143.
  15. DUDINOV, V. N., SMIRNOV, G. V., VAKULIK, V. G., SERGEEV, A. V. and KOCHETOV, A. E., 2010. Gravitational Lensed System Q2237-0305 in 2001–2008: Observations at the Maidanak Mountain. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 15, is. 4, pp. 387–398. (in Russian).
  16. TSVETKOVA, V. S., SHULGA, V. M. and BERDINA, L. A., 2016. A simple method to determine time delays in the presence of microlensing: application to HE 0435-1112 and PG 1115+080. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 461, is. 4, pp. 3714–3723. DOI: 10.1093/mnras/stw1540
  17. FRANK, J., KING, A. and RAINE, D. J., 2002. *Accretion Power in Astrophysics*. Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press.
  18. POINDEXTER, S. and KOCHANNEK, C. S., 2010. Microlensing Evidence that a Type 1 Quasar is Viewed Face-On. *Astrophys. J.* vol. 712, is. 1, pp. 668–673. DOI: 10.1088/0004-637X/712/1/668
  19. AGOL, E., JONES, B. and BLAES, O., 2000. Keck Mid-Infrared Imaging of QSO 2237+0305. *Astrophys. J.* vol. 545, is. 2, pp. 657–663. DOI: 10.1086/317847
  20. MORGAN, C. W., KOCHANNEK, C. S., MORGAN, N. D. and FALCO, E. E., 2010. The Quasar Accretion Disk Size-Black Hole Mass Relation. *Astrophys. J.* vol. 712, is. 2, pp. 1129–1136. DOI: 10.1088/0004-637X/712/2/1129
  21. AGOL, E. and KROLIK, J. H., 2000. Magnetic Stress at the Marginally Stable Orbit: Altered Disk Structure, Radiation, and Black Hole Spin Evolution. *Astrophys. J.* vol. 528, is. 1, pp. 161–170. DOI: 10.1086/30817
  22. GASKELL, C. M., GOOSMANN, R. W. and KLIMEK, E. S., 2008. Structure and kinematics of the broad-line region and torus of Active Galactic Nuclei. *Mem. S. A. It.* vol. 79, pp. 1090–1095.
  23. EIGENBROD, A., COURBIN, F., MEYLAN, G., AGOL, E., ANGUIA, T., SCHMIDT, R. W. and WAMBSGANSS, J., 2008. Microlensing variability in the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 ≡ the Einstein Cross. II. Energy profile of the accretion disk. *Astron. Astrophys.* vol. 490, is. 3, pp. 933–943. DOI: 10.1051/0004-6361:200810729
  24. VIVES-ARIAS, H., MUÑOZ, J. A., KOCHANNEK, C. S., MEDIÁVILLA, E. and JIMÉNEZ-VICENTE, J., 2016. Observations of the Lensed Quasar Q2237+0305 with CanariCam at GTC. *Astrophys. J.* vol. 831, is. 1, id. 43. DOI: 10.3847/0004-637X/831/1/43
  25. ELVIS, M., 2000. A Structure for Quasars. *Astrophys. J.* vol. 545, is. 1, pp. 63–76. DOI: 10.1086/317778
  26. URRY, C. M. and PADOVANI, P., 1995. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *Publ. Astron. Soc. Pac.* vol. 107, no. 715, pp. 803–845.
  27. JAROSZYNSKI, M., WAMBSGANSS, J., and PACZYNSKI, B., 1992. Microlensed light curves for thin accretion disks around Schwarzschild and Kerr black holes. *Astrophys. J.* vol. 396, is. 2, pp. L65–L68. DOI: 10.1086/186518
  28. WITT, H. J. and MAO, S., 1994. Interpretation of microlensing events in Q2237+0305. *Astrophys. J.* vol. 429, is. 1, pp. 66–76. DOI: 10.1086/174302
  29. VAKULIK, V. G., SCHILD, R. E., SMIRNOV, G. V., DUDINOV, V. N. and TSVETKOVA, V. S., 2007. Q2237+0305 source structure and dimensions from light-curve simulation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 382, is. 2, pp. 819–825. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2007.12422.x
  30. POOLEY, D., BLACKBURNE, J. A., RAPPAPORT, S. and SCHECHTER, P. L., 2007. X-ray and optical flux ratio anomalies in quadruply lensed quasars. I. Zooming in on quasar emission regions. *Astrophys. J.* vol. 661, is. 1, pp. 19–29.
  31. POINDEXTER, S., MORGAN, N. and KOCHANNEK, C. S., 2008. The Spatial Structure of an Accretion Disk. *Astrophys. J.* vol. 673, is. 1, pp. 34–38. DOI: 10.1086/524190
  32. ABOLMASOV, P. and SHAKURA, N. I., 2012. Microlensing evidence for super-Eddington disc accretion in quasars. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 427, is. 3, pp. 1867–1876. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21881.x
  33. OHSUGA, K. and MINESHIGE, S., 2011. Global Structure of Three Distinct Accretion Flows and Outflows around



Black Holes from Two-dimensional Radiation-magnetohydrodynamic Simulations. *Astrophys. J.* vol. 736, is. 1, id. 2. DOI :10.1088/0004-637X/736/1/2

L. A. Berdina<sup>1,2</sup>, V. S. Tsvetkova<sup>1,2</sup>, and V. M. Shulga<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

<sup>3</sup>The International Center of Future Science, Jilin University, 2699 Qianjin St., 130012 Changchun, China

#### REVERBERATION RESPONSES IN LIGHT CURVES OF THE Q2237+0305 QUASAR

*Purpose:* Studying the spatial structure of the quasar in the Q2237+0305 gravitational lens system in optical spectral range; estimating the central black hole mass.

*Design/methodology/approach:* The method of reverberation mapping has been used that implies measuring of the time delays between the quasar intrinsic brightness variations in different spectral ranges. We used the macroimage light curves of the Q2237+0305 system in spectral bands  $V$  ( $\lambda_{eff} = 547.7$  nm) and  $R$  ( $\lambda_{eff} = 634.9$  nm) of Johnson–Cousins photometric system. The reverberation mapping method allows to obtain direct estimates of distances between the quasar regions responsible for radiation in the selected spectral bands.

*Findings:* The time delay between the  $V$  and  $R$  light curves is estimated to be  $5.58 \pm 1.69$  days, which is more than an order of magnitude larger than that predicted by a standard thin accretion disk model by Shakura–Sunyaev. As an explanation, a suggestion is made that the standard accretion disk model is not entirely adequate when describing an actual quasar structure.

*Conclusions:* Such a large time delay means that reverberation responses arise in extended structures located outside the accretion disk. A suggestion that some extended structure capable to efficiently radiate in optical band may exist around the accretion disks has been reported in a number of works dedicated to the microlensing studies and analysis of flux ratio anomalies in gravitationally lensed quasars. Abolmasov and Shakura have shown analytically that a super-Eddington accretion regime may take place for some quasars, which leads to formation of an envelope. The envelope scatters radiation from the disk, thus making the apparent disk size larger. The further development in studying the spatial structure of the Q2237+0305 quasar with the use of reverberation mapping implies involving the data in spectral band  $I$ . This will provide two additional spectral bases thus allowing investigation of a wavelength dependence of the corresponding structure dimensions.

*Key words:* quasar, black hole, spatial structure, accretion disk, reverberation mapping

Л. А. Бердіна<sup>1,2</sup>, В. С. Цветкова<sup>1,2</sup>, В. М. Шульга<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

<sup>3</sup>Міжнародний центр науки майбутнього, Цзилінський університет, вул. Цяньцзинь, 2699, м. Чанчунь, 130012, Китай

#### РЕВЕРБЕРАЦИЙНІ ВІДГУКИ В КРИВИХ БЛИСКУ КВАЗАРА Q2237+0305

*Предмет і мета роботи:* Вивчення просторової структури квазара гравітаційно-лінзової системи Q2237+0305 у оптичному діапазоні; оцінка маси центральної чорної діри.

*Методи і методологія:* Застосовано метод ревербераційного картування, який передбачає вимірювання часових запізнень між коливаннями власного блиску квазара в різних спектральних діапазонах. Використано криві блиску макрозображень системи Q2237+0305 в спектральних смугах  $V$  ( $\lambda_{eff} = 547.7$  нм) та  $R$  ( $\lambda_{eff} = 634.9$  нм) фотометричної системи Джонсона–Коузінса. Метод ревербераційного картування дозволяє отримувати прямі оцінки відстаней між областями квазара, відповідальними за випромінювання у вибраних спектральних діапазонах.

*Результати:* Отримано оцінку часу запізнення між кривими блиску в спектральних смугах  $V$  і  $R$ , котра становить  $5.58 \pm 1.69$  діб, що більш ніж на порядок перевершує значення запізнення, передбачуване стандартною моделлю тонкого акреційного диску Шакура–Сюняєва. Щодо можливої причини висловлюється припущення, що стандартна модель диску не зовсім точно описує реальну картину.

*Висновок:* Настільки великий час запізнення означає, що ревербераційні відгуки виникають в протяжних структурах, розташованих за межами акреційного диску. Припущення про існування довкола акреційного диску деякої протяжної структури, ефективно випромінюючої в оптичному діапазоні, неодноразово висловлювалося у низці робіт, присвячених аналізу аномалій співвідношення блиску і подій мікролінзування у гравітаційно-лінзованих квазарах. Аболмасов і Шакура показали аналітично, що для деяких квазарів можливий надеддінгтонівський режим акреції, що призводить до утворення деякої оболонки, яка розсіює випромінювання від диска, збільшуючи таким чином його видимі розміри. Для подальшого розвитку робіт щодо дослідження просторової структури квазара Q2237+0305 методом ревербераційного картування передбачається використати криві блиску в спектральній смузі  $I$ . Це забезпечить дві додаткові спектральні бази, що дозволить досліджувати характер залежності розміру даної структури від довжини хвилі.

*Ключові слова:* квазар, чорна діра, просторова структура, акреційний диск, ревербераційне картування

Статья поступила в редакцию 19.10.2018