

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra24.04.242>УДК 551.558, 551.596,
534.221PACS numbers: 94.20.-y,
96.30.YsЛ. А. БЕРДИНА^{1,2}, В. С. ЦВЕТКОВА^{1,2}, В. М. ШУЛЬГА^{1,3}¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Мыстэцтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: lberdina@rian.kharkov.ua² НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,
ул. Сумская, 35, г. Харьков, 61022, Украина³ Международный центр науки будущего, Цзилиньский университет,
ул. Цяньцзинь, 2699, г. Чанчунь, 130012, Китай

ПРОТЯЖЕННАЯ РАССЕИВАЮЩАЯ ОБОЛОЧКА В КВАЗАРЕ Q2237+0305

Предмет и цель работы: *Изучение структуры аккреционного диска гравитационно линзированного квазара Q2237+0305 в оптическом диапазоне; оценка параметров режима аккреции материи на центральную черную дыру.*

Методы и методология: *Измерение времени запаздывания между колебаниями блеска квазара в двух спектральных диапазонах позволяет получать прямые оценки расстояния между зонами квазара, излучающими в выбранных диапазонах (метод реверберационного картирования).*

Результаты: *Получены новые оценки запаздывания между кривыми блеска в спектральных полосах R и V, относящиеся к наблюдениям Q2237+0305 в 2004 г., и уточнены измеренные ранее запаздывания по наблюдениям 2005 г. Среднее по двум годам значение времени запаздывания составляет $\Delta t_{R-V} \approx 6.7 \pm 2.4$ сут в системе координат наблюдателя, или $\hat{\Delta} t_{R-V} \approx 2.49 \pm 0.9$ сут в системе координат источника. Такое запаздывание соответствует расстоянию между кольцевыми зонами аккреционного диска, ответственными за излучение в полосах R и V, равному $R_R - R_V = \hat{\Delta} t_{R-V} \cdot c \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ см. Это говорит о размере аккреционного диска, более чем на порядок превосходящем значение, предсказанное стандартной моделью тонкого аккреционного диска Шакуры и Сюняева (1973 г.). В работе проверяется предположение, что столь большой размер аккреционного диска может быть следствием сверхкритического (сверх-эддингтоновского) режима аккреции, рассмотренного в классической работе Шакуры и Сюняева, в которой показано, что сверхкритический режим аккреции приводит к образованию протяженной оптически плотной рассеивающей оболочки на периферии диска.*

Заключение: *Аналитические выражения для радиуса и температуры такой оболочки, полученные Шакурой и Сюняевым, были использованы в настоящей работе для вычисления размеров оболочки R_R и R_V в спектральных полосах R и V, ожидаемых в рамках гипотезы о сверхкритическом режиме аккреции в квазаре Q2237+0305. Вычисления выполнены для трех значений массы черной дыры M_{BH} , покрывающих весь диапазон существующих в настоящее время оценок для Q2237+0305, от $M_{BH} = 2 \cdot 10^8 M_\odot$ до $M_{BH} = 20 \cdot 10^8 M_\odot$. Для скорости аккреции принято значение $\dot{m} = 17$. Вычисленные значения радиусов оболочки в полосах R и V достаточно хорошо согласуются со значением запаздывания 2.49 сут, полученным в настоящей работе из наблюдательных данных. Таким образом, можно утверждать, что черная дыра в квазаре Q2237+0305 аккрецирует вещество в умеренно сверхкритическом режиме, приводящем к развитию обширной оптически плотной рассеивающей оболочки, в которой и возникают исследованные в настоящей работе реверберационные отклики. При этом диапазон изменения параметра α (эффективность передачи углового момента) составил $0.005 \div 0.006$ для минимальной массы черной дыры и $0.029 \div 0.033$ для максимальной при значениях параметра A (отношение потерь энергии при комптоновском рассеянии к потерям при свободно-свободных переходах) в диапазоне от 50 до 100.*

Ключевые слова: квазар, черная дыра, аккреционный диск, реверберационное картирование

1. Введение

Квазары, одни из наиболее мощных источников излучения во Вселенной, являются одновременно и наиболее удаленными от нас объектами, настолько удаленными, что углового разрешения даже самых современных астрономических инструментов недостаточно для получения их прямых изображений. Тем не менее в настоящее время о пространственной структуре квазаров мы

знаем достаточно много благодаря пониманию фундаментальных физических процессов, происходящих в этих объектах. Прежде всего, стал понятен источник огромной энергии, излучаемой ими. Это – аккреция вещества на сверхмассивную черную дыру, в результате которой высвобождается гравитационная энергия аккрецирующего вещества, переходя в тепловую энергию плазмы и в кинетическую энергию частиц при спуске на цен-

тральное тело. Наиболее разработанной и широко используемой является теория стандартной дисковой аккреции, основы которой заложены работами [1] и [2].

Стартовавшие в начале 70-х гг. прошлого столетия интенсивные исследования гравитационно линзированных квазаров и, в особенности, обнаружение в них событий микролинзирования предоставили эффективный инструмент прямого исследования пространственной структуры квазаров и, следовательно, проверки различных моделей аккреционных дисков.

Открытый в 1985 г. квадрупольно линзированный квазар Q2237+0305 (Крест Эйнштейна) оказался весьма перспективным для наблюдения событий микролинзирования: близость к наблюдателю линзирующей галактики ($z = 0.039$) и чрезвычайная компактность расположения линзированных изображений обеспечивают в этом объекте высокую частоту событий микролинзирования. Для квазара Q2237+0305 по событиям микролинзирования в разных спектральных диапазонах было выполнено около двух десятков измерений эффективного размера, которые продемонстрировали их удовлетворительное соответствие стандартной модели тонкого аккреционного диска Шакуры и Сюняева [1]. Важную роль в установлении этого соответствия сыграли многоцветные и спектральные наблюдения, позволившие исследовать температурный профиль диска в Q2237+0305 [3, 4]. Вместе с тем в ряде случаев анализ кривых блеска микролинзирования квазара Q2237+0305 приводил к оценкам радиуса аккреционного диска, значительно (иногда на несколько порядков) превосходящим теоретические предсказания, основанные на модели тонкого аккреционного диска [5–8]. Более того, по мере накопления наблюдательных данных обнаружилось, что далеко не для всех квазаров измеренный температурный профиль аккреционного диска соответствует стандартной модели Шакуры–Сюняева. Все эти несоответствия позволили ряду авторов высказать сомнения относительно универсальности стандартной модели тонкого аккреционного диска [7, 9, 10] и одновременно подчеркнули необходимость в привлечении большего количества наблюдательных данных с использованием новых методов и средств наблюдений.

В последнее время большое внимание уделяется наблюдательным проектам, предпола-

гающим синхронные наблюдения изменений блеска квазаров и активных ядер галактик в нескольких спектральных диапазонах. Согласно модели переработки излучения [11], всплески жесткого излучения, возникающие в центральных областях диска, при распространении во внешние области переизлучаются в них в более длинноволновых диапазонах с временными запаздываниями, пропорциональными их удаленности от центра. Измерения временных запаздываний между колебаниями блеска в разных участках спектра позволяют определять расстояния между областями диска с отличающимися физическими условиями, т. е. исследовать пространственную структуру квазаров и активных ядер галактик с разрешением, пока недоступным существующим наблюдательным средствам. Такой метод исследования структуры удаленных источников получил название реверберационного картирования [12].

Помимо прямых измерений размеров излучающих областей квазара, метод реверберационного картирования позволяет получать оценки массы центральной черной дыры, скорости аккреции вещества на центральное тело и других физических параметров, ответственных за особенности излучения квазара и механизм его переменности. В настоящее время реверберационному картированию квазаров и активных ядер галактик посвящено несколько крупных международных проектов, таких как SDSS-RM (Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping), STORM (Space Telescope and Optical Reverberation Mapping), LAMP (Lick AGN Monitoring Project) [13, 14].

В настоящей работе предварительные результаты измерения запаздываний между колебаниями блеска в фильтрах R и V по наблюдениям Q2237+0305 в 2005 г., опубликованные в работе [15], дополнены данными измерений в наблюдательный сезон 2004 г. Приведены также уточненные значения запаздываний для сезона 2005 г., полученные в результате более корректного учета погрешностей измерения. В рамках предположения о сверхкритическом режиме аккреции, на основе полученных в работе [1] аналитических соотношений, выполнены оценки возможных значений некоторых физических параметров, определяющих пространственную структуру аккреционного диска квазара Q2237+0305.

2. Значения запаздываний и оценка погрешностей

Гравитационно-линзовая система Q2237+0305 представляет собой квазар с красным смещением $z_Q = 1.69$, квадрупольно линзированный галактикой с $z_G = 0.039$. Все четыре макроизображения системы обнаруживают заметную переменность, обусловленную как изменениями собственного блеска квазара, так и событиями микролинзирования, которые вследствие геометрии системы происходят в ней почти непрерывно.

В настоящей работе использованы результаты фотометрии системы Q2237+0305 в 2004 и 2005 гг. в спектральных полосах V (эффективная длина волны $\lambda_{eff} = 547.7$ нм) и R ($\lambda_{eff} = 634.9$ нм) фотометрической системы Джонсона–Коузинса, которые являются частью обширного ряда данных, полученных в рамках программы длительного мониторинга на 1.5-метровом телескопе Майданакской высокогорной обсерватории [16]. На рис. 1 приведены кривые блеска изображений гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 в полосе R для использованных нами юлианских дат $2403150 \div 2403345$ и $2403525 \div 2403730$, соответствующих сезонам 2004 и 2005 гг. Полные данные мониторинга доступны на сайте НИИ

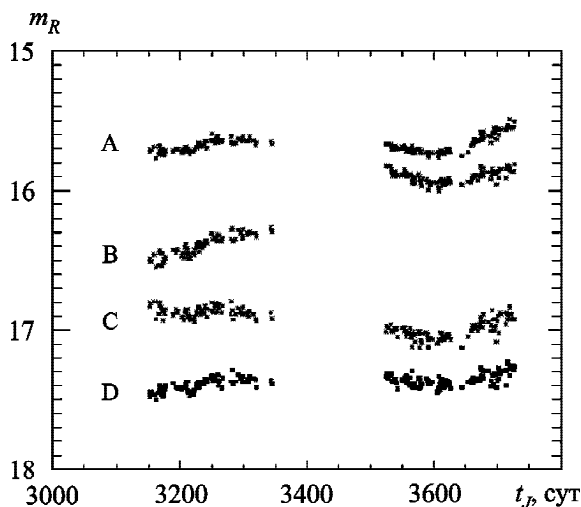


Рис. 1. Кривые блеска макроизображений А, В, С и D системы Q2237+0305 в спектральной полосе R по данным мониторинга на 1.5-метровом телескопе в Майданакской высокогорной обсерватории [16]. По горизонтальной оси отложено время $t_j = \text{JD} - 2400000$, по вертикальной оси – яркость в звездных величинах. Использованные кривые блеска соответствуют юлианским датам $\text{JD} = 2403150 \div 2403345$ (наблюдательный сезон 2004 г.) и $\text{JD} = 2403525 \div 2403730$ (сезон 2005 г.)

астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина <<http://www.astron.kharkov.ua/databases/index.html>>.

Времена запаздывания между колебаниями блеска в спектральных полосах V и R, измеренные нами по кривым блеска линзированных изображений А, В и С системы Q2237+0305, приведены в табл. 1. Кривые блеска самого слабого компонента D не использовались из-за сравнительно большой погрешности фотометрии. Так как разные компоненты системы являются изображениями одного и того же квазара-источника (макроизображениями), нет оснований ожидать для них разных оценок времен запаздывания. Поэтому оценки запаздываний Δt_{R-V} , полученные для каждого из макроизображений отдельно, были использованы для получения значений Δt_{R-V}^{ABC} , усредненных по трем макроизображениям в пределах каждого сезона. Значения Δt_{R-V}^{ABC} приведены в табл. 1.

Заметим, что приведенное в табл. 1 значение Δt_{R-V}^{ABC} для сезона 2005 г., равное (6.25 ± 1.97) сут, несколько отличается от опубликованного ранее [15] значения (5.58 ± 1.69) сут, однако находится в пределах указанной погрешности. Причина этой небольшой разницы – в ужесточении процедуры оценки погрешности измерения запаздываний, в результате которой значение погрешности ожидаемым образом увеличилось. Как подробно описано в нашей предыдущей работе [15], для оценки погрешности (а заодно и проверки решения на устойчивость) в исходных кривых блеска случайным образом пропускалось до 30 % точек отчета с последующим повторением вычислений для каждой вновь сформированной реализации пары кривых блеска. Ужесточение процедуры состояло в примерно двукратном увеличении числа таких испытаний. При этом, естественно, несколько изменились и значения запаздываний для каждого компонента, и результат усреднения по компонентам.

Разброс оценок запаздываний между кривыми блеска макроизображений в течение наблюдательного сезона 2004 г. оказался заметно большим, чем в течение сезона 2005 г., что, естественно, проявилось и в значении оцененной погрешности. Это ожидаемый результат, так как вариации собственного блеска квазара в сезон 2004 г. менее выразительны, чем в сезон 2005 г.,

Таблица 1. Временные запаздывания между кривыми блеска линзированных изображений А, В и С системы Q2237+0305 в спектральных полосах R и V по наблюдениям 2004 и 2005 гг.

Компонент	Сезон 2004 г.		Сезон 2005 г.	
	Δt_{R-V} , сут	Δt_{R-V}^{ABC} , сут	Δt_{R-V} , сут	Δt_{R-V}^{ABC} , сут
А	9.14 ± 2.51		7.31 ± 2.06	
В	6.68 ± 2.31	7.18 ± 2.81	5.64 ± 2.35	6.25 ± 1.97
С	5.61 ± 2.38		5.82 ± 0.62	

когда наблюдения охватили четко выраженный минимум блеска достаточно большой амплитуды (по сравнению со среднеквадратической погрешностью фотометрии). В кривых блеска 2004 г., как можно видеть на рис. 1, таких вариаций блеска нет. Тем не менее измерения временных запаздываний, выполненные по данным наблюдений двух разных сезонов, достаточно хорошо согласуются друг с другом. Наряду с удовлетворительным совпадением результатов, полученным по разным макроизображениям, это согласие является подтверждением достоверности найденной оценки временного запаздывания.

Таким образом, можно утверждать, что колебания блеска квазара Q2237+0305 в спектральной полосе V проявляются в полосе R через промежуток времени, составляющий от ≈ 6.2 до ≈ 7.2 сут. В дальнейшем будем использовать значение запаздывания, равное среднему между этими значениями, $\Delta t_{R-V} \approx (6.7 \pm 2.4)$ сут, что в системе координат источника соответствует промежутку времени $\Delta \hat{t}_{R-V} = \frac{\Delta t_{R-V}}{1+z_Q} \approx 2.5$ сут. В рамках гипотезы о переработке излучения при распространении к периферии аккреционного диска [11] такое запаздывание означает, что расстояние между зонами диска, ответственными за излучение в этих спектральных полосах, составляет $R_R - R_V = \Delta \hat{t}_{R-V} \cdot c \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ см.

При такой оценке использована несколько упрощенная схема возникновения реверберационных откликов, согласно которой они формируются в каждом из фильтров в неких кольцевых зонах аккреционного диска. Зоны отстоят от центрального источника на расстояния, при которых достигаются температуры, соответствующие кривым пропускания используемых светофильтров. Исходный сигнал (флуктуации потока жесткой радиации центральных областей диска), распространяясь от центра к периферии диска, переизлучается

в более длинноволновом диапазоне с запаздыванием, соответствующим времени распространения световой волны. При этом он подвергается искажениям, обусловленным размерами, формой и расположением переизлучающих областей. В рамках нашей упрощенной схемы наблюдаемые искажения исходного сигнала во времени (согласно англоязычной терминологии, “transfer function”, “response function”, – передаточная функция) определяются, в частности, шириной и профилем яркости излучающей зоны, азимутальным распределением поверхностной яркости в кольцевой зоне и, наконец, углом наклона i плоскости аккреционного диска относительно картинной плоскости.

В каждом конкретном случае все эти факторы не известны или известны с большой степенью неопределенности. Поэтому обычно для построения передаточной функции пользуются модельными представлениями, как правило, упрощенными. В нашем случае упрощение принятой схемы состоит в предположении, что ширина и яркость кольцевых зон не меняются по азимуту. Тогда ширина передаточной функции определяется температурным профилем кольцевой зоны, соответствующим кривой пропускания используемого светофильтра, а влияние наклона диска относительно картинной плоскости сводится к дополнительному расширению передаточной функции на величину $\pm \frac{R \sin i}{c}$, причем, что важно, симметричному относительно времени прихода исходного сигнала на расстояние R от источника. В работе [17] авторы на основании анализа событий микролинзирования приходят к выводу, что квазар Q2237+0305 наблюдается практически “face-on”, а именно $\cos i > 0.66$. Несложно подсчитать, что при таком наклоне расширение передаточной функции для радиуса зоны, скажем, $R = 2 \cdot 10^{16}$ см составит ± 2 сут. Воздействие передаточной функции с такой шириной на

исходный сигнал с характерным периодом флуктуаций от 50 сут и выше приведет лишь к его незначительному сглаживанию, при этом симметричный характер передаточной функции обеспечит отсутствие смещения в оценках запаздываний между реверберационными откликами.

Согласно модели тонкого аккреционного диска Шакуры и Сюняева [1], расстояние R_λ от центра диска до зоны с температурой, при которой максимум чернотельного излучения приходится на длину волны λ , определяется выражением:

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

где G – гравитационная постоянная, h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны в системе координат источника, M_{BH} – масса черной дыры и \dot{M} – скорость аккреции. Для вычислений удобно воспользоваться представлением соотношения (1) в безразмерных величинах $\tilde{M}_{BH} = M_{BH}/(10^9 M_\odot)$ и $\tilde{\lambda} = \lambda/\Lambda$, где $\Lambda = 1$ мкм, предложенным в работах [10, 17], которое, с учетом того, что $\dot{M} = L/(\eta c^2)$ и эддингтоновский предел светимости $L_E = 1.3 \cdot 10^8 M_{BH}/M_\odot$, имеет вид:

$$R_\lambda = 9.7 \cdot 10^{15} \tilde{\lambda}^{4/3} \tilde{M}_{BH}^{2/3} \left(\frac{L}{\eta L_E} \right)^{1/3}. \quad (2)$$

Обычно при расчетах полагают, что светимость $L = L_E$, а для эффективности аккреции η принимают, согласно [18], $\eta = 0.1$.

Значение массы черной дыры M_{BH} , необходимое для оценки радиуса диска R_λ из выражения (2), можно выбрать из табл. 2, в которой собраны полученные различными методами в течение последних 20 лет оценки массы черной дыры в

квизаре Q2237+0305. Как видно из таблицы, разброс значений M_{BH} весьма велик. Принимая, например, $M_{BH} = 9 \cdot 10^8 M_\odot$ [10] – значение, близкое к среднему значению приведенных в таблице оценок, – получим из выражения (2) следующие значения радиусов диска в полосах пропускания V и R: $R_{\lambda,V} \approx 2.32 \cdot 10^{15}$ см и $R_{\lambda,R} \approx 2.84 \cdot 10^{15}$ см. Следовательно, предсказываемое моделью тонкого диска расстояние между зонами, ответственными за излучение в полосах V и R, составляет $R_{\lambda,R} - R_{\lambda,V} \approx 0.52 \cdot 10^{15}$ см, что более чем на порядок меньше значения $R_R - R_V \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ см, которое соответствует полученному в настоящей работе запаздыванию $\Delta t \approx 2.49$ сут. И даже если принять для массы черной дыры верхний предел оценок из табл. 2, $M_{BH} = 20 \cdot 10^8 M_\odot$, то расстояние между зонами, излучающими в полосах R и V, составит, согласно выражению (2), $R_R - R_V \approx 0.86 \cdot 10^{15}$ см, что соответствует запаздыванию, в семь раз меньшему измеренного в настоящей работе.

3. Анализ и интерпретация результатов

Как отмечено во Введении, в ряде работ, например [5–8], сообщается, что анализ событий микролинзирования в квазаре Q2237+0305 приводит к значениям радиуса аккреционного диска, превосходящим в несколько раз теоретические предсказания, основанные на стандартной модели тонкого диска. Аналогичные расхождения между теорией и наблюдениями неоднократно отмечались также в работах по реверберационному картированию квазаров [10, 13, 26]: измеренные запаздывания между колебаниями блеска в различных фильтрах часто оказываются существенно больше ожидаемых значений, полученных на основе стандартной модели тонкого аккреционного

Таблица 2. Оценки массы черной дыры в квазаре Q2237+0305, полученные в работах разных авторов

Авторы	M_{BH}	Примечания
Agol et al. [19]	$20 \cdot 10^8 M_\odot$	По отношению потоков в среднем ИК диапазоне
Kochanek [20]	$(4.3 \div 25) \cdot 10^8 M_\odot$	Из соотношения (2) в предположении $\eta = 0.15$, $L = L_E$
Pooley et al. [7]	$10 \cdot 10^8 M_\odot$	По болометрической светимости в предположении $\eta = 0.15$, $L = L_E$
Morgan et al. [10]	$9 \cdot 10^8 M_\odot$	По дисперсии скоростей C IV из [21]
Sluse et al. [22]	$2 \cdot 10^8 M_\odot$	По дисперсии скоростей C IV из данных [22]
Assef et al. [23]	$6.17 \cdot 10^8 M_\odot$	По дисперсии скоростей C IV, H α и H β из данных [24]
Mediavilla et al. [25]	$12 \cdot 10^8 M_\odot$	По центральной депрессии в кривой блеска микролинзирования

диска Шакуры–Сюняева. Таким образом, имеются веские основания считать, что реальный аккреционный диск может заметно отличаться от общепринятой модели, которая нуждается в коррекции или пересмотре [27, 28].

Между тем, уже в работе Шакуры и Сюняева 1973 г. [1], в которой впервые предложена ставшая классической модель тонкого аккреционного диска, рассмотрен также сверхкритический (сверх-эддингтоновский) режим аккреции, приводящий к существенным изменениям физических характеристик и распределения вещества, окружающего черную дыру. Согласно этой работе, сверхкритический режим характеризуется светимостью, соответствующей пределу Эддингтона, $L_E = 10^{38} \cdot M/M_\odot$ (единица – эрг в секунду), высокой скоростью аккреции, $\dot{M} > \dot{M}_{cr}$, где $\dot{M}_{cr} = L_E/\eta c^2$, и низкой эффективностью передачи углового момента α в падающей на черную дыру материи, $\alpha \ll 1$. Шакура и Сюняев анализируют физические следствия такого режима, в частности, предсказывают формирование на периферии аккреционного диска оптически плотного ветра (оболочки), отмечают возможность развития вокруг оси вращения диска конической зоны избегания (вихревой воронки).

Создается впечатление, что эта часть работы Шакуры и Сюняева в свое время не была замечена и должным образом оценена, и в дальнейшем получили развитие исследования, посвященные анализу всего многообразия режимов дисковой аккреции и их проявлений, выполненные как аналитически [29–31], так и с помощью цифрового моделирования [32–35]. В 2012 г. в работе [36] были продолжены аналитические исследования сверхкритического режима аккреции и его влияния на наблюдаемые свойства квазаров. К этому времени было проведено трехмерное компьютерное моделирование развития аккреционных дисков при различных режимах аккреции, в которых выводы Шакуры и Сюняева получили убедительное подтверждение [37].

Согласно работам [1] и [36], при сверхкритическом режиме аккреции, когда $\dot{M} \gg \dot{M}_{cr}$ и $\alpha \ll 1$, вокруг черной дыры формируется рассеивающая оптически плотная оболочка, которая увеличивает видимый размер диска. Шакура и Сюняев приводят аналитические выражения для эффективной температуры (в кельвинах) и эффективного радиуса оболочки (в сантиметрах):

$$T_{eff} = 2 \cdot 10^{10} \dot{m}^{-15/11} m^{-2/11} \alpha^{10/11} A^{-6/11}, \quad (3)$$

$$R_{eff} = 3 \cdot 10^2 \dot{m}^{5/22} m^{10/11} \alpha^{-17/11} A^{8/11}. \quad (4)$$

Здесь использованы безразмерные масса черной дыры и скорость аккреции, $m = M_{BH}/M_\odot$, $\dot{m} = \dot{M}/\dot{M}_{cr}$, а параметр A характеризует отношение потерь энергии при комптоновском рассеянии к потерям при свободно-свободных переходах. В работе [1] указывается, что при физических условиях, представляющих интерес для рассмотрения сверхкритического режима аккреции, величина A меняется от 10 до 300. Отмечается также, что температура T_{eff} (3) практически постоянна при $R > R_{eff}$ (4) и что в оптическом диапазоне (низкочастотный участок спектра при данной эффективной температуре T_{eff}) радиус, при котором оптическая плотность оболочки становится равной единице, значительно превышает R_{eff} . Полагая оптическую плотность оболочки равной единице, авторы работы [1] получают при решении соответствующих уравнений переноса излучения, теплового баланса и гидростатического равновесия следующее выражение для ее радиуса (в сантиметрах) в оптическом диапазоне на частоте ν :

$$R_{opt} = 10^7 \alpha^{-3/4} \left(\frac{10^6}{T} \right)^{3/8} \left(\frac{10^{15}}{\nu} \right)^{1/2} \dot{m}^{9/8} m^{3/4}. \quad (5)$$

Важным следствием наличия рассеивающей оболочки является обнаруженная в работе [36] возможность отдельного определения массы черной дыры и скорости аккреции. Такое определение было сделано в работе [36] для 11 гравитационно линзированных квазаров, в том числе и для Q2237+0305. Согласно оценкам, значение $\dot{m} = \dot{M}/\dot{M}_{cr}$ для этого квазара равно 17, что позволяет отнести Q2237+0305 к объектам с так называемым умеренно сверх-эддингтоновским режимом аккреции.

Воспользовавшись выражениями (3) и (5), найдем значения параметров α и A , при которых расстояние между зонами оболочки $R_R - R_V$ будет соответствовать времени запаздывания, измеренному в настоящей работе. Вычисления выполнены для трех значений массы черной дыры в Q2237+0305, соответствующих минимальной ($2 \cdot 10^8 M_\odot$), максимальной ($20 \cdot 10^8 M_\odot$) и сред-

ней ($9 \cdot 10^8 M_{\odot}$) оценкам массы из табл. 2. Для скорости аккреции принято значение $\dot{m} = 17$, полученное в работе [36]. Результаты приведены в табл. 3, в которой, помимо времени запаздывания (последний столбец), приведены диапазоны значений параметров α и A и соответствующие им диапазоны значений R_{opt} для трех значений массы черной дыры. Таким образом, рассмотренный в работе [1] сценарий формирования оптически плотной оболочки при сверхкритическом (сверх-эддингтоновском) режиме аккреции предсказывает размеры областей квазара, излучающих в полосах R и V, которые хорошо согласуются с нашими измерениями времени запаздывания между колебаниями блеска в этих полосах. При этом значения параметра A находятся в пределах интервала, оговариваемого в работе [1], а значения параметра α для всех трех масс черной дыры отвечают условию $\alpha \ll 1$.

4. Заключение

1. Выполненные в настоящей работе измерения показали, что колебания собственного блеска квазара гравитационно линзовой системы Q2237+0305 в спектральной полосе, соответствующей пропусканию фильтра R (эффективная длина волны в момент излучения в системе координат источника $\lambda_R = 235.6$ нм), отстают от колебаний в полосе V ($\lambda_V = 203.2$ нм), на $\Delta t_{R-V} \approx (6.7 \pm 2.4)$ сут, что соответствует запаздыванию $\Delta \hat{t}_{R-V} \approx 2.49$ сут в системе координат источника.

2. В рамках гипотезы о переработке излучения при распространении к периферии аккреционного диска [11] этот результат означает, что расстояние между зонами, ответственными за наблюдаемые реверберационные отклики, составляет $R_R - R_V = c \cdot \Delta \hat{t}_{R-V} \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ см. Это значение более чем на порядок превосходит расстояние между соответствующими зонами, следующее из стандартной модели тонкого аккреционного диска Шакуры и Сюняева [1] –

$0.52 \cdot 10^{15}$ см для массы центральной черной дыры $M_{BH} = 9 \cdot 10^8 M_{\odot}$.

3. В поисках возможного объяснения столь больших размеров аккреционного диска мы обратились к выполненному в классической работе [1] анализу сверхкритического режима аккреции вещества на центральную черную дыру и его возможных проявлений при наблюдениях. Основным выводом, следующий из этого анализа, подтвержденный позже в работах [36] и в модельных экспериментах [37], заключается в формировании обширной оптически плотной рассеивающей оболочки (ветра) как непосредственного следствия сверхкритического режима аккреции.

4. Опубликованные в работе [1] аналитические выражения позволили определить в настоящей работе значения радиуса оболочки R_{opt} для двух рассматриваемых участков спектра, ожидаемые в рамках гипотезы о сверхкритическом режиме аккреции в квазаре Q2237+0305. Вычисления выполнены для трех значений массы черной дыры M_{BH} , покрывающих весь диапазон существующих в настоящее время оценок для Q2237+0305, от минимальной ($M_{BH} = 2 \cdot 10^8 M_{\odot}$) до максимальной ($M_{BH} = 20 \cdot 10^8 M_{\odot}$). Для скорости аккреции принято значение $\dot{m} = 17$. Для всех трех значений M_{BH} полученные из выражений (3) и (5) радиусы оболочки в полосах R и V соответствуют времени запаздывания между колебаниями блеска в этих полосах $\Delta \hat{t}_{R-V} \approx (2.6 \pm 2.7)$ сут, достаточно близкому к измеренному в настоящей работе значению (2.49 сут). При этом диапазон изменения параметра α (эффективность передачи углового момента) составил $0.005 \div 0.006$ для минимальной массы черной дыры и $0.029 \div 0.033$ для максимальной при значениях параметра A (отношение потерь энергии при комптоновском рассеянии к потерям при свободно-свободных переходах) – в диапазоне от 50 до 100.

5. Таким образом, можно утверждать, что измеренное в настоящей работе запаздывание меж-

Таблица 3. Диапазоны значений параметров α и A в выражениях (3) и (5) и соответствующие значения R_{opt}

M_{BH}	A	α	R_{opt_R} , см	R_{opt_V} , см	$\Delta \hat{t}_{R-V}$, сут
$2 \cdot 10^8 M_{\odot}$	50 ÷ 100	0.005 ÷ 0.006	$(9.41 \div 9.96) \cdot 10^{16}$	$(8.74 \div 9.26) \cdot 10^{16}$	2.56 ÷ 2.71
$9 \cdot 10^8 M_{\odot}$	50 ÷ 100	0.016 ÷ 0.018	$(9.58 \div 9.71) \cdot 10^{16}$	$(8.91 \div 9.03) \cdot 10^{16}$	2.61 ÷ 2.65
$20 \cdot 10^8 M_{\odot}$	50 ÷ 100	0.029 ÷ 0.033	$(9.63 \div 9.64) \cdot 10^{16}$	$(8.95 \div 8.96) \cdot 10^{16}$	2.61 ÷ 2.62

ду колебаниями блеска в полосах R и V обусловлено переизлучениями (реверберациями) жесткой радиации центральных областей аккреционного диска при ее распространении в рассеивающей оптически плотной оболочке, возникшей в квазаре Q2237+0305 вследствие умеренно сверхкритического режима аккреции материи на центральную черную дыру. Полагая $M_{BH} = 9 \cdot 10^8 M_{\odot}$ наиболее вероятным значением массы черной дыры в Q2237+0305, получим для радиуса оболочки в полосе R значение $R_R \approx 9.65 \cdot 10^{16}$ см и в полосе V значение $R_V \approx 8.95 \cdot 10^{16}$ см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Shakura N. I. and Sunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astron. Astrophys.* 1973. Vol. 24. P. 337–355.
- Pringle J. E. and Rees M. J. Accretion disc models for compact X-ray sources. *Astron. Astrophys.* 1972. Vol. 21. P. 1–9.
- 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 ≡ 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
- Anguita T., Schmidt R. W., Turner E. L., Wambsganss J., Webster R. L., Loomis K. A., Long D., and McMillan R. The multiple quasar Q2237+0305 under a microlensing caustic. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 480. P. 327–334. DOI: 1051/0004-6361:20078221
- 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
- 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
- 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. DOI: 10.1086/512115
- 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
- Jiménez-Vicente J., Mediavilla E., Muñoz J. A., and Kochanek C. S. A robust determination of the size of quasar accretion disks using gravitational microlensing. *Astrophys. J.* 2012. Vol. 751, Is. 2. id. 106. DOI: 10.1088/0004-637X/751/2/106
- 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
- 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
- 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., Holmoe 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., Mosqueira 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. 414.01
- Бердина Л. А., Цветкова В. С., Шульга В. М. Реверберационные отклики в кривых блеска квазара Q2237+0305. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2018. Т. 23, № 4. С. 235–243. DOI: 10.15407/grpa23.04.235
- 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.
- 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
- Frank J., King A., and Raine D. J. *Accretion Power in Astrophysics.* Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 398 p.
- 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
- Kochanek C. S. Quantitative interpretation of quasar microlensing light curves. *Astrophys. J.* 2004. Vol. 605, Is. 1. P. 58–77. DOI: 10.1086/382180
- Yee H. K. C. and De Robertis M. M. Spatially resolved spectroscopy of Lyman-alpha and C IV in the gravitational lens 2237+030. *Astrophys. J.* 1991. Vol. 381, Is. 2. P. 386–392. DOI: 10.1086/170661
- Sluse D., Schmidt R., Courbin F., Hutsemékers D., Meylan G., Eigenbrod A., Anguita T., Agol E., and Wambsganss J.

- Zooming into the broad line region of the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 \equiv the Einstein Cross. III. Determination of the size and structure of the C IV and C III] emitting regions using microlensing. *Astron. Astrophys.* 2011. Vol. 528. id. 100. DOI: 10.1051/0004-6361/201016110
23. Assef R. J., Denney K. D., Kochanek C. S., Peterson B. M., Kozłowski S., Ageorges N., Barrows R. S., Buschkamp P., Dietrich M., Falco E., Feiz C., Gempferlein H., Germeroth A., Grier C. J., Hofmann R., Juette M., Khan R., Kilic M., Knierim V., Laun W., Lederer R., Lehmitz M., Lenzen R., Mall U., Madsen K. K., Mandel H., Martini P., Mathur S., Mogren K., Mueller P., Naranjo V., Pasquali A., Polsterer K., Pogge R. W., Quirrenbach A., Seifert W., Stern D., Shappee B., Storz C., Van Sadars J., Weiser P., and Zhang D. Black hole mass estimates based on C IV are consistent with those based on the Balmer lines. *Astrophys. J.* 2011. Vol. 742, Is. 2. id. 93. DOI: 10.1088/0004-637X/742/2/93
 24. Eigenbrod A., Courbin F., Sluse D., Meylan G., and Agol E. Microlensing variability in the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 \equiv the Einstein Cross. I. Spectrophotometric monitoring with the VLT. *Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 480, Is. 3. P. 647–661. DOI: 10.1051/0004-6361:20078703
 25. Mediavilla E., Jiménez-Vicente J., Muñoz J. A., and Mediavilla T. Resolving the innermost region of the accretion disk of the lensed quasar Q2237+0305 through gravitational microlensing. *Astrophys. J. Lett.* 2015. Vol. 814, Is. 2. id. L26. DOI: 10.1088/2041-8205/814/2/L26
 26. Fausnaugh M. M., Denney K. D., Barth A. J., Bentz M. C., Bottorff M. C., Carini M. T., Croxall K. V., De Rosa G., Goad M. R., Horne K., Joner M. D., Kaspi S., Kim M., Klimanov S. A., Kochanek C. S., Leonard D. C., Netzer H., Peterson B. M., Schnülle K., Sergeev S. G., Vestergaard M., Zheng W.-K., Zu Y., Anderson M. D., Aréval P., Bazhaw C., Borman G. A., Boroson T. A., Brandt W. N., Breeveld A. A., Brewer B. J., Cackett E. M., Crenshaw D. M., Dalla Bontà E., De Lorenzo-Cáceres A., Dietrich M., Edelson R., Efimova N. V., Ely J., Evans P. A., Filippenko A. V., Flatland K., Gehrels N., Geier S., Gelbord J. M., Gonzalez L., Gorjian V., Grier C. J., Grupe D., Hall P. B., Hicks S., Horenstein D., Hutchison T., Im M., Jensen J. J., Jones J., Kaastra J., Kelly B. C., Kennea J. A., Kim S. C., Korista K. T., Kriss G. A., Lee J. C., Lira P., MacInnis F., Manne-Nicholas E. R., Mathur S., McHardy I. M., Montouri C., Musso R., Nazarov S. V., Norris R. P., Nousek J. A., Okhmat D. N., Pancoast A., Papadakis I., Parks J. R., Pei L., Pogge R. W., Pott J.-U., Rafter S. E., Rix H.-W., Saylor D. A., Schimoia J. S., Siegel M., Spencer M., Starkey D., Sung H.-I., Teems K. G., Treu T., Turner C. S., Uttley P., Villforth C., Weiss Y., Woo J.-H., Yan H., and Young S. Space Telescope and Optical Reverberation Mapping Project. III. Optical Continuum Emission and Broadband Time Delays in NGC 5548. *Astrophys. J.* 2016. Vol. 821, Is. 1. id. 56. DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/56
 27. 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: 10.1086/308177
 28. 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.
 29. Begelman M. C. Black holes in radiation-dominated gas: an analogue of the Bondi accretion problem. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1978. Vol. 184, Is. 1. P. 53–67. DOI: 10.1093/mnras/184.1.53
 30. Abramowicz M. A., Czerny B., Lasota J. P., and Szuszkiewicz E. Slim accretion disks. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 332. P. 646–658.
 31. Narayan R. and Yi I. Advection-dominated accretion: a self-similar solution. *Astrophys. J.* 1994. Vol. 428, Is. 1. P. L13–L16.
 32. Eggum G. E., Coroniti F. V., and Katz J. I. Radiation hydrodynamic calculation of super-Eddington accretion disks. *Astrophys. J.* 1988. Vol. 330, Is. 1. P. 142–167.
 33. Ohsuga K., Mineshige S., Mori M., and Umemura M. Does the slim-disk model correctly consider photon-trapping effects? *Astrophys. J.* 2002. Vol. 574, Is. 1. P. 315–324. DOI: 10.1086/340798
 34. Ohsuga K., Mori M., Nakamoto T., and Mineshige S. Supercritical accretion flows around black holes: two-dimensional, radiation pressure-dominated disks with photon trapping. *Astrophys. J.* 2005. Vol. 628. P. 368–381. DOI: 10.1086/430728
 35. Okuda T., Teresi V., Toscano E., and Molteni D. Black hole accretion discs and jets at super-Eddington luminosity. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2005. Vol. 357, Is. 1. P. 295–303. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08647.x
 36. 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
 37. 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

1. SHAKURA, N. I. and SUNYAEV, R. A., 1973. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astron. Astrophys.* vol. 24, pp. 337–355.
2. PRINGLE, J. E. and REES, M. J., 1972. Accretion disc models for compact X-ray sources. *Astron. Astrophys.* vol. 21, pp. 1–9.
3. 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 \equiv 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
4. ANGUIA, T., SCHMIDT, R. W., TURNER, E. L., WAMBSGANSS, J., WEBSTER, R. L., LOOMIS, K. A., LONG, D. and MCMILLAN, R., 2008. The multiple quasar Q2237+0305 under a microlensing caustic. *Astron. Astrophys.* vol. 480, pp. 327–334. DOI: 1051/0004-6361:20078221
5. 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
6. 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
 7. POOLEY, D., BLACKBURN, 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. DOI: 10.1086/512115
 8. 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
 9. JIMÉNEZ-VICENTE, J., MEDIAVILLA, E., MUÑOZ, J. A. and KOCHANÉK, C. S., 2012. A robust determination of the size of quasar accretion disks using gravitational microlensing. *Astrophys. J.* vol. 751, is. 2, id. 106. DOI: 10.1088/0004-637X/751/2/106
 10. MORGAN, C. W., KOCHANÉK, 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
 11. KROLIK, J. H., HORNE, K., KALLMAN, T. R., MALKAN, M. A., EDELSON, R. A. and KRIS, 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
 12. 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
 13. FAUSNAUGH, M. M., STARKEY, D. A., HORNE, K., KOCHANÉK, 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., 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/aaa2b
 14. 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
 15. BERDINA, L. A., TSVETKOVA, V. S. and SHULGA, V. M., 2018. Reverberation Responses in Light Curves of the Q2237+0305 Quasar. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 23, is. 4, pp. 235–243. (in Russian). DOI: 10.15407/rpra23.04.235
 16. 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).
 17. POINDEXTER, S. and KOCHANÉK, 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
 18. FRANK, J., KING, A. and RAINE, D. J., 2002. *Accretion Power in Astrophysics*. Third Edition. Cambridge: Cambridge University Press.
 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. KOCHANÉK, C. S., 2004. Quantitative interpretation of quasar microlensing light curves. *Astrophys. J.* vol. 605, is. 1, pp. 58–77. DOI: 10.1086/382180
 21. YEE, H. K. C. and DE ROBERTIS, M. M., 1991. Spatially resolved spectroscopy of Lyman-alpha and CIV in the gravitational lens 2237+030. *Astrophys. J.* vol. 381, is. 2, pp. 386–392. DOI: 10.1086/170661
 22. SLUSE, D., SCHMIDT, R., COURBIN, F., HUTSEMÉKERS, D., MEYLAN, G., EIGENBROD, A., ANGUIA, T., AGOL, E. and WAMBSGANSS, J., 2011. Zooming into the broad line region of the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 = the Einstein Cross. III. Determination of the size and structure of the CIV and CIII] emitting regions using microlensing. *Astron. Astrophys.* vol. 528, id. 100. DOI: 10.1051/0004-6361/201016110
 23. ASSEF, R. J., DENNEY, K. D., KOCHANÉK, C. S., PETERSON, B. M., KOZŁOWSKI, S., AGEORGES, N., BARROWS, R. S., BUSCHKAMP, P., DIETRICH, M., FALCO, E., FEIZ, C., GEMPERLEIN, H., GERMERTH, A., GRIER, C. J., HOFMANN, R., JUETTE, M., KHAN, R., KILIC, M., KNIERIM, V., LAUN, W., LEDERER, R., LEHMITS, M., LENZEN, R., MALL, U., MADSEN, K. K., MANDEL, H., MARTINI, P., MATHUR, S., MOGREN, K., MUELLER, P., NARANJO, V., PASQUALI, A., POLSTERER, K., POGGE, R. W., QUIRRENBACH, A., SEIFERT, W., STERN, D., SHAPPEE, B., STORZ, C., VAN SADERS, J., WEISER, P. and ZHANG, D., 2011. Black hole mass estimates based on CIV are consistent with those based on the Balmer lines. *Astrophys. J.* vol. 742, is. 2, id. 93. DOI: 10.1088/0004-637X/742/2/93
 24. EIGENBROD, A., COURBIN, F., SLUSE, D., MEYLAN, G. and AGOL, E., 2008. Microlensing variability in the gravitationally lensed quasar QSO 2237+0305 = the Einstein Cross . I. Spectrophotometric monitoring with the VLT. *Astron. Astrophys.* vol. 480, is. 3, pp. 647–661. DOI: 10.1051/0004-6361:20078703

25. MEDIAVILLA, E., JIMÉNEZ-VICENTE, J., MUÑOZ, J. A. and MEDIAVILLA, T., 2015. Resolving the innermost region of the accretion disk of the lensed quasar Q2237+0305 through gravitational microlensing. *Astrophys. J. Lett.* vol. 814, is. 2, id. L26. DOI: 10.1088/2041-8205/814/2/L26
26. FAUSNAUGH, M. M., DENNEY, K. D., BARTH, A. J., BENTZ, M. C., BOTTORFF, M. C., CARINI, M. T., CROXALL, K. V., DE ROSA, G., GOAD, M. R., HORNE, K., JONER, M. D., KASPI, S., KIM, M., KLIMANOV, S. A., KOCHANÉK, C. S., LEONARD, D. C., NETZER, H., PETERSON, B. M., SCHNÜLLE, K., SERGEEV, S. G., VESTERGAARD, M., ZHENG, W.-K., ZU, Y., ANDERSON, M. D., ARÉVAL, P., BAZHAW, C., BORMAN, G. A., BOROSON, T. A., BRANDT, W. N., BREEVELD, A. A., BREWER, B. J., CACKETT, E. M., CRENSHAW, D. M., DALLA BONTÀ, E., DE LORENZO-CÁCERES, A., DIETRICH, M., EDELSON, R., EFIMOVA, N. V., ELY, J., EVANS, P. A., FILIPPENKO, A. V., FLATLAND, K., GEHRELS, N., GEIER, S., GELBORD, J. M., GONZALEZ, L., GORJIAN, V., GRIER, C. J., GRUPE, D., HALL, P. B., HICKS, S., HORENSTEIN, D., HUTCHISON, T., IM, M., JENSEN, J. J., JONES, J., KAASTRA, J., KELLY, B. C., KENNEA, J. A., KIM, S. C., KORISTA, K. T., KRISS, G. A., LEE, J. C., LIRA, P., MACINNIS, F., MANNE-NICHOLAS, E. R., MATHUR, S., MCHARDY, I. M., MONTOURI, C., MUSSO, R., NAZAROV, S. V., NORRIS, R. P., NOUSEK, J. A., OKHMAT, D. N., PANCOAST, A., PAPADAKIS, I., PARKS, J. R., PEI, L., POGGE, R. W., POTT, J.-U., RAFTER, S. E., RIX, H.-W., SAYLOR, D. A., SCHIMOIA, J. S., SIEGEL, M., SPENCER, M., STARKEY, D., SUNG, H.-I., TEEMS, K. G., TREU, T., TURNER, C. S., UTTLEY, P., VILLFORTH, C., WEISS, Y., WOO, J.-H., YAN, H. and YOUNG, S., 2016. Space Telescope and Optical Reverberation Mapping Project. III. Optical Continuum Emission and Broadband Time Delays in NGC 5548. *Astrophys. J.* vol. 821, is. 1, id. 56. DOI: 10.3847/0004-637X/821/1/56
27. 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: 10.1086/308177
28. 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.
29. BEGELMAN, M. C., 1978. Black holes in radiation-dominated gas: an analogue of the Bondi accretion problem. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 184, is. 1, pp. 53–67. DOI: 10.1093/mnras/184.1.53
30. ABRAMOWICZ, M. A., CZERNY, B., LASOTA, J. P. and SZUSZKIEWICZ, E., 1988. Slim accretion disks. *Astrophys. J.* vol. 332, pp. 646–658.
31. NARAYAN, R. and YI, I., 1994. Advection-dominated accretion: a self-similar solution. *Astrophys. J.* vol. 428, is. 1, pp. L13–L16.
32. EGGUM, G. E., CORONITI, F. V. and KATZ, J. I., 1988. Radiation hydrodynamic calculation of super-Eddington accretion disks. *Astrophys. J.* vol. 330, is. 1, pp. 142–167.
33. OHSUGA, K., MINESHIGE, S., MORI, M. and UMEMURA, M., 2002. Does the slim-disk model correctly consider photon-trapping effects? *Astrophys. J.* vol. 574, is. 1, pp. 315–324. DOI: 10.1086/340798
34. OHSUGA, K., MORI, M., NAKAMOTO, T. and MINESHIGE, S., 2005. Supercritical accretion flows around black holes: two-dimensional, radiation pressure-dominated disks with photon trapping. *Astrophys. J.* vol. 628, pp. 368–381. DOI: 10.1086/430728
35. OKUDA, T., TERESI, V., TOSCANO, E. and MOLTENI, D., 2005. Black hole accretion discs and jets at super-Eddington luminosity. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* vol. 357, is. 1, pp. 295–303. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08647.x
36. 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
37. 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^{1,2}, V. S. Tsvetkova^{1,2}, and V. M. Shulga^{1,3}

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

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

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

EXTENDED SCATTERING ENVELOPE IN THE Q2237+0305 QUASAR

Purpose: Studying the accretion disc structure in the Q2237+0305 gravitationally lensed quasar in optical wavelengths; estimation of parameters of the matter accretion regime onto a central black hole.

Design/methodology/approach: Measuring the time delays between the quasar brightness variations in two spectral ranges allows to obtain direct estimates of distances between the quasar's zones, which radiate in the selected wavelengths (the reverberation mapping method).

Findings: New estimates of the time delays between the Q2237+0305 light curves in the R and V spectral bands have been obtained from the observations of 2004, as well as more accurate estimates for the light curves of the 2005 season reported earlier. The time delay value averaged over the two years is $\Delta t_{R-V} \approx 6.7 \pm 2.4$ days in the observer's coordinate system, or $\Delta t_{R-V} \approx 2.49 \pm 0.9$ days in the rest frame. With this delay, a distance between the accretion disk annular zones responsible for the radiation in V and R is $R_R - R_V = \Delta t_{R-V} \cdot c \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ cm. This indicates an accretion disk size far exceeding that one predicted by the standard thin accretion disc model by Shakura and Sunyaev. In this work, a suggestion is checked that thus large disk size can be a consequence of a super-critical (super-Eddington) accretion regime considered in the classical work by Shakura and Sunyaev, where the supercritical accretion regime has been shown

to results in formation of an extended optically thick scattering envelope on the disk periphery.

Conclusions: Analytical expressions for the radius and temperature of such an envelope derived by Shakura and Sunyaev have been used in this work to calculate the R_R and R_V envelope dimensions in the R and V spectral bands expected from the super-critical accretion regime scenario in the Q2237+0305 quasar. The calculations have been made for three values of the black hole mass covering the whole range of the existing estimates for Q2237+0305, from $M_{BH} = 2 \cdot 10^8 M_\odot$ to $M_{BH} = 20 \cdot 10^8 M_\odot$. The accretion rate was assumed to be $\dot{m} = 17$. The calculated envelope radii in spectral bands R and V are well consistent with the inter-band time delay value of 2.49 days obtained in the present work from the data of observations. Thus, it can be argued that the black hole in the Q2237+0305 quasar is accreting the matter in a moderately super-critical regime, which results in creating an extended optically thick scattering envelope, and this is just in this envelope that the reverberation responses examined in this work arise. Parameter α (efficiency of the angular momentum transport) is varying within 0.005 – 0.006 for the black hole minimal mass, and from 0.029 to 0.033 for the maximal one, while parameter A (ratio of the energy losses in Compton scattering to those in free-free transitions) is within 50 to 100.

Key words: quasar, black hole, accretion disk, reverberation mapping

Л. А. Бердіна^{1,2}, В. С. Цветкова^{1,2}, В. М. Шульга^{1,3}

¹Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

²НДІ Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

³Міжнародний центр науки майбутнього,
Цзілінський університет,
вул. Цяньцзинь, 2699, м. Чанчунь, 130012, Китай

ПРОТЯЖНА РОЗСІЮЮЧА ОБОЛОНКА В КВАЗАРІ Q2237+0305

Предмет і мета роботи: Вивчення структури акреційного диску гравітаційно лінзованого квазара Q2237+0305 в оптичному діапазоні; оцінка параметрів режиму акреції матерії на центральну чорну діру.

Методи і методологія: Вимірювання часу запізнення між коливаннями блиску квазара у двох спектральних діапазонах дозволяє одержувати прямі оцінки відстані між зонами квазара, що випромінюють у вибраних діапазонах (метод ревербераційного картування).

Результати: Отримано нові оцінки запізнення між кривими блиску в спектральних смугах R та V за результатами спостережень Q2237+0305 у 2004 р. та уточнено виміряні раніше запізнення за спостереженнями 2005 р. Середнє за двома роками значення часу запізнення складає $\Delta t_{R-V} \approx 6.7 \pm 2.4$ діб у системі координат спостерігача, або $\Delta \hat{t}_{R-V} \approx 2.49 \pm 0.9$ діб у системі координат джерела. Таке запізнення відповідає відстані між кільцевими зонами акреційного диску, що випромінюють у спектральних смугах V та R, яка дорівнює $R_R - R_V = \Delta \hat{t}_{R-V} \cdot c \approx 6.46 \cdot 10^{15}$ см. Це свідчить про розмір акреційного диску, який більш ніж на порядок перевищує значення, передбачене стандартною моделлю тонкого акреційного диску Шакури та Сюняєва (1973 р.). В роботі перевіряється припущення, що настільки великий розмір акреційного диску може бути наслідком надкритичного (над-еддінгтонівського) режиму акреції, розглянутого у класичній роботі Шакури та Сюняєва, де показано, що надкритичний режим акреції призводить до створення протяжної оптично щільної розсіюючої оболонки на периферії диска.

Висновок: Аналітичні вирази для радіуса та температури такої оболонки, отримані Шакурою та Сюняєвим, були використані в даній роботі для обчислення розмірів оболонки R_R та R_V в спектральних смугах R та V, очікуваних в рамках гіпотези про надкритичний режим акреції в квазарі Q2237+0305. Обчислення виконано для трьох значень маси чорної діри M_{BH} , які перекривають увесь діапазон наразі існуючих оцінок для Q2237+0305, від $M_{BH} = 2 \cdot 10^8 M_\odot$ до $M_{BH} = 20 \cdot 10^8 M_\odot$. Для швидкості акреції прийнято значення $\dot{m} = 17$. Обчислені значення радіусів оболонки у смугах R та V досить добре узгоджуються зі значенням запізнення 2.49 діб, отриманим у даній роботі за даними спостережень. Отже, можна стверджувати, що чорна діра в квазарі Q2237+0305 акреціює матерію у помірно надкритичному режимі, який спричиняє створення досить великої оптично щільної розсіюючої оболонки, у якій і виникають ревербераційні відгуки, що досліджувалися у даній роботі. При цьому діапазон змін параметру α (ефективність передачі кутового моменту) складає $0.005 \div 0.006$ для мінімальної маси чорної діри і $0.029 \div 0.033$ для максимальної при значеннях параметру A (відношення енергетичних втрат при комптонівському розсіюванні до втрат при вільно-вільних переходах) у діапазоні від 50 до 100.

Ключові слова: квазар, чорна діра, акреційний диск, ревербераційне картування

Стаття постуила в редакцію 10.07.2019