

УДК 524.7

Вариации блеска и цвета в гравитационно-линзовой системе Q2237+0305 по наблюдениям в 1997 и 1998 гг.

В. Н. Дудинов¹, В. Г. Вакулик¹, А. П. Железняк¹, В. В. Коничек¹,
И. Е. Синельников¹, В. С. Цветкова¹, А. А. Минаков², Б. П. Артамонов³,
В. В. Бруевич³, С. Н. Нуритдинов⁴, И. М. Хамитов⁴

¹Астрономическая обсерватория Харьковского университета
61002, Харьков, ул. Сумская 35

²Радиоастрономический институт НАН Украины
61002, Харьков, ГСП, ул. Червонопрапорна 4

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
119899, Москва, Университетский пр. 13

⁴Астрономический институт им. Улугбека
700052, Ташкент, ул. Астрономическая 33

Приводятся результаты двухлетних наблюдений известной гравитационно-линзовой системы Q2237+0305 (Крест Эйнштейна) на 1.5-м телескопе обсерватории на горе Майданак. Вклад этих наблюдений в существующие кривые блеска четырех компонентов квазара в полосе R, построенные на основании всех существующих наблюдений, составляет 12 дат в течение 133 дней в 1997 г. и 15 дат на протяжении 115 дней в 1998 г. Для трех ночей в 1997 г. и четырех в 1998 г. выполнены трехцветные наблюдения, позволившие сделать оценки относительных цветов V–I компонентов и проследить их поведение во времени путем сравнения с данными наблюдений предыдущих лет. Утверждается, что наблюдаемые временные вариации цветов компонентов являются значимыми. Обращается внимание на важность проведения регулярных многоцветных наблюдений системы Q2237+0305.

ВАРІАЦІЇ БЛИСКУ ТА КОЛЬОРУ В ГРАВІТАЦІЙНО-ЛІНЗОВІЙ СИСТЕМІ Q2237+0305 ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ 1997 ТА 1998 РР., Дудінов В. М., Вакулік В. Г., Железняк О. П., Конічек В. В., Синельников І. С., Цветкова В. С., Минаков А. О., Артамонов Б. П., Бруевич В. В., Нуритдинов С. Н., Хамитов І. М. — Надаються результати дворічних спостережень відомої гравітаційно-лінзової системи Q2237+0305 (Хрест Ейнштейна) на 1.5-м телескопі обсерваторії на горі Майданак. Внесок цих спостережень в криві блиску чотирьох компонентів квазару у смузі R складає 12 дат впродовж 133 діб у 1997 р. та 15 дат на протязі 115 діб у 1998 р. Для трьох ночей у 1997 р. та чотирьох у 1998 р. виконані триколірні спостереження, які дозволили зробити оцінки відносних кольорів V–I компонентів та простежити їхню поведінку шляхом порівняння з даними попередніх років. Стверджується, що часові варіації кольорів компонентів, які спостерігаються, є значущими. Звертається увага на

© В. Н. ДУДИНОВ, В. Г. ВАКУЛИК, А. П. ЖЕЛЕЗНЯК, В. В. КОНИЧЕК,
И. Е. СИНЕЛЬНИКОВ, В. С. ЦВЕТКОВА, А. А. МИНАКОВ, Б. П. АРТАМОНОВ,
В. В. БРУЕВИЧ, С. Н. НУРИТДИНОВ, И. М. ХАМИТОВ, 2000

важливість регулярних багатоколірних спостережень системи Q2237+0305.

BRIGHTNESS AND COLOUR VARIATIONS IN THE Q2237+0305 GRAVITATIONAL LENS SYSTEM FROM OBSERVATIONS OF 1997 AND 1998, by Dudinov V. N., Vakulik V. G., Zheleznyak A. P., Konichek V. V., Sinelnikov I. Ye., Tsvetkova V. S., Minakov A. A., Artamonov B. P., Bruevich V. V., Nuritdinov S. N., Hamitov I. M. — The results of two-year observations of the known Q2237+0305 gravitational lens system (Einstein Cross) with the Maidanak 1.5-meter telescope are presented. A contribution of these observations to the existing R lightcurves of four quasar components consists of 12 dates during 133 days in 1997, and of 15 dates during 115 days in 1998. Three-colour observations were fulfilled for three nights in 1997 and for four nights in 1998 which enabled to estimate the relative ($V-I$) colours of the components and to trace their behavior by comparing with the observing data of previous years. The observed colour variations are argued to be real. The importance of multicolour observations of the Q2237+0305 system is noticed.

ВВЕДЕНИЕ

Объект Q2237+0305 (Крест Эйнштейна) представляет собой изображение далекого квазара ($z = 1.695$), расщепленное гравитационным полем галактики с красным смещением $z = 0.039$ на четыре компонента, расположенные почти симметрично вокруг ядра галактики. Близость галактики к наблюдателю делает этот объект чрезвычайно перспективным для изучения событий микролинзирования, благодаря которым появляется возможность получать ценную информацию о характеристиках как линзы, так и квазара. Для галактики можно в принципе оценить пространственную плотность населения ее внутренних областей и характерные массы микролинз; для квазара появляется возможность изучения его пространственной структуры с чрезвычайно высоким угловым разрешением.

Высокая вероятность событий микролинзирования для системы Q2237 +0305 была предсказана в работе [8]. Уже в середине 1988 г. в системе было впервые отмечено событие микролинзирования [7]: компонент А быстро увеличил свой блеск почти на 0.4^m , вернувшись к исходному состоянию примерно в течение месяца. Интерпретации этого события посвящено несколько работ, в которых получены оценки угловых размеров квазара и массы объекта, вызвавшего это событие [3, 10, 13, 17, 18].

Дальнейшие наблюдения показали, что все четыре компонента постоянно изменяют блеск с временными масштабами от нескольких недель до нескольких лет. Опубликованные к настоящему времени наиболее подробные кривые блеска относятся к полосе R и охватывают период с 1986 по 1997 гг. [1, 11]. Несмотря на недостаточную продолжительность наблюдений (согласно [17] для получения достоверных статистических оценок требуются подробные кривые блеска длительностью не менее 100 лет), неоднократно делались попытки статистического анализа имеющихся данных [9, 19]. Основным результатом их следует считать оценку верхнего предела трансверсальной скорости галактики [18], важнейшего из неизвестных параметров при интерпретации кривых блеска микролинзирования, и наиболее вероятного диапазона масс, ответственных за наблюдаемые вариации блеска [9].

В данной работе представлены результаты двухлетних наблюдений Креста Эйнштейна на Майданаке. По сравнению с предыдущей публикацией [1], кривые блеска дополнены данными 1998 г. — 15 дат в полосе R на протяжении 115 дней. Приводятся также результаты фотометрии в

полосах V и I в 1997 г. (три даты) и в 1998 г. (четыре даты), которые позволили оценить относительные цвета компонентов. На основе опубликованных данных многоцветной фотометрии [11], а также оценок цвета [2, 12, 14, 20] прослежен характер временных вариаций цвета в системе.

НАБЛЮДЕНИЯ

Исходный наблюдательный материал был получен на 1.5-м телескопе АЗТ-22 Астрономического института им. Улугбека на горе Майданак, известной своими исключительно хорошими астроклиматическими условиями. При наблюдениях 1997 г. использовалась охлаждаемая жидким азотом ПЗС-камера Т1 800×800, любезно предоставленная профессором Д. Тарншеком из университета в Питтсбурге. Однако, как сообщалось в работе [1], эта камера имеет ряд особенностей, затрудняющих фотометрию компактных объектов со сложной пространственной структурой, характерным представителем которых является система Q2237+0305. Поэтому, начиная с 1998 г. часть наблюдений была выполнена с помощью ПЗС-камеры «Pictor-416». Обеспечивая лучшую внутреннюю сходимость результатов, эта камера имеет, однако, заметную нелинейность, приводящую в первую очередь к некоторому смещению абсолютной привязки. Тем не менее мы сочли целесообразным включить в настоящую публикацию некоторые предварительные результаты, полученные с камерой «Pictor-416», ввиду их важности для последующего анализа вариаций цвета в системе.

Наблюдения выполнялись в полосах, близких к стандартной цветовой системе $BVRI$, при масштабе $0.13''/\text{пкс}$ с камерой Т1 800×800 и $0.16''/\text{пкс}$ с камерой «Pictor-416». Из-за неудовлетворительной работы системы слежения телескопа АЗТ-22 экспозиции не превышали 3 мин. Для увеличения статистики изображения регистрировались сериями, от 5 до 20 кадров в серии. Характерный размер изображений звезд (величина FWHM) составлял $0.7\text{--}1''$. Кадры, полученные при худшем качестве, не обрабатывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИИ В ПОЛОСЕ R

Первая попытка объединить все данные по фотометрии системы Q2237+0305 была осуществлена в 1991 г. в работе [3], в которой изображения этой системы, полученные разными наблюдателями на разных телескопах, были профотометрированы по единой методике. Были построены кривые блеска всех компонентов системы в полосе r Ганна, охватывающие интервал времени с сентября 1986 до декабря 1989 гг. включительно.

В дальнейшем была предпринята попытка [6] проанализировать вариации блеска в системе путем построения так называемых «дифференциальных» кривых блеска компонентов, свободных, по утверждению авторов, от различий в спектральных полосах, способах стандартизации используемых наблюдательных данных и собственных вариаций блеска квазара. Помимо данных 1986—1989 гг., содержащихся в [3], использованы другие результаты, полученные в 1990 г. [4, 12, 16], в том числе самими авторами [6].

Дальнейшее существенное дополнение кривых блеска было сделано по результатам пятилетнего (1990—1994 гг.) мониторинга Креста Эйнштейна, выполненного на Северном оптическом телескопе большим коллективом наблюдателей из 10 астрономических институтов Западной Европы [11]. Наиболее обширный ряд данных был получен в полосе R — в работе приводятся значения R -блеска компонентов для 44 дат. В сентябре 1995 г. нами были выполнены наблюдения в полосах VRI на 1.5-м телескопе (Майданак) [16], и в 1999 г. были опубликованы результаты наблюдений

Таблица 1. Результаты фотометрии системы Q2237+0305 в полосе R; наблюдения 1998 г.

Дата	A	B	C	D
23.07.98	17.10±0.04	17.97±0.08	17.52±0.10	18.22± 0.12
26.07.98	17.08	17.82	17.43	18.12
28.07.98	17.14±0.02	18.00±0.02	17.63±0.06	18.32± 0.12
23.08.98	17.22±0.07	18.03±0.04	17.41±0.03	18.33± 0.06
24.08.98	17.18±0.02	18.05±0.04	17.39±0.03	18.30± 0.04
25.08.98	17.15±0.02	17.97±0.02	17.45±0.02	18.28± 0.04
26.08.98	17.15±0.03	18.00±0.04	17.45±0.03	18.38± 0.05
28.08.98	17.05	17.85	17.45	18.04
29.08.98	17.06	17.84	17.39	18.09
30.08.98	17.03	17.82	17.39	17.99
31.08.98	17.06	17.88	17.40	18.08
01.09.98	17.08	17.83	17.44	18.04
02.09.98	17.06	17.84	17.40	18.04
22.10.98	17.05	17.89	17.40	17.99
14.11.98	17.07±0.05	17.89±0.06	17.4±0.05	18.07± 0.08

1997 г. на г. Майданак — R-фотометрия для 12 дат на протяжении 133 дней [1].

В табл. 1 приведены звездные величины всех четырех компонентов в полосе R по наблюдениям 1998 г. на 1.5-м телескопе обсерватории на горе Майданак. Большинство наблюдений выполнены с помощью ПЗС-камеры TI 800×800. Для них приведены значения погрешности, которые вычислялись для каждой серии и каждого компонента как среднее квадратичное отклонение результатов измерения одиночных кадров от среднего по серии, деленное на корень квадратный из числа кадров в серии. Описание процедуры фотометрии можно найти в работе [1]. В таблице приведены также результаты наблюдений, выполненных с камерой «Pictor-416», для них оценки погрешности не приводятся, так как результаты могут быть отягощены систематической погрешностью, вызванной нелинейностью камеры, в то время как формальные ошибки, вычисленные описанным выше способом, оказываются для нее заметно меньше.

На рис. 1 можно видеть поведение блеска четырех компонентов в течение 1997 [1] и 1998 гг. (см. данные, полученные с камерой TI 800×800, табл. 1). На рис. 2 приведена кривая блеска в полосе R, взятая из [1, 11] и дополненная результатами настоящей работы. Наиболее заметные события в системе в течение последних лет — значительное (почти на 0.8^m)

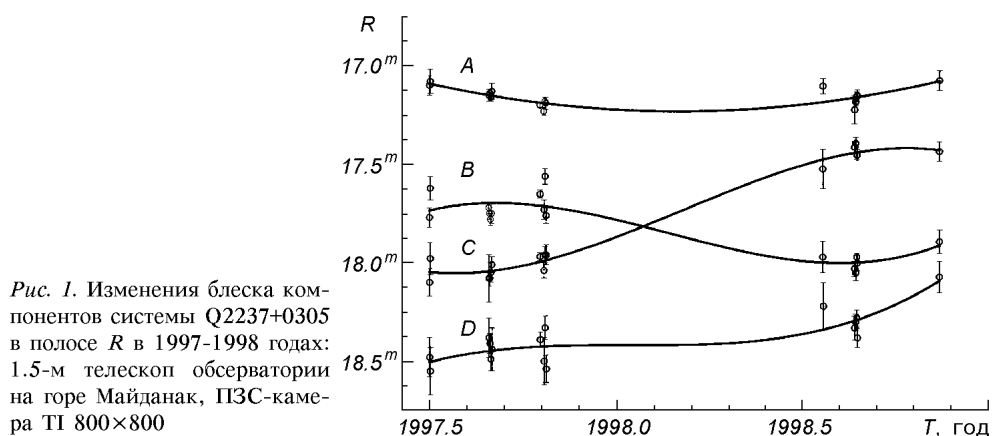


Рис. 1. Изменения блеска компонентов системы Q2237+0305 в полосе R в 1997-1998 годах: 1.5-м телескоп обсерватории на горе Майданак, ПЗС-камера TI 800×800

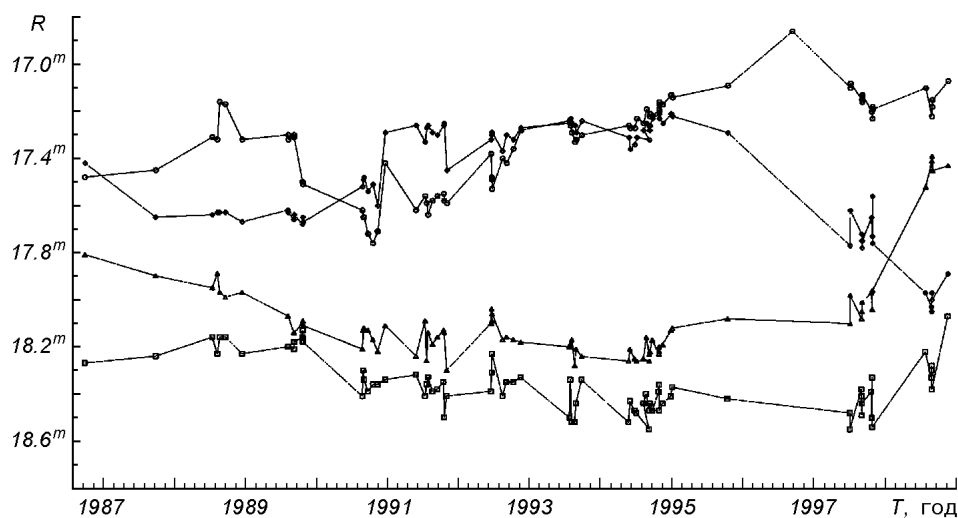


Рис. 2. Кривые блеска компонентов системы Q2237+0305 в полосе R, построенные на основе [1, 3, 11] и результатов настоящей работы

ослабление блеска компонента В, начавшееся, по-видимому, еще в конце 1995 г. и прекратившееся в конце 1998 г., и, что более интересно, резкий всплеск яркости компонента С, практически на 1^m в течение года. В 1998 г., впервые за историю наблюдений этой системы, компонент С стал ярче В. Можно отметить также увеличение блеска компонента D, долгое время остававшегося почти неизменным, хотя следует отметить, что результат за последнюю дату представляется нам менее уверенным, так как изображения были получены при масштабе $0.268''/\text{пкс}$.

В настоящее время основное внимание при выполнении наблюдательных программ уделяется длительному мониторингу системы с целью получения надежных и подробных кривых блеска. Многоцветная фотометрия, к сожалению, выполняется относительно редко. В следующем разделе приводятся результаты фотометрии системы Q2237+0305 в полосах VRI и сделанные на их основе оценки относительных цветов компонентов и их поведения во времени.

АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ЦВЕТА

Уже первые многоцветные наблюдения системы, проведенные в 1987 г. в фотометрической системе *gri*, [20], показали, что цвета компонентов различаются. Тот факт, что покраснения компонентов обнаруживали явную зависимость от их расстояний до ядра линзирующей галактики, позволил автору этой работы объяснить различие цветов селективным поглощением веществом галактики. Однако наблюдения, выполненные в конце 1990 г. на Космическом телескопе им. Хаббла, показали, что цвета компонентов, возможно, изменились [14]. Были предложены два объяснения этому явлению: либо поглощение пылью изменяется во времени, либо при микролинзировании проявляется зависимость эффективного размера источника от длины волны. Второе предположение было высказано в 1991 г. в работе [17].

Аргументом в пользу последнего предположения можно считать результаты наблюдений в континууме в полосе V и в фильтре, вырезающем широкую эмиссионную линию $\lambda 1909 C_{III}$, смещенную к $\lambda 514.5$ нм [12].

Наблюдения были выполнены на канадско-франко-гавайском телескопе 10 октября 1991 г., когда, согласно предыдущим наблюдениям [3, 10, 14], происходило значительное усиление блеска компонента В в континууме. По измерениям [12], усиление в линии S_{III} было заметно меньше, как и должно быть при микролинзировании, если источник излучения в широких эмиссионных линиях имеет большие размеры, чем источник континуума. Аналогичные результаты были получены в сентябре этого же года при спектральных наблюдениях на этом же телескопе [5], и при наблюдениях в фильтре V и узкополосном фильтре, центрированном на линию S_{III} , выполненных на 1.5-м датском телескопе в Ла-Силье [15].

Авторы работы [11], в которой представлены результаты первого наиболее длительного и подробного мониторинга системы в 1990—1994 гг., в том числе и в полосах VRI , не обсуждают вопроса о поведении цветов компонентов, отмечая лишь примерное равенство показателей цвета $V-R$ и $R-I$ для пары компонентов А и В, а также для пары С и D. Они отмечают также примерное соответствие покраснений для этих пар закону поглощения, полученному в работе [10].

Очередная информация о поведении относительных цветов компонентов была получена из многоцветных наблюдений, выполненных на 1.5-м телескопе обсерватории на горе Майданак [16] и на 2.56-м Северном оптическом телескопе [2] осенью 1996 г. Эти данные определенно подтвердили наличие цветовых изменений в системе Q2237+0305.

При планировании программы наблюдений в 1997—1998 гг. на г. Майданак предполагалось уделить серьезное внимание многоцветным наблюдениям. К сожалению, в силу ряда объективных причин наблюдения в трех фильтрах оказались не столь многочисленными, как этого хотелось бы.

В табл. 2 представлены результаты фотометрии компонентов системы в полосах VRI . Как и в табл. 1, оценки погрешностей приводятся только для измерений с камерой TI 800×800. Из-за отмеченной выше сложности получения уверенных оценок абсолютных цветов компонентов, будем, аналогично [14] и [20], использовать относительные цвета компонентов,

Таблица 2. Оценки блеска компонентов Q2237+0305 в полосах VRI

Дата	А	В	С	Д	Полоса
29.08.97	16.96±0.03	17.60±0.04	17.81±0.04	18.15±0.07	<i>I</i>
29.08.97	17.15±0.03	17.72±0.03	18.08±0.12	18.38±0.10	<i>R</i>
29.08.97	17.43±0.03	17.95±0.05	18.42±0.05	18.78±0.07	<i>V</i>
30.08.97	16.89±0.02	17.55±0.04	17.72±0.03	18.11±0.06	<i>I</i>
30.08.97	17.14±0.02	17.75±0.03	18.08±0.04	18.41±0.05	<i>R</i>
30.08.97	17.40±0.03	17.94±0.04	18.35±0.05	18.79±0.06	<i>V</i>
01.09.97	16.93±0.03	17.61±0.04	17.83±0.04	18.19±0.09	<i>I</i>
01.09.87	17.13±0.04	17.75±0.05	18.01±0.04	18.44±0.11	<i>R</i>
01.09.87	17.47±0.05	18.01±0.07	18.38±0.06	18.91±0.09	<i>V</i>
26.07.98	16.92	17.71	17.32	17.87	<i>I</i>
26.07.98	17.08	17.82	17.43	18.12	<i>R</i>
26.07.98	17.30	18.11	17.66	18.52	<i>V</i>
28.07.98	16.93±0.04	17.72±0.05	17.47±0.05	17.82±0.06	<i>I</i>
28.07.98	17.14±0.02	18.00±0.02	17.63±0.06	18.32±0.12	<i>R</i>
28.07.98	17.44±0.03	18.23±0.03	17.78±0.03	18.64±0.05	<i>V</i>
23.08.98	17.09±0.04	17.73±0.03	17.04±0.04	18.14±0.20	<i>I</i>
23.08.98	17.22±0.07	18.03±0.04	17.41±0.03	18.33±0.06	<i>R</i>
23.08.98	17.52±0.02	18.23±0.02	17.77±0.04	18.84±0.07	<i>V</i>
14.11.98	16.94±0.03	17.79±0.05	17.44±0.03	17.92±0.06	<i>I</i>
14.11.98	17.07±0.05	17.89±0.06	17.43±0.05	18.07±0.08	<i>R</i>
14.11.98	17.34±0.05	18.28±0.05	17.65±0.06	18.48±0.11	<i>V</i>

Таблица 3. Изменение относительных показателей цвета V-I компонентов системы Q2237+0305 по данным наблюдений 1997 и 1998 гг.

Дата	A	B	C	D
29.08.97	0.00	-0.12	0.14	0.16
30.08.97	0.00	-0.12	0.12	0.17
01.09.97	0.00	-0.14	0.11	0.18
26.07.98	0.00	0.02	-0.04	0.27
28.07.98	0.00	0.00	-0.20	0.30
23.08.98	0.00	0.07	-0.06	0.27
14.11.98	0.00	0.09	-0.19	0.16

вычисленные по отношению к самому яркому компоненту A, и проследим их поведение во времени, сравнивая между собой результаты, полученные разными авторами в различные эпохи. В отличие от абсолютных цветов, оценки относительных цветов менее чувствительны к различиям используемых фотометрических систем, и их можно использовать для качественного анализа и сравнения даже при отличающихся цветовых базах.

В табл. 3 приводятся относительные цвета компонентов на базе V-I, вычисленные на основании данных табл. 2. Данные табл. 3 позволяют утверждать, что наблюдаемые изменения относительных цветов компонентов реальны, по крайней мере для компонентов B и C. Отмечается явная тенденция к покраснению компонента B с уменьшением его блеска в 1998 г. (см. рис. 1), и смещение цвета компонента C в синюю сторону, сопровождающее резкое увеличение его блеска в 1998 г., описанное в предыдущем разделе.

Воспользуемся отмеченной выше слабой чувствительностью относительных показателей цвета к различию фотометрических систем и цветовых баз и попытаемся проследить поведение этой величины на более длительном промежутке времени, основываясь на имеющихся данных других наблюдателей.

Результаты можно видеть в табл. 4, где приведены эпоха наблюдений, ссылка на соответствующую публикацию и цветовая база. Приведенные данные позволяют утверждать, что в системе Q2237+0305 изменяется не только блеск компонентов, но и их цвет. К сожалению, имеющийся материал не позволяет выполнить количественный анализ поведения цветов компонентов во времени и проследить, например, зависимость между блеском линзированных компонентов квазара и их цветом. Иногда можно отметить некоторую качественную зависимость типа «ярче—голубее». Примером может служить период с 1987 по 1990 гг., когда компонент A был

Таблица 4. Вариации относительных показателей цвета в системе Q2237+0305, все доступные данные

Эпоха	Литературный источник	База	A	B	C	D
1987	[20]	<i>g-i</i>	0.00	0.08	0.33	0.19
1990	[14]	<i>U-R</i>	0.00	0.03	0.24	0.42
1991	[11]	<i>V-I</i>	0.00	-0.08	0.31	0.18
1994	[11]	<i>V-I</i>	0.00	-0.05	0.25	0.18
1995	[2]	<i>V-I</i>	0.00	-0.08	0.12	0.15
1995	[16]	<i>V-I</i>	0.00	-0.12	0.23	0.08
1996	[11]	<i>V-I</i>	0.00	0.04	0.26	0.13
1997	[Настоящая работа]	<i>V-I</i>	0.00	-0.12	0.09	0.14
1998	[Настоящая работа]	<i>V-I</i>	0.00	0.04	-0.12	0.25

самым ярким в системе и самым голубым, (см. рис. 2). Утратив в 1990 гг. статус самого яркого компонента, он перестал быть и наиболее голубым. Другой пример — поведение блеска и цвета компонентов В и С в 1997—1998 годах, уже упоминавшееся выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система Q2237+0305 (Крест Эйнштейна) является одной из наиболее интересных систем, порожденных феноменом гравитационного линзирования. Будучи, по-видимому, малоперспективной для измерений постоянной Хаббла, она представляет исключительный интерес для изучения явлений микролинзирования. Несмотря на интенсивные исследования в течение более чем двенадцати лет, прошедшие с момента ее идентификации как гравитационной линзы, объем накопленных данных недостаточен для получения достоверных оценок статистических характеристик кривых блеска, необходимых для физической интерпретации событий микролинзирования. Изложенные в данной работе результаты являются очередной добавкой к постоянно пополняющейся базе данных по этому объекту.

Мы хотели бы также привлечь внимание исследователей к относительно слабо изученному явлению — временным вариациям цветов компонентов, анализ которых может быть эффективным ключом к пониманию процессов, происходящих в этой системе, и к оценке важнейших физических характеристик как линзирующей галактики, так и квазара.

Исследования, изложенные в настоящей публикации, выполнены благодаря поддержке Фонда гражданских исследований и развития (CRDF) для независимых государств бывшего Советского Союза, грант N UP2-302. Мы благодарны координатору проекта, профессору Б. Пачиньскому, а также профессору Д. Тарншеку за возможность использовать ПЗС-камеру TI 800×800. Мы благодарны за поддержку работы грантами РФФИ 98-02-17490 и «Астрономия. Фундаментальные исследования», 1.2.5.5, а также совместной узбекско-украинской программой «Развитие наблюдательной базы оптической астрономии на горе Майданак».

1. Блюх П. В., Дудинов В. Н., Вакулик В. Г. и др. Система Q2237+0305 (Крест Эйнштейна) по наблюдениям 1997 года на горе Майданак // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 4.—С. 338—349.
2. Burud I., Stabell R., Magain P., et al. Three photometric methods tested on ground-based data of Q2237+0305 // Astron. and Astrophys.—1998.—339, N 3.—P. 701—708.
3. Corrigan R. T., Irwin M. J., Arnaud J., et al. Initial lightcurve of Q2237 +0305 // Astron. J.—1991.—102, N 1.—P. 34—40.
4. Crane P., Albrecht R., Barbieri C., et al. First results from the faint object camera: images of gravitational lens system Q2237+0305 // Astrophys. J.—1991.—369, N 2.—P. L59—L61.
5. Fitte C., Adam G. Sub-arcsecond integral field spectroscopy of the Einstein Cross 2237+0307: lensing and microlensing effects // Astron. and Astrophys.—1994.—282, N 1.—P. 11—18.
6. Houde M., Racine R. Image restoration and photometric monitoring of the gravitational lens Q2237+0305 // Astron. J.—1994.—107, N 2.—P. 466—456.
7. Irwin M. J., Webster R. L., Hewett P. C., et al. Photometric variations in the Q2237+0305 system: first detection of a microlensing event // Astron. J.—1989.—98, N 6.—P. 1989—1995.
8. Kayser R., Refsdal S. Detectability of gravitational microlensing in the quasar QSO2237+0305 // Nature.—1989.—338, N 6218.—P. 745—749.
9. Lewis G. F., Irwin M. J. The statistics of microlensing light curves. II. Temporal analysis // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1996.—283, N 11.—P. 225—240.
10. Nadeau D., Yee H. K. C., Forrest W. J., et al. Infrared and visible photometry of the gravitational lens system 2237+030 // Astrophys. J.—1991.—376, N 2.—P. 430—438.
11. Ostensen R., Refsdal S., Stabell R., et al. Monitoring of the einstein cross with the nordic optical telescope // Astron. and Astrophys.—1996.—309, N 1.—P. 59—64.
12. Racine R. Continuum and C_{III} microlensing in Q2237+0305 and the quasar geometry // Astrophys. J.—1992.—395, N 6.—P. L65—L67.

13. *Refsdal S., Stabell R.* Gravitational microlensing variability caused by small masses // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**278**, N 1.—P. L5—L11.
14. *Rix H.-W., Schneider D. P., Bachcall J. N.* Hubble space telescope camera imaging of the gravitational lens 2237+0305 // *Astron. J.*—1992.—**104**, N 3.—P. 959—960.
15. *Saust A. B.* Determining the size of the emission line region in Q2237 +0301 from microlensing // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—**103**.—P. 33—37.
16. *Vakulik V. G., Dudinov V. N., Zheleznyak A. P., et al.* VRI photometry of the Einstein Cross Q2237+0305 at Maidanak Observatory // *Astron. Nachr.*—1997.—**318**, N 2.—P. 73—80.
17. *Wambsganss J., Paczynski B., Schneider P.* Interpretation of the micro-lensing event in QSO 2237+0305 // *Astrophys. J.*—1990.—**358**, N 2.—P. L33—L41.
18. *Webster R. L., Ferguson A. M. N., Corrigan R. T., Irwin M. J.* Interpreting the lightcurve of Q2237+0305 // *Astron. J.*—1991.—**102**, N 6.—P. 1939—1945.
19. *Wyithe J. S. B., Webster R. L., Turner E. L.* A measurement of the transverse velocity of Q2237+0305 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1999.
20. *Yee H. K. C.* High-resolution imaging of the gravitational lens system candidate 2237+0305 // *Astron. J.*—1988.—**95**, N 5.—P. 1331—1339.

Поступила в редакцию 26.05.00