

Гравитационно-линзовая система Q2237+0305 в 2001–2008 гг.: результаты наблюдений на горе Майданак

В. Н. Дудинов^{1,2}, Г. В. Смирнов¹, В. Г. Вакулик^{1,2}, А. В. Сергеев^{1,2}, А. Е. Кочетов^{1,2}

¹НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,
ул. Сумская, 35, г. Харьков, 61022, Украина

²Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

E-mail: vladimir_dudinov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2010 г.

Представлены результаты многоцветной фотометрии изображений гравитационно-линзовой системы Q2237+0305, полученных в 2001–2008 гг. с помощью 1.5-метрового телескопа АЗТ-22 (гора Майданак, Узбекистан). Приводится краткое описание использованного метода фотометрии. Сравнение результатов нашей фотометрии с данными программы OGLE позволило получить редуцированное соотношение между этими рядами данных. Выполнены оценки погрешностей фотометрии и показано, что погрешность фотометрии OGLE оказывается лишь немного меньше погрешностей наших измерений. Получены количественные оценки соотношения между вариациями блеска в системе Q2237+0305, обусловленными отдельно событиями микролинзирования и внутренней переменностью источника.

1. Введение

Объект Q2237+0305, открытый в 1984 г. [1] и получивший название Крест Эйнштейна, представляет собой квазар (с красным смещением $z = 1.695$), линзированный спиральной галактикой ($z = 0.039$), гравитационное поле которой расщепляет изображение квазара на четыре компонента (рис. 1). Поскольку линзирующая галактика лежит практически на луче зрения между квазаром и наблюдателем, компоненты располагаются почти симметрично вокруг ядра в радиусе всего около $1''$. Временная задержка между вариациями блеска квазара, наблюдаемыми в отдельных линзированных изображениях, составляет всего несколько часов, что было подтверждено нами непосредственно при анализе результатов наблюдений 2003 г. [2].

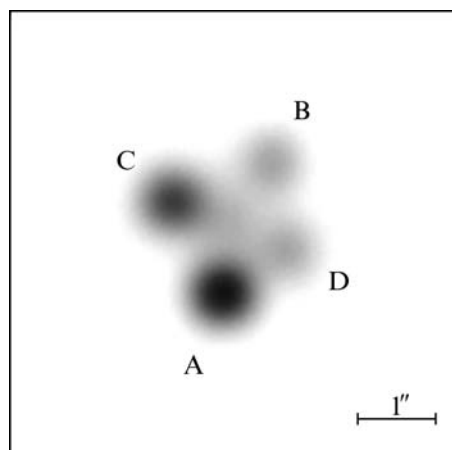


Рис. 1. Изображение гравитационно-линзовой системы Q2237+0305

Относительные положения компонентов гравитационно-линзовой системы (ГЛС) определяются глобальным полем галактики и считаются неизменными в течение всего периода наблюдений этой системы. Измеряемой величиной являются временные флуктуации блеска компонентов квазара, получаемые в различных спектральных диапазонах.

Близость линзирующей галактики к наблюдателю и тот факт, что компоненты квазара наблюдаются сквозь среду центральной области линзирующей галактики, делают эту систему весьма перспективной для изучения проявлений эффекта микролинзирования, т. е. короткопериодических изменений блеска отдельных компонентов, вызванных линзированием отдельными звездами либо субзвездными объектами.

Анализ проявлений эффекта гравитационного микролинзирования достаточно сложен. Излучение от удаленного на космологическое расстояние квазара, проходя через неоднородное поле тяготения галактики, созданное дискретной структурой гравитирующих масс, расположенных в объеме галактики, претерпевает переменное усиление, зависящее от характерной массы микролинз, а также от углового размера квазара. Таким образом, кривые блеска микролинзированных компонентов ГЛС содержат в себе информацию как об источнике – квазаре, так и о линзе – галактике.

Благодаря сравнительно высокой яркости и большой частоте событий микролинзирования, системе Q2237+0305, по сравнению с другими гравитационными линзами, уделено наибольшее число наблюдений, результаты которых используются зачастую как тестовые для проверки различных моделей гравитационного линзирования.

С 1986 по 1991 г. разными наблюдателями была проведена первая серия измерений блеска отдельных компонентов этой системы. Наблюдения проводились в нескольких обсерваториях, наибольшая часть изображений была получена на 3.6-метровом Канадско-франко-гавайском телескопе (CFHT). Наблюдения велись в основном в полосах В и R, а также в фильтре г системы Ганна [3, 4]. С 1991 по 1998 г. регулярный мониторинг проводился на 2.56-метровом

Северном оптическом телескопе (NOT), расположенном на о. Ла Пальма (Испания) [5]. С октября 1999 г. по февраль 2000-го на этом же телескопе наблюдения проводились в рамках международной программы GLITP (Gravitational Lenses International Time Project) в полосах V и R [6].

Наиболее подробный мониторинг системы Q2237+0305 с 1997 г. проводится по программе OGLE, основной задачей которой является поиск эффектов микролинзирования в Магеллановых облаках и балдже Галактики. Наблюдения Q2237+0305 ведутся с помощью 1.3-метрового телескопа Варшавского университета, расположенного в обсерватории Лас Кампанас (Чили), лишь в одной полосе V [7].

Регулярные многоцветные наблюдения ГЛС Q2237+0305 с помощью 1.5-метрового телескопа АЗТ-22, расположенного на горе Майданак (Узбекистан), ведутся международным коллективом наблюдателей из Узбекистана, России и Украины с 1997 г. В настоящей статье представлены результаты фотометрии (доступны в сети Интернет на сайте НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина <<http://astron.kharkov.ua/dip/qso2237.htm>>) изображений ГЛС Q2237+0305, полученных с 2001 по 2008 г. в фильтрах V, R и I.

2. Условия и методика наблюдений Q2237+0305 на горе Майданак

Высокогорная обсерватория, расположенная на горе Майданак на высоте 2600 м над уровнем моря, известна высоким качеством астроклимата, которое позволяет вести наблюдения на протяжении более 200 ночей в году с угловым разрешением лучших обсерваторий мира [8]. По замыслу разработчиков 1.5-метровый телескоп АЗТ-22 не должен был вносить заметных aberrаций, обеспечивая реальное разрешение, обусловленное астроклиматом горы Майданак. Согласно цеховым испытаниям телескопа не менее 80 % энергии точечного источника концентрируется в кружке рассеяния не более чем 0.3" [9]. Телескоп установлен в башне высотой 20 м. Для выравнивания температуры подкупольного помещения с температурой окружающей среды баш-

ня телескопа оборудована мощной вытяжной вентиляцией. Медианное значение ширины распределения яркости изображения звезды на половине его максимального значения (FWHM), полученное для Майданакской обсерватории с помощью Differential Image Motion Monitor (DIMM), составляет $0.69''$ [8]. По оценкам реальных изображений среднее значение FWHM изображения звезды, полученное с помощью 1.5-метрового телескопа, составляет около $1''$ и может достигать $0.6''$ при наилучших атмосферных условиях.

Для наблюдений в 2001–2006 гг. и частично в 2008 г. использовалась камера BroCam, оборудованная системой охлаждения жидким азотом. Камера была изготовлена в Копенгагенском университете на основе ПЗС-матрицы SITe ST-005A (2000×800 пикселей) с размером пикселя 15 мкм. Для наблюдений с 2006 по 2008 г. использовалась камера SNU4kCAM (4080×4080 пикселей) с размером пикселя 15 мкм, изготовленная для Сеульского национального университета на основе ПЗС-чипа производства компании Fairchild Imaging. Основная часть наблюдений в 2001–2008 гг. проводилась в фокусе системы квази-Ричи-Кретьюна со светосилой $1/8$ без корректора аберраций при масштабе изображения 0.266 угловой секунды на пиксель. Угол поля зрения камеры BroCam составлял $8.7' \times 3.5'$ и камеры SNU4kCAM – $18.1' \times 18.1'$.

До октября 2006 г. система ведения телескопа не позволяла получать изображения с приемлемым качеством при экспозициях, превышающих 3 мин. Поэтому изображения ГЛС Q2237+0305 получались сериями от 4 до 12 кадров, длительность экспозиции каждого кадра составляла 180 с. Количество кадров в серии определялось качеством атмосферы, а также зависело от количества спектральных фильтров, в которых проводились наблюдения в данную ночь. В сентябре 2005 г. была улучшена юстировка телескопа, а в октябре 2006 г. установлена система автоматического слежения, которая позволила снять ограничения на длительность экспозиции. Это дало возможность увеличить экспозицию, получить большее значение отношения сигнал/шум и в конечном счете повысить точность фотометрии.

Наибольшее количество изображений ГЛС Q2237+0305 за этот период было получено в полосе R (всего более 300 ночей). Многоцветные наблюдения в фильтрах V, R и I фотометрической системы Джонсона–Козинса проводились при высоком качестве атмосферы (FWHM опорной звезды меньше $1''$) и составили всего около 100 ночей. Наблюдения в полосе V позволяют сравнить результаты нашей фотометрии с результатами, полученными в рамках проекта OGLE в тот же период времени. Так как частота событий микролинзирования в системе Q2237+0305 весьма высока, мы старались проводить наблюдения каждые 2–3 дня, если позволяли погодные условия.

3. Метод фотометрии

Измерение блеска четырех компонентов квазара, расположенных на фоне быстро убывания яркости вблизи ядра галактики, является непростой задачей. Как уже указывалось ранее, изображения четырех компонентов квазара, расположенных в круге радиусом всего около $0.9''$, накладывается прямо на центральную область галактики, обладающую крутым градиентом яркости. Даже при наилучшем разрешении $\sim 0.4'' \div 0.5''$, которое может быть получено наземным телескопом, изображения компонентов частично перекрываются друг с другом и ярким ядром галактики. Оценки блеска компонентов квазара, полученные в рамках разных наблюдательных программ, систематически различаются. Особенно существенны эти различия для двух наиболее слабых и наиболее близких к ядру галактики компонентов C и D [10, 11]. Объяснить это можно отличием принятой априорной информации и способов ее задания, которые положены в основу различных алгоритмов обработки исходных изображений. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Все существующие алгоритмы фотометрии используют информацию о том, что распределение яркости по галактике остается постоянным в течение всего времени наблюдения ГЛС Q2237+0305, а угловой размер компонентов квазара значительно меньше дифракционного разрешения телескопа. Поскольку компоненты квазара в оптическом диапазоне заведомо

не разрешаются, распределение яркости в изображении каждого отдельного компонента представляют функцией рассеяния точки (ФРТ), определяемой реальным разрешением телескопа. Оценку ФРТ получают по распределению яркости в изображении изолированной звезды, находящейся в одном кадре с ГЛС Q2237+0305.

Общий подход к фотометрии подобных систем состоит в получении оценок яркости компонентов квазара в результате минимизации функционала

$$\int \left[g(x, y) \otimes \left\{ f_{\Gamma}(x, y) + \sum_{i=1}^4 a_i \delta(x - x_i, y - y_i) \right\} - F(x, y) \right]^2 dx dy = \min,$$

где $F(x, y)$ – изображение ГЛС, полученное с помощью телескопа; a_i – искомое значение яркости i -го компонента, а (x_i, y_i) – его неизвестные координаты; $g(x, y)$ – оценка ФРТ, т. е. распределение яркости в изображении опорной звезды, полученное одновременно с изображением объекта; $f_{\Gamma}(x, y)$ – истинное распределение поверхностной яркости по галактике; \otimes – обозначает операцию свертки. Функция $f_{\Gamma}(x, y)$ формально должна описывать распределение яркости по галактике при неограниченном разрешении телескопа. Эта функция может быть задана как функция неизвестных параметров только при произвольном конечном разрешении телескопа. Чтобы исключить неопределенность, связанную с моделью галактики, для фотометрии ГЛС разрабатываются специальные методы и алгоритмы, цель которых – обеспечить несмещенные оценки блеска отдельных компонентов квазара и самого ядра галактики. Косвенным критерием правильности учета распределения яркости по галактике может служить независимость измеренных оценок блеска компонентов квазара от реального разрешения полученного изображения.

Для обработки результатов наблюдений ГЛС Q2237+0305, представленных в настоящей работе, мы использовали алгоритм, разработанный и уже успешно применявшийся нами ранее для обработки результатов наблюдений этого

объекта в 2000 г. [11]. В этом алгоритме модель распределения яркости по галактике задавалась аналитически в виде суммы трех двумерных гауссовых функций. Задавались также относительные координаты компонентов квазара. Оценки этих параметров были рассчитаны по серии изображений Q2237+0305, полученных в 2000 г. при наилучших атмосферных условиях. Поскольку ФРТ каждого из полученных изображений может значительно отличаться вследствие различного качества атмосферных условий и ошибок ведения телескопа, все изображения приводились к одной ФРТ. Для этого сначала для всех изображений была выполнена обратная свертка с оценкой ФРТ, полученной по опорной звезде, а затем свертка с некоторой “стандартной” ФРТ, задаваемой функцией Гаусса с $\text{FWHM} = 0.9''$.

Оценки блеска компонентов далее получались путем минимизации квадрата разности между восстановленным изображением ГЛС и фотометрической моделью системы, включающей модель распределения яркости по галактике и сумму четырех модельных ФРТ с переменными амплитудами, но фиксированными положениями, соответствующими координатам компонентов ГЛС. В качестве опорной звезды для получения оценки ФРТ была использована звезда, расположенная на расстоянии около $1'$ от объекта и обозначенная в работе [3] как α . Эта же звезда использовалась нами в качестве вторичного фотометрического стандарта. Ее блеск в полосе V, согласно [12], был принят равным 17.50^m , в полосе R – 17.28^m , и в полосе I – 17.26^m .

Кадры с низким разрешением ($\text{FWHM} > 1.4''$) или обладающие дефектом изображения объекта либо опорной звезды из дальнейшей обработки исключались. Результаты фотометрии одиночных изображений, полученных в течение одной ночи, усреднялись.

Наиболее регулярные наблюдения Q2237+0305 с 1997 г. проводятся по программе OGLE. Для обработки изображений данной системы в рамках этой программы используется метод дифференциальной фотометрии [7], изначально разработанный авторами работы [13] для обнаружения эффектов микролинзирования в Магеллановых облаках и балдже Галактики. Этот метод основан на предположении о том, что при точном совмещении по координатам двух

изображений звездного поля их распределения яркостей будут совпадать с точностью до фона, если ФРТ обоих изображений одинаковы. При вычитании согласованных по разрешению изображений в разностном кадре должна оставаться только переменная часть распределения яркости, т. е. только изображения объектов, изменивших свою яркость. Фотометрия разностных изображений дает переменную часть интегральной яркости. Информацию о полной яркости получают калибровкой референтного кадра, являющегося результатом усреднения кадров, полученных при наилучших атмосферных условиях. Преимущество метода состоит в том, что он обеспечивает лучшую внутреннюю сходимость оценок блеска компонентов, однако при этом может вносить в них неизвестную ошибку калибровки референтного кадра.

В настоящей работе не ставилась задача детального сравнения алгоритмов обработки, используемых для фотометрии изображений гравитационно-линзированных квазаров. Основной целью было проведение сравнительного анализа результатов применения двух описанных

алгоритмов к обработке изображений такого непростого объекта, каким является Q2237+0305. В следующем разделе будут приведены результаты наблюдений, проводившихся в 2001–2008 гг. на горе Майданак, анализ их погрешностей, а также сравнение с данными, полученными в тот же период времени в рамках программы OGLE.

4. Результаты фотометрии изображений Q2237+0305, полученных с 2001 по 2008 г.

Основная часть наблюдений Q2237+0305 проводилась нами в полосе R. Кривые блеска, полученные в результате фотометрии изображений этой системы, приведены на рис. 2. Наиболее регулярные ряды данных были получены в 2003–2008 гг. Из самых интересных событий за период с 2001 по 2008 г. можно отметить резкое увеличение блеска компонента B, на 0.5^m , начавшееся в 2004 г. и достигшее максимума в 2005 г., которое можно интерпретировать как событие микролинзирования. Возрас-

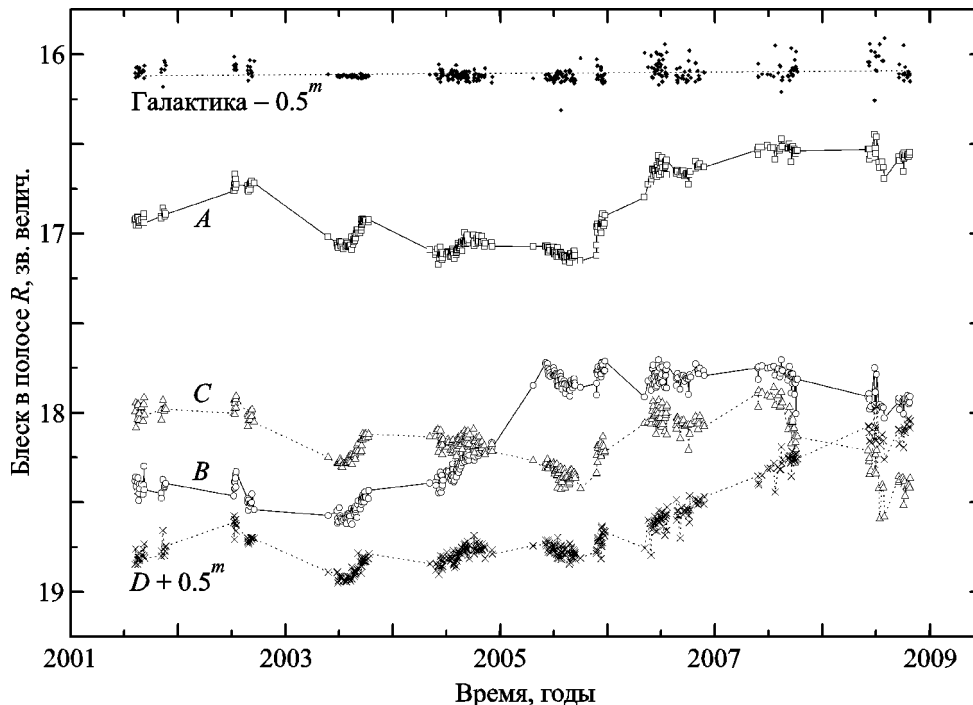


Рис. 2. Кривые блеска компонентов A, B, C, D ГЛС Q2237+0305, а также значения интегрального блеска галактики-линзы, полученные нами в фильтре R с 2001 по 2008 г.

тание блеска компонента А в 2005–2006 гг. на 0.4^m , по-видимому, также связано с проявлением эффекта микролинзирования, что подтверждают наблюдения 2007 г.

Отдельно следует выделить начавшееся в 2007 г. и продолжающееся до сих пор существенное увеличение блеска компонента D, более чем на 0.5^m . Это привело к тому, что компонент, бывший на протяжении более 20 лет одним из самых слабых, стал вторым по яркости после компонента А. Использование данных, полученных в 2008 г., позволило существенно уточнить распределения плотности вероятности коэффициента усиления для данного компонента, построенные нами ранее по результатам анализа кривых блеска, полученных с 1986 по 2006 г. [14].

Следует также отметить практически синхронное изменение блеска всех компонентов в 2003 г. Вклад микролинзирования в изменение блеска компонентов в этот период практически отсутствовал, и блеск изменялся только за счет внутренней переменности источника.

Такое поведение компонентов позволило нам получить оценки характерных времен запаздывания между вариациями их блеска [2].

На рис. 2 приведены также значения интегрального блеска галактики в полосе R, рассчитанные нами после вычитания из изображений галактики изображений всех компонентов. Как видно, глобального изменения блеска со временем не происходит, а случайные отклонения оценок флуктуаций блеска галактики относительно среднего значения не превышают отклонений, наблюдаемых для самого слабого компонента.

Наблюдательные данные, полученные нами в полосе V, менее регулярны, чем данные в фильтре R, однако они позволяют сравнить результаты нашей фотометрии с результатами фотометрии OGLE [15]. На рис. 3 представлены кривые блеска компонентов ГЛС Q2237+0305, полученные в рамках этих двух наблюдательных программ с 2001 по 2008 г.

Как видно из рис. 3, между нашими кривыми блеска в фильтре V и кривыми блеска OGLE

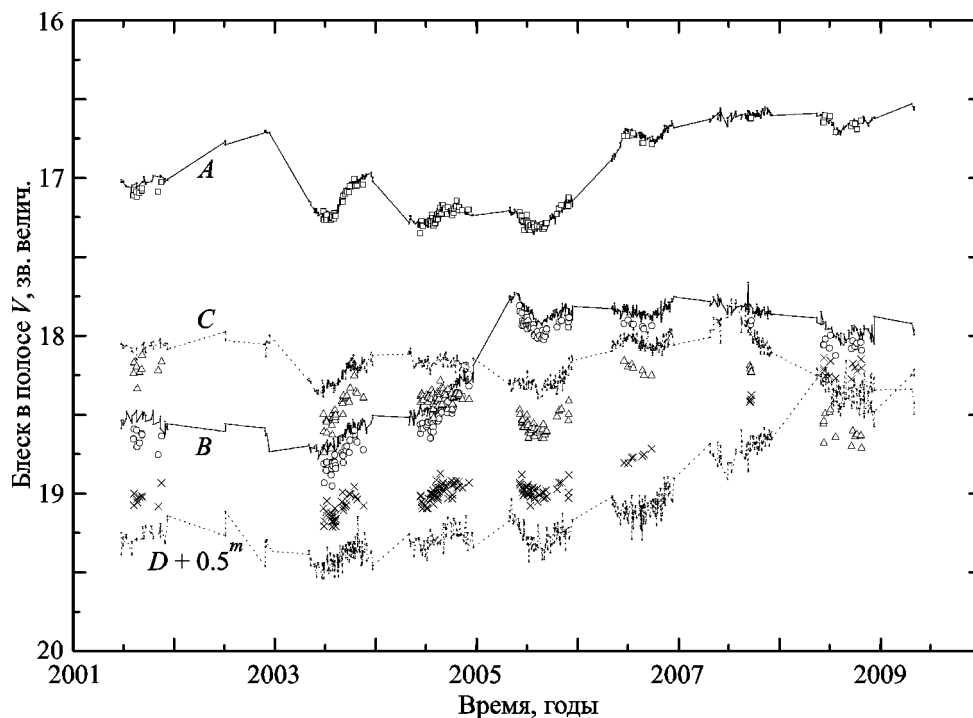


Рис. 3. Кривые блеска компонентов A, B, C, D ГЛС Q2237+0305, полученных на горе Майданак с 2001 по 2008 г. в полосе V (крупные символы), и кривые блеска, полученные в тот же период времени в рамках проекта OGLE (линии)

имеются некоторые систематические смещения, значения которых максимальны для компонентов С и D – наиболее близких к ядру галактики. Кроме того, видно, что кривые блеска, полученные в рамках этих двух программ, имеют различия в амплитудах, которые оказываются тем больше, чем меньше блеск компонента (большие значения звездных величин). Особенно заметны различия амплитуд кривых блеска для компонентов С и D в 2005 г.

Аппроксимировав данные, полученные в рамках проекта OGLE, отрезками полиномов, используя метод наименьших квадратов, мы рассчитали оценку среднего смещения ΔV между этими полиномами и данными, полученными на горе Майданак, а также зависимость между этим смещением и значением блеска компонента в данный момент времени. Таким образом, мы установили следующее редуцированное соотношение:

$$(V_{OGLE} + \Delta V_{\alpha}) - V_{Maid} = k(V_{Maid} - \langle V_{Maid} \rangle) + \Delta V,$$

которое выражает связь между кривыми блеска, полученными в рамках наблюдательной программы OGLE (V_{OGLE}) и результатами фотометрии данных, полученных на горе Майданак (V_{Maid}). Величина $\Delta V_{\alpha} = 0.034^m$ в этом выражении – разность между значениями блеска звезды, являющейся вторичным фотометрическим стандартом, принятыми при калибровке результатов наблюдений нами ($V_{\alpha} = 17.50^m$) и в рамках программы OGLE ($V_{\alpha} = 17.466^m$). Значения коэффициента k , характеризующего различие амплитуд кривых блеска V_{Maid} и V_{OGLE} , смещения между кривыми блеска ΔV и средние значения блеска компонентов, рассчитанные для данных, полученных за этот период на горе Майданак $\langle V_{Maid} \rangle$, приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены средние квадратические отклонения σ результатов фотометрии относительно аппроксимирующей кривой, характеризующие точность результатов фотометрии, полученных в рамках двух наблюдательных программ. Как видно, результаты фотометрии изображений, полученных на горе Майданак, показывают для компонентов А, В и С несколько большие ошибки, чем результаты OGLE, в то время как для самого слабо-

Таблица 1. Средние значения блеска компонентов ГЛС Q2237+0305 $\langle V_{Maid} \rangle$, средняя разность между результатами фотометрии ΔV , полученными в рамках проекта OGLE и на горе Майданак, а также значения k , характеризующие различие их амплитуд

Компонент	$\langle V_{Maid} \rangle$	ΔV	k
A	17.133	0.018	0.027
B	18.344	-0.069	-0.040
C	18.465	-0.208	-0.273
D	18.415	0.316	-0.124

Таблица 2. Сравнение случайных ошибок фотометрии компонентов А, В, С, D ГЛС Q2237+0305, рассчитанных для данных, полученных на горе Майданак и в рамках проекта OGLE

Набл. программа	σ_A	σ_B	σ_C	σ_D
Майданак	0.019	0.037	0.042	0.039
OGLE	0.014	0.024	0.029	0.053

го компонента D заметно большими оказываются ошибки измерений OGLE. При этом случайные ошибки, рассчитанные в рамках одного метода, оказываются намного меньше систематических смещений ΔV между кривыми блеска, полученными двумя рассматриваемыми методами.

Для оценок возможных систематических ошибок, зависящих от разрешения каждого отдельного кадра, кривые блеска компонентов ГЛС Q2237+0305, полученные в полосе R, были аппроксимированы гладкой функцией, описывающей все основные особенности данной кривой. Ошибки фотометрии ΔR рассчитывались как отклонение каждой отдельной точки кривой блеска от полученной аппроксимации. На рис. 4 приведены значения таких ошибок в зависимости от разрешения FWHM каждого отдельного кадра. Наклон линии регрессии для данной зависимости составил 0.016 ± 0.005 для компонентов А и В и 0.028 ± 0.009 для пары С и D.

Причина возникновения обнаруженных небольших систематических ошибок фотометрии компонентов ГЛС, зависящих от качества атмосферных условий в данную наблюдательную ночь, может заключаться в том, что, задавая

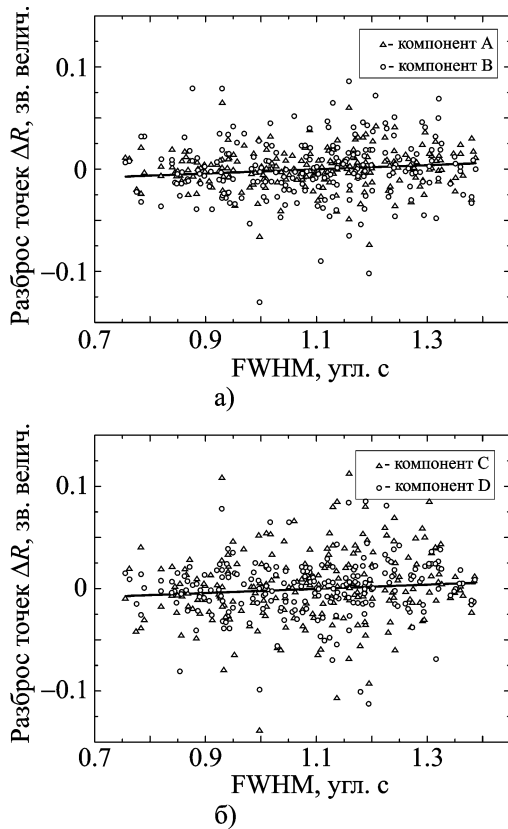


Рис. 4. Зависимость изменения разброса точек кривой блеска ΔR относительно аппроксимирующей кривой от качества атмосферы, характеризуемого величиной FWHM опорной звезды. Наклон линейной регрессии составил 0.016 ± 0.005 для компонентов A и B (а) и 0.028 ± 0.009 для пары C и D (б)

распределение яркости по галактике, мы не фиксировали значение ее интегрального блеска, которое измерялось наряду со значениями блеска каждого из компонентов. Таким образом, приведение разрешения исходного кадра с низким разрешением ($\text{FWHM} > 0.9''$) к более высокому ($\text{FWHM} = 0.9''$) может становиться причиной завышения оценок интегрального блеска галактики и занижения оценок блеска отдельных компонентов. Однако в то же время независимая оценка интегрального блеска галактики позволяет быть уверенными в однородности цветовой фотометрической системы на протяжении всего периода наблюдений. Это крайне важно в первую очередь для наиболее подверженных ошибкам многоцветных наблюдений процессов, происходящих в системе

Q2237+0305, учитывая то, что за период с 2001 по 2008 г. ПЗС-камеры, а также отдельные спектральные фильтры, используемые нами, менялись несколько раз.

Среднее разрешение изображений ГЛС Q2237+0305, полученных с 2001 по 2008 г., оказалось равно $1.1''$ при 90 % всех наблюдений, попадающих в интервал от $0.9''$ до $1.3''$. Для этого диапазона значений FWHM систематическое смещение в оценках блеска компонентов оказывается равным 0.006^m для пары A и B и 0.011^m для C и D. Таким образом, обнаруженные систематические смещения в оценках блеска компонентов, зависящие от качества атмосферных условий, для подавляющего большинства наблюдений оказываются в несколько раз меньше случайных ошибок фотометрии, приведенных в табл. 2. Все это говорит о надежности наших фотометрических оценок, указывая на то, что для широкого диапазона допустимого качества атмосферных условий разработанный метод фотометрии не дает значительных систематических ошибок.

В пользу нашего метода говорит также анализ погрешностей результатов фотометрии в зависимости от звездной величины компонентов (табл. 2). Для наших измерений их поведение вполне закономерно: более слабые изображения измеряются с меньшей точностью. В то же время фотометрия OGLE обнаруживает неоправданно высокую погрешность измерения блеска компонента D, заметно более высокую, чем в наших измерениях.

Характер различий в амплитудах вариаций блеска, отраженный в полученном нами редуцированном соотношении, также дает определенные основания для оптимизма в отношении применяемого нами метода фотометрии. Действительно, для участка кривой блеска, соответствующей наблюдениям 2003 г., имело место беспрецедентное снижение активности микролинзирования при отчетливо выраженном характерном изменении собственного блеска квазара, проявившемся во всех компонентах (см. рис. 2 и 3). В этом случае естественно ожидать примерно одинаковых амплитуд изменений блеска для разных компонентов. Именно это и наблюдается в наших кривых блеска, в то время как амплитуды

кривых блеска, измеренных в рамках программы OGLE, существенно разнятся в этот период времени.

5. Оценка флуктуаций кривых блеска компонентов Q2237+0305, вызванных внутренней переменностью источника

Хорошо известно, что квазары не являются стационарными источниками и их блеск может меняться в достаточно больших пределах в течение короткого времени. Таким образом, в кривых блеска компонентов ГЛС могут присутствовать вариации, вызванные как собственной переменностью источника, так и переменностью, связанной с проявлением эффекта микролинзирования. Попытка разделить эти флуктуации и построить кривую блеска источника на основании данных OGLE, полученных в 1997–2000 гг., была сделана нами в работе [16]. В этой работе, используя результаты фотометрии изображений ГЛС Q2237+0305, полученных на горе Майданак в 1997–2006 гг., мы попытались применить статистический подход для оценки возможного вклада этих двух типов переменности в наблюдаемые флуктуации блеска компонентов ГЛС Q2237+0305.

Измеренные кривые блеска компонентов, например А и В, могут быть представлены в виде:

$$m_A(t) = m'_A(t) + \Delta A(t) + S_1(t),$$

$$m_B(t) = m'_B(t) + \Delta B(t) + S_2(t),$$

где $m'_A(t)$ и $m'_B(t)$ – кривые блеска компонентов, которые наблюдались бы при некотором постоянном блеске источника S_0 и были бы только результатом микролинзирования компонентов; $S_1(t) = S(t')$ и $S_2(t) = S(t' + \Delta t_{AB})$ – блеск источника в некоторые моменты t' и $t' + \Delta t_{AB}$ соответственно, Δt_{AB} – временная задержка между вариациями блеска источника, наблюдаемыми в этих двух компонентах; $\Delta A(t)$ и $\Delta B(t)$ – ошибки измерения соответствующих кривых блеска.

Известно (см., например, [17]), что дисперсия суммы (или разности) n случайных величин x_k определяется выражением:

$$D(x_1 \pm x_2 \pm \dots \pm x_n) = \sum_{k=1}^n \sigma_k^2 \pm 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j,$$

где ρ_{ij} – коэффициенты корреляции случайных величин x_i и x_j , а σ_i^2 и σ_j^2 – их дисперсии. Нет оснований полагать, что вариации блеска компонентов, вызванные микролинзированием, или погрешности их измерений коррелируют, поэтому соответствующие коэффициенты корреляции мы можем положить равными нулю. Однако, вариации блеска компонентов, обусловленные вариациями блеска одного и того же источника, могут заметно коррелировать. Таким образом, дисперсию суммы кривых блеска $m_A(t)$ и $m_B(t)$ двух любых компонентов можно представить в виде:

$$D(m_A(t) + m_B(t)) = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{\Delta A}^2 + \sigma_{\Delta B}^2 + \sigma_{S_1}^2 + \sigma_{S_2}^2 + 2\rho_{12}\sigma_{S_1}\sigma_{S_2},$$

где σ_A^2 и σ_B^2 – дисперсии вариаций блеска компонентов, обусловленные микролинзированием; $\sigma_{\Delta A}^2$ и $\sigma_{\Delta B}^2$ – дисперсии ошибок измерения блеска компонентов; $\sigma_{S_1}^2$ и $\sigma_{S_2}^2$ – дисперсии кривых блеска источника $S_1(t)$ и $S_2(t)$, входящих в наблюдаемые кривые блеска, а ρ_{12} – коэффициент корреляции между ними.

В общем случае наличие временных задержек приводит к тому, что вариации блеска источника, которые наблюдаются в кривых блеска разных компонентов, не равны друг другу, $S_1(t) \neq S_2(t)$. Однако в случае ГЛС Q2237+0305 временная задержка вариаций блеска составляет не более суток [2, 18], что намного меньше характерного времени вариаций блеска квазара. Поэтому вполне можно считать, что коэффициент корреляции $\rho_{12} \approx 1$, а дисперсии кривых блеска источника $\sigma_{S_1}^2 = \sigma_{S_2}^2 = \sigma_S^2$. Следовательно, для дисперсии суммы кривых блеска компонентов получаем:

$$D(m_A(t) + m_B(t)) = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{\Delta A}^2 + \sigma_{\Delta B}^2 + 4\sigma_S^2.$$

В то же время в выражение для дисперсии разности кривых блеска дисперсия вариаций блеска самого источника-квазара входит не должна:

$$D(m_A(t) - m_B(t)) = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_{\Delta A}^2 + \sigma_{\Delta B}^2.$$

В табл. 3 представлены среднеквадратические отклонения сумм кривых блеска σ_{A+B} , а в табл. 4 – разностей σ_{A-B} пар компонентов, рассчитанные по кривым блеска, полученным по наблюдениям 1997–2006 гг. на горе Майданак в полосе R и в рамках проекта OGLE в полосе V. Для обоих фильтров оценки среднеквадратических отклонений сумм кривых блеска оказались систематически больше среднеквадратических отклонений их разностей, что указывает на заметные вариации блеска самого источника.

Таким образом, получив оценки дисперсий сумм σ_{A+B}^2 и разностей σ_{A-B}^2 кривых блеска пар компонентов ГЛС Q2237+0305, мы можем составить систему из двенадцати линейных уравнений и найти такие оценки дисперсий кривых блеска каждого из компонентов σ_A^2 , σ_B^2 , σ_C^2 , σ_D^2 и кривой блеска источника σ_S^2 , при которых средняя ошибка определения этих величин окажется минимальной.

В табл. 5 представлены полученные таким образом оценки флуктуаций кривых блеска каж-

дого из компонентов σ_A , σ_B , σ_C , σ_D , их средние значения σ_{all} , а также оценки флуктуаций блеска самого источника σ_S . Полученные оценки σ_{all} и σ_S позволяют утверждать, что события микролинзирования, хотя и вносят несколько больший вклад в наблюдаемые вариации блеска, чем внутренняя переменность источника, однако в целом имеют сравнимые с нею значения. Этот вывод крайне важен для правильной интерпретации наблюдательных кривых при моделировании процессов микролинзирования в этой ГЛС. Следует также отметить более высокие значения величин σ_{all} и σ_S , полученные нами в фильтре V. Тенденция возрастания переменности нелинзированных квазаров с уменьшением длины волны была известна и ранее (например, [19]). Об аналогичной тенденции в системе Q2237+0305 сообщается в работе [11], где показана ее связь с событиями микролинзирования. Такой эффект может наблюдаться при микролинзировании источника, эффективный размер которого увеличивается с увеличением длины волны. В работе [16] нами уже была предложена и проверена при моделировании двухкомпонентная модель источника Q2237+0305, хорошо объясняющая особенности кривых блеска микролинзирования, полученных в одном спектральном диапазоне. Объяснению наблюдаемых в Q2237+0305 вариаций показателя цвета, используя результаты фотометрии, по-

Таблица 3. Среднеквадратические вариации сумм кривых блеска пар компонентов ГЛС Q2237+0305

Фильтр	σ_{A+B}	σ_{A+C}	σ_{A+D}	σ_{B+C}	σ_{B+D}	σ_{C+D}
V (OGLE)	0.421	0.468	0.348	0.436	0.416	0.413
R (Майданак)	0.369	0.333	0.241	0.406	0.381	0.305

Таблица 4. Среднеквадратические вариации разностей кривых блеска пар компонентов ГЛС Q2237+0305

Фильтр	σ_{A-B}	σ_{A-C}	σ_{A-D}	σ_{B-C}	σ_{B-D}	σ_{C-D}
V (OGLE)	0.377	0.234	0.192	0.430	0.294	0.208
R (Майданак)	0.347	0.211	0.123	0.381	0.287	0.183

Таблица 5. Оценки среднеквадратических вариаций блеска отдельных компонентов Q2237+0305 (σ_A , σ_B , σ_C , σ_D), их средние значения σ_{all} , а также вариации кривой блеска источника σ_S

Фильтр	σ_A	σ_B	σ_C	σ_D	σ_{all}	σ_S
V (OGLE)	0.150	0.274	0.170	0.115	0.18 ± 0.030	0.14 ± 0.013
R (Майданак)	0.098	0.277	0.186	0.070	0.16 ± 0.041	0.10 ± 0.028

лученные в настоящей работе, мы планируем уделить внимание в дальнейшем.

6. Выводы

1. Как видно из рис. 2 и 3, кривые блеска в фильтре R, полученные нами по результатам наблюдений в 2003–2006 гг., по количеству измерений в пределах наблюдательных сезонов и по их длительности практически не уступают данным программы OGLE, которые в настоящее время являются наиболее подробными. В фильтре V наши кривые блеска менее подробны, однако наличие измерений в трех фотометрических полосах V, R, I является важным преимуществом наших данных по сравнению с данными программы OGLE, где наблюдения выполнялись только в полосе V.

2. Сравнение погрешностей фотометрии обоих рядов наблюдений, определенных как среднеквадратическое отклонение измеренных звездных величин от соответствующих аппроксимирующих кривых, показывает, что наши данные несколько (на $0.005^m \div 0.013^m$) уступают по точности данным OGLE для компонентов A, B и C и оказываются на 0.014^m более точными для самого слабого компонента D.

3. Показано, что зависимость точности фотометрии от атмосферного качества изображения (ширины изображения звезды, FWHM) несущественна: для диапазона значений FWHM от $0.9''$ до $1.3''$, в который попадает 90 % всех наблюдений, систематическое смещение в оценках блеска компонентов равно 0.006^m для пары A и B и 0.011^m для C и D, т. е. оказывается заметно меньше случайных погрешностей фотометрии.

4. Получено редуцированное соотношение, позволяющее корректно приводить наши данные к данным OGLE и наоборот. Это обеспечивает принципиальную возможность для синтеза более полных и подробных кривых блеска компонентов. Для системы Q2237+0305 это важно при анализе и интерпретации событий микролинзирования, в частности, для изучения статистических характеристик переменности, вызванной микролинзированием, чувствительных к возможному наличию непрерывно распределенной (темной) материи в линзирующей галактике.

5. Впервые получены количественные оценки величин вариаций блеска компонентов Q2237+0305, обусловленных отдельно собственной переменностью квазара и событиями микролинзирования.

В заключение авторы выражают благодарность сотрудникам Астрономического института им. Улугбека (Узбекистан) С. Н. Нуритдинову, О. А. Бурхонову, Т. А. Ахуну, сотрудникам ГАИШ МГУ (Россия) Б. П. Артамонову, В. В. Бруевичу, О. В. Ежковой, А. С. Гусеву, а также сотрудникам Института астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина А. П. Железняку, В. В. Коничеку и И. Е. Синельникову за техническую поддержку телескопа и участие в наблюдениях гравитационно-линзированных квазаров в Майданакской обсерватории, легших в основу данной работы, а также А. А. Минакову за обсуждение статьи и В. С. Цветковой за ряд полезных критических замечаний, позволивших значительно улучшить статью.

Работа выполнялась при поддержке гранта УНТЦ U127k, а также целевой программы НАН Украины “Космомикрофизика-X”.

Литература

1. Huchra J., Gorenstein M., Horine E., Kent S., Perley R., Shapiro I. I., and Smith G. 2237+0305 – a new and unusual gravitational lens // *Astron. J.* – 1985. – Vol. 90. – P. 691-696.
2. Vakulik V. G., Schild R. E., Dudinov V. N., et al. Observational determination of the time delays in gravitational lens system Q2237+0305 // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 447. – P. 905-913.
3. Corrigan R. T., Irwin M. J., and Arnaud J. Initial light curve of Q2237+0305 // *Astron. J.* – 1991. – Vol. 102, No. 1. – P. 34-40.
4. Houde M., Racine R. Image restoration and photometric monitoring of the gravitational lens Q2237+0305 // *Astron. J.* – 1994. – Vol. 107, No. 2. – P. 456-466.
5. Østensen R., Refsdal S., Stabell R., et al. Monitoring of the Einstein Cross with the Nordic Optical Telescope // *Astron. Astrophys.* – 1996. – Vol. 309, No. 1. – P. 59-64.
6. Alcalde D., Mediavilla E., Moreau O., et al. QSO 2237+0305 VR light curves from Gravitational Lenses International Time Project optical monitoring // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 572. – P. 729-734.

7. Wozniak P. R., Alard C., Udalski A., et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment monitoring of QSO 2237+0305 // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 529, No. 5. – P. 88-92.
8. Ehgamberdiev S. A., Baijumanov A. K., Ilyasov S. P., et al. The astroclimate of Mайданак Observatory in Uzbekistan // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 2000. – Vol. 145. – P. 293-304.
9. Артамонов Б. П., Бруевич В. В., Бугаенко О. И. и др. 1.5-метровый телескоп АЗТ-22. Цеховая аттестация оптических систем: Препр. / ГАИШ МГУ: № 16. – Москва: 1990.
10. Burud I., Stabell R., Magain P., et al. Three photometric methods tested on ground-based data of Q2237+0305 // *Astron. Astrophys.* – 1998. – Vol. 339, No. 3. – P. 701-708.
11. Vakulik V. G., Schild R. E., Dudinov V. N., et al. Color Effects Associated with the 1999 Microlensing Brightness Peaks in Gravitationally Lensed Quasar Q2237+0305 // *Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 420. – P. 447-457.
12. Yee H. K. C. High-resolution imaging of the gravitational lens system candidate 2237+0305 // *Astron. J.* – 1988. – Vol. 95. – P. 1331-1339.
13. Alard C., Lupton R. H. A Method for Optimal Image Subtraction // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 503. – P. 325-331.
14. Цветкова В. С., Шульга В. М., Вакулик В. Г., Смирнов Г. В., Дудинов В. Н., Минаков А. А. Поиск темной материи с использованием явления сильного гравитационного линзирования // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2009. – Т. 25, №1. – С. 40-55.
15. Udalski A., Szymanski M. K., Kubiak, M., et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. OGLE-III Long Term Monitoring of the Gravitational Lens QSO2237+0305 // *Acta Astronomica.* – 2006. – Vol. 56. – P. 293-305.
16. Vakulik V. G., Schild R. E., Smirnov G. V., et al. Q2237+0305 source structure and dimensions from light-curve simulation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2007. – Vol. 382. – P. 819-825.
17. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
18. 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. – P. 37-46.
19. De Vries W. H., Becker R. H., and White R. L. Double Lobed Radio Quasars from the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. J.* – 2005. – Vol. 131, No. 2. – P. 666-679.

Гравітаційно-лінзова система Q2237+0305 у 2001–2008 рр.: результати спостережень на горі Майданак

**В. М. Дудінов, Г. В. Смирнов,
В. Г. Вакулик, О. В. Сергєєв,
О. Е. Кочетов**

Надаються результати багатокольорової фотометрії зображень гравітаційно-лінзової системи Q2237+0305, одержаних у 2001–2008 рр. за допомогою 1.5-метрового телескопа АЗТ-22 (гора Майданак, Узбекистан). Стисло описано використаний метод фотометрії. Порівняння результатів нашої фотометрії з даними програми OGLE дозволило одержати редуційне співвідношення між цими рядами даних. Виконано оцінки похибок фотометрії та показано, що похибки фотометрії OGLE є лише дещо меншими, ніж похибки наших вимірювань. Отримано числові оцінки співвідношення між варіаціями блиску в системі Q2237+0305, зумовлені роздільно подіями мікролінзування та внутрішньою змінністю джерела.

Gravitational Lensed System Q2237-0305 in 2001–2008: Observations at the Mайданак Mountain

**V. N. Dudinov, G. V. Smirnov,
V. G. Vakulik, A. V. Sergeev,
and A. E. Kochetov**

Results of multicolor observations of the gravitational lens system Q2237+0305 in 2001–2008 with the 1.5-m AZT-22 telescope (Mайданак Mountain, Uzbekistan) are presented. The photometry method is described briefly. Comparison of the results of our photometry with those of the OGLE data allowed obtaining a reduction formula for these data series. Our photometry errors are estimated, demonstrating that the OGLE photometry errors are but slightly smaller than ours. The quantitative estimates of brightness variations in Q2237+0305 that arise separately from microlensing and the internal quasar variability are obtained.