

УДК 520.16

В. С. Цветкова¹, В. М. Шульга¹, В. Г. Вакулик^{1, 2},
Г. В. Смирнов², В. Н. Дудинов^{1, 2}, А. А. Минаков¹

¹Радиоастрономический институт НАН Украины
61002 Харьков, ул. Краснознаменная 4

²Институт астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина
61022 Харьков, ул. Сумская 35

Поиск темной материи с использованием явления сильного гравитационного линзирования

Приведен краткий обзор методов оценки содержания темной материи во Вселенной, основанных на явлении сильного гравитационного линзирования — метод аномалий взаимного блеска макроизображений и метод, предполагающий анализ распределения вероятностей усиления блеска макроизображений вследствие событий микролинзирования. Оба метода требуют задания модели макролинзы, знания пространственной структуры источника или хотя бы его эффективного размера и выполнения цифрового моделирования событий микролинзирования, с последующим сравнением результатов моделирования с данными наблюдений. На примере квадрупольно линзированного квазара Q2237+0305 продемонстрировано влияние пространственной структуры источника на характер распределения вероятностей усиления блеска при событиях микролинзирования. Отмечается необходимость в учете вклада собственной переменности квазара в наблюдаемую кривую блеска и в разработке физически обоснованного алгоритма аппроксимации наблюдательных данных. На основе всех имеющихся наблюдений Q2237+0305 впервые построены гистограммы вероятностей усиления всех четырех макроизображений квазара; анализируется возможность их использования для оценки содержания непрерывно распределенной (темной) материи в галактике Q2237+0305 на расстоянии от ядра, соответствующем расположению макроизображений.

ПОШУК ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЯВИЩА СИЛЬНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО ЛІНЗУВАННЯ, Цветкова В. С., Шульга В. М., Вакулик В. Г., Смирнов Г. В., Дудинов В. М., Минаков О. А. — Подається стислий огляд методів оцінки вмісту темної матерії у Всесвіті, що базуються на явищі сильного гравітаційного лінування — метод аномалій взаємного блиску та метод, який потребує аналізу розподілу ймовірностей підсилення блиску макрообразень внаслідок подій мікролінування. Обидва методи потребують задання моделі макролінзи, знання просторової структури джерела чи щонайменше його ефективного

розміру, а також виконання цифрового моделювання подій мікролінзування з наступним порівнянням результатів моделювання з даними спостережень. На прикладі квадрупольно лінзованого квазару Q2237+0305 продемонстровано вплив просторової структури джерела на характер розподілу ймовірностей підсилення блиску при подіях мікролінзування. Відмічено необхідність враховувати внесок власної змінності квазара до кривої блиску, а також необхідність розробки фізично мотивованого алгоритму апроксимації спостережних даних. На основі всіх наявних спостережень Q2237+0305 вперше побудовано гістограми ймовірностей підсилення блиску всіх чотирьох макрозображень квазара; аналізується можливість їхнього використання для оцінювання вмісту рівномірно розподіленої (темної) матерії в галактиці Q2237+0305 на відстані від ядра, що відповідає розташуванню макрозображень.

A SEARCH FOR DARK MATTER WITH THE USE OF THE STRONG LENSING PHENOMENON, by Tsvetkova V. S., Shulga V. M., Vakulik V. G., Smirnov G.V., Dudinov V. N., Minakov A. A. — We present a brief review of the existing methods to estimate the dark matter content in the Universe, which are based on the strong lensing phenomenon, namely, the method of brightness ratio anomalies and the method based on the analysis of magnification probability distributions of macroimages caused by microlensing. Both of the methods need the macrolens model, the information on the source spatial structure, or at least on its effective size, and the following numerical simulation of microlensing events with subsequent comparison of the simulation results with observation data. Using the quadruply lensed quasar Q2237+0305 as an example, we show the effect of the source spatial structure on the shape of magnification probability distribution due to microlensing. A necessity to account for the contribution of the quasar intrinsic variability into the observed light curve is noted, as well as the need in developing a physically motivated algorithm to approximate the data of observations. With the use of all available observations of Q2237+0305, including our observations, the first histograms of microlensing amplification probability were built for all the four macroimages. We analyse the possibility to use them for evaluation of the dark matter content in the Q2237+0305 galaxy at the distance from the nucleus which corresponds to locations of macroimages.

ВВЕДЕНИЕ

Почти три четверти века тому назад стало понятно, что для объяснения дисперсии скоростей в скоплениях галактик [37, 57] необходимо либо допустить, что сила тяготения на больших пространственных масштабах убывает медленнее, чем по закону Ньютона, либо принять, что во Вселенной существует некая скрытая масса, пока ускользающая от наблюдений. Этот факт привел к введению понятия «темной материи», которая взаимодействует с обычным веществом только гравитационно, и, как альтернатива, — к развитию так называемых модифицированных теорий гравитации [2, 32].

В настоящее время наиболее перспективный метод обнаружения темной материи и прямой оценки ее вклада в общую космологическую плотность связывают с использованием явления гравитационного линзирования на различных пространственных масштабах Вселенной. Различают три вида гравитационного линзирования, каждый из которых обладает своими потен-

циальными возможностями в применении к решению проблемы темной материи: галактическое линзирование, сильное линзирование и слабое линзирование.

Наибольший объем наблюдательных ресурсов до недавнего времени уделялся галактическому микролинзированию, изучение которого было начато в рамках известного проекта MACHO (Massive Compact Halo Objects) по инициативе Б. Пачинского [38]. В рамках этого проекта и более поздних аналогичных проектов (OGLE, EROS и др.) по наблюдениям миллионов звезд, населяющих балдж нашей Галактики и Магеллановы облака, удалось зафиксировать свыше сотни событий микролинзирования звезд компактными объектами. В настоящее время в программу проектов включены некоторые галактики местной системы, где также зарегистрированы события микролинзирования.

Чрезвычайно интересные результаты получены недавно по так называемому слабому линзированию, которое проявляется при наблюдениях удаленных объектов (квazarов, галактик) сквозь поля тяготения более близких массивных скоплений галактик. Обработка изображений, сформированных явлением слабого линзирования, в принципе позволяет восстановить распределение поверхностной плотности массы в скоплении и проанализировать, насколько оно соответствует наблюдаемой массе светящейся материи и ее распределению.

Недавно результаты наблюдений двух скоплений взаимодействующих галактик, 1E0657-558 и C1 0024+17, стали предметом горячих дискуссий и широкой рекламы. В первом скоплении [5, 6] сближение произошло около 10^8 лет назад почти точно в картинной плоскости. Это дало возможность увидеть результат взаимодействия двух скоплений «в профиль». Соображения, которые привели авторов работ [5, 6] к выводу о том, что темная материя составляет существенную долю вещества в скоплениях, состоят в следующем. Согласно современным представлениям примерно 90 % видимого барионного вещества в скоплениях галактик существует в виде нагретой до миллионов градусов плазмы, заполняющей объем скопления. Остающиеся 10 % приходятся на звездное население. В процессе столкновения двух скоплений галактики взаимодействуют бесстолкновительно, в то время как плазма является существенно столкновительной, и поэтому испытывает замедление под действием лобового давления. Поэтому после столкновения скопления и сопутствующая им плазма окажутся пространственно разделенными. Если же частицы темной материи также взаимодействуют бесстолкновительно, как теперь полагают, то темная материя останется вблизи галактик. Восстановив по оптическим изображениям методом слабого линзирования карту распределения гравитационного потенциала и сопоставив ее с рентгеновскими изображениями горячей плазмы, полученными аппаратом «Chandra», авторы работ [5, 6] заключили, что максимумы восстановленного распределения гравитационного потенциала совпадают со скоплениями галактик. Рентгеновская плазма вносит лишь незначительный вклад в восстановленную картину распределения потенциала, и следовательно, в веществе скоплений есть значительная доля материи в невидимой форме.

Столь же решающим подтверждением существования темной материи считаются и результаты наблюдения скоплений C1 0024+17 [13]. В этом случае столкновение происходило почти строго вдоль луча зрения. На восстановленной карте поверхностной плотности массы отчетливо видна кольцевая структура. Она приписывается темной материи, испытавшей

после конца столкновения расширение с последующим замедлением и образованием оболочки, которая при такой геометрии наблюдается в виде кольца.

Часть ресурсов проекта OGLE посвящена наблюдениям гравитационно линзированных квазаров — объектов, сформированных явлением сильного линзирования. Конфигурации изображений гравитационно линзированных квазаров зависят от взаимного расположения квазара, галактики-линзы и наблюдателя. Если лучи света от квазара по пути к наблюдателю проходят через густонаселенные области галактики-линзы, могут наблюдаться изменения блеска макроизображений, вызванные прохождением объектов линзирующей галактики вблизи луча зрения (события микролинзирования). Анализ кривых блеска микролинзирования позволяет оценить характерные массы микролинз и исследовать с беспрецедентно высоким угловым разрешением структуру излучающих областей квазара. С конца прошлого столетия интенсивно обсуждаются также способы получения оценок вклада непрерывно распределенной (темной) материи в общую массу галактики-линзы, основанные на анализе взаимного блеска компонентов квадрупольно линзированных квазаров и его изменений во времени [9, 15, 16, 30, 31, 41, 42].

СИЛЬНОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Таким образом, явление гравитационного линзирования предоставляет несколько подходов к исследованию проблемы темной материи. В отличие от случая галактического линзирования, которое дает информацию только о компактных объектах в гало нашей Галактики, изменения блеска макроизображений в гравитационно линзированных квазарах, вызванные событиями микролинзирования, содержат информацию как о звездном компоненте поверхностной плотности вещества линзирующей галактики, так и о непрерывно распределенной материи, причем есть принципиальная возможность разделить эти два компонента. Исследования последних лет [10, 21, 22, 29, 41, 42] дают основание полагать, что во многих «квазарных линзах» темная материя может вносить ощутимый вклад в массу линзы-галактики. Следует отметить, однако, что есть и другие мнения относительно содержания темной материи в галактиках — от полного отрицания факта ее существования (например, упоминавшиеся выше модифицированные теории гравитации [2, 32]) до весьма осторожных оценок ее содержания. Так, в недавно опубликованной работе (van de Ven G., arXiv:0807.4175v1) с привлечением эффекта линзирования и высокоточных измерений лучевых скоростей звезд линзирующей галактики Q2237+0305, выполненных вплоть до расстояния 4" от ее центра, содержание темной материи оценивается не более чем в 20 % от общей массы.

Аномалии взаимного блеска макроизображений как критерий наличия темной материи в линзирующих галактиках. Давно известно [17, 19, 28, 55], что наблюдаемые положения кратных макроизображений квазаров достаточно хорошо предсказываются простыми регулярными моделями гравитационных линз, в то время как отношения яркостей компонентов воспроизводятся такими моделями плохо. Первый систематический анализ этой проблемы был выполнен в 1998 г. Мао и Шнайдером [28], которые предположили, что аномалии взаимного блеска в некоторых линзах

могут быть объяснены наличием субструктур в линзирующих галактиках (или где-либо еще на луче зрения) с масштабами, сравнимыми с расстояниями между изображениями.

Известно, что популярная в настоящее время модель формирования иерархических структур во Вселенной с преобладающим содержанием темной материи плохо предсказывает распределение материи на малых масштабах, а именно, ожидаемое количество галактик-спутников с массами порядка $M_g \approx 10^8 M_\odot$, оставшихся после завершения процесса иерархического формирования, более чем на порядок превышает число карликовых галактик с такими массами, реально наблюдаемых в пределах Местной Группы [18, 35]. Одним из решений этого противоречия может быть предположение, что некоторые субструктуры, в особенности с низкой массой, являются темными.

В работе [30] было впервые отмечено, что парадигма темной материи может естественным образом объяснить природу субструктур, предложенных Мао и Шнайдером [28] для объяснения аномалий взаимного блеска компонентов, и наоборот, подтверждение существования субструктур с массами порядка $10^6 \dots 10^8 M_\odot$ способно устранить противоречие в предсказаниях количества маломассивных галактик-спутников. Идея была чрезвычайно актуальной, и была немедленно подхвачена [3, 4, 9, 14]. В последующие годы наблюдается неослабевающий интерес к методам исследования проблемы темной материи с использованием явления сильного линзирования [1, 7, 15, 16, 22, 27, 29, 34, 40].

Следует отметить, что наблюдаемые аномалии отношений блеска могут в принципе вызываться и другими причинами, такими как события микролинзирования компактными телами и электромагнитные явления в межзвездной среде линзирующей галактики (поглощение и рассеяние излучения, мерцания). Влияние перечисленных факторов подробно исследовано в работах [21, 22].

Идея использования аномалий взаимного блеска линзированных компонентов квазаров для обнаружения субструктур в линзирующих галактиках основана на фундаментальных соотношениях между коэффициентами усиления компонентов, следующих из основного уравнения линзы. Впервые они были получены в работах [46] и [26] для нескольких «гладких» моделей распределения потенциала галактики-линзы. В принципе уравнение линзы позволяет получить для квадрупольных систем шесть независимых соотношений между координатами и усилениями возникающих макроизображений, однако только одно из них может быть проверено с использованием данных наблюдений. Это — известное правило суммы усиления, впервые сформулированное в [46] для случая источника внутри каспа макроакустики в виде

$$|\mu_1| = |\mu_2 + \mu_3|.$$

В этом случае формируются четыре макроизображения, — тесная тройка со средним изображением внутри критической кривой и двумя крайними вне ее, и четвертое изображение, несколько в стороне от тесной тройки. Индекс «1» относится к изображению, расположенному в середине тройки макроизображений. Так как значения абсолютных усиления нам неизвестны (нелинзированный источник недоступен наблюдениям), Мао и Шнайдер [28] предложили пользоваться при анализе величиной

$$R_{cusp} = \frac{|\mu_1| - |\mu_2| + |\mu_3|}{|\mu_1| + |\mu_2| + |\mu_3|} = \frac{F_1 - F_2 + F_3}{F_1 + F_2 + F_3},$$

где F_i — наблюдаемые потоки. В идеализированном случае регулярной линзы и точного нахождения источника внутри каспа $R_{cusp} = 0$. Для аналогичной величины в случае источника, расположенного вблизи складки каустики, имеем [16]

$$R_{fold} = \frac{|\mu_m| - |\mu_s|}{|\mu_m| + |\mu_s|} = \frac{F_m - F_s}{F_m + F_s} \approx 0.$$

Здесь индекс m относится к изображению, соответствующему минимуму поверхности времени прибытия сигнала (поверхности Ферма), а индекс s — седловой точке этой поверхности.

В работах [15, 16] исследовано асимптотическое поведение величин R_{cusp} и R_{fold} вблизи каспа и складки соответственно. Анализ этих асимптотических выражений позволил оценить верхний предел отклонения величин R_{cusp} и R_{fold} от нулевого значения [15, 16], ожидаемый для набора возможных положений источника относительно каспа и складки каустики и для различных моделей макролинзы с «гладким» распределением гравитационного потенциала. С использованием этих предельных значений R_{cusp} и R_{fold} как критерия отбора систем с наиболее вероятным наличием аномалий блеска были исследованы соотношения блеска макроизображений у 12 квадрупольно линзированных систем. Сделан вывод о том, что как минимум половина таких систем обнаруживает аномалии взаимного блеска, которые невозможно объяснить с использованием «гладких» регулярных моделей распределения линзирующего потенциала.

Оценка вклада темной материи из анализа распределений вероятности усиления блеска при микролинзировании. В то время как в методе аномалий взаимного блеска возможные события микролинзирования являются мешающим фактором, сами по себе эти события, точнее, статистика вызванных ими изменений блеска, также несут информацию о соотношении между массой галактики, содержащейся в компактных объектах и в непрерывно распределенной (темной) материи. Идея использовать события микролинзирования для определения содержания темной материи в галактиках, линзирующих изображения удаленных квазаров, была высказана впервые еще в 1991 году [53] и несколько позже опубликована в работе, посвященной статистическому анализу кривых блеска микролинзирования [33], хотя основы ее содержатся уже в так называемых соотношениях масштабирования, полученных в 1986 г. Пачинским [35].

Недавно Шехтер и Вамбсгансс [41, 42], отметив вышеупомянутых предшественников, вернулись к этой идее и предложили метод оценки относительного вклада непрерывно распределенной темной материи в общую поверхностную плотность линзирующей галактики, основанный на анализе распределений вероятности усиления блеска макроизображений, вызванных микролинзированием (будем в дальнейшем для краткости называть его методом гистограмм). В своей работе 2002 г. они с помощью компьютерного моделирования показали, что вопреки интуитивному ожиданию замена части гравитирующей массы, содержащейся в компактных объектах, на непрерывно распределенную материю в некоторых случаях увеличивает флуктуации блеска, вызванные микролинзированием на оставшихся компактных объектах. При этом для изображений, соответствующих седловым точкам поверхности Ферма, флуктуации увеличиваются гораздо больше, чем для изображений, соответствующих минимумам этой поверхности. Более того, введение непрерывно распределенной материи существенно изменяет форму распределения вероятностей усиления, при-

чем влияние непрерывного компонента на распределение вероятностей усиления различно для изображений разной четности.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СТАТИСТИКУ ФЛУКТУАЦИЙ БЛЕСКА МАКРОИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ МИКРОЛИНЗИРОВАНИИ

Таким образом, принципиально задача оценки наличия непрерывно распределенной материи в линзирующей галактике методом гистограмм представляется достаточно простой, требующей либо длительного мониторинга вариаций блеска компонентов в каком-либо выбранном гравитационно линзированном квазаре, либо наблюдений семейства таких объектов в произвольные моменты времени с последующим статистическим анализом [42]. Реально ситуация не столь проста.

1. Во-первых, при статистическом анализе вариаций блеска при микролинзировании необходимо иметь информацию о пространственной структуре источника-квазара. Модельные эксперименты показывают, что распределения вероятностей усиления существенно зависят от принятой модели распределения яркости по источнику-квазару, в частности от его эффективного размера [1, 8, 25, 36].

2. Во-вторых, влияние на статистику вариаций блеска микролинзирования в принципе может оказывать функция масс микролинз. Этот вопрос неоднократно обсуждался [23, 45, 52]. Вамбгансс в своей работе 1992 г. [52] представил большое количество разнообразных функций распределения вероятностей микроусиления, построенных при моделировании с использованием различных сочетаний параметров микролинзирования. Его результаты подтвердили полученный аналитически результат Шнайдера [45], согласно которому вид функции распределения вероятностей усиления при микролинзировании слабо зависит от функции масс компактных объектов. Этот вывод довольно долго не подвергался сомнению, и хотя было понятно, что популяции компактных объектов в реальных галактиках представлены в весьма широком диапазоне масс (от планет до звезд), при моделировании и в аналитических расчетах до недавнего времени принималась, что все микролинзы имеют одну массу [56]. Это было удобно, так как упрощало процедуру цифрового моделирования и теоретические исследования.

3. При анализе наблюдательных данных необходимо отделить вариации блеска компонентов, обусловленные микролинзированием, от вариаций собственного блеска квазара. Это непростая задача даже для квадрупольных систем с небольшими временами запаздывания, такими как Q2237+0305 [48]. Статистические характеристики переменности квазара в каждом реальном объекте неизвестны. Моделирование же выполняется при фиксированном блеске квазара, то есть анализируется «чистое» микролинзирование.

4. Наконец, существенно осложняют статистический анализ наблюдаемых кривых блеска макроизображений неполнота данных и неравномерность отсчетов кривых блеска, вызванная погодными условиями, с неизбежными пробелами в наблюдениях из-за сезонных условий видимости объекта.

Влияние структуры источника на распределение вероятностей усиления при микролинзировании. Как указывалось выше, в последние годы появилось несколько работ, в которых путем цифрового моделирования изучается влияние размеров источника на статистику флуктуаций блеска при микролинзировании [1, 8, 25, 36]. Мы выполнили моделирование

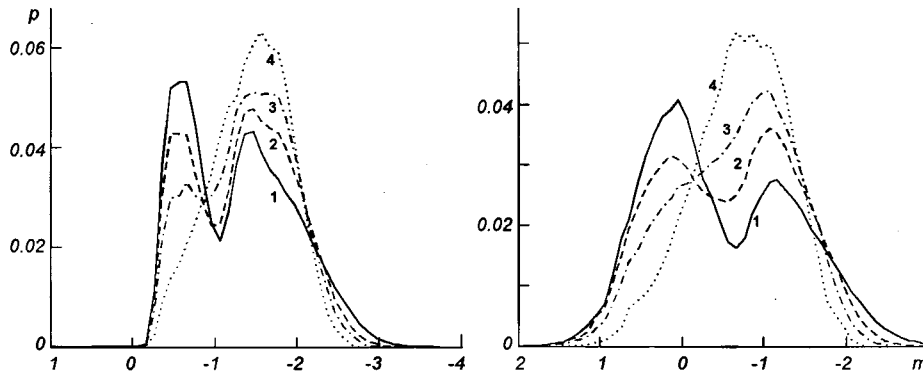


Рис. 1. Распределения плотностей вероятности усиления компонентов А и С системы Q2237+0305, вызванных событиями микролинзирования. Моделирование выполнялось для нулевого вклада непрерывно распределенной материи (кривые 1–4 — для размеров источника, составляющих 0.07, 0.25, 0.5 и 1.0 от радиуса кольца Эйнштейна микролинзы)

событий микролинзирования для источников с различными размерами и с параметрами микролинзирования, характерными для системы Q2237+0305. Соответствующие распределения вероятностей усиления при микролинзировании компонентов А (минимум поверхности Ферма) и С (седловая точка), приведены на рис. 1. Кривые нормированы таким образом, что сумма вероятностей всех возможных усиления блеска остается постоянной. При построении карт усиления параметры микролинзирования σ_s и γ были взяты для этих изображений из работы [20]. Для простоты вычислений кривые блеска рассчитывались для гауссова распределения яркости по источнику.

Отчетливо просматривается, как при уменьшении размеров источника все более явно проявляется бимодальный характер распределения вероятности усиления, которому сопутствует увеличение частоты событий ослабления блеска (положительные значения на горизонтальной оси) для «седловых» изображений. Хорошо заметно также существенное различие в статистике микроусиления для изображений седловых точек и точек минимума, продемонстрированная в работе [41] и отмечавшаяся ранее в работах [23, 24, 51, 55]: гистограммы для «седловых» изображений систематически шире, чем для изображений, соответствующих минимуму поверхности Ферма.

Общий вывод упоминавшихся выше последних работ [1, 8, 25, 36] состоит в том, что при анализе и интерпретации статистики кривых блеска микролинзирования необходимо учитывать размер источника. При этом, ссылаясь на работу [36], все исследователи игнорируют конкретный вид распределения яркости по источнику, используя только понятие эффективного размера источника. Однако еще в 1992 и 1994 гг. было отмечено [12, 55], что один лишь центральный компактный источник не обеспечивает удовлетворительного соответствия модельных кривых блеска реально наблюдаемым, и что ситуацию могло бы улучшить введение некоей дополнительной протяженной структуры.

В 2003 г. Шилд и Вакулик [44] успешно промоделировали события микролинзирования в системе Q0957+561 с использованием двухкомпонентной модели квазара, основанной на эмпирической модели Элвиса [11], а в 2007 г. Вакулик и др. [49] применили двухкомпонентную модель для

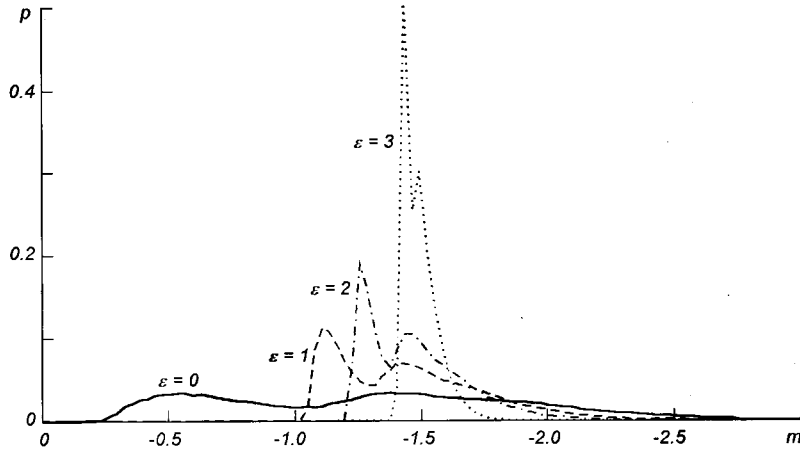


Рис. 2. Распределения вероятностей усиления для компонента А Q2237, рассчитанные для различного вклада ϵ протяженной структуры в интегральную светимость квазара

моделирования кривых блеска макроизображений квадрупольной системы Q2237+0305 и оценили ее параметры. Предложенная в этой работе фотометрическая модель квазара состоит из центрального компактного источника и окружающей его протяженной пространственной структуры, которая вносит ощутимый вклад в общую светимость квазара: согласно [49] примерно $2/3$ энергии, излучаемой квазаром в оптическом континууме, приходится на долю этой структуры.

Распределения вероятностей микроусиления, представленные на рис. 1, а также результаты [23, 41, 43] и более поздних работ [1, 8, 25, 36], где исследуется влияние размера источника, были получены для модели структуры квазара, состоящей только из центрального источника. Легко видеть, что протяженная структура должна демпфировать вариации блеска, вызванные событиями микролинзирования центрального компактного источника. Качественно это должно привести к сужению гистограмм распределения вероятностей микроусиления. Это демонстрируют гистограммы, приведенные на рис. 2, которые были построены нами по результатам моделирования (при тех же параметрах микролинзирования, что и на рис. 1) событий микролинзирования в компоненте А для двухкомпонентной модели квазара — центральный источник размером $0.25R_E$, окруженный протяженной структурой с различным вкладом в общую светимость квазара ϵ .

Таким образом, статистика вариаций блеска при микролинзировании оказывается весьма чувствительной к пространственной структуре квазара. Более того, работы последних лет [25, 43], показали, что размер квазара и функция масс объектов линзирующей галактики весьма сложным образом взаимодействуют друг с другом, совместно определяя статистические характеристики кривых блеска микролинзирования. В частности, Шехтер, Вамбсгансс и Льюис [43] на примере довольно экзотической функции масс (две популяции компактных объектов с массами порядка массы Солнца и 0.003 массы Солнца) показали, что распределения вероятностей усиления при микролинзировании для двух популяций с сильно различающимися массами выглядят очень похожими на случай, когда составляющая с более массивными компактными объектами погружена в непрерывно распределен-

ную материю, — ситуация, ранее рассмотренная в работе [41]. В работе [25] был продолжен анализ бимодальной функции масс с весьма различающимися массами и найдено, что есть критический режим, определяемый размером источника-квазара, при котором малые массы проявляют себя еще как компактные объекты. Увеличение размеров источника приводит к тому, что малые массы начинают проявлять себя уже как непрерывно распределенная материя.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ УСИЛЕНИЯ БЛЕСКА
ПРИ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯХ В СИСТЕМЕ Q2237+0305.
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Квадрупольно линзированный квазар Q2237+0305 (Крест Эйнштейна), открытый в 1984 г., является практически идеальным объектом для исследования проблемы темной материи с использованием статистики вариаций блеска, вызванных событиями микролинзирования. Из-за близости к наблюдателю линзирующей галактики ($Z_{Gal} \approx 0.04$) и чрезвычайной компактности системы лучи света от всех четырех компонентов проходят через густонаселенные области галактики на расстояниях около $1''$ от ее центра. События микролинзирования происходят в ней практически непрерывно и имеют характерные временные масштабы от нескольких месяцев до двух лет при амплитудах изменения блеска до 1^m . Наши первые наблюдения системы были выполнены в 1995 г. [47], и в дальнейшем проводились ежегодно.

На рис. 3 представлены кривые блеска компонентов Q2237+0305, построенные по результатам наблюдений в полосе R харьковской группой на горе Майданак (темные значки). Более светлыми символами представлены результаты мониторинга в полосе V , проводимого группой OGLE, которые к настоящему времени являются наиболее подробными и точными. Приведенные кривые блеска хорошо демонстрируют проблемы, возникающие при их статистическом анализе: данные измерений отягощены неизбежными случайными ошибками фотометрии, более высокими для более

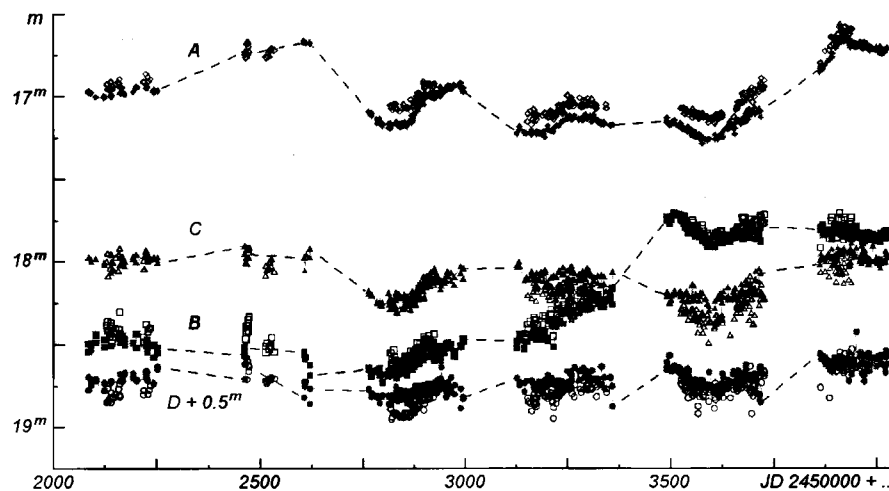


Рис. 3. Кривые блеска компонентов ГЛК Q2237+0305, полученные в спектральных полосах R (Майданак) и V (OGLE) в 2001—2006 гг.

слабых компонентов, выборки существенно нерегулярны, особенно неприятны промежутки, обусловленные сезонными периодами ненаблюдаемости.

Как было сказано выше, статистика вариаций блеска, вызванных событиями микролинзирования, оказывается весьма чувствительной к наличию в галактике непрерывно распределенной (возможно, темной) материи или компактных объектов с весьма малыми массами, радиус кольца Эйнштейна которых существенно меньше размера излучающей зоны источника. Соотношение между этой составляющей населения галактики и составляющей, представленной объектами со звездными массами, можно получить из сравнения модельных распределений вероятностей усиления с гистограммами, построенными по результатам наблюдений. Однако, насколько нам известно, работ, в которых было бы выполнено такое сравнение, до сих пор нет. Это связано с тем, что даже для такого подробно исследованного объекта, как Q2237+0305, регулярные наблюдения которых проводятся почти 20 лет, имеющиеся выборки наблюдательных данных не являются представительными. Согласно [50] для получения достоверных оценок статистических характеристик вариаций блеска микролинзирования потребуется не менее 100 лет непрерывных наблюдений.

Кроме того, из-за зависимости от погодных условий и условий видимости объектов, изменяющихся в течение года, исходные наблюдательные данные неравномерны, и необходимо найти способ корректной интерполяции нерегулярных данных. Необходимо также устранить из наблюдаемых кривых блеска составляющую, обусловленную переменностью самого источника-квазара. Даже для объекта Q2237+0305, где наблюдаются события микролинзирования с большими усилениями, вкладом собственной переменности квазара пренебрегать нельзя, тем более что временные масштабы обоих видов переменности, по-видимому, перекрываются. Для подготовки кривых блеска макроизображений для последующего статистического анализа нами был разработан алгоритм аппроксимации, основанный на теореме отсчетов, описанный в работе [33], и метод оценки вклада собственной переменности квазара, представленный там же.

Для построения гистограмм вариаций блеска компонентов Q2237+0305, помимо кривых блеска, приведенных на рис. 3, были использованы практически все доступные результаты фотометрии, полученные в полосе R с 1986 по 2006 гг. После вычитания из кривых блеска каждого компонента кривой блеска источника и их аппроксимации, выполненных по разработанным нами алгоритмам [33], были получены гладкие кривые блеска микролинзирования компонентов. Средняя квадратичная погрешность аппроксимации составила 0.023^m , 0.019^m , 0.024^m , 0.026^m для компонентов А, В, С, D соответственно, что сравнимо с ошибками фотометрии. Построенные по таким кривым блеска гистограммы распределения вероятностей усиления блеска компонентов А и С системы Q2237+0305 приведены на рис. 4. Так как согласно известным моделям макролинзы для Q2237+0305 [20] ожидаемые параметры микролинзирования для пар противоположных компонентов (А и В; С и D) достаточно близки, были построены и совместные гистограммы вариаций блеска компонентов А и В, а также С и D соответственно.

Прежде всего обращает на себя внимание заметное различие гистограмм для пар А и В, С и D, что является следствием различной четности (А и В соответствуют точкам минимума поверхности Ферма, С и D — «седловые» изображения), на что впервые обратили внимание Шехтер и Вамбсганс [41]. Для этих пар различны также параметры микролинзиро-

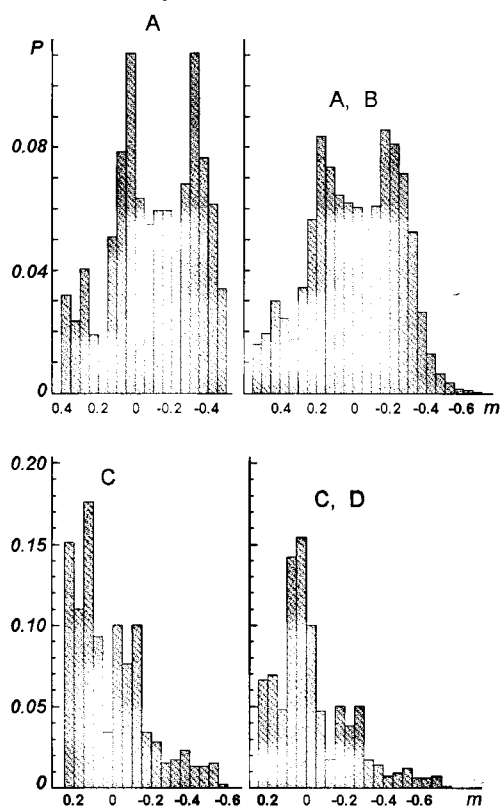


Рис. 4. Гистограммы распределения коэффициентов усиления для компонентов А, В, С и D квадрупольной системы Q2237+0305, построенные по всем доступным данным фотометрии системы в спектральной полосе R

вания μ и σ_s , и кроме того, из-за разницы расстояний этих пар компонентов от ядра галактики можно ожидать для них различного соотношения между звездным компонентом вещества линзирующей галактики и непрерывно распределенной (темной) материей.

Распределение вероятностей усиления для пары А—В заметно шире, чем для пары С—D, и имеет явно бимодальный характер. Интересно также отметить для компонентов С и D более высокую, нежели у пары А—В, вероятность ослабления блеска (положительные значения на горизонтальной оси), что согласуется с результатами моделирования [41]. Дальнейшие исследования предполагают моделирование при различном относительном содержании непрерывно распределенной материи событий микролинзирования источника, размер и пространственная структура которого предполагаются известными, с последующим сравнением модельных распределений вероятностей усиления с гистограммами, построенными по реальным наблюдательным данным.

На рис. 5, 6 приведены распределения вероятностей усиления, полученные по результатам моделирования событий микролинзирования для компонентов А и С системы Q2237+0305 с различным относительным содержанием непрерывно распределенной материи $\sigma = \sigma_c / \sigma_{tot}$ и для значений ϵ ,

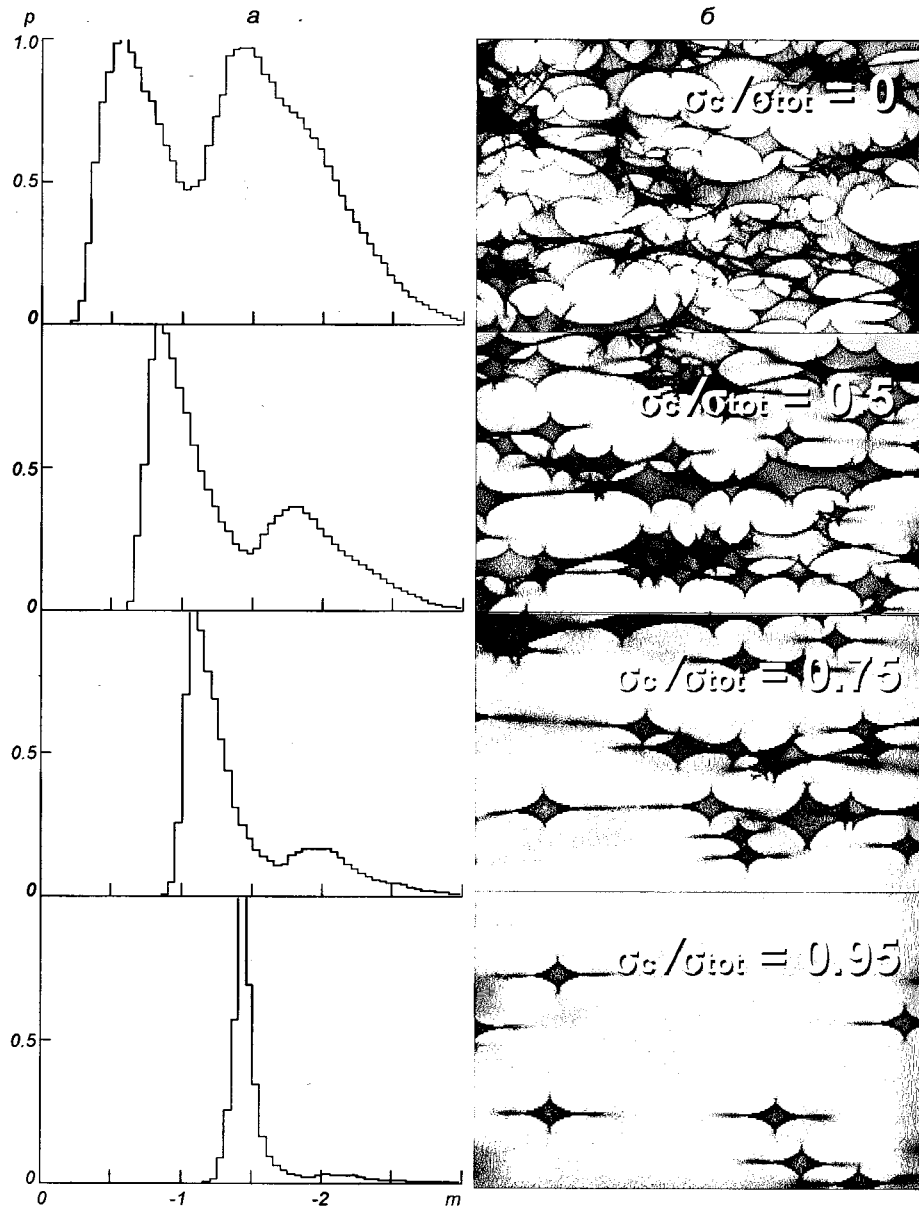


Рис. 5. Распределения вероятностей усиления, построенные для компонента А Креста Эйнштейна, а также соответствующие фрагменты карт усиления для различных значений σ_c/σ_{tot}

изменяющихся от 0 (только центральный источник) до 3. Напомним, что в работе [49] наиболее вероятное значение параметра ε равно 2. Видно, что относительное содержание непрерывно распределенной материи $\sigma = \sigma_c/\sigma_{tot}$ и вклад в общее излучение квазара протяженной структуры ε оказывают разное влияние на распределение вероятностей усиления. В то время как изменение величины σ заметно изменяет форму распределения, слабее влияя на диапазон изменений блеска, величина ε управляет в основном шириной функции распределения вероятностей усиления.

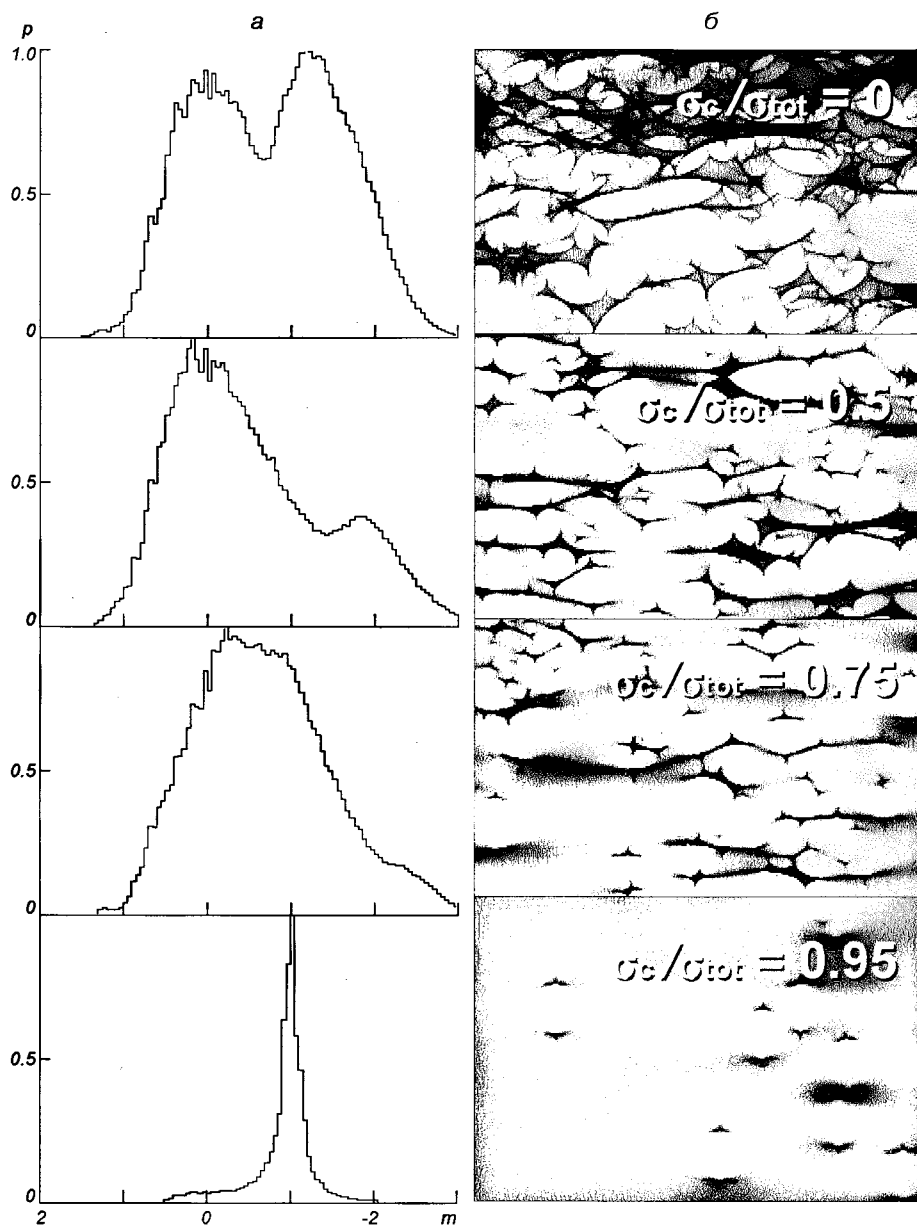


Рис. 6. Распределения вероятностей усиления, построенные для компонента С Креста Эйнштейна, а также соответствующие фрагменты карт усиления для различных значений σ_c / σ_{tot}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены гистограммы распределения вероятности усиления блеска при микролинзировании компонентов квадрупольно линзированного квазара Q2237+0305. Несмотря на пессимистический прогноз возможностей статистического анализа переменности в этом объекте, содержащийся в работе [50], с которым нельзя не согласиться, попытки такого анализа делались и ранее на основании наблюдений первых 8—

10 лет [23, 24]. В настоящей работе для построения гистограмм вероятностей усиления впервые использована наиболее полная и однородная выборка данных, полученных за двадцатилетний период наблюдений этого объекта в полосе R .

Для построения гистограмм был применен разработанный нами ранее метод оценки и устранения из наблюдаемых кривых блеска макроизображений составляющей, обусловленной собственной переменностью квазара. Был использован также оригинальный метод аппроксимации кривых блеска, основанный на теореме отсчетов.

Проблема оценки содержания непрерывно распределенной материи в галактиках, линзирующих удаленные квазары, с использованием метода гистограмм предполагает сравнение гистограмм, построенных на основании многолетних наблюдений изменений блеска макроизображений, с результатами цифрового моделирования событий микролинзирования. Для этого прежде всего необходимо задание физически обоснованной модели пространственной структуры источника. В работе путем цифрового моделирования показано, как влияет структура источника на вид распределения вероятностей усиления блеска для изображений различной четности. С помощью цифрового моделирования продемонстрировано также влияние относительного содержания непрерывно распределенной (темной) материи на форму распределений вероятностей микроусиления. Основываясь на современных предсказаниях относительно ожидаемого вклада темной материи в общую массу вещества галактик, моделирование выполнялось для высоких значений величины σ от 0.5 до 0.95. В процессе работы появились аргументы в пользу существенно меньших значений σ . На проверку этих аргументов потребуется значительное время, так как необходимые модельные эксперименты требуют значительных вычислительных ресурсов.

В заключение отметим, что в настоящее время в системе Q2237+0305 происходит весьма знаменательное событие: впервые за всю двадцатилетнюю историю наблюдений в самом слабом (и до сих пор самом «спокойном») компоненте D происходит довольно значительное событие микролинзирования. Это тем более интересно, что его блеск существенно ниже той величины, которую предсказывают для него все известные макромодели.

Работа выполнена при поддержке Целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины «Исследования структуры и состава Вселенной, скрытой массы и темной энергии» (шифр «Космомикрофизика»).

1. Bate N. F., Webster R. L., Wyithe J. S. B. Smooth matter and source size in microlensing simulations of gravitationally lensed quasars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—381, N 4.—P. 1591—1596.
2. Bekenstein J., Milgrom M. Does the missing mass problem signal the breakdown of Newtonian gravity? // *Astrophys. J.*—1984.—286, N 1.—P. 7—14.
3. Bradac M., Schneider P., Steinmetz M., et al. B1422+231: The influence of mass substructure on strong lensing // *Astron. and Astrophys.*—2002.—388, N 3.—P. 373—382.
4. Chiba M. Probing dark matter substructure in lens galaxies // *Astrophys. J.*—2002.—565, N 1.—P. 17—23.
5. Clowe D., Gonzalez A., Markevitch M. Weak-lensing mass reconstruction of the interacting cluster 1E 0657-558: direct evidence for the existence of dark matter // *Astrophys. J.*—2004.—604, N 2.—P. 596—601.
6. Clowe D., Randall S. W., Markevitch M. Catching a bullet: direct evidence for the existence of dark matter // *Nucl. Phys. B. Proc. Supp.*—2007.—173.—P. 28—31.
7. Congdon A. B., Keeton Ch. R. Multipole models of four-image gravitational lenses with anomalous flux ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—364, N 4.—P. 1459—1466.

8. Congdon A. B., Keeton Ch. R., Osmer S. J. Microlensing of an extended source by a power-law mass distribution // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—376, N 1.—P. 263—272.
9. Dalal N., Kochanek C. S. Direct detection of cold dark matter substructure // *Astrophys. J.*—2002.—572, N 1.—P. 25—33.
10. Dobler G., Keeton Ch. R., Wambsganss J. Microlensing of central images in strong gravitational lens systems // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—377, N 3.—P. 977—986.
11. Elvis M. A structure for quasars // *Astrophys. J.*—2000.—545, N 1.—P. 63—76.
12. Jaroczynski M., Wambsganss J., Paczynski B. Microlensed light curves for thin accretion disks around Schwarzschild and Kerr black holes // *Astrophys. J.*—1992.—396, N 2.—P. L65—L68.
13. Jee M. J., Ford H. C., Illingworth G. D., et al. Discovery of a Ringlike Dark Matter Structure in the Core of the Galaxy Cluster Cl 0024+17 // *Astrophys. J.*—2007.—661, N 2.—P. 728—735.
14. Keeton Ch. R. Cold Dark Matter and Strong Gravitational Lensing: Concord or Conflict? // *Astrophys. J.*—2001.—561, N 1.—P. 46—60.
15. Keeton Ch. R., Gaudi B. S., Petters A. O. Identifying lenses with small-scale structure. I. Cusp lenses // *Astrophys. J.*—2003.—598, N 1.—P. 138—161.
16. Keeton Ch. R., Gaudi B. S., Petters A. O. Identifying lenses with small-scale structure. II. Fold lenses // *Astrophys. J.*—2005.—635, N 1.—P. 35—59.
17. Kent S. M., Falco E. E. A model for the gravitational lens system 2237+0305 // *Astron. J.*—1988.—96, N 5.—P. 1570—1574.
18. Klypin A., Kravtsov A., Valenzuela O. Where are the missing galactic satellites? // *Astrophys. J.*—1999.—522, N 1.—P. 82—92.
19. Kochanek C. S. The implications of lenses for galaxy structure // *Astrophys. J.*—1991.—373, N 1.—P. 354—368.
20. Kochanek Ch. S. Quantitative interpretation of quasar microlensing light curves // *Astrophys. J.*—2004.—605, N 1.—P. 58—77.
21. Kochanek C. S., Dalal N. CDM Substructure in Gravitational Lenses: Tests and Results // *AIP Conf. Proc.*—2003.—666.—P. 103—112.
22. Kochanek C. S., Dalal N. Tests for substructure in gravitational lens // *Astrophys. J.*—2004.—610, N 1.—P. 69—79.
23. Lewis G. E., Irwin M. J. The statistics of microlensing light curves. I. Amplification probability distributions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—276, N 1.—P. 103—114.
24. Lewis G. E., Irwin M. J. The statistics of microlensing light curves II. Temporal analysis // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—283, N 1.—P. 225—240.
25. Lewis G. F., Gil-Merino R. Quasar microlensing: when compact masses mimic smooth matter // *Astrophys. J.*—2006.—645, N 2.—P. 835—840.
26. Mao Sh. Gravitational microlensing by a single star plus external shear // *Astrophys. J.*—1992.—389, N 1.—P. 63—67.
27. Mao Sh., Jing Y., Ostriker J. P., Weller J. Anomalous Flux Ratios in Gravitational Lenses: For or against Cold Dark Matter? // *Astrophys. J.*—2004.—604.—P. L5—L8.
28. Mao Sh., Schneider P. Evidence for substructure in lens galaxies? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—295, N 1.—P. 587—592.
29. McKean J. P., Koopmans L. V. E., Flack C. E., et al. High-resolution imaging of the anomalous flux ratio gravitational lens system CLASS B2045+265: dark or luminous satellites? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—378, N 1.—P. 109—118.
30. Metcalf R. B., Madau P. Compound gravitational lensing as a probe of dark matter substructure within galaxy halos // *Astrophys. J.*—2001.—563, N 1.—P. 9—20.
31. Metcalf R. B., Zhao H. Sh. Flux ratios as a probe of dark substructures in quadruple-image gravitational lenses // *Astrophys. J.*—2002.—567, N 1.—P. L5—L8.
32. Milgrom M. A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis // *Astrophys. J.*—1983.—270, N 1.—P. 365—370.
33. Minakov A. A., Schild R. E., Vakulik V. G., et al. Microlensing events in gravitationally lensed quasar Q2237+0305: stars or dark matter? // *Practical Cosmology: Proc. Int. Conf. (23—27 June 2008, Saint Petersburg, Russia)*. — Saint Petersburg, 2008.—Vol. 1.—P. 180—186.
34. Miranda M., Jetzer Ph. Substructures in lens galaxies: PG1115+080 and B1555+375, two fold configurations // *Astrophys. and Space Sci.*—2007.—312, N 3-4.—P. 203—214.
35. Moore B., Calcaneo-Roldan C., Stadel J., et al. Dark matter in Draco and the Local Group: Implications for direct detection experiments // *Phys. Rev.*—2001.—64, N 6.—P. 301—314.
36. Mortonson M. J., Schechter P. L., Wambsganss J. Size is everything: universal features of quasar microlensing with extended sources // *Astrophys. J.*—2005.—628, N 2.—P. 594—603.
37. Oort J. H. The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems // *Bull. Astron. Inst. Nether.*—1932.—6, N 238.—P. 249—387.

38. Paczynski B. Gravitational microlensing by the galactic halo // *Astrophys. J.*—1986.—304, N 1.—P. 1—5.
39. Paczynski B. Gravitational microlensing at large optical depth // *Astrophys. J.*—1986.—301, N 1.—P. 503—516.
40. Pooley D., Blackburne J. A., Rappaport S., Schechter P. L. X-ray and optical flux ratio anomalies in quadruply lensed quasars: Zooming in on quasar emission regions // *Astrophys. J.*—2007.—661, N 1.—P. 19—30.
41. Schechter P., Wambsganss J. Quasar microlensing at high magnification and the role of dark matter: enhanced fluctuations and suppressed saddle points // *Astrophys. J.*—2002.—580, N 2.—P. 685—695.
42. Schechter P., Wambsganss J. The dark matter content of lensing galaxies at 1.5R_{sube} // *IAUS Proc.*—2004.—N 220.—P. 103—106.
43. Schechter P. L., Wambsganss J., Lewis G. F. Qualitative aspects of quasar microlensing with two mass components: magnification patterns and probability distributions // *Astrophys. J.*—2004.—613, N 1.—P. 77—89.
44. Schild R., Vakulik V. Microlensing of a Ring Model for Quasar Structure // *Astron. J.*—2003.—126, N 2.—P. 689—695.
45. Schneider P. An analytically soluble problem in fully nonlinear statistical gravitational lensing // *Astrophys. J.*—1987.—319, N 1.—P. 9—13.
46. Schneider P., Weiss A. The gravitational lens equation near cusps // *Astron. and Astrophys.*—1992.—260, N 1-2.—P. 1—13.
47. 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—79.
48. Vakulik V. G., Schild R. E., Dudinov V. N., et al. Observational determination of the time delays in gravitational lens system Q2237+0305 // *Astron. and Astrophys.*—2006.—447, N 3.—P. 905—913.
49. Vakulik V. G., Schild R. E., Smirnov G. V., et al. Q2237+0305 source structure and dimensions from light curves simulation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—382, N 2.—P. 819—826.
50. Wambsganss J., Paczynski B., Schneider P. Interpretation of the microlensing event in QSO 2237+0305 // *Astrophys. J.*—1990.—358, N 2.—P. L33—L36.
51. Wambsganss J. Gravitational microlensing. The effect of a single lens and the impact of sparse sampling // *Astrophys. J.*—1992.—392, N 1.—P. 424—431.
52. Wambsganss J. Probability distributions for the magnification of quasars due to microlensing // *Astrophys. J.*—1992.—386, N 1.—P. 19—29.
53. Webster R. L., Ferguson A. M. N., Corrigan R. T., Irwin M. J. Interpreting the light curve of Q2237+0305 // *Astron. J.*—1991.—102, N 6.—P. 1939—1945.
54. Witt H. J., Mao Sh. Interpretation of microlensing events in Q2237 + 0305 // *Astrophys. J.*—1994.—429, N 1.—P. 66—76.
55. Witt H. J., Mao Sh., Schechter P. L. On the universality of microlensing in quadruple gravitational lenses // *Astrophys. J.*—1995.—443, N 1.—P. 18—28.
56. Wyithe J. S. B., Turner E. L. Determining the microlens mass function from quasar microlensing statistics // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—320, N 1.—P. 21—30.
57. Zwicky F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helvetica Phys. Acta.*—1933.—6.—P. 110—127.

Поступила в редакцию 30.09.08