Uzbek Journal of Physics

Vol.20(№5) 2018 PP.275-282

АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗБРАННЫХ ГРАВИТАЦИОННО-ЛИНЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ. II. B1422+237

Т.А. Ахунов

Национальный университет РУз, кафедра астрономии и физики атмосферы, Ташкент, Узбекистан

(Получена 02.03.2018)

B1422+237 рақамли гравитацион линзаланган система (ГЛС) нинг биз аниқлаган узун даврли узлуксиз мониторингли натижалари маълумотлари таҳлил этилди. ГЛС нинг компонентларини қайта ишлаш учун фотометрик усулнинг таснифи қисқа равишда берилган, равшанлик эгри чизиқлари таҳлил қилинган, кучли микролинзаланиш ҳодисаси топилган, кечикиш вақтининг эҳтимолли қийматлари аниқланди.

Анализируются полученные нами данные долголетнего непрерывного мониторинга гравитационно-линзированной системы (ГЛС) B1422+237. Дано краткое описание фотометрического метода обработки изображений ГЛС, анализируются кривые блеска, обнаружено сильное микролинзирование, определены вероятные значения времени задержки.

The observational data of long-term continuous monitoring of the gravitationally lensed system B1422+237 are analyzed. A brief description of the photometric method for image processing is given, light curves are analyzed, and strong microlensing is revealed. Preliminary values for time delay were found.

I. ВВЕДЕНИЕ

Явление гравитационного линзирования является одним из самых активно изучаемых областей современной астрономии. Результаты исследований гравитационно-линзированных систем (ГЛС) позволяют изучить смежные фундаментальные проблемы космологического масштаба, н-р, дают возможность косвенного наблюдения и исследования невидимой материи, а также определения ряда до сих пор окончательно не установленных космологических параметров: измерение внегалактических расстояний, уточнение тонкой структуры ядер галактик и квазаров, поиск новых планет, протогалактик, зарождающихся галактик и др. В связи с этим исследование ГЛС, в том числе гравитационно-линзированных квазаров (ГЛК), является одной из важнейших задач современной астрономии и космологии. Результаты наблюдений времен задержки, характера микролинзирования, параметров гравитационной линзы позволяют пролить свет на ряд смежных космологических и астрофизических проблем. А именно, с помощью комбинации значений времени задержки и модельных построений можно получить сведения о геометрии Вселенной, через микролинзирование судить о наличии и свойствах темной материи как внутри галактик-линз, так и в межгалактическом пространстве. Мы можем также исследовать их межзвездную среду по поглощению пылью или по абсорбционным линиям, появляющимся в спектрах множественных изображений квазара и т.д. [1]

Но для того чтобы получить необходимую информацию и затем использовать ее для дальнейшего анализа, в первую очередь, необходимы подробные и как

можно долговременные данные о кривых блеска. С другой стороны, подобные сведения нужны о как можно большем количестве ГЛС, то есть нужно собирать подробную статистику от большого количества таких объектов. В частности, статистика линзированных квазаров и измерение временных задержек между мнимыми изображениями в них дает исследователям физически осмысленные ограничения для космологических параметров при построении моделей [2].

II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ B1422+232

ГЛС B1422 является одним из самых мало исследованных объектов. Она была открыта в 1992 году [3]. Были проведены как оптические, так и радионаблюдения удаленного квазара с красным смещением zq=3.62 и впервые идентифицирована как четырехкомпонентная система с суммарным блеском 16.5 звездных величин (рис. 1). В том же году были проведены инфракрасные наблюдения. Обработка наблюдательного материала позволила определить линзирующую галактику в этой системе, красное смещение которой оказалось zl~1 [4].

Оптические наблюдения подтвердили предыдущие выводы, а именно, они отождествили ранее обнаруженные 4 точечных источника и получили значения их блеска. Несколько позже рассматривались модели, в которых линзирующее тело представлялось в виде комбинации одной галактики с изотермической сферой и двух галактик как точечных источников, либо используется один изотермический эллипсоид. Оказалось, что такие модели достаточно хорошо воспроизводят гравитационную систему B1422. Группа Эллингсона [5] в 1994 году вновь попыталась получить более детальные параметры линзы-галактики. По их мнению, фотометрические свойства компонентов системы и отношение масса/яркость галактики позволяют предположить, что здесь имеет место галактика раннего типа с красным смещением в пределах от 0.4 до 0.8. Более точное значение этого параметра соответствует zg=0.647. Фотометрическое измерение блеска системы показало, что блеск системы в целом в R фильтре равен MA+B+C+D=15.59m±0.06m, а компонентов A=1.0, B=1.52, C=0.73, D=0.037. Впервые о микролинзировании в этой системе говорится в статье Хьорфа и др. [6] на основе измерений и сравнения блеска компонентов.

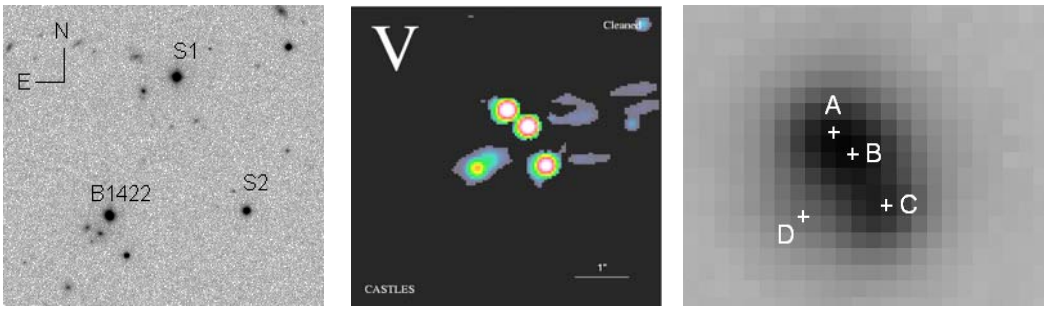


Рис. 1. ГЛС B1422 с окружающими опорными звездами в R фильтре (получена 13.04.2001 на телескопе АЗТ-22). S1 и S2 – опорные звезды. Размер поля 2.1×1.83 угловых минут (слева). Крупномасштабное изображение B1422+231, полученное на телескопе Хаббла (в середине). На майданакских изображениях (справа) хорошо видны компоненты A, B и C. Блеск компонента D оказался за пределом чувствительности светоприемника, поэтому его трудно заметить.

Последующие фотометрические измерения выявили короткопериодическую переменность источника-квазара в ГЛС B1422 в течение одного дня. Было найдено, что отношения потоков между компонентами в оптическом и радиодиапазонах существенно отличаются, а показатели цветов галактики соответствуют эллиптической галактике с красным смещением ~0.4. Дальнейшие исследования линзирующей галактики показали, что она находится в составе компактного скопления с красным смещением 0.338, радиусом r_{gr}=35 h^{-1} и массой M=1.4×10^{13} $h^{-1}M_{\Theta}$. Патнаик и Поркас в 1998 г. [3] измерили отношения потоков между компонентами в нескольких участках радиодиапазона и нашли значительные несоответствия между отношениями потоков в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах у *A* компонента. Это, в первую очередь, можно объяснить наличием микролинзирования [7]. В 2000 г. впервые были найдены значения времени задержки между компонентами B1422 [8] и показано, что эта величина между парами равна: *BA*=1.5±1.4 дня, *AC*=7.6±2.5 дня и *BC*=8.2±2.0 дня. Согласно модельным расчетам время задержки между компонентами *A* и *C* ~0.4 h^{-1}. В 2005 г. на основе инфракрасных наблюдений B1422+231 были введены дополнительные ограничения на структуру линзирующей галактики [9]. С 2005 г. никаких результатов по B1422+231 не опубликовано.

Из приведенного обзора работ по исследуемому объекту видно, что эта ГЛС исследовалась ранее довольно часто. Однако не было проведено мониторинговых наблюдений, по крайней мере, в оптическом диапазоне. Одной из причин, по-видимому, является то, что компоненты этой системы очень трудно разрешить из-за экстремально малых расстояний между ними, максимальное расстояние между противоположными компонентами ~1.3″ (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Координаты компонентов ГЛС B1422+231 относительно центрального изображения B (в угловых секундах). Из каталога Castles [10].

		A	*B*	*C*	*D*	*G*
RA		0.385±0.0	0	–0.336±0.003	0.948±0.004	0.742±0.003
Положение	Dec.	0.317±0.0	0	–0.750±0.003	–0.802±0.003	–0.656±0.004

III. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА H1413+117

Для наблюдения этого объекта мы были вынуждены выбирать ночи с самыми благоприятными астроклиматическими условиями, а если учесть то, что этот объект доступен наблюдениям в основном в зимне-весенний сезон, то вероятность получения хорошего изображения намного снижается. За последние годы (2003-2008 г.) нам удалось собрать достаточное количество наблюдательного материала для подробного исследования этой системы. В итоге мы получили 197 наблюдательных точек в *R* фильтре и 29 точек в *V* фильтре. Нам пришлось исключить из дальнейшего анализа кадры с неудовлетворительным качеством, а именно с высоким значением фона неба (больше 1500) и плохим сингом (больше 1.4″). После этого осталось 132 точки в *R* фильтре и 20 точек в *V* фильтре. Фотометрия этого объекта, как уже говорилось, из-за малых расстояний между компонентами, достаточно трудная задача. Поэтому в этом случае мы не можем пользоваться хорошо апробированной программой DAOPHOT. Для этого объекта использована программа GALFIT, хотя здесь и не требуется обработки галактики-линзы.

Для построения модели ФРТ мы выбрали звезду S1 (рис. 1). Предварительная обработка и нормализация модели ФРТ была проведена в рамках пакета программ IRAF. Так как линзирующая галактика очень слабая (m_{gal}=21.8^m) и не видна на наших изображениях, мы не стали учитывать ее присутствия.

В первую очередь мы получили кривую блеска системы в целом (рис. 2). Этот график получился очень многообещающим. Видно, что источник-квазар показывает заметные, можно сказать периодические, изменения блеска, связанные с ее внутренней переменностью. В самом начале наблюдательной кампании, в 2003 году, блеск квазара находился на самом пике. Со следующего же сезона блеск системы сразу же устремился вниз к своему "спокойному" состоянию, и падение продолжалось до конца 2006 года. А со следующего года видно, что блеск снова начал увеличиваться. Амплитуда изменения ~ 0.25^m звездных величин.

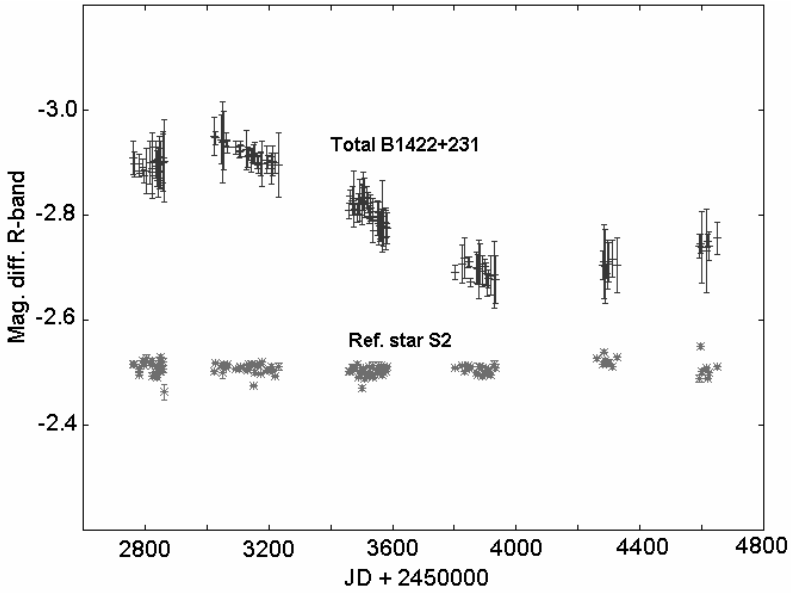


Рис. 2. Кривая блеска квазара B1422 и референтной звезды S2 за 2003-2008 г.г в *R*-полосе.

Такое замечательное поведение общего блеска источника-квазара объясняется, по-видимому, тем, что в нем происходит периодическое падение аккреционного вещества на центр квазара, что вызывает увеличение яркости с соответствующим периодом.

Интересно было посмотреть на поведение компонентов в отдельности. В первую очередь мы использовали первый вариант программы Galfit, где все параметры являются свободными. Приложение ее к данным за 2003-2005 г.г. показало очень странную картину (рис. 3). Во-первых, кривые блеска в 2003 г. совершенно не коррелируют с общей кривой за тот же период. С другой стороны, они показывают очень большой разброс точек. Эти факты пока не получили убедительного объяснения. Но, по-видимому, это связано с предварительной обработкой сырых изображений. В-третьих, кривая блеска четвертого компонента *D* на порядок, а то и в большей степени, рассеянна по сравнению с другими. Вследствие этого совершенно невозможно проследить за ее поведением. Это

естественным образом объясняется ее слабым блеском. Из-за этого факта мы были вынуждены ограничиться в дальнейшем кривыми блеска только первых трех (*A*, *B*, *C*) компонентов.

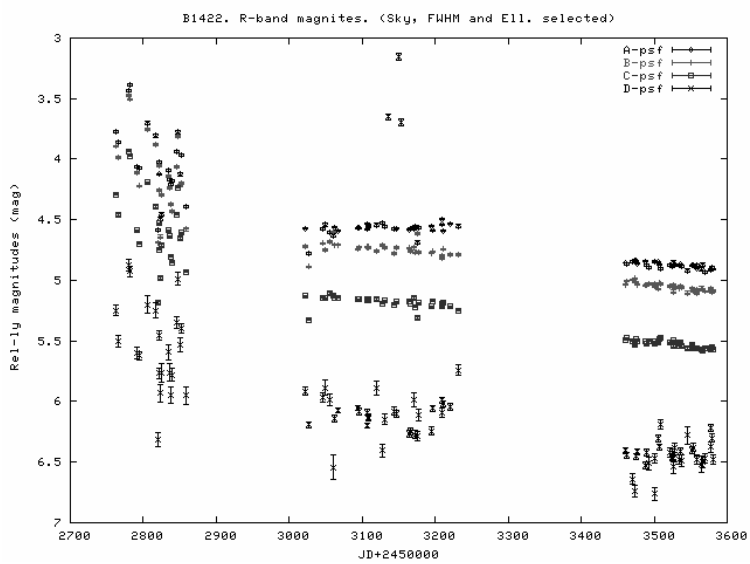


Рис. 3. Кривая блеска компонентов ГЛС B1422 относительно референтной звезды S2. Кривые компонентов *A*, *B*, *C*, *D* соответственно сверху вниз.

В дальнейшем мы использовали обновленную версию Galfit, т.е. во входных параметрах координаты компонентов можно было жестко связать относительно центральной. В этом случае задача минимизации параметров сводится к отысканию на изображении не компонентов в отдельности, а конфигурации в целом. Потоки же компонентов остаются неизменными. Профили яркости описываются двумерной функцией Гаусса. В это же время мы воспользовались также и разработанной нами фотометрической программой на основе прямой подгонки параметров ФРТ к исследуемым изображениям. Здесь же профили яркости компонентов описываются функцией Моффата.

IV. АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА

В результате работы этих программ мы получили следующие графики, изображенные на рис. 4. В верхней части изображены кривые блеска, полученные с помощью нашей программы, ниже показаны результаты работы обновленной программы Galfit. В целом поведение блеска компонентов повторяет изменения блеска источника в целом. Но между указанными ниже графиками есть существенное расхождение. В первом случае очень трудно отделить кривые *A* и *B* компонентов друг от друга. К тому же они показывают сравнительно большой разброс. Помимо этого, расстояние в звездных величинах между ними и компонентом *C* примерно 0.05^{m}. Кривые же, полученные Galfit, проявляются намного четче. У них меньший разброс, а расстояние до *C* ~0.04^{m}. Исходя из этих соображений, можно утверждать, что нижние графики, т.е. полученные с помощью Galfit, являются более достоверными. В таком случае в ГЛС B1422+231 можно

указать как минимум два события микролинзирования – в 2003 году и в последнем 2008 году. В обоих случаях кривые блеска компонентов *B* и *C* в целом совпадают, а вот поведение компонента *A* заметно отличается от них.

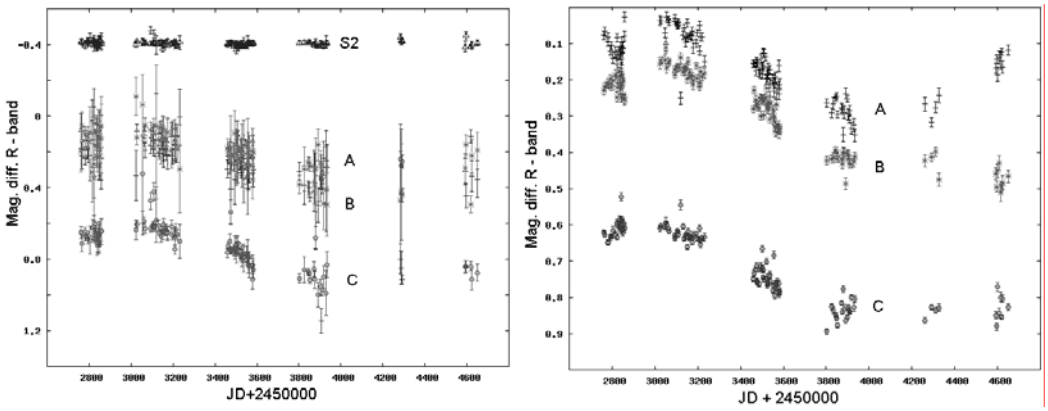


Рис. 4. Кривые блеска компонентов *A*, *B* и *C* ГЛС B1422, полученные в *R* фильтре. Верхние кривые получены программой прямой подгонки параметров ФРТ, нижние получены усовершенствованной программой Galfit. Показана также кривая звезды сравнения S2.

Утверждение о событии микролинзирования в 2003 году косвенно подтверждают кривые показателей цветов компонентов рассматриваемого объекта (рис. 5). Из рисунка видно, что цвет компонентов *B* и *C* не меняется. Но цвет компонента *A* имеет тренд, направленный в синюю сторону спектра. Это является свидетельством микролинзирования в этом компоненте.

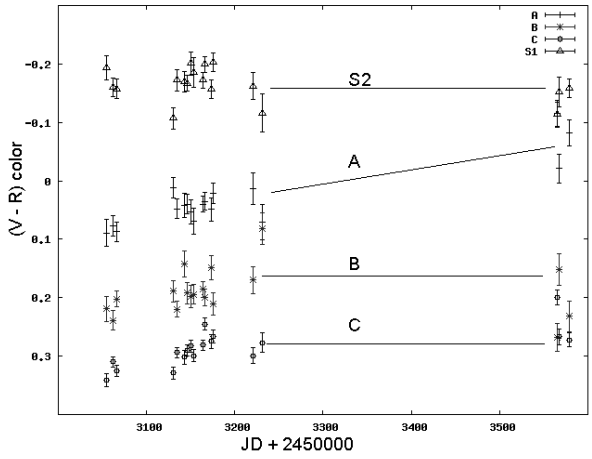
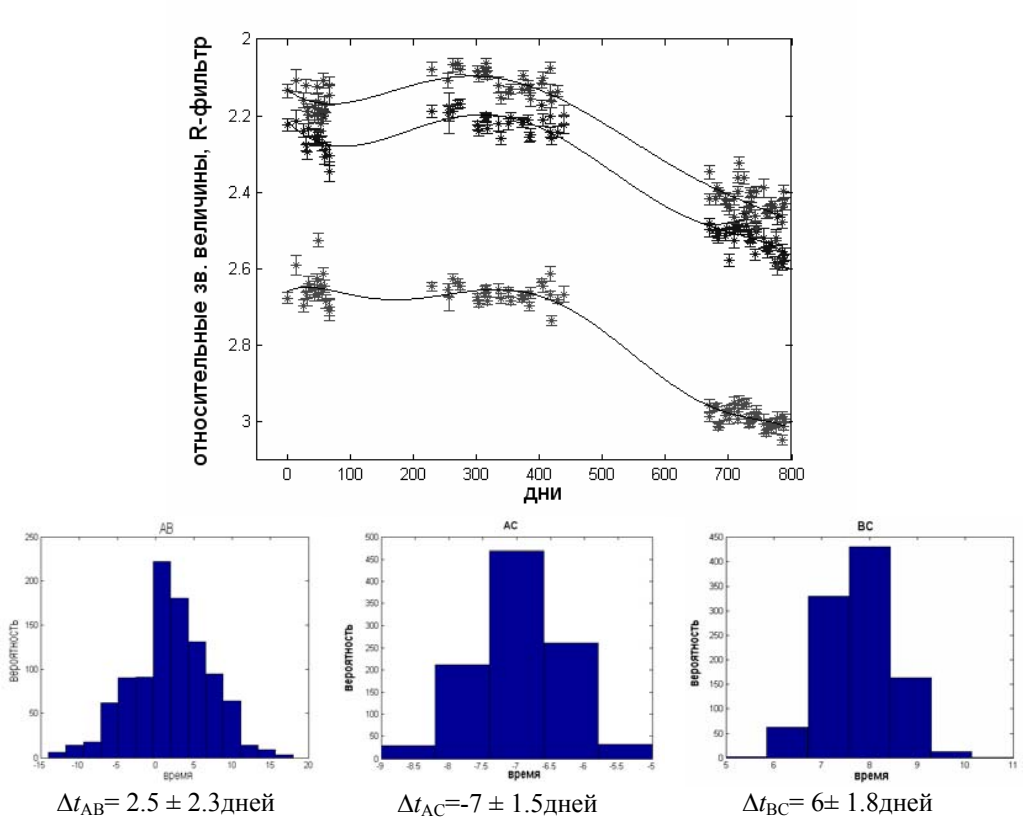


Рис. 5. Кривые показателей цвета (*V*-*R*) звезды сравнения S2, а также *A*, *B* и *C* компонентов ГЛК B1422+231.

V. ВЕРОЯТНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ В B1422+237

Взяв за основу, полученные нами кривые блеска компонентов B1422+231 мы попытались измерить время задержки между изменениями их яркости. Для анализа

кривых блеска и измерения времени задержки был использован известный метод полиномиальной подгонки и интерполяции, который хорошо подходит для неравномерных и прерывистых данных. Используя полученные кривые блеска, при помощи полиномов мы получили искусственную регулярную выборку. А затем, с помощью метода Монте-Карло со случайными числами, мы получили по 1000 случайных реализаций кривых блеска для обоих объектов (рис. 6).



Δt_{AB}= 2.5 ± 2.3дней Δt_{AC}=-7 ± 1.5дней Δt_{BC}= 6± 1.8дней

Рис. 6. Верхняя панель: избранные для интерполирования и восстановленные (сплошная линия) кривые блеска. Нижняя панель: гистограммы наиболее вероятного сдвига по времени между парами кривых блеска B1422+231.

Тонким местом метода полиномиальной подгонки является оптимальный выбор степени полинома так, чтобы максимально точно описать наблюдаемые изменения блеска, т.е. не подавить естественную переменность блеска (как долго-периодических, так и короткопериодических). И в то же самое время интерполяция не должна давать дополнительные, часто ложные признаки переменности.

При этом мы использовали для интерполяции всю кривую блеска в целом, а не сезоны в отдельности. Так, мы могли бы найти время задержки на основе долгопериодических изменений, которые происходят в источнике-квазаре. На рис. 6 приведены наблюдаемые кривые блеска, их интерполированные аналоги (сплошные кривые). Ниже приведены гистограммы, где показаны значения времени задержки для случайных реализаций кривых блеска. Там же показаны средние Δt задержки и доверительные интервалы.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, нами найдено долговременное (более 6 лет) изменение блеска в источнике квазаре ГЛС B1422+231. Амплитуда изменения блеска порядка 0.25^m звездных величин. Кривые блеска трех компонентов этой ГЛС на фоне переменности источника показывают также и микролинзирование.

Поиск корреляции кривых блеска показал, что у обоих ГЛС явно присутствует микролинзирование и для измерения времени задержки необходимо отобрать максимальный по продолжительности участок с максимальной корреляцией. В случае B1422+231 это особо заметно, хорошо коррелировали сезоны 2003–2005 г., как видно из рис. 6. Из результатов измерений времени задержки у B1422+231, представленных на этом рисунке, видно, что подобрать оптимальную степень полинома весьма проблематично.Это удалось только для двух пар компонентов при выборе периода с 2003 по 2006 гг. Большой разброс значений пока не позволяет получить более точные значения времени задержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. C.S. Kochanek, P. Schneider, J. Wambsganss. Gravitational Lensing. Part 2: Strong, Weak & Micro (2006). Proceedings of the 33rd Saas-Fee Advanced Course. G. Meylan, P. Jetzer & P. North, eds. (Springer-Verlag: Berlin, 1991).
2. E.L. Turner, ApJ **365**, L43 (1990).
3. A.R. Patnaik, R.W. Porcas, ASPS **144**, 319 (1992).
4. C.R. Lawrence et al., MNRAS **259**, 5P (1992).
5. H.K.C. Yee, E. Ellingson, AJ **107**, 28 (1994).
6. J. Hjorth, A.O. Jausen, A.R. Patnaik, J.-P. Kneib, IAUS **173**, 343 (1996).
7. A.R. Patnaik, R.W. Porcas, ASPS **144**, 319 (1998).
8. A.R. Patnaik, D. Narasimha, MNRAS **326**, 1403 (2001).
9. M. Chiba, T. Minezaki, N. Kashikawa, H. Kataza, K.T. Inoue, ApJ **627**, 53 (2005).
10. CASTLES: cfa-www.harvard.edu/castles/