



УДК:159.9(575.1)

Дилшод БЕКОВ,

базовый докторант (PhD) Национальный университет Узбекистана

Талъат АХУНОВ,

доктор ф.м.н., зав. кафедрой ААФК Национальный университет Узбекистана

Отабек БУРХОНОВ,

заведующий отделом Астрономический институт АН РУз

Нигина АЛИМОВА,

базовый докторант (PhD) Национальный университет Узбекистана

E-mail: talat77@rambler.ru,

профессор, ф.м.н. К.Т. Миртаджиева на основе обзора

КРИВЫЕ БЛЕСКА ЛИНЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ ГЛК SDSS J0806+2006 И ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ

Аннотация

В работе представлены результаты фотометрического анализа изображений двойного гравитационно линзированного квазара SDSS J0806+2006, наблюдавшегося в Майданаской обсерватории в период 2017-2021 г.г. Кривые блеска показали, что яркость источника-квазара в данный период имеет заметную, и возможно периодическую, переменность. Вычислено вероятное значение времени задержки $\Delta t_{AB} = -17.0 \pm 2.5$ дней, лидирующим является более яркий компонент А. Эта величина согласуется с ранее предсказанными теоретическими значениями для этой системы.

Ключевые слова: Гравитационно линзированный квазар, SDSS J0806+2006, время задержки.

LIGHT CURVES OF THE LENSED IMAGES OF GLQ SDSS J0806+2006 AND TIME DELAY ESTIMATION

Abstract

The paper presents the results of photometric analysis of images of the double gravitationally lensed quasar SDSS J0806+2006, observed at the Maidanak Observatory in the period 2017-2021. The light curves showed that the brightness of the source-quasar in this period has a noticeable, and possibly periodic, variability. The probable value of the delay time $\Delta t_{AB} = -17.0 \pm 2.5$ days is calculated, the brighter component A is the leading one. This value is consistent with previously predicted theoretical values for this system.

Key words: Gravitational lensed quasar, SDSS J0806+2006, time delay

SDSS J0806+2006 ГЛК ЛИНЗАЛАНГАН ТАСВИРЛАРИНИНГ РАВШАНЛИК ЭГРИ ЧИЗИҚЛАРИ ВА КЕЧИШ ВАҚТИНИ ҲИСОБЛАШ

Аннотация

Ушбу мақолада 2017-2021 йилларда Майданак расадхонасида кузатилган SDSS J0806+2006 қаррали гравитацион линзаланган квазар тасвирларининг фотометрик таҳлили натижалари келтирилган. Равшанлик эгри чизиқлари маълум бир даврда квазар манбаъсининг ёрқинлиги сезиларли ва эҳтимол даврий ўзгарувчанликка эга эканлигини кўрсатди. Кечикиш вақтининг эҳтимолий қиймати $\Delta t_{AB} = -17.0 \pm 2.5$ кун эканлиги ҳисоблаб чиқилди, нисбатан ёрқинроқ А компоненти етакчи эканлиги маълум. Бу қиймат ушбу тизим учун олдиндан тахмин қилинган назарий қийматларга мос келади.

Калит сўзлар: Гравитацион линзаланган квазар, SDSS J0806+2006, кечикиш вақти

Введение. Явление гравитационного линзирования выявляет очень интересные и необычные свойства материи во Вселенной, например, из-за него формируются кратные изображения фоновых источников, выступая в качестве природного телескопа, разрешает далекие, очень слабые аспекты объектов в космологических масштабах. Особое место занимают гравитационно линзированные квазары (ГЛК), которые позволяют решать ряд актуальных вопросов современной космологии, таких как, проблема темной материи и энергии, определение массы космологических объектов, строение Вселенной, величина постоянной Хаббла, структура источников-квазаров и др. (см., например, [1,2]).

Так, с помощью гравитационного линзирования была обнаружена часть темной материи в виде звезд малой массы в нашей Галактике [3,4], обнаружена одна из самых маленьких известных внесолнечных планет [5], обнаружены массивные крупномасштабные структуры во Вселенной [6], найдено эмпирическое доказательство существования темной материи [7]. Эффект увеличения блеска позволил обнаружить некоторых из самых отдаленных галактик [8].

Постоянная Хаббла H_0 – еще одно важное приложение гравитационного линзирования. Неопределенность в его определении все еще достигает 10% [9]. Более того, между величинами H_0 , найденными на объектах с разными расстояниями найдены чувствительная разница. С этой точки зрения задача измерения этой величины на примере ГЛК с разными красными смещениями стала одной из актуальных направлений в наблюдательной астрофизике [10-12]. Поэтому в последние несколько лет число новых открытых ГЛК резко возрос, чему способствовали многочисленные исследовательские проекты SDSS, GAIA, GRAL [см. напр. 13-16]. Отсюда становится актуальной задача продолжительных мониторинговых наблюдений избранных ГЛК, выявления фотометрической переменности их линзированных компонентов и независимых измерений времени задержки.

В этой статье мы представляем результаты 5-летнего оптического мониторинга двойного ГЛК SDSS J0806+2006 в Майданакской обсерватории – кривые блеска двух линзированных компонентов и значение времени задержки.

Предварительные данные ГЛК SDSS J0806+2006. ГЛК SDSS J0806+2006 (рис.1,2) был открыт относительно недавно, в 2006 году, о чем сообщалось в работе Inada et al. [17]. В этой статье, на основе анализа базы данных цифрового обзора неба SDSS, были открыты два новых двойных ГЛК. Прямое восхождение исследуемого объекта равно $\alpha=121^{\circ}.59875$, а склонение $\delta=+20^{\circ}.108861$. Красное смещение источника-кварзара в системе оказался равным $z_q=1.54$, угловое же расстояние между двумя линзированными компонентами $\theta=1.4''$ угловые секунды. В момент открытия их видимый блеск в R фильтре составлял $m_A=18^m.93$ и $m_B=19^m.36$. Между мнимыми компонентами находится линзирующая галактика, видимый блеск которой составляет $m_G=21^m.20$. Из-за этого ее поток не дает заметного вклада в измерение звездных величин компонентов и ее влиянием можно пренебречь, как было ранее в случаях других двойных ГЛК [см. напр. 18,19].

Спектроскопия и наблюдения в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах показали, что изображения квазаров имеют идентичное красное смещение и протяженный объект между ними, которые, вероятно, является линзирующей галактикой $z_l=0.6$. Поле неба вокруг SDSS J0806+2006 содержит несколько близких галактик, которые могут существенно возмущать систему. Простые модели распределения массы с разумными параметрами воспроизвели положения квазаров и потоки в системе.

Были также проведены модельные расчеты на основе сингулярного изотермического эллипсоида (SIE). Так, получилось, что радиус кольца Эйнштейна $b=0.69''$, позиционный угол $PA=28^{\circ}$, отношение осей $q=0.08$, усиление блеска $\mu=4.62$. Более того, они нашли модельное значение времени задержки равное $\Delta t_{AB} \sim 32 h^{-1}$ дням.

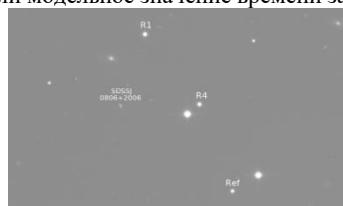


Рисунок 1. ГЛК SDSS J0806+2006 с окружающими опорными звездами в R фильтре на телескопе АЗТ-22. Ref – опорная звезда, Размер поля 3.45×1.73 угловых минут.

В следующий раз внимание на этот объект обратили в работе [20]. Оптический спектр показал, что на непрерывном участке отношение потоков $A/B = 1.3$, а в линиях ионизированного магния $A/B = 2.2$. Также, основываясь на инфракрасных данных телескопа VLT, на фоне той же модели SIE, была получена теоретическая величина времени задержки $\Delta t_{AB} \sim 50$ дням.

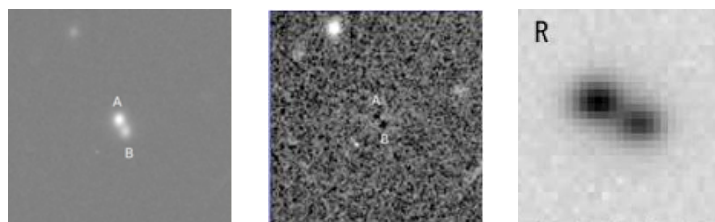


Рисунок 2. Крупномасштабные изображения SDSS J0806+2006, полученный на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории (слева). Здесь же показан результат вычитания моделью распределения блеска от наблюдаемого (по середине). Для сравнения качества изображений показаны также данные с 2.2-м телескопа UN88 (справа) [17]. На изображениях хорошо видны компоненты A и B. Линзирующая галактика слабая и не проявляется на наших изображениях.

Как видно, этот объект требует проведения длительных непрерывных наблюдений и подтверждения предыдущих результатов определения времени задержки. В этой работе мы представим наши оптические кривые блеска линзированных компонентов ГЛК SDSSJ0806+2006 на основе майданакских наблюдательных данных и величину времени задержки. Отсюда видно, что длительные оптические наблюдения этой ГЛК, определение наличия микролинзирования и измерение времени задержки является довольно интересной проблемой.

Кривые блеска линзированных изображений ГЛК SDSSJ0806+2006. Наблюдения этого квазара велись в Майданакской обсерватории, отвечающей всем требованиям для продолжительного мониторинга подобных объектов [21,22]. Для наблюдения этого объекта выбирались ночи с благоприятными астроклиматическими условиями. Но если учесть, что объект виден в период с сентября по март, то число данных наблюдений, пригодных для фотометрических измерений и дальнейшего анализа будет существенно меньше, чем у других объектов. При наблюдениях мы использовали телескоп АЗТ-22 с камерой SNUCAM 4Kx4K, оснащенный набором оптических фильтров системы Джонсона-Кузина. За последние годы (2017-2021 г.г.) нам удалось собрать достаточное количество наблюдательного материала для фотометрического исследования этой системы. В итоге мы получили 120 наблюдательных точек в R фильтре.

Измерения видимого блеска линзированных компонентов полностью проводились в среде комплекса программ IRAF. Хотя между ними располагается протяженная линзирующая галактика, из-за слабости ее потока этот вклад не существенный и мы ее отдельно не учитывали.

В первую очередь мы получили кривую блеска системы в целом (рис. 3). На графике показана также относительная кривая блеска референтной звезды, что примерно на $\sim 3.30^m$ ярче нашего объекта, так как данные по квазару здесь смещены вверх на 0.25^m . Однако блеск самого квазара меняется незначительно, попеременно относительно сезонов с амплитудой $\sim 0.10^m$. Большой разброс измерений объясняется относительной слабостью

системы. Явных признаков микролинзирования здесь не видно. Однако это положение позволит нам вычислить наиболее вероятное значение времени задержки. Поэтому нам необходимо получить графики изменения блеска отдельных компонентов.

Для этого необходимо было выбрать способ описания функции распределения блеска между искомыми компонентами. В пакете программ IRAF предусмотрены несколько возможностей, например функция Гаусса, функция Моффата с показателем степени 1.5 или 2.5, Лоренца и др. Соответствующие параметры рассчитываются на основе звезд отмеченной как PSF (рис.1). Детали фотометрической обработки изображений в тесных полях можно найти в работах [19,23].

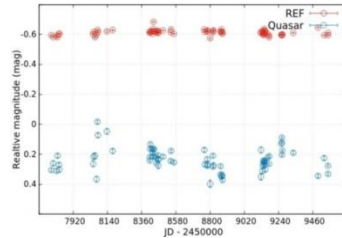


Рисунок 3. Относительные кривые блеска квазара SDSSJ0806+2006 в целом и опорной звезды в период 2017-2021 г.г. в R-полосе.

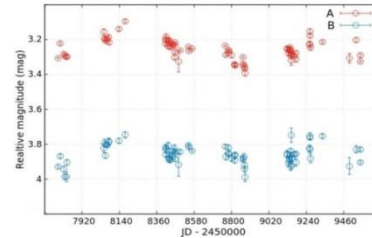


Рисунок 4. Кривая блеска линзированных компонентов A и B ГЛК SDSSJ0806+2006 в R-полосе.

Так, применив фотометрический метод подгонки функции рассеяния точки (ФРТ) к майданакским изображениям ГЛК SDSSJ0806+2006, мы получили кривые блеска A и B компонентов (рис. 4). Поведение блеска компонентов не отличается от изменений блеска системы в целом - в течение 2017-2021 г.г. изменения блеска компонентов более явны, а амплитуда составляет $\sim 0.25^m$. На что еще надо обратить внимание – то, что компоненты меняют свой блеск почти синхронно друг к другу. А это указывает на то, что время задержки в этой системе должен быть относительно небольшим (см. также работы [17,20]) и влияние микролинзирования практически отсутствует. Теперь попробуем вычислить время задержки.

Вычисление времени задержки. Взяв за основу полученные нами кривые блеска линзированных компонентов SDSSJ0806+2006 мы измерили время задержки между изменениями их видимого блеска. При этом мы должны определиться с тем, 1) каким из методов мы воспользуемся для вычисления времени задержки, и 2) как мы будем интерполировать кривые блеска для определения блеска компонентов, в те даты, не было наблюдений?

Для вычисления времени задержки в ГЛК были разработаны многочисленные методы, например стандартную минимизация χ^2 , формулы Пельта, периодические функции [19,24,25] и др. Причем для определения отсутствующих наблюдений применяется формула линейной интерполяции с окном до 25-30 дней. В этих методах одна из компонент «сдвигается» с некоторым шагом по оси времени и звездных величин, и на каждом шаге вычисляется коэффициент корреляции, дисперсии и т.п. Тот сдвиг, что соответствует минимальному значению этого коэффициента и принимается за наиболее вероятное значение времени задержки и разницы звездных величин между компонентами.

В зависимости от частоты наблюдательных данных и влияния микролинзирования рассматривают отдельные сезоны и выбирают те значения, что соответствуют критерию самосогласованности [26]. В нашем же случае мы имеем примерно по 15-20 наблюдений в сезон (с октября по март), практическое отсутствие микролинзирования и равномерное изменение блеска компонентов. С учетом этого мы решили применить несколько иной подход – сдвигает звездные величины компоненты B по оси времени и видимого блеска, образуем объединенную кривую блеска, получаем сглаженную кривую блеска путем интерполяции обычным полиномом. Соответствие между данными наблюдений и сглаженной кривой вычисляем с помощью известной формулы

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(m_{A,B,obs,i} - m_{A,B,calc,i})^2}{\sigma_{A,B,i}^2}, \quad (1)$$

где N - число данных наблюдений, $\sigma_{A,B}^2$ - среднеквадратичные ошибки измерений звездных величин компонентов A и B, $m_{A,B,obs,i}$ - наблюдаемый блеск соответствующих компонентов, $m_{A,B,calc,i}$ - интерполированная последовательность этих величин. Причем

$$m_{A,B,calc}(t) = \sum_{i=0}^K a_i t^i \quad (2)$$

При вычислении мы отбросили точки в самом начале и конце наблюдений, где очень мало точек. Первый день наблюдений мы нормировали так, что $t = 270$, что соответствует $JD = 2458048$. Искомые параметры здесь время задержки Δt , разница звездных величин между компонентами Δm , многочлены a_i . Коэффициенты полиномиального ряда a_i вычислялись с помощью хорошо известного метода Левенберга-Марквардта [27]. Те параметры, что соответствующим наименьшему значению χ^2 приравниваются к искомым величинам. Число многочленов в (2) мы определили $K = 6$. В итоге у нас 9 неизвестных величин. Для выяснения величины их неопределенностей мы, методом Монте-Карло, сгенерировали 5000 искусственных кривых блеска для обоих линзированных компонентов и применили к ним вышеописанную процедуру. Результаты этих вычислений представлены ниже.

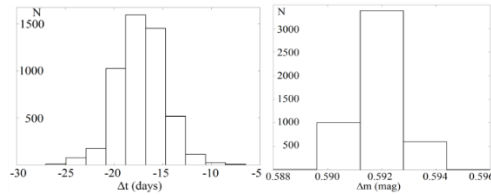


Рисунок 5. Распределения вероятных значений времени задержки (верхняя гистограмма) и разницы звездных величин (нижняя гистограмма) на основе искусственных кривых блеска, сгенерированных методом Монте-Карло.

Распределение значений времени задержки показаны на рис. 5. На рис. 5а показано, что наиболее вероятное значение времени задержки между двумя компонентами равно $\Delta t = -17.0 \pm 2.50$ дням (А компонента лидирующая), а разница звездных величин между ними $\Delta m = 0.592^m \pm 0.0011^m$ с 68 % достоверностью.

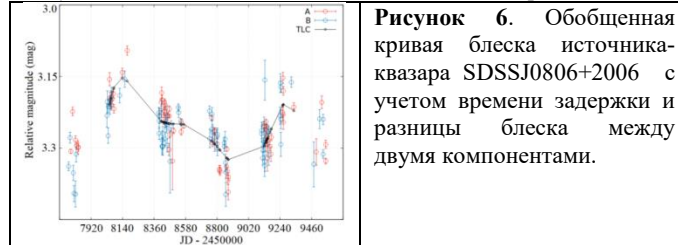


Рисунок 6. Обобщенная кривая блеска источника-квазара SDSSJ0806+2006 с учетом времени задержки и разницы блеска между двумя компонентами.

На рис. 6 показана обобщенная кривая блеска источника в ГЛК SDSSJ0806+2006. Видно, что система с 2017 года претерпевает периодические изменения. Этот период приблизительно равен 3 годам, если обратить внимание на два последовательных увеличения блеска примерно в JD = 8140 и JD = 9240. В течение всех наблюдательных сезонов разница звездных величин между компонентами А и В не меняется, что позволяет нам утверждать об отсутствии в этой системе влияния микролинзирования. Этим аспектом данный объект напоминает характеристики другого двойного ГЛК UM673 [19,28], где в течение более 10 лет не было зарегистрировано ни одного события микролинзирования. Поэтому и SDSSJ0806+2006 и UM673 удобны при моделировании системы для вычисления постоянной Хаббла, либо определения красного смещения линзирующей галактики.

Заключение. Итак, в работе представлены результаты фотометрического исследования двойного ГЛК SDSSJ0806+2006, которое наблюдалось в Майданакской обсерватории в 2017-2021 г.г. Представлены кривые блеска системы в целом, так и его отдельных компонентов. Амплитуда изменения блеска оказалась достаточно заметный $\sim 0.10^m$ звездных величин для системы в целом, а у обоих компонентов до $\sim 0.25^m$. Анализ кривых блеска и расчет времени задержки показал, что система не подвержена влиянию микролинзирования.

Также нами вычислено вероятное значение времени задержки, равное $\Delta t_{AB} = -17.0 \pm 2.5$ дней, причем лидирующим является компонент А. Эта величина согласуется с ранее найденными теоретическими предсказаниями времени задержки [17,20], где предполагалось, что оно должно быть не более 50 дней.

Исходя из этого мы считаем, что этот объект удобно использовать при моделировании двойных гравитационно линзированных систем с целью вычисления постоянной Хаббла, красного смещения источника и т.п.

Благодарности. Авторы выражают свою глубокую признательность руководству и сотрудникам АИ АН РУз за организацию многолетних наблюдений в Майданакской обсерватории, что позволило получить значимые результаты данной статьи. Работа выполнена в рамках гранта FZ-20200929344.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eigenbrod A. "Gravitational lensing of quasars". T&F Group, 2011. – 152 p.
2. Dodelson S. "Gravitational lensing". Cambridge University Press, 2017. – 466 p.
3. Alcock C., Akerloff C. W, Allsman R.A., et al., Nature, 365, 621 (1993).
4. Aubourg E., Baryre P., Brehin S., et al., Nature, 365, 623 (1993).
5. P.- Beaulieu J.u, D.P. Bennett, P. Fouque, et al., Nature, 439, 437 (2006).
6. L.Van Waerbeke, Y. Mellier, T. Erben, et al., A&A, 358, 30 (2000).
7. D.Clowe, M. Bradac, A.H. Gonzalez, et al., ApJ, 648, L109 (2006).
8. J.-P. Kneib, R.S. Ellis, M.R. Santos & J. Richard, ApJ, 607, 697 (2004).
9. W.L. Freedman, B.F. Madore, B.K. Gibson, et al., ApJ, 553, 47 (2001).
10. L. Verde, T. Treu, A.G. Riess, Nature Astronomy, 3, 891 (2019).
11. K.S. Rathna, M. Tewes, C.S.Stalin, et al., A&A, 557, id.A44, 7 pp. (2013).
12. E. Eulaers, M. Tewes, P. Magain, et al. A&A, 553, id.A121, 9 pp. (2013).
13. C. A.Lemon, M.W.Auger, et al., MNRAS, 479, 5060–5074 (2018).
14. C. A.Lemon, et al., MNRAS, 483, Issue 3, p.4242-4258 (2019).
15. D. Stern, S.G. Djorgovski, A. Krone-Martins, et al., ApJ, 921:42, 16 pp (2021).
16. J.H.H. Chan, C.Lemon, F. Courbin, et al., A&A, 659, A 140 (2022)
17. N. Inada, M. Oguri, R.H. Becker, et al., AJ, 131, 1934–1941 (2006)
18. E.R. Gaynullina, R.W. Schmidt, al., A&A, 440, pp.53-58 (2005).
19. Ахунов Т.А., Нуриддинов С.Н., и др., УФЖ, 9, 5-6, p. 291-301 (2007).
20. D. Sluse, F. Courbin, et al., A&A, 492, L39-L42 (2008).
21. Ehgamberdiev Sh., Bayjumanov A., et al., A&A S.S., 145, p. 293 (2000).
22. Ehgamberdiev Sh., Nature Astronomy, 2, 349-351 (2018).

-
23. Асфандияров И.М., и др., УФЖ, 22, № 6, p. 325-333 (2020).
 24. R. Gil-Merino, L. Wisotzki, J. Wambsganss, A&A, 381, 428 (2002).
 25. J. Pelt, R. Kayser, S. Refsdal, T. Schramm, A&A 305, 97 (1996).
 26. Akhunov T.A., Wertz O., Elyiv A., et al., MNRAS, 465, 3607-3621 (2017).
 27. W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, in: Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing, Cambridge Univ. Press 1992.
 28. Koptelova E., Chen W.P., Chiueh T., et al., A&A, 544, id.A51, 11 pp. (2012).