Анализ фотометрических свойств избранных гравитационно-линзированных систем. III. SDSS J2124+1632

Н.Р. Алимова[1], Т.А. Ахунов[*,1,2], О.А. Бурхонов[2], Д.Х. Беков[1]

[1] Национальный университет Узбекистана, ул. Университетская, 4, 100176, Ташкент, Узбекистан
[2] Астрономический институт АН РУз, ул. Астрономическая, 33, 1000052, Ташкент, Узбекистан

Получена 11.10.2022, revised 29.11.2022

* Corresponding author: e-mail talat77@rambler.ru, Phone: +998 94 675 52 87

В работе представлены результаты фотометрической обработки цифровых изображений нового двойного гравитационно-линзированного квазара SDSS J2124+1632, наблюдавшаяся в Майданакской обсерватории. Кривые блеска показали, что яркость компонентов в течение 2018-2021 г.г. имеет активную переменность, вызванную, в том числе, микролинзированием. Вычислено вероятное значение времени задержки Δt_{AB} = 105.3±18.8 дней, причем лидирующим оказался компонент *B*. Эта величина согласуется с ранее найденными временными задержками для двойных гравитационно-линзированных квазаров с подобной конфигурацией.

Ключевые слова: гравитационно-линзированный квазар, SDSS J2124+1632, время задержки.

The paper presents the results of photometric processing of digital images of a new double gravitationally lensed quasar SDSS J2124+1632 observed at Maidanak observatory. The light curves showed that the brightness of the components during 2018-2021 has an active variability caused, among other things, by microlensing. The probable value of the time delay Δt_{AB} = 105.3±18.8 days was calculated (component *B* is leading one). This value is consistent with the previously found time delays for binary gravitationally lensed quasars with a similar configuration.

Keywords: gravitational lensed quasar, SDSS J2124+1632, time delay.

DOI: https//doi.org/10.52304/.v24i4.375

I. Введение

Известно, что гравитационное линзирование – грандиозное явление, происходящее в космологическом масштабе. Когда свет, излучаемый далекими квазарами, проходит через потенциал притяжения промежуточных объектов, он искривляется, в результате мы можем наблюдать не просто искажённые, но и кратные изображения одного и того же источника. Особое место среди широкого класса гравитационно-линзированных систем занимают гравитационно-линзированные квазары (ГЛК), которые являются мощным инструментом в изучении проблем, связанных со всеми компонентами в линзированных системах. Сведения о конфигурации линзированных систем, временные задержки в них, микролинзирование и многие другие сведения позволяют нам изучать тонкую подструктуру, распределение массы и эволюцию линзирующих галактик. Временные задержки между мнимыми изображениями могут быть использованы для определения постоянной Хаббла, важнейшего космологического параметра при определении размера, возраста и критической плотности Вселенной [1-4]. Если учесть, что между измерениями постоянной Хаббла на объектах ранней и поздней Вселенной есть существенная разница, то независимые ее измерения на примере квазаров с разны-

ми красными смещениями становятся особенно актуальными [5]. В связи с этим в последние годы число вновь обнаруженных ГЛК, согласно исследованиям в рамках проектов GRAL, GAIA, SDSS и др. [1, 6-8], непрерывно увеличивается. С другой стороны, растет острая необходимость в непрерывных мониторинговых наблюдениях избранных ГЛК, фотометрической обработке и измерении времени задержки в них.

В этой статье мы представляем результаты 4-х летнего оптического мониторинга двойного ГЛК SDSSJ2124+1632 – кривые блеска двух линзированных изображений и значение времени задержки.

II. Предварительные данные ГЛК SDSSJ2124+1632

ГЛК SDSSJ2124+1632 (рис. 1) является новым объектом, открытым в 2018 году, о чем сообщалось в работе C. Lemon et al. [6]. Ими были открыты, спектроскопически подтверждены и вычислены предварительные характеристики 24 линзированных квазаров, обнаруженных космической обсерваторией Gaia. Согласно [6], прямое восхождение объекта равно α=321°.07029, а склонение δ=16°.53841. Система состоит из A и B компонентов (рис. 2), угловое расстояние между которыми составляет θ=3.02″ угловые секунды. А красное смещение линзирующей галактики $z_q = 1.28$. В момент открытия их видимый блеск составлял m_A=18^m.11 и m_G=18^m.40. Из-за того, что изображение галактики было расположено очень близко к компоненту B, измерить его блеск и красное смещение не удалось. Однако на основе внешнего вида системы были проведены модельные расчеты на основе сингулярной изотермической серы. Получено, что радиус кольца Эйнштейна b=1.41″, позиционный угол PA=176°, отношение осей q=0.39, усиление блеска μ=2.7. Заметим еще, значения ошибок измерения каждой из этих величин сопоставимы с самой величиной. Больше работ по этому объекту не публиковали.

Отсюда видно, что длительные оптические наблюдения этой ГЛК, определение наличия микролинзирования и измерение времени задержки является довольно интересной проблемой.

III. Кривые блеска линзированных изображений ГЛК SDSSJ2124+1632

Для наблюдения этого объекта выбирали ночи с самыми благоприятными астроклиматическими условиями, а этому благоприятствовало то, что этот объект виден с мая по октябрь. При наблюдениях мы использовали телескоп АЗТ-22 с камерой SNUCAM 4K×4K, оснащенный набором оптических фильтров системы Джонсона-Кузина. За последние годы (2018-2021 г.г.) нам удалось собрать достаточное количество наблюдательного материала для подробного исследования этой системы. В итоге мы получили 214 наблюдательных точек в R фильтре.

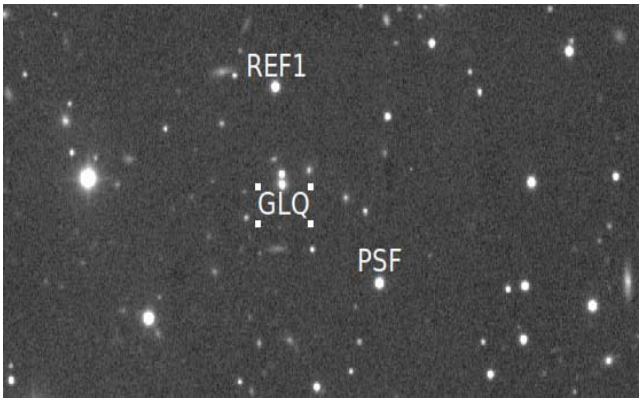


Рисунок 1. ГЛК SDSSJ2124+1632 с окружающими опорными звездами в R фильтре (получена 07.24.2019 на телескопе АЗТ-22). Ref1 – опорная звезда, и PSF – звезда, использовавшаяся для построения функции рассеяния точки. Размер поля 3.45×1.73 угловых минут.

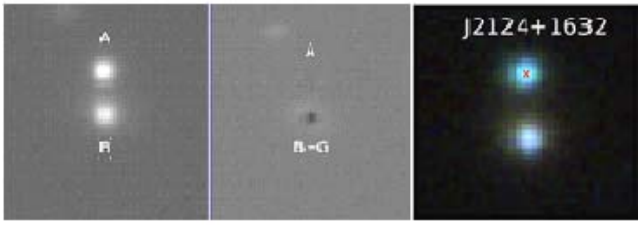


Рисунок 2. Крупномасштабные изображения SDSSJ2124+1632. Полученное на телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории показано слева. (Здесь же показан результат вычитания моделью распределения блеска от наблюдаемого). Для сравнения качества изображений показаны также данные с телескопа GAIA (справа) [см. 6]. На изображениях хорошо видны компоненты A и B. Линзирующая галактика расположена очень близко к B. Это сказалось на фотометрических измерениях блеска этого компонента.

Фотометрические измерения видимого блеска компонентов полностью проводили в рамках комплекса программ IRAF. Хотя линзирующая галактика слабая, она расположена достаточно близко к компоненту B, что дало о себе знать в

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

виде большого разброса измеренных звездных величин (см. далее).

В первую очередь мы получили кривую блеска системы в целом (рис. 3). Этот график получился очень многообещающим. Видно, что источник-квазар показывает заметные изменения блеска, связанные, скорее всего, с ее внутренней переменностью. В самом начале наблюдений, в 2018 году, блеск квазара находился на самом нижнем уровне и в тот год не менялся. Со следующего сезона блеск системы сразу же устремился вверх и к концу сезона 2021 увеличился на ~ 0.50^{m} звездных величин.

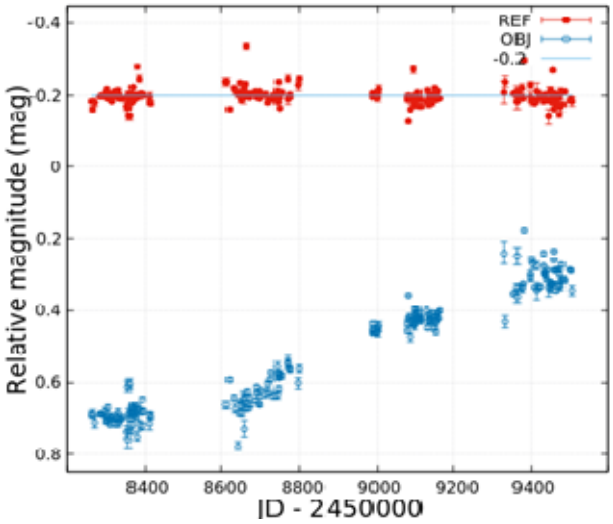


Рисунок 3. Кривые блеска квазара SDSSJ2124+1632 в целом и референтной звезды для 2018-2022 г.г в R-полосе. Здесь и далее на кривых блеска по горизонтальной оси отложено время наблюдений в единицах юлианского дня, а по вертикальной оси – относительная звездная величина.

Такое значительное изменение общего блеска источника-квазара объясняется, по-видимому, тем, что мы имеем дело не только с внутренней переменностью квазара (например, падение аккреционного вещества на центр, прецессионное вращения его оси), но активным микролинзированием. В связи с этим интересно было посмотреть на поведение компонентов в отдельности.

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, отмеченных как PSF (рис. 1). Детали фотометрической обработки изображений объектов, расположенных так близко друг к другу, что они даже перекрываются (так называемый случай тесных полей) можно найти в работах [10, 11].

Так, применив фотометрический метод подгонки функции рассеяния точки (ФРТ) к майданакским изображениям ГЛК SDSSJ2124+1632, мы получили кривые блеска A и B компонентов (рис. 4). Поведение блеска компонентов в целом повторяет изменения блеска системы в целом – в течение 2019-2021 г.г. блеск непрерывно увеличивается. Однако в деталях между ними есть отличия, темп увеличения блеска между двумя компонентами разный. Если блеск компонента A увеличился на ~0.70^{m}, у компонента B этот показатель равен ~0.45^{m}. Подобные изменения блеска явно указывают на наличие долгопериодического события микролинзирования. Такое явление наблюдалось ранее и в других двойных ГЛК, например, в SBS0909+532, SBS1520+530 [12-15].

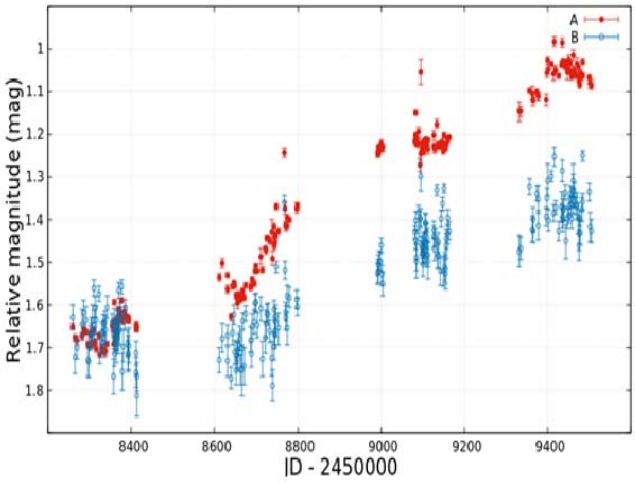


Рисунок 4. Кривая блеска линзированных компонентов A и B ГЛК SDSSJ2124+1632 в *R*-полосе. Оси и их масштаб тот же, что и на рис. 3.

IV. Анализ кривых блеска: микролинзирование и время задержки

Взяв за основу полученные нами кривые блеска линзированных изображений SDSS J2124+1632, мы попытались измерить время задержки между изменениями их видимого блеска. При этом мы использовали два метода – стандартную минимизацию χ^2 и формулы Пельта [16, 17]. Поскольку мы наблюдаем непрерывное влияние микролинзирования, что особенно видно ме-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

жду сезонами, для выяснения величины времени задержки каждый сезон мы рассматривали по отдельности. Кроме того, с целью минимизации различного рода факторов, влияющих на измерения звездных величин и приводящих к чрезмерному рассеянию точек (особенно это видно на кривой блеска компонента B), мы провели медианное и усредненное сглаживание фотометрических точек (рис. 5).

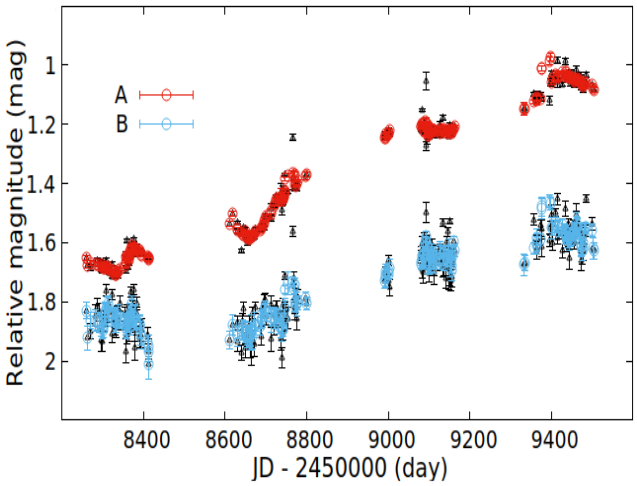


Рисунок 5. Пример медианного сглаживания кривых блеска. Для сравнения: фоновые черные точки – это те же данные, что на рис. 4. Кривая компонента B смещена вниз на 0.2^m для ясности.

В результате вычисления времени задержки на основе искусственных кривых блеска, генерировавшихся способом Монте-Карло, для каждого метода мы получили по 12 вероятных значений времени задержки. Самое главное отличие состояло в том, что некоторые из них давали положительное значение, некоторые отрицательные. Положительные значения соответствует тому, что лидирующим будет компонент B, при отрицательном значении, наоборот, компонент A. По этой величине мы и выбрали критерий согласованности, т.е. тот метод, который дает большее количество одноименных значений, будет считаться наиболее правдоподобным, а окончательное значение времени задержки будет средней среди всех этих величин. Наиболее подходящие к критерию результаты дал метод χ^2, здесь в подавляющем числе случаев мы имеем дело с положительными значениями времени задержки. Среднее из них оказалось равным Δt_{AB} = 105.3±18.8 с доверительным интервалом 68%. Относительно большое значение ошибки измерения объясняется, с одной стороны, большим разбросом фотометрических точек в компоненте B, а с другой, большим перерывом между наблюдательными сезонами.

Такое положение вообще не коснулось разницы звездных величин между двумя компонентами. Все методы и подходы для каждого наблюдательного сезона дали совпадающие результаты. При этом разница блеска между компонентами, как мы и ожидали, меняется от сезона к сезону: так, в 2018 Δm_{AB}=–0.020^m; в 2019 Δm_{AB}=–0.300^m; в 2020 Δm_{AB}=–0.285^m; в 2006 Δm_{AB}=–0.260^m звездных величин. Этот факт также подтверждает наш вывод – в этой системе наблюдается явление долгопериодического микролинзирования (см. например, [12, 14]).

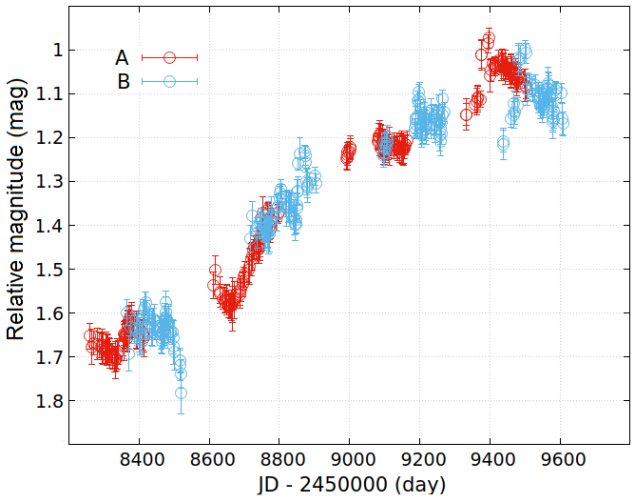


Рисунок 6. Восстановленная кривая блеска источника квазара. Здесь данные, относящиеся к компоненту B сдвинуты назад по времени на величину времени задержки Δt_{AB} = 105.3 дней и вверх по оси звездных величин соответственно сезонам (см. выше).

На рис. 6 показана комбинированная кривая блеска источника в ГЛК SDSSJ2124+1632. Видно, что система с 2019 года находится в стадии увеличения блеска. Это есть результат совпадения микролинзирования в компоненте B, а также процессов в самом источнике-квазаре. Скорее всего, здесь мы опять имеем дело с явлением долгопериодического микролинзирования, которое наблюдается в некоторых двойных ГЛК [12, 16, 17].

V. Заключение

Итак, приведены результаты фотометрического исследования двойного ГЛК SDSSJ2124+1632, наблюдавшиеся нами в Майданакской обсерватории в 2018-2022 г.г. Представ-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

лены кривые блеска системы в целом, так и его отдельных компонентов. Амплитуда изменения блеска оказалась достаточно большой 0.50^m звездных величин для системы в целом, а для компонента А до 0.75^m. Эти данные указывают на то, что система испытывает влияние долгопериодического микролинзирования вместе с общим увеличением излучения источника-квазара.

Также нами вычислено вероятное значение времени задержки, равное Δt_{AB} = 105.3±18.8 дней, причем лидирующим оказался компонент В. Эта величина согласуется с ранее найденными временными задержками для гравитационно линзировнных систем подобной конфигурации UM673, SBS1520+530 и др. [13-15]. Исходя из этого, мы предлагаем продолжить исследование этой системы с целью уточнения времени задержки независимыми методами.

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.

Метаданные

Analysis of photometric properties of the selected gravitationally lensed systems. III. SDSS J2124+1632

N. Alimova[1], T. Akhunov[1,2], O. Burkhonov[2], D. Bekov[1]

[1]National University of Uzbekistan, Universitetskaya str,, 100176, Tashkent, Uzbekistan

[2]Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, Astronomicheskaya 33, 100052 Tashkent, Uzbekistan

The paper presents the results of photometric processing of digital images of a new double gravitationally lensed quasar SDSS J2124+1632 observed at Maidanak observatory. The light curves showed that the brightness of the components during 2018-2021 has an active variability caused, among other things, by microlensing. The probable value of the time delay Δt_{AB} = 105.3±18.8 days was calculated (component B is leading one). This value is consistent with the previously found time delays for binary gravitationally lensed quasars with a similar configuration.

Keywords: gravitational lensed quasar, SDSS J2124+1632, time delay.

Литература

[1] J.H.H. Chan, C. Lemon, F. Courbin, R. Gavazzi, B. Clement, M. Millon, E. Paic, K. Rojas, E. Savary, G. Vernardos, J.-C. Cuillandre, S. Fabbro, S. Gwyn, M.J. Hudson, M. Kilbinger, and A. McConnachie. Astronomy & Astrophysics **659**, A 140 (2022).

[2] N. Dalal, C.S. Kochanek. ApJ **572**, 25 (2002).

[3] A.M. Nierenberg, T. Treu, G. Brammer, A.H.G. Peter, C.D. Fassnacht, C.R. Keeton, C.S. Kochanek, K.B. Schmidt, D. Sluse, S.A. Wright. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **471**, 2224-2236 (2017).

[4] D. Gilman, S. Birrer, T. Treu, A. Nierenberg, A. Benson MNRAS **487**, Issue 4, 5721-5738 (2019).

[5] L. Verde, T. Treu, A.G. Riess. Nature Astronomy **3**, 891 (2019).

[6] C. Lemon, M.W. Auger, R.G. McMahon, F. Ostrovski. MNRAS **479**, 5060-5074 (2018).

[7] C. Lemon, M.W. Auger, R.G. McMahon. MNRAS **483**, Issue 3, 4242-4258 (2019).

[8] D. Stern, S.G. Djorgovski, A. Krone-Martins, D. Sluse, L. Delchambre, C. Ducourant, R. Teixeira, J. Surdej, C. Boehm, J. den Brok, D. Dobie, A. Drake, L. Galluccio, M.J. Graham, P. Jalan, J. Klüter, J.-F. Le Campion, A. Mahaba, F. Mignard, T. Murphy, A. Nierenberg, S. Scarano Jr., J. Simon, E. Slezak, C. Spindola-Duarte, and J. Wambsganss. The Astrophysical Journal **921**, 42, 16 pp. (2021).

[9] C. Lemon, T. Anguita, M.W. Auger, F. Courbin, A. Galan, R.G. McMahon, F. Neira, M. Oguri, P. Schechter, A. Shajib, T. Treu. Gravitationally lensed quasars in Gaia IV. 150 new lenses, quasar pairs, and projected quasars. Eprint arXiv:2206.07714 (2022).

[10] T.F. Akhunov, S..N. Nuritdinov, A. Sergeev, O. Burkhonov. Uzbek Journal of Physics **9**, Issue 5-6, 291-301 (2007).

[11] I.M. Asfandiyarov, Sh.A. Egamberdiev, M. Millon, F. Courbin. Uzbek Journal of Physics **22**, Issue 6, 325-333 (2020).

[12] N.C. Wickramasinghe, J.T. Wickramasinghe, E. Mediavilla. Astrophysics and Space Science **298**, Issue 3, 453-460 (2005).

[13] A. Ullan, L.J. Goicoechea, A.P. Zheleznyak, E. Koptelova, V.V. Bruevich, T. Akhunov, O. Burkhonov. A&A **452**, 25-35 (2006).

[14] E.R. Gaynullina, R.W. Schmidt, T. Akhunov, O. Burkhonov, S. Gottlöber, K. Mirtadjieva, S.N. Nuritdinov, I. Tadjibaev, J. Wambsganss, L. Wisotzki. Astronomy & Astrophysics **440**, Issue 1, 53-58 (2005).

[15] E. Koptelova, W.P. Chen, T. Chiueh, B.P. Artamonov, V.L. Oknyanskij, S.N. Nuritdinov, O. Burkhonov, T. Akhunov, V.V. Bruevich, O.V. Ezhkova, A.S. Gusev, A.V. Sergeyev, Sh.A. Ehgamberdiev and M.A. Ibragimov. Astronomy & Astrophysics **544**, A 51, (2012).

[16] R. Gil-Merino, L. Wisotzki, J. Wambsganss. A&A **381**, 428 (2002).

[17] J. Pelt, R. Kayser, S. Refsdal, T. Schramm. A&A **305**, 97 (1996).

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.

Танланган гравитацион линзаланган системаларнинг фотометрик ҳусусиятлари таҳлили. III. SDSS J2124+1632

Н.Р. Алимова[1], Т.А. Ахунов[1,2], О.А. Бурхонов[2], Д.Х. Беков[1]

[1]Ўзбекистон Миллий университети, Университет кўч., 4, 100176, Тошкент, Ўзбекистон
[2]ЎзР ФА Астрономия институти, Астрономия кўч., 33, 100052, Тошкент, Ўзбекистон

Мақолада Майданак обсерваториясида кузатилган SDSS J2124+1632 номли янги қўшалоқ гравитацион линзали квазарнинг рақамли тасвирларнинг фотометрик қайта ишлаш натижалари келтирилган. Равшанлик эгри чизиқлари шуни кўрсатдики, 2018-2021 йилларда компонентларнинг ёркинлиги, бошқа сабаблар қатори, микролинзаланиш ҳодисаси туфайли фаол ўзгарувчанликка эга бўлган. Кечикиш вақтининг эҳтимолли қиймати, B компоненти етакчи бўлган ҳолда, Δt_{AB} = 105.3±18.8 кунни ташкил этди. Ушбу қиймат шунга ўхшаш конфигурацияга эга бўлган қўшалоқ гравитацион линзаланган квазарлар учун илгари топилган вақт кечикишларига мос келади.

Калит сўзлар: гравитацион линзаланган квазарлар, SDSS J2124+1632, кечикиш вақти.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2022 г.