

УДК 523.163;
524.316.7.082-82

В. С. ЦВЕТКОВА^{1,2}, В. М. ШУЛЬГА¹, Л. А. БЕРДИНА¹

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

² НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,
ул. Сумская, 35, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: laberdina@gmail.com

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАПАЗДЫВАНИЙ В ГРАВИТАЦИОННО ЛИНЗИРОВАННЫХ КВАЗАРАХ ПРИ НАЛИЧИИ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЙ

Предложен метод определения временных запаздываний в гравитационно линзированных квазарах, который предоставляет простую и прозрачную процедуру устранения влияния событий микролинзирования, основанную на фундаментальных свойствах представления квадратично интегрируемых функций в виде разложения по ортогональным полиномам. Метод протестирован на семилетних кривых блеска гравитационно линзированного квазара HE 0435-1223, фотометрия для которого получена из архива CDS (Strasbourg astronomical Data Center). Приводится анализ полученных оценок временных запаздываний в системе HE 0435-1223 и их сравнение с результатами, опубликованными ранее в работах других авторов.

Ключевые слова: временные запаздывания, квазар, микролинзирование, кривые блеска, гравитационное линзирование, ортогональный полином

1. Введение

Измерения временных запаздываний между колебаниями блеска квазара, наблюдаемыми в его изображениях, сформированных гравитационным полем более близкой галактики, представляют огромный интерес для современной астрофизики. Они используются для решения целого ряда астрофизических задач, таких как определение постоянной Хаббла H_0 , оценка массы линзирующей галактики, изучение распределения масс на трассе источник-наблюдатель и других. В частности, так как проявления гравитационного линзирования определяются распределением полной массы вещества (видимой и так называемой темной материи), появляется возможность обнаружения темной материи и измерения ее содержания на пути распространения лучей света в среде между удаленным квазаром и наблюдателем.

Возможность использования явления гравитационного линзирования для оценки значения постоянной Хаббла, не зависящей от промежуточных индикаторов расстояний, была отмечена еще в 1964 г. [1], задолго до открытия первого гравитационно линзированного квазара Q0957+561 [2]. В течение 1980–1992 гг. были заложены методологические основы измерения временных запаздываний в гравитационно линзированных квазарах [3–5]. В последующие годы было предложено

несколько модификаций методов измерения [6–9], в той или иной мере основанных на общем подходе. Среди множества существующих в настоящее время методов можно выделить следующие четыре группы:

- 1) методы, основанные на поиске минимума дисперсии между кривыми блеска (Minimum Dispersion Method, MDM);
- 2) методы, основанные на анализе разницы регрессий (Regression Difference Method, RDM);
- 3) методы, основанные на сплайн-интерполяции со свободными узлами;
- 4) методы, основанные на подгонке числовой модели (Numerical Model Fit, NMF).

Разнообразие конкретных реализаций методов внутри каждой из перечисленных групп достаточно велико, как и число гибридных методов, сочетающих особенности различных подходов. Так, в недавней работе [9] временное запаздывание в двойном квазаре SDSS J1001+5027 было измерено с использованием пяти различных модификаций трех из перечисленных методов.

Методика оценки постоянной Хаббла по временным запаздываниям предъявляет достаточно высокие требования к точности измерения значений запаздываний, которая должна быть порядка 1 % [10]. Современным измерениям доступна пока, как правило, заметно меньшая точность. Причина заключается в ряде известных объективных факторов:

© В. С. Цветкова, В. М. Шульга, Л. А. Бердина, 2014

1) наличие систематических и случайных погрешностей измерений блеска линзированных компонентов квазара;

2) малая амплитуда вариаций собственного блеска квазара;

3) неравномерность точек отсчета на кривых блеска, большие сезонные промежутки;

4) события микролинзирования, связанные с прохождением вблизи трассы луча света квазар–макроизображение–наблюдатель изолированных компактных масс населения линзирующей галактики.

При заданном качестве исходного наблюдательного материала основную трудность при определении временных запаздываний представляют события микролинзирования, которые по-разному искажают наблюдаемые кривые блеска разных линзированных изображений квазара. Более того, при учете влияния микролинзирования необходимо иметь в виду возможную переменность пространственной структуры квазара, сопровождающую (или вызывающую) изменения его собственного блеска. Очевидно, что в присутствии событий микролинзирования физические изменения размеров, формы и блеска излучающих областей квазара по-разному проявятся в его различных макроизображениях. В частности, в работе [11] отмечается возможность искажения амплитуд собственной кривой блеска квазара. Детальный теоретический анализ особенностей гравитационной фокусировки переменных во времени и протяженных в пространстве источников излучения, которые могут влиять на точность измерения временных запаздываний, выполнен в работе [12]. Показано, что для таких источников при гравитационной фокусировке излучения происходит не только пространственное перераспределение излучения, но и временное, в результате чего кривая блеска квазара, наблюдаемая в разных компонентах, может быть искажена по-разному. Естественным следствием этого могут быть различия в оценках временных запаздываний, сделанных по данным разных сезонов.

Общего рецепта для устранения влияния микролинзирования на оценки временных запаздываний не существует. Выбор методики его устранения в значительной степени зависит от характеристик собственной переменности квазара и переменности, обусловленной событиями микролинзирования, в частности, от соотношения

характерных амплитуд и временных масштабов обоих процессов. Недавно вышедшая работа [7] участников проекта COSMOGRAIL (the COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses) посвящена разработке методов измерения временных запаздываний в присутствии “медленных” событий микролинзирования, т. е. таких, у которых характерные времена переменности больше, чем у собственной переменности квазара.

Из-за перечисленных выше факторов число систем с надежно измеренными временными запаздываниями пока относительно невелико, несмотря на актуальность проблемы. Так, например, значительная часть ресурсов программы COSMOGRAIL уделяется измерениям временных запаздываний во вновь открываемых гравитационно линзированных квазарах (см., например, [8, 9, 13, 14] и др.).

Идея методики определения временных запаздываний между собственными колебаниями блеска квазара, наблюдаемыми в его отдельных линзированных компонентах, принципиально довольно проста и очевидна. Общей чертой всех известных методов измерения запаздываний является использование, в том или ином виде, критериев максимума кросс-корреляции или минимума взаимной дисперсии сравниваемых кривых блеска. В случае кратных линзовых систем значения запаздываний могут определяться либо из сравнения кривых блеска пар компонентов, либо из совместного анализа всех кривых блеска.

При этом возникает необходимость интерполяции неравномерной выборки наблюдательных данных, представляющих исходные кривые блеска, т. е. требуется построение модели процесса. Используются различные математические представления кривой блеска квазара, как например: аппроксимация рядами по полиномам Лежандра [15, 16] и другие полиномиальные аппроксимации, сплайн-интерполяция [7, 11], сглаживание с помощью функции отсчетов [17] или линейных комбинаций Гауссовых ядер [18] и другие.

Общим свойством всех существующих методов измерения запаздываний является невозможность получить в явном виде оценку погрешности измерения временных запаздываний в качестве непосредственного результата обработки. Для этого обычно используют искусственную процедуру, известную как моделирование Монте-Карло: различные реализации случайного шума

с известными статистическими свойствами добавляются к гладким модельным кривым блеска с известными запаздываниями для последующей обработки с целью получения оценок временных запаздываний. Средний квадрат разброса значений запаздываний, полученных при различных имитациях кривых блеска, принимается в качестве оценки погрешности запаздываний.

В следующих разделах приводится краткое описание предлагаемого нами метода измерения временных запаздываний в присутствии событий микролинзирования, поясняется его отличие от методов, использованных ранее другими авторами. На примере обработки кривых блеска квадрупольной системы HE 0435-1223 демонстрируются возможности нашего подхода и его правомерность. Проводится сравнение наших оценок запаздываний с оценками, представленными в работах [13] и [16].

2. Суть предлагаемого метода

Приведем описание предлагаемого нами подхода в его сравнении с методикой, изложенной в работе [16] и использованной для обработки двух сезонов наблюдений HE 0435-1223.

Авторы работы [16] исходят из предположения, что наблюдаемые кривые блеска можно представить суммой двух разложений в ряд по полиномам Лежандра, одно из которых, $s(t)$, описывает истинные вариации собственного блеска квазара, а второе, $\mu_i(t)$ – составляющую, обусловленную событиями микролинзирования в рассматриваемом i -м изображении:

$$s(t) = \sum_{m=0}^{N_{quas}} a_m P_m \left[\frac{t-t_c}{\delta t} \right], \quad \mu_i(t) = \sum_{m=0}^{N_{micr}} c_{mi} P_m \left[\frac{t-t_c}{\delta t} \right].$$

Здесь P_m – m -й полином Лежандра; a_m и c_{mi} – соответствующие коэффициенты разложения; $t_c = (t_n + t_1)/2$ – точка, соответствующая середине интервала реализации, (n – количество точек отсчетов в кривой блеска); $\delta t = (t_n - t_1)/2$ – полуширина интервала реализации; N_{quas} и N_{micr} – порядки полиномов Лежандра, выбранные для этих двух составляющих. Далее отмечается, что в отсутствие микролинзирования кривая блеска i -го линзированного изображения $m_i(t)$ была бы смещенной во времени копией кривой блеска источника $s(t)$, отличающейся только коэффициентом усиления (постоянным сдвигом в звезд-

ных величинах). При наличии событий микролинзирования будем иметь $m_i(t) = s(t + \Delta t_i) + \Delta \mu_i(t)$, где Δt_i – время запаздывания в i -м изображении относительно другого, выбранного в качестве опорного; $\Delta \mu_i(t)$ – дифференциальная кривая блеска микролинзирования (вариации микролинзирования в i -м изображении относительно опорного), которая также может быть представлена разложением в ряд по полиномам Лежандра.

Установление оптимальных порядков полиномов N_{quas} и N_{micr} является отдельной задачей. В работе [16] предельно допустимый порядок N_{quas} аппроксимирующего полинома для “квазарной” составляющей кривой блеска определялся с использованием результатов измерения структурной функции вариаций блеска типичного квазара [19] и был принят равным 20. Для описания кривых блеска микролинзирования применялись полиномы Лежандра существенно более низких порядков N_{micr} – не выше 3.

Далее решалась задача поиска параметров, обеспечивающих минимум среднеквадратичного отклонения между измеренной кривой блеска i -го компонента и моделью процесса:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k_{im}} \sum_{j=1}^n \left[\frac{m_{ij} - s(t_j + \Delta t_i) - \Delta \mu_i(t_j)}{\sigma_{ij}} \right]^2,$$

где k_{im} – число линзированных изображений, σ_{ij} – погрешность измерения блеска изображении квазара.

Как и в работе [16], при аппроксимации наблюдаемых кривых блеска, представленных неравномерными дискретными точками отсчета, мы также используем их представление в виде разложения в ряд по полиномам Лежандра и также выполняем попарное сравнение кривых блеска. Однако, в отличие этой работы, мы не сравниваем кривые блеска в их исходной форме (дискретные неравномерно расположенные точки отсчетов) с “гладкой” модельной кривой блеска – одной из кривых, аппроксимированной рядом Лежандра. Предложенный нами подход предполагает попарное сравнение “гладких” кривых блеска, каждая из которых представлена своей аппроксимацией рядом Лежандра. Для этого предварительно находится разложение в ряд по ортонормированным полиномам в заданных неравномерно расположенных точках отсчета с использованием процедуры Грама–Шмидта [20: 15.2-5].

Такой подход предоставляет прозрачную и технически простую возможность учесть присутствие событий микролинзирования и устранить их влияние на результаты измерений временных запаздываний. Такая возможность основана на некоторых фундаментальных свойствах приближения функций в виде разложения в ряд по ортонормированным полиномам, а именно:

1) аппроксимация квадратично интегрируемой функции $F(x)$ суммой $F(x) \approx f(x) = \sum_{i=0}^n a_i u_i(x)$ – где совокупность $u_i(x)$ представляет собой полную ортонормированную последовательность функций (ортонормированный базис), построенную на дискретном числе узлов (в нашем случае это совокупность дат наблюдений), – доставляет наименьшее значение среднеквадратичной ошибки аппроксимации [20: 15.2-6];

2) исключение отдельных членов из суммы $f(x)$ или добавление к ней новых членов не меняет значений остальных ранее вычисленных коэффициентов a_i [20: 15.2-6].

Второе свойство указывает путь освобождения кривых блеска от переменной составляющей, обусловленной событиями микролинзирования, по крайней мере для случаев “медленных” событий (когда временной масштаб изменности микролинзирования заметно превосходит масштаб собственных вариаций блеска квазара). Для этого из рядов, представляющих аппроксимации кривых блеска компонентов, исключались младшие члены ряда – нулевого, 1-го и, при необходимости, 2-го порядка. Отметим, что, освобождая таким путем наблюдаемые кривые блеска от возможного вклада событий микролинзирования, мы также устраняем средние уровни (нулевой порядок) и линейные тренды (первый порядок) и в составляющих кривых блеска, обусловленных изменениями собственного блеска квазара. То есть для дальнейшего анализа мы получаем представления кривых блеска, приведенные к нулевому среднему уровню и освобожденные от линейных трендов (при необходимости и от квадратичных членов). Заметим, что действие этой процедуры аналогично действию фильтра нижних частот.

При выборе максимального порядка аппроксимирующего полинома N_{\max} мы руководствовались, во-первых, поведением среднеквадратичной погрешности аппроксимации в зависимости

от порядка полинома, а именно, с ростом N_{\max} погрешность аппроксимации σ_{appr} должна приближаться к погрешности исходных фотометрических данных σ_{phot} (обычно приводится в таблице исходных данных), не становясь меньше ее: $\sigma_{appr} \geq \sigma_{phot}$. С другой стороны, разумно потребовать, чтобы осцилляции, возникающие иногда вблизи концов реализаций или в местах разреженных отсчетов, не превышали значений фотометрических ошибок σ_{phot} . Этими критериями мы воспользовались при выборе оптимального порядка аппроксимирующего полинома.

Дальнейший анализ состоял в вычислении кросс-корреляционных функций для пар кривых блеска компонентов, представленных своими аппроксимациями. Для устранения краевых эффектов при вычислении кросс-корреляционных функций мы использовали процедуру, аналогичную процедуре вычисления локально-нормированной дискретной корреляционной функции (LNDCF – Locally Normalized Discrete Correlation Function), примененной в работе [15] для определения временного запаздывания в Первой Линзе Q0957+561 в радиодиапазоне. Далее в качестве оценки временного запаздывания для каждой данной пары принимался сдвиг во времени, при котором функция кросс-корреляции достигает максимума.

Описанный выше алгоритм реализован на языке программирования IDL. Для удобства внесения изменений в процесс вычисления программа была разбита на блоки, в которых выполнялись следующие процедуры:

1) подготовка данных;

2) вычисление ортонормированного базиса на дискретном множестве неравномерно расположенных точек (дат наблюдений) с помощью процедуры Грама–Шмидта [20: 15.2-5];

3) вычисление аппроксимирующих полиномов заданного порядка для кривых блеска выбранного сезона, вычисление и вывод среднеквадратичных погрешностей аппроксимации σ_{appr} для каждого компонента изображений, при необходимости коррекция заказанного числа точек с отклонением от аппроксимации, превышающим $3\sigma_{appr}$, визуализация исходных кривых блеска и соответствующих аппроксимирующих полиномов;

4) вычисление локально-нормированных корреляционных функций (см. выше) для пар аппроксимирующих полиномов, соответствующих всем возможным комбинациям из k_{im} компонен-

тов по два, визуализация вычисленных кросс-корреляционных функций, вычисление и вывод значений смещения по оси времени, при которых достигаются максимумы кросс-корреляционных функций, и значений функций корреляции в максимумах.

Программа достаточно удобна в использовании и быстро настраивается. Процесс вычислений и визуализации занимает от долей секунды до нескольких секунд в зависимости от числа точек отсчетов в исследуемой кривой блеска и быстродействия компьютера. В следующем разделе приводятся результаты апробации предложенного метода на примере обработки реальных кривых блеска системы HE 0435-1223.

3. Тестирование метода на данных мониторинга гравитационной линзы HE 0435-1223

Для тестирования предлагаемого подхода мы воспользовались данными детального семилетнего мониторинга квадрупольной гравитационной линзы HE 0435-1223, всесторонняя обработка которого представлена в работе [13]. Фотометрические данные мониторинга были взяты из архива CDS [21].

Объект HE 0435-1223 был идентифицирован как квадрупольно линзированный квазар с красным смещением $z_Q = 1.689$ в 2002 г. [22]. Красное смещение линзирующей галактики ($z_L = 0.4546$) было измерено позже [23]. Первые оценки временных запаздываний были сделаны по данным плотного двухлетнего мониторинга в 2004 и 2005 гг. на 1.3-метровом телескопе SMARTS [16]. Впоследствии кривые блеска этих двух сезонов были дополнены наблюдениями на других телескопах и данными, полученными в 2006–2010 гг. [13]. Оценки временных запаздываний, представленные в этих двух работах, приведены в табл. 1 (данные взяты из работы [13]).

В первой строке указаны значения временных запаздываний, полученные в работе [16] с ис-

пользованием представления кривых блеска в виде разложения в ряд по полиномам Лежандра (см. раздел 2). Во второй строке – результаты измерения тех же данных, что и в первой строке, но выполненные в работе [13] другим методом. В третьей строке – временные запаздывания, полученные в работе [13] по данным подробного семилетнего мониторинга. Примененный в этой работе подход основан на методе дисперсии (см. раздел 1), аналогичном предложенному Пельтом [5]. В частности, была использована оценка дисперсии Пельта, при которой выполняется линейная интерполяция между точками одной из кривых блеска на интервале 30 дней. Полная дисперсия равна сумме дисперсий, вычисленных для пар кривых блеска, составленных из всех возможных перестановок по две кривые из четырех. Чтобы избежать влияния выбора опорной кривой, каждая пара обрабатывалась дважды с заменой опорного компонента. Затем общая дисперсия минимизировалась относительно временных запаздываний и параметров полиномов, описывающих микролинзирования.

Временные запаздывания вычислялись в работе [13] относительно компонента B, принятого в качестве опорного, в котором, по мнению авторов, колебания блеска квазара на рассматриваемом интервале времени наименее искажены событиями микролинзирования. Наибольшая активность микролинзирования наблюдается в компоненте A, в отличие от C и D, для которых составляющая микролинзирования может быть представлена полиномами низкого порядка даже на протяжении всего семилетнего периода. Перед вычислением кросс-корреляционных функций для каждой пары кривых блеска и для каждого сезона оценивался вклад событий микролинзирования.

Как уже отмечалось, при нашем подходе оценка вклада событий микролинзирования выполняется исключительно просто, а именно: из полинома, аппроксимирующего кривую блеска конк-

Таблица 1. Оценки временных запаздываний (в сутках) в квадрупольно линзированном квазаре HE 0435-1223 по результатам работ [13] и [16]

| Данные | Авторы | Δt_{AB} | Δt_{AC} | Δt_{AD} | Δt_{BC} | Δt_{BD} | Δt_{CD} |
|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| SMARTS (сезоны 1, 2) | Kochanek (2006) | -8.0 ± 0.8 | -2.1 ± 0.8 | -14.4 ± 0.8 | | | |
| SMARTS (сезоны 1, 2) | Courbrin (2011) | -8.8 ± 2.4 | -2.0 ± 2.7 | -14.7 ± 2.0 | 6.8 ± 2.7 | -5.9 ± 1.7 | -12.7 ± 2.5 |
| COSMOGRAIL (7 сезонов) | Courbrin (2011) | -8.4 ± 2.1 | -0.6 ± 2.3 | -14.9 ± 2.1 | 7.8 ± 0.8 | -6.5 ± 0.7 | -14.3 ± 0.8 |

ретного компонента, извлекаются члены первых двух или трех порядков, представляющие средний уровень, линейную и квадратичную составляющие переменности. Этот полином низкого порядка описывает в нашем случае обе составляющие переменности – как собственно “кварзарную”, так и обусловленную микролинзированием. Так как вариации блеска квазара должны быть одинаковыми во всех его изображениях, разность между этими полиномами низкого порядка для любых двух изображений будет описывать дифференциальное микролинзирование. На рис. 1 приведены вычисленные таким образом кривые блеска дифференциального микролинзирования для пары А–В для шести сезонов наблюдений HE 0435-1223. Сравнение кривых, представленных на рис. 1, с аналогичными кривыми дифференциального микролинзирования, вычисленными в работе [13] более сложным способом, обнаруживает практически полное их совпадение.

Примеры кривых блеска компонентов изображений А, В, С и D квадрупольной системы HE 0435-1223 и их аппроксимаций разложениями в ряд по полиномами Лежандра, вычисленными по описанной выше процедуре, приведены на рис. 2. Из обработанных семи сезонов мы выбрали для иллюстрации сезон 2005 г. (наилучший по плотности и точности данных), 2006 г. (среднее качество данных) и 2007 г. (плохое качество). Напомним, что для представления кривых блеска из аппроксимирующих полиномов исключались члены двух младших порядков (средний уровень и линейный член).

Максимальный порядок полиномов составлял 13 для второго сезона и 9 для третьего и

четвертого. Как указывалось в разделе 2, при выборе порядка аппроксимирующего полинома для каждой конкретной кривой блеска мы руководствовались, во-первых, поведением среднеквадратичной погрешности аппроксимации в зависимости от порядка и, во-вторых, старались не допускать осцилляций, возникающих иногда при излишне высоких порядках вблизи границ реализаций. Так, для второго сезона увеличение порядка полинома от 13 до 21 лишь незначительно увеличивает точность аппроксимации, делая в то же время осцилляции на краях неприемлемыми. Поэтому для второго сезона мы остановились на полиноме 13-го порядка.

Для каждого компонента в наблюдаемых кривых блеска есть точки данных, для которых отклонения от аппроксимирующих полиномов заметно превышают характерные ошибки фотометрии и ошибки аппроксимации. Мы допускаем возможность коррекции программным способом двух или трех точек на кривых блеска, отклоняющихся от аппроксимирующего полинома на величину, превышающую $3\sigma_{appr}$. Исправленным точкам (выделены квадратами на рис. 2) присваиваются значения, соответствующие значениям аппроксимирующего полинома в местах их расположения на оси времени, затем процедура аппроксимации повторяется с точками, модифицированными таким образом.

Кросс-корреляционные функции C_{AB} , C_{AC} , C_{AD} , C_{BC} , C_{BD} , C_{CD} , вычисленные для всех возможных пар компонентов HE 0435-1223 по кривым блеска второго сезона, представлены на рис. 3, а в табл. 2 приведены оценки временных

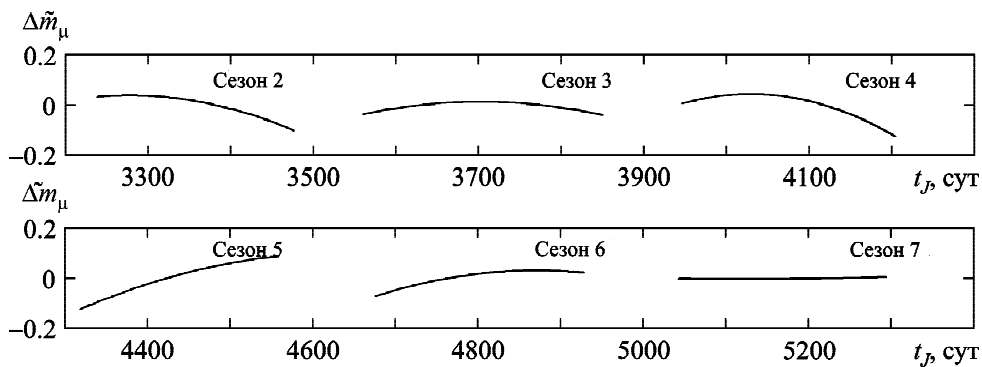


Рис. 1. Кривые блеска микролинзирования в компоненте А относительно В (дифференциальные микролинзирования). По горизонтальной оси отложено время t_J (в сутках), равное гелиоцентрической юлианской дате (HJD) минус 2400000: $t_J = \text{HJD} - 2400000$, по вертикальной оси – вариации блеска $\Delta\tilde{m}_\mu$ в звездных величинах относительно среднего за данный сезон уровня

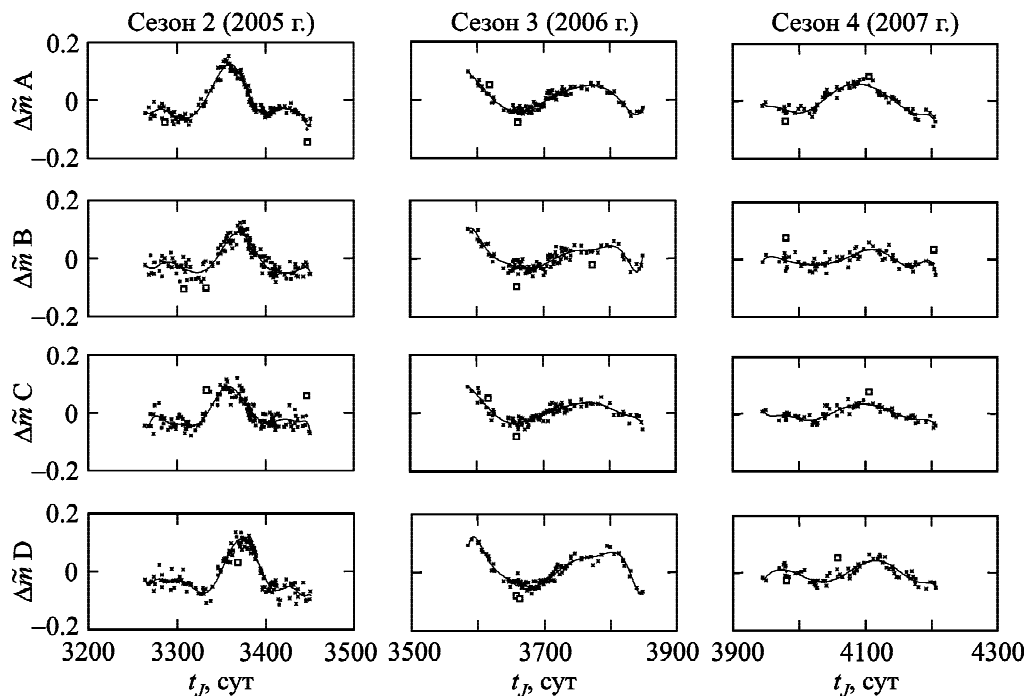


Рис. 2. Кривые блеска HE 0435-1223 и их аппроксимации полиномами Лежандра (компоненты от А до D – сверху вниз, сезоны 2, 3, 4 – слева направо) с устраненными членами нулевого и первого порядка. По горизонтальной оси отложено время t_j (в сутках), равное гелиоцентрической юлианской дате (HJD) минус 2400000: $t_j = \text{HJD} - 2400000$, по вертикальной оси – вариации блеска Δm в звездных величинах относительно среднего за данный сезон уровня

запаздываний для семи сезонов мониторинга HE 0435-1223.

Табл. 2 демонстрирует достаточно хорошее совпадение оценок, полученных по данным разных сезонов. Наилучшим образом согласуются между собой результаты обработки данных второго и третьего сезонов, что не является неожиданным, если учесть характер исходных данных: этим сезонам присущи наиболее высокая плотность отсчетов и большая амплитуда сигнала. Самыми быстрыми и мощными вариациями блеска характеризуется второй сезон, что обуславливает наибольшую надежность оценок запаздываний по данным этого сезона.

Оценки, сделанные по 4, 5 и 6 сезонам, заметно хуже согласуются между собой и с результатами 2 и 3 сезонов, что также не должно вызывать удивления, учитывая отсутствие “выразительных” деталей на кривых блеска этих сезонов. Наконец, следует отметить существенное отклонение всех перечисленных оценок запаздываний от результатов 1 и 7 сезонов, которые в табл. 2 приведены отдельно. Объяснение этому, очевидно, следует искать в большей разреженности точек отсчетов

на кривых блеска этих сезонов по сравнению с другими.

Полученные нами значения запаздываний удовлетворительно согласуются с результатами измерений, выполненных в работах [13, 16], по крайней мере, находятся в пределах указанных в этих работах погрешностей, которые определялись общепринятым способом, упомянутым в первом разделе. Мы отчетливо сознаем, что корректной альтернативы этому методу оценки погрешностей измерения запаздываний пока нет. Тем не менее следует отметить, что реальный разброс оценок, выполненных даже с одними и теми же данными, но разными методами, превосходит оценки погрешностей, полученные методом статистических испытаний. Еще более существенные отклонения в оценках временных запаздываний получаются при использовании различных реализаций кривых блеска, например, взятых из разных сезонов. Это хорошо демонстрируют результаты обработки данных семи сезонов, представленные в табл. 2.

Нам представляется, что более реалистичные оценки погрешностей можно получить, вос-

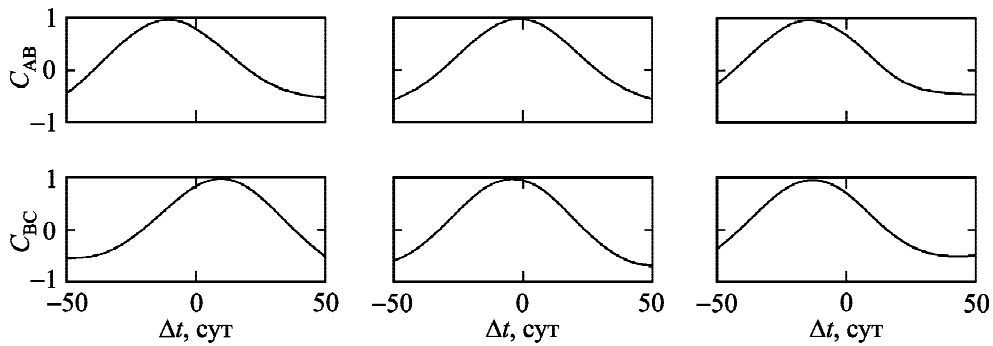


Рис. 3. Кросс-корреляционные функции C для пар кривых блеска HE 0435-1223, представленных полиномами, аппроксимирующими наблюдательные данные на рис. 2 (обработка данных второго сезона). По горизонтальной оси отложен временной сдвиг Δt (в сутках)

Таблица 2. Значения временных запаздываний в системе HE 0435-1223, определенные по данным разных сезонов, – результаты тестирования метода, предложенного в настоящей работе

| Данные | Δt_{AB} | Δt_{AC} | Δt_{AD} | Δt_{BC} | Δt_{BD} | Δt_{CD} |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Сезон 2 (2005 г.) | -11.0 | -0.8 | -14.5 | 10.4 | -3.7 | -14.7 |
| Сезон 3 (2006 г.) | -10.2 | -2.3 | -11.9 | 7.2 | -3.3 | -9.5 |
| Сезон 4 (2007 г.) | -10.9 | -3.8 | -13.1 | 3.4 | -9.1 | -10.4 |
| Сезон 5 (2005 г.) | -10.6 | -5.0 | -21.3 | 7.2 | -9.4 | -15.3 |
| Сезон 6 (2005 г.) | -10.0 | -2.7 | -5.8 | 5.2 | -3.4 | -1.6 |
| Среднее | -10.5 ± 0.5 | -2.9 ± 1.2 | -13.3 ± 3.7 | 6.7 ± 1.9 | -4.4 ± 3.9 | -10.3 ± 2.5 |
| Сезон 1 (2004 г.) | -1.6 | 1.4 | -18.5 | -0.4 | -22.1 | -20.7 |
| Сезон 7 (2010 г.) | -1.6 | 0.0 | -1.4 | 1.3 | -2.9 | -0.2 |

пользовавшись предположением о стационарности случайного процесса, описывающего переменность блеска макроизображений квазара. В рамках такого предположения одинаково правомерно определять статистические характеристики случайного процесса как из анализа полной длины реализации (несколько сезонов), так и их усреднением по результатам обработки отдельных реализаций процесса (сезонов). Таким образом, если для рассматриваемого интервала времени предположение о стационарности справедливо, то в качестве наиболее вероятных оценок временных запаздываний можно принять их значения, усредненные по сезонам. Среднеквадратичные же отклонения значений временных запаздываний, полученных по данным отдельных сезонов, от среднего по всем реализациям можно принять в качестве меры неопределенности оценок запаздываний.

При этом возникает следующая проблема. Кривые блеска, зарегистрированные в различные сезоны, неравнозначны в плане их эффективности для измерения временных запаздываний. Поэтому значения, полученные по данным разных сезонов,

должны входить с разными весами в процесс вычисления среднего по реализациям. Интуитивно понятно, что эффективность кривой блеска для измерения временных запаздываний в значительной степени определяется соотношением между амплитудой сигнала и уровнем ошибок измерения, при этом значение имеют также плотность точек измерения на кривой блеска и общая продолжительность кривой. Поэтому весовые коэффициенты могут быть выбраны пропорциональными, например, плотности точек и их общему количеству на кривой блеска, а также отношению амплитуды кривой блеска к уровню ошибок измерения. Приведенные в табл. 2 средние значения временных запаздываний и их неопределенности (строка “Среднее”) были посчитаны с учетом таким образом определенных весовых коэффициентов. Данные второго сезона при этом вошли в оценку среднего с максимальным весом, минимальный вес оказался у седьмого сезона, остальные имели промежуточные веса.

Мы полагаем, что при достаточно большом числе реализаций (сезонов) полученные таким

способом оценки погрешностей имеют не меньшее право на существование, нежели те, которые получены моделированием методом статистических испытаний. Открытым остается вопрос, обладают ли доступные в настоящее время данные по объекту HE 0435-1223 достаточной статистикой, чтобы можно было воспользоваться предположением о стационарности.

Авторы работы [13] проверяли свой метод на устойчивость и достаточность статистики различными способами, в частности, обрабатывая данные отдельных сезонов и групп сезонов. Они утверждают, что выбор сезона заметного влияния на результат не оказывает. Это утверждение находится в противоречии с данными нашей табл. 2, однако предметно комментировать его не представляется возможным, так как конкретных значений запаздываний для отдельных сезонов в работе [13] не приводится. Между тем многие авторы отмечают зависимость результатов от вида конкретной реализации точек измерения на кривой блеска, случайные отклонения которых из-за измерительных ошибок создают иногда видимость детерминированного сигнала и, как результат, приводят к уходу от истинного значения запаздывания.

5. Выводы

Резюмируя, отметим главные моменты работы.

1. Временные запаздывания в гравитационно линзированном квазаре HE 0435-1223, определенные предложенным в настоящей работе методом, достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными ранее для этого объекта другими методами.

2. Новизна предложенного метода состоит в использовании фундаментальных свойств приближения функций в виде разложения в ряд по ортогональным полиномам. Это обеспечивает наилучшее приближение к наблюдаемым кривым блеска в смысле среднеквадратичного отклонения и, что наиболее важно, предоставляет простую и объективную (в смысле независимости от действий исследователя) процедуру устранения влияния событий микролинзирования на оценки временных запаздываний.

3. Кросс-корреляционная функция вычисляется для кривых блеска, представленных соответствующими аппроксимирующими функциями. Это обеспечивает ее гладкость и гарантирует отсутствие случайных ложных максимумов.

Отметим в заключение, что сравнение двух кривых блеска, представленных их аппроксимациями, предполагается также и в методе разницы регрессии (Regression Difference Method, RDM), упоминавшемся в разделе 1. Однако на этом сходство с нашим методом заканчивается: нам не встречались в литературе работы, где использовались бы преимущества приближения функций в виде разложения в ряд по ортогональным полиномам, перечисленные в разделе 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Refsdal S. On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1964. – Vol. 128, Is. 4. – P. 307–310.
2. Walsh D., Carswell R., and Weymann R. 0957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens? // *Nature.* – 1979. – Vol. 279, No. 5712. – P. 381–384.
3. Press W., Rybicki G., and Hewitt J. The time delay of gravitational lens 0957 + 561. I. Methodology and analysis of optical photometric data // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 385. – P. 404–415.
4. Press W., Rybicki G., and Hewitt J. The time delay of gravitational lens 0957 + 561. II. Analysis of radio data and combined optical-radio analysis // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 385. – P. 416–420.
5. Pelt J., Kayser R., Refsdal S., and Schramm T. The light curve and the time delay of QSO 0957 + 561 // *Astron. Astrophys.* – 1996. – Vol. 305. – P. 97–107.
6. Hirv A., Olsper N., Pelt J. Towards the Automatic Estimation of Time Delays of Gravitational Lenses // *Baltic Astronomy.* – 2011. – Vol. 20. – P. 125–144.
7. Tewes M., Courbin F., and Meylan G. COSMOGRAIL: the COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses – XI. Techniques for time delay measurement in presence of microlensing // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 553. – id. A120.
8. Eulaers E., Tewes M., Magain P., Courbin F., Asfandiyarov I., Ehgamberdiev Sh., Rathna Kumar S., Stalin C. S., Prabhu T. P., Meylan G., and Van Winckel H. COSMOGRAIL: the COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses – XII. Time delays of the doubly lensed quasars SDSS J1206+4332 and HS 2209+1914 // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 553. – id. A121.
9. Rathna Kumar S., Tewes M., Stalin C. S., Courbin F., Asfandiyarov I., Meylan G., Eulaers E., Prabhu T. P., Magain P., Van Winckel H., and Ehgamberdiev Sh. COSMOGRAIL: the COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses – XIV. Time delay of the doubly lensed quasar SDSS J1001+5027 // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 557. – id. A44.
10. Kochanek C. and Schechter P. The Hubble Constant from Gravitational Lens Time Delays. In: Freedman W. L., editor. *Carnegie Observatories Astrophysics Series, Vol. 2: Measuring and Modeling the Universe.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2003. – P. 117–137.

11. Barkana R. Analysis of time delays in the gravitational lens PG 1115+080 // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 489, No. 1. – P. 21–28.
 12. Минаков А. А., Васильев С. А., Вакулик В. Г. Пространственно-временные вариации кривой блеска источника при прохождении излучения через гравитационную линзу-галактику // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2001. – Т. 6, № 2. – С. S43–S48.
 13. Courbin F., Chantry V., Revaz Y., Sluse D., Faure C., Tewes M., Eulaers E., Koleva M., Asfandiyarov I., Dye S., Magain P., van Winckel H., Coles J., Saha P., Ibrahimov M., and Meylan G. COSMOGRAIL: the COSmological MONitoring of GRAVItational Lenses – IX. Time delays, lens dynamics and baryonic fraction in HE 0435-1223 // *Astron. Astrophys.* – 2011. – Vol. 536. – id A53.
 14. Tewes M., Courbin F., Meylan G., Kochanek C. S., Eulaers E., Cantale N., Mosquera A. M., Asfandiyarov I., Magain P., van Winckel H., Sluse D., Keerthi R. K. S., Stalin C. S., Prabhu T. P., Saha P., and Dye S. COSMOGRAIL: Measuring Time Delays of Gravitationally Lensed Quasars to Constrain Cosmology // *The Messenger.* – 2012. – No. 150. – P. 49–52.
 15. Lehar J., Hewitt J. N., Burke B. F., and Roberts D. H. The radio time delay in the double quasar 0957 + 561 // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 384. – P. 453– 466.
 16. Kochanek C. S., Morgan N. D., Falco E. E., McLeod B. A., Winn J. N., Dembicky J., and Kezebeck B. The Time Delays of Gravitational Lens HE 0435-1223: An Early-Type Galaxy with a Rising Rotation Curve // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 640, No.1. – P. 47– 61.
 17. Cuevas-Tello J., Tino P., and Raychaudhury S. How accurate are the time delay estimates in gravitational lensing? // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 454, No. 3. – P. 695–706.
 18. Vakulik V. G., Shulga V. M., Schild R. E., Tsvetkova V. S., Dudinov V. N., Minakov A. A., Nuritdinov S. N., Artamonov B. P., Kochetov A. Ye, Smirnov G. V., Sergeev A. A., Konichek V. V., Sinelnikov I. Ye, Bruevich V. V., Akhunov T., and Burkhonov O. Time delays in PG 1115+080: new estimates // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 400, Is.1. – P. L90–L93.
 19. Vanden Berk D. E., Wilhite B. C., Kron R. G., Anderson S. F., Brunner R. J., Hall P. B., Ivezić Ž., Richards G. T., Schneider D. P., York D. G., Brinkmann J. V., Lamb D. Q., Nichol R. C., and Schlegel D. J. The Ensemble Photometric Variability of ~25,000 Quasars in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 601, No. 2. – P. 692–714.
 20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
 21. Centre de Données astronomiques de Strasbourg [Электронный ресурс]: R-band light curves of HE 0435-1223 – Режим доступа: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/>
 22. Wisotzki L., Schechter P., Bradt H., Heinmüller J., and Reimers D. HE 0435-1223: A wide separation quadruple QSO and gravitational lens // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 395, No.1. – P. 17–23.
 23. Morgan N., Kochanek V., Pevunova O., and Schechter P. L. The lens redshift and galaxy environment for HE 0435-1223 // *Astron. J.* – 2005.– Vol. 129, Is. 6. – P. 2531–2541.
- В. С. Цветкова^{1,2}, В. М. Шульга¹, Л. А. Бердіна¹
- ¹Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна
- ²НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, вул. Сумська, 35, м. Харків, 61022, Україна
- ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАПІЗНЕНЬ У ГРАВІТАЦІЙНО ЛІНЗОВАНИХ КВАЗАРАХ ЗА НАЯВНОСТІ МІКРОЛІНЗУВАННЯ**
- Запропоновано метод визначення часових запізнень у гравітаційно лінованих квазарах, який надає просту і прозору процедуру усунення впливу подій мікролінзування, що ґрунтується на фундаментальних властивостях репрезентації квадратично інтегрованих функцій у вигляді розкладання за ортогональними поліномами. Метод протестовано на семирічних кривих блиску гравітаційно лінованого квазара HE 0435-1223, фотометрію для котрого було отримано з архіву CDS (Strasbourg Astronomical Data Center). Надається аналіз отриманих оцінок часових запізнень у системі HE 0435-1223 та їх порівняння з результатами, опублікованими раніше в роботах інших авторів.
- V. S. Tsvetkova^{1,2}, V. M. Shulga¹, and L. A. Berdina¹
- ¹ Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine
- ² Institute of Astronomy, V. Karazin National University of Kharkiv, 35, Sumska St., Kharkiv, 61022, Ukraine
- MEASURING THE TIME DELAYS IN GRAVITATIONALLY LENSED QUASARS IN THE PRESENCE OF MICROLENSING**
- A method to measure the time delays in gravitationally lensed quasars is proposed, which provides a simple and transparent procedure to eliminate the effects of microlensing events. The procedure is based on fundamental properties of representation of quadratically integrable functions by their expansion in orthogonal polynomials. The method is tested on the seven-year duration light curves of the gravitationally lensed quasar HE 0435-223. The corresponding photometry was downloaded from the Strasbourg Astronomical Data Center archive. The analysis of time delay estimates in the HE 0435-1223 system, as well as comparison with the results published by other authors, are presented.

Статья поступила в редакцию 26.08.2014