Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 85–88.

УДК 524.5+524.7
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-85
ORCID 0000-0001-8347-7880

РАССЕЯНИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ КВАЗАРА НА СИСТЕМЕ ПЛАЗМЕННЫХ ЛИНЗ В ГАЛАКТИКЕ

Т.А. Корюкова[1,2], И.Н. Пащенко[3,1], А.Б. Пушкарев[2,1]

[1] Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, Россия, tatyana.koryukova@gmail.com
[2]Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия
[3]Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

SCATTERING OF QUASAR RADIO EMISSION ON A SYSTEM OF PLASMA LENSES IN THE GALAXY

T.A. Koryukova[1,2], I.N. Pashchenko[3,1], A.B. Pushkarev[2,1]

[1]Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia
[2]Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Crimea, Russia
[3]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Аннотация. На кривых блеска квазара 2005+403, полученных на радиотелескопе РАТАН-600, ранее нами было обнаружено минимум пять последовательных модуляций плотности потока, отождествленных с событиями экстремального рассеяния радиоизлучения. В данной работе мы представляем результаты Монте-Карло моделирования рефракционного рассеяния радиоизлучения квазара на системе линз. Мы разработали численную модель распространения волн в системе двух гауссовых линз, позволяющую оценивать физические параметры рассеивающих экранов, создающих модуляции на кривых блеска радиоисточников.

Ключевые слова: активные ядра галактик, межзвездная среда, рассеяние радиоволн.

Abstract. In the light curves of quasar 2005+403 obtained with the RATAN-600 radio telescope, we previously detected at least five flux density modulations identified as extreme scattering events. In this study, we present the results of Monte Carlo simulations of the refractive scattering of the quasar's radio emission by a complex lens system. We developed a model of wave propagation in the system of two Gaussian lenses, allowing us to estimate the physical parameters of scattering screens that create modulations in the light curves of radio sources.

Keywords: active galactic nuclei, interstellar medium, radio waves scattering.

ВВЕДЕНИЕ

В результате совместного анализа многочастотных радиоинтерферометрических наблюдений (Very Long Baseline Array, VLBA), наблюдений Owens Valley Radio Observatory (OVRO) с одиночной антенной и наблюдений с помощью радиотелескопа РАТАН-600 было показано, что в данных квазара 2005+403 на масштабах времени до года почти всегда оказываются значимыми эффекты рассеяния в межзвездной среде Галактики (МЗС). Обнаружены вторичные изображения [Koryukova et al., 2023], угловое уширение наблюдаемого размера [Koryukova et al., 2023], впервые надежно определен значимый вклад субструктуры рассеяния на больших проекциях баз источника [Plavin et al., 2026], а также обнаружены множественные события экстремального рассеяния (ESE) на гигагерцовых кривых блеска источника [Koryukova et al., 2023; Koryukova et al., 2025]. Таким образом, квазар 2005+403 — один из самых перспективных зондов для исследования физических свойств тепловой плазмы в Галактике в направлении области созвездия Лебедь.

Преломление на плазменных линзах радиоволн, проходящих через луч зрения на источник, может создавать каустические поверхности на кривых блеска компактных ярких радиоисточников, формируя вариации плотности потока. Общей чертой одиночных ESE является симметричная (в случае гауссовых линз) пара пиков, разделенных неделями или месяцами, окружающих плоский или округлый минимум [Fiedler et al., 1994; Pushkarev et al., 2013]. Модуляции плотности потока во время событий ESE являются ценным источником информации для изучения физических свойств промежуточного рассеивающего экрана.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Вариации плотности потока квазара 2005+403 на кривых блеска, полученных на радиотелескопе РАТАН-600 на 5, 8 и 11 ГГц в 2014–2017 гг., выглядят как последовательность нескольких ESE-подобных модуляций (рис. 1). Частота возникновения этих событий в среднем составляет 2.5 мес., а продолжительность одного события — порядка нескольких месяцев. Вариации плотности потока имеют квазисимметричную форму и примерно одинаковую продолжительность на разных частотах наблюдения. Теоретически предсказано, что неоднородная структура рассеивающего экрана может вызвать формирование более одного ESE подряд на кривой блеска радиоисточника [Fiedler et al., 1994]. Такая последовательность множественных ESE была обнаружена нами впервые.

Для количественного описания свойств плазменных линз, создающих ESE на кривых блеска радиоисточников, наблюдаемые модуляции плотности потока могут быть аппроксимированы с использованием стандартных моделей экстремального рассеяния [например, Fiedler et al.,

1994; Clegg et al., 1998]. В случае же модуляций, создаваемых системой нескольких линз, данные модели неприменимы, поскольку две последовательно расположенные линзы создают эффект, не сводящийся к простой суперпозиции эффектов от каждой линзы по отдельности. Для моделирования более сложных случаев рассеяния на нескольких линзах мы использовали численное моделирование распространения лучей методом Монте-Карло. В качестве первого приближения рассмотрен случай, когда через луч зрения последовательно проходят две линзы с гауссовым профилем плотности свободных электронов. Каждой линзе соответствует эффективная сила α (пропорциональна плотности свободных электронов в линзе) и горизонтальное смещение положения эпохи минимума вариаций *u*'. Предполагаем, что обе линзы находятся на одинаковом удалении от наблюдателя. Угловой размер источника излучения σ_s оценивается в единицах размера линзы a_1. Для оценки размера второй линзы в модель добавлен параметр a_ratio_2, который определяется как отношение размеров первой линзы ко второй. Для каждой реализации положения системы линз относительно источника, распределенной по нормальному закону с дисперсией равной угловому размеру источника в единицах размера первой линзы σ_s, генерируется плоский фронт излучения источника, равномерно покрывающий интервал по координате *u* (в плоскости линз). Лучи последовательно проходят через две линзы, на каждой из которых испытывают рассеяние пропорционально локальному градиенту рассеивающей силы α. Итоговая кривая блеска строится из отношения нормированной на нелинзированную интенсивности. В результате наблюдается одномерное распределение интенсивности как функции координаты *u*' в плоскости наблюдателя. На рис. 2 показана схема распространения лучей от источника в случае, когда через луч зрения проходит система из двух линз с произвольными параметрами (слева), а также результирующая кривая блеска в плоскости наблюдателя *u*' (справа).

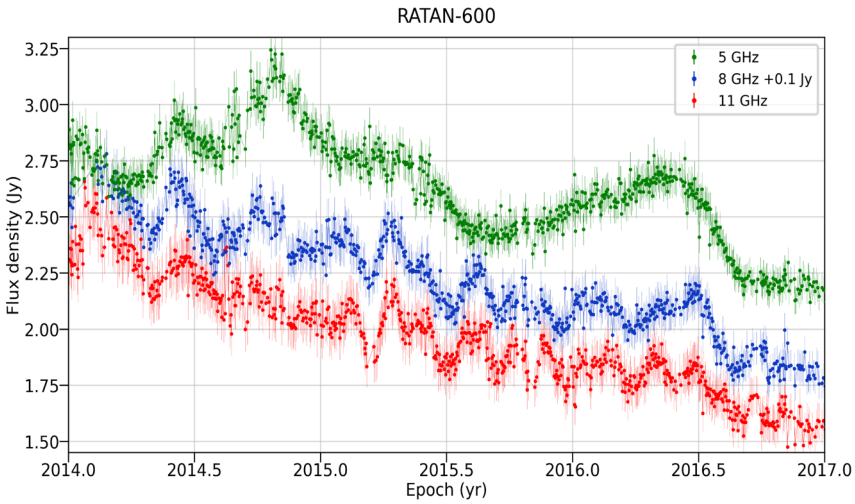

Рис. 1. Кривые блеска 2005+403, полученные на РАТАН-600. Зеленая кривая соответствует наблюдаемой частоте 5 ГГц, синяя — 8 ГГц, красная — 11 ГГц

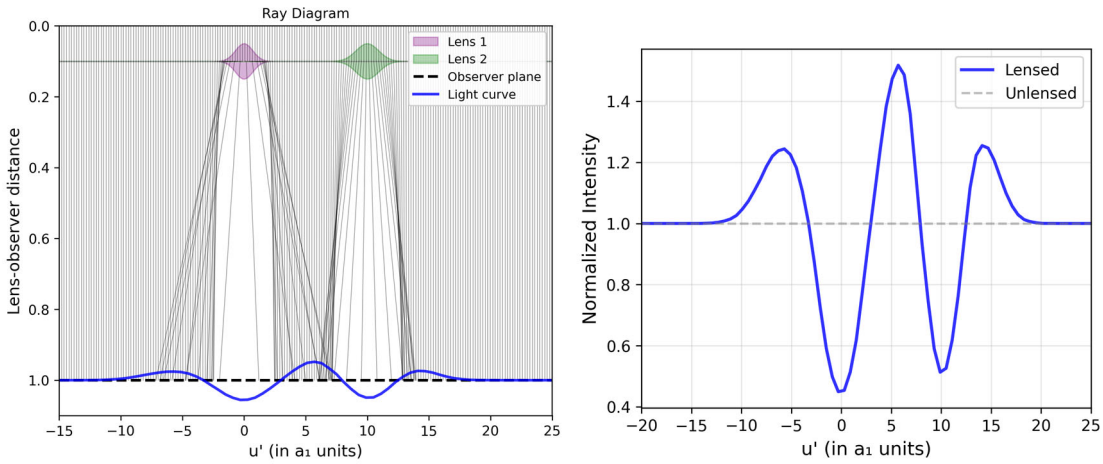

Рис. 2. Диаграмма распространения лучей, преломленных последовательно на двух рассеивающих линзах (слева), показывающая, как формируются области фокусировки и дефокусировки лучей в случае ESE на нескольких экранах. Справа — модуляции, наблюдаемые на кривых блеска источника в случае ESE на двух линзах. По оси X на обеих панелях даны координаты в плоскости наблюдателя *u*' в единицах углового размера первой линзы a_1.

Восстановление параметров модели. Для количественной оценки эффективности восстановления параметров модели была сгенерирована синтетическая кривая блеска на основе модели двух линз с параметрами, указанными в табл. 1. К полученной модели был добавлен шум на уровне 5 %. Для количественной оценки неопределенностей восстановленных параметров применен непараметрический бутстрап с генерацией 50 реализаций. В табл. 1 приведены истинные значения параметров модели, граничные значения области поиска максимума правдоподобия и интервальные оценки параметров, полученные из бутстрап-распределений. На рис. 3 показаны симулированные наблюдательные данные, которые использовались для подгонки параметров модели из табл. 1 (синие точки), а также кривая, соответствующая полученным параметрам (красная линия). Все истинные значения параметров попадают в 1σ интервал, что свидетельствует о хорошем качестве восстановления.

Влияние уровня шума на точность восстановления параметров. Для оценки влияния уровня шума данных на качество оценки параметров были проведены серии восстановлений параметров по синтетическим данным с различным уровнем шума: 2, 5 и 10 %. Результаты представлены в табл. 2.

С ростом уровня шума от 2 до 10 % точность восстановления параметров в целом снижается, но все параметры восстанавливаются с высокой точностью в пределах 1σ. Для надежного восстановления параметров пороговый уровень шума реальных данных должен определяться на основе полученных оценок параметров.

Восстановление параметров для различных конфигураций линз. Для оценки работоспособности алгоритма в широком диапазоне параметров были проведены восстановления для трех различных конфигураций двухлинзовой системы. Уровень шума во всех экспериментах составлял 5 %. Истинные параметры выбирались таким образом, чтобы охватить различные режимы: слабые линзы (I), сильные линзы (II) и одинаковые по силе линзы с близким расположением (III). Полученные оценки приведены в табл. 3. В конфигурациях I и II все шесть восстановленных параметров попадают в 2σ-интервал относительно истинных значений, что свидетельствует о том, что разработанный метод обеспечивает надежное восстановление параметров для широкого диапазона их значений. Основное ограничение выявлено для случая близкорасположенных линз сравнимой силы: обнаружена корреляция между α_2 и a_ratio_2, приводящая к ошибкам восстановления больше 2σ.

Таблица 1. Параметры линз, оцененные с помощью модели из двух рассеивающих линз, пересекающих луч зрения на источник

Параметр	Истинное значение	Границы поиска	Оценка параметра
α_1	15.0	0.1 – 20.0	15.6±2.9
α_2	10.0	0.1 – 20.0	9.8±3.2
σ_s	2.0	0.05 – 5.0	1.9±0.1
a_ratio_2	1.3	0.5 – 3.0	1.6±0.5
u'_1	0.0	−10.0 – 10.0	0.1±3.9
u'_2	10.0	−10.0 – 20.0	10.0±4.1

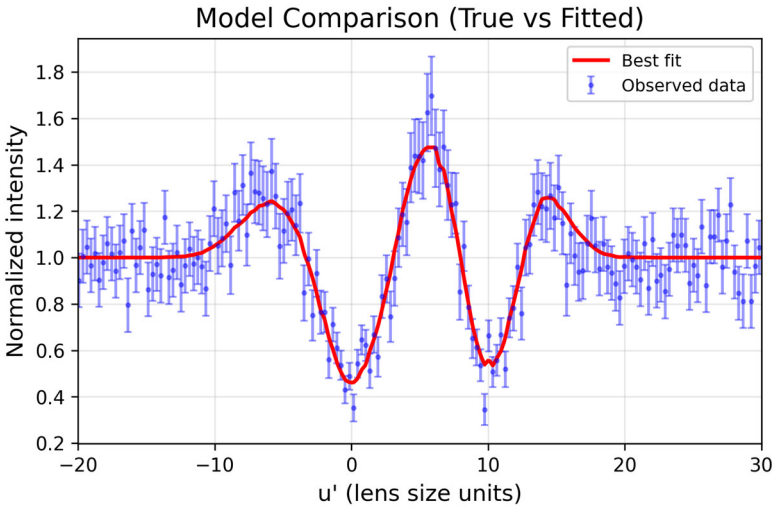

Рис. 3. Синтезированные наблюдательные данные, созданные с помощью модели двух линз (синие точки). Красная кривая — результат подгонки в рамках предположения о рассеянии на двух линзах. Истинные значения и интервальные оценки параметров модели даны в табл. 1.

Таблица 2. Восстановленные параметры модели с двумя линзами при различных уровнях шума в синтетических данных. Границы поиска соответствуют табл. 1

Пар-р	Истинное значение	Оценка параметра		
		Шум 2%	Шум 5%	Шум 10%
α_1	15.0	15.6±0.2	15.6±2.9	16.2±2.8
α_2	10.0	10.5±0.3	9.8±3.2	8.7±2.4
σ_s	2.0	2.1±0.1	1.9±0.1	1.7±0.2
a_ratio_2	1.3	1.4±0.1	1.6±0.5	0.9±0.4
u'_1	0.0	0.01±0.02	0.1±3.9	0.2±3.1
u'_2	10.0	9.9±0.1	10.0±4.1	10.2±3.2

Таблица 3. Восстановление параметров двухлинзовой модели для различных наборов истинных параметров. Границы поиска соответствуют Табл. 1.

Параметр	Истинное значение			Оценка параметра		
	I	II	III	I	II	III
α_1	5.0	20.0	12.0	6.0±0.6	20.4±0.8	14.2±1.7
α_2	3.0	10.0	12.0	3.2±1.4	9.7±0.9	5.6±2.0
σ_s	1.5	3.0	1.0	1.4±0.8	2.9±0.1	1.2±0.1
a_ratio_2	1.1	2.0	1.0	1.1±0.2	1.7±0.4	2.6±0.4
u'_1	2.0	– 5.0	0.0	1.9±0.7	– 5.1±0.1	0.7±0.1
u'_2	8.0	15.0	3.0	8.0±0.7	14.9±0.2	2.2±0.6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель для описания распространения излучения при учете рассеяния на двух линзах с гауссовым профилем плотности. Выполнено восстановление параметров модели по синтетическим данным с различным уровнем шума, а также исследованы различные конфигурации линз. Разработанная модель показала высокую эффективность при восстановлении исходных параметров двухлинзовой системы. Модель позволит проводить оценку параметров МЗС в случаях многокомпонентного линзирующего экрана, для которого применение стандартных моделей ESE оказывается проблематичным. Данную модель мы планируем использовать для оценки параметров рассеивающих экранов в направлении квазара 2005+403 с использованием многочастотных наблюдательных данных, полученных на РАТАН-600.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-22-00152.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Clegg A.W., Fey A.L., Lazio T.J.W. The Gaussian plasma lens in astrophysics: refraction // Astrophys. J. 1998. V. 496, N 1. P. 253–266.

Koryukova T.A., Pushkarev A.B., Kiehlmann S., Readhead A.C.S., Multiple imaging of the quasar 2005+ 403 formed by anisotropic scattering // Monthly Not. Royal Astron. Soc. 2023. V. 526, N 4. P. 5932-5948.

Koryukova T.A., Trushkin S.A., Pashchenko I.N., Pushkarev A.B. Probing plasma scattering screens towards the quasar 2005+ 403 wit Monthly Not. Royal Astron. Soc. 2025. V. 542, N 4. P. 2733–2751.

Plavin A.V., Pushkarev A.B., Kovalev Y.Y. Direct very long baseline interferometry detection of interstellar turbulence imprint on a quasar TXS 2005+ 403 // Astrophys. J. Lett. 2026. V. 1003, N 1. P. L4.

Pushkarev A.B., Kovalev, Y.Y., Lister, M.L. et al. VLBA observations of a rare multiple quasar imaging event caused by refraction in the interstellar medium // Astron. Astrophys. 2013. V. 555. P. A80.

Fiedler R.L., Dennison, B., Johnston, K.J., et al. A summary of extreme scattering events and a descriptive model // Astrophys. J. 1994. V. 430, N 2, pt. 1. P. 581–594.