

ПРИРОДА

№ 1, 2005 г.

М.Б. Богданов, А.М. Черепашук

Взгляд на квазар через гравитационную линзу

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции**



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Взгляд на квазар сквозь гравитационную линзу

М.Б.Богданов, А.М.Черепашук

В прошлом году исполнилось 40 лет со дня знаменательного события в астрофизике, когда впервые были идентифицированы линии в спектре квазара и установлено, что эти объекты находятся на космологических расстояниях, а следовательно, должны считаться наиболее мощными источниками излучения среди всех известных астрономам. Только к концу XX в. благодаря работам сотен исследователей, применивших весь арсенал методов наблюдательной астрофизики в диапазоне спектра от гамма-лучей до радиоволн, стало ясно, что квазары, как и многие другие внегалактические объекты (сейфертовские галактики, лацертиды и т.п.) представляют собой проявление активности ядер галактик [1]. При этом основной источник энергии активных ядер — дисковая аккреция вещества на сверхмассивные черные дыры, находящиеся в центрах галактик. Последнее утверждение базируется на большой совокупности многократно проверенных наблюдательных данных. Однако доказательства по существу являются косвенными — они суть результаты анализа распределения энергии в спектрах квазаров и изучения формы контуров эмиссионных линий. Непосредственно увидеть «центральную машину» квазара —

© Богданов М.Б., Черепашук А.М., 2005



Михаил Борисович Богданов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией астрономии и геофизики НИИ механики и физики Саратовского государственного университета им.Н.Г.Чернышевского. Занимается исследованием астрономических объектов с использованием методов повышения углового разрешения телескопов, гравитационных линз и микролинз, изучением звездных атмосфер и пылевых оболочек.



Анатолий Михайлович Черепашук, член-корреспондент Российской академии наук, директор Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга при Московском государственном университете им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — исследование двойных звезд и рентгеновских источников в тесных двойных системах, гравитационных линз и микролинз, обратные задачи астрофизики. Неоднократно публиковался в «Природе», член редколлегии журнала.

релятивистский аккреционный диск — до недавнего времени никому не удавалось. Это неудивительно, если учесть, что из-за огромных расстояний характерный угловой размер такого диска оказывается меньше микросекунды дуги. А разрешающая способность Космического телескопа «Хаббл» ограничена значением $0.1''$, и даже при использовании методов сверхдлиннобазной радиоинтерфе-

рометрии разрешение оказывается ненамного лучше миллисекунды дуги. Получить информацию о распределении яркости в аккреционном диске квазара удалось только в последние годы, используя в роли телескопов космические гравитационные линзы. Об этих интересных линзах, а также о возможности их применения для изучения активных ядер галактик и пойдет здесь речь.

Загадки квазизвездных объектов

Еще в конце 50-х годов радиоастрономы обнаружили несколько источников космического радиоизлучения, угловые размеры которых не удавалось измерить с помощью существовавшей в то время аппаратуры. Они получили название квазизвездных радиоисточников, или, сокращенно, квазаров. В 1963 г. астрофизик М.Шмидт (Нидерланды), исследуя оптический спектр одного из квазаров, занесенного в Третий Кембриджский каталог радиоисточников под номером 3С 273, установил, что наблюдаемые эмиссионные линии принадлежат хорошо известной серии водорода, но имеют большой сдвиг к красной границе спектра. Измеренная величина красного смещения $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ — наблюдаемая, а λ_0 — лабораторная длина волны спектральной линии, оказалась равной 0.158. Если это смещение связано с наблюдаемым расширением Вселенной, применение закона Хаббла позволяет оценить расстояние до объекта как $d = cz/H$, где c — скорость света, а H — постоянная Хаббла. Приняв современное значение $H = 70$ [км/с Мпк], легко рассчитать, что расстояние до объекта 3С 273 равно приблизительно 700 млн парсек (Мпк). Однако квазар выглядел как не слишком слабая звездочка 13-й звездной величины, доступная для наблюдения даже в любительские телескопы. Иначе говоря, его светимость больше, чем у галактик, содержащих сотни миллиардов звезд!

К настоящему времени число обнаруженных квазизвездных объектов (QSO), не все из которых, правда, служат мощными источниками радиоизлучения, составляет многие тысячи. Так, в известном каталоге А.Хьюит и Дж.Бербиджа (1993) содержатся сведения о 7312 подобных объектах с измеренными крас-

ными смещениями. Светимости квазаров достигают значений $L = 10^{46} - 10^{47}$ эрг/с, которые, будучи выраженными в привычных единицах светимости нашего Солнца ($L_\odot = 4.0 \cdot 10^{33}$ эрг/с), составляют $L = 10^{12} - 10^{13} L_\odot$. Вместе с тем размеры излучающей области должны быть сравнительно невелики. Уже вскоре после измерения красного смещения объекта 3С 273 московские астрономы Ю.Н.Ефремов и А.С.Шаров проанализировали его изображение на ранее полученных фотопластинках и обнаружили изменение блеска с характерными временами вплоть до месяца. Это означало, что размер квазара не должен превышать одного светового месяца. Позднее быстрая переменность блеска была найдена и у многих других QSO, причем в некоторых случаях поток менялся заметным образом даже за несколько дней.

Концентрация высокой энергии излучения в малом объеме свидетельствует о большой массе объекта M . Если предположить, что квазар находится в стационарном состоянии и его притяжение уравнивает световое давление на полностью ионизованную плазму, то светимость не должна превышать так называемый предел Эддингтона $L_E = 2 \cdot 10^4 (M/M_\odot) \cdot L_\odot$, где M_\odot — масса Солнца ($M_\odot = 2.0 \cdot 10^{33}$ г). Большое число наблюдаемых квазаров свидетельствует: время их существования достаточно велико, а следовательно, светимость не превышает предела Эддингтона. Поэтому массы наиболее мощных квазаров должны быть порядка $10^9 M_\odot$. С учетом малого объема излучающей области средняя плотность вещества оказывается весьма высокой. Однако в спектрах многих квазаров наблюдаются так называемые запрещенные линии, которые соответствуют квантовым переходам с малой вероятностью и могут возникать только при очень низкой плотности ионизованного газа (иначе энергия возбуждения успеет передаться

другим атомам в многочисленных столкновениях — реализуется безызлучательный переход). Но основная загадка была связана с механизмом выделения энергии в небольшом объеме, способным обеспечить гигантские светимости квазаров.

Где взять энергию?

Известно, что максимальная эффективность выделения энергии имеет место в процессе аннигиляции вещества и антивещества; таким способом в энергию $E = mc^2$ может быть превращена вся масса материи m . Однако подобные процессы протекают только в мире элементарных частиц и при аннигиляции отдельных атомов антивещества, создаваемых в физических лабораториях с помощью ускорителей. Для объяснения энергетики квазаров этот механизм неприемлем в силу двух причин. Во-первых, для нашей Вселенной свойственна барионная асимметрия, и какие-либо макроскопические скопления антивещества существовать просто не могут. Во-вторых, невозможно было бы осуществить полную аннигиляцию таких скоплений при взаимодействии с обычным веществом — давление излучения, возникшего на границе их соприкосновения, должно быстро разделить реагирующее компоненты. Тем не менее с аннигиляцией удобно сравнивать другие источники энергии, приняв ее эффективность за единицу.

Очевидно, что ни о каких привычных нам химических источниках энергии (горение нефтепродуктов, взрыв тротила и т.п.) для объяснения феномена QSO говорить не приходится. Эффективность этих источников оценивается величиной порядка 10^{-9} . Более эффективна термоядерная реакция синтеза гелия из водорода, протекающая в недрах Солнца или при взрыве водородной бомбы. Но и для нее эта величина составляет всего 0.0067. Таким образом, просто

из энергетических соображений квазары не могут быть «сверхзвездами». Кроме того, обычные звезды начинают терять устойчивость при массах около $100M_{\odot}$, которым соответствуют светимости не более 10^7L_{\odot} .

Новый и неожиданно эффективный механизм выделения энергии был предложен в начале 70-х годов прошлого века московскими астрофизиками Н.И.Шакурой и Р.А.Сюняевым для объяснения природы обнаруженного к тому времени интересного класса космических объектов — рентгеновских источников в двойных звездных системах. Этот механизм получил название дисковой аккреции вещества на массивный компактный объект. В случае двойной системы газ, перетекающий с нормальной звезды на ее компактный спутник (обычно белый карлик или нейтронную звезду, но в ряде систем, возможно, и черную дыру с массой в несколько масс Солнца), обладает большим моментом количества движения. В результате он должен образовывать вокруг компактного объекта аккреционный диск, лежащий в плоскости орбиты двойной звезды, скорость вращения которого возрастает по мере приближения к центру. Вязкость газа приводит к трению между его соседними слоями, сопровождающемуся интенсивным нагревом. В результате центральные районы диска могут нагреться до температуры более 10^6K , обеспечивая высокую светимость и заметный поток излучения в рентгеновском диапазоне спектра.

Предположение о том, что подобный механизм может объяснить феномен QSO, впервые высказал английский астроном Д.Линден-Белл. Однако в этом случае аккреционный диск должен был создаваться вращающимся газом галактики, падающим на сверхмассивную черную дыру в ее центре. Как известно, существование черных дыр предсказывается общей теорией

относительности; описание свойств пространства—времени вблизи них требует применения этой теории. Механизм дисковой аккреции Шакуры и Сюняева был дополнен учетом соответствующих эффектов, выполненным И.Д.Новиковым и К.Торном. Рассчитываемая на этой основе модель получила название стандартной модели релятивистского аккреционного диска. В последующие годы механизм дисковой аккреции интенсивно исследовался многими учеными, указавшими на важность учета плазменных неустойчивостей, переноса энергии движущимся веществом диска (так называемой адвекции) и других эффектов. Однако стандартная модель по-прежнему сохраняет свое значение, позволяя качественно описать многие наблюдаемые явления.

Эффективность выделения энергии при аккреции вещества на черные дыры оказывается весьма высокой. Так, для черной дыры Шварцшильда (со сферически-симметричным гравитационным полем) она почти на порядок превышает выход энергии в ходе термоядерной реакции и достигает значения 0.057. Еще больше энергии удастся получить при аккреции на вращающуюся черную дыру Керра (чье гравитационное поле имеет вихревой характер). В случае максимального момента вращения теоретическая эффективность равна 0.42, что вполне сравнимо с аннигиляцией. Правда, излучение диска тормозит вращение черной дыры, и в результате эффективность уменьшается приблизительно на четверть от своего максимального значения. Таким образом, даже при сравнительно небольших количествах вещества, падающего на черную дыру, порядка одной массы Солнца за год, удастся объяснить энергетическую квазаров и их длительное существование.

Наличие релятивистских аккреционных дисков в активных ядрах галактик в настоящее время не вызывает сомнений. Дан-

ная гипотеза дает объяснение практически всем наблюдаемым свойствам этих объектов. Дополнительные подтверждения были получены недавно по наблюдениям космических обсерваторий, изучавших их рентгеновское излучение. Оно формируется в центральных районах аккреционных дисков, температура которых превышает 10^6K ; здесь же наиболее заметно проявляют себя и релятивистские эффекты. Профили рентгеновских K_{α} -линий излучения железа, наблюдаемых у ряда активных ядер галактик, однозначно свидетельствуют о том, что излучение генерируется в пространстве—времени черной дыры Керра.

Вид релятивистского аккреционного диска, в центральной области которого линейная скорость движения вещества приближается к скорости света, для внешнего удаленного наблюдателя достаточно своеобразен и существенно зависит от наклона плоскости диска к лучу зрения. При наблюдении в направлении, перпендикулярном к плоскости диска, распределение яркости имеет круговую симметрию. Оно, в общем, близко к виду обычного (ньютоновского) аккреционного диска. Однако яркость центрального района ослаблена из-за совместного влияния поперечного эффекта Доплера и гравитационного красного смещения. Если же плоскость диска наклоняется по отношению к лучу зрения, картина резко меняется. Вследствие релятивистского эффекта Доплера яркость участков диска, приближающихся к наблюдателю в ходе вращения, становится больше яркости удаляющихся участков, и симметрия распределения яркости нарушается. Особенно сложная картина должна наблюдаться вблизи центра, где проявляют себя эффекты искривления лучей.

Но чтобы мы могли полюбоваться этой картиной, как уже говорилось, разрешающая способность телескопа должна быть лучше микросекунды дуги. На-

помним, что, в соответствии с определением радиана, объект виден под углом в одну секунду дуги ($1''$), когда расстояние до него превышает размер объекта в 206 265 раз. Если бы наш телескоп имел субмикросекундное разрешение, то можно было бы читать текст книги, находящейся на поверхности Луны! В настоящее время подобную разрешающую способность удается реализовать, используя созданные природой телескопы — космические гравитационные линзы.

Гравитационные линзы в роли телескопов

О том, что притягивающие тела способны отклонять лучи света, догадывался уже И.Ньютон. Однако точно эта задача была решена на основе ньютоновской теории тяготения немецким ученым И.Г.Зольднером только в начале XIX в. Из его расчетов отклонение получилось очень малым и даже для луча света, проходящего вблизи края Солнца, составило лишь $0.87''$. При создании общей теории относительности А.Эйнштейн показал, что в действительности отклонение должно быть ровно в два раза больше — $1.75''$. Подтверждение этого факта путем наблюдения смещения изображений звезд во время полного солнечного затмения 1919 г., проведенного по инициативе А.Эддингтона, стало одним из решающих доводов в пользу справедливости новой теории.

Возможность формирования изображений источника излучения притягивающим телом — гравитационной линзой — была впервые обоснована российским физиком О.Д.Хвольсоном в 1924 г. Через 12 лет после публикации его работы эта же задача была рассмотрена и Эйнштейном. Оказалось, что точечная гравитационная линза со сферически-симметричным потенциалом в общем случае должна создавать два искажен-

ных изображения источника в виде вытянутых полумесяцев, расположенных по обе стороны от направления на линзу. В последующие годы эффект гравитационной фокусировки излучения привлекал к себе сравнительно мало внимания. Положение изменилось в 1979 г., когда выяснилось, что двойной квазар Q 0957+561 на самом деле представляет собой два изображения одного квазара, создаваемые гравитационной линзой. На сегодня обнаружено уже несколько десятков подобных объектов. Их стали интенсивно изучать, надеясь решить задачи космологии, получить информацию о строении галактик и квазаров [2]. Приятно отметить, что заметный вклад в развитие теории гравитационных линз внесли и наши соотечественники (А.В.Бялко, П.В.Блиох, А.А.Минов, А.Ф.Захаров и др.).

Среди различных видов гравитационных линз особый интерес представляют прозрачные линзы. В их роли обычно выступают галактики, поглощением света в которых, в первом приближении, можно пренебречь. Распределение суммарного потенциала, создаваемого звездами галактики, способно в определенных случаях вызвать появление каустик в плоскости линзируемого источника. При этом гравитационная линза может создавать кратные изображения удаленного источника излучения, которыми часто оказываются квазары. Наличие каустик характерно и для обычных оптических линз, имеющих неоднородности показателя преломления. В качестве подобной линзы можно, например, использовать доннышко стеклянной банки с водой. Наведя такую линзу на Солнце, мы увидим на расположенном за ней экране систему каустик в виде изогнутых линий, к одной из сторон которых будет концентрироваться солнечное излучение. Области экрана, лежащие на противоположных сторонах этих линий, останутся темными.

Если посмотреть сквозь такую линзу на удаленный яркий источник света малых угловых размеров, то также можно увидеть его кратные изображения. Однако гравитационная линза принципиально отличается от стеклянной — у нее отсутствует хроматическая аберрация, так как лучи света с разными длинами волн отклоняются гравитационным полем одинаково.

Один из наиболее известных проявлений эффекта гравитационной линзы — объект QSO 2237+0305, обнаруженный группой американских астрофизиков во главе с Дж.Хухрой в 1985 г. Его часто называют Крестом Эйнштейна; на рис.1 приведено изображение этого объекта. Длина горизонтального отрезка, показанного на рисунке для характеристики его угловых размеров, соответствует одной угловой секунде. В данном случае четыре изображения далекого ($z = 1.695$) квазара создаются гравитационным полем достаточно близкой ($z = 0.0394$) галактики, видимой в центре рисунка. Центр этой галактики, наблюдатель и квазар располагаются почти на одной линии. Суммарный поток от всех четырех изображений существенно превышает исходный поток от квазара в нашу сторону и, таким

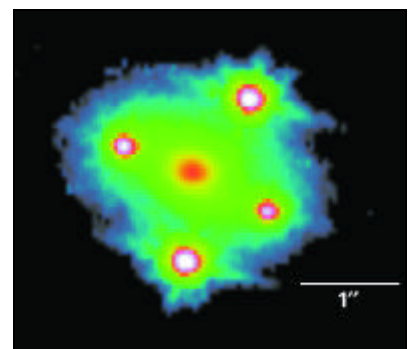


Рис.1. Изображение гравитационной линзы QSO 2237+0305 (Крест Эйнштейна), полученное группой CASTLES с помощью Космического телескопа «Хаббл» в видимой области спектра.

образом, гравитационная линза играет роль своеобразного телескопа, собирающего излучение источника. Лучи света, формирующие различные изображения квазара, распространяются по разным траекториям. В результате между ними может возникнуть временная задержка. Однако геометрия объекта QSO 2237+0305 такова, что величина этой задержки оказывается порядка суток. Поэтому собственная переменность блеска квазара должна приводить к практически синхронному изменению потока от всех его изображений.

Лучи света для разных изображений квазара проходят сквозь различные области галактики-линзы. При этом свет должен испытывать дополнительное отклонение за счет гравитационного взаимодействия со звездами галактики, расположение которых может рассматриваться как случайное. Подобное взаимодействие обычно характеризуют термином гравитационное микролинзирование. В результате гравитационного микролинзирования в плоскости квазара возникает случайное поле каустик. Пример подобного поля, построенного по результатам компьютерного моделирования, приведен на рис.2. В силу обратимости оптических

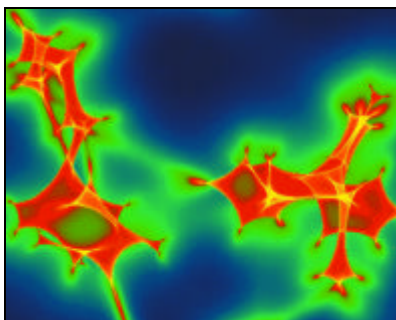


Рис.2. Картина случайного поля каустик, возникающих в плоскости квазара в результате гравитационного микролинзирования звездами галактики-линзы. Данные компьютерного моделирования И.Вамбганса.

систем такую картину можно было бы увидеть на экране, если расположить его на расстоянии квазара, перпендикулярно к лучу зрения, проходящему через центр галактики, и осветить галактику-линзу точечным источником из места расположения наблюдателя. Области максимальной концентрации излучения показаны на рисунке желтым цветом.

Гравитационная линза осуществляет гладкое отображение плоскости источника-квазара на плоскость наблюдателя. Каустики соответствуют особенностям этого гладкого отображения, которые, как известно из теории катастроф, бывают двух видов: складки и сборки. Стороны криволинейных многоугольников на рис.2 соответствуют особенностям типа складки, а вершины, за которыми в литературе по гравитационным линзам закрепилось название «касп», — сборкам. При пересечении точечным источником каустики коэффициент усиления потока, регистрируемого наблюдателем, формально стремится к бесконечности (в рамках обычно используемого приближения геометрической оптики). Однако для протяженного источника он всегда остается конечным. При относительном движении квазара, галактики-линзы и наблюдателя аккреционный диск будет пересекать случайное поле каустик. Это должно вызывать характерные изменения потока от изображения квазара, обычно называемые высокоамплитудными явлениями. Поскольку для каждого изображения существенно влияние своей области поля каустик, изменения потока от разных изображений должны быть некоррелированными.

Наблюдать подобные высокоамплитудные явления для QSO 2237+0305 наземной аппаратурой очень трудно. Дело в том, что турбулентность земной атмосферы вызывает размазывание изображения точечного источника при длительных

экспозициях. В результате образуется так называемый турбулентный диск с характерным размером около $1''$. Сравнение этой величины с угловыми размерами объекта показывает (см. рис.1), что в такой ситуации выделить вклад потока отдельного изображения квазара от излучения галактики чрезвычайно сложно. Для ее решения необходимо проводить наблюдения в местах с хорошим астроклиматом, используя высококачественные ПЗС-матрицы и методы компьютерной обработки изображений.

Изменения потоков от компонентов изображения QSO 2237+0305, связанные с микролинзированием, были впервые зарегистрированы М.Ирвином и др. в 1989 г. Впоследствии фотометрические наблюдения этого объекта проводились многими группами, в том числе и на Майданакской обсерватории Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга (Б.П.Артамонов, М.В.Сажин, В.Н.Дудинов и др.). На рис.3 приведены кривые изменения блеска четырех компонентов А, В, С и D гравитационной линзы, полученные в видимой области спектра международной группой OGLE. По оси ординат отложены звездные величины компонентов, а по оси абсцисс — модифицированные юлианские даты (JD), которые соответствуют сплошному счету суток с некоторого момента, лежащего в глубокой древности. Кривые блеска для каждого компонента выделены разными цветами, а вертикальными отрезками показаны значения среднеквадратичных погрешностей. Как видно из рисунка, эффекты микролинзирования регистрируются вполне уверенно. Выделенная черным цветом кривая блеска расположенной по соседству звезды сравнения не показывает никаких значимых изменений.

Кривая изменения потока, регистрируемая в ходе высокоамплитудного явления, — результат сканирования изобра-

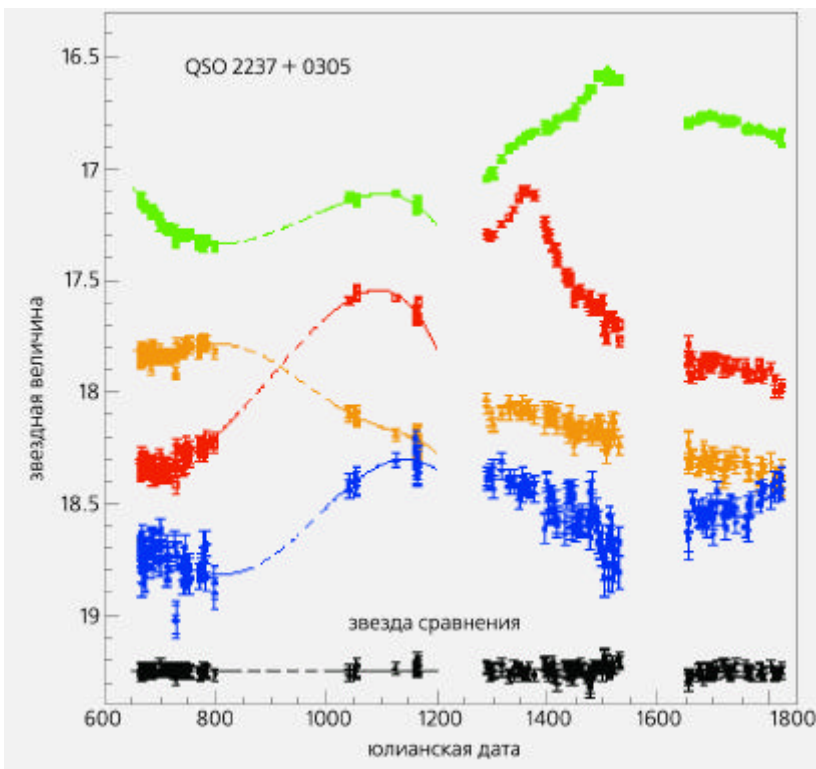


Рис.3. Кривые изменения потоков от компонентов изображения гравитационной линзы QSO 2237+0305, созданного микролинзированием. Получены в видимой области спектра международной группой OGLE. По оси абсцисс отложены модифицированные юлианские даты — числа уменьшены на 2 450 000. Звезда сравнения — звезда постоянного блеска, расположенная вблизи исследуемого объекта.

жения аккреционного диска квазара каустикой гравитационной линзы. Таким образом, она содержит в себе информацию о распределении яркости в этой «центральной машине» квазара.

От видимой картинки — к распределению яркости

Как видно из рис.2, при пересечении случайного поля каустик наиболее вероятна встреча с каустикой типа складки. Проведенные оценки показывают, что ожидаемый угловой размер аккреционного диска квазара много меньше характерной длины каустики, и можно прибли-

женно считать ее прямой линией. В этих условиях изменение потока будет зависеть только от одномерной проекции распределения яркости на направление локальной нормали к каустике. Такую проекцию, которая может быть получена при сканировании изображения диска бесконечно узкой щелью, ориентированной параллельно каустике, в астрономии часто называют стрип-распределением яркости.

Для того чтобы представить себе, каким должно быть стрип-распределение яркости $V(x)$ в релятивистском аккреционном диске, мы провели его расчет для стандартной модели диска, расположенного в экваториальной плоскости черной дыры Керра с массой $M = 10^8 M_\odot$

и моментом вращения 0.998 от максимального. Было принято, что светимость диска находится на пределе Эддингтона, вращение вещества происходит против часовой стрелки и совпадает с направлением вращения черной дыры, а плоскость диска наклонена под углом 45° к лучу зрения. Ось x совпадает с большой осью эллипса проекции диска на картинную плоскость. Полный поток излучения от диска, регистрируемый наблюдателем, принят равным единице. Полученное стрип-распределение яркости в видимой области спектра $V(x)$ показано на рис.4. На этом рисунке расстояние от центра диска x измеряется в долях гравитационного радиуса черной дыры $1/2r_g = GM/c^2$, где G — гравитационная постоянная, а c — скорость света. Для самого центрального района с $|x| \leq 10r_g$ расчет не проводился (здесь существенны эффекты искривления лучей и гравитационной фокусировки, однако для видимого диапазона спектра этот район вносит лишь очень малый вклад в кривую изменения потока, и его влиянием можно пренебречь). На рисунке хорошо заметно проявление эффекта Доплера — яркость левой ветви распределения, где вещество при вращении приближается к наблюдателю, оказывается заметно большей, чем правой.

Можно показать, что в общем случае наблюдаемая кривая изменения потока при высокоамплитудном явлении связана с функцией $V(x)$ некоторым интегральным уравнением, и нахождение распределения яркости представляет собой так называемую обратную задачу для этого уравнения. Как правило, решение подобных задач труднее, чем прямых (известный пример — задача помещения выдавленной зубной пасты обратно в тюбик). В данном случае она оказывается еще и некорректно поставленной задачей — сколь угодно малые изменения зарегистрированной кривой по-

тока способны привести к большим изменениям восстанавливаемого распределения яркости. Наиболее простой подход к решению таких задач заключается в подборе модели распределения яркости, наилучшим образом удовлетворяющей наблюдательным данным. В этом случае решение обратной задачи фактически заменяется на многократное решение прямой. Подобный подход был использован и при анализе высокоамплитудных явлений для QSO 2237+0305 в работе В.Н.Шаляпина [3]. Однако рассмотренные им симметричные модели распределения яркости нельзя признать адекватными для релятивистского аккреционного диска. Поэтому особый интерес представляло создание модельно-независимой методики восстановления распределения яркости.

Общая теория решения некорректно поставленных задач была разработана отечественными математиками (А.Н.Тихоновым, В.К.Ивановым, М.М.Лаврентьевым и др.). Важным моментом в этом случае является использование априорной информации о решении, причем для повышения его точности и устойчивости необходимо привлекать как можно больший объем такой информации, согласующейся с физикой задачи. Сотрудники Московского университета А.В.Гончарский и А.Г.Ягола предложили эффективные алгоритмы поиска решения некорректно поставленных задач на так называемых компактных множествах функций [4]. С использованием этих алгоритмов нами была разработана методика последовательного восстановления ветвей стрип-распределения яркости в аккреционном диске на множестве монотонно невозрастающих, выпуклых вниз неотрицательных функций [5]. Подобное ограничение множества возможных решений соответствует ожидаемому виду релятивистского аккреционного диска и вместе с тем обеспечи-

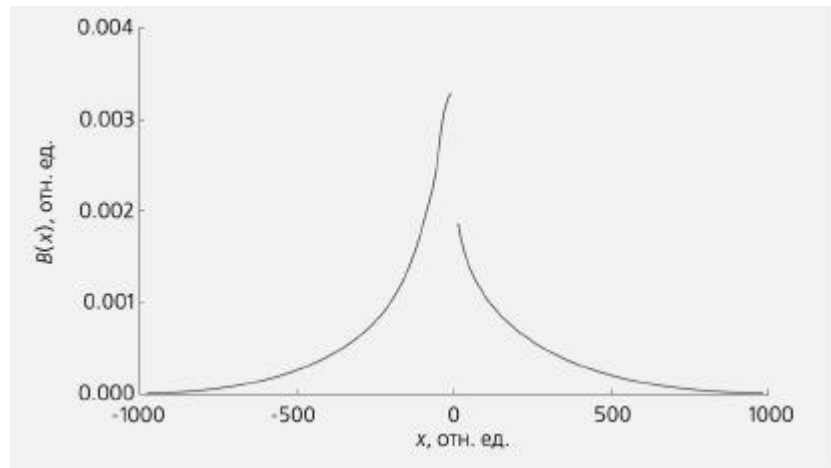


Рис.4. Одномерная проекция распределения яркости (стрип-распределение яркости), рассчитанная для стандартной модели релятивистского аккреционного диска, обращаемого в экваториальной плоскости черной дыры Керра. Расстояние измеряется от центра диска в единицах гравитационного радиуса.

вает высокую устойчивость решения по отношению к случайному шуму.

Эта методика была использована для восстановления распределения яркости в аккреционном диске квазара из анализа высокоамплитудного явления, наблюдавшегося группой OGLE у компонента С гравитационной линзы QSO 2237+0305 вблизи

юлианских дат лета 1999 г. Зарегистрированные отсчеты потока показаны кружками на рис.5. На рис.6 приведены восстановленные ветви стрип-распределения яркости. Как видно из рисунка, форма распределения яркости качественно согласуется с ожидаемым видом релятивистского аккреционного диска. Кривая изменения потока, соот-

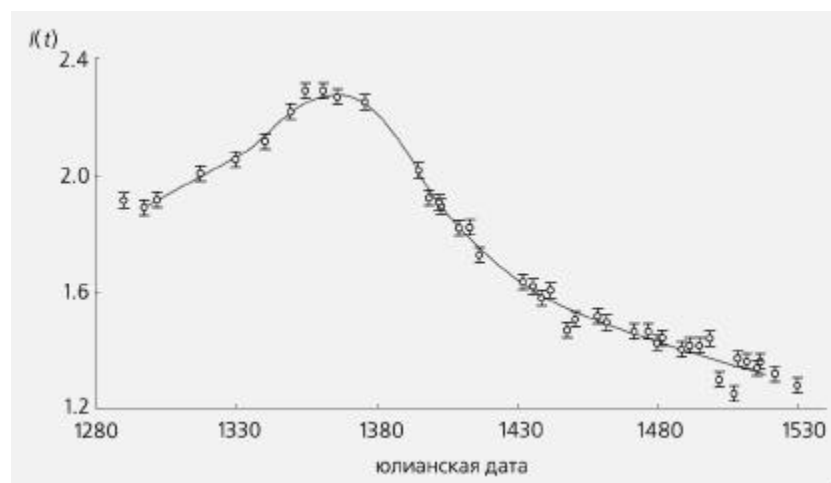


Рис.5. Наблюдаемое изменение потока при высокоамплитудном явлении у компонента С изображения гравитационной линзы QSO 2237+0305 (кружки). Величины потока приведены к потоку звезды сравнения. Сплошной линией показана кривая, соответствующая восстановленному распределению яркости. Юлианские даты уменьшены на 2450000.

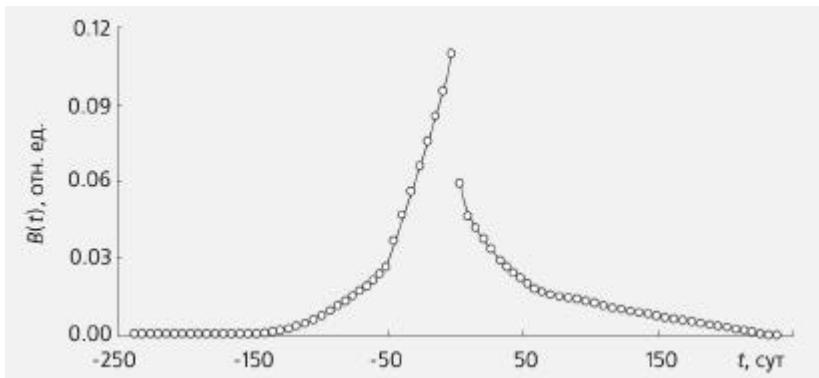


Рис.6. Ветви стрип-распределения яркости в аккреционном диске линзируемого квазара, восстановленные из анализа наблюдений высокоамплитудного явления. По оси абсцисс отложено время (в сутках), отсчитанное от момента пересечения каустики центра диска.

ветствующая восстановленному распределению яркости, показана сплошной линией на рис.5 и удовлетворяет наблюдательным данным в пределах оцененной погрешности.

Для оценки размеров аккреционного диска необходимо знать скорость его движения в направлении нормали к каустике V_{\perp} . В общем случае эта скорость есть результирующая сумма векторов проекций на картинную плоскость скоростей собственных движений наблюдателя, галактики-линзы и квазара. Она зависит также от расстояний до линзы и квазара, а большое красное смещение последнего ($z = 1.695$) приводит к зависимости расстояния от параметров, определяющих строение Вселенной. Рассмотрение характерных значений дисперсии скоростей всех объектов, участвующих в данном высокоамплитудном явлении, с учетом возможного изменения модели Вселенной от плоской

(если плотность вещества Вселенной ρ равна критической ρ_c , т.е. $\Omega_0 = \rho/\rho_c = 1$) до модели с преобладанием энергии вакуума, согласующейся с современными наблюдательными данными ($\Omega_0 = 0.3$), приводит к весьма широким границам интервала возможных значений скорости сканирования каустики: $765 \leq V_{\perp}$ (км/с) $\leq 10\,548$ [6]. Если формально принять для V_{\perp} значение, равное середине этого интервала 5600 км/с, то характерному времени пересечения каустиры стрип-распределения яркости 300^d (см. рис.6) соответствует линейный размер $1.5 \cdot 10^{16}$ см или 1000 а.е. Таким образом, размеры аккреционного диска квазара более чем на порядок превышают диаметр Солнечной системы.

Одновременно с группой OGLE наблюдение эффектов микролинзирования у компонентов гравитационной линзы QSO 2237+0305 проводила также международная группа GLITP. Их

результаты подтвердили факт высокоамплитудного явления у компонента А вблизи момента $JD = 2\,451\,500$ (конец осени 1999 г.), наличие которого можно заподозрить и на рис.3. Анализ этих данных методом подбора модели ньютоновского аккреционного диска, обращающегося вокруг черной дыры Шварцшильда, позволил получить ограничения возможных значений ее массы: $10^7 M_{\odot} < M < 6 \cdot 10^8 M_{\odot}$ [6]. Мы провели обработку объединенного ряда фотометрии групп OGLE и GLITP для компонента А с использованием нашей методики и получили ветви стрип-распределения яркости. Форма восстановленного распределения также качественно согласуется с возможным видом релятивистского аккреционного диска. Однако наблюдаемые искажения кривой высокоамплитудного явления могут говорить о том, что в данном случае сказывается кривизна каустики или близость каспа.

Таким образом, анализ наблюдений высокоамплитудных явлений в кратных изображениях квазаров, формируемых гравитационными линзами, позволяет исследовать распределение яркости в аккреционных дисках со сверхвысоким угловым разрешением. Продолжение программ наблюдений этих интересных явлений позволит получить важную информацию о природе активных ядер галактик. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 02-02-17524), программы «Астрономия» и Минобразования России.

Литература

1. Krolik J.H. Active galactic nuclei. Princeton, 1999.
2. Захаров А.Ф. Гравитационные линзы и микролинзы. М., 1997.
3. Шаляпин В.Н. // Письма в Астрон. журн. 2001. Т.27. №3. С.180—186.
4. Гончарский А.В., Черепашук А.М., Ягола А.Г. Некорректные задачи астрофизики. М., 1985.
5. Богданов М.Б., Черепашук А.М. // Астрон. журн. 2002. Т.79. №8. С.693—701.
6. Goicoechea L.J., Alcalde D., Mediavilla E., Munoz A. // Astron. and Astrophys. 2003. V.397. P.517—525.
7. Богданов М.Б., Черепашук А.М. // Астрон. журн. 2004. Т.81. №4. С.291—297.