

Гамма-всплески и гравитационные линзы

О.С.Угольников

Выход за узкие границы видимого излучения ко всему обширному диапазону электромагнитного спектра, совершенный астрономической наукой в прошлом веке, привел к открытию новых классов небесных объектов. Загадку их природы обычно удавалось разрешить с невероятной для астрономии быстротой — за несколько лет или десятилетий. Но есть и исключения.



Олег Станиславович Угольников, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Астрокосмического центра Физического института им.П.Н.Лебедева и Института космических исследований РАН. Занимается внегалактической астрофизикой, в частности физикой гамма-всплесков, а также оптикой атмосферы Земли.

Таинственные вспышки

Без преувеличения можно сказать, что самые загадочные из этих новых объектов — космические гамма-всплески, уже потому, что их природу не удалось понять так быстро. Хотя они были открыты американскими спутниками достаточно давно, в 60-х годах прошлого века [1], даже сейчас, в веке нынешнем, на тему их происхождения ведутся оживленные споры и пишутся тысячи научных работ.

Почему же причина возникновения гамма-всплесков — этих таинственных коротких (продолжительностью от долей секунды до минут) вспышек гамма-излучения из космоса — до сих пор окончательно не уста-

новлена? Прежде всего дело в низком угловом разрешении существующих приемников гамма-излучения, не дающем возможности отождествить гамма-всплеск с известными объектами на небе.

Еще одно препятствие кроется в самих гамма-всплесках, а точнее — в их изотропном распределении по небесной сфере. Всплески не концентрируются в каком-либо направлении: ни к плоскости Галактики, ни к скоплениям галактик, вообще ни к каким небесным областям! Как было справедливо отмечено в статье [2] и многих других работах, такая ситуация может иметь место только в двух случаях: либо источники

гамма-всплесков находятся к нам очень близко по сравнению со звездами и другими составляющими нашей Галактики, либо, наоборот, они являются одними из самых удаленных объектов во Вселенной.

Вторая гипотеза со временем приобретала все большее число сторонников, хотя на первый взгляд она кажется фантастической. Действительно, если мы видим гамма-всплески с таких огромных расстояний, то какими же мощными должны быть эти вспышки и какие, без преувеличения, космические катастрофы могут быть их причиной? На этот вопрос уже было предложено несколько вариантов ответа, и самый попу-

лярный состоит в том, что гамма-всплеск возникает при слиянии тесной системы из двух нейтронных звезд. Обращаясь по орбитам вокруг общего центра масс и теряя энергию за счет излучения гравитационных волн, звезды сближаются и в конце концов «падают» друг на друга [3]. Поскольку нейтронные звезды имеют огромную плотность и очень сильное поле тяготения вблизи поверхности, понятно, что энергодделение при их слиянии будет колоссальным. Высказывались также предположения, что источники гамма-всплесков схожи со сверхновыми звездами — массивными светилами, завершающими свое существование мощным взрывом.

Но как можно проверить ту или иную гипотезу, если мы даже не знаем точного направления, откуда пришел сигнал? До недавнего времени ответа на этот вопрос фактически не было. И лишь в конце 90-х годов двадцатого столетия произошла настоящая революция в исследованиях гамма-всплесков. 28 февраля 1997 г. с помощью итало-голландского спутника «Верро-SAX» впервые было обнаружено так называемое послесвечение гамма-всплеска в рентгеновской области спектра [4]. Представляя огромную важность для понимания природы гамма-всплесков, данное открытие позволило гораздо точнее определить координаты всплеска на небе. Вскоре было найдено и оптическое послесвечение, что еще больше повысило точность локализации.

За прошедшие с тех пор пять лет рентгеновские, оптические и радио-послесвечения были замечены у нескольких десятков всплесков, и со временем это число неуклонно увеличивается. Заслуживает особого внимания мощный гамма-всплеск 23 января 1999 г., у которого оптический компонент был зафиксирован с помощью автоматического телескопа ROTSE во время самого всплеска и оказался на-

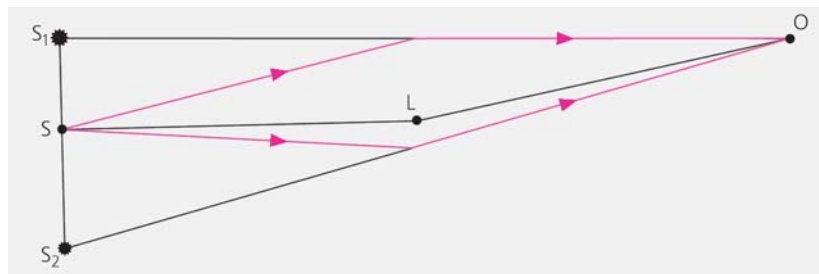


Рис. 1. Явление гравитационного линзирования на точечной массе (S — источник, L — массивное тело, O — наблюдатель, S_1 и S_2 — изображения источника, причем яркость изображения S_1 больше, чем яркость изображения S_2).

столько ярким, что его в принципе можно было наблюдать в обычный бинокль [5]! И наконец, получены первые так долго ожидаемые данные — на месте некоторых послесвечений гамма-всплесков обнаружены далекие галактики, а у отдельных наблюдалось значительное смещение спектральных линий в область больших длин волн («красное смещение»). Оба факта указывали на то, что источники данных гамма-всплесков находятся вне нашей Галактики на очень большом, космологическом расстоянии.

Итак, космологическая гипотеза происхождения гамма-всплесков победила? Но число всплесков с послесвечениями, совпавшими по положению на небе с далекими галактиками, очень невелико, вдобавок все они относятся лишь к одному из подклассов, так называемым длинным всплескам с продолжительностью более 2 с. Являются ли *все* гамма-всплески отзвуками далеких космических взрывов колоссального масштаба, нужно ли относить их источники наряду с квазарами и активными ядрами галактик к самым удаленным известным астрономическим объектам?

Дополнительный аргумент могло бы обеспечить одно важное свойство, присущее всем известным классам внегалактических объектов. Оно заключается в том, что свет, идущий от определенной части удаленных объ-

ектов, встречая на своем пути галактику, скопление галактик или какое-либо другое образование с большой массой, претерпевает гравитационное линзирование (рис.1). За счет эффекта, предсказанного общей теорией относительности, лучи света от источника S вблизи массы L отклоняются, и в результате наблюдатель в точке O фиксирует сразу два изображения источника S по разные стороны от линзы L (на рис.1 эти изображения обозначены как S_1 и S_2). Впервые явление гравитационного линзирования было обнаружено для далекого квазара в 1979 г. [6], и с тех пор найдено уже несколько десятков подобных объектов. Если линзу L нельзя считать точечной массой, мы можем заметить даже больше двух изображений источника, что тоже часто встречается на небе [7].

Но если космические гамма-всплески исходят от удаленных внегалактических объектов, значит, и среди них должны попадаться гравитационно линзированные [3]. И если бы мы нашли подобные всплески, это стало бы убедительным доказательством их внегалактической природы. Каким образом мы могли бы наблюдать гравитационное линзирование для космических гамма-всплесков, по каким признакам следует искать возможных «кандидатов» и что дает такой поиск? Попытаемся ответить на эти вопросы.

Следы линзирования

Прежде чем искать космические гамма-всплески, подвергшиеся гравитационному линзированию, нужно понять, каким образом можно их распознать. Ведь просто увидеть два изображения по разные стороны от линзы, как это происходит с оптическими объектами, в гамма-области мы не сможем: угловое расстояние между ними будет не более $1-2''$, что находится далеко за пределами углового разрешения для данной части спектра. В трудной ситуации на выручку приходит другое свойство гамма-всплесков — их кратковременность.

Вновь обратимся к рис.1 и заметим, что время распространения сигнала от источника до наблюдателя по двум траекториям различно. Во-первых, сами траектории имеют разную длину, а во-вторых, вблизи массы L прохождение сигнала замедляется за счет эффекта Шапиро, одного из следствий общей теории относительности. В итоге сигнал, прошедший на большем расстоянии от точечной линзы, будет зарегистрирован раньше. А если сам источник излучает кратковременный импульс гамма-лучей, то два импульса достигнут наблюдателя один после другого.

Оба импульса должны иметь одинаковую форму и одинаковые спектры, так как картина гравитационного линзирования не зависит от частоты излучения. А если линза представляет собой точечную массу, появляется еще одно важное свойство: первый по времени импульс должен быть ярче, чем второй. В иных случаях последний признак может отсутствовать, однако все равно более вероятно, что два (или более) импульса будут регистрироваться в порядке уменьшения их яркости.

Величина временной задержки между импульсами зависит от маршрута лучей и прямо пропорциональна массе гравитационной линзы. И поскольку

вид линзированного всплеска сильно зависит от типа линзы, столь же сильно от него зависит и методика поиска подобных гамма-всплесков.

Самый очевидный вид гравитационного линзирования, который наблюдается для известных внегалактических объектов и который в первую очередь имеет смысл искать для космических гамма-всплесков, — это макролинзирование, когда роль линзы играет массивная галактика или даже скопление галактик, лежащее близ траектории распространения света от источника к наблюдателю. С учетом известных значений масс подобных объектов можно вычислить, что временная задержка между импульсами составит месяцы или даже годы! То есть мы увидим не двойной гамма-всплеск, а два разных всплеска, но пришедшие из одной и той же области неба и имеющие подобные временные профили и спектры. На основе числа наблюдаемых линзированных источников можно грубо оценить: из известных нескольких тысяч гамма-всплесков $10-20$ должны быть макролинзированными. Казалось, дело остается за малым: найти эти всплески, и гипотеза их внегалактического происхождения подтвердится окончательно...

Неудивительно, что поиск подобных пар гамма-всплесков стал целью большого количества работ, проводимых исследователями в разных странах (см. напр., [8] и [9]). Поиски велись с использованием данных о большей части известных гамма-всплесков, насколько это только было возможно. Но... усилия оказались тщетными. Ни одному исследователю не удалось найти хотя бы одну пару всплесков, полностью отвечающую признакам макролинзирования. Этот результат внушал большие сомнения в том, что проблема происхождения гамма-всплесков уже решена, вновь ставил знак вопроса и призывал к дискуссии. Конечно, у сторонников

внегалактического происхождения гамма-всплесков оставались аргументы в свою пользу. Где гарантия того, что мы не могли пропустить одну из двух компонент линзированного всплеска из-за ее слабости или просто потому, что в этот момент ни один из гамма-телескопов не проводил наблюдения? А может, ее координаты были измерены настолько неточно, что мы приняли пару за два всплеска, пришедшие из разных областей неба?

Итак, оставались нерешенные вопросы, и требовались дальнейшие исследования и новые методы поиска. Именно в этот момент пора вспомнить, что не только гигантская галактика может встать на пути лучей от источника к наблюдателю. Гравитационной линзой может «работать» и более легкий объект, например карликовая галактика или шаровое звездное скопление, коих во Вселенной великое множество, а на более ранних этапах ее существования (которые мы фактически и наблюдаем, когда видим самые удаленные источники) было еще больше. Да, вероятность такого типа линзирования может быть меньше, но насколько легче его найти для гамма-всплесков! Ведь теперь интервал между двумя импульсами уже не будет таким большим, а составит всего несколько секунд, что сравнимо с продолжительностью самого всплеска. Мы уже увидим один всплеск, но с характерной двойственностью (или даже кратностью) временного профиля, и больше не надо будет сравнивать координаты и вести поиски второй компоненты на огромных временных интервалах.

Есть и еще одна особенность данного типа гравитационного линзирования (оно называется мезолинзированием), отмеченная в статьях [10] и [11], которая существенно увеличивает вероятность его наблюдения. Эта особенность связана с возможностью заметного усиления яркости изображения источника

подобной гравитационной линзой. На рис.2 приведена схема распространения света сквозь ядро шарового звездного скопления. Как было показано в работе [10], образование с внутренним распределением массы, характерным для таких скоплений, в качестве гравитационной линзы проявляет очень интересные свойства. Линза такого типа, в отличие от точечной, гораздо больше похожа на оптическую, и у нее имеется некое подобие фокуса, в котором практически сходятся лучи, собранные со значительной площади. И если по воле случая наблюдатель окажется вблизи этой точки, он зарегистрирует многократное усиление яркости источника.

Вдобавок угол преломления лучей, проходящих чуть дальше от центра, очень слабо зависит от прицельного расстояния. Это связано с тем, что во внешних областях шаровых скоплений плотность материи убывает с расстоянием от центра r как r^{-3} , поэтому масса части скопления, находящейся внутри сферы радиуса r , пропорциональна $\ln(r)$. Угол преломления лучей света примерно пропорционален $\ln(r)/r$. Данная зависимость имеет максимум, что приводит к появлению конической каустики, которая выходит из фокуса под углом, близким к углу максимального отклонения лучей. Наблюдатель, находящийся на продолжении прямой источник—линза и вблизи поверхности конической каустики, увидит источник более ярким, чем он есть на самом деле.

Да и внутри конической каустики усиление яркости будет значительным, что видно по большой плотности линий-лучей в этой области на рисунке. Взглянув на него внимательно, можно заметить, что в каждую точку внутри конуса сходятся не два, а сразу три разных луча — именно столько изображений источника может быть видно из данной области пространства. Следовательно,

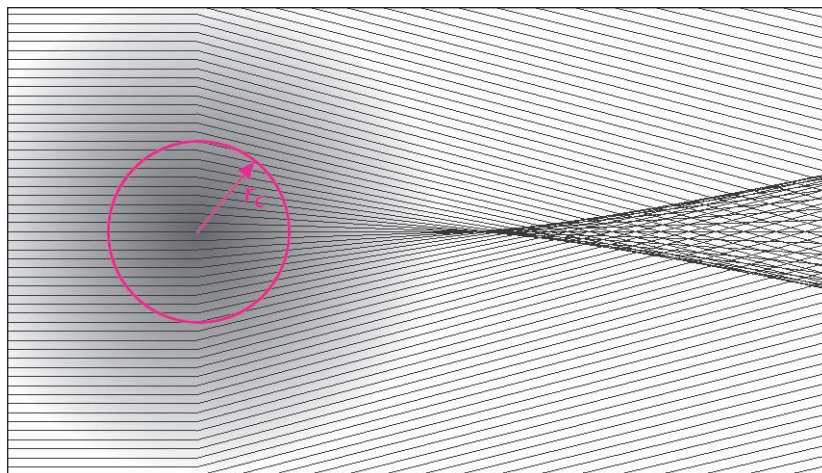


Рис.2. Ход лучей удаленного источника при гравитационном линзировании на шаровом звездном скоплении, рассчитанный по формулам из работы [10]. Окружность соответствует ядру скопления, масштаб по горизонтали и вертикали неодинаков. Лучи, проходящие внутри ядра скопления, собираются практически в одну точку, которая по аналогии с оптической линзой была названа фокусом. Вблизи фокуса, а также поверхности конической каустики, выходящей из него, яркость изображения резко возрастает (для наглядности масштаб по горизонтали не выдержан).

в случае мезолинзирования гамма-всплеска велика вероятность, что структура его профиля блеска будет уже тройственной, хотя и двойственная тоже возможна (если линза компактна или наблюдатель находится намного дальше фокуса). Соотношение яркости и очередности импульсов в общем случае может оказаться любым, однако опять-таки более вероятно наблюдение двух или трех импульсов в порядке убывания их яркости.

Необходимо также отметить, что фокусные расстояния мезолинзирования для типичных шаровых скоплений составляют несколько Мпк, и мы можем увидеть данный эффект только от скопления, расположенного в другой галактике, а источник гамма-всплеска при этом должен находиться от нас еще дальше. Тем самым эффект мезолинзирования, как и макролинзирования, вполне может служить надежным подтверждением внегалактического происхождения гамма-всплесков.

Удастся ли нам найти «кандидатов» — двойные или тройные всплески с подобными профилями блеска и спектрами компонент, или и здесь нас будет ждать неудача?

Долгожданный успех?

Для поиска гамма-всплесков, обладающих описанными выше свойствами, была использована полная версия каталога BATSE, созданного на основе данных Космической обсерватории им.Комптона (США) за все время ее работы с 1991 по 2000 г. Каталог содержит данные о 2704 гамма-всплесках, из которых были отобраны 1512 всплесков с зарегистрированными спектрами и с надежными профилями яркости, измеренными при высоком временном разрешении. Среди этого множества всплесков и проводился поиск возможных случаев мезолинзирования.

На первом этапе были визуально отобраны всплески с ха-

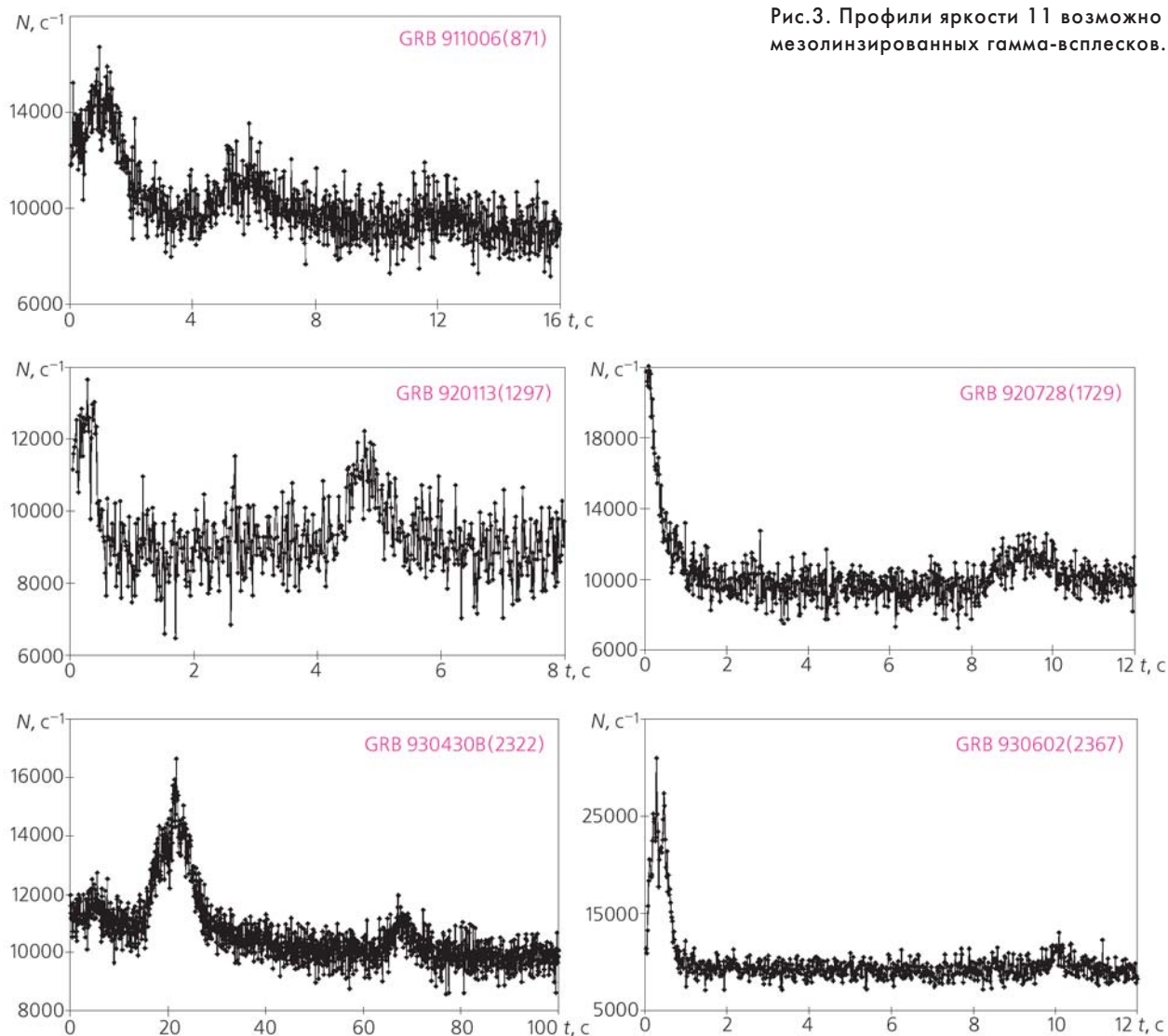


Рис.3. Профили яркости 11 возможно мезолинзированных гамма-всплесков.

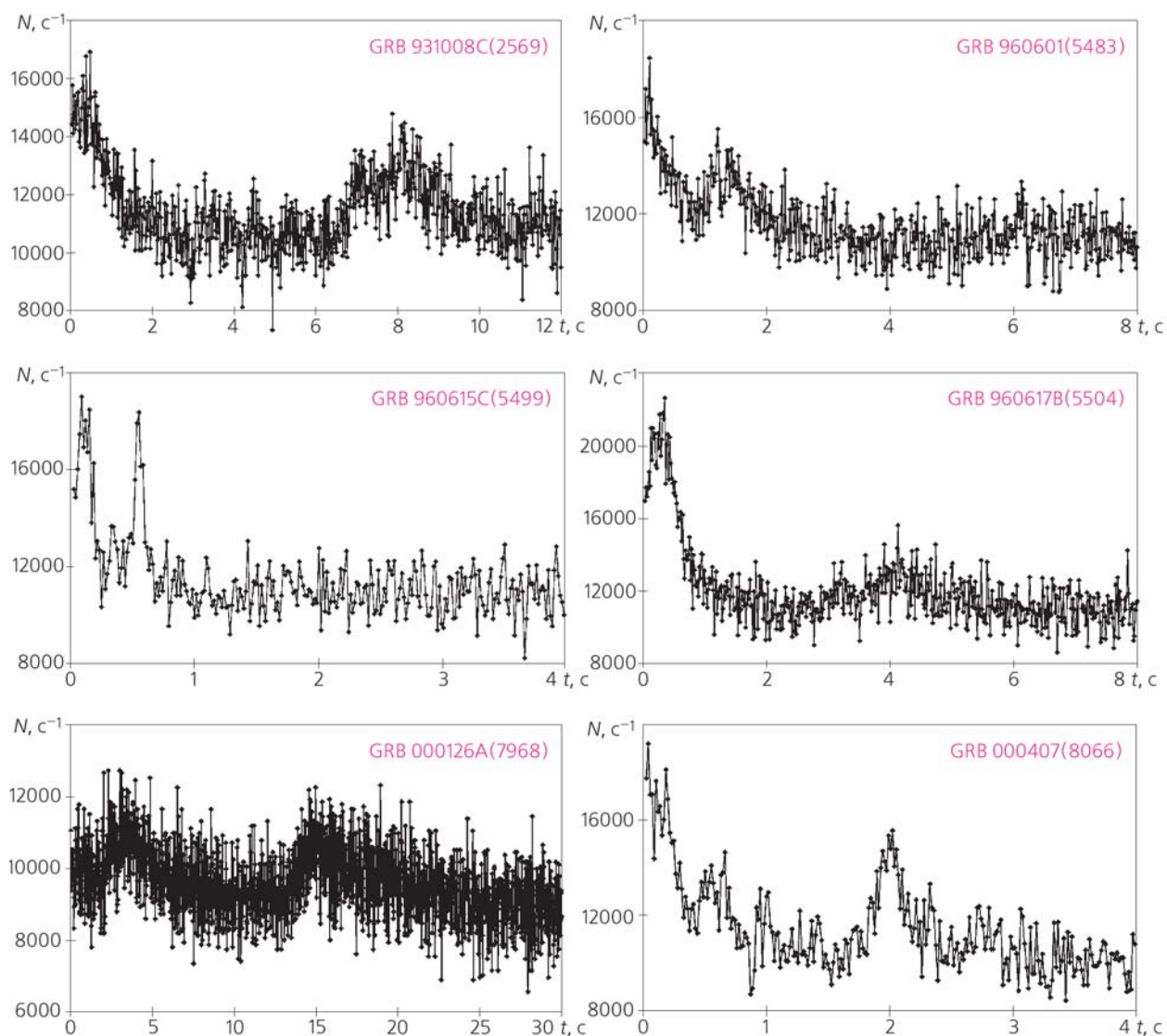
рактерной двойной или тройной структурой профиля яркости. Далее отдельные компоненты проверялись с помощью статистического теста на подобие друг другу, аналогичным образом тестировалось сходство их спектров, и, как выяснилось, именно спектральное сходство оказалось самым жестким критерием отбора.

И все же «кандидаты» в мезолинзированные всплески были найдены! Сразу 11 гамма-всплесков с двойственной структурой профиля яркости прошли все тесты. На рис.3 по-

казаны временные зависимости их яркости, измеряемой числом отсчетов в секунду. Для каждого всплеска приведено его обозначение, образованное номером года, месяца и дня (по две цифры), и номер по каталогу BATSE. Мы видим, что временная задержка между двумя компонентами изменяется от 0.5 с до 50 с, что соответствует массам гравитационных линз в 10^5 – 10^6 масс Солнца (эти значения вполне согласуются с массами шаровых скоплений и космологических объектов).

Но самый поразительный факт заключается в другом. При поиске «кандидатов» в мезолинзированные всплески требования относительно взаимной очередности яркого и слабого импульса не накладывались. И тем не менее у всех 11 «кандидатов» первый импульс оказался более ярким! Если сходство импульсов было бы случайным, то по теории вероятности картина должна была быть иной.

Итак, двойные всплески найдены, и в достаточном количестве. А как быть с тройны-



ми, ведь их мы тоже должны были бы увидеть, и здесь уже гораздо меньше возможность случайного сходства импульсов? В результате поисков тройных всплесков новых «кандидатов» в мезолинзирование к уже найденным 11 не добавилось. Но... третий импульс был найден у двух из этих 11 всплесков, GRB 911006 и GRB 930430B, что можно заметить на рис.3, *слева* (слабая компонента следует за двумя другими у первого всплеска и предшествует им у второго). Тест на подобие профиля яркости и спек-

тра данного импульса с другими двумя дал положительный результат у обоих всплесков. Итак, в нашем арсенале есть и два тройных гамма-всплеска — бесспорно, самые интересные «кандидаты» в мезолинзированные.

Особенно ценен гамма-всплеск GRB 911006, у которого мы наблюдаем правильную очередность импульсов — в порядке убывания яркости: это существенно увеличивает вероятность того, что мы столкнулись с реальным мезолинзированием. Данный всплеск

примечателен еще и тем, что помимо Космической обсерватории им.Комптона он был зарегистрирован космическим аппаратом «Ulysses». Располагая результатами наблюдений из двух пространственно разнесенных точек, удалось локализовать источник с хорошей точностью в тонком кольце на небесной сфере с помощью метода космической триангуляции [12]. Эта область неба (узкая полоса на рис.4) не перекрывается с областью локализации по результатам только Космической обсерватории

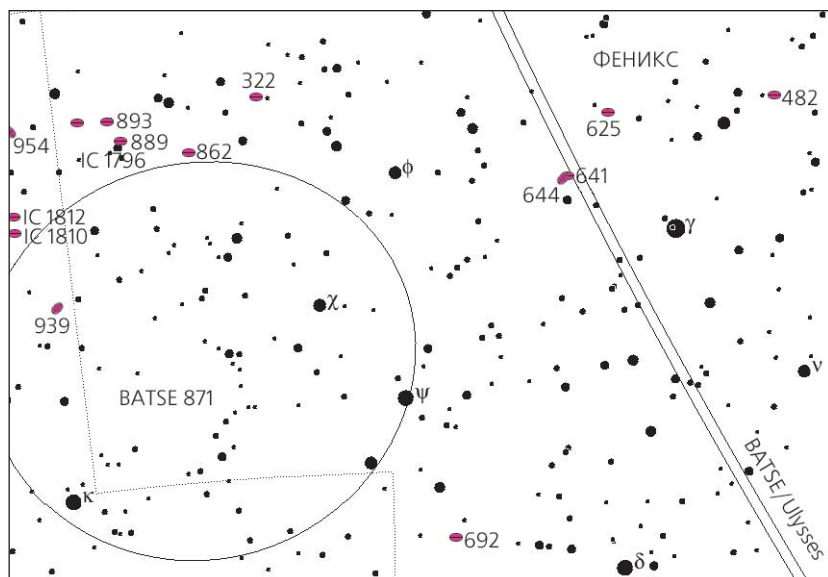


Рис.4. Локализация гамма-всплеска 6 октября 1991 г. (BATSE 871) по данным Космической обсерватории им.Комптона (круговая область) и триангуляционным измерениям по данным этой обсерватории и аппарата «Ulysses» (тонкая полоса). Цветом обозначены галактики.

(круг на рисунке). Однако последние имеют крайне низкую точность. Но самое интересное заключается не в этом — рядом с триангуляционной полосой локализации, в точке, ближайшей к кругу локализации по данным BATSE, находится достаточно яркая галактика NGC

641. Шаровое звездное скопление из галактики вполне могло бы стать гравитационной линзой для проходящего поблизости сигнала, создав картину, которую и зарегистрировала в октябре 1991 г., в самом начале своей работы, Космическая обсерватория им.Комптона...

Еще чуть-чуть...

Мы рассказали о поиске гамма-всплесков, испытавших, возможно, гравитационное мезолинзирование. К сожалению, еще нельзя убрать из предыдущего предложения слово «возможно». Но совокупность всех фактов говорит о значительной вероятности того, что некоторые из найденных «кандидатов» могут действительно являть собой мезолинзированные всплески, а значит, давать еще один весомый аргумент в пользу их внегалактической природы.

Сейчас можно с уверенностью сказать: одна из самых больших астрономических загадок двадцатого века — загадка происхождения космических гамма-всплесков — приближается к своему разрешению, которое станет одним из первых достижений века двадцать первого. И недалек тот день, когда на страницах научных журналов впервые появится словосочетание «гравитационно линзированный гамма-всплеск» без слова «возможно». ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 02-02-06140.

Литература

1. Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A. // *Astrophysical Journal*. 1973. V.182. P.L85—L88.
2. Курт В.Г., Тухомирова Я.Ю., Шейхет А.И. // *Космич. исслед.* 1996. Т.34. №6. С.564—570.
3. Paczynski B. // *Astrophysical Journal*. 1986. V.308. P.L43—L46.
4. Costa E., Frontera F., Heise J. et al. // *Nature*. 1997. V.387. P.783—785.
5. Akerlof C., Balsano R., Barthelmy R. et al. // *Nature*. 1999. V.398. P.400—402.
6. Walsb D., Carswell R.F., Weymann R.J. // *Nature*. 1979. V.279. P.381—384.
7. Refsdal S., Surdej J. // *Rep. Prog. Phys.* 1994. V.56. P.117—142.
8. Marani G.F., Nemiroff R.J., Norris J.P. et al. // *Gamma-Ray Bursts: 4th Huntsville Symposium*. 1998. P.166—174.
9. Комберг Б.В., Курт В.Г., Кузнецов А.В. // *Астрон. журн.* 1999. Т.76. №9. С.665—671.
10. Yakovlev D.G., Mitrofanov I.G., Levshakov S.A., Varshalovich D.A. // *Astrophysics and Space Science*. 1983. V.91. P.133—155.
11. Барышев Ю.В., Езова Ю.Л. // *Астрон. журн.* 1999. Т.74. №4. С.497—508.
12. Hurley K., Briggs M.S., Kippen R.M. et al. // *Astrophysical Journal Supplements*. 1999. V.120. P.399—408.