

ектов как в нашей галактике, так и за ее пределами, подтверждение идей Эйнштейна о связи геометрии и гравитации. Не следует сомневаться, что в будущем это приведет к лучшему пониманию нашего мира и созданию новых, еще более впечатляющих технологий. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эйнштейн А. Теория относительности. Избранные работы. – Ижевск, 2000.
2. Чистяков В.Д. Беседы о геометрии Лобачевского. – Минск, 1973.
3. Пуанкаре А. О науке: Пер. с французского / под ред. Л.С. Понтрягина. – 2-е изд. стер. – М., 1990.
4. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: в 3-х т., пер. с англ. М.М. Баско / под ред. В.Б. Брагинского и И.Д. Новикова. – М., 1977.
5. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. «Черные дыры» во Вселенной // Природа. 1972. №4. С. 28–32.
6. Зельдович Я.Б. Судьба звезды и выделение гравитационной энергии при аккреции. Докл. АН СССР. – 1964. Т. 155, №1. С. 67–69.
7. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L1. 17.
8. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L2. P. 28.
9. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way // The Astrophysical Journal Letters. 2022. Vol. 930:L12. P. 21.
10. Кардашев Н.С. «Радиоастрон» – радиотелескоп, много больший Земли. Научная программа // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, №11. С. 1191–1202.
11. Кардашев Н.С. [и др.]. Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно-космического радиоинтерферометра «РадиоАстрон» // Труды института прикладной астрономии РАН. 2018. Вып. 47. С. 31–37.
12. Астрокосмический центр ФИАН // <https://millimetron.ru>.
13. Gralla S., Lupsasca A. Lensing by Kerr black holes // Phys. Rev. D. // 2020. Vol. 101. 044031.
14. Зенин О.И., Алексеев С.О., Прокопов В.А. Тени черных дыр как источник проверки расширенных теорий гравитации // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2023. Вып. 1. С. 65–70.

Гамма-всплески — ярчайшие вспышки во Вселенной



Евгений Деришев,
старший научный
сотрудник Института
прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
кандидат физико-
математических наук

Детективная история. Открытие гамма-всплесков

Истории астрономических открытий складывались по-разному. Некоторые из них, надев изрядно шуму, впоследствии были опровергнуты. Так случилось с «открытием» каналов на Марсе итальянским астрономом Джованни Скиапарелли. Увы, длинные и почти прямые протоки на поверхности Красной планеты оказались вовсе не свидетельством трудолюбия марсиан, а всего лишь результатом несовершенства телескопов того времени.

Другие открытия, казавшиеся поначалу совершенно невероятными, быстро получали объяснение в рамках уже известного. Так произошло с пульсарами. Импульсы их радиоизлучения повторяются с совершенно одинаковыми интервалами по времени (выражение «как по часам» здесь будет преуменьшением – пульсары «тикают»

гораздо точнее обычных хронометров). Строго периодическое их мигание сначала приняли за сбой в работе записывающей аппаратуры, а затем и вовсе сочли сигналами от далеких инопланетных цивилизаций. Однако вскоре появилось прозаичное объяснение загадки. Пульсары оказались нейтронными звездами, которые испускают мощное радиоизлучение со своих магнитных полюсов. Почти идеальная периодичность сигналов связана с вращением нейтронной звезды, чьи размеры настолько малы, что позволяют ей совершать десятки оборотов в секунду.

Случались и заранее предсказанные открытия. Хрестоматийным примером служит история Нептуна. Изучая движение Урана, самой далекой из известных на тот момент планет, сотрудники Парижской (Урбен Леверье) и Кембриджской (Джон Адамс) обсерваторий независимо друг от друга обнаружили отклонения его фактической орбиты от расчетной, объяснив их притяжением еще более далекой и пока не обнаруженной планеты. Также независимо они вычислили ее приблизительное положение на небе, где Нептун вскоре и был найден.

В редких случаях бывает так, что открытие, будучи многократно подтвержденным, ждет своего объяснения долгие десятилетия. Именно такая судьба ждала гамма-всплески. История их открытия могла бы послужить сюжетом для детективного рассказа. Она началась с запуска серии американских спутников военного назначения Vela, которые должны были выявлять проводимые в СССР ядерные испытания и изучать их последствия по сопутству-

ющему ядерным взрывам гамма-излучению атмосферы. Начиная с 1967 г., спутники фиксировали вспышки предположительно происходящего от земной атмосферы гамма-излучения длительностью от единиц до десятков секунд. Однако они не были похожи на ожидаемые последствия ядерных взрывов и не сопровождалась сейсмическими сигналами, к тому же не было полной уверенности, что это не ложные срабатывания детекторов. Так что обратили на них внимание только в 1969 г. Поскольку основная задача спутников была другой, изучение загадочных вспышек продолжалось неспешно. Выяснилось, что они вовсе не земного происхождения, а космического, но их источники не связаны и с Солнцем. Первое сообщение о космических гамма-всплесках (так было названо обнаруженное явление) в научном журнале появилось лишь спустя несколько лет после их открытия, в 1973 г. К тому времени уже существовали независимые наблюдения гамма-всплесков другими спутниками, но открытие оставалось неполноценным. Требовалось связать явление с какими-нибудь известными, желательно видимыми в обычный телескоп объектами. Дело с таким отождествлением не заладилось. Во-первых, точность определения направления на источник для детекторов гамма-излучения невелика – даже сейчас она составляет доли градуса, а в то время речь шла о нескольких градусах. В области неба такого размера телескоп различает миллионы объектов, причем очевидных кандидатов на роль источников гамма-всплесков не было. Во-вторых, гамма-вспле-

ски не повторяются. Уточнить положение источников с помощью многочисленных наблюдений не представлялось возможным, поскольку каждый раз всплеск приходит с иного направления. Ясно было только то, что источники не слишком велики по космическим меркам, не больше нескольких миллионов километров. Если бы они были большего размера, то не смогли бы включиться и погаснуть за нужное время, даже если бы все изменения в них происходили со скоростью света.

В 70-е гг. прошлого века детекторы гамма-излучения начали устанавливать на межпланетные космические аппараты. Так появилась возможность измерять задержку прихода короткого сигнала на удаленные друг от друга спутники, чтобы с помощью триангуляции определить угол между соединяющей их линией и направлением на источник. Наблюдение на двух спутниках дает узкий круг на небесной сфере, на трех – пересечение таких кругов, образующее небольшую область, гораздо меньшую по размерам, чем погрешность каждого прибора по отдельности. Несколько раз складывались удачные обстоятельства, когда наблюдения велись сразу тремя или даже четырьмя спутниками, но к разгадке происхождения гамма-всплесков это не привело. В выделенном сегменте на небе ярких в оптическом диапазоне объектов не было вообще, а тусклых – слишком много. Интерес к неподатливой загадке рос, и в 1991 г. на орбиту вывели первый специализированный прибор BATSE для поиска гамма-всплесков. Их зарегистрировали сотни за годы его работы. Большая статистика принесла с собой

новые сюрпризы. Выяснилось, что есть два типа гамма-всплесков – длинные, продолжительностью десятки секунд (их большинство), и короткие, длящиеся доли секунды. Вопреки ожиданиям, даже самые слабые, а значит наиболее удаленные всплески были распределены на небесной сфере изотропно, то есть в любом направлении их число одинаково. Звезды распределены иначе. Самые тусклые из них образуют на небе полосу – Млечный Путь. Это следствие дискообразной формы нашей галактики – при взгляде вдоль диска видно больше звезд (правда, почти все они далекие).

То обстоятельство, что источники гамма-всплесков не концентрируются к плоскости галактики, сразу выдвинуло на первый план гипотезы об их внегалактической природе, которые до того момента считались экзотической гимнастикой для ума. И в самом деле, модели, помещавшие источники в далекие галактики, должны были как-то обеспечить яркость, по меньшей мере, в миллионы раз больше, чем у любой сверхновой звезды. Напомним, что размер источника при этом не превосходит размеров обычной звезды. С другой стороны, никакая звезда не могла бы пережить взрыва подобной силы, а это естественным образом объясняло отсутствие повторяющихся всплесков. Предположение о том, что источники коротких и длинных всплесков могут быть разными, давало дополнительную работу теоретикам.

В 1996 г. начал работу спутник ВерроSAX. Помимо широкоугольного детектора, удобного для обнаружения непредсказуемых гамма-всплесков, он имел на борту и рентгеновский теле-

скоп с малым полем зрения, но хорошим (по сравнению с широкоугольными гамма-детекторами) угловым разрешением. На следующий год произошел гамма-всплеск GRB 970228, который по счастливому стечению обстоятельств попал не только в поле зрения широкоугольного детектора, но и «зоркого» телескопа. Наконец-то положение источника удалось определить с точностью лишь немногим хуже остроты человеческого зрения. Подключившиеся к наблюдениям наземные оптические телескопы обнаружили рядом с указанным местом затухающий точечный источник. Поблизости не было ничего другого, что можно было бы связать с гамма-всплеском. Некоторое время спустя на месте потерявшего яркость источника стала видна далекая галактика, находящаяся на расстоянии 8 млрд световых лет. Таким образом, положение источников гамма-всплесков было установлено, и их открытие получило завершенность спустя 30 лет после первого наблюдения. Оставалось только определить, что именно и каким образом порождает это явление.

Что такое гамма-всплески

Гамма-всплески – не просто ярчайшие события во Вселенной. В видимой ее части самые мощные из них на пике своей яркости затмевают все остальное, вместе взятое. Совсем не просто уместить такую прорву энергии всего лишь в объеме средних размеров звезды. Теоретически это возможно, но плотность фотонов окажется настолько велика, что они будут сталкиваться друг с другом, мешая излучению выхо-

дить из источника. Часто сталкивающиеся фотоны обязательно термализуются, то есть спектр излучения станет похож на таковой у нагретого черного тела, который описывается формулой Планка и вовсе не похож на спектр гамма-всплесков. У проблемы компактности нет иного решения, кроме как уменьшить плотность излучения в источнике (одновременно увеличивая его размер), чтобы фотоны выходили свободно.

Увеличенный размер источника как будто находится в противоречии с ограничениями, полученными из быстрой переменной. Спасают релятивистские (то есть связанные с теорией относительности) эффекты. При движении в сторону наблюдателя со скоростью, близкой к скорости света, источник будет казаться более кратковременным и менее вытянутым, чем он есть на самом деле. Сила релятивистских эффектов тем больше, чем ближе скорость движения к скорости света. Чтобы наиболее высокоэнергичные из наблюдаемых гамма-квантов имели возможность свободно выходить из источника, его направленная скорость должна отличаться от скорости света на величину меньше одной тысячной доли процента. Источники гамма-всплесков оказались держателями рекорда скорости. Более быстрого движения во Вселенной не найти, если не брать в расчет микроскопические частицы субатомного размера.

Если бы источники гамма-всплесков светили одинаково во все стороны, то для создания самых сильных из них потребовалось бы полностью превратить в энергию излучения звезду с массой почти 10 масс Солнца (вспомним знаменитую формулу

Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии). Самый эффективный из известных способов преобразования массы в энергию – это высвобождение гравитационной энергии при падении вещества на черную дыру. Эффективность при этом может достигать 10%. Термоядерные реакции (из тех, что могут протекать достаточно быстро) едва дотягивают до эффективности в 0,1%. Получается, что даже самой массивной звезды может не хватить для обеспечения нужной энергии. А ведь ее еще нужно преобразовать именно в гамма-излучение с неизвестной, но скорее всего не слишком высокой эффективностью. Единственный возможный вывод: источники гамма-всплесков представляют собой очень узкие струи быстро движущегося вещества (джеты), которые светят только в направлении своего движения. По крайней мере, некоторые гамма-всплески формируются джетами с углом раскрытия в доли градуса (об их ширине в ряде случаев можно судить по особенностям кривой блеска). Судя по всему, источники гамма-всплесков можно назвать самыми узкими струями естественного происхождения. Луч прожектора расходится сильнее, чем их джеты.

Если гамма-всплески светят в узком луче, то они происходят гораздо чаще, чем можно судить по наблюдениям. Большинство из них направлены в сторону от нас, потому что такие явления невидимы, и в этом случае не так уж и редки. Частота наблюдаемых событий оценивается в 2–3 в день во всей наблюдаемой Вселенной, то есть примерно раз в 10 млн лет в одной галактике. Частота невидимых может оказаться в 10–100 тыс. раз больше,

и тогда она сравнима с частотой появления сверхновых звезд.

Чрезвычайно быстрое выделение энергии в источнике гамма-всплеска, по сути, является взрывом, который запускает очень сильную ударную волну в окружающий межзвездный газ. Вещество на фронте такой ударной волны разогревается до огромных температур, а часть электронов приобретает энергию намного больше средней. Они эффективно излучают за счет синхротронного и обратного комптоновского механизма, порождая радио-, оптическое, рентгеновское и гамма-излучение. Затухающее свечение постепенно тормозящейся ударной волны продолжается еще долгое время (недели и даже месяцы) после окончания гамма-всплеска. Оно получило название послесвечения. Это самое широкополосное явление во Вселенной, наблюдаемое в диапазоне частот, который тянется, по меньшей мере, на 18 порядков по частоте, от радиодиапазона до крайне жесткого гамма-излучения с энергией фотонов в десятки ТэВ. Сколько-нибудь серьезную конкуренцию ему могут составить разве что активные ядра галактик.

Гамма-всплески – весьма необычное явление, которое раз за разом преподносит сюрпризы наблюдателям и загадки теоретикам. Тем не менее все справились со своей работой, и сейчас существуют общепринятые теоретические модели. Источниками длинных всплесков выступают довольно редкие сверхновые типа Ibc – взрывы массивных звезд Вольфа – Райе, которые к концу своей жизни полностью потеряли водородную оболочку и даже наружный гелиевый слой ядра. Остав-

шееся углеродно-кислородное ядро может иметь быстрое вращение. Когда начинается взрыв сверхновой звезды, то есть коллапс центральной области в черную дыру, быстро вращающееся вещество задерживается на близкой к черной дыре орбите. Там его энергия посредством очень сильного магнитного поля передается в два ускоряющихся вдоль оси черной дыры джета. Они постепенно отодвигают вещество звезды со своего пути и спустя некоторое время достигают поверхности, после чего можно увидеть вызванный излучением джетов гамма-всплеск. Пока в этом сценарии понятны не все детали, но в целом он подтверждается наблюдениями. В частности, в оптическом послесвечении длинных гамма-всплесков обнаруживается подъем яркости, который по форме и спектру похож на сверхновую.

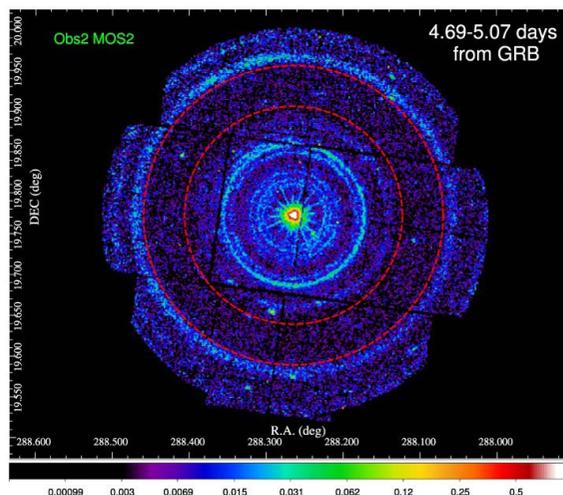
Короткие гамма-всплески возникают при слиянии двойных нейтронных звезд. Представление об этом как о новом классе взрывающихся объектов обрело популярность после открытия в 1974 г. пульсара в системе из двух нейтронных звезд. Уже упоминавшаяся фантастическая точность хода «пульсарных часов» позволила не только верно определить элементы орбиты, но и заметить их медленное изменение со временем. Пульсар постепенно сближается со своим компаньоном, теряя энергию орбитального вращения на излучение гравитационных волн в точном соответствии с предсказаниями общей теории относительности. За косвенное обнаружение гравитационного излучения первооткрыватели пульсара получили в 1993 г. Нобелевскую премию по физике. Через 300 млн лет

нейтронные звезды сблизятся настолько, что произойдет их слияние с образованием черной дыры и короткоживущего аккреционного тора вокруг нее. За счет того же механизма, что и для длинных гамма-всплесков, происходит передача энергии от вращающегося и падающего на черную дыру вещества к двум джетам, разгоняющимся вдоль оси вращения. Они и являются источником гамма-всплеска. В 2017 г. сразу три детектора гравитационных волн наблюдали сигнал от слияния компактных объектов, связанный с коротким гамма-всплеском. Так было получено окончательное подтверждение теории их происхождения. Интересно, что в том же году за прямое наблюдение гравитационных волн была присуждена еще одна Нобелевская премия, а среди немногих известных на тот момент событий был и упомянутый источник короткого гамма-всплеска.

Фотовспышка для Вселенной

Порой гамма-всплески бывают настолько яркими, что чувствительные детекторы космических аппаратов оказываются засвеченными. Это не вызывает необратимых последствий для приборов, но теряется важная информация (а ведь редкие яркие события – самые интересные). Часть утраченного можно возместить, работая с гораздо более слабым отраженным сигналом. Чаще всего наблюдают отражение от частей конструкции спутника, атмосферы Земли или даже от Луны. Но самым впечатляющим примером можно назвать отражение от межзвездных облаков космической пыли. На *рисунке* пока-

Рисунок. Фотография рентгеновского излучения от гамма-всплеска GRB 221009A, отражающегося от облаков космической пыли в нашей галактике. Изображение получено спутником XMM-Newton и опубликовано в журнале «The Astrophysical Journal Letters» <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac1dc>



зано отраженное от межзвездной пыли рентгеновское излучение самого яркого из всех известных на сегодня гамма-всплесков GRB 221009A. Это изображение (и ему подобные) можно с натяжкой назвать единственной доступной фотографией гамма-всплесков. Изображение самого источника, полученное на любом телескопе в различных диапазонах электромагнитного спектра, выглядит как точка.

В каждый момент времени точки отражения располагаются на поверхности эллипсоида вращения, в одном из фокусов которого находится измерительный прибор, а в другом – источник. Чем дальше от направления на него отстоит точка отражения и чем ближе она к наблюдателю, тем больше будет задержка. То есть находящиеся ближе к Земле пылевые облака в отраженном свете космической рентгеновской вспышки окажутся на небе на самом большом угловом удалении от источника. По направлению на отраженный сигнал и его задержке можно вычислить расстояние до пылевого облака и его размер. А сравни-

вая спектр отраженного рентгеновского излучения со спектром исходного, можно определить химический состав пыли и даже размер пылинок (это, по сути, рентгенофлуоресцентный анализ, широко применяющийся в лабораториях). Трудно представить себе более удобный способ исследования космических пылевых облаков, но, к сожалению, мощные гамма-всплески – большая редкость.

Каждый делавший рентгеновский снимок в поликлинике знает, как много на нем можно увидеть. И дело тут не только в прозрачности человеческого тела для рентгеновских лучей, а еще и в том, что оно просвечивается насквозь. Отраженные от разных внутренних органов, рентгеновские лучи смешались бы друг с другом и даже близко не дали бы четкой картины. Исследовать «на просвет» Вселенную крайне сложно – не считая малую долю объема, занятую галактиками, она практически пустая и, соответственно, почти абсолютно прозрачная. Оказавшись внутри одной из межгалактических пустот, человек увидел бы совершенно черное небо. И все же темнота эта далеко не абсолютная. Ее пронизывает свет миллиардов

недоступных человеческому глазу галактик. Будь у воображаемого космонавта хороший телескоп, он смог бы измерить спектр Вселенной в целом, что дало бы информацию о численности звезд разных типов и об истории звездообразования от момента зарождения галактик до наших дней. Сделать подобное, находясь на Земле, очень сложно: мешают многочисленные звезды нашей галактики, заполняющая межзвездное пространство космическая пыль и прочие помехи. Было бы здорово иметь посланника с нужной информацией из межгалактического пространства. И здесь снова приходят на помощь гамма-всплески. Рождающиеся в послесвечении сверхэнергичные ТэВ-ные фотоны на своем пути к Земле через межгалактическое пространство могут сталкиваться с фотонами звездного света (менее энергичные из них не могут участвовать в таких взаимодействиях). По тому, сколько пропало ТэВ-ных фотонов, можно судить о частоте столкновений, а значит, напрямую измерить количество (и даже спектр) звездного излучения между галактиками. Пока регистрация сверхэнергичного гамма-излучения остается сложной в техническом отношении задачей, а наблюдавшиеся в ТэВ-ном диапазоне всплески можно пересчитать по пальцам. Однако теория утверждает, что каждый такой всплеск является мощным источником ТэВ-ных фотонов, и по мере совершенствования приборов количество и качество измерений многократно вырастет. Когда Вселенную «просветят» много раз с разных направлений, станет возможным создание «томограммы» звездного света, которая расскажет много нового об истории Вселенной.

Ближний контакт. Гамма-всплески в нашей галактике

К настоящему времени наблюдались тысячи гамма-всплесков, и все они, включая ближайшие из известных, возникали далеко даже по меркам межгалактических расстояний. Конечно, любопытство подталкивает астрофизиков (и не только) к попыткам выяснить, как мог бы выглядеть подобный феномен, случившийся сравнительно близко. Для одной отдельно взятой галактики это редчайшее событие, которое случается примерно раз в 10 млн лет. Но за время своего существования наша планета могла быть свидетелем сотен очень близких гамма-всплесков. Выдвигались гипотезы, что самые мощные из них могли быть причиной катастроф, вплоть до великих вымираний в далекие геологические эпохи. Настоящие последствия все же не настолько драматические.

Перенесись мы ко времени последнего очень близкого гамма-всплеска, условно – во времена динозавров, и представшее нашим глазам зрелище было бы грандиозным. Хотя глаза лучше было бы защитить – с началом явления небо становится ослепительно ярким. Свет похож на исходящий от неоновой лампы, но при этом ярче солнечного в сотни раз. Это воздух поглощает опасное рентгеновское и гамма-излучение, перерабатывая его в относительно безвредное видимое и ультрафиолетовое излучение. Не будь атмосферы Земли, защищающей нас, и доза радиации уже в первые секунды стала бы смертельной для любого сложного живого

организма. Во время всплеска воздух у поверхности нашей планеты немного разогреется, что вызовет ощутимый ветерок, а вот на большой высоте, в стратосфере, нагрев гораздо больше. Там будет бушевать настоящий ураган, гул от которого слышен и у Земли. Из-за ионизирующего действия поглощенной радиации в атмосфере образуется много окислов азота, и в последующие дни пройдут очень сильные кислотные дожди, отчего пострадает растительность. По-видимому, это и будет самым страшным и самым долгоиграющим последствием гамма-всплеска для жизни на Земле. Примерно неделю после него на закате и перед восходом можно будет наблюдать огромный ореол вокруг Солнца, ярко светящийся в зеленых, бирюзовых и голубых тонах. Это ТэВ-ные фотоны от послесвечения, сталкиваясь с фотонами солнечного света, образуют энергичные электроны и позитроны, которые излучают в магнитном поле солнечного ветра.

Сожалеть о том, что нам никогда не доведется увидеть такое зрелище, наверное, не стоит. Ведь вызванная гамма-всплеском сильнейшая магнитная буря, на которую динозавры не обратили бы внимания, легко может оставить без Интернета и электричества половину населения нашей планеты. Лучше уж изучать гамма-всплески в далеких галактиках, они и так очень интересны. ■