

**В 2010 ГОДУ FERMI ОБНАРУЖИЛ** в центре Млечного пути два гигантских "пузыря", являющихся источником гамма-излучения. Одной из причин могут являться джеты, выбрасываемые гигантской черной дырой в центре галактики – но это пока только гипотеза

## ХВОСТАТЫЕ ВСПЫШКИ

ГАММА-ВСПЛЕСКИ – САМЫЕ МОЩНЫЕ ВО ВСЕЛЕННОЙ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ГИБЕЛЬ ИЛИ СЛИЯНИЕ ЗВЕЗД И РОЖДЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР

Текст: Алексей Левин

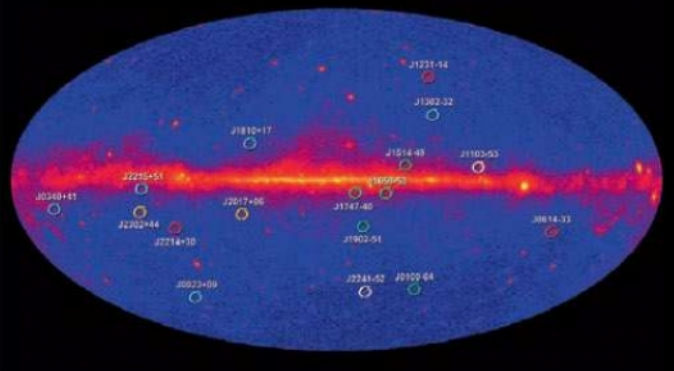
**В** марте 1969 года сотрудники небольшой научной группы в Лос-Аламосе, где обрабатывалась поступающая из космоса информация, обратили внимание, что пара спутников-близнецов серии Vela-4 еще в 1967 году зарегистрировала два непродолжительных импульса гамма-излучения, которые нельзя приписать ни взрыву сверхновой, ни солнечным вспышкам, ни советским ядерным испытаниям. К лету 1973-го усовершенствованные спутники серии Vela-5 отследили уже 16 подобных вспышек. Первооткрыватели загадочного явления Рей Клибсадел и Рой Олсон, а также сотрудничавший с ними Йен Стронг сообщили об этом открытии на страницах *Astrophysical Journal Letters*. Короткая заметка положила начало новому научному направлению – исследованию космических гамма-всплесков, cosmic gamma-ray bursts (GRB, в русскоязычной литературе их называют также гамма-вспышками и гамма-барстерами, хотя последний термин сейчас употребляют редко).

### СБОР ИНФОРМАЦИИ

Информация о гамма-всплесках накапливалась медленно. Поначалу детектировались только импульсы длительностью 10–30 секунд, состоящие из гамма-

**В 1960-Х ГОДАХ США ОТПРАВИЛИ В КОСМОС** несколько специализированных спутников семейства Vela, предназначенных для регистрации элементарных частиц и фотонов очень высоких энергий. Хотя эти спутники не имели никакого отношения к астрономии (они должны были отслеживать для Пентагона советские ядерные испытания на обратной стороне Луны), именно они стали первооткрывателями чрезвычайно интересного астрономического феномена – гамма-вспышек.

**ОБНАРУЖЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ** – не единственная задача космического телескопа Fermi. Гамма-картирование неба, проведенное с помощью его инструментов, выявило несколько "неопознанных" источников гамма-излучения. Позднее они были идентифицированы как 17 новых пульсаров (на карте они обозначены кружочками, яркая горизонтальная полоса – наш Млечный путь).



квантов с небольшой примесью рентгена. Со временем обнаружилось, что около 30% всех всплесков короче двух секунд, а их средняя длительность составляет лишь 300 миллисекунд. Эти импульсы отличаются большей жесткостью гамма-излучения (иначе говоря, присутствием более энергичных гамма-квантов), однако по части полной светимости уступают более продолжительным всплескам. Такие всплески стали называть короткими, а все прочие (иногда растягивающиеся на десятки минут) – длинными. Не так давно были выделены в самостоятельный класс очень короткие гамма-всплески длительностью меньше 100 миллисекунд.

В настоящее время собраны данные о нескольких тысячах гамма-всплесков различных типов. Примерно половина информации получена детектирующим комплексом BATSE (Burst and Transient Source Experiment), который стоял на борту американской космической обсерватории "Комптон", запущенной в апреле 1991 года и снятой с орбиты в июне 2000-го. Один этот прибор зарегистрировал 2704 гамма-всплески – примерно по одной ежесуточно. Их источники не только не были сконцентрированы в плоскости нашей Галактики, но, напротив, однородно распределялись по всей небесной сфере (эту тенденцию еще в конце 1970-х выявил советский космический эксперимент "Конус"). Поэтому в 1990-х укрепилось мнение, что гамма-всплески возникают на дистанциях в миллионы и даже миллиарды световых лет от Земли (такие расстояния называют космологическими). Отсюда следовало, что для генерации всплесков необходима фантастическая энергия, вполне сравнимая с той, которая выделилась бы при полной аннигиляции небесных тел приличного размера.

Подтверждений этой гипотезы пришлось ждать еще несколько лет. Все дело было в том, что восемь детекторов комплекса BATSE локализовали расположение всплесков на небесной сфере очень приблизительно, с точностью от одного до десяти градусов (то есть от 2 до 20 угловых диа-

метров полной Луны). Координаты почти сотни всплесков удалось определить с меньшей погрешностью, но все же не слишком точно. Поэтому долгое время не получалось привязать гамма-всплески к конкретным источникам видимого света, расстояние до которых можно было бы измерить по красному смещению спектральных линий.

ПРИВЯЗКА К НЕБУ

Первый шаг к преодолению этой неопределенности был сделан командой ученых во главе с голландским астрономом Яном ван Парадейсом 14 лет назад. Ученые работали с данными, полученными с итало-голландской орбитальной обсерватории ВерроSAX, которая в первую очередь предназначалась для исследований в рентгеновском диапазоне, но была оснащена детектором длинноволновых гамма-квантов с энергиями 60–600 кэВ (иногда эту область относят к верхней границе рентгеновского спектра).

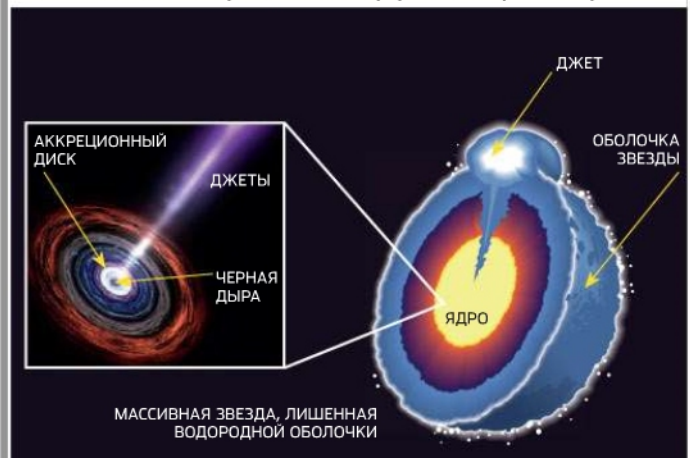
28 февраля 1997 года ВерроSAX зарегистрировал вошедший в историю 80-секундный гамма-всплеск GRB 970228 (первые две цифры означают год, вторые – месяц, третьи – число). Погрешность в определении угловых координат на сей раз не превышала одной угловой минуты, и как раз на этом участке неба был выявлен чрезвычайно тусклый объект, различимый с помощью оптических телескопов. Правда, расстояние до него удалось определить лишь приблизительно, но это было только начало. 8 мая и 14 декабря ВерроSAX навел ученых еще на два длинных гамма-всплеска с оптическими двойниками, которые уж несомненно отстояли от Солнца на космологические дистанции (последний – аж на 12 млрд световых лет!).

Но это были еще цветочки. 12 января 1999 года BATSE зарегистрировал полутораминутный всплеск, источник

**ОДНА ИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛИННЫХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ** связана с коллапсами – массивными звездами (более 20 солнечных масс), лишенными водородной оболочки. Ядро такой звезды коллапсирует в черную дыру, которая засасывает вещество аккреционного диска и выбрасывает вдоль оси вращения релятивистские джеты – струи вещества, разогнанного до околосветовых скоростей. Пробивая оболочку звезды, джеты порождают мощное гамма-излучение, сконцентрированное в узком конусе.

ПРОДОЛЖЕНИЕ БАНКЕТА

И длинные, и короткие гамма-всплески обладают длинноволновым продолжением – послесвечением. Вслед за исходным гамма-импульсом следует поток рентгена типичной протяженностью в несколько суток. Он переходит в ультрафиолет, затем в видимый свет, в инфракрасное излучение и в конце концов – в радиоволны, которые удается записывать на протяжении недель и месяцев (правда, у половины наблюдаемых гамма-всплесков нет оптических хвостов – по пути к Земле их поглощает космическая пыль). Это явление предсказали Богдан Пачинский и Джеймс Роадс в 1993 году. У длинных всплесков его обнаружили в ходе отслеживания GRB 970228, а у коротких впервые наблюдали в 2005 году. Считается, что послесвечение возникает благодаря ультрарелятивистским (распространяющимся почти со скоростью света) ударным волнам в межзвездном газе, окружающем источник гамма-всплеска. Вещество, которое переносит ударные волны, постепенно охлаждается и испускает фотоны все меньших энергий. Детали этого механизма еще предстоит выяснить.





которого удалось быстро локализовать с помощью нового роботизированного телескопа ROTSE 1, установленного на территории Лос-Аламосской национальной лаборатории. Телескоп обнаружил в указанном направлении световую вспышку продолжительностью чуть больше минуты. Ее можно было бы заметить и невооруженным глазом, будь она всего раз в десять ярче, хотя от источника нас отделяли 9 млрд световых лет. В гамма-диапазоне этот всплеск выбросил около  $4 \times 10^{54}$  эрг ( $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$ ) – правда, при допущении, что он равномерно светил по всем направлениям. Такая оценка полной энергии излучения называется изотропным эквивалентом, и в данном случае он оказался равным энергии, которая выделилась бы при полной аннигиляции звезды вдвое тяжелее Солнца! Конечно, если излучение было выброшено в узком конусе, хватило бы намного меньшей энергии, и такая интерпретация в конце концов стала общепринятой. Но в любом случае теперь уже исчезли всякие сомнения в том, что гамма-всплески порождены космическими катаклизмами феноменальной мощности.

и определяют их координаты с исключительно высокой точностью – до десятых долей угловой секунды. К маю 2010 года Swift отловил свыше 500 гамма-всплесков, причем более половины – с оптическим послесвечением. Одним из них был первый короткий всплеск, обладающий световым хвостом, зарегистрированный 9 мая 2005 года. На основании этого наблюдения было определено расстояние до источника и доказано, что и короткие всплески возникают на космологических дистанциях от Солнца. 19 марта 2008 года Swift заметил всплеск, сопровождающийся такой яркой вспышкой видимого света, что в течение 30 секунд ее можно было видеть без всякой оптики – и это при том, что расстояние до источника составляло 7,5 млрд световых лет! 23 апреля 2009 года Swift разглядел 10-секундный гамма-всплеск с рекордно высоким красным смещением 8,2, который был всего на 630 млн лет моложе эпохи Большого взрыва.

В последние годы немалый вклад в исследование гамма-всплесков внес космический гамма-телескоп Fermi, запущенный в космос 11 июня 2008 года. Эта обсерватория

## ИЗУЧЕНИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ ОБЕЩАЕТ ВЕЛИКОЕ МНОЖЕСТВО ОТКРЫТИЙ. ЕСЛИ КОСМИЧЕСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ СМОГУТ УЛАВЛИВАТЬ МИКРОСЕКУНДНЫЕ ГАММА-ИМПУЛЬСЫ, ПОЯВИТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДАТЬ ТАКИЕ ДЕТАЛИ ФИЗИКИ КОСМОСА, О КОТОРЫХ ПОКА НЕЛЬЗЯ И МЕЧТАТЬ

### КОСМИЧЕСКИЕ ГЛАЗА

В последнее время возможности гамма-астрономии расширились благодаря новейшим космическим обсерваториям, оснащенным не только гамма-детекторами, но и телескопами, работающими на более длинных волнах. Поэтому появилась возможность оперативно отслеживать гамма-всплески даже без участия наземной аппаратуры.

Первой такой обсерваторией стал американский астропутник HETE-2 (High Energy Transient Explorer), работавший с 2000 по 2006 год. Он определял положение гамма-всплесков с точностью до десяти угловых секунд и сделал множество открытий. Так, он обнаружил 25-секундный всплеск GRB 030329, который удалось связать со сверхновой звездой SN 2003 dh, вспыхнувшей в 2 млрд световых лет от Солнца. Это стало первой надежной демонстрацией того, что некоторые гамма-всплески сопутствуют взрывам сверхновых. Самые ранние свидетельства этого были получены в ходе наблюдения 30-секундного всплеска GRB 980425, но степень достоверности в том случае была гораздо меньшей.

За HETE-2 последовала действующая по сей день международная обсерватория Swift, выведенная на околоземную орбиту 29 ноября 2004 года. На ней стоит детектор длинноволновых гамма-квантов с энергиями 15–150 кэВ, а также телескопы – рентгеновский и оптический. Эти приборы регистрируют послесвечение гамма-всплесков

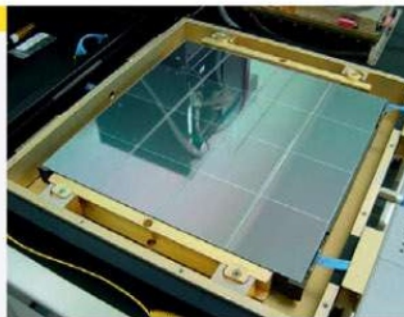
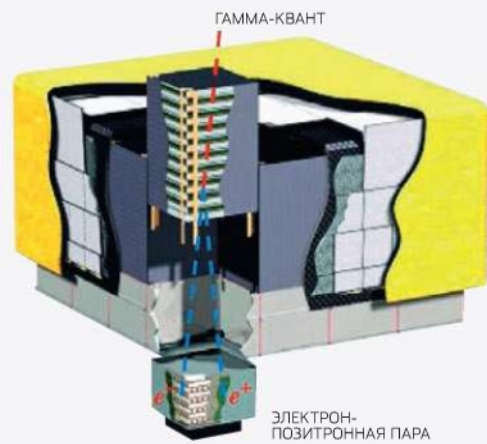
оснащена приемником гамма-всплесков с 14 кристаллическими детекторами, отслеживающими кванты с энергиями в диапазонах 8 кэВ – 1 МэВ и 150 кэВ – 30 МэВ. Основной прибор обсерватории, обзорный гамма-телескоп (Large Area Telescope, LAT), позволяет отлавливать гамма-кванты особо высоких энергий – вплоть до 300 ГэВ. 16 сентября 2008 года эта обсерватория зарегистрировала гамма-всплеск с наибольшим на сегодня изотропным энергетическим эквивалентом в  $8,8 \times 10^{54}$  эрг, что соответствует полной аннигиляции примерно пяти солнечных масс.

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

Новые наблюдения весьма пополнили наши знания о гамма-всплесках. Обсерватория Swift накопила богатейший архив сведений о красном смещении оптического послесвечения гамма-всплесков, позволяющем оценить расстояние до их источников. “Сейчас мы собираем информацию о том, в каких галактиках чаще всего наблюдаются источники всплесков, – объясняет “ПМ” Крисса Коувелиоту из Центра космических полетов NASA им. Маршалла, которая первой ввела классификацию гамма-всплесков на короткие и длинные. – По предварительным данным, там меньше элементов тяжелее гелия, нежели в нашей собственной Галактике, и следовательно, возникли они на более ранних этапах эволюции Вселенной. Мы также пытаемся понять, нельзя ли воспользоваться излучением гамма-всплесков для просвечивания пространства.

## ГАММА-ГЛАЗА

Один из основных инструментов обсерватории Fermi – гамма-телескоп LAT (Large Area Telescope). Высокоэнергетические гамма-лучи не преломляются линзами, поэтому LAT построен по образцу детекторов, используемых в ускорителях частиц.



**LAT СОСТОИТ** из 16 наборов полупроводниковых детекторов и калориметров из йодидов цезия, которые закрыты 89 полимерными детекторами антисовпадений. Система обработки учитывает сигналы детектора антисовпадений, полупроводниковых детекторов и калориметра и определяет направление и энергию гамма-квантов.



Взаимодействуя с атомами вольфрама в фольге, гамма-кванты порождают электрон-позитронные пары, взаимодействующие с кремниевыми полупроводниковыми полосками, ориентированными в перпендикулярных направлениях, чтобы отслеживать траекторию частиц. Потом частицы попадают в электромагнитный калориметр, где измеряется их энергия.

**Габариты LAT:** 1,8 x 1,8 x 0,72 м **Масса:** 2789 кг  
**Потребляемая мощность:** 650 Вт

Если это удастся, появится возможность получить дополнительную информацию о распределении материи во Вселенной. Автоматические космические обсерватории позволяют намного лучше выявить связь между всплеском и взрывом сверхновой и усовершенствовать теоретические модели возникновения гамма-всплесков различного типа. В целом специалисты согласны с тем, что длинные всплески появляются при гравитационном коллапсе звезд-гигантов, а короткие – при столкновении и слиянии нейтронных звезд. Но здесь имеется множество нюансов, которые предстоит прояснить. К примеру, мы пока не знаем, почему излучение коротких гамма-всплесков иногда равномерно разбрасывается по всем направлениям, а иногда концентрируется внутри широкого конуса с углом раствора не менее 30°. Напротив, излучение длинных всплесков выходит через узкие конусы с типичным раствором в 5–10°, что полностью соответствует модели гибели звезд-коллапсаров”.

Космический телескоп Fermi в настоящее время зарегистрировал два десятка гамма-всплесков с энергиями фотонов выше 15 ГэВ. Это очень серьезное достижение, поскольку предшествующие обсерватории никогда не сообщали о всплесках с энергиями квантов более 2 МэВ. “Эта информация представляет огромный интерес для фундаментальной физики и космологии, – говорит Линн Комински, профессор и декан факультета физики и астрономии Калифорнийского университета в округе Сонома. – Есть все основания полагать, что сверхэнергичные фотоны чувствуют квантовую природу гравитации, которая лежит за рамками общей теории относительности. Теория утверждает, что такие кванты распространяются несколько медленней, нежели фотоны меньших энергий, и поэтому преодолевают космологические дистанции с ощутимой задержкой. Это явление еще не обнаружено, но будущее покажет. Новая аппаратура также позволит выяснить, можно ли исполь-

зовать гамма-всплески в качестве эталонных источников излучения. Сейчас эту роль исполняют звезды из группы цефеид и сверхновые типа Ia. Гамма-всплески намного ярче и потому пригодны для измерения космических дистанций куда большего масштаба. Наконец, есть шансы обнаружить гамма-всплески, порожденные взрывами сверхмассивных звезд первого поколения, сформировавшихся во времена, когда во Вселенной практически не было других элементов, кроме водорода и гелия. Я не побоюсь назвать эту цель святым Граалем современной гамма-астрономии”.

ВСПЛЕСКИ: ДЛИННЫЕ, КОРОТКИЕ...

По мнению профессора Техасского университета в Остине Крейга Уилера, возникновение длинных гамма-всплесков наилучшим образом объясняет модель, связывающую их со взрывами сверхмассивных коллапсирующих звезд. Такие взрывы оставляют после себя или черные дыры, или магнетары – сильно намагниченные быстро вращающиеся нейтронные звезды. В соответствии с этой моделью гамма-кванты должны выбрасываться внутри узких конусов, направленных вдоль оси вращения гнущей звезды. Их источниками, скорее всего, служат ультрарелятивистские джеты – потоки частиц, чья скорость лишь на тысячные доли процента меньше скорости света. Общая энергия коллимированных выбросов гамма-квантов должна быть в тысячи раз меньше изотропного эквивалента и поэтому даже в максимуме не превышает  $10^{51}$  эрг ( $10^{44}$  Дж). Коллапсу очень массивной звезды вполне по силам обеспечить такой энергетический выход. Для свободного выброса гамма-квантов звезда должна избавиться от внешней водородной оболочки, иначе та поглотит большую часть излучения. “Но это лишь общая картина, – говорит Уилер. – Детали работы космических машин, преобразую-



щих гравитационную и вращательную энергию гнущихся звезд в направленное гамма-излучение, пока еще не выяснены. В частности, нам неизвестно, какой вклад в эти процессы вносят заряженные частицы и магнитные поля и на каких расстояниях от центра коллапсара рождаются основные потоки гамма-квантов”.

Наиболее популярная модель происхождения коротких всплесков утверждает, что они возникают при столкновении намагниченных нейтронных звезд, которые обращаются вокруг общего центра инерции и постепенно сближаются из-за потери кинетической энергии, уносимой гравитационными волнами. Однако у этой модели есть свои белые пятна. Крейг Уилер отмечает: “Есть и другие гипотезы, например рождение коротких всплесков в аккреционных дисках белых карликов, но они тоже недостаточно обоснованы”.

#### ...И ОЧЕНЬ КОРОТКИЕ

**Профессор Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе Дэвид Клайн занимается изучением наикратчайших всплесков. Информация о них весьма скудная – из-за ограниченных возможностей аппаратуры.** На сегодня зарегистрировано лишь несколько десятков всплесков этого типа, причем длительность некоторых из них составляла всего 11 миллисекунд. Но почти наверняка из космоса приходят всплески, измеряемые не только миллисекундами, но долями миллисекунд, просто пока нет возможности их обнаружить.

Очень короткие всплески – рекордсмены по жесткости гамма-излучения, однако максимальные энергии их фотонов еще не определены. Об их послесвечении мало что известно, но если оно действительно существует, то должно быть намного слабее послесвечения всплесков других типов.

“Вполне возможно, что для объяснения природы самых коротких всплесков не понадобятся никакие экзотические модели, – говорит Клайн, – однако я придерживаюсь

мнения, что эти всплески возникают в ходе исчезновения черных дыр, образовавшихся вскоре после Большого взрыва и просуществовавших до современной эпохи”. Такие дыры могут порождать гамма-всплески двумя путями. Стивен Хокинг в 1974 году теоретически показал, что любая черная дыра непрерывно испускает квантовое излучение с чернотельным спектром. Из-за этого она постепенно теряет массу и, как это ни парадоксально, не охлаждается, а нагревается. В конце концов дыра взрывается и излучает в гамма-диапазоне энергию порядка  $10^{30}$  эрг. Дыры звездной массы и тем более сверхмассивные дыры в ядрах галактик худеют чрезвычайно медленно, более легкие – намного быстрее. Расчеты показывают, что мини-дыра, появившаяся на свет с массой порядка  $10^{10}$ – $10^{11}$  г, должна взорваться в нашу эпоху, и мы сможем зарегистрировать ее гамма-излучение, если она находится совсем рядом, не далее двух-трех световых лет.

Однако профессор Клайн полагает, что существует и более экстравагантный способ генерации гамма-квантов, доступный дыре с исходной массой в  $10^{14}$ – $10^{15}$  г. Когда такая дыра прогревается до триллионов градусов, обычная материя в ее окрестностях превращается в кварк-глюонную плазму. Это фазовый переход первого рода, аналогичный превращению воды в лед. Он приводит к выделению огромной энергии, которая и генерирует очень короткий гамма-всплеск. Такие всплески можно засечь, если их источник находится от нас на дистанции в два-три десятка световых лет. И профессор Клайн не теряет надежды, что детекторы космического телескопа Fermi когда-нибудь смогут подтвердить его гипотезу: “Если космические обсерватории новых поколений смогут улавливать микросекундные, а то и наносекундные гамма-импульсы, появится возможность наблюдать такие детали физики космоса, о которых сейчас нельзя даже и мечтать”. В этих надеждах и заключается очарование древнейшей, но неизменно юной науки о Вселенной.