

Гамма-всплески: секундные катастрофы галактического масштаба.

Гром с ясного неба

60-е годы были самыми урожайными на сенсационные открытия в астрономии уходящего века. Не говоря о фундаментальнейшем открытии реликтового излучения, это три явления, каждое из которых в то или иное время вызвало шок: квазары, пульсары и гамма-всплески. Но если квазары и пульсары были быстро поняты хотя бы в самых общих чертах, гамма-всплески водили исследователей за нос почти тридцать лет, да и сейчас остаются почти непонятыми.

Гамма-всплески — ярчайшее явление. Сильные всплески можно зарегистрировать детектором размером с монету (например, маленьким счетчиком Гейгера на спутнике). Открыты они были в 1968 г. американскими спутниками-шпионами “Вела”, призванными наблюдать за ядерными взрывами в атмосфере.

Почти 30 лет их видели только как всплески отсчетов гамма-квантов детекторами на космических аппаратах, продолжительность менялась от малых долей секунды до сотен секунд, интенсивность всплеска зависела от времени непредсказуемым образом.

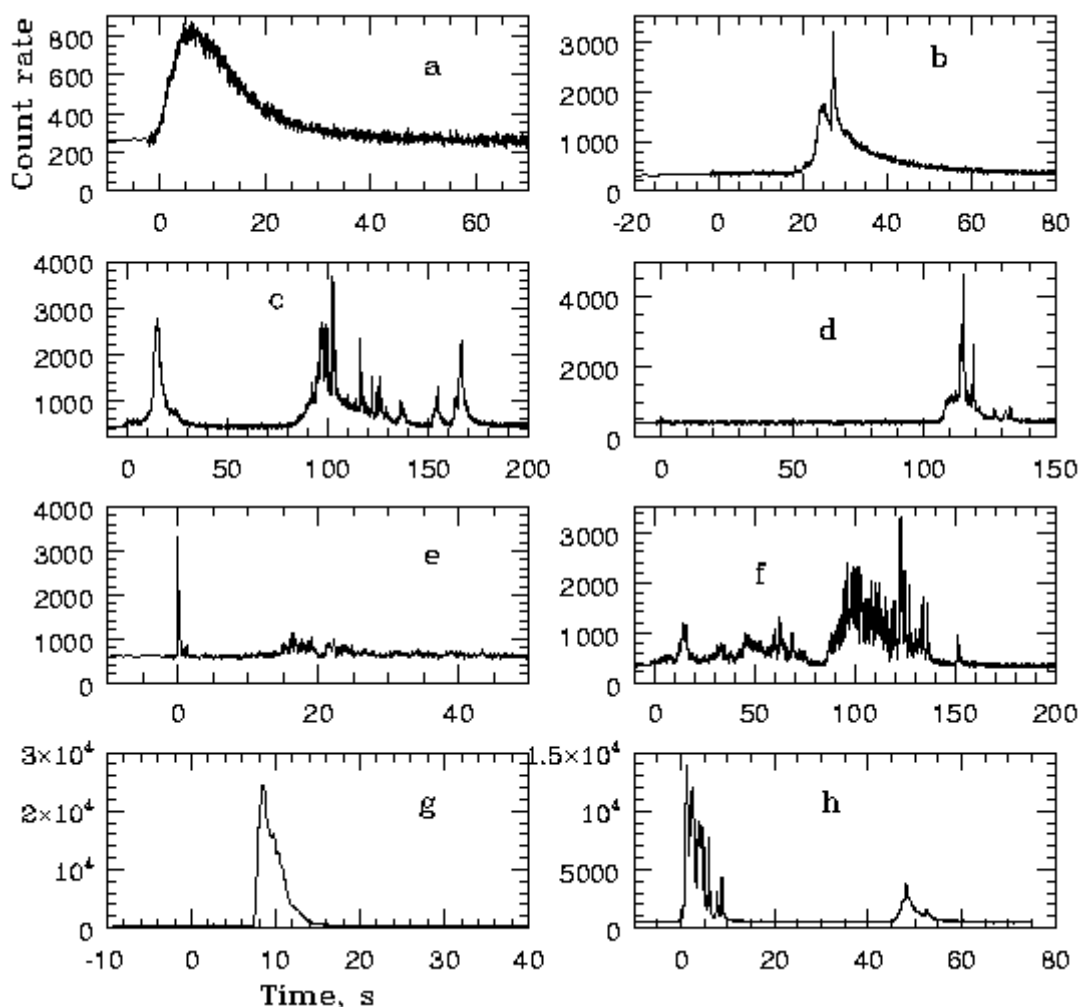


Рис.1

Временные профили нескольких ярких гамма-всплесков (данные BATSE). (по горизонтальной оси — время в секундах, по вертикальной — число отсчетов в секунду). Профили настолько разные, что не верится, что они относятся к одному и тому же явлению. Однако, они хорошо вписываются в единую статистику и все попытки выделить среди них подклассы по временным профилям ничего не дали.

Иногда удавалось довольно точно определить положение источника всплеска на небе (гамма-всплески всегда приходят из разных мест, не повторяясь). И никогда на месте гамма-всплеска не оказывалось ровным счетом ничего, разве что какая-то очень далекая галактика, которые и так найдешь повсюду. Мощнейшие всплески напоминали гром с ясного неба

Больше двадцати лет думали, что гамма-всплески рождаются сравнительно недалеко — в Галактике — и связаны с какими-то катаклизмами на нейтронных звездах, богатых на яркие эффекты.

5 марта 1979 года произошло событие (кстати, зарегистрированное российскими аппаратами), после которого многие подумали, что ответ ясен: мощнейший всплеск с последующими периодическими пульсациями с периодом несколько секунд. Раз пульсации — значит пульсар, нейтронная звезда. Но впоследствии оказалось, что это был не гамма-всплеск а soft gamma repeater (на одном семинаре предложили переводить это как “мягкий повторитель”, но мы не берем на себя такую смелость) — совсем другое явление.

В 90-х годах, когда американцы (НАСА) запустили Гамма Обсерваторию “Комптон”, вообще все смешалось. Детекторы BATSE на Гамма Обсерватории регистрировали всплески почти ежедневно. Оказалось, что источники всплесков слишком равномерно распределены по небу, чтобы принадлежать Галактике, которая, как известно, имеет форму диска. Хуже того, явно не досчитывались слабых всплесков: их распределение по яркости подразумевало, что у их распределения по расстоянию от нас есть край! Как будто мы сидим в центре сферического ограниченного облака гамма-всплесков.

Это уже старая история, перейдем сразу к результату: большинство (которое не всегда право, но иногда бывает) исследователей постепенно, после жестоких баталий, поверило, что гамма-всплески рождаются на космологических расстояниях, за миллиарды световых лет от нас. Мы видим те всплески, которые испущены, когда Вселенная была вдвое-втрое моложе, чем сейчас. И равномерное распределение по небу (Вселенная на таких масштабах равномерна), и ограниченность по расстоянию (у Вселенной есть горизонт) при этом обеспечиваются автоматически. Но это было пока только сильное подозрение, многие астрофизики еще не верили в космологические расстояния до всплесков. Ведь если так, тогда гамма-всплески должны быть чудовищно мощными: чтобы дать такой эффект на расстоянии порядка 10 миллиардов световых лет надо излучить 10^{51} - 10^{52} эрг в гамма-квантах за считанные секунды: больше, чем при самых грандиозных взрывах, известных ранее — сверхновых, высвечивающих меньшую энергию за месяцы.

Где гром, там должна быть и молния.

Прорыв тупика произошел 28 февраля 1997 г. Небольшой и сравнительно недорогой итало-голландский спутник Верро-SAX зарегистрировал гамма-всплеск позиционно-чувствительной гамма-камерой, которая выдала его координаты с точностью 7 угловых минут. На спутнике есть другая камера, рентгеновская, которая обладает лучшим угловым разрешением (благодаря рентгеновскому зеркалу), но имеет узкое поле зрения, куда всплеск не попал. Зато Верро-SAX

умеет разворачиваться рентгеновской камерой на всплеск, что он и сделал за 8 часов. Рентгеновская камера в пределах упомянутых 7 минут зарегистрировала слабеющий источник с точностью уже в одну угловую минуту. А одна угловая минута — это достаточно точное указание для мощного телескопа, чтобы искать в этом месте нечто необычное.

Нашли слабый точечный источник света, которого раньше там не было, необычно синий. Вскоре убедились, что источник слабеет. Сомнений не осталось — это послесвечение гамма-всплеска. Источник совпадал с очень далекой галактикой.

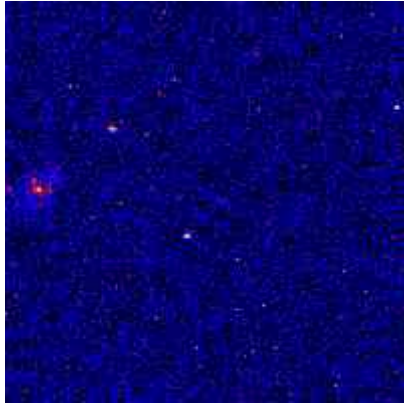


Рис.2

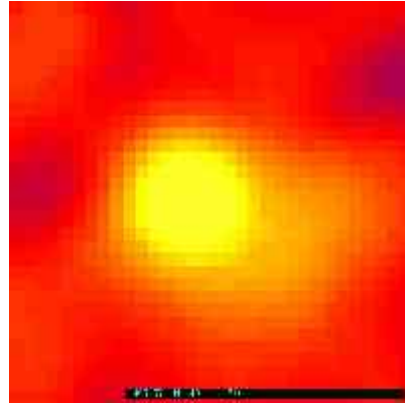
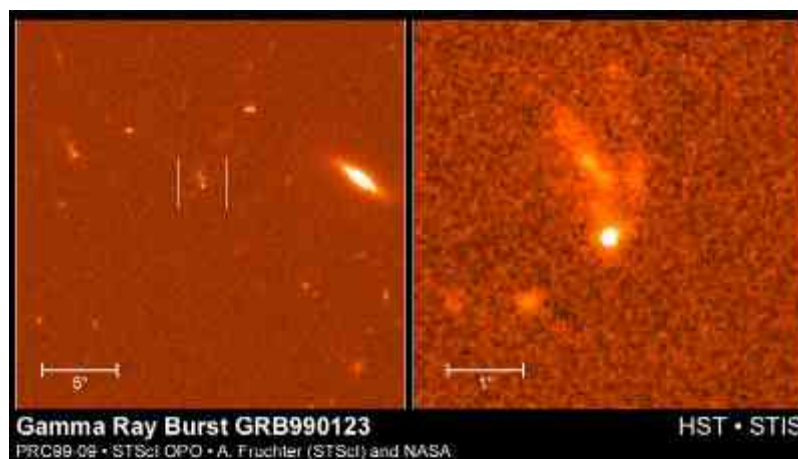


Рис.3

Первое в истории обнаруженное послесвечение всплеска от 28 февраля 1997 г. На левом снимке оно находится вблизи центра. Справа оно же крупным планом. слабое светящееся облако внизу справа — хозяйская галактика всплеска, которую он затмил своим послесвечением.

Вскоре зарегистрировали послесвечения других всплесков, для некоторых напрямую измерили красное смещение, и оно оказалось порядка $z=1$ и больше, т.е источник удаляется со скоростью, сравнимой со скоростью света, расстояние до него — миллиарды световых лет, больше полпути до горизонта Вселенной и больше половины срока ее жизни во времени.

Методика наблюдений совершенствовалась — примерные координаты всплесков стали выдавать за считанные секунды, появились небольшие телескопы-роботы, направляющиеся в нужную точку неба по команде, переданной по сети. 23 января 1999 г. такой телескоп, наведясь по координатам, переданным со спутника, увидел гамма-всплеск в оптике через 10 — 20 секунд после его начала, когда он еще продолжался в гамма-диапазоне. По дате (23 января) всплеск получил прозвище 0123. То есть это было не послесвечение, а прямое оптическое свечение - в сотни тысяч раз ярче галактик, находящихся на том же (космологическом) расстоянии. Свечение могло быть видимо с Земли в сильный бинокль и продолжалось секунд 40, как и гамма-всплеск. Послесвечение этого всплеска показано на рис.4.



Послесвечение знаменитого всплеска "0123". Слева — общий вид, справа — крупный план). Оно на 5 - 6 порядков величины слабее прямого оптического свечения, наблюдавшегося в момент всплеска и все-еще затмевает хозяйскую галактику (два слабых светящихся рукава, направленных вверх от остатка всплеска).

Сейчас количество всплесков, для которых найдено послесвечение составляет 35. Для 14 случаев непосредственно измерено красное смещение. Все они находятся на космологических расстояниях. Энергия, выделенная при гамма-всплесках колеблется от 10^{51} до 10^{54} эрг, если считать, что энергия излучена равномерно во все стороны.

Что такое 10^{54} эрг?

Идеально эффективный ядерный взрыв килограмма урана даст 10^{21} эрг, идеальный термоядерный взрыв килограмма дейтерий-тритиевой смеси в три раза больше. В этом случае выделяется от 0.1% до 0.3% от энергии массы покоя вещества (масса покоя дается знаменитой формулой $E = mc^2$). Если все Солнце (масса 10^{33} грамм) взорвется как термоядерная бомба (что бывает с некоторыми типами звезд), выделится около $3 \cdot 10^{51}$ эрг - близко к тому, что излучается при не самых сильных всплесках.

Есть более эффективный механизм звездного взрыва — гравитационный коллапс звезды в черную дыру. Теоретически — выделяемая энергия может быть сравнима с mc^2 , реально — большая ее часть уносится в черную дыру, наружу может быть выброшена энергия, эквивалентная 10% массы покоя (это довольно трудная оценка и она не точна). Для Солнца это 10^{53} эрг, для массивной звезды все 10^{54} эрг. Но куда пойдет эта энергия? В случае взрывов сверхновых большая ее часть уносится потоком труднонаблюдаемых нейтрино. А здесь мы имеем рекорд 10^{54} эрг только в гамма-квантах! Скорее всего, энергия взрыва поменьше — просто она излучается неравномерно по направлениям и иногда мы попадаем в максимальный поток, как бы в луч прожектора (а пересчет на полную энергию делается в предположении об изотропном излучении).

Важно то, что нужная энергия может быть обеспечена источником звездного происхождения. И в принципе есть мыслимые механизмы выделения подобной энергии. И даже есть явление, лишь немного уступающее гамма-всплескам по энерговыделению — взрывы сверхновых, правда эти взрывы в сотни тысяч раз растянуты относительно всплесков.

Не приведи Господь!

Возьмем умеренный случай энерговыделения 10^{52} эрг и расстояние до всплеска 3 парсека, 10 световых лет, или 10^{19} см — в таких пределах от нас находится с десяток звезд. На таком расстоянии за считанные секунды на каждом квадратном сантиметре попавшейся на пути гамма-квантов планеты выделится 10^{13} эрг. Это эквивалентно взрыву атомной бомбы на каждом гектаре неба! Атмосфера не помогает: хоть энергия высветится в ее верхних слоях, значительная часть мгновенно дойдет до поверхности в виде света. Ясно, что все живое на половине планеты будет истреблено мгновенно, на второй половине чуть позже за счет вторичных эффектов. Даже если мы возьмем в 100 раз большее расстояние (это уже толщина галактического диска и сотни тысяч звезд), эффект (по атомной бомбе на квадрат со стороной 10 км) будет тяжелейшим

ударом, и тут уже надо серьезно оценивать — что выживет и выживет ли вообще что-нибудь.

Так, каждый гамма-всплеск способен истребить жизнь в радиусе десятков, а то и сотен световых лет (если она там окажется) и нанести тяжелый удар по биосферам планет в радиусе до тысяч световых лет. К счастью, гамма-всплески достаточно редки. Число наблюдаемых (правильнее сказать — наблюдавшихся, поскольку Гамма-обсерватория Комптон, регистрировавшая 90% всплесков, уничтожена конъюнктурным решением руководства НАСА) гамма-всплесков — около трехсот в год. С поправками на неполное поле зрения, дыры в данных и малую эффективность регистрации слабых всплесков имеем 600 - 800 в год. Стараниями автора данной заметки с соавторами, нашедшими много очень слабых всплесков в архивных данных Комптоновской обсерватории, пропущенных регистрирующей электроникой, цифра возрастает до 1200 - 1300 в год, и еще минимум 2000 должны быть слабее порога регистрации (экстраполяция). Скорее всего, гамма-всплесков не меньше 10000 в год.

В видимой Вселенной около миллиарда галактик. Получается около одного всплеска в миллион лет на галактику для оценки полного числа 1000 в год и один в 100 000 лет для полного числа 10000 в год. На расстояниях порядка размеров галактики (десятки тысяч световых лет) гамма-всплеск еще безопасен. Но один из сотни или тысячи всплесков в галактике может происходить достаточно близко, чтобы представлять угрозу.

Тут самое время вспомнить о вымирании динозавров (вообще этот ход очень выигрышен в смысле public relations — динозавры популярны, в их вымирание - интригующе) — не гамма-всплеск ли тому виной? Действительно, было несколько работ на эту тему, где вышеприведенные оценки, выраженные здесь в атомных бомбах на единицу площади, делались серьезней и детальней. Получалось, что раз в несколько сот миллионов лет гамма-всплески действительно должны наносить заметный урон фауне Земли, и один из них вполне мог погубить динозавров.

Как устроить чистый взрыв

Рассуждения о катастрофичности гамма-всплесков хоть и интересны, все-таки это досужие рассуждения. С точки зрения ученого куда важнее понять, что это такое и как это происходит. Первый вопрос проще: выбирать особенно не из чего — гамма-всплеск является разновидностью катастрофического гравитационного коллапса одного или пары объектов звездного происхождения. Либо коллапс очень массивной звезды, либо слияние и совместный коллапс двух нейтронных звезд в черную дыру. В этом смысле гамма-всплеск не сильно отличается от взрыва сверхновой, тоже связанного с гравитационным коллапсом ядра звезды. Разница в последствиях — в случае сверхновой выбрасывается тяжелая оболочка вещества, которая высвечивается в течение недель и месяцев и летит медленно, 10 - 30 тыс. км/с, т.е. около 0.03 - 0.1 от скорости света. В случае гамма-всплеска нечто излучающее гамма-кванты летит практически со скоростью света.

Когда речь идет о таких скоростях, основное значение имеет Лоренц-фактор $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ — энергия тела равна энергии массы покоя, умноженной на γ , время на летящем объекте замедляется в γ раз и т.п. Довольно твердое утверждение заключается в том, что излучающая субстанция гамма-всплеска движется к нам с Лоренц-фактором не меньше 100, иначе она не смогла бы испускать гамма-кванты больших энергий. Значит, летит очень мало вещества, на 5 - 6 порядков

меньше, чем в оболочке сверхновой, иначе получится слишком большая кинетическая энергия.

В этом и есть основное отличие: взрыв сверхновой “грязный”, в него вовлечены огромные массы вещества, гамма-всплеск — чистый взрыв, вещество почти не выбрасывается, выбрасывается чистая энергия в виде магнитного поля и релятивистских частиц. Кстати, именно из-за большого Лоренц-фактора всплеск получается коротким. Ударный фронт может идти и излучать несколько дней или месяц. Но он очень мало отстает от гамма-квантов, которые сам испустил. В результате все гамма-кванты приходят к нам почти одновременно, и мы видим всплеск десятки секунд длиной (происходит сжатие времени в $1/\gamma^2$ раз) там, где излучение продолжалось дни.

Сценарии и персонажи

В кандидатах в виновники гамма-всплесков перебивало множество космических персонажей: нейтронные звезды, реликтовые черные дыры, белые карлики, красные карлики, космические струны, даже кометы — список далеко не полон.

Ныне всерьез рассматриваются только два: парные нейтронные звезды, сливающиеся в черную дыру и коллапсирующие звезды-гиганты.

Итак, подводя черту, попробуем обрисовать наиболее популярные сценарии гамма-всплеска. Причиной является катастрофа звездного масштаба: слияние пары нейтронных звезд, или коллапс ядра очень большой звезды. За миллисекунды выделяется до 10^{54} эрг, которые мы пока не видим. И в случае слияния нейтронных звезд и в случае коллапса гиганта образуется диск из сверхплотной материи радиусом порядка 10 км. Он и излучает энергию. Никто не знает сколько живет этот диск: одни исследователи за то, что он живет миллисекунды, другие за то, что он живет десятки и сотни секунд. Энергия, излученная диском, разлетается почти со скоростью света в форме частиц и магнитного поля — ультрарелятивистский файербол или струя.

Если это произошло в ядре гиганта — диск испускает вдоль оси вращения две струи энергии такой мощности, что, по уверениям Стэна Вусли (Санта-Круз) с соавторами, они за доли секунды прожигают канал сквозь тело звезды, очищая свой путь от вещества. Это получается при численном моделировании, но убедить общественность в этом непросто, поскольку задача очень сложна.

Будь то файербол или струя — в начале мы ничего не видим: плотность энергии и частиц в нем настолько велика, что излучение оказывается запертым. И только потом, когда файербол прошел световые часы, дни или даже месяцы, он как-то перерабатывает свою энергию в гамма-кванты (для нас эти дни и месяцы сжимаются в секунды, см. выше). Поток этих гамма-квантов таков, что звездная катастрофа превращается в катастрофу местного галактического масштаба, способную истребить жизнь на расстояниях до сотен световых лет.

Потом в течение многих недель мы видим последствия взаимодействия уже замедлившегося файерболо с межзвездной средой — послесвечение. Оно гораздо слабей всплеска и сравнимо с обычной сверхновой (все-же ярче).

В этом сценарии остается масса неясных вопросов. Например, как и что излучает гамма-кванты, что определяет разнообразные кривые яркости всплесков, на которые пока нет убедительных ответов. Кажется там работает какой-то сравнительно простой и красивый процесс, которого мы не понимаем.

Просветить всю Вселенную

Квазары сравнивают с маяками Вселенной. Они видны с огромных расстояний (до красного смещения $z=5$), по ним исследуют структуру и эволюцию Вселенной, определяют распределение вещества на луче зрения: сильные спектральные линии поглощения водорода разворачиваются в лес линий по красному смещению поглощающих облаков.

Прямое оптическое излучение всплеска, как в случае 0123 (см. выше), несравненно ярче любого квазара, хотя продолжается недолго. Такой всплеск, если его успеть поймать, мог бы легко быть виден с красного смещения 10 — т.е. из самой ранней Вселенной, о которой мы почти не имеем представления. По мнению Джиорговского, одного из лидеров в оптических наблюдениях послесвечений всплесков, такого события хватило бы, чтобы промерить распределение газа на луче зрения вплоть до $z=10$ — это бы сказало очень многое про эпоху образования галактик.

Так, явление остающееся загадочным, все больше приобретает значение инструмента исследования.

[Б.Штерн](#)

[На главную страницу](#)