

Санкт-Петербургский государственный университет
математико- механический факультет
кафедра астрофизики

Длинные гамма-всплески и их связь со сверхновыми звездами

Семинар
“Наблюдательные проявления звездной эволюции”

Павлова Ю. В.

591 гр.

Санкт-Петербург
30.10.2013

1 Немного истории

В 1964 году в США были запущены несколько военных спутников системы “Vela” (испанское название проекта, означает “дозор”, “вахта”) с целью контроля за ядерными испытаниями стран- противников. Идея контроля проста: ядерный взрыв на поверхности Земли или в атмосфере сопровождается коротким всплеском гамма-излучения. Если на околоземной орбите расположить несколько гамма-детекторов, то по временной задержке импульсов можно определить, где произошел взрыв. В марте 1969 года сотрудники небольшой научной группы в Лос-Аламосе, где обрабатывалась поступающая со спутников информация, обратили внимание, что пара спутников-близнецов серии “Vela-4” еще в 1967 году зарегистрировала два непродолжительных импульса гамма-излучения. Эти всплески приходили из космоса и не были связаны с ядерными испытаниями на Земле. 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)*. Запущенные в 70-е годы советские спутники “Венера-11, -12” и “Прогноз” в рамках эксперимента “Конус” фиксировали гамма- всплески почти ежедневно, причем всплески приходили с любого направления равновероятно, т. е. наблюдалось изотропное распределение на небесной сфере.

2 Большая загадка

До последнего стоял вопрос о том, чем вызваны гамма-всплески, какова их природа и причина возникновения. Дело в том, что начиная с первых регистраций всплесков не было возможности отождествить их с какими-то известными космическими объектами. Причина в крайне большой неопределенности области регистрации гамма- фотонов (так называемый бокс ошибок). Величина бокса ошибок в то время в лучшем случае составляла около одного квадратного градуса на небесной сфере. В такую площадку попадает около миллиона только одних внегалактических объектов (о внегалактической природе гамма-всплесков исследователи начали говорить почти сразу после их открытия). Тем не менее, многочисленные космические миссии позволили выявить следующие особенности всплесков:

- По продолжительности все всплески можно было разделить на короткие и длинные (в интервале $10^{-2} - 10^3$ с), причем 30% всех всплесков имели продолжительность менее 2 секунд.
- Изотропность распределения всплесков на небесной сфере.
- Сложная временная структура всплесков
- Максимально регистрируемый поток энергии всплесков у Земли составлял $10^{-7} - 10^{-3}$ эрг/см²
- Частота регистрации около 1- 2 всплеска в сутки.

Более 20 лет природа гамма-всплесков оставалась неясна: астрономы продолжали регистрировать всплески, но по-прежнему не могли отождествить их.



Рис. 1: Изотропное распределение гамма- всплесков на небесной сфере.[1]

3 Накопление статистики. Эпоха CGRO

В апреле 1991 года на орбиту была запущена гамма- обсерватория им. Комптона (CGRO), на борту которой был установлен детектор Burst and Transient Source Explorer (BATSE), предназначенный для регистрации гамма- всплесков. Этот прибор имел максимальную чувствительность в диапазоне энергий 30-500 кэВ и позволял регистрировать очень слабые потоки гамма- излучения от источников, создающих на Земле предельную освещенность около 10^{-7} эрг/см². За время работы (спутник перестал работать в 2000 году) прибор смог зарегистрировать более 2000 гамма-всплесков, правда, точность определения координат была невелика - $1^0 - 10^0$, что вновь не позволило отождествить всплески с какими-то конкретными объектами.

Но тем не менее заслуга BATSE велика: было подтверждено изотропное распределение гамма- всплесков по всей небесной сфере и установлен факт их неоднородного распределения в пространстве. Последнее заключение было сделано на основе анализа зависимости $\lg N - \lg F$, согласно которой для источников со стандартными светимостями L регистрируемый поток излучения непосредственно связан с расстоянием до источника следующим образом:

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

Если источники расположены в наблюдаемой области однородно с концентрацией n , то число всплесков с потоком $> F$ из области радиусом R равно

$$N(> F) = \frac{4\pi}{3} n R^3 = \frac{1}{6} \pi^{\frac{1}{2}} n \left(\frac{L}{F} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Поэтому, если зависимость $N(> F)$ соответствует закону “три вторых”, то это указывает на однородность пространственного распределения источников всплесков. Известно, что измеренное пространственное распределение гамма- всплесков отклоняется от этого закона и, следовательно, плотность источников неравномерна. С учетом изотропности распределения на небесной сфере последний факт говорит о внегалактической природе источников всплесков.

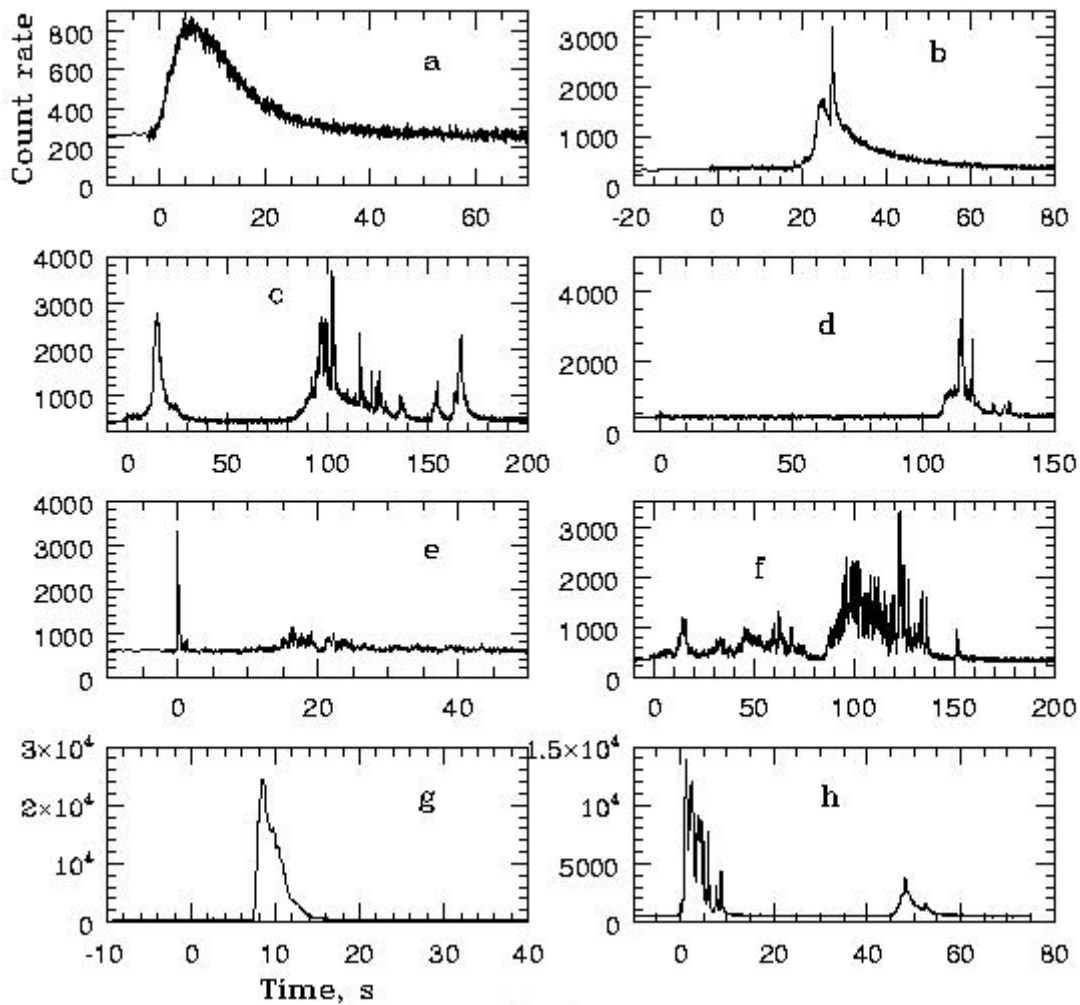


Рис. 2: Временная структура всплесков по данным BATSE.[6]

После этого от галактической модели гамма-всплесков пришлось отказаться. Астрономическое сообщество разделилось на две части: одни считали, что источники гамма-всплесков удалены на космологические расстояния и их изотропия связана с изотропией нашей Вселенной (расстояния > 100 Мпк), другие считали, что они окружают нашу Галактику, образуя своеобразную сферическую корону (< 100 кпк).

Космологическая модель предполагала светимость источников гамма-всплесков 10^{51} эрг/(см² с), что само по себе являлось невероятным! Даже у квазаров, которые считались самыми мощными источниками во Вселенной, светимость в 100 000 раз меньше! В рамках космологической модели можно было объяснить и нарушение закона “три вторых”, т. к. на больших расстояниях начинают сказываться эффекты ОТО: в кривом пространстве зависимость $\lg N - \lg P$ имеет меньший наклон, чем предполагается, даже при однородном распределении источников.

4 Открытие послесвечений. Спутник ВерроSAX

В 1997 году начала работу итало-голландская обсерватория ВерроSAX (1997-2002 гг.), на борту которой находились рентгеновские телескопы (2 широко-

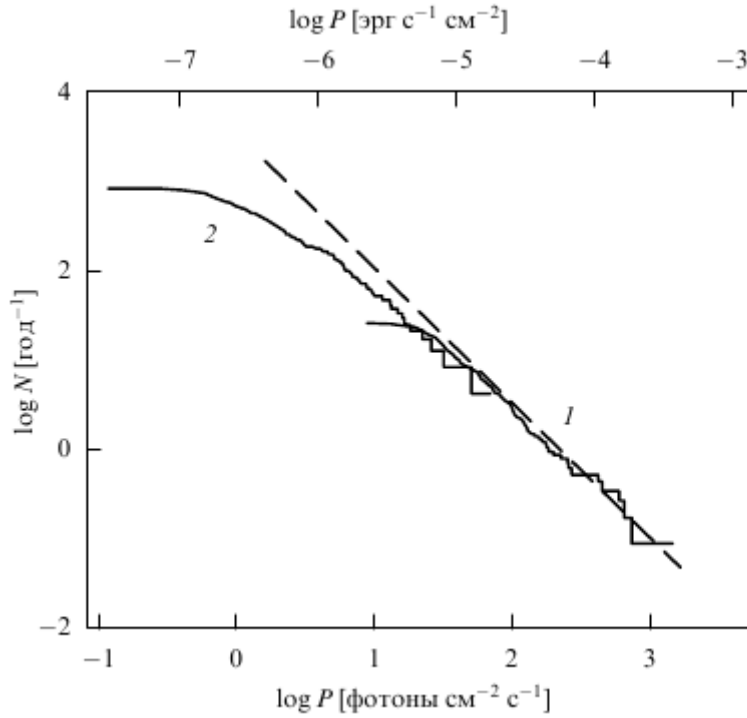


Рис. 3: Зависимость $\lg N$ - $\lg P$. [2]

1 соответствует закону “три вторых”, 2 наблюдаемому распределению GRB

угольные камеры WFC (2-30 кэВ) и узконаправленные (1 градус) спектрометры NFI LECS (0.1-10 кэВ) и MECS (2-10 кэВ) с чувствительностью по потоку 10^{-12} эрг/см² с) и монитор гамма- всплесков GRBM (40-700 кэВ). Одна из основных задач спутника состояла в локализации рентгеновского излучения от космических гамма-всплесков, поскольку через 4-6 часов после срабатывания триггера на GRBM на (плохо локализованный) гамма-всплеск наводился рентгеновский телескоп. Чувствительность рентгеновского телескопа в 60 раз выше, чем у гамма- приемника, поэтому, если после гамма- всплеска наблюдается излучение в рентгеновском диапазоне, то можно определить координаты источника с точностью до одной угловой минуты. Именно эта процедура и позволила обнаружить первые послесвечения от гамма-всплесков: 28 февраля 1997 года (GRB 970228) вспыхнул гамма- всплеск, у которого наблюдалось рентгеновское послесвечение, длившееся около суток. Была выдана ошибка положения (бокс ошибок) в несколько минут дуги, и буквально на следующий же день внутри этого бокса ошибок многие крупные оптические наземные телескопы обнаружили очень слабую звездочку, блеск которой монотонно уменьшался со временем. Необычность этого оптического транзиентного источника заключалась в его голубом цвете и законе спадания потока оптического излучения со временем как $t^{-1.1}$, который до сих пор не наблюдался ни от одного известного астрономического источника.

Более того, тщательные наблюдения, проведенные с борта космического телескопа им. Хаббла в конце марта- начале апреля, обнаружили слабое асимметричное туманное пятнышко вокруг затухающего оптического источника. Проведенные спустя полгода наблюдения подтвердили неизменность блеска этого туманного объекта (сам оптический транзиент к тому времени перестал быть видимым), подтвердив тем самым, что это далекая галактика. Если всплеск

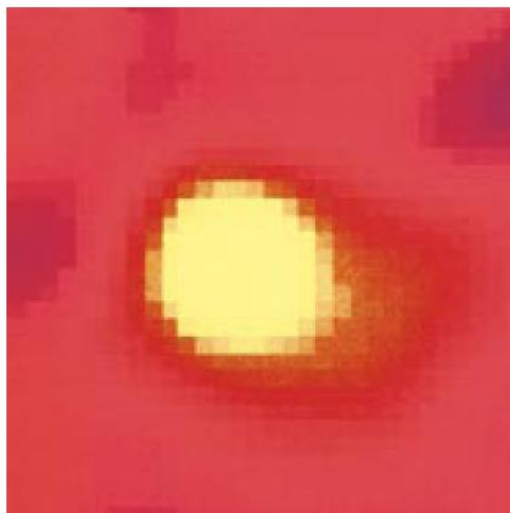


Рис. 4: Снимок GRB 970228, сделанный космическим телескопом им. Хаббла.[1]

GRB 970228 произошел именно в ней (а не явился случайной проекцией более близкого объекта на далекую галактику), то самые твердые сторонники космологической гипотезы могли торжествовать. По косвенным оценкам, красное смещение до этой галактики (напрямую не измеренное из-за ее слабости) должно было быть около 0.7.

Спутник ВерроSAX регистрировал примерно 1 гамма-всплеск в месяц, и новые сенсации не заставили себя долго ждать. В спектре оптического послесвечения от всплеска 8 мая 1997 г. были обнаружены системы линий поглощения и излучения, длина волны которых была смещена в красную сторону, указывая на красное смещение $z=0.835$. А это уже не ближний космос (расстояния порядка 1 Гпк). Причем в отличие от GRB 970228, галактики вокруг майского всплеска не было обнаружено. Зато продолжительность послесвечения оказалась рекордно долгой - около 200 дней послесвечение затухало по степенному закону, а затем спад прекратился, что было интерпретировано как выход на блеск “хозяйской галактики”, в которой произошел этот гамма-всплеск, но которую не было видно на фоне более мощного излучения от оптического послесвечения. Эта возможная галактика заведомо должна была иметь красное смещение $z > 0.835$.

Наконец, наблюдение на телескопе им. Кека “хозяйской галактики” всплеска 981214 и определение ее огромного красного смещения почти не оставили сомнения в справедливости космологической природы гамма-всплесков. Почему почти? Как признают сами авторы, вероятность случайного наложения гамма-всплесков на далекие галактики довольно высока, порядка 1%. К тому же есть некоторая вероятность ошибочного определения красного смещения. Даже если последнее верно, оно должно быть порядка 0.4. Есть и косвенные наблюдательные данные, которые делают отождествления оптических послесвечений с далекими галактиками достаточно уверенными. Речь идет о сдвиге спектра некоторых оптических послесвечений в красную область, свидетельствующем о большом поглощении оптического излучения пылью и газом (по крайней мере $R=1$ mag для 971214 и $R=5$ mag для 980329 по наблюдениям в красной области спектра). По-видимому, это поглощение света происходит вблизи места образования этого послесвечения, а значительная концентрация пыли и газа

наблюдается только в дисках галактик и особенно в местах активного звездообразования.

За 6 лет своей работы ВерроSAX открыл и локализовал десятки гамма-всплесков, для некоторых из них по оптическим послесвечениям или по изучению хозяйских галактик были определены красные смещения.

5 Эра быстрого отождествления

5.1 Спутник *HETE-2*

Со временем гамма-астрономия расширилась 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 спутник *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 2003dh, 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.

5.2 Обсерватория *Swift*

Обсерватория *Swift* была выведена на околоземную орбиту 29 ноября 2004 года. На ней установлен детектор длинноволновых гамма-квантов с энергиями 15-150 кэВ, а также телескопы - рентгеновский и оптический. Эти приборы регистрируют послесвечение гамма-всплесков 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.

5.3 Обсерватория *Fermi*

В последние годы немалый вклад в исследование гамма-всплесков внесла космическая гамма-обсерватория *Fermi*, запущенная в космос 11 июня 2008 года. Эта обсерватория оснащена приемником гамма-фотонов 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 $8.8 \cdot 10^{54}$ эрг, что соответствует полной аннигиляции примерно пяти солнечных масс.

6 Природа источников гамма- всплесков

Наблюдаемый темп регистрации гамма- всплесков и оценка максимального красного смещения соответствует темпу генерации около $R = 10^{-6}$ событий в стандартной галактике в год. При этом быстрая переменность потока всплесков соответствует пространственному масштабу энерговыделения, который меньше размеров любой звезды, кроме нейтронных звезд и черных дыр. Для объяснения их космологического происхождения необходимо предложить такие модели источников, которые могут обеспечить генерацию гамма- излучения с энергией $E = 10^{50} - 10^{51}$ эрг (при изотропном характере излучения) в течение нескольких секунд (или десятков секунд).

Отсюда следует предположение, что гамма- всплески могут быть связаны с какими-то катастрофическими событиями в эволюции релятивистских компактных объектов (нейтронных звезд или черных дыр), во время которых может быть излучена значительная доля полной энергии. Слияние двух компактных звезд (нейтронных звезд или черных дыр) безраздельно претендовало на роль источника энергии гамма-всплесков. Детали этой модели крайне плохо изучены ввиду сложности физических процессов при таком событии. Попытки рассчитать процесс слияния (даже с использованием мощнейших компьютеров) пока не привели к заметным успехам в моделировании реалистического гамма-всплеска.

В середине 1997 г. американский астрофизик польского происхождения Б. Пачиньский выдвинул альтернативную гипотезу возможного источника энергии. Важнейшее требование к моделям космологических гамма-всплесков состоит в получении в результате некоторого физического процесса оболочки с массой около $10^{-5} - 10^{-6} M_{\odot}$, расширяющейся с релятивистскими скоростями (начальный Лоренц- фактор порядка 100). Столкновение такой оболочки (за счет ударной волны) с окружающим межзвездным (межгалактическим) веществом приводит к явлению гамма-всплеска. Это т. н. модель расширяющейся релятивистской плазмы (называется также модель "огненного шара" или файерболла), рассматриваемая с конца 70-х гг. для различных астрофизических источников, в т. ч. и для гамма-всплесков. основополагающие работы были сделаны английским астрофизиком Мартином Рисом (M.Rees), американским астрофизиком Питером Месарошем (P.Meszáros) и др. Сразу после открытия первого оптического послесвечения от GRB 970228 появился поток работ, в которых это явление (степенные зависимости, вид спектра, предсказание радиоизлучения) полностью объяснялось моделью релятивистского файерболла, и в настоящее время мало у кого остались сомнения в правильности этой модели. Однако что же может вызывать релятивистское расширение оболочки? Модель Пачиньского предлагает в качестве источника энергии коллапс очень массивной звезды с образованием быстро вращающейся черной дыры.

Максимальный запас энергии вращения черной дыры с массой M $\Delta E \simeq 10^{54} (M/10M_{\odot})$ (эрг) более чем достаточен. Как известно, энергию вращения

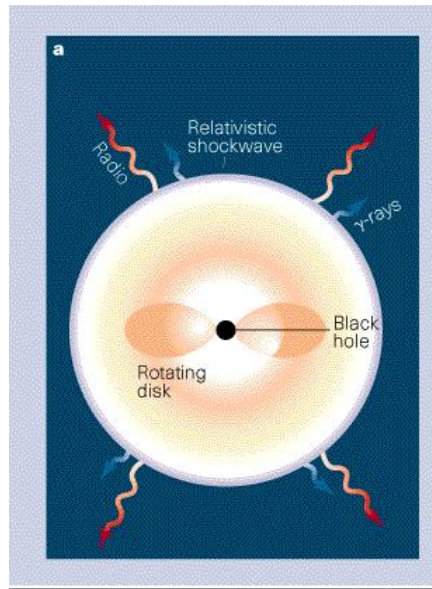


Рис. 5: Модель релятивистского файерболла.[5]

черной дыры можно извлекать, если черная дыра окружена плазмой с магнитным полем (механизм Блэндфорда-Знаека). Черная дыра обладает конечным сопротивлением около 30 Ом, поэтому если она вращается в магнитном поле, то вблизи горизонта черной дыры $R \sim GM/c^2$ может происходить энерговыделение порядка $(dE/dt)_{max} \simeq B^2 R^2 c \approx 3 \cdot 10^{51} (\text{эрг/с}) (B/10^{15})^2 Gc (M/10M_{\odot})^2$, где B - напряженность магнитного поля.

Как предлагает Пачинский, столь высокие напряженности магнитного поля возможны при коллапсе конвективного ядра массивной звезды. Для того, чтобы черная дыра обладала максимально быстрым вращением, звезда перед коллапсом должна находиться в тесной двойной системе, чтобы вращение ядра было синхронизировано с орбитальным обращением компонент действием приливных сил. Как только образуется черная дыра, она начинает “перекачивать” энергию вращения в оболочку (сам процесс перекачки предлагается связать с сильным магнитным полем), и за короткое время порядка 1- 100 с кинетическая энергия оболочки может стать очень большой, около 10^{54} эрг. Это на несколько порядков больше типичных энергий, передаваемых оболочке при вспышке сверхновой, поэтому Пачинский предложил термин “гиперновая” для такого явления. При такой энергии самые внешние слои оболочки могут ускориться до требуемых релятивистских скоростей и произвести гамма-всплеск. Следует отметить, что идея перекачки энергии вращения в оболочку с помощью магнитного поля выдвигалась еще в 1970 г. российским астрофизиком Г. С. Бисноватым-Коганом (т.н. магнито- вращательный механизм сброса оболочки сверхновой).

Поскольку время жизни массивной звезды около 1 млн. лет, такие “гиперновые” должны происходить в местах активного звездообразования. Не исключено, что большое поглощение в оптическом послесвечении некоторых гамма-всплесков подтверждает их связь с областями повышенной плотности пыли и газа, в которых идет активное звездообразование. Есть ли альтернативное объяснение столь высокому энерговыделению? Теоретически остается возможность огромного энерговыделения при слиянии двух черных дыр или пар нейтронная звезда - черная дыра. Некоторые исследователи полагают, что слияние двух нейтронных звезд менее вероятно, так как во-первых, характерное время меж-

ду образованием и слиянием такой системы из-за уноса орбитального момента импульса гравитационным излучением порядка 1 млрд. лет, а за это время система может уйти на значительные расстояния от места образования из-за высокой пространственной скорости 100- 300 км/с, приобретаемой при двух вспышках сверхновых в ходе эволюции. Во-вторых, согласно расчетам аннигиляции нейтрино- антинейтрино в электрон- позитронные пары при слиянии нейтронных звезд, ожидаемая энергия файерболла не превышает 10^{50} эрг, что недостаточно для объяснения наблюдаемой энергетике.

7 Гамма- всплески и сверхновые

Остановимся подробнее на гипотезе Б. Пачиньского о взрыве гиперновой. Есть несколько наблюдательных фактов в пользу этой теории.

В кривых блеска уже первых отождествленных оптических ореолов (послесвечений) гамма- всплесков на временах порядка несколько недель была обнаружена особенность, которая не вписывалась в рамки простой синхротронной модели излучения релятивистской ударной волны. На этих временных шкалах скорость изменения блеска оптического ореола заметно уменьшалась, т. е. наблюдалось нечто вроде плато или даже временного увеличения блеска. Ореол в это время заметно “краснел”. При нетепловом синхротронном излучении релятивистских электронов “цвет” определяется только распределением частиц по энергиям, которое носит практически универсальный характер $dN/dE \sim E^{-2.2}$ и не зависит от скорости ударной волны, поэтому на фазе торможения ударной волны в межзвездной среде “цвет” излучения не должен меняться. Эта особенность указывает на появление тепловой компоненты излучения.

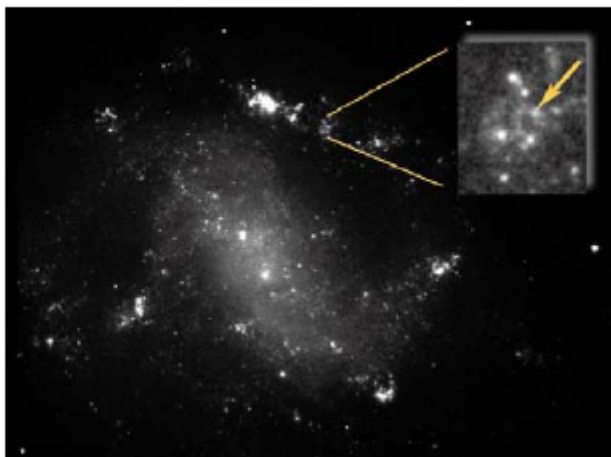


Рис. 6: Галактика ESO 184-g8, в которой произошел GRB 980425. На врезке стрелкой указано положение SN 1998bw.[3]

Примерно через год после открытия первого оптического послесвечения от GRB 980425 было зарегистрировано рентгеновское послесвечение, положение которого оказалось вблизи открытой в оптическом диапазоне сверхновой SN 1998bw в достаточно близкой галактике, находящейся на расстоянии порядка 400 Мпк (рис.6). Удивительным также оказалось и то, что время вспышки этой сверхновой, экстраполированное от максимума ее блеска, совпадало со

временем гамма-всплеска. Более того, эта сверхновая принадлежала к редкому классу сверхновых типа Ibс, которые, как полагают, являются результатом гравитационного коллапса ядер звезд типа Вольфа–Райе, которые находятся на поздних стадиях термоядерной эволюции и лишены водородной оболочки. Моделирование кривой блеска и спектров SN 1998bw привело к выводу о необычайно большой кинетической энергии оболочки сверхновой (по разным оценкам, $\sim 10^{51} - 10^{52}$ эрг), на порядок больше обычных сверхновых. Максимум оптического блеска сверхновых приходится на времена несколько недель – месяц после взрыва и связан (в сверхновых I типа) с радиоактивным распадом элементов группы железа (в первую очередь радиоактивного никеля), образовавшихся при распаде.

Эти наблюдения послужили основанием для гипотезы об ассоциации гамма-всплесков с определенным типом сверхновых, а именно наиболее энергичных сверхновых типа Ibс (гиперновых). Таких гиперновых известно не много, частота встречаемости в расчете на галактику типа Млечного Пути составляет порядка одной в 1000 лет, в то время как частота коллапсирующих сверхновых по меньшей мере на порядок выше. Но даже из известных SN Ibс только несколько процентов имели энергию, сопоставимую с энергией SN 1998bw, поэтому хорошей оценкой темпа встречаемости энергичных SN Ibс является цифра один раз в 100 000 лет.

Что до гамма-всплесков, то их наблюдаемый темп регистрации составляет порядка 1 в день или в пересчете на среднюю галактику во Вселенной около 1 в 10^7 лет. Вспоминая о коррекции темпа встречаемости за фактор направленности $\frac{2}{\theta_j^2} \sim 50 - 500$, получаем для частоты встречаемости гамма-всплесков в типичной галактике величину один раз в 10^5 лет в согласии с приведенной выше оценкой для гиперновых. Разумеется, это грубое совпадение еще ни о чем не говорит и нужны более весомые доказательства для ассоциации гамма-всплесков с коллапсом ядер массивных звезд.

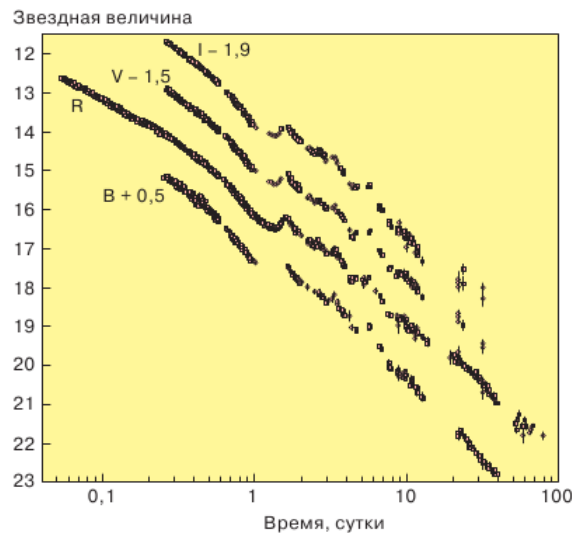


Рис. 7: Изменение блеска оптического послесвечения GRB 030329 на разных длинах волн.[3]

Самым сильным аргументом в пользу ассоциации сверхновые – гамма-всплески послужили спектроскопические наблюдения послесвечения одного из ярчай-

ших гамма-всплесков 29 марта 2003 г. Этот всплеск, произошедший на расстоянии порядка 800 мегапарсек, отличался особенным разнообразием деталей на кривой блеска оптического послесвечения (рис.7). На фоне в среднем степенного спада блеска от времени наблюдались многократные поярчения, начиная со времени в несколько дней после всплеска. Конечно, эти поярчения не могут объясняться никакими сверхновыми. Однако примерно через неделю в непрерывном спектре послесвечения стали проявляться широкие особенности, которые напоминали спектр SN 1998bw, а спадание блеска стало замедляться. Эти впечатляющие результаты у многих практически не оставили сомнения в ассоциации гамма-всплесков и гиперновых.

Список литературы

- [1] *В. М. Липунов* “Военная тайна” астрофизики.- СОЖ, 1998, №5.
- [2] *Б. И. Лучков, И. Г. Митрофанов, И. Л. Розенталь* О природе космических гамма- всплесков.- УФН, 1996, т. 166, №7, 743–762.
- [3] *К. А. Постнов* Гиперновые и гамма- всплески.- СОЖ, 2004, т. 8, №8.
- [4] *К. А. Постнов* Космические гамма- всплески.- УФН, 1999, т. 169, №5, 743-762.
- [5] *М. И. Панасюк* Странники Вселенной или эхо Большого взрыва.- “Век-2”, 2006. (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/pilgrims/cr09.htm>)
- [6] <http://www.scientific.ru/journal/burst2.html>
- [7] *К. А. Постнов* Супервсплески и гиперновые, или что же такое космические гамма- всплески. (<http://www.astronet.ru/db/msg/1171324>)
- [8] <http://www.popmech.ru/article/8605-hvostatyie-vspyishki/>