

**THE EXPERIMENTAL
METHODS
OF INVESTIGATION
OF COSMIC GAMMA-RAY
BURSTS**

V. G. KURT

Cosmic Gamma-Ray Bursts (GRB) were discovered almost twenty five years ago. The nature of GRB is still unknown till now. The amount of registered GRBs is more than 2000. However they cannot be surely identified with any astronomical objects in the whole range of electromagnetic spectrum. The experimental methods of investigation of GRBs are described and modern hypothesis of their origin are given.

Статья посвящена открытым 25 лет назад гамма-всплескам, природа которых остается непонятой до сих пор. Количество зарегистрированных всплесков превышает 2000, однако их не удается отождествить с астрономическими объектами во всем диапазоне электромагнитного спектра. В статье излагаются экспериментальные методы изучения гамма-всплесков и приводятся современные гипотезы их происхождения.

© Курт В.Г., 1998

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ
ГАММА-ВСПЛЕСКОВ**

В. Г. КУРТ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ**

25 лет тому назад американские спутники системы “ВЕЛА” обнаружили, что изредка на небе возникают короткие вспышки в рентгеновском и гамма-диапазонах (рис. 1). Спутники “ВЕЛА” были запущены на экваториальную орбиту с высотой 100 000 км и предназначались для обнаружения ядерных взрывов, проводимых в те годы в Советском Союзе, Китае и Франции, а также для контроля за ядерными испытаниями, которые могли бы проводиться другими, неядерными странами. В статье, опубликованной в 1972 году, указывалось лишь, что эти вспышки происходят не в направлении на Землю и Солнце. Более точных данных об их координатах тогда не удалось получить. Длительность всплесков находилась в пределах от 1 до 100 с. Вот, пожалуй, и все, что было получено в этом эксперименте. Как и многие другие крупные открытия, оно было сделано случайно, однако не следует забывать, что и для случайных открытий необходимы достаточно высокий уровень наблюдательной аппаратуры и внимательные наблюдатели, которые бы обратили внимание на новый вид явлений. Таким же случайным было, например, открытие английскими астрономами Джоселин Белл и Мартином Райлом радиопульсаров – быстровращающихся нейтронных звезд с сильным (вплоть до 10^{12} Э) магнитным полем.

Для того чтобы понять природу открытого феномена, необходимо было прежде всего определить координаты всплесков на небесной сфере, что могло бы дать возможность их отождествления с оптическими или другими уже известными объектами. Так астрономы поступают всегда. Подобная стратегия поиска позволила быстро отождествить рентгеновские источники с аккрецирующими нейтронными звездами или черными дырами в двойных системах, где второй компонентой является нормальная звезда – иногда голубой гигант, а иногда и звезда типа нашего Солнца. Ускоряясь в поле силы тяжести нейтронной звезды до релятивистских скоростей, падающее (аккрецирующее) вещество, вытекающее с поверхности нормальной звезды,

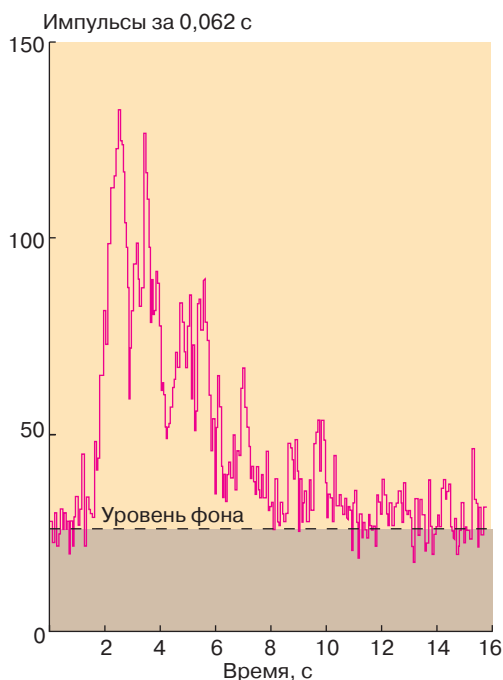


Рис. 1. Типичный космический гамма-всплеск, зарегистрированный с американского аппарата “Улисс” 3 мая 1991 года в спектральном диапазоне 30–225 кэВ. Временное разрешение 0,062 с

разогревается до температур, превышающих миллион градусов, что и обеспечивает громадную рентгеновскую светимость такого источника вплоть до миллиона раз выше светимости нашего Солнца во всем диапазоне электромагнитного спектра. Рентгеновские источники также были открыты случайно американскими физиками Бруно Росси и Риккардо Джаконни при поиске рентгеновского флуоресцентного излучения лунной поверхности, бомбардируемой космическими лучами. Вслед за открытием рентгеновских источников некоторые из них были отождествлены с переменными звездами (первым был источник Her XR-1, отождествленный с хорошо изученной переменной звездой HZ Her 12,5 звездной величины). Быстрое отождествление с оптическими объектами многих рентгеновских источников позволило понять их природу, вычислить расстояния до них, их светимость в рентгеновском и оптическом диапазонах, их массы, размеры, периоды обращения нейтронной звезды вокруг своей оси и орбитальный период обращения компонент вокруг центра тяжести системы, а в конечном счете подтвердить и существование таких фантастических объектов, как черные дыры.

Однако с гамма-всплесками все вышло по-другому. Определить их координаты на небесной сфере оказалось непросто. Всплески возникают случайно, непредсказуемо, и при той чувствительности, которая была на вооружении астрономов 25 лет тому на-

зад, один всплеск регистрировался примерно раз в три-четыре дня. Наблюдательная аппаратура должна была осматривать всю небесную сферу (4π стерадиан) 24 часа в сутки. Для решения этой задачи были применены два метода. В первом из них (рис. 2, а) использовалось несколько всенаправленных детекторов с полем зрения 2π ср, чувствительность которых зависела от угла θ между нормалью к поверхности детектора и направлением прихода всплеска (чувствительность пропорциональна косинусу этого угла). Если использовать три таких детектора (а еще лучше 6 или больше), то по соотношению сигналов от них можно вычислить направление на источник гамма-всплеска. В первых экспериментах такого типа использовались сцинтилляционные детекторы с кристаллами CsI(Tl) или NaI(Tl) диаметром 100–150 мм. Детекторы были включены 24 часа в сутки, но измеряли лишь уровень фона и его

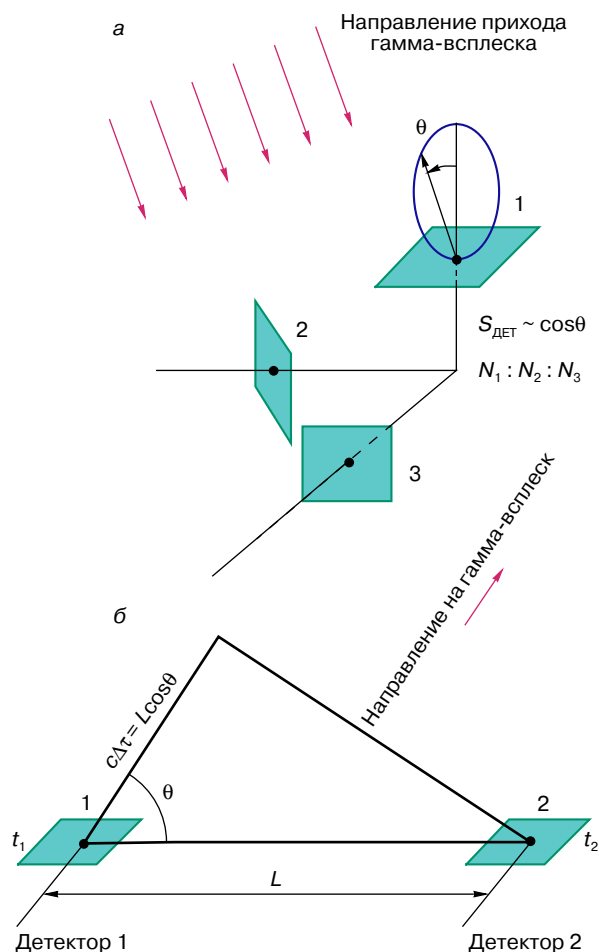


Рис. 2. Способы определения координат всплесков: а – метод, основанный на измерении отношения показаний трех детекторов, чувствительность которых пропорциональна $\cos\theta$; б – метод, основанный на измерении времени прихода сигнала на несколько разнесенных космических аппаратах

дисперсию. Данные хранились в оперативной памяти прибора 1–2 с, и если фон не превышал своего среднего уровня плюс 5–7 среднестатистических ошибок, то данные из оперативной памяти стирались. Такая кольцевая или стековая память работала в течение многих месяцев на нескольких советских, американских и французских аппаратах (“Прогноз”, “Марс”, “Венера”, “Pioneer–Venus”, ISEE-3). Если же очередное измерение (примерно один раз в секунду) показывало превышение над установленным порогом, то включалась быстрая память, которая с высоким временным разрешением (1/32, 1/64 или даже 1/128 с) записывала временной профиль всплеска в течение 16, 32 или 64 с. При этом записывалась и предпамять, то есть уровень фона за одну-две секунды до его начала. Так производится показ фрагмента футбольного матча за несколько секунд до красивого гола. Этот же детектор позволяет регистрировать и спектр всплеска, что важно для понимания физики процесса в источнике.

Для среднего по яркости всплеска точность определения координат этим методом составляет несколько градусов (от 1° до 10°). Приборы такого типа успешно применялись группой астрономов Ленинградского (ныне Санкт-Петербургского) физического института им. А.Ф. Иоффе на спутниках и автоматических станциях “Марс” и “Венера”. В последние годы свыше 2000 всплесков было исследовано подобным способом на американском спутнике GRO (Gamma Ray Observatory) им. А. Комптона в эксперименте BATSE (Burst and Transient Sources Experiment), где установлены восемь детекторов площадью 2000 см² каждый. К настоящему времени опубликованы уже четыре каталога BATSE, в которых приводятся координаты 1805 всплесков (экваториальные и галактические), время их появления, интенсивность в четырех спектральных интервалах (от 50 кэВ и до 1 мэВ), длительность, ошибки координат и другие данные.

Однако точность определения координат описанным методом невелика, что не позволяло осуществить оптическое отождествление всплесков с какими-либо известными объектами в других спектральных диапазонах.

Вскоре после открытия всплесков в Советском Союзе, США и Франции был коллективно разработан принципиально другой метод определения координат всплесков с гораздо более высокой точностью. Суть его сводится к следующему. Рассмотрим (рис. 2, б) плоский волновой фронт от гамма-всплеска, приходящий на два разнесенных в пространстве космических аппарата. Тогда время запаздывания прихода сигнала на эти аппараты $\tau = Lc\cos\theta/c$, где L – расстояние между аппаратами, θ – угол между направлением на всплеск и вектором, соединяющим оба аппарата, c – скорость света. Очевидно, что два аппарата позволяют получить лишь кольцо на небесной сфере, в пределах которого может на-

ходиться источник гамма-всплеска. Ширина этого кольца определяется ошибками измерения времени на двух аппаратах и ошибкой знания величины L :

$$\Delta\theta = \frac{c(L\Delta\tau + \tau\Delta L)}{L^2 \sin\theta} \text{ радиан.}$$

Наличие в космосе третьего аппарата позволяет построить два пересекающихся кольца, что дает возможность получить на небесной сфере двузначное положение источника всплеска. Одно из этих положений обычно легко исключить. Четвертый, пятый и т.д. аппараты могут существенно улучшить точность определения координат. Таким образом, точность определения координат этим методом обусловлена баллистическим и временным обеспечением эксперимента.

Для точного определения времени прихода на аппараты, разделенные десятками и сотнями миллионов километров, приходится, даже имея на борту кварцевые или атомные часы со стабильностью $\Delta t/t$ порядка 10^{-8} и 10^{-12} , производить сверку бортовых часов с наземным атомным стандартом времени. Эта процедура представляет значительные трудности, особенно если сравниваются стандарты времени разных стран. К настоящему времени удалось достигнуть точности порядка 3–5 мс и точности определения базы (расстояния между аппаратами) порядка 100–300 км). При таких ошибках точность локализации всплесков составляет несколько угловых минут, а для самых ярких всплесков – даже меньше одной угловой минуты. Так, например, ярчайший всплеск 5 марта 1978 года был локализован нами с помощью восьми аппаратов с точностью до 10 угловых секунд! Этот всплеск был отождествлен (единственный случай) с остатком вспышки Сверхновой звезды N 49 в Большом Магеллановом Облаке (ближайшая к нам галактика).

При такой точности возникают новые проблемы, связанные с учетом релятивистских поправок, так как измерения координат и времени производятся с движущихся аппаратов. Аналогичные проблемы существуют и для сравнения времени с наземным стандартом. Следует учесть и релятивистскую разность хода часов в точках Солнечной системы с различным потенциалом силы тяжести. Как правило, все времена на Земле и космических аппаратах приводятся к барицентрическому времени (барицентрическое время – это время, которое показывали бы часы, отнесенные на бесконечность и покоящиеся относительно барицентра, то есть центра масс, Солнечной системы). Только в этом случае поправка за влияние гравитационного поля Солнца будет сведена к нулю. В этой же барицентрической системе следует измерять и координаты всех участвующих в эксперименте аппаратов. Так что перспективно организовать специальный эксперимент на трех космических аппаратах с точностью определения координат вплоть до 1–10 угловых секунд. Межпланетные

станции для такого эксперимента должны быть оснащены атомными стандартами частоты и времени, специальной системой сравнения часов с наземным атомным стандартом с точностью не хуже 1 мс и системой определения координат аппаратов с точностью 1–10 км. Эти значения вполне реальны для техники сегодняшнего дня.

В настоящее время прорабатываются и принципиально другие методы точной локализации всплесков, основанные на использовании координатно-чувствительных детекторов с кодированной апертурой.

ЧТО МЫ ЗНАЕМ О КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКАХ

Итак, что же сегодня известно о всплесках после десятка успешных экспериментов? Для 2000 всплесков есть координаты с точностью 1° – 10° , почти для 100 – с точностью 3–30 угловых минут. Для всех 2000 всплесков имеются потоки излучения в интервале энергий 50–1000 кэВ, длительность и спектры с различным, но не очень высоким спектральным разрешением.

Начнем с пространственного распределения всплесков. Результат этого анализа крайне прост: распределение весьма изотропно, то есть не обнаружено концентрации источников к галактическому экватору, как для радиопульсаров или рентгеновских галактических источников. Не найдено концентрации ни к каким другим точкам или областям небесной сферы: к центру, антицентру или полюсам Галактики, к ближайшим галактикам Большому и Малому Магеллановым облакам, к туманности Андромеды (М31), ближайшим скоплениям галактик, сверхскоплениям и т.д. Для этого анализа использовались разнообразные и весьма изощренные методы математической статистики (рис. 3). Длительность всплесков колеблется от нескольких миллисекунд и до 100 с с двумя максимумами на 1 и 30 с. Несколько всплесков имели длительность вплоть до 1000 с (рис. 4).

Непростая ситуация складывается с распределением всплесков по их яркости (или потоку рентгеновского излучения). Для однородного распределения в пространстве источников одинаковой яркости, очевидно, будет справедливо выражение $N(S > S_0) = AS_0^{-3/2}$, где N – число источников с потоком больше S_0 . Формула очевидна, так как наблюдаемый поток обратно пропорционален квадрату расстояния до источника, а число источников пропорционально объему сферы или кубу расстояния. Для ярких источников с потоком свыше 10^{-3} – 10^{-4} эрг/см² за все время длительности всплеска в диапазоне 50–1000 кэВ зависимость $N(S_0)$ подчиняется закону $3/2$ (рис. 5), однако для более слабых всплесков (вплоть до потоков 10^{-8} эрг/см²) число наблюдаемых источников существенно ниже значения, даваемого этим

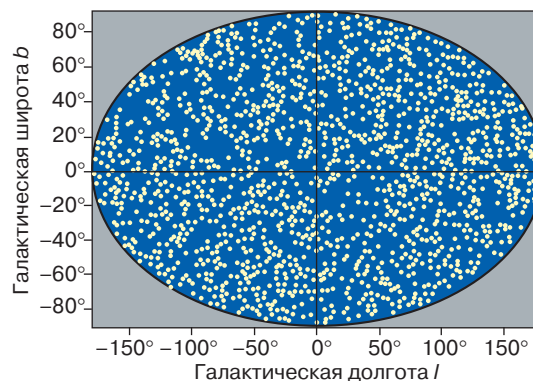


Рис. 3. Пространственное распределение в галактических координатах 1805 всплесков по данным 4-го каталога BATSE

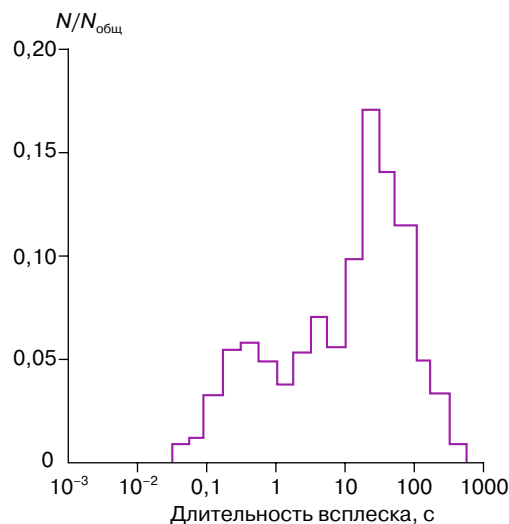


Рис. 4. Распределение длительности всплесков

законом. Столь странное поведение функции $N(S_0)$, конечно, нуждается в разумном объяснении.

Наконец, остановимся кратко на спектре гамма-всплесков. В среднем в диапазоне 50–1000 кэВ фотонный спектр неплохо аппроксимируется степенным законом $S(E)dE = AE^{-\alpha}dE$, где показатель степени α равен примерно 2. В мягкой области спектра (где энергия фотонов меньше 50–30 кэВ) значение α уменьшается от 2 до 1, в жесткой области с $E > 100$ кэВ величина α растет и спектр становится круче. Однако это верно лишь в среднем. Наблюдаются спектры и совсем пологие, и более крутые, и даже с изломом, не описываемые простым степенным законом с одним значением α . Не решен вопрос и о наличии линий в рентгеновском спектре. На раннем этапе наблюдений, когда число спектральных каналов детекторов было невелико (8–16), некоторые авторы наблюдали линии в диапазоне

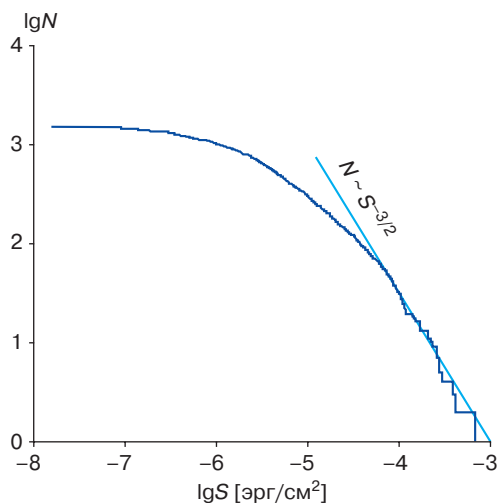


Рис. 5. Функция распределения вспышек (по данным 4-го каталога BATSE) по их потоку ($\lg N - \lg S$). S – регистрируемый поток

десятков и сотен килоэлектронвольт как в эмиссии, так и в поглощении. Эти линии интерпретировались как результат красного смещения, вызванного или космологическим расширением, или гравитационным красным смещением аннигиляционной линии ($e^- + e^+ = 2\gamma$) с энергией 512 кэВ. Линии с энергией ниже 100 кэВ приписывались гиролиниям излучения электронов при переходах между уровнями Ландау (уровни энергии вращения электрона вокруг силовой линии магнитного поля) при магнитных полях нейтронных звезд вплоть до величин 10^{12} Э. Однако при последних измерениях со спутника GRO в эксперименте BATSE, где используется спектрометр высокого разрешения с 256 спектральными каналами, не удалось надежно обнаружить линии ни в эмиссии, ни в поглощении. Все наблюдаемые линии были, по-видимому, результатом взаимодействия заряженных частиц космических лучей с веществом аппарата и прибора. Похоже, что авторы прежних работ принимали “стук своего сердца за топот копыт коня ожидаемого друга”, так что вопрос наличия или отсутствия линий остается пока открытым.

Вот, пожалуй, и все экспериментальные данные, накопленные к сегодняшнему дню. Остановимся теперь на последних сенсационных результатах, полученных весной и летом 1997 года на итальянском спутнике VERPO SAX. В этом эксперименте впервые удалось для двух вспышек получить точные координаты (с ошибкой меньше нескольких угловых минут) и рентгеновские положения со сдвигом в 8 ч после регистрации гамма-всплеска. При этом в области локализации на нескольких наземных телескопах были обнаружены очень слабые оптические и рентгеновские переменные источники слабее 21 видимой звездной величины. Практически все

участники этого эксперимента склоняются в пользу внегалактической природы наблюдавшихся оптических объектов.

МОЖНО ЛИ РЕШИТЬ ПРОБЛЕМУ ПРОИСХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ?

В чем причина столь плачевного состояния вопроса о природе космических гамма-всплесков? Прежде всего в отсутствии точных, “секундных” координат. Наша наблюдательная группа из Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН и Специальной астрофизической обсерватории РАН в станции Зеленчукской на Северном Кавказе (В.В. Соколов, С.А. Жариков, А.И. Копылов, А.В. Березин и автор этой статьи) использовали шестиметровый оптический телескоп БТА с чувствительной ПЗС-матрицей (координатно-чувствительным детектором на базе прибора с зарядовой связью) для изучения нескольких областей локализации вспышек. При этом была достигнута рекордная чувствительность – 27 зв.вел. В пределах прямоугольника с размерами $0,5 \times 2,5$ было измерено около 400 объектов. Практически все они являются внегалактическими: галактиками или квазарами. Придерживаясь локальной теории происхождения вспышек и полагая, что источниками гамма-всплесков являются близкие нейтронные звезды, мы искали, согласно предсказаниям теоретиков, голубые объекты с температурой порядка нескольких сот тысяч градусов. Выбрать конкретный объект мы так и не смогли. Все другие наблюдательные группы также не смогли найти оптические кандидаты для гамма-всплесков. Однако поиски проводились через десятки лет после наблюдений вспышек в рентгеновском и гамма-диапазонах. Только в эксперименте VERPO SAX удалось получить оптические изображения через несколько часов после вспышки в рентгеновском и гамма-диапазонах. Отсюда следует, что необходимо получать координаты вспышки с точностью в несколько угловых секунд и желательно как можно быстрее, с задержкой не более нескольких часов после его обнаружения в гамма-диапазоне. Наши наблюдения обычных радиопульсаров, проводившиеся также на шестиметровом телескопе БТА вместе с наблюдениями на космическом телескопе им. Э. Хаббла (HST), показали, что оптическое излучение нейтронных звезд может не описываться законом излучения абсолютно черного тела и соответственно не быть голубым.

ТРИ ГИПОТЕЗЫ О ПРИРОДЕ ВСПЛЕСКОВ

Какие же возможности остаются для объяснения этого странного феномена? Изотропное распределение на небесной сфере оставляет нам три возможности.

- Локальная теория, объясняющая происхождение всплесков близкими объектами с расстояниями меньше толщины галактического диска, то есть ближе 100–200 пк (1 пк (парсек) = 3,2 светового года = $3 \cdot 10^{18}$ см). В этом случае светимость потенциальных источников остается в допустимых пределах, то есть меньше 10^{37} эрг. Вероятнее всего, что в этом случае источники всплесков – старые одиночные нейтронные звезды, практически не излучающие в оптическом диапазоне вне времени всплеска.

- Внегалактическая теория, согласно которой всплески расположены на громадных космологических расстояниях с красным смещением $z > 1$. Эта идея была выдвинута несколько лет тому назад Богданом Пачинским (США) и нашла много сторонников. При таких расстояниях светимость источников всплесков превышает 10^{52} эрг, что соответствует аннигиляции за 1–10 секунд 0,01 массы Солнца. Пачинский предложил и физический механизм для объяснения такой светимости – слияние двух нейтронных звезд в тесной двойной системе. Такие пары теряют вращательный момент за счет излучения гравитационных волн. В нашей Галактике уже найдены шесть таких пар с периодами орбитального вращения менее нескольких часов. Физические (ядерные) аспекты такого процесса до сих пор не выяснены. Если это так, то необходимо искать в местах расположения всплесков слабые родительские галактики, в которых и произошло такое редкое событие. По оценкам теоретиков, в галактиках типа нашей оно может происходить раз за 10^5 – 10^7 лет.

- Промежуточная теория – гало вокруг ядра нашей Галактики с характерным размером около 100–200 кпк. Параметры такой модели довольно сильно ограничены: надо, чтобы не сказывалась концентрация источников к ядру Галактики и чтобы не были видны всплески от туманности Андромеды (что делать с Большим и Малым Магеллановыми облаками, вообще не ясно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как же решить эту проблему? Кажется, что эксперименты типа GRO BATSE себя исчерпали. Дальнейшее накопление подобного материала вряд ли принесет успех. Следует направить усилия экспериментаторов на определение координат хотя бы самых

ярких всплесков с точностью 1–10 угловых секунд. Как это сделать, описано выше. Другое направление поиска – определение расстояния до источников всплесков путем измерения поглощения мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 0,1–2 кэВ на нейтральном газе в Галактике, распределение которого хорошо изучено по радиоастрономическим наблюдениям в линии атомарного водорода с длиной волны 21 см. Третий, ключевой эксперимент – длительный мониторинг с высокой чувствительностью (не хуже 10^{-9} эрг/см²) области туманности Андромеды с целью обнаружения слабых всплесков, возникающих в этой галактике, весьма похожей на нашу Галактику. Это даст возможность принять или отбросить галактическую гипотезу происхождения всплесков. Вряд ли астрономическое сообщество будет долго терпеть столь смелый вызов Природы! Решение проблемы космических гамма-всплесков должно быть найдено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курт В.Г. Космические гамма-всплески – призраки современной астрофизики // Природа. 1997. № 4. С. 74–81.
2. Курт В.Г. Гамма-всплески // Земля и Вселенная. 1993. № 2. С. 3–10.
3. Гнедин Ю.Н. Небо в рентгеновских и гамма-лучах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 74–79.
4. Черпацук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах // Соросовский Образовательный Журнал. № 3. С. 87–93.

* * *

Владимир Гдалевич Курт, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии астрономического отделения физического факультета Московского университета, зам. директора Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Лауреат Государственной премии СССР, лауреат Ломоносовской премии МГУ, действительный член Международной академии астронавтики. Область научных интересов: ультрафиолетовая и рентгеновская астрономия, космические исследования. Автор свыше 180 статей и двух открытий.