

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Космические гамма-всплески и мягкие гамма-репитеры — наблюдения и моделирование экстремальных астрофизических процессов

(к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН)

Р.Л. Аптекарь, А.М. Быков, С.В. Голенецкий, Д.Д. Фредерикс,
Д.С. Свинкин, М.В. Уланов, А.Е. Цветкова, А.В. Козлова, А.Л. Лысенко

Гамма-всплески и гамма-репитеры (повторные мягкие гамма-всплески) являются наиболее яркими источниками космического гамма-излучения. Физические процессы, приводящие к огромным светимостям космических гамма-источников, представляют фундаментальный интерес, поскольку позволяют изучать явления в окрестности чёрных дыр звёздных масс и нейтронных звёзд с магнитными полями, вероятно, выше критических квантово-электродинамических значений, необходимых для поляризации вакуума. Это делает возможным изучение физических процессов в условиях, недостижимых в физических лабораториях. Высокая светимость гамма-всплесков позволяет наблюдать их на космологических расстояниях и изучать процессы образования первых звёзд, а также свойства материи на луче зрения. Приводится краткий обзор результатов современных всеволновых исследований космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров. Описывается история развития, основные результаты и перспективы исследований космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров — актуального направления фундаментальных космических исследований в Физико-техническом институте (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе РАН. Детально представлены результаты, полученные в экспериментах с детекторами КОНУС нескольких поколений, разработанных и успешно реализованных в ФТИ. Наблюдательные данные, полученные в космических экспериментах, эффективно дополняются результатами моделирования астрофизических источников с экстремальным выделением энергии. Обсуждаются перспективы исследования гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров, включая эксперименты, планируемые в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Ключевые слова: космические гамма-всплески, гамма-репитеры, временные профили всплесков, энергетические спектры всплесков

PACS numbers: 95.55.Ka, 97.80.Gm, 98.70.Rz

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.11.038488>

Содержание

1. Открытие космических гамма-всплесков на американских спутниках "Вела". Первые всесторонние исследования нового явления в экспериментах КОНУС на межпланетных станциях "Венера 11–14". Эксперимент BATSE. Эксперимент КОНУС–ВИНД (785).
2. Мягкие гамма-репитеры (787).
3. Современные всеволновые исследования космических гамма-всплесков (790).
 - 3.1. Многоволновые наблюдения и космологическая эпоха в исследованиях гамма-всплесков.
 - 3.2. Классификация гамма-

Р.Л. Аптекарь*, А.М. Быков, С.В. Голенецкий,
Д.Д. Фредерикс, Д.С. Свинкин, М.В. Уланов,
А.Е. Цветкова, А.В. Козлова, А.Л. Лысенко
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая 26, 194021 С.-Петербург, Российская Федерация
E-mail: *aptkar@mail.ioffe.ru

Статья поступила 23 августа 2018 г.,
после доработки 23 ноября 2018 г.

всплесков.
3.3. Красные смещения и энергетика гамма-всплесков.
3.4. Длинные гамма-всплески и сверхновые.
3.5. Гамма-всплески, космология и фундаментальная физика.
3.6. Короткие гамма-всплески и гравитационные волны.
4. Моделирование астрофизических процессов с экстремальными по энергетике потоками электромагнитного излучения (797).
5. Перспективы исследования гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров (798).
Список литературы (800).

1. Открытие космических гамма-всплесков на американских спутниках "Вела". Первые всесторонние исследования нового явления в экспериментах КОНУС на межпланетных станциях "Венера 11–14". Эксперимент BATSE. Эксперимент КОНУС–ВИНД

Космические гамма-всплески были открыты на американских спутниках "Вела", которые запускались на орбиты, удалённые от Земли на расстояния около

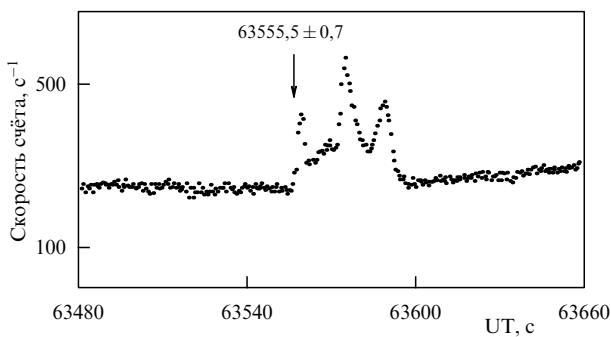


Рис. 1. Одно из первых независимых подтверждений открытия космических гамма-всплесков по данным наблюдений GRB 720117 аппаратурой ФТИ им. А.Ф. Иоффе на ИСЗ "Космос-461".

100 тыс. км. Спутники содержали в своём составе несложные по устройству детекторы гамма-излучения и предназначались для контроля за соблюдением Соглашения о запрете испытаний ядерного оружия в трёх средах. С помощью таких аппаратов триангуляционным методом, использующим разницу времени прихода излучения в разные точки пространства, можно было определять координаты источников рентгеновского и гамма-излучения. Наблюдения со спутников "Вела" продолжались с середины 1960-х и до конца 1970-х годов. Случаев нарушения со стороны стран, подписавших Соглашение о запрете испытаний ядерного оружия, зафиксировано не было, но к началу 1970-х годов у разработчиков аппаратуры спутников "Вела" накопилось несколько десятков событий, связанных с непонятными вспышками рентгеновского и гамма-излучения, источники которых находились далеко от Земли в межзвёздном пространстве. Список из двух десятков таких событий был опубликован руководителем разработки аппаратуры спутников "Вела" Р. Клебесаделем [1], и это послужило началом исследований нового астрофизического явления, получившего название космических гамма-всплесков.

С середины 1960-х годов в Физико-техническом институте (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе на малых космических аппаратах (КА) серии "Космос" проводились исследования потоков гамма-излучения с энергией 30 кэВ–4,1 МэВ и их вариаций на околоземных орbitах. Эти исследования были инициированы академиком Б.П. Константиновым. Был разработан и изготовлен сцинтилляционный гамма-спектрометр, снабжённый многоканальным амплитудным анализатором с блоком оперативной памяти на ультразвуковой линии задержки [2]. Это был один из первых в мире многоканальных амплитудных анализаторов с внутренней оперативной памятью, применённый на космическом аппарате. Он позволял регистрировать с необходимой детальностью временные профили и энергетические спектры гамма-излучения. В экспериментах на спутниках "Космос-135", "Космос-163" и "Космос-461" были подробно изучены фоновые эффекты, сопровождающие измерения космического гамма-излучения с энергией 30 кэВ–4,1 МэВ на околоземных орбитах, и разработан оригинальный метод выделения космической компоненты излучения с использованием геомагнитных зависимостей. В этих исследованиях были впервые детально исследованы интенсивность и спектр диффузного космического фонового излучения с энергией 30 кэВ–4,1 МэВ, установлена высокая степень изо-

тропии этого излучения и тем самым его внегалактическая природа. Была получена независимая и более точная оценка спектра диффузного гамма-излучения и уточнена форма его спектра [3, 4]. Эти результаты показали ошибочность данных, полученных ранее на американском спутнике ERS-18, и вынудили американских исследователей пересмотреть свои результаты по диффузному фоновому гамма-излучению, полученные в ходе выполнения программы "Аполлон".

В составе аппаратуры спутника "Космос-461" имелся интенсиметр с временным разрешением на уровне долей секунды. Именно с его помощью было получено одно из первых независимых подтверждений открытия космических гамма-всплесков на американских спутниках "Вела". Гамма-всплеск из перечня событий, зарегистрированных на спутниках "Вела" на удалённых от Земли орбитах, был зарегистрирован интенсиметром на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) "Космос-461" (рис. 1) [5]. На основании этого результата ФТИ им. А.Ф. Иоффе получил возможность подготовить и провести собственные эксперименты по исследованию этого нового астрофизического явления на автоматических межпланетных станциях (АМС) "Венера 11–14" в 1978–1983 гг. Руководителем этих работ являлся Е.П. Мазец.

Для исследований на станциях "Венера" была разработана и изготовлена оригинальная высокочувствительная и высоконформативная научная аппаратура КОНУС (рис. 2) [6, 7]. Аппаратура каждого КА содержала в своём составе детекторную систему из шести сцинтилляционных детекторов диаметром 80 мм и толщиной 30 мм с анизотропной диаграммой угловой чувствительности, позволяющей автономно определять направление на источник гамма-всплеска. Детекторы были размещены вдоль положительных и отрицательных направлений осей космических аппаратов (рис. 2а). Каждый детектор был снабжён системой детального временного и амплитудного анализа гамма-излучения всплесков (рис. 2б). Кроме того, по просьбе ФТИ им. А.Ф. Иоффе станции разводились друг от друга на расстояния в несколько десятков миллионов километров, что позволяло с высокой точностью локализовать источники гамма-всплесков триангуляционным методом, предоставляя дополнительный независимый способ определения координат источников всплесков. Из наиболее важных наблюдательных свойств гамма-всплесков, открытых в экспериментах КОНУС на станциях "Венера 11–14", следует отметить бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности, указывающее на разную физическую природу их источников (так называемые "короткие" и "длинные" всплески, рис. 3а) [8]. Второй важный результат состоит в том, что по данным наблюдений на станциях "Венера 11–14" впервые было показано, что источники гамма-всплесков распределены равномерно по небесной сфере (рис. 3б) [8], а это свидетельствует в пользу их внегалактического происхождения. Ещё одно важное свойство гамма-всплесков, установленное в ходе экспериментов КОНУС, — корреляция между интенсивностью детектируемого в ходе события гамма-излучения и жёсткостью его спектра [9]. В научной литературе это соотношение получило название "соотношение Голенецкого".

В 1990-е годы указанные результаты были подтверждены данными эксперимента BATSE (Burst And Transient

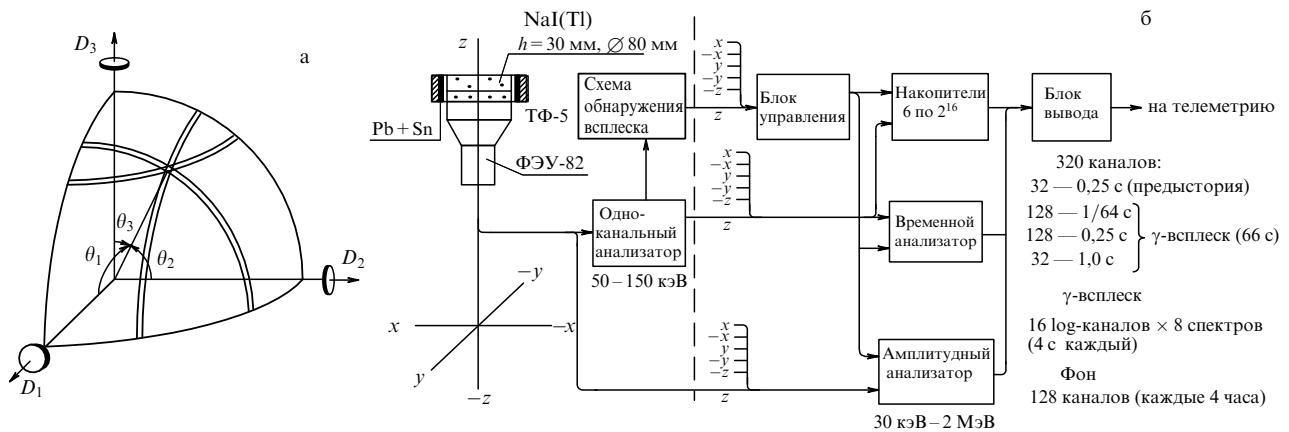


Рис. 2. Научная аппаратура КОНУС для изучения космических гамма-всплесков на АМС "Венера 11–14": (а) схема размещения детекторов аппаратурой вдоль осей космических межпланетных станций "Венера 11–14"; (б) схема обеспечения временного и спектрального анализа детекторов гамма-излучения станций "Венера 11–14".

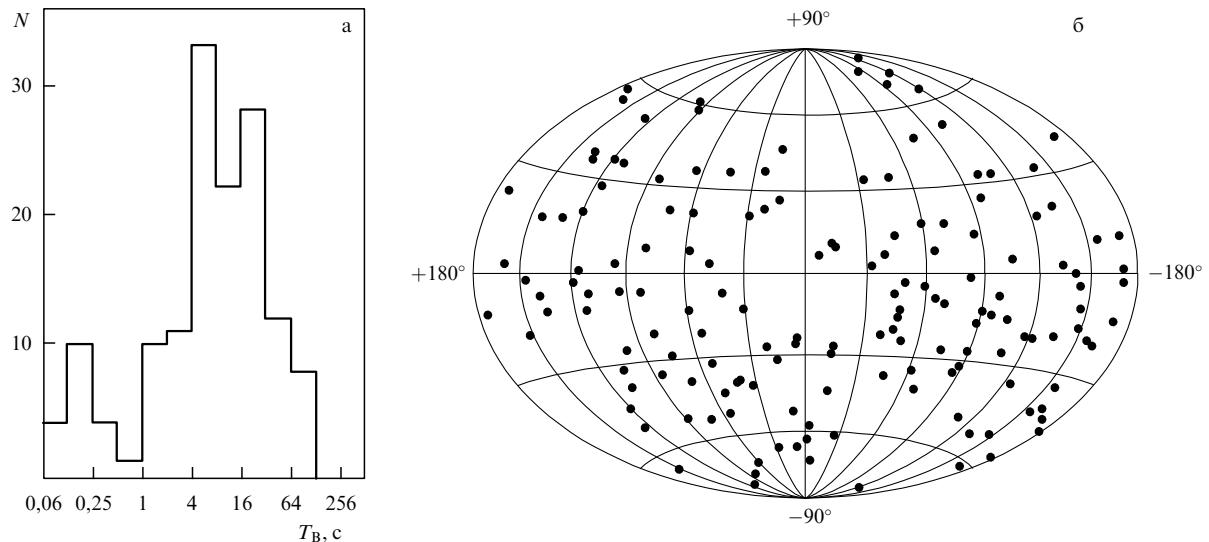


Рис. 3. Ключевые результаты экспериментов КОНУС на АМС "Венера 11–14": (а) бимодальное распределение гамма-всплесков по длительности; (б) изотропия распределения источников гамма-всплесков по небесной сфере. \$T_B\$ — длительность всплеска, \$N\$ — число событий.

Source Experiment) на борту космической обсерватории им. А. Комптона (CGRO, Compton Gamma Ray Observatory). Благодаря BATSE было установлено, что типичный спектр коротких гамма-всплесков является более жёстким, чем спектр длинных гамма-всплесков [10]. Кроме того, широкий спектральный диапазон BATSE (~ 20 – 2000 кэВ) позволил установить, что спектр значительной части гамма-всплесков имеет существенно нетепловой характер и хорошо описывается двухстепенной эмпирической функцией Банда [11] с изломом, параметризуемым через энергию максимума vF_v -спектра (E_p), с типичными значениями E_p в диапазоне ~ 100 – 1000 кэВ.

Эксперименты КОНУС лаборатории экспериментальной астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе получили своё продолжение в международном эксперименте КОНУС–ВИНД [12], который проводится с ноября 1994 г. на борту американской космической обсерватории GGS Wind (NASA, США). На протяжении более 25 лет КОНУС–ВИНД играет важную роль в исследовании гамма-всплесков благодаря своим уникальным характеристикам (рис. 4). Положение космического аппарата вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце–Земля

обеспечивает стабильный фон излучения и непрерывный обзор всего неба двумя детекторами NaI(Tl) в широком диапазоне энергий (~ 10 кэВ– 10 МэВ) и с высоким, до 2 мс, временным разрешением. К середине 2018 г. КОНУС–ВИНД зарегистрировал в триггерном режиме ~ 4600 транзиентных событий, в том числе ~ 3000 гамма-всплесков, ~ 260 вспышек мягких гамма-репитеров и более 1000 солнечных вспышек.

2. Мягкие гамма-репитеры

Уникальным видом транзиентов в жёстком рентгеновском диапазоне, тесно связанных с гамма-всплесками, являются источники повторных всплесков (мягкие гамма-репитеры, soft gamma-repeaters, SGPs). Открытие этого класса транзиентов — фундаментальный результат экспериментов КОНУС на АМС "Венера 11–14", в которых зарегистрирован необычный исключительно интенсивный гамма-всплеск 5 марта 1979 г. Хотя всплеск был зарегистрирован гамма-детекторами на девяти космических аппаратах [13–16], наиболее детально кривая блеска этого события была измерена только

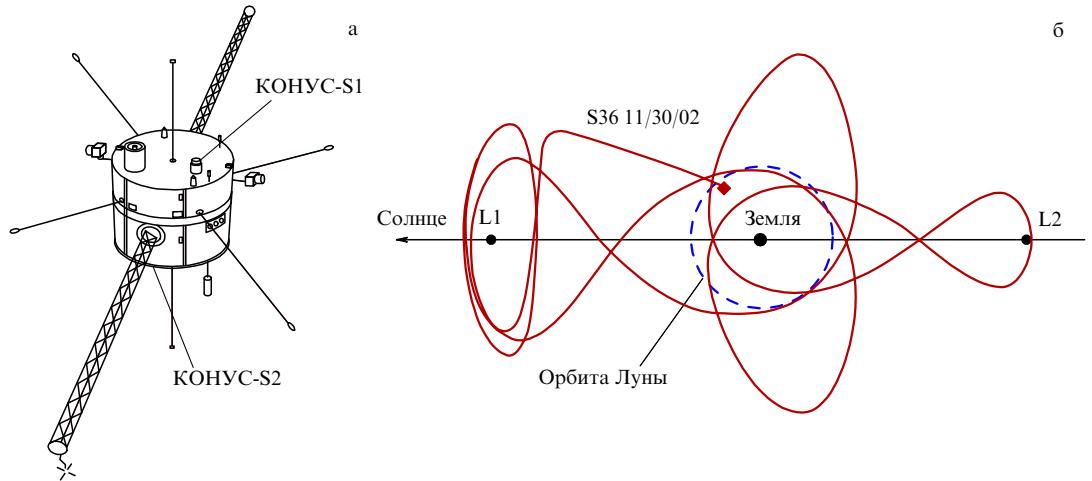


Рис. 4. Американский космический аппарат "Винд" с детекторами КОНУС (а) и схематическое изображение его орбиты в межпланетном пространстве (б).

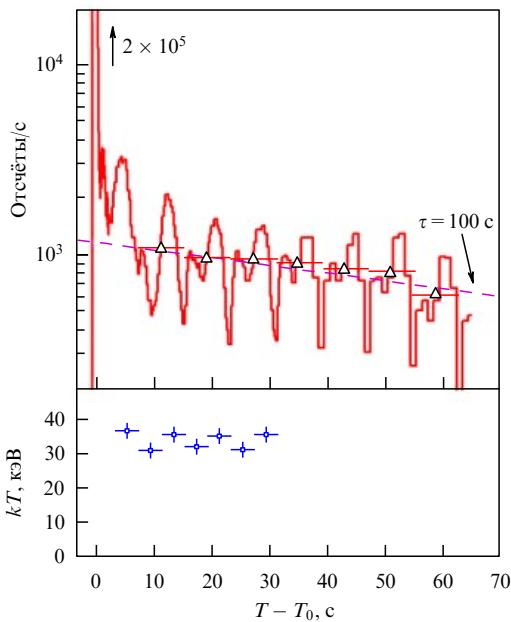


Рис. 5. Открытие мягких гамма-репитеров в экспериментах КОНУС на АМС "Венера 11–14". Событие 5 марта 1979 г. — первое наблюдение гигантской вспышки от SGR 0526–66.

детекторами КОНУС на автоматических межпланетных станциях "Венера 11, 12". Она представляла собой интенсивный начальный импульс, переходящий в мягкий пульсирующий (с периодом ~ 8 с) длинный "хвост" (рис. 5), который наблюдался только прибором КОНУС благодаря низкой границе его энергетического диапазона. Спектр пульсирующего излучения хорошо описывался моделью тормозного излучения оптически тонкой плазмы (optically thin thermal bremsstrahlung, OTTB) с температурой ~ 30 кэВ. Стоит отметить, что в эксперименте Снег-2 было зарегистрировано только несколько периодов пульсаций [17]. На следующий день, 6 марта 1979 г., от этого же источника были зарегистрированы два повторных гамма-всплеска. Положение источников зарегистрированных всплесков, определённое триангуляционным методом, накладывалось на положение остатка сверхновой N49 в Большом Магеллановом

Облаке на расстоянии 55 кпк, что впервые указало на возможную связь источников повторяющихся всплесков и нейтронных звёзд. Источник всплесков был впоследствии назван SGR 0526–66. В том же 1979 г. в эксперименте КОНУС был открыт ещё один гамма-репитер, получивший обозначение SGR 1900+14 [18].

В конце 1980-х годов был открыт третий на тот момент источник повторных всплесков SGR 1806–20, находящийся в районе галактического балджа [19]. Падающая часть наблюдаемых повторных всплесков имела длительность менее 1 с и более мягкий по сравнению с неповторяющимися гамма-всплесками спектр. На основе этого было высказано предположение [20], что известные источники повторных всплесков имеют отличную от обычных гамма-всплесков природу и, вероятнее всего, связаны с нейтронными звёздами.

К настоящему времени известно более 20 мягких гамма-репитеров, большая часть из которых ассоциирована с медленно вращающимися (период $P \sim 2–12$ с) быстро замедляющимися ($\dot{P} \sim 10^{-13}–10^{-10}$ с $^{-1}$) изолированными нейтронными звёздами. Оценки дипольной компоненты магнитного поля, полученные из скорости замедления, составляют $10^{13}–10^{15}$ Гс, что на несколько порядков выше, чем у радиопульсаров. Класс магнитаров объединяет как источники повторных всплесков, так и пульсары с аномально высокой рентгеновской светимостью (Anomalous X-ray Pulsar, AXp) [21, 22]. Для этих объектов характерна высокая светимость в рентгеновском диапазоне (< 10 кэВ) $\sim 10^{34}–10^{35}$ эрг с $^{-1}$, превышающая потери энергии вращения нейтронной звезды, оцениваемые по магнито-дипольной формуле, при этом для SGR характерно возрастание рентгеновского потока до нескольких порядков в стадии вспышечной активности [23]. Считается, что как постоянное мягкое рентгеновское излучение, так и вспышечная активность в жёстком рентгене связаны с диссипацией энергии, запасённой в магнитном поле нейтронной звезды (tokах, поддерживающих это поле).

Мягкие гамма-репитеры проявляют два типа активности в жёстком рентгеновском диапазоне (10–1000 кэВ). Во время периода активности SGR испускают короткие (0,001–1 с) жёсткие рентгеновские всплески с пиковой светимостью $10^{38}–10^{42}$ эрг с $^{-1}$. Фаза активности может

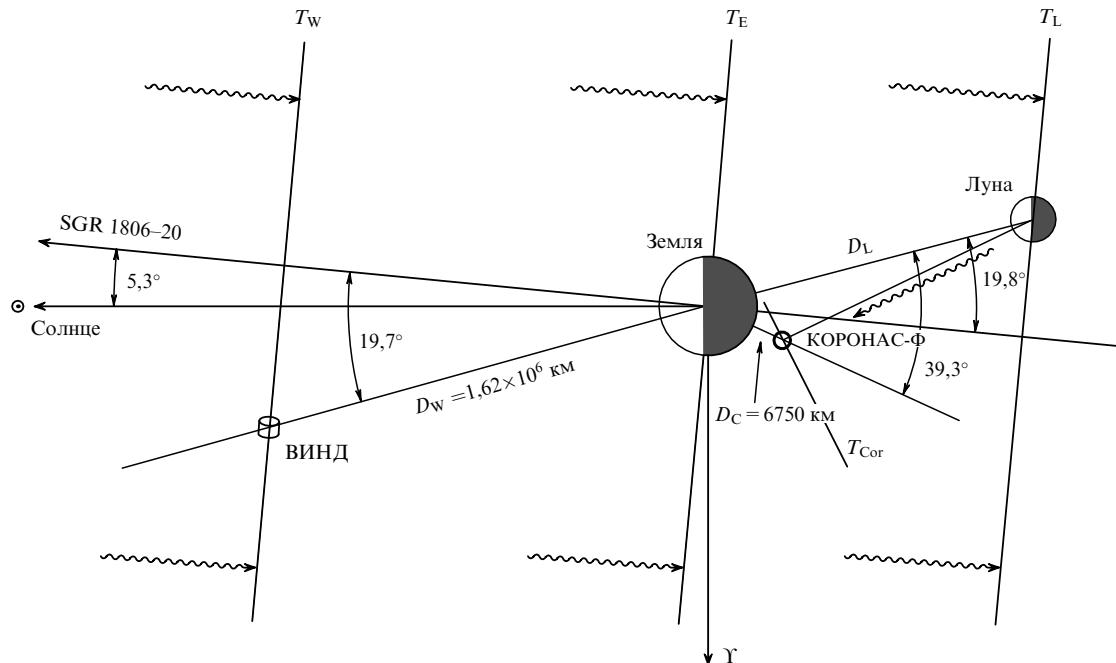


Рис. 6. Схема наблюдений гигантской вспышки гамма-репитера SGR 1806–20 27 декабря 2004 г. Отражённый от Луны и многократно ослабленный начальный импульс события был зарегистрирован детектором ГЕЛИКОН на ИСЗ КОРОНАС-Ф.

длиться от нескольких дней до года, после чего наступает длительная фаза затишья. Значительно реже, возможно, один раз за время нахождения нейтронной звезды в стадии SGR, на магнитарах могут происходить гигантские вспышки, во время которых высвобождается значительная энергия $(0,01-1) \times 10^{46}$ эрг [23]. К настоящему времени гигантские вспышки наблюдались только у трёх источников: SGR 0526–66 в Большом Магеллановом Облаке, SGR 1900+14 и SGR 1806–20 в нашей Галактике. Все эти вспышки были детально изучены в экспериментах КОНУС [13, 24, 25].

Уникальные данные, позволяющие точно оценить энерговыделение в начальном импульсе гигантской вспышки SGR 1806–20, которая произошла 27 декабря 2004 г., были получены в экспериментах КОНУС–ВИНД и ГЕЛИКОН ФТИ им. А.Ф. Иоффе [25]. Потоки излучения в начальных импульсах гигантских вспышек столь велики, что сцинтилляционные детекторы гамма-излучения на космических аппаратах входят в режим насыщения и измерения с их помощью становятся невозможными. Именно так и произошло с детекторами КОНУС–ВИНД и других космических экспериментов, которые подверглись воздействию гамма-излучения гигантской вспышки 27 декабря 2004 г. Однако ситуация с наблюдением этого события оказалась нестандартной благодаря одновременному проведению на околоземной орбите эксперимента ГЕЛИКОН, аппаратура которого, близкая по характеристикам к аппаратуре КОНУС–ВИНД и установленная на околоземном ИСЗ КОРОНАС-Ф, оказалась экранированной Землёй от прямого воздействия излучения гигантской вспышки. Но яркость начального импульса вспышки была столь велика, что в эксперименте ГЕЛИКОН оказалось возможным зарегистрировать его отражение от поверхности Луны (рис. 6). Анализ отражённого излучения позволил корректно восстановить временной профиль гигантской вспышки (рис. 7) и оценить её полную энергию $2,3 \times 10^{46}$ эрг и пиковую

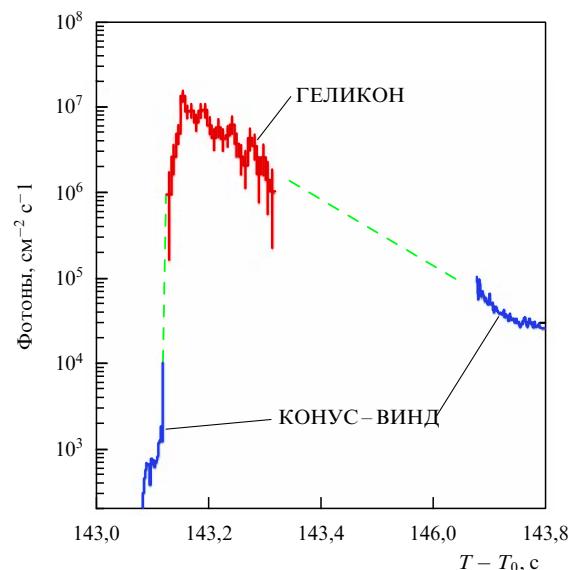


Рис. 7. (В цвете онлайн.) Временной профиль начального импульса гигантской вспышки SGR 1806–20, восстановленный по данным наблюдений в экспериментах КОНУС–ВИНД и ГЕЛИКОН.

светимость $3,5 \times 10^{47}$ эрг с^{-1} (в предположении расстояния 15 кпк), на несколько порядков величины превосходящие по масштабу энергию ранее наблюдавшихся событий подобного типа (см. табл. 3 в работе [26]).

Детектирование столь мощной гигантской вспышки возродило идею о возможности наблюдения подобных событий в ближайших галактиках, которая впервые была высказана в работах [27, 28], при этом начальный импульс вспышки может быть схож с типичным космологическим коротким всплеском. Обзор результатов поиска таких событий приведён в работе [29]. Поиск по наиболее обширному набору коротких всплесков КОНУС–ВИНД показал, что магнитары генерируют гигантские

вспышки не чаще чем примерно раз в столетие и доля внегалактических гигантских вспышек среди относительно ярких коротких гамма-всплесков не превышает 10 % [30]. За время работы эксперимента КОНУС–ВИНД было зарегистрировано только два кандидата во внегалактические гигантские вспышки. Всплеск (gamma-ray burst) GRB 051103, зарегистрированный сетью гамма-детекторов (Interplanetary network, IPN), был ассоциирован с группой галактик M81/M82, находящихся на расстоянии 3,6 Мпк (см., например, [31]). Локализация другого короткого яркого всплеска GRB 070201 [26] наложилась на спиральный рукав галактики Туманность Андромеды; при этом энергетика источника хорошо согласовывалась с другими известными гигантскими вспышками. В пользу гипотезы о гигантской вспышке говорит сравнение спектральных и энергетических параметров коротких всплесков КОНУС–ВИНД и GRB 070201, при котором показано, что этот всплеск является явным статистическим выбросом [32].

Первые фундаментальные представления о природе вспышек гамма-репитеров изложены в работах [33, 34]. На основе данных о периоде модуляции хвоста события 5 марта 1979 г. и оценённого возраста остатка сверхновой была высказана идея о том, что источником всплеска может быть *магнитар* — молодая нейтронная звезда со сверхсильным магнитным полем $\sim 10^{14}$ Гс. Непосредственное измерение замедления нейтронной звезды в источнике SGR 0526–66 и соответствующие оценки возраста (1500 лет) и магнитного поля ($\sim 8 \times 10^{14}$ Гс) были проведены в 1998 г. [35]. Такое магнитное поле превышает характерное значение поля $B_{\text{QED}} = m_e^2 c^3 / e\hbar \approx \approx 4,4 \times 10^{13}$ Гс, при котором энергия первого уровня Ландау сравнима с массой покоя электрона, и квантовые эффекты существенны при описании процессов в таких полях. Плотность энергии магнитного поля $W_B \approx \approx 4 \times 10^{28} B_{15}^2$ эрг см^{-3} (где B_{15} — магнитное поле, выраженное в единицах 10^{15} Гс). Для обеспечения наблюдаемой энергии гигантских вспышек магнитное поле должно диссирировать в области размером около 10 км, т.е. порядка радиуса нейтронной звезды. Быстрая диссириация поля посредством процессов магнитного пересечения согласно моделям SGR [22, 34] нагревает электрон-позитронную плазму до релятивистских температур. Выход наблюдаемого излучения вспышки из источника SGR предполагает формирование релятивистского течения на расстояниях нескольких тысяч радиусов звезды, позволяющего решить проблему изначальной комптоновской непрозрачности нагретой e^\pm -плазмы. Детальное моделирование процессов формирования сверхсильных магнитных полей, их диссириации, а также нестационарных процессов в магнитосферах магнитаров содержит ряд нерешённых фундаментальных проблем и активно обсуждается в литературе (см., например, обзор [22]).

3. Современные всеволновые исследования космических гамма-всплесков

3.1. Многоволновые наблюдения и космологическая эпоха в исследованиях гамма-всплесков

Вплоть до конца 1990-х годов происхождение гамма-всплесков оставалось загадкой. Сочетание изотропии распределения источников гамма-всплесков на небесной сфере и характера их кумулятивного распределения по

яркости (соотношения $\log N - \log S$) [36] указывало на внегалактическую природу событий. Однако размеры областей локализации источников гамма-излучения на небесной сфере неколлимированными детекторами даже с использованием метода триангуляции между космическими аппаратами, разнесёнными на миллионы километров, составляли в лучшем случае доли квадратного градуса¹. Эти области локализации содержали многие тысячи астрофизических объектов, что делало идентификацию источников гамма-всплесков невозможной.

С запуском в 1996 г. итalo-голландской космической обсерватории BeppoSAX, оснащённой монитором гамма-всплесков и работавшими с ним синхронно телескопами рентгеновского излучения WFC с широким полем зрения и высоким (до нескольких минут) угловым разрешением, появилась возможность с высокой точностью локализовать источники рентгеновского излучения от гамма-всплесков на небесной сфере и транслировать координаты этих источников на Землю в режиме реального времени. Это положило начало эпохе отождествлений гамма-всплесков в различных диапазонах длин волн.

Детектирование рентгеновского послесвечения гамма-всплеска GRB 970228 [37], его последующее отождествление с оптическим транзиентным источником [38] и родительской галактикой на красном смещении $z = 0,695$ [39] надёжно подтвердили гипотезы о космологической природе гамма-всплесков [40–43].

Первая оценка расстояния до источника гамма-всплеска, полученная исключительно на основе спектрскопии послесвечения, появилась лишь через несколько месяцев для GRB 970508. Красное смещение источника составило $z = 0,835$ [44], что соответствует удалению ~ 7 миллиардов световых лет и возрасту Вселенной около 6,5 миллиардов лет после Большого взрыва.

Дальнейшее одновременное изучение гамма-всплесков в жёстком и мягком рентгеновских диапазонах проводилось космической обсерваторией HETE-2 (High-Energy Transient Explorer), регистрирующей излучение в диапазоне 2–400 кэВ. С помощью HETE-2 был открыт новый класс событий (XRF, X-Ray Flashes), сходных по характеристикам с гамма-всплесками, но имеющих значительно более мягкий спектр с $E_p \sim 1 - 10$ кэВ.

Для описанных выше экспериментов типичная задержка между регистрацией гамма-всплеска и началом оптических наблюдений его локализации на небесной сфере составляла порядка нескольких часов. С запуском в 2004 г. космической обсерватории Swift [45] (с 2017 г. — обсерватория им. Нила Герельса) ситуация изменилась кардинальным образом. Благодаря быстрой (около минуты) и точной (порядка угловых секунд) локализации гамма-всплесков стало возможным осуществлять оперативную идентификацию событий и исследовать переход от фазы собственного излучения к фазе послесвечения всплеска в различных диапазонах электромагнитного

¹ При детектировании GRB двумя КА, разнесёнными на расстояние d , можно получить его локализацию на небе в виде кольца. Пересечение нескольких колец (при детектировании трёмя и более КА) даёт так называемый "бокс ошибок". Ширина кольца определяется несколькими факторами: длиной триангуляционной базы (d), отношением сигнал/шум (SNR) в коррелируемых кривых блеска GRB и их временным разрешением δT . Сочетание большой базы с высоким SNR и малым δT на практике оказывается редко достижимым в силу весовых, габаритных и телеметрических ограничений, присущих работе на межпланетных миссиях.

излучения. Высокая (до 10^{-8} эрг см $^{-1}$) чувствительность телескопа Swift-BAT (Burst Alert Telescope) к излучению в относительно мягком диапазоне энергий 15–150 кэВ позволяет эффективно регистрировать гамма-всплески с большим красным смещением (до $z \approx 9$), а также слабые короткие гамма-всплески и всплески от гамма-репитеров. Следует отметить, что пиковая энергия значительной части гамма-всплесков лежит вне спектрального диапазона телескопа Swift-BAT и не может быть оценена напрямую по спектральным данным указанного прибора.

Данные, полученные обсерваторией Swift, позволили пролить свет на природу коротких гамма-всплесков. В 2005 г. её детекторами впервые было зарегистрировано рентгеновское послесвечение короткого всплеска GRB 050509B [46]. Рентгеновское послесвечение этого всплеска было слабым и в пределах нескольких часов уменьшилось ниже порога обнаружения, при этом не было обнаружено оптического послесвечения (предел в фильтре V, 550 нм, телескопа Swift-UVOT составил 19,7 звёздной величины для временной задержки < 300 мин после регистрации всплеска телескопом Swift-BAT). На основании локализации рентгеновского телескопа Swift-XRT (X-ray Telescope) с точностью ~ 10 угл. с всплеск был ассоциирован с эллиптической галактикой с низкой скоростью звездообразования на космологическом красном смещении $z = 0,225$.

Вскоре были детектированы ещё два коротких всплеска: GRB 050709 (HETE-2) и GRB 050724 (Swift). У всплеска GRB 050709 впервые было обнаружено оптическое послесвечение, и это позволило локализовать всплеск с точностью лучше угловой секунды и определить, что источник всплеска располагался на окраине галактики с активным звездообразованием на красном смещении $z = 0,160$. Для короткого всплеска GRB 050724 впервые было детектировано послесвечение от рентгеновского до радиодиапазона и обнаружена родительская галактика на $z = 0,257$. Интенсивность рентгеновского и оптического послесвечений коротких всплесков оказалась в среднем на порядок ниже, чем длинных, что смогло объяснить отсутствие детектирования послесвечения для предшествующих событий.

Благодаря запуску в июне 2008 г. космической обсерватории GLAST, позднее переименованной в честь Энрико Ферми (Fermi Gamma-ray Space Telescope), оснащённой сцинтилляционным спектрометром GBM (8 кэВ–40 МэВ) [47] и телескопом высоких энергий LAT (Large Area Telescope, 20 МэВ–300 ГэВ) [48], появилась возможность исследовать излучение гамма-всплесков в широком диапазоне энергий и было обнаружено, что энергетический спектр гамма-всплесков простирается вплоть до нескольких десятков ГэВ (см., например, [49]). Отмечается задержка и большая длительность излучения в области высоких энергий относительно более мягкого гамма-излучения, что свидетельствует в пользу разных механизмов их генерации.

В эпоху исследования космических гамма-всплесков специализированными гамма- и рентгеновскими телескопами большую важность сохраняют наблюдения таких событий всенаправленными детекторами, не ограниченные условиями низкой околоземной орбиты. К середине 2018 г. КОНУС–ВИНД зарегистрировал в триггерном режиме ~ 3000 гамма-всплесков (частота детектирова-

ния ~ 120 гамма-всплесков в год). Данные результаты представлены, в частности, в каталоге коротких гамма-всплесков [32] (около 300 событий, зарегистрированных в 1994–2010 гг.) и в каталоге гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением [50], в который вошли 150 событий, из них 12 событий относятся к типу I (короткие/жёсткие) и 138 — к типу II (длинные/мягкие). Данная выборка является наиболее полным набором характеристик гамма-всплесков в собственной космологической системе отсчёта, полученных в результате систематического анализа однородного массива наблюдений в широком диапазоне энергий гамма-квантов.

Эксперимент КОНУС–ВИНД является опорным сегментом межпланетной сети космических экспериментов с детекторами гамма-излучения IPN (Interplanetary Network) [51, 52], в состав которой входит 7 космических аппаратов, включая миссию Mars – Одиссея на удалении до 360 млн км (~ 1200 световых секунд) от Земли. Сеть IPN имеет чувствительность $\sim 6 \times 10^{-7}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ и локализует до 300 гамма-всплесков в год триангуляционным методом. Примерно 60 % из них не наблюдаются детекторами с высоким угловым разрешением, а во многих случаях локализации IPN позволяют уточнять области локализации, полученные детекторами GBM и LAT гамма-обсерватории Ферми. В области всеволновых наблюдений возможности сети IPN многократно усиливаются в сочетании с такими мощными, постоянно действующими наземными системами мониторинга транзитной активности в оптическом диапазоне, как МАСТЕР [53] и iPTF/ZTF [54, 55]. Данные IPN используются также для поиска гамма-излучения от источников гравитационных волн, нейтрино сверхвысоких энергий и гигантских всплесков от гамма-репитеров в близлежащих галактиках.

3.2. Классификация гамма-всплесков

Распределение гамма-всплесков по длительности характеризуется двумя выраженным пиками: с максимумами в области $\sim 0,3$ с и ~ 30 с [10], при этом граница между пиками, лежащая в области ~ 2 с, условно делит события на короткие и длинные. Данная классификация, дополненная информацией о спектральной жёсткости излучения, позволила выделить два кластера событий в плоскости жёсткость – длительность: короткие/жёсткие и длинные/мягкие гамма-всплески (рис. 8).

Указанная кластеризация, свидетельствующая в пользу существования двух физически различных типов источников, была обнаружена задолго до появления сведений о расстоянии до источников гамма-всплесков. Следует отметить, что наблюдаемые длительности и спектральные жёсткости гамма-всплесков не отражают в полной мере значения данных характеристик в их источниках в силу космологических эффектов растяжения времени и умягчения спектра. Однако с накоплением информации о красном смещении гамма-всплесков стало ясно, что существование двух кластеров гамма-всплесков на диаграмме жёсткость – длительность подтверждается и в космологической системе отсчёта их источников (по крайней мере, в общем для коротких/жёстких и длинных/мягких всплесков диапазоне $z < 2$ [50]).

Длинные/мягкие события были ассоциированы с коллапсом ядра молодых массивных звёзд (тип II) на основе наблюдений родительских галактик и сопутствующих сверхновых (см. раздел 3.4), в то время как короткие/

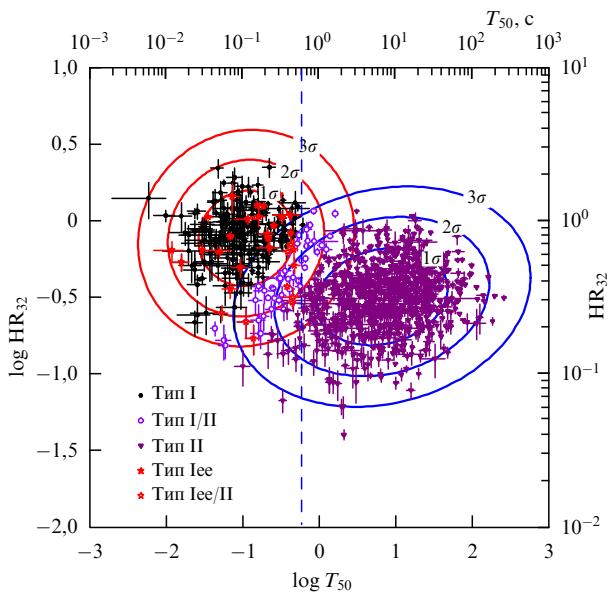


Рис. 8. (В цвете онлайн.) Классификация гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте КОНУС – ВИНД. Кластеры в плоскости жёсткость – длительность отражают два физических типа событий: тип I — короткие/жёсткие (слияние компактных объектов), тип II — длинные/мягкие (коллапс ядра массивной звезды) [32]. HR_{32} — отношение интегральных чисел отсчётов в диапазонах 200–750 кэВ и 50–200 кэВ, T_{50} — интервал накопления 50 % отсчётов всплеска в диапазоне 50–750 кэВ.

жёсткие всплески, вероятнее всего, происходят при слиянии компактных объектов (тип I): двух нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры (см. раздел 3.6).

Особый интерес представляют так называемые "сверхдлинные" всплески, длительностью от тысячи до десятков тысяч секунд [56]. Важность исследования сверхдлинных гамма-всплесков обусловлена, в частности, тем, что по наблюдательным характеристикам они

приближаются к отличным по природе событиям прививного разрушения звёзд массивными чёрными дырами. К настоящему времени известно не более десятка сверхдлинных GRB и они вызывают пристальное внимание различных групп исследователей [57]. Существенным преимуществом эксперимента КОНУС – ВИНД, обусловленным расположением его орбиты в межпланетном пространстве, является возможность регистрировать такие события на всей их протяжённости, достигающей нескольких часов (рис. 9) [58].

3.3. Красные смещения и энергетика гамма-всплесков

Как правило, красные смещения гамма-всплесков изменяются либо по деталям оптических спектров (линиям абсорбции и эмиссии) родительской галактики и/или послесвещения, либо фотометрически. К настоящему времени красные смещения были определены приблизительно для 500 гамма-всплесков, покрывая диапазон от $z = 0,0087$ (GRB 980425) до $z = 9,4$ (GRB 090429B), а детектирование наиболее мощных событий, сходных по характеристикам с ультраярким GRB 110918A [59], возможно вплоть до $z \approx 17$ [50], т.е. до эпохи, отстоящей всего на сотни миллионов лет от Большого взрыва.

Колоссальная энергетика взрыва является одним из ключевых параметров, важных для понимания физики прародителей, центральной машины и механизма излучения гамма-всплесков. Знание красного смещения гамма-всплеска позволяет оценить изотропный эквивалент его энерговыделения (E_{iso}), характеристику энергии, выделенной центральной машиной всплеска, и изотропный эквивалент пиковой светимости (L_{iso}), характеризующий механизмы преобразования кинетической энергии взрыва в излучение. С учётом высоких наблюдаемых потоков энергии (до 10^{-3} эрг $\text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$) и космологических расстояний до источников данные характеристики гамма-всплесков достигают гигантских величин: $E_{iso} \sim 10^{55}$ эрг (GRB 080916C) [60] и

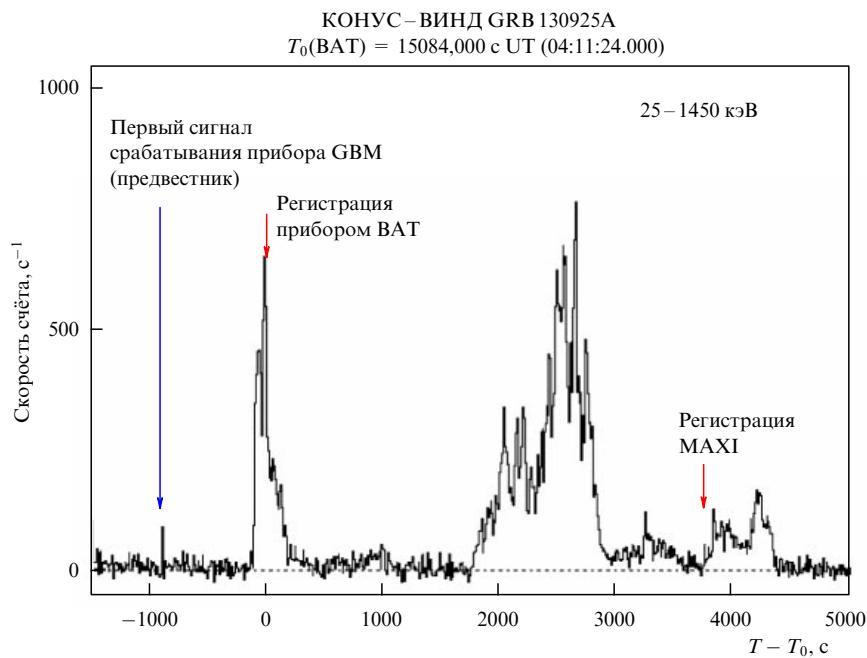


Рис. 9. Наблюдение сверхдлинного гамма-всплеска GRB 130925A в эксперименте КОНУС – ВИНД. Стрелками показаны моменты детектирования отдельных эпизодов события в других экспериментах. Приведена часть кривой блеска, охватывающая примерно 6000 с.

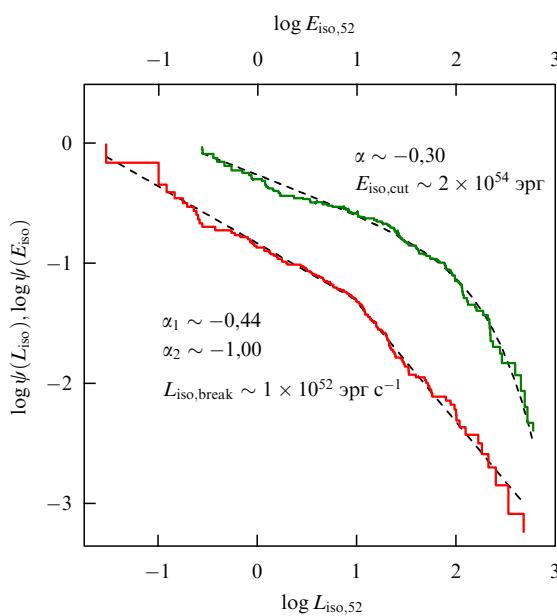


Рис. 10. Кумулятивные распределения "длинных" гамма-всплесков по пиковой светимости $\psi(L_{\text{iso}})$ (нижний график) и полному энерговыделению $\psi(E_{\text{iso}})$ (верхний график) по данным эксперимента КОНУС–ВИНД [50]. Показаны наилучшие аппроксимации степенными моделями с изломом ($\psi(L_{\text{iso}})$) и с экспоненциальным обрезанием ($\psi(E_{\text{iso}})$).

$L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{54}$ эрг с $^{-1}$ (GRB 110918A) [59], сопоставимых, соответственно, с массой покоя Солнца и стационарной светимостью всех звёзд наблюдаемой Вселенной. Последние результаты по анализу кумулятивного распределения гамма-всплесков по E_{iso} , полученные по данным экспериментов КОНУС–ВИНД и Fermi-GBM [50, 61], указывают на экспоненциальный характер обрезания данного распределения в области $E_{\text{iso}} \sim 10^{54}$ эрг (рис. 10, верхний график), что свидетельствует в пользу наблюдаемого предела на энерговыделение гамма-всплесков. В то же время распределение гамма-всплесков по пиковой светимости (функция светимости) [50], демонстрируя излом в области $L_{\text{iso}} \sim 10^{53}$ эрг с $^{-1}$, сохраняет степенной характер вплоть до верхней исследованной к настоящему времени границы (рис. 10, нижний график).

Огромное изотропное энерговыделение гамма-всплесков было впервые объяснено для GRB 990510 [62] с помощью предположения о высокой коллимации излучения (jet beaming). Для типичных углов коллимации в несколько градусов истинное энерговыделение большинства гамма-всплесков составляет $\sim 10^{51}$ эрг, что сопоставимо с энерговыделением сверхновой. Подобное экстремальное выделение энергии, сравнимое с энергией связи звезды, за характерное время порядка нескольких секунд указывает на связь источников гамма-всплесков с коллапсом массивных звёзд или слиянием компактных релятивистских объектов.

3.4. Длинные гамма-всплески и сверхновые

Наблюдательные свидетельства связи гамма-всплесков и сверхновых впервые были получены в 1998 г., когда в области локализации всплеска GRB 980425 ($z = 0,0085$, 35,6 Мпк) была обнаружена сверхновая SN 1998bw типа Ic [63]. Пик оптической кривой блеска наблюдался на 10 –

20 день после гамма-всплеска. Обнаруженная сверхновая была необычной, моделирование показало, что она имела приблизительно в 10 раз большее энерговыделение, чем обычная сверхновая (10^{51} эрг), и релятивистскую скорость расширения $\sim 0,1$ скорости света; из-за своих уникальных свойств SN 1998bw получила название "гиперновая" ("hypernova") [64]. Изотропный эквивалент пиковой светимости GRB 980425 составил примерно $L_{\text{iso}} \sim 5 \times 10^{46}$ эрг с $^{-1}$, что на несколько порядков меньше, чем изотропное энерговыделение, определённое для основной массы гамма-всплесков, зарегистрированных к настоящему времени ($\sim 10^{50}–10^{54}$ эрг с $^{-1}$), подобные всплески относят к классу гамма-всплесков с низкой светимостью (low-luminosity GRB). Только спустя пять лет благодаря миссии НЕТЕ-2 удалось зарегистрировать сверхновую SN 2003dh на фоне уменьшающегося послесвечения близкого GRB 030329 с типичным значением $L_{\text{iso}} \sim 8 \times 10^{50}$ эрг с $^{-1}$.

К настоящему времени известно приблизительно 50 сверхновых, ассоциированных с относительно близкими гамма-всплесками при $z = 0,0085–1,0$ [65], при этом красные смещения длинных всплесков распределены на существенно большем интервале $z = 0,0085–9,4$ со средним значением $z \approx 2,3$.

Как для обычных сверхновых типов IbC, так и для связанных с гамма-всплесками можно оценить скорость ударной волны из радионаблюдений (см., например, [66]). В случае сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, считается, что наблюдаемое радиоизлучение связано с джетом. Параметры более медленной компоненты, ответственной за излучение наблюдаемой сверхновой, определяются из моделирования оптических кривых блеска и спектров. В координатах скорость ударной волны – кинетическая энергия выброса релятивистские сверхновые без гамма-всплеска (SN 2009bb и SN 2012ap), гамма-всплески низкой светимости и обычные гамма-всплески образуют последовательность с соответственно возрастающими скоростями и кинетическими энергиями выбросов. Такая последовательность может свидетельствовать о различных сценариях развития струйного выброса: в случае наименее энергетических релятивистских сверхновых джет не вышел за поверхность звезды, в гамма-всплесках низкой светимости джет израсходовал большую часть энергии на проход через оболочку звезды (shock break out GRBs), а в обычных гамма-всплесках джет успешно вышел в межзвёздную среду, потеряв незначительную часть энергии (см., например, [65, 67]).

В настоящее время наиболее яркой является SN 2011kl, связанная со сверхдлинным всплеском GRB 111209A, причём её яркость нельзя объяснить исключительно распадом ^{56}Ni . Предполагается, что её излучение питается центральным источником гамма-всплеска, например, образовавшимся магнитаром [68]. Дальнейшее детектирование сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, должно дать новую информацию о физике гамма-всплесков и породивших их звёздах.

3.5. Гамма-всплески, космология и фундаментальная физика

После первого обнаружения рентгеновского и оптического послесвечения длинного гамма-всплеска GRB 9702281 [37, 38], измерения космологического красного смещения источника всплеска GRB 970508 [44] и

обнаружения первой сверхновой SN 1998bw, ассоциированной с длинным гамма-всплеском GRB 980425 [63], источники длинных гамма-всплесков были надёжно ассоциированы с конечными стадиями эволюции массивных звёзд в галактиках, находящихся на космологических расстояниях (см., например, [69]). Последующее детальное моделирование коллапса железного ядра вращающейся массивной звезды в чёрную дыру (модель "коллапсара" [70]) показало, что при некоторых начальных условиях возможно образование релятивистского струйного выброса с углом коллимации $\sim 10^\circ$ и кинетической энергией до $\sim 10^{52}$ эрг, а это смогло объяснить наблюдаемые характеристики большинства длинных гамма-всплесков и дало ясные предсказания об ассоциации длинных гамма-всплесков с галактиками с активным звездообразованием.

Благодаря колossalной светимости гамма-всплески являются уникальными инструментами для исследования свойств Вселенной практически на всех этапах её существования. В частности, исследования свойств популяции GRB позволяют наложить ограничения на параметры расширения Вселенной и свойства тёмной энергии в широчайшем диапазоне красных смещений. С решением этой задачи связан вопрос о возможности использования гамма-всплесков в качестве "стандартных свеч"² для независимого измерения фотометрического расстояния (luminosity distance). В отличие от сверхновых типа Ia, блеск которых тесно связан с фундаментальным пределом массы белых карликов (пределом Чандraseкара), основной трудностью здесь является широкий диапазон энерговыделения и светимости гамма-всплесков. Разрешению проблеме "стандартизации" гамма-всплесков может способствовать [72, 73] исследование корреляций между энергетикой гамма-всплесков и жёсткостью их излучения (так называемые соотношения "Амати" [74], "Ёнетоку" [75] и их "коллимированные" версии [76]). Наиболее полные данные о характере корреляций между энергетикой гамма-всплесков и жёсткостью их излучения были получены по результатам анализа 150 гамма-всплесков с известным красным смещением, зарегистрированных в эксперименте КОНУС–ВИНД [50]. В работе [50], в частности, были получены свидетельства в пользу того, что резкая "нижняя" граница соотношений "Амати" и "Ёнетоку" (в области относительно мягких событий с относительно высокой энергетикой) определяется свойствами популяции гамма-всплесков, в то время как "верхняя" граница в области относительно жёстких всплесков с низкой энергетикой обусловлена в существенной мере эффектами наблюдательной селекции. Таким образом, вопрос о применимости гамма-всплесков в качестве "стандартных свеч" остаётся открытым.

Связь длинных гамма-всплесков с коллапсом массивных звёзд [77] является ключом к оценке темпа звездообразования в широком диапазоне красных смещений. Постепенное накопление статистики по наблюдениям гамма-всплесков с известными красными смещениями позволяет перейти к оценке таких характеристик их популяции, как функция светимости и космологическая эволюция темпа образования гамма-всплесков (GRBFR). На рисунке 11 приведена оценка

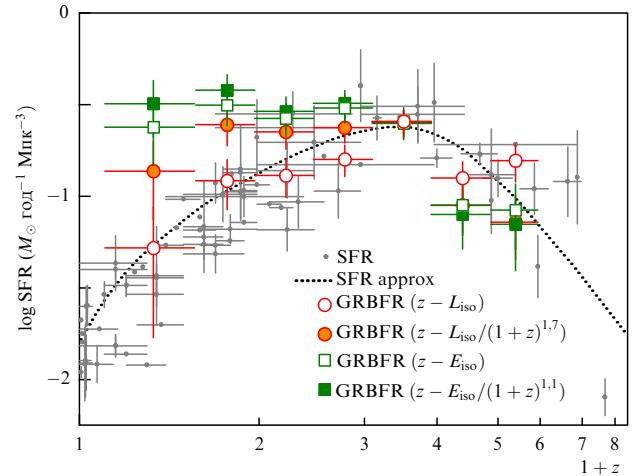


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Относительный темп образования источников гамма-всплесков (GRBFR) в зависимости от красного смещения (z) по данным эксперимента КОНУС–ВИНД [50]. Результаты, полученные с поправкой на космологическую эволюцию светимости и энерговыделения (цветные символы с заливкой), свидетельствуют в пользу избытка GRBFR относительно космологического темпа звездообразования (SFR) при малых z . Серые символы — SFR из работ [78–81]. Пунктирной линией обозначена аппроксимация SFR из работы [82].

GRBFR для "длинных" всплесков, выполненная по результатам эксперимента КОНУС–ВИНД в интервале красных смещений z от 0,125 до 5, демонстрирующая в области малых красных смещений ($z < 1$) избыток относительно космологического темпа звездообразования [50]. Данный результат может свидетельствовать в пользу как неоднородности физической природы источников "длинных" гамма-всплесков, так и в пользу космологической эволюции характеристик их прародителей. С другой стороны, оценённый темп образования гамма-всплесков хорошо согласуется с историей звездообразования при больших z , следовательно, регистрируя далёкие всплески, можно оценить ход звездообразования и начальную функцию масс в ранней Вселенной. В частности, источниками гамма-всплесков в эпоху рекон ionизации ($z > 6$) могут быть первичные звёзды популяции III, имеющие массу, большую 100 масс Солнца. Теоретическое моделирование их коллапса показывает [83, 84], что полное энерговыделение в таких гамма-всплесках должно составлять $> 10^{54}$ эрг при относительно низкой пиковой светимости $\sim 10^{52}$ эрг с^{-1} . Таким образом, детектирование далёких гамма-всплесков с высоким отношением полной энергии к светимости может стать первым прямым наблюдением первого поколения звёзд во Вселенной.

Послесвечивание гамма-всплеска, характеризуемое исходно непрерывным нетепловым спектром, проходя через межзвёздную среду родительской галактики и межгалактическую среду, приобретает абсорбционные особенности, несущие информацию о химическом составе и степени ионизации вещества на линии зрения. При детектировании нескольких десятков всплесков при $z \sim 7–9$ это поможет оценить историю металличности, условия и основные источники жёсткого излучения в эпоху рекон ionизации (см., например, [85]). Детектирование полос поглощения CO в спектрах послесвечения гамма-всплесков может способствовать оценке характера эволюции температуры реликтового излучения и

² Идея GRB как "стандартной свечи" была впервые высказана в 2001 г. в работе Липунова, Постникова и Прохорова [71].

вариации фундаментальных физических постоянных в недоступной ранее области $z > 3$ [86].

Регистрация высоконергетичных фотонов от GRB 090510 [87] детектором Fermi-LAT с высоким временным разрешением позволила определить ограничения для модели квантовой гравитации с нарушением лоренц-инвариантности, сводящиеся к зависимости скорости распространения фотона v_{ph} от его энергии E_{ph} . В некоторых моделях (см., например, [88]) рассматривают зависимость вида

$$v_{\text{ph}} = \frac{\partial E_{\text{ph}}}{\partial p_{\text{ph}}} \approx c \left[1 - \frac{n+1}{2} \zeta_n \left(\frac{E_{\text{ph}}}{M_{\text{QG}} c^2} \right)^n \right],$$

где n определяет линейный ($n = 1$) или квадратичный ($n = 2$) характер низшего члена разложения модифицированного дисперсионного соотношения для фотона, $\zeta_n = \pm 1$, а M_{QG} — характерный масштаб массы в квантовой теории гравитации. В GRB 090510 фотон с энергией около 31 ГэВ был зарегистрирован через интервал времени менее одной секунды после фотонов с энергиями несколько МэВ, что позволило установить предел $M_{\text{QG}} > M_{\text{P}}$ для $n = 1$, где планковская масса $M_{\text{P}} = 1,22 \times 10^{19}$ ГэВ [89].

Также всеволновые наблюдения могут быть использованы для проверки принципа эквивалентности Эйнштейна, который, в частности, постулирует, что задержка распространения фотона в гравитационном поле (эффект Шапиро) не должна зависеть от его энергии. Из наиболее важных результатов следует отметить наблюдения двух гамма-всплесков, GRB 050820A [90] и GRB 080319B [91]. Оптическое излучение первого из этих всплесков было зарегистрировано телескопом RAPTOR Лос-Аламосской лаборатории. Сопоставление с данными о гамма-излучении, полученными в эксперименте КОНУС–ВИНД, позволило впервые наблюдать одновременное начало оптического и гамма-излучения в источнике всплеска. Второе из указанных событий явилось самым ярким в оптической области всплеском с оптической светимостью в максимуме до 5,3 звёздной величины и интегральным потоком гамма-излучения $\sim 6 \times 10^{-4}$ эрг см $^{-2}$ (рис. 12). Совместный анализ данных эксперимента КОНУС–ВИНД и наблюдений наземного телескопа Pi of the Sky показал, что гамма- и оптическое излучение этого всплеска начи-

нается и заканчивается в одно и то же время, предоставляя веское свидетельство того, что они происходят из одной области пространства. На основе данного результата в работе [92] был сделан вывод о том, что параметр постニュтонаского формализма u одинаков для фотонов оптического и МэВ-го диапазонов на уровне $(\gamma_{\text{ev}} - \gamma_{\text{MeV}}) \leq 1,2 \times 10^{-7}$, это на порядок величины лучше оценок, полученных по наблюдениям сверхновой 1987A.

3.6. Короткие гамма-всплески и гравитационные волны

Предположения о связи источников гамма-всплесков с двойными системами компактных объектов: двойных нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры — начали появляться задолго до непосредственного измерения расстояний до источников всплесков. Мотивированные отчасти тем, что характерное время слияния пульсаров в двойной системе Халса–Тейлора [93] составляет порядка 0,1 млрд лет, первые работы [94–96] указали на то, что слияния двойных нейтронных звёзд могут производить более 10^{50} эрг в виде гамма-излучения — типичное энерговыделение для космологического гамма-всплеска. Такие слияния, вследствие отсутствия вокруг плотной межзвёздной среды, могут приводить к генерации выбросов с низким содержанием барионов, которые могут быть разогнаны до релятивистских скоростей. Более подробное исследование модели слияния двойных нейтронных звёзд выполнено в работе [97], где указано на проверяемые предположения о том, что для таких событий характерно значительное удаление от центров родительских галактик вследствие скорости, приобретённой двойной системой при образовании составляющих её нейтронных звёзд. Также было указано, что слияние будет сопровождаться излучением гравитационных волн в диапазоне частот лазерного интерферометра LIGO [98]. И было предложено [96, 99], что слияния двойных компактных объектов являются потенциальными местами протекания г-процесса нуклеосинтеза.

К настоящему времени (середина 2018 г.) несколько десятков коротких всплесков ассоциированы с галактиками на красных смещениях $z \sim 0,1–1,3$, которые в среднем более массивны и содержат более старое звёздное население, чем родительские галактики длинных всплесков. Источники коротких всплесков в родительских галактиках располагаются в среднем в четыре раза дальше относительно их центров, чем источники длинных всплесков, которые в основном тяготеют к наиболее ярким в ультрафиолете областям родительских галактик. Ни для одного короткого всплеска не была найдена сопутствующая сверхновая. Наблюданное распределение источников коротких всплесков в родительских галактиках хорошо согласуется с результатами моделирования распределений двойных нейтронных звёзд (см. работу [100] и ссылки в ней). Таким образом, результаты наблюдений свидетельствуют в пользу того, что значительная часть источников коротких гамма-всплесков связана со старым звёздным населением и может быть результатом слияния компактных объектов в двойных системах.

Свойства гамма-излучения коротких всплесков широко исследовались по данным инструментов CGRO-BATSE, Swift-BAT, Fermi-GBM/LAT и КОНУС–ВИНД.

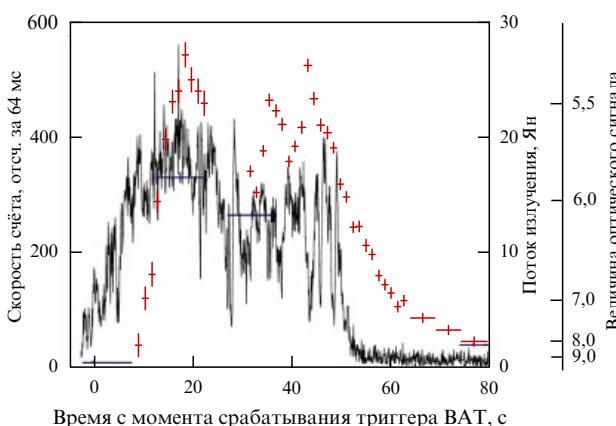


Рис. 12. Одновременная регистрация гамма-излучения (КОНУС–ВИНД) и ультраяркого оптического излучения (телескоп Pi of the Sky) гамма-всплеска GRB 080319B.

Наиболее обширный набор коротких всплесков получен в эксперименте КОНУС–ВИНД (в настоящее время более 400 событий). Детальный анализ этого набора [32] показал, например, что для описания части коротких всплесков недостаточно одной спектральной модели (степени с изломом или экспоненциальным завалом в области больших энергий) и необходимо вводить дополнительную степеннью спектральную компоненту, дающую основной вклад в излучение на низких (< 50 кэВ) и высоких ($\gtrsim 2$ МэВ) энергиях. Анализ всплесков с предполагаемым продолженным излучением (длительное слабое излучение, наблюдаемое после основного короткого импульса гамма-всплеска) показал, в отличие от предыдущих работ, что его спектр может быть достаточно жёстким с пиковыми энергиями спектров до нескольких МэВ. Исследование популяции коротких гамма-всплесков КОНУС–ВИНД в пространстве параметров жёсткость спектра – интенсивность выявило, что всплески в целом следуют зависимостям $E_p \propto S^{1/2}$ и $E_p \propto F^{1/2}$, где E_p — пищевая энергия интегрального спектра, S — интегральный энергетический поток и F — пищевый энергетический поток, и это, по-видимому, является проявлением соотношений "Амати" и "Ёнетоку" для коротких всплесков.

Очень яркий всплеск GRB 070201 выпадает из общего тренда популяции, что является дополнительным аргументом в пользу того, что это событие — гигантская вспышка магнитара в галактике Туманность Адромеды.

К 2017 г. последними недостающими элементами в картине феномена коротких гамма-всплесков были предсказанная регистрация гравитационных волн от конечной стадии эволюции двойной системы нейтронных звёзд и детектирование оптического излучения от распада тяжёлых элементов, образованных в г-процессе при разрушении нейтронных звёзд. Эти два элемента были одновременно найдены 17 августа 2017 г., когда двумя детекторами LIGO был зарегистрирован сигнал от слияния двух нейтронных звёзд на расстоянии порядка 40 Мпк и затем, через 1,7 с, зарегистрирован короткий гамма-всплеск космическими обсерваториями Fermi и INTEGRAL [101]. Исходную значительную по площади область локализации источника гравитационных волн на небе удалось уменьшить примерно до 28 квадратных градусов благодаря совместному анализу данных детекторов LIGO и европейской гравитационной обсерватории Virgo, которая не детектировала гравитационное излучение, но это могло означать, что источник был в минимуме диаграммы направленности детектора. Полученная локализация согласовалась с областью автономной локализации короткого всплеска инструментом Fermi-GBM.

Дополнительным ограничением на локализацию источника гамма-всплеска стала локализация, полученная на основе времени распространения гамма-излучения между обсерваториями INTEGRAL и Fermi [102], она позволила надёжнее отождествить гамма-всплеск и источник гравитационных волн, сократив область локализации Fermi-GBM примерно в три раза. Подобная методика локализации гамма-всплеска может сузить область поиска электромагнитного транзиента в случае менее точной локализации LIGO и Virgo.

Короткий гамма-всплеск GRB 170817A, сопровождавший слияние, имел параметры, не типичные для популяции космологических коротких жёстких всплесков. Дли-

тельность события составляла ~ 2 с, при этом в кривой блеска можно выделить два эпизода излучения: начальный импульс с длительностью $\sim 0,6$ с и нетепловым спектром с максимумом $EF(E)$ спектра около 200 кэВ и последующим излучением с тепловым спектром с температурой ~ 10 кэВ. Оценка изотропного энерговыделения всплеска для расстояния 40 Мпк составила $\sim 5 \times 10^{46}$ эрг, что на 2–6 порядков меньше типичного значения для коротких всплесков. Такое расхождение можно объяснить в том числе моделью релятивистского струйного выброса — джета, наблюдаемого под большим углом к оси (см., например, [103]). Эта модель также косвенно подтверждается поздним детектированием послесвечения в рентгеновском и радиодиапазонах [104–106].

В результате последовавших в течение суток наблюдений области локализации источника гравитационных волн был обнаружен оптический источник ~ 17 звёздной величины в видимом диапазоне на краю линзовидной галактики с низкой скоростью звездообразования NGC 4993 на расстоянии 39,5 Мпк [107]. Два первых оптических спектра источника, измеренные в течение первых дней (0,6 и 1,5 сут), были близки к тепловым с температурами 8300 К и 5500 К, радиусами $R \sim 4,5 \times 10^{14}$ см и $R \sim 7 \times 10^{14}$ см соответственно, что свидетельствует о скоростях расширения источника $\sim 0,3c$ (c — скорость света). При этом кривая блеска в наиболее коротковолновой части оптического спектра быстро затухала со скоростью ~ 2 звёздной величины в день. В длинноволновой же части спектра затухание имело сложный профиль: убывание со скоростью $\sim 0,3$ звёздной величины в день в первые полтора дня перешло в плато в районе четвёртого дня с последующим продолжением убывания после ~ 8 дня [108, 109]. Наблюдаемое поведение оптического транзиента можно описать двухкомпонентной моделью выброса, образованного слиянием двух нейтронных звёзд. В такой модели основной вклад в коротковолновую часть спектра даёт более лёгкий ($\sim 0,01 M_\odot$) и быстро расширяющийся ($\sim 0,3$ с) выброс вдоль оси двойной системы. Длинноволновая часть спектра связана с более тяжёлым ($\sim 0,04 M_\odot$) и медленным ($\sim 0,1$ с) выбросом в экваториальной плоскости, при этом профили кривой блеска и спектра сильно зависят от содержания тяжёлых элементов, образованных в г-процессе [110].

Таким образом, с одной стороны, природа коротких гамма-всплесков к настоящему времени достаточно прояснена. Известно, что значительная их часть образуется в галактиках на космологических расстояниях и их источники достаточно надёжно связаны со слияниями компактных объектов. С другой стороны, обнаружено значительное различие в свойствах единственного локального короткого всплеска GRB 170817A и остальной популяции. Также нет достаточного понимания механизма генерации коротких всплесков с продолженным излучением, когда за коротким начальным импульсом следует длительное (до нескольких сотен секунд) менее интенсивное излучение [111–113].

Текущий запуск обсерваторий LIGO и Virgo в апреле 2019 г. может пополнить популяцию локальных транзиентов (150–200 Мпк) от оптического до гамма-диапазона, связанных со слияниями двойных систем, включающих нейтронные звёзды, что должно дать более глубокое понимание процессов, происходящих при проливном разрушении нейтронных звёзд.

4. Моделирование астрофизических процессов с экстремальными по энергетике потоками электромагнитного излучения

Экстремальное выделение энергии, сравнимой с энергией связи звезды, за характерное время порядка нескольких секунд указывает на связь источников гамма-всплесков с коллапсом массивных звёзд или слиянием нейтронных звёзд. Отсутствие эффектов конверсии гамма-излучения в электрон-позитронные пары указывает на наличие релятивистского течения с лоренц-фактором Γ больше или порядка 100 в компактном источнике излучения. Действительно, в отсутствие релятивистского движения источник гамма-излучения с характерным наблюдаемым временем перемены δt_0 имеет размеры, не превышающие $c\delta t_0$. Типичная изотропная светимость гамма-всплесков L_γ , наблюдавшихся на космологических расстояниях, превышает 10^{52} эрг s^{-1} . Столкновение двух фотонов с энергиями ϵ_1 и ϵ_2 , удовлетворяющими пороговому условию $(\epsilon_1\epsilon_2)^{1/2} > m_ec^2$, сопровождается рождением электрон-позитронных пар $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ с сечением порядка томсоновского сечения σ_T . Для фотонов с энергиями ϵ , превышающими порог реакции, оптическая толщина системы

$$\tau_{\gamma\gamma} \sim \frac{\sigma_T L_\gamma}{4\pi c^2 \delta t_0 \epsilon},$$

что даёт $\tau_{\gamma\gamma} \sim 10^{12}$ для $\delta t_0 \approx 0,1$ с и $\epsilon \approx 1$ МэВ. Столь большая оптическая толщина приводит к спектрам источников, близким к равновесным, тогда как в гамма-всплесках наблюдаются существенно нетепловые (кусочно-степенные) спектры гамма-излучения. Естественным решением "проблемы компактности" источников является наличие релятивистского течения в источниках гамма-всплесков [95, 114–116].

После запуска обсерватории *Fermi* было надёжно зарегистрировано гамма-излучение с энергиями в ГэВ-диапазоне на основной фазе всплеска. В коротком гамма-всплеске GRB 090510 с красным смещением $z = 0,903$, детектированным обсерваториями *Swift*, КОНУС–ВИНД, INTEGRAL, AGILE и другими, прибор *Fermi*-LAT зарегистрировал фотоны с энергиями до 31 ГэВ, причём фотон с энергией 31 ГэВ пришёл примерно через 0,8 с после начала отсчётов фотонов вспышки. Наличие высокозергетических фотонов в основной фазе вспышки позволило оценить минимальный лоренц-фактор течения в источнике $\Gamma \sim 1200$. Более того, в GRB 090510 была обнаружена новая компонента жёсткого гамма-излучения, дополнительная к стандартному спектру Банда. Данную жёсткую компоненту трудно описать в рамках однозонной модели с синхротронным и синхротронно-комптоновским механизмами формирования основного спектра вспышки [89].

Наблюдаемые спектры гамма-излучения существенно нетепловые, что указывает на наличие механизмов конверсии большой доли энергии, выделенной в центральном компактном источнике, в нетепловые частицы и последующее эффективное излучение ускоренных частиц, вероятно, синхротронным механизмом, и это позволяет моделировать гамма-всплески как диссилативные релятивистские течения [117]. В качестве вероятных источников энергии и импульса релятивистского истечения рассматриваются слияние нейтронных звёзд [96] и коллапс массивных звёзд [118].

Построение детальной модели источников гамма-всплесков из первых принципов требует последовательного учёта многих факторов, таких как нейтринный перенос и турбулентность в трёхмерной геометрии (с учётом эффектов ОТО), а также недостижимых сегодня компьютерных мощностей. Однако существующие модели, основанные на ограниченном описании источников, но учитывающие взаимодействие релятивистских истечений с окружающим веществом, допускают интерпретацию наблюдений и ограничение параметров моделей.

Коллимированные релятивистские струи (джеты) могут формироваться при коллапсе вращающихся массивных звёзд в чёрную дыру, аккрецирующую вещество из внешних оболочек звезды [77]. Другим возможным центральным источником может быть нейтронная звезда с сильным магнитным полем, порядка 10^{15} Гс, вращающаяся с миллисекундным периодом. Такой магнитар имеет энергию вращения $\sim 3 \times 10^{52}$ эрг и может достигать выделяемой мощности $> 10^{50}$ эрг s^{-1} [119]. Существенную роль при формировании релятивистского истечения с лоренц-фактором, большим 100, необходимо для формирования гамма-всплеска, играет металличность звезды и продолжительность действия центрального источника при фиксированном полном значении выделенной энергии [120]. Коллапсировавшие звёзды, вероятно, являются источниками длинных/мягких гамма-всплесков (тип II на рис. 8). Однако в таких моделях сталкиваются с трудностями при попытке воспроизвести особенности коротких/жёстких всплесков типа I. Две популяции всплесков — типа I и типа II — чётко разделяются на рис. 8 и это может отражать различие в источниках всплесков. Детектирование обсерваториями LIGO и Virgo гравитационного излучения от источника GW 170817, ассоциированного с коротким гамма-всплеском GRB 170817A [101, 103], позволило подтвердить гипотезу о слиянии нейтронных звёзд [96] как источнике коротких гамма-всплесков [121]. Наблюдения источника GRB 170817A от радиоволн до гамма-лучей в течение 160–200 дней после всплеска [122] позволили несколько ограничить круг моделей релятивистских структурированных течений.

Структура релятивистских течений зависит как от характеристик выделения энергии центральным источником, так и от распределения массы и энергии вокруг источника. Процесс слияния нейтронных звёзд сопровождается приливным их разрушением и сильным нагревом плотного вещества, охлаждающегося за счёт интенсивного излучения нейтрино. Ветер, ускоренный потоками уходящих нейтрино, формирует структуру каверны вокруг центрального источника, которая расширяется с умеренно релятивистской скоростью и через которую распространяется сильно анизотропный поток энергии электромагнитного поля, излучаемый центральным источником (см., например, [123]). Прорыв наружу каверны и сильно коллимированного джета сопровождается излучением короткого гамма-всплеска с характерной кривой блеска, совместимой с данными наблюдений.

В случае коллапсировавшей звезды коллимированный релятивистский джет от центрального источника должен прорываться наружу через внешние оболочки звезды. Поэтому энергия коллимированного релятивистского джета и сопутствующего ему умеренно релятивистского течения с более широким углом раствора на поверхности звезды определяются структурой внешних

оболочкой, а следовательно, массой звезды и её металличностью. Наблюдения указывают на вероятную связь источников гамма-всплесков со звёздами типа Вольфа – Райе — прародителями сверхновых типа Ib/c, где могут присутствовать релятивистские скорости эjectированных вещества [124].

Космологические гамма-всплески происходят от первичных звёзд популяции III, имеющих большую массу, малую металличность и, вероятно, большую массу коллапсированного ядра. Оценки темпа детектирования гамма-всплесков в эксперименте КОНУС–ВИНД в зависимости от красного смещения до $z \sim 5$, приведённые на рис. 11, могут служить тестом для проверки теоретических моделей, построенных в работах [125, 126].

Выход релятивистского джета на поверхность звезды должен сопровождаться процессом ускорения частиц и формирования нетеплового распределения излучающих частиц. При этом механизм ускорения должен обеспечить высокую эффективность конверсии энергии релятивистского течения в ускоренные частицы [40, 41]. Моделирование релятивистских джетов из центрального источника, как правило, предполагает изначально высокую степень замагниченности плазмы (см., например, [127, 128]). Существует проблема конверсии энергии магнитного поля джета в кинетическую энергию течения или непосредственно в ускоренные частицы посредством механизмов перезамыкания магнитного поля [129–133]. Протяжённые энергетические распределения частиц с жёсткой компонентой, характерной для типичных спектров гамма-всплесков (спектр Банда), могут быть сформированы посредством механизма Ферми в области столкновения внутренних ударных волн в модели релятивистского диссипативного течения. Особенность ускорения Ферми релятивистскими течениями с магнитными флуктуациями заключается в сильном изменении энергии частицы в одном акте рассеяния, что требует выхода за рамки стандартных уравнений Фоккера – Планка [134, 135]. При этом формирование жёсткого спектра ускоренных лептонов $\propto p^{-\alpha}$ (где p — импульс частицы) с показателем степенного спектра $\alpha \sim 1$, ответственного за быструю фазу всплеска, возможно как в релятивистских течениях с сильно замагниченной неоднородной плазмой, так и в случае течений с малой степенью замагниченности [136, 137]. Далее, на стадии расширения эjectированной центральным источником энергии в околосвёздную среду, наблюдаемой как послесвечение, релятивистские ударные волны распространяются в

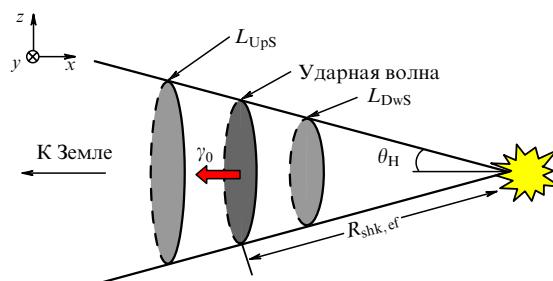


Рис. 13. Схема, иллюстрирующая модель распространения релятивистской ударной волны, инициированной эJECTОЙ источника гамма-всплеска в околосвёздной среде [138]. Модель позволяет рассчитывать спектры ускоренных частиц и энергетического излучения на фазе послесвечения гамма-всплеска, показанные на рис. 14.

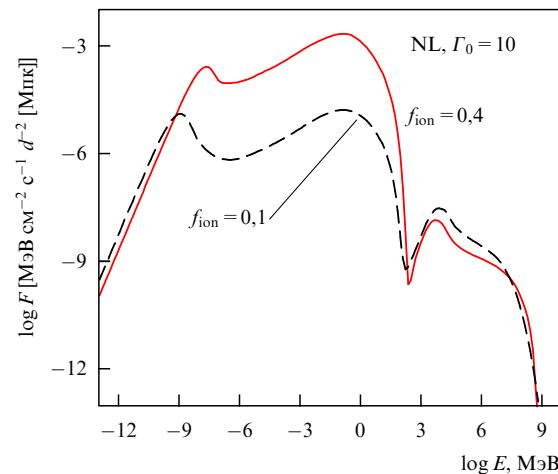


Рис. 14. Модельный спектр послесвечения гамма-всплеска [138]. Расчёт функций распределения излучающих частиц, ускоренных релятивистской ударной волной с начальным лоренц-фактором $\Gamma_0 = 10$, выполнен нелинейным методом Монте-Карло. Геометрия распространения ударной волны показана на рис. 13.

незамагниченной плазме (рис. 13) и могут ускорять космические лучи вплоть до сверхвысоких энергий [67, 136, 138, 139].

Моделирование спектров излучения на фазе послесвечения предполагает комплексный расчёт микроскопической структуры фронта ударной волны и макроскопического МГД-течения за ней в условиях взаимодействия энергетичной эJECTЫ, состоящей из изначально замагниченной, вероятно, электрон-позитронной плазмы, с незамагниченной электрон-ионной плазмой. Полное моделирование предполагает кинетические расчёты с большим динамическим диапазоном, недостижимым современными компьютерами. Спектры нетеплового излучения послесвечения, представленные на рис. 14, были рассчитаны [138] в предположении упрощённой модели, в которой релятивистская ударная волна сформирована и распространяется в околосвёздной электрон-ионной плазме. В модели параметризована доля энергии ионов, f_{ion} , переданная электронам и позитронам при их первом пересечении ударной волны. Расчёт распределения ускоренных частиц выполнен нелинейным методом Монте-Карло, учитывающим обратное влияние ускоренных частиц на структуру фронта волны. Спектры излучения от оптических до ГэВ-фотонов существенно зависят от модельного параметра f_{ion} , характеризующего эффективность инъекции электронов.

5. Перспективы исследования гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров

Исследования гамма-всплесков и других космических транзиентных источников, связанных с катастрофическими процессами коллапса массивных звёзд, слияния нейтронных звёзд и чёрных дыр в двойных системах, приливного разрушения звёзд массивными чёрными дырами или быстрого преобразования магнитной энергии в излучение в мягких гамма-репитерах, включены сегодня в наблюдательные программы крупных телескопов во всех диапазонах спектра электромагнитного излучения, нейтринных телескопов и детекторов гравитационных волн.

Гамма-всплески, являясь наиболее яркими объектами во Вселенной и наблюдаемыми на космологических расстояниях до $z \sim 10$, представляют уникальный инструмент для исследования ранней Вселенной и параметров её эволюции. В связи с этим большие ожидания связаны с возможностью детектирования послесвечения гамма-всплесков с высокими красными смещениями в ИК-диапазоне с помощью космического телескопа им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope, JWST), планируемого к запуску в 2021 г.

Для менее удалённых гамма-всплесков, в пределах $z \lesssim 1$, в будущем возможно детектирование сопровождающих их гравитационных волн от слияний двойных нейтронных звёзд или нейтронной звезды и чёрной дыры новыми проектируемыми обсерваториями: Einstein gravitational wave Telescope (ET) [140] и Cosmic Explorer (CE) [141], запуск которых планируется после 2030 г. Эти инструменты являются наземными интерферометрами с расположенным в виде треугольника плечами $\sim 10\text{--}40$ км, что даёт возможность измерять поляризацию гравитационных волн. Для обсерватории Advanced LIGO, которая запущена в апреле 2019 г., горизонт детектирования слияний двойных нейтронных звёзд составит около 200 Мпк, что позволит регистрировать от нескольких до сотен событий, схожих с GW 170817, в год. Для одновременного наблюдения таких событий в жёстком рентгеновском и гамма-диапазонах необходимы инструменты с широким полем зрения, способные быстро осмотреть область локализации гравитационно-волнового события и локализовать вероятный источник электромагнитного излучения.

В настоящее время планируются две специализированные космические миссии, нацеленные на изучение гамма-всплесков и других транзиентов: SVOM [142] и THESEUS [143, 144]. Предполагается, что обе миссии будут оборудованы несколькими инструментами, покрывающими диапазон от гамма-излучения (до $\sim 5\text{--}20$ МэВ) до оптического. При этом они будут иметь широкое поле зрения (2π ср — телескоп ECLAIR на SVOM и 2π ср — XGIS на THESEUS) и будут способны локализовать источник излучения в мягком гамма-диапазоне с точностью локализации менее 10 угл. мин. Эти инструменты позволят не только эффективно отождествлять источники гравитационных волн, но и, благодаря низкому (порядка нескольких кэВ) энергетическому порогу основных инструментов и их высокой чувствительности, регистрировать гамма-всплески до расстояний $z \sim 10$, что существенно расширит знания об условиях в ранней Вселенной.

Вероятно, дальнейший прогресс в понимании природы магнитаров: механизмов генерации колоссальных магнитных полей и их "генетической" связи с другими классами нейтронных звёзд — будет связан с открытием новых представителей классов магнитаров и мягких гамма-репитеров благодаря планируемым обсерваториям с широким полем зрения, более чувствительным к транзиентным событиям в мягком рентгеновском диапазоне (eXTP [145], THESEUS [143]). Для известных объектов перспективными являются поляриметрические наблюдения в рентгеновском диапазоне для реконструкции геометрии магнитных полей, многоволновые наблюдения пульсарных туманностей магнитаров могут раскрыть историю активности этих источников. Вероятной представляется связь магнитаров с источниками быстрых радиовсплесков (FRB, см. обзор [146]).

Исследования космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров в ФТИ им. А.Ф. Иоффе планируется продолжить в рамках проектов "Спектр-УФ" (эксперимент "Конус-УФ") и "Интергелиозонд" (эксперимент "Геликон-И"). Состав аппаратуры обоих экспериментов в сочетании с характеристиками орбиты указанных обсерваторий позволит реализовать непрерывный обзор всей небесной сферы и современную программу измерения временных и спектральных характеристик космических гамма-всплесков, мягких гамма-репитеров, солнечных вспышек и других транзиентных явлений в широком диапазоне энергий 8 кэВ–15 МэВ. Высокое временное разрешение в сочетании со значительным удалением КА от Земли позволит с высокой точностью локализовать источники коротких гамма-всплесков триангуляционным методом и надёжно отождествлять их с источниками гравитационных волн.

В ФТИ проводится разработка чувствительных кремниевых детекторов для наблюдений высоко-энергетичного излучения транзиентных источников в рамках международных проектов ALEGRO [147] и eASTROGAM [148]. Наземный высокогорный черенковский телескоп ALEGRO предназначен для высокочувствительных наблюдений фотонов с энергиями начиная с нескольких ГэВ, т.е. предельно низкой энергии, достижимой в атмосферных черенковских телескопах.

Обсерватория eASTROGAM [148] позволит, наряду с чувствительными наблюдениями послесвечения гамма-всплесков в диапазоне МэВ–ГэВ, измерять поляризацию гамма-излучения, что существенно для анализа механизмов излучения.

Авторы благодарят рецензента К.А. Постнова за полезные замечания. Работа Р.Л.А., Д.Д.Ф., Д.С.С., М.В.У., А.Е.Ц., А.В.К. и А.Л.Л. по исследованию гамма-всплесков и других транзиентных событий в эксперименте КОНУС–ВИНД поддержана грантом РНФ 17-12-01378. Работа А.М.Б. по моделированию астрофизических процессов с экстремальными по энергетике потоками электромагнитного излучения поддержана грантом РНФ 16-12-10225.

Дополнение при корректуре

Наблюдения и модели гамма-всплесков до настоящего времени не дали однозначного ответа на фундаментальные вопросы о механизмах излучения и о величинах магнитных полей в области формирования как собственного излучения, так и послесвечения гамма-всплесков [149, 150]. Особый интерес для выяснения природы центрального источника представляет механизм формирования собственного излучения гамма-всплеска. Наблюдения с высокой чувствительностью детекторов КОНУС, Fermi-GBM, Swift-BAT и др. позволили получить спектры большой выборки всплесков в диапазоне энергий 15–150 кэВ. В то же время наблюдения собственного излучения всплесков при энергиях ниже 15 кэВ выполнены лишь для нескольких десятков всплесков.

Совместный анализ небольшой выборки всплесков, наблюдавшихся двумя телескопами — Swift-BAT и Swift-XRT — позволил построить спектры в диапазоне 0,5–150 кэВ [151–153].

Класс моделей гамма-всплесков, предлагающих синхротронный механизм излучения нетепловых ускоренных электронов и позитронов, предсказывает спектр фотонов, состоящий из нескольких кусочно-степенных

участков (аппроксимируемых законом $dF/dE \sim E^\Gamma$) и, соответственно, нескольких изломов спектра. Спектр имеет временну́ю эволюцию, поэтому сравнение с данными наблюдений требует учёта разрешения по времени детекторов и одновременности наблюдений в случае наблюдений несколькими приборами. При самых низких энергиях изломы спектра могут соответствовать переходу от режима синхротронного самопоглощения (с фотонным индексом $\Gamma = 1$) к спектру с фотонным индексом $\Gamma = -2/3$, который соответствует излучению электронов и позитронов с энергиями около минимальных энергий нетеплового распределения. При более высоких энергиях форма спектра зависит от эффективности потерь энергии лептонов на синхротронное и комптоновское излучения. В режиме быстрого охлаждения частицы нетеплового спектра теряют основную часть энергии на излучение в пределах источника. В противном случае имеет место режим медленного охлаждения (или промежуточный случай умеренного охлаждения). Для степенного распределения нетепловых электронов в источнике ($dN/dE \sim E^{-s}$) фотонные индексы излучения равны $\Gamma = -(s+2)/2$ или $\Gamma = -(s+1)/2$ в режимах быстрого и медленного охлаждения соответственно. Существующие модели ускорения нетепловых частиц для фазы собственного излучения предсказывают спектры лептонов, ускоренных сильной турбулентностью, с индексами $s = 1$ до некоторой максимальной энергии [134], а для фазы послесвечения — $s > 2$ [41].

В спектрах излучения восьми из десяти длинных гамма-всплесков авторы работы [152] обнаружили излом спектра на низких энергиях. Полученные в работах [151, 152] фотонные индексы в области энергий ниже излома хорошо согласуются с ожидаемым в модели синхротронного излучения значением $\Gamma = -2/3$ до энергии излома спектра. Выше энергии излома, но до энергий фотонов, соответствующих пику функции распределения Банда, фотонный индекс $\Gamma = -3/2$. Излом не был обнаружен в исследованных коротких гамма-всплесках. Однако в них фотонный индекс излучения с энергиями ниже пика очень жёсткий и совместим с индексом $\Gamma = -2/3$. Исследование спектров всплесков с привлечением мягкого рентгеновского излучения позволило обнаружить изломы в спектрах и получить удовлетворительное согласие данных наблюдений с гипотезой о синхротронном механизме излучения в режиме с умеренным темпом охлаждения излучающих лептонов. Данные наблюдений в диапазоне 0,5–150 кэВ также не противоречат комбинированной модели с вкладами чернотельного излучения фотосфера и нетеплового степенного распределения на высоких энергиях. Для ограниченной выборки из нескольких гамма-всплесков удалось наблюдать оптическую компоненту с временну́ю переменностью, характерной для гамма-всплесков [153]. В этих всплесках синхротронное излучение нетепловых частиц со степенными распределениями по энергии позволяет объяснить данные наблюдений, а простая однозонная модель с чернотельной компонентой несовместима с данными. Для согласования с данными наблюдений требуется введение дополнительных изломов спектра, что сложно обосновать. Авторы работ [151–153] отметили, что интерпретация их наблюдений в рамках стандартных сценариев предполагает магнитное поле в области излучения собственно всплеска менее 100 Гс (в сопутствующей системе отсчёта), что на порядки

меньше значений, предполагавшихся до настоящего времени.

Пока получены первые результаты анализа спектров собственного излучения всплесков с временным разрешением, что демонстрирует возможности детальной проверки моделей и ускорения частиц в гамма-всплесках. Как уже отмечалось ранее, разрешённые во времени измерения поляризации собственного излучения гамма-всплесков в совокупности со спектральными данными в широком диапазоне энергий позволят проверить гипотезы о синхротронных компонентах в излучении гамма-всплесков [154].

Список литературы

1. Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A *Astrophys. J.* **182** L85 (1973)
2. Голенецкий С В и др. *ПТЭ* (4) 203 (1969)
3. Голенецкий С В, Мазец Е П *Письма в ЖЭТФ* **14** 201 (1971); Golenetskii S V, Mazets E P *JETP Lett.* **14** 131 (1971)
4. Golenetskii S V et al. *Astrophys. Lett.* **9** 69 (1971)
5. Мазец Е П, Голенецкий С В, Ильинский В Н *Письма в ЖЭТФ* **19** 126 (1971); Mazets E P, Golenetskii S V, Il'inskii V N *JETP Lett.* **19** 77 (1971)
6. Голенецкий С В и др. *Космические исследования* **12** 779 (1974); Golenetskii S V, Il'inskii V N, Mazets E P *Cosmic Res.* **12** 706 (1974)
7. Mazets E P et al. *AIP Conf. Proc.* **101** 36 (1983)
8. Mazets E P et al. *Astrophys. Space Sci.* **80** 3 (1981)
9. Golenetskii S V et al. *Nature* **306** 451 (1983)
10. Kouveliotou C et al. *Astrophys. J.* **413** L101 (1993)
11. Band D et al. *Astrophys. J.* **413** 281 (1993)
12. Aptekar R L et al. *Space Sci. Rev.* **71** 265 (1995)
13. Mazets E P et al. *Nature* **282** 587 (1979)
14. Evans W D et al. *Astrophys. J.* **237** L7 (1980)
15. Cline T L et al. *Astrophys. J.* **237** L1 (1980)
16. Cline T L et al. *Astrophys. J.* **255** L45 (1982)
17. Barat C et al. *Astron. Astrophys.* **79** L24 (1979)
18. Мазец Е П, Голенецкий С В, Гурьян В Н *Письма в Астрон. журн.* **5** 641 (1979); Mazets E P, Golenetskii S V, Guryan Y A *Sov. Astron. Lett.* **5** 641 (1979)
19. Laros J G et al. *Astrophys. J.* **320** L111 (1987)
20. Kouveliotou C et al. *Astrophys. J.* **322** L21 (1987)
21. Kuiper L et al. *Astrophys. J.* **645** 556 (2006)
22. Kaspi V M, Beloborodov A M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **55** 261 (2017)
23. Mereghetti S, Pons J A, Melatos A *Space Sci. Rev.* **191** 315 (2015)
24. Мазец Е П и др. *Письма в Астрон. журн.* **25** 735 (1999); Mazets E P et al. *Astron. Lett.* **25** 635 (1999)
25. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 3 (2007); Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 1 (2007)
26. Mazets E P et al. *Astrophys. J.* **680** 545 (2008)
27. Mazets E P, Golenetskii S V *Astrophys. Space Sci.* **75** 47 (1981)
28. Mazets E P et al. *Astrophys. Space Sci.* **84** 173 (1982)
29. Hurley K *Adv. Space Res.* **47** 1337 (2011)
30. Svinkin D S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **447** 1028 (2015)
31. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 22 (2007); Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 19 (2007)
32. Svinkin D S et al. *Astrophys. J. Suppl.* **224** 10 (2016)
33. Duncan R C, Thompson C *Astrophys. J.* **392** L9 (1992)
34. Thompson C, Duncan R C *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **275** 255 (1995)
35. Kouveliotou C et al. *Nature* **393** 235 (1998)
36. Fishman G J et al. *Astrophys. J. Suppl.* **92** 229 (1994)
37. Costa E et al. *Nature* **387** 783 (1997)
38. van Paradijs J et al. *Nature* **386** 686 (1997)
39. Bloom J S et al. *Astrophys. J.* **507** L25 (1998)
40. Mészáros P *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 137 (2002)

41. Piran T *Rev. Mod. Phys.* **76** 4 1143 (2004)
42. Gehrels N, Ramirez-Ruiz E, Fox D B *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **47** 567 (2009)
43. Willingale R, Mészáros P *Space Sci. Rev.* **207** 63 (2017)
44. Metzger M R et al. *Nature* **387** 878 (1997)
45. Gehrels N et al. *Astrophys. J.* **611** 1005 (2004)
46. Gehrels N et al. *Nature* **437** 851 (2005)
47. Meegan C et al. *Astrophys. J.* **702** 791 (2009)
48. Atwood W B et al. *Astrophys. J.* **697** 1071 (2009)
49. Ackermann M et al. *Science* **343** 42 (2014)
50. Tsvetkova A et al. *Astrophys. J.* **850** 161 (2017)
51. Pal'shin V D et al. *Astrophys. J. Suppl.* **207** 38 (2013)
52. Hurley K et al. *Astrophys. J. Suppl.* **207** 39 (2013)
53. Lipunov V M *Astron. Astrophys. Trans.* **29** 143 (2016)
54. Singer L P et al. *Astrophys. J.* **806** 52 (2015)
55. Bellm E, in *The Third Hot-Wiring the Transient Universe Workshop, HTU-III, 13–15 November, 2013, Santa Fe, NM* (Eds P R Wozniak et al.) p. 27
56. Аптекарь Р Л и др. *УФН* **180** 420 (2010); Aptekar R L et al. *Phys. Usp.* **53** 401 (2010)
57. Levan A J et al. *Astrophys. J.* **781** 13 (2014)
58. Evans P A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **444** 250 (2014)
59. Frederiks D D et al. *Astrophys. J.* **779** 151 (2013)
60. Greiner J et al. *Astron. Astrophys.* **498** 89 (2009)
61. Atteia J et al. *Astrophys. J.* **837** 119 (2017)
62. Stanek K Z et al. *Astrophys. J.* **522** L39 (1999)
63. Galama T J et al. *Nature* **395** 670 (1998)
64. Iwamoto K et al. *Nature* **395** 672 (1998)
65. Cano Z et al. *Adv. Astron.* **2017** 8929054 (2017)
66. Soderberg A M et al. *Nature* **463** 513 (2010)
67. Быков А М *УФН* **188** 894 (2018); Bykov A M *Phys. Usp.* **61** 805 (2018)
68. Kann D A et al. *Astron. Astrophys.* **624** A143 (2019)
69. Woosley S E, Eastman R G, Schmidt B P *Astrophys. J.* **516** 788 (1999)
70. Woosley S E, Heger A *Astrophys. J.* **752** 32 (2012)
71. Липунов В М, Постнов К А, Прохоров М Е *Астрон. журн.* **78** 276 (2001); Lipunov V M, Postnov K A, Prokhorov M E *Astron. Rep.* **45** 236 (2001)
72. Atteia J *Astron. Astrophys.* **328** L21 (1997)
73. Friedman A S, Bloom J S *Astrophys. J.* **627** 1 (2005)
74. Amati L et al. *Astron. Astrophys.* **390** 81 (2002)
75. Yonetoku D et al. *Astrophys. J.* **609** 935 (2004)
76. Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D *Astrophys. J.* **616** 331 (2004)
77. MacFadyen A I, Woosley S E *Astrophys. J.* **524** 262 (1999)
78. Hopkins A M *Astrophys. J.* **615** 209 (2004)
79. Bouwens R J et al. *Nature* **469** 504 (2011)
80. Hanish D J et al. *Astrophys. J.* **649** 150 (2006)
81. Thompson R I et al. *Astrophys. J.* **647** 787 (2006)
82. Li L-X *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **388** 1487 (2008)
83. Komissarov S S, Barkov M V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **402** 1 L25 (2010)
84. de Souza R S, Yoshida N, Ioka K *Astron. Astrophys.* **533** A32 (2011)
85. Tanvir N R et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **483** 5380 (2019)
86. Petitjean P et al. *Space Sci. Rev.* **202** 195 (2016)
87. Ackermann M et al. *Astrophys. J.* **716** 1178 (2010)
88. Amelino-Camelia G et al. *Nature* **393** 763 (1998)
89. Abdo A A et al. *Nature* **462** 331 (2009)
90. Vestrand W T et al. *Nature* **442** 172 (2006)
91. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
92. Gao H, Wu X-F, Mészáros P *Astrophys. J.* **810** 121 (2015)
93. Hulse R A, Taylor J H *Astrophys. J.* **195** L51 (1975)
94. Блинников С И и др. *Письма в Астрон. журн.* **10** 422 (1984); Blinnikov S I et al. *Sov. Astron. Lett.* **10** 177 (1984)
95. Paczynski B *Astrophys. J.* **308** L43 (1986)
96. Eichler D et al. *Nature* **340** 126 (1989)
97. Narayan R, Paczynski B, Piran T *Astrophys. J.* **395** L83 (1992)
98. Abramovici A et al. *Science* **256** 325 (1992)
99. Lattimer J M et al. *Astrophys. J.* **213** 225 (1977)
100. Berger E *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **52** 43 (2014)
101. Abbott B P et al. *Astrophys. J.* **848** L12 (2017)
102. Svinkin D et al. *GCN Circ.* (21515) (2017); <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/21515.gcn3>
103. Abbott B P et al. *Astrophys. J.* **848** L13 (2017)
104. D'Avanzo P et al. *Astron. Astrophys.* **613** L1 (2018)
105. Mooley K P et al. *Nature* **561** 355 (2018)
106. Mooley K P et al. *Astrophys. J. Lett.* **868** L11 (2018)
107. Blanchard P K et al. *Astrophys. J.* **848** L22 (2017)
108. Cowperthwaite P S et al. *Astrophys. J.* **848** L17 (2017)
109. Nicholl M et al. *Astrophys. J.* **848** L18 (2017)
110. Kasen D et al. *Nature* **551** 80 (2017)
111. Буренин Р А *Письма в Астрон. журн.* **26** 323 (2000); Burenin R A *Astron. Lett.* **26** 269 (2000)
112. Frederiks D D et al., in *Third Rome Workshop on Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era. Proc. of the Conf, 17–20 September 2002, Rome, Italy* (ASP Conf. Series, Vol. 312, Eds M Feroci et al.) (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2004) p. 197
113. Norris J P, Bonnell J T *Astrophys. J.* **643** 266 (2006)
114. Cavallo G, Rees M J *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **183** 359 (1978)
115. Goodman J *Astrophys. J.* **308** L47 (1986)
116. Shemi A, Piran T *Astrophys. J.* **365** L55 (1990)
117. Rees M J, Mészáros P *Astrophys. J.* **430** L93 (1994)
118. Woosley S E, Bloom J S *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **44** 507 (2006)
119. Woosley S, in *Gamma-Ray Bursts* (Cambridge Astrophysics Series, Vol. 51, Eds C Kouveliotou, R A M J Wijers, S Woosley) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2012)
120. Lazzati D et al. *Astrophys. J.* **750** 68 (2012)
121. Kasliwal M M et al. *Science* **358** 1559 (2017)
122. Margutti R et al. *Astrophys. J.* **848** L20 (2017)
123. Bromberg O et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **475** 2971 (2018)
124. Soderberg A M et al. *Nature* **453** 469 (2008)
125. Suwa Y, Ioka K *Astrophys. J.* **726** 107 (2011)
126. Aloy M A, Cuesta-Martínez C, Obergaulinger M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **478** 3576 (2018)
127. Lyutikov M *New J. Phys.* **8** 119 (2006)
128. Granot J et al. *Space Sci. Rev.* **191** 471 (2015)
129. Zhang B, Yan H *Astrophys. J.* **726** 90 (2011)
130. Kagan D et al. *Space Sci. Rev.* **191** 545 (2015)
131. Lemoine M, Pelletier G *Comptes Rendus Phys.* **16** 628 (2015)
132. Uzdensky D A, in *Magnetic Reconnection: Concepts and Applications* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 427, Eds W Gonzalez, E Parker) (Switzerland: Springer, 2016) p. 473
133. Blandford R et al. *Space Sci. Rev.* **207** 291 (2017)
134. Bykov A M, Meszaros P *Astrophys. J.* **461** L37 (1996)
135. Bykov A et al. *Space Sci. Rev.* **173** 309 (2012)
136. Xu S, Yang Y, Zhang B *Astrophys. J.* **853** 43 (2018)
137. Lemoine M, Waxman E J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **11** 009 (2009)
138. Warren D C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **452** 431 (2015)
139. Bykov A M et al. *Space Sci. Rev.* **214** 41 (2018)
140. Sathyaprakash B et al. *Class. Quantum Grav.* **29** 124013 (2012)
141. LIGO Scientific Collab. Technical Note, LIGO-T1700231 (2017), <https://dcc.ligo.org/LIGO-T1700231/public>
142. Cordier B et al., arXiv:1512.03323
143. Amati L et al. *Adv. Space Res.* **62** 191 (2018)
144. Stratta G et al. *Adv. Space Res.* **62** 662 (2018)
145. Zhang S N et al., in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray* Vol. 9905 (2016) p. 99051Q
146. Попов С Б, Постнов К А, Пширков М С *УФН* **188** 1063 (2018); Popov S B, Postnov K A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **61** 965 (2018)

147. Быков А М и др. *ЖТФ* **87** 803 (2017); Bykov A M et al. *Tech. Phys.* **62** 819 (2017)
148. De Angelis A et al. (The e-ASTROGAM Collab.) *Exp. Astron.* **44** 25 (2017)
149. Mészáros P *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67** 45 (2015)
150. Božnjak Ž, Daigne F *Astron. Astrophys.* **568** A45 (2014)
151. Oganesyan G et al. *Astron. Astrophys.* **616** A138 (2018)
152. Ravasio M E et al. *Astron. Astrophys.* **625** A60 (2019)
153. Oganesyan G et al., arXiv:1904.11086
154. De Angelis A et al. *J. High Energy Astrophys.* **19** 1 (2018)

**Cosmic gamma-ray bursts and soft gamma-repeaters — observations and modeling of extreme astrophysical phenomena
(100th anniversary of the Ioffe Institute)**

**R.L. Aptekar*, A.M. Bykov, S.V. Golenetskii, D.D. Frederiks, D.S. Svinkin,
M.V. Ulanov, A.E. Tsvetkova, A.V. Kozlova, A.L. Lysenko**
Ioffe Institute, ul. Politekhnicheskaya 26, 194021 St. Petersburg, Russian Federation
*E-mail: * aptekar@mail.ioffe.ru*

Cosmic gamma-ray bursts (GRBs) and soft gamma-ray repeaters (SGRs) are the brightest sources of high-energy electromagnetic radiation. For many years, GRB and SGR studies have been among the major basic research areas at the Ioffe Institute. The physical processes that power immense luminosity of the cosmic gamma-ray sources are of utmost interest since they enable exploring physical phenomena in the vicinities of stellar-mass black holes and neutron stars, whose magnetic fields are probably larger than the critical value for vacuum polarization, i.e., under the conditions inaccessible for terrestrial laboratories. Owing to high luminosity, GRBs may be detected out to the edge of the visible Universe thus enabling one to study how first stars have emerged and probe properties of matter along the entire line of sight to the sources. We briefly review the results of modern multi-wavelength studies of cosmic gamma-ray bursts and soft gamma-repeaters. The history of development of, main accomplishments in, and prospects for studies of GRBs and SGRs, a vibrant area of basic astrophysical research at the Ioffe Institute, are presented. We describe in detail the results obtained with several generations of KONUS detectors that have been designed and manufactured at the Ioffe Institute. Observational data obtained by space-based instruments are effectively complemented by theoretical modeling of astrophysical processes that exhibit extreme energy release. We also discuss prospects for the GRB and SGR studies including future experiments scheduled at Ioffe Institute.

Keywords: cosmic gamma-ray bursts, soft gamma-repeaters, burst light curves, burst energy spectra

PACS numbers: 95.55.Ka, 97.80.Gm, 98.70.Rz

Bibliography — 154 references

Received 23 August 2018, revised 23 November 2018

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (8) 785–802 (2019)

Physics – Uspekhi **62** (8) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.11.038488>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.11.038488>