

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Быстрые радиовсплески

С.Б. Попов, К.А. Постнов, М.С. Пширков

Феномен быстрых радиовсплесков (БРВ) (fast radio bursts, FRB) был открыт в 2007 г. Это мощные ($10^{-1} - 10^2$ Ян) одиночные импульсы радиоизлучения с характерной длительностью порядка нескольких миллисекунд, большой мерой дисперсии и рекордно высокой яркостной температурой, свидетельствующей о нетепловом когерентном механизме излучения. На март 2018 г. обнаружено 32 таких события. Известен также один источник повторяющихся всплесков, от которого зарегистрировано уже несколько сотен импульсов. Частота событий оценивается в несколько тысяч всплесков на всём небе в сутки (без учёта повторных всплесков). Большая мера дисперсии и изотропное распределение на небесной сфере свидетельствуют о вероятном внегалактическом происхождении этих импульсов. С момента обнаружения БРВ выдвинуто множество гипотез о их возможной природе, однако до сих пор происхождение этих транзиентов остаётся невыясненным. Наиболее перспективные модели связаны со вспышечным излучением магнитаров — нейтронных звёзд, активность которых обусловлена диссипацией энергии их магнитных полей, или с аналогом гигантских радиоимпульсов, наблюдаемых от некоторых радиопульсаров — вращающихся нейтронных звёзд с сильным магнитным полем. Увеличение статистики наблюдаемых всплесков и уточнение характеристик популяции БРВ позволит использовать их как новый инструмент для изучения межгалактической среды, оценок космологических параметров, а также для проверки фундаментальных физических теорий.

Ключевые слова: быстрые радиовсплески, нейтронные звёзды, радиоастрономия, транзиентные источники

PACS numbers: 95.85.Bh, 95.85.Fm, 97.60.Jd

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038313>

Содержание

1. Введение (1063).
 - 1.1. Нетепловой характер излучения быстрых радиовсплесков.
 - 1.2. Параметры энерговыделения быстрых радиовсплесков.
 - 1.3. Особенности детектирования коротких радиовсплесков.
2. История открытия быстрых радиовсплесков (1066).

С.Б. Попов. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация
E-mail: sergepolar@gmail.com

К.А. Постнов. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация; Казанский федеральный университет, Кремлёвская ул. 18, 420008 Казань, Российская Федерация
E-mail: kpostnov@gmail.com

М.С. Пширков. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119234 Москва, Российская Федерация; Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация; Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Пушинская радиоастрономическая обсерватория, 142290 Пушкино, Московская обл., Российская Федерация
E-mail: pshirkov@gmail.com

Статья поступила 7 декабря 2017 г.

- 2.1. Ключевые моменты раннего этапа исследования быстрых радиовсплесков. 2.2. Перитоны.
 3. Современные наблюдения и феноменология быстрых радиовсплесков (1067).
 - 3.1. Одиночные (неповторяющиеся) всплески. 3.2. Источник повторных всплесков.
 4. Гипотезы о природе быстрых радиовсплесков (1072).
 - 4.1. Менее перспективные гипотезы. 4.2. Наиболее перспективные гипотезы. 4.3. Быстрые радиовсплески как зонды внегалактической среды и инструмент для проверки физических и космологических теорий.
 5. Заключение (1077).
- Список литературы (1078).

1. Введение

Транзиентные (т.е. внезапно появляющиеся на короткое время) космические источники электромагнитного излучения дают ценную информацию об астрофизических объектах. Их наблюдения в разных диапазонах электромагнитного спектра составляют существенную часть всех современных астрофизических исследований. Транзиентные источники (сокращённо — транзиенты) могут быть связаны с известными объектами (например, вспышками на звёздах), могут быть повторяющимися (например, гигантскими импульсами от радиопульсаров) или представлять собой уникальные события (например, явления, связанные со взрывом сверхновых или слиянием двойных нейтронных звёзд). Очевидно, что эффективность обнаружения транзиентных феноменов зависит от чувствительности конкретного детектора, его поля зрения, длительности наблюдений, продолжи-

тельности самого транзитного события, а также от фона и возможных помех.

В разных диапазонах электромагнитного спектра астрономические наблюдения транзиев имеют свои особенности. В радиодиапазоне, о котором в основном пойдёт речь в настоящей статье, известно уже довольно много разнообразных транзитных источников (см. обзор [1]). Некоторые из них остаются не отождествлёнными с другими астрономическими объектами, и их природа совершенно неизвестна, как, например, природа источника в галактическом центре GCRT J1745-3009 [2, 3]. Вспышки GCRT J1745-3009 имеют характерные времена порядка нескольких минут при регистрируемом потоке около 1 Ян. Есть более медленные радиотранзиенты (например, активные ядра галактик), а есть намного более быстрые.

В настоящей статье мы будем рассматривать быстрые транзитные вспышки (всплески) в радиодиапазоне, наблюдаемые на частотах от нескольких сотен МГц до нескольких ГГц современными радиотелескопами. Из большого разнообразия радиотранзиев (см., например, обзор [1]) в настоящее время наибольшее внимание привлекают так называемые быстрые радиовсплески БРВ (англ. Fast Radio Bursts, FRB), открытые по архивным данным Парковского радиобзора неба (Parkes Radio Sky Survey) [4] в 2007 г. Большой интерес к БРВ обусловлен их необычными свойствами — малой длительностью $W \sim 1-10$ мс, высокой интенсивностью излучения (спектральная плотность потока S_v в пике до нескольких сотен Ян¹), большой мерой дисперсии² $DM \sim \sim 500$ пк см⁻³ и высокой частотой возникновения (порядка нескольких тысяч событий в сутки на всей небесной сфере [5]).

1.1. Нетепловой характер излучения быстрых радиовсплесков

Одной из отличительных черт БРВ, рассматриваемых в этой статье, является большое значение меры дисперсии этих событий, значительно превосходящее меру дисперсии, набираемую в галактической плазме в соответствующем направлении, что говорит о больших расстояниях до источников, указывая на их внегалактическую природу. Это также подтверждается изотропным (насколько это можно установить при малой статистике и неоднородном покрытии неба в разных обзорах) распределением найденных БРВ на небесной сфере. Большая амплитуда и малая длительность БРВ свидетельствуют о высокой яркостной температуре излучения и о нетепловом (когерентном) механизме их образования. В рэлей-джинсовском диапазоне ($h\nu \ll k_B T$) яркостная температура T_b выражается как

$$k_B T_b = I_v \frac{c^2}{2\nu^2}, \quad (1)$$

где I_v — интенсивность излучения [Вт м⁻² Гц⁻¹ ср⁻¹], c — скорость света, ν — частота, k_B — постоянная Больцмана. Предполагая, что источник виден на небе с угловым размером θ , и считая, что длительность всплеска ограничена причинно-связанной областью $W \sim l/c$, где $l = D\theta$ — поперечный размер источника на расстоянии D ,

находим оценку яркостной температуры:

$$2\pi k_B T_b = \frac{S_v D^2}{(W\nu)^2}, \quad (2)$$

подставляя сюда характерные значения, получим

$$T_b \approx 10^{35.8} \left(\frac{S_v}{1 \text{ Ян}} \right) \left(\frac{(D/1 \text{ Гпк})}{(\nu/1 \text{ ГГц})(W/1 \text{ мс})} \right)^2 [\text{К}]. \quad (3)$$

(Здесь все величины даны в лабораторной системе наблюдателя.) Если движение источника релятивистское, то это выражение для яркостной температуры в собственной системе источника следует уменьшить в $\sim \gamma$ раз, где $\gamma \gg 1$ — лоренц-фактор релятивистского движения излучающей области³. Из этих оценок видно, что даже для БРВ с галактических расстояний (несколько килопарсек) яркостные температуры будут заведомо выше 10^{12} К.

Следуя [1, 7], удобно изобразить различные популяции радиотранзиев на плоскости $L_\nu - \nu W$, где ν — частота, на которой наблюдается объект, W — ширина импульса, L_ν — светимость (мощность излучения) на единицу частотного интервала (рис. 1). В радиоастрономии часто используют "псевдосветимость" $L_{\text{psd},\nu} = S_v D^2$, получаемую из наблюдаемого потока и оценки расстояния до источника. Именно с ней часто отождествляют L_ν . При построении рис. 1 мы следовали этой традиции.

При яркостных температурах выше $\sim 10^{12}$ К излучение должно быть нетепловым (когерентным), так как в случае теплового излучения при более высоких температурах обратное комптоновское рассеяние быстро приводило бы к стремительной потере энергии электронами [8]. Радиоизлучение от пульсаров, вращающихся радиотранзиев, активных ядер галактик и быстрых радиовсплесков относится к этой категории. Радиоизлучение от некоторых рентгеновских двойных систем, новых звёзд, вспыхивающих звёзд и бурых карликов, а также большей части сверхновых обычно является тепловым (некогерентным).

1.2. Параметры энергосвечения быстрых радиовсплесков

Важнейшей характеристикой БРВ является их энергосвечение. Оценивая удельную радиосветимость источника на расстоянии D по наблюдаемой спектральной плотности потока S_v в предположении излучения в телесный угол $\Delta\Omega$, $L_\nu = 4\pi D^2 S_v \Delta\Omega / (4\pi)$, и полагая, что выделившаяся во всплеске энергия $\Delta E = \nu L_\nu W$, находим

$$\Delta E \sim \nu S_v W 4\pi D^2 \left(\frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) = 10^{39} [\text{эрг}] \left(\frac{\nu}{1 \text{ ГГц}} \right) \times \left(\frac{S_v}{1 \text{ Ян}} \right) \left(\frac{W}{1 \text{ мс}} \right) \left(\frac{D}{1 \text{ Гпк}} \right)^2. \quad (4)$$

Релятивистское движение источника уменьшает это значение в собственной системе источника K' в $D^3 \simeq \gamma^3$ раз (излучение в K' считается изотропным, так что $\Delta\Omega'/(4\pi) = 1$). Для источников на космологических рас-

¹ Ян (Янский) — внесистемная единица измерения спектральной плотности потока энергии, 1 Ян = 10^{-26} Вт м⁻² Гц⁻¹.

² Мера дисперсии определяется как интеграл электронной плотности вдоль луча зрения до источника: $DM = \int n_e dl$. Измеряется во внесистемных единицах [см⁻³ пк]; 1 пк ≈ 206265 астрономических единиц (а.е.) $\approx 3 \times 10^{16}$ м.

³ Из релятивистской кинематики при переходе из лабораторной (K) в собственную (K') систему отсчёта имеем $I_\nu = I'_\nu D^3$, $\nu = \nu' D$, $D = 1/[\gamma(1 - \beta\mu)]$ — доплеровский фактор, $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$ — лоренц-фактор, $\mu = \cos \theta$, θ — угол между вектором скорости и направлением на наблюдателя в K . При $\gamma \gg 1$ величина $D \approx \gamma$ и из (1) имеем $T_b \approx T'_b \gamma$. Другой, более феноменологический, вывод этого результата можно найти в [6].

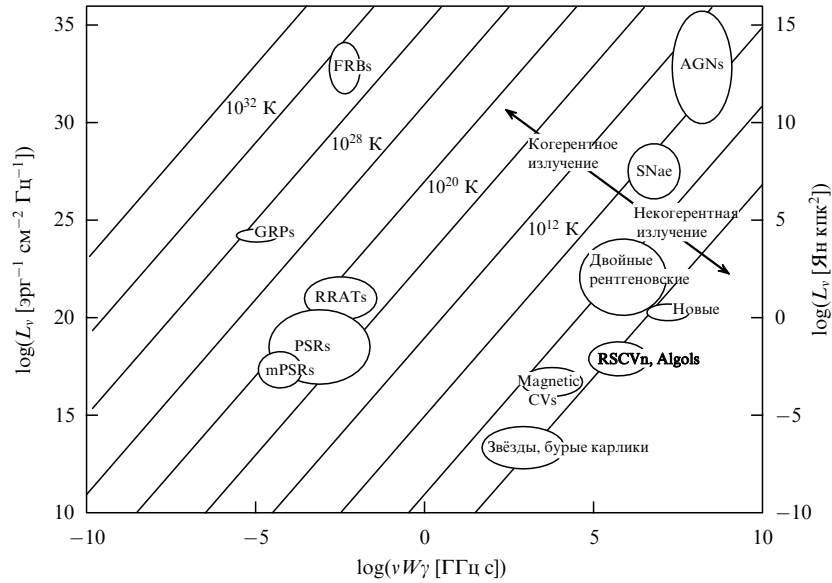


Рис. 1. Различные типы источников на плоскости $L_v - \nu W$. Наклонные прямые — линии постоянной яркостной температуры T_b . Указаны различные типы объектов: пульсары (PSRs), вращающиеся радиотранзиенты (RRATs), миллисекундные пульсары (mPSRs), гигантские импульсы радиопулсаров (GRPs), активные ядра галактик (AGNs), сверхновые (SNae), рентгеновские двойные, звёзды типа RS Гончих Псов и Алголя (RSCVn, Algols), магнитные катаклизмические переменные (magnetic CVs), звёзды и бурые карлики.

стояниях такое энерговыделение в виде когерентного короткого импульса требует привлечения радиационных механизмов в релятивистской плазме (см. раздел 4.2). Для источников на галактических расстояниях (10 кпк) энерговыделение $\sim 10^{29}$ эрг сравнимо с таковым у звёздных вспышек, что послужило одной из причин появления галактической модели БРВ [9].

1.3. Особенности детектирования коротких радиовсплесков

Распространение радиоимпульса по ионизованной межзвёздной (МЗС) или межгалактической среде приводит к эффективному уширению регистрируемого импульса (см. подробнее в [10]). Во-первых, импульс уширяется вследствие зависимости показателя преломления ионизованной среды от частоты (эффект меры дисперсии). Для холодной плазмы $n = [1 - (\omega_p/\omega)^2]^{1/2}$, где ω_p — плазменная частота. При этом задержка прихода импульса на разных частотах определяется мерой дисперсии DM:

$$t_{DM} \approx 4,2 \times 10^3 \text{ DM} \left(\frac{\nu}{1 \text{ ГГц}} \right)^{-2} [\text{мкс}]. \quad (5)$$

При некогерентной (поканальной) "дедисперсии", т.е. устранении задержки прихода импульса на разных частотах из-за меры дисперсии, в полосе приёма $\Delta\nu$ на частоте ν уширение импульса составит

$$\Delta t_{DM} \approx 8,3 \text{ DM} \frac{(\Delta\nu/1 \text{ МГц})}{(\nu/1 \text{ ГГц})^3} [\text{мкс}]. \quad (6)$$

Во-вторых, для оптимальной регистрации проводится процедура дедисперсии сигнала, поэтому неизбежна погрешность в мере дисперсии δDM дополнительно уширяет импульс на величину порядка $\Delta_{\delta\text{DM}} = \Delta t_{DM}(\delta\text{DM}/\text{DM})$. В-третьих, уширение возникает из-за конечной полосы приёмника $\Delta t_{\Delta\nu} \sim \Delta\nu^{-1}$. Наконец, уширение импульса τ_d происходит из-за рассеяния на флуктуациях плотности турбулентной межзвёздной и

межгалактической среды (эффект мерцаний). На данный момент уширение из-за рассеяния наблюдалось лишь у части БРВ, для остальных событий были найдены только верхние пределы. Как и дисперсионная задержка, уширение может возникать на всём пути от источника к наблюдателю. Значительное превышение уширения над его измеренными значениями для галактических пульсаров в близких направлениях указывает на внегалактическое происхождение. Имеющиеся данные не позволяют однозначно определить, где именно возникает уширение: непосредственно вблизи источника, в галактике, где произошёл всплеск, или где-то на пути до наблюдателя [11–13]. Величина измеренных уширений τ_d сильно варьируется для разных всплесков и достигает нескольких десятков миллисекунд на частоте 1 ГГц. Для нескольких всплесков была найдена частотная зависимость величины уширения, $\tau_d \sim \nu^\alpha$, где $\alpha \sim -4$. Быстрое возрастание уширения из-за рассеяния также может быть одной из причин, препятствующих наблюдениям всплесков на низких частотах (см. ниже).

Суммарное уширение приближённо выражается как

$$\Delta t = (\Delta t_{DM}^2 + \Delta t_{\delta\text{DM}}^2 + \Delta t_{\Delta\nu}^2 + \tau_d^2)^{1/2}. \quad (7)$$

В отличие от эффектов рассеяния, эффекты межзвёздной дисперсии могут быть полностью или частично устранены специальной обработкой зарегистрированного сигнала. Поскольку при поиске транзиентов мера дисперсии заранее не известна, она подбирается так, чтобы размывание сигнала после процедуры дедисперсии было минимальным, $\Delta t \rightarrow \Delta t_0 = (2\Delta t_{DM, \min} + \tau_d^2)^{1/2}$.

После проведения процедуры дедисперсии в записях ищутся импульсы с амплитудой, превышающей некоторое пороговое значение отношения сигнала к шуму (S/N). Так как длительность импульса W_i заранее не известна, она подбирается так, чтобы отношение S/N стало максимальным. При среднеквадратичной (root mean square — rms) амплитуде шума σ_n и величине импульса S_i (или интегральном потоке — флюэнсе) — импульса $A_i \approx S_i W_i$) оптимальное отношение сигнала к шуму

имеет вид

$$\left(\frac{S}{N}\right)_i = \left(\frac{(A_i/W_i)}{\sigma_n}\right) \sqrt{\frac{W_i}{W_n}}, \quad (8)$$

где W_n — время корреляции шума радиометра. Поскольку в радиоастрономических антеннах $\sigma_n \simeq S_n/\sqrt{\Delta\nu W_n}$, где S_n — шум антенны в единицах Ян, оптимальное отношение сигнала к шуму не зависит от W_n , $(S/N)_i \propto A_i/\sqrt{W_i}$, и чем уже импульс при данном флюэнсе, тем с большим отношением сигнала к шуму можно его выделить. Конечно, при большом флюэнсе (мощный сигнал) даже широкие импульсы легче детектировать.

При распространении в МЗС радиоимпульс уширяется, как обсуждалось выше, причём его площадь (флюэнс) сохраняется. Если при этом ширина импульса за счёт эффектов распространения в среде и в результате детектирования превысит собственную ширину импульса, $W_b > W_i$, то оптимальное отношение сигнала к шуму изменится соответственно как $(S/N)_b = (S/N)_i \sqrt{W_i/W_b}$. Ясно, что эффекты уширения при распространении импульса в МЗС значительно усложняют процедуру регистрации сигнала.

Сделаем ещё одно замечание физического характера. Для радиоимпульсов с высокой яркостной температурой существенными могут оказаться эффекты вынужденного рассеяния в окружающей среде (комптоновского на электронах и комбинационного (рамановского) на плазмонах). Этот вопрос исследовался в работе [14]. Было показано, что оптическая толща при распространении единичного узкого импульса в среде определяется в основном его шириной Δt и вынужденное рассеяние существенно только в плазме вблизи источника (например, в звёздном ветре предсверхновой в случае радиоизлучения от гамма-всплесков). Также показано, что эффекты вынужденного рассеяния в самом источнике могут быть несущественными при условии генерации импульса в плазме, движущейся с релятивистскими скоростями. Из этих соображений получено нижнее ограничение на лоренц-фактор плазмы в источнике БРВ: $\gamma > (3-4) \times 10^3$, относительно слабо зависящее от модельных параметров. Заметим, что это условие выполняется и для гигантских радиоимпульсов, генерируемых в магнитосферах пульсаров, и в магнитарной модели БРВ, обсуждаемой в разделе 4.2.2, и значительно ограничивает (даже если не принимать во внимание прочие аргументы) [15] возможности галактической модели генерации БРВ в звёздных вспышках.

Несмотря на огромный интерес к феномену БРВ и возрастающее количество статей, посвящённых проблеме БРВ, их природа остаётся неизвестной. Часто эту ситуацию справедливо сравнивают с исследованиями космических гамма-всплесков в 1970–середине 1990-х годов, до первого отождествления космического гамма-всплеска с далёкой галактикой и тем самым установления их космологической природы (см. обзор [16]). Поэтому до тех пор пока расстояния до источников БРВ не будут определены из астрономических наблюдений, остаётся широкий выбор возможных физических моделей.

После краткого рассказа об истории изучения БРВ (раздел 2) мы рассмотрим основные феноменологические свойства БРВ как нового астрономического феномена (раздел 3), с отдельным описанием пока единственного повторного источника FRB 121102 (раздел 3.2), и подробнее обсудим две наиболее вероятные внегалактические модели: модель некогерентной совокупности на-

носекундных гигантских импульсов от молодых пульсаров (раздел 4.2.1) и модель синхротронного мазерного излучения при гигантских вспышках магнитаров⁴ (раздел 4.2.2). В разделе 4.3 рассмотрены возможные приложения БРВ для зондирования межгалактической среды и космологических исследований. Перспективы исследований БРВ кратко описаны в заключении (раздел 5).

2. История открытия быстрых радиовсплесков

В этом разделе мы кратко расскажем о наиболее важных эпизодах недолгой ранней истории изучения БРВ.

2.1. Ключевые моменты раннего этапа исследования быстрых радиовсплесков

Предвестником открытия быстрых радиовсплесков было обнаружение так называемых вращающихся радиотранзиентов (Rotating Radio Transients — RRATs) [17]. От этих источников наблюдаются отдельные повторяющиеся радиовсплески миллисекундной длительности. Выделение таких сигналов требовало довольно сложной методики, описанной в [10]. Анализ показал наличие периодичности в приходе импульсов, что в конечном счёте позволило уверенно идентифицировать эти источники как подкласс радиопульсаров — вращающихся нейтронных звёзд.

Сейчас известно уже более 100 источников этого типа. Механизм генерации всплесков остаётся неизвестным, однако активность RRATs позволяет поставить их в один ряд с радиопульсарами в качестве объектов с нулингом (т.е. с временным прекращением радиоизлучения), превосходящим 95 % периода пульсара [18].

Существенно, что RRATs были обнаружены (и продолжают обнаруживаться) именно благодаря поиску отдельных импульсов, а не в результате поиска периодичности радиосигнала (как происходит в случае поиска и обнаружения обычных радиопульсаров). Таким образом, в последние годы была разработана эффективная методика надёжной идентификации отдельных миллисекундных заметно диспергированных радиоимпульсов от астрономических источников, что открыло дорогу обнаружению совершенно нового феномена — быстрых радиовсплесков.

Сообщение о первом БРВ [4] появилось осенью 2007 г. Сам всплеск наблюдался в 2001 г. и впоследствии получил обозначение FRB 010724 (год–месяц–день). Он был обнаружен на 64-метровой антенне Паркса в Австралии в ходе обзорных наблюдений неба на частоте 1,4 ГГц, основной целью которых был поиск новых радиопульсаров. Вспышка произошла в 3° от Малого Магелланова Облака. Всплеск обладал очень высоким пиковым потоком, превосходящим 30 Ян, и малой длительностью (< 5 мс). Важной особенностью была надёжно измеренная большая мера дисперсии: $DM = 375$ пк см⁻³, что существенно превосходит галактическую меру дисперсии в этом направлении (см. стандартную модель распределения электронной плотности в Галактике в [19] и результаты более нового подхода в [20]). Последующие 90-часовые наблюдения не выявили повторных всплесков. Поскольку событие было зарегистрировано в результате обзорных наблюдений, удалось оценить темп таких событий. В рамках гипотезы о внегалактическом происхождении всплеска, когда дисперсия сигнала наби-

⁴ В русскоязычной литературе используется также эквивалентный исторически сложившийся термин "магнетар". (Примеч. ред.)

рается в межгалактической среде, авторы [4] получили оценку 90 событий в сутки в объёме величиной 1 Гпк^3 . Это по порядку величины соответствует нескольким тысячам событий в сутки на небе. Интересно, что после открытия ещё трёх десятков всплесков данная грубая оценка остаётся справедливой.

После опубликования первой работы [4] на тему БРВ появилось несколько теоретических статей, в которых развивались идеи, уже высказанные в ней, или предлагались новые. Однако без увеличения числа известных всплесков поток работ теоретиков быстро иссяк.

Второй всплеск, FRB 010621, был идентифицирован [21] лишь в 2012 г. Это событие также было найдено по архивным данным. Сама вспышка была зарегистрирована в одном из боковых лепестков диаграммы направленности телескопа Паркса. Ширина импульса составила 7,8 мс. Повторные всплески из этого участка неба не были обнаружены. Всплеск был почти на два порядка слабее первого, кроме того, источник находился в плоскости Галактики. Таким образом, отличия от первого события были достаточно велики. С учётом проблемы перитонов (см. раздел 2.2) существование большого класса астрофизических миллисекундных радиовсплесков не казалось очевидным. Поиск в архивных данных различных инструментов (в первую очередь на более низких частотах — несколько сотен МГц) не дал никаких результатов.

Решающей стала работа [22], в которой сообщалось об открытии ещё четырёх ярких радиотранзистентов миллисекундной длительности с большой мерой дисперсии на высоких галактических широтах. Начиная с этой публикации можно отсчитывать современную историю БРВ.

2.2. Перитоны

В недолгой истории БРВ есть поучительный момент, связанный с открытием коротких радиовсплесков — перитонов (peritons). Радиовсплески этого типа были обнаружены вскоре после опубликования результатов Лоримера и др. [4]. Также как и в случае БРВ, открытие перитонов было сделано по результатам обработки архивных данных наблюдений на телескопе Паркса [23].

В первой статье [23], посвящённой перитонам (авторы которой и предложили прижившееся их название), было представлено 16 таких событий, имевших характерную длительность несколько десятков миллисекунд. В отличие от БРВ, перитоны были видны во всех (или очень многих) лепестках диаграммы радиотелескопа Паркса. Перитоны не были равномерно распределены по времени суток и временам года. В основном они происходили поздним утром. Все перитоны обладали сходными спектральными характеристиками. Сигнал показывал запаздывание на низких частотах, аналогичное таковому при взаимодействии радиоволн с плазмой МЗС. Зависимость временного сдвига δt от частоты ν в некоторых случаях была очень близка к классической: $\delta t \sim \nu^{-2}$. Однако для некоторых всплесков отличия были весьма велики. События могли происходить сериями (например, однажды 11 всплесков были зафиксированы менее чем за 5 мин).

Авторы [23] сразу же высказали предположение, что перитоны имеют земное, скорее всего даже техногенное, происхождение. Напомним, что к этому моменту был известен всего лишь один БРВ, обнаруженный Лоримером и др. [4]. Формально для ряда перитонов можно было определить меру дисперсии. Для большинства из них она оказывалась равной $350 - 400 \text{ пк см}^{-3}$ (см. рис. 9 в [24]). Мера дисперсии для первого БРВ составляет 375 пк см^{-3} . Поэтому встал вопрос о происхождении

первого БРВ: астрономический это источник или земной (возможно, техногенный) всплеск, подобный перитонам?

Перитоны специально искали на других телескопах (Аресибо, VLA (Very Large Array), телескоп Аллена); были также проведены новые исследования по данным Обсерватории Паркса (см. обзор результатов и ссылки в [24]). Однако лишь в обсерватории в Блейене (Bleien) в Швейцарии были зарегистрированы аналогичные сигналы [25].

Вопрос о происхождении перитонов детально исследовался в нескольких работах (см. [24, 25] и приведённые там ссылки). Рассматривались такие естественные феномены, как разряды в атмосфере, следы метеоров, а также ряд техногенных процессов (например, пролёт самолета через диаграмму направленности радиотелескопа). Однако не удавалось выбрать модель, которая позволила бы объяснить одновременно все особенности перитонов.

Решение проблемы оказалось достаточно неожиданным. В декабре 2014 г. на телескопе Паркса была установлена новая система мониторинга окружающей радиообстановки. Затем были проведены тщательное исследование с целью выявить природу перитонов, а также переобработка архивных данных [27]. Наблюдения проводились одновременно в Австралии — в Парксе и на установке ATCA (Australia Telescope Compact Array), а также в Индии на телескопе GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope). Перитоны регистрировались только в Парксе. Стало ясно, что проблема является локальной. Кроме того, одновременно с сигналом на 1,4 ГГц с помощью системы мониторинга был обнаружен сопутствующий сигнал на частоте 2,3–2,5 ГГц, очень похожий на техногенный.

Тщательный анализ показал, что источниками перитонов были микроволновые печи в обсерватории! При определённом положении телескопа, если у ещё работающей печи открывалась дверца (вспомните — часто ли вы ждёте, пока микроволновка выключится, подогревая чашку чая?), то регистрировался перитон на частоте 1,4 ГГц.

Дополнительный анализ показал, что БРВ (включая первый) не имеют особенностей, присущих перитонам. Соответственно, можно было с большей уверенностью говорить об астрономическом происхождении БРВ. Однако их природа оставалась неясной.

3. Современные наблюдения и феноменология быстрых радиовсплесков

Современный всплеск интереса к БРВ возник после опубликования статьи [22], авторы которой представили четыре новых примера таких событий, обнаруженных по архивным данным телескопа в Парксе. В настоящий момент обнаружено более 30 источников быстрых радиовсплесков, один из которых является повторным. Онлайн-каталог доступен на сайте <http://frbcat.org> [28]. Постоянно появляются обзоры, посвящённые свойствам БРВ (см. [29, 30] и приведённые там ссылки).

3.1. Одиночные (неповторяющиеся) всплески

В настоящий момент известно более 30 одиночных быстрых радиовсплесков. Основная часть из них (25 всплесков) обнаружена на 64-метровом австралийском радиотелескопе Паркса. По одному всплеску обнаружено на системе телескопов в Австралии ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder) [31] и 100-метровом телескопе GBT (Green Bank Telescope) в Грин-Бэнке (США). Пять всплесков зарегистрировано на австралийской системе UTMOST (Upgrade of The Molonglo Observa-

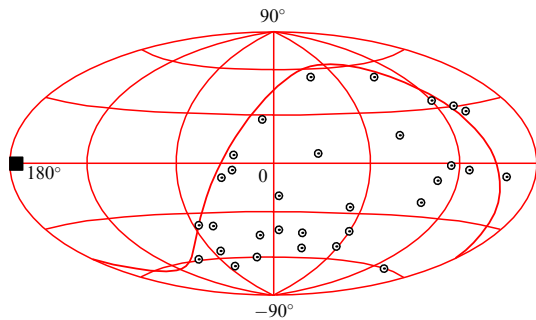


Рис. 2. (В цвете онлайн.) Распределение зарегистрированных всплесков на небесной сфере в галактических координатах (долгота возрастает справа налево). Положение повторного всплеска FRB 121102 обозначено квадратом, положение остальных — кружками. Жирной (красной) линией показан небесный экватор. Из-за того что большинство БРВ было найдено в данных наблюдений австралийских телескопов, заметна большая концентрация всплесков в Южном полушарии небесной сферы. (Данные из онлайн-каталога frbcatalog.org.)

tory Synthesis Telescope). Число известных событий увеличивается каждый месяц. Распределение детектированных всплесков по небесной сфере показано на рис. 2.

Типичное значение потока радиоизлучения в максимуме всплесков ~ 1 Ян. Однако для ярких событий (FRB 010724, FRB 170827) эта величина достигает нескольких десятков Ян, а в случае рекордного всплеска FRB 150807 превосходит 100 Ян!

Ширина зарегистрированных импульсов лежит в диапазоне от нескольких десятых миллисекунды до 30 мс. Также возможно, что внутри общего импульса существует микроструктура. Так, например, обнаруженный на установке UTMOST (практически в режиме реального времени) яркий всплеск FRB 170827 сам по себе имел небольшую ширину ($\sim 0,4$ мс), при этом в профиле импульса присутствовали три компонента, самая короткая была продолжительностью около 30 мкс [32]. Сходной длительностью субимпульсов обладает и источник повторных всплесков FRB 121102 [33].

Распределение всплесков по небу во многом определяется тем, что почти все они зарегистрированы австралийскими инструментами (Parkes, UTMOST, ASKAP). Кроме того, важно, что многие всплески обнаружены по архивным данным наблюдений, проводившимся в основном по программам поиска радиопульсаров. Таким образом, покрытие неба не было равномерным. Тем не менее статистический анализ не отвергает гипотезу о том, что распределение известных БРВ согласуется с равномерным.

Мера дисперсии БРВ лежит в интервале от ~ 170 до ~ 2600 см $^{-3}$ пк. Первоначально специальные поиски всплесков с большой (несколько тысяч [см $^{-3}$ пк]) мерой дисперсии не дали результатов [34]. Однако совсем недавно было обнаружено несколько всплесков с $DM > 1500$ см $^{-3}$ пк, а у одного из них (FRB 160102) мера дисперсии составляет примерно 2600 см $^{-3}$ пк [35].

В основном всплески обнаруживались по архивным данным, что исключает возможность эффективного поиска сопутствующих транзиентов на других длинах волн. Первым быстрым радиовсплеском, обнаруженным в реальном времени, стало событие FRB 140514 [36], что предоставило возможность сразу инициировать программу наблюдений на других инструментах в разных диапазонах спектра. Не было найдено никаких транзиентов, связанных с источником этого радиовсплеска. Это позволило отвергнуть модели (по крайней мере, в

отношении конкретного источника), связанные со взрывами сверхновых, гамма-всплесками большинства типов и некоторыми другими транзитными явлениями, обсуждавшимися в качестве кандидатов для объяснения механизма БРВ.

Кроме FRB 140514 в реальном времени были обнаружены всплески FRB 150215 [37], FRB 150418 [38], FRB 150807 [39], а также четвёрка событий (FRB 150610, FRB 151206, FRB 151230, FRB 160102), представленная в работе [35]. Во всех случаях не было никаких надёжных отождествлений всплеска или возможного послесвечения в других спектральных диапазонах, что также позволяет исключить ряд моделей для объяснения этих событий.

Для всплеска FRB 150418 была выдвинута гипотеза о том, что с ним связан медленный радиотранзиент [38]. На основании этого отождествления была найдена материнская галактика всплеска. Однако в дальнейшем оказалось, что два указанных радиоисточника не связаны между собой [40–42].

Кроме того, проводились поиски сопутствующих гамма-источников на космической обсерватории "Ферми" [43, 44], а также гамма-всплесков, связанных с БРВ [45]. Никаких достоверных ассоциаций обнаружено не было. В одном случае (FRB 131104) был предложен кандидат — гамма-всплеск длительностью несколько сотен секунд [46], однако впоследствии взаимосвязь между двумя транзиентами была признана недостоверной [29].

Наблюдения неповторяющихся быстрых радиовсплесков на настоящий момент не дают обширной надёжной информации о спектральных свойствах этих событий. Всплески были зарегистрированы в узких полосах на частоте или 1,4 ГГц (Паркс, Аресибо), или ~ 840 МГц (UTMOST, GBT). Настоятельные поиски на более низких частотах на различных установках (включая LOFAR (LOw Frequency ARray)) не дали результатов [47–50]. В частности, авторы работы [50] на основе отсутствия детектированных всплесков в рамках некоторой космологической модели БРВ при предположении широкого (от $\sim$ нескольких сантиметров до ~ 1 м) степенного спектра без изломов налагают ограничение на спектральный индекс ($F \sim \nu^\alpha$, где F — флюэнс): $-7,6 < \alpha < 5,8$. Однако, учитывая существующие неопределённости, этот результат нельзя считать достаточно надёжным и ограничивающим модели.

Причины отсутствия детектирования сигнала на частотах ниже 800 МГц остаются неясными. Последнее может быть связано собственно с механизмом излучения, однако, вероятнее всего, это обусловлено поглощением сигнала на низких частотах. В первую очередь, большую роль может играть среда непосредственно вокруг источника (см., например, [51]). Анализ различных возможностей и предсказания для низкочастотных наблюдений (например, на инструментах CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment), HIRAX (Hydrogen Intensity and Real-time eXperiment), которые будут работать на частотах ~ 600 МГц) можно найти в работе [52].

Недавно поиск БРВ на частотах ниже 800 МГц был проведён в рамках пульсарного обзора Green Bank Northern Celestial Cap (GBNCC) [53], рабочие частоты которого составляли 300–400 МГц. Ни одного БРВ не было обнаружено. В работе [53] получен ряд ограничений на спектральный индекс при различных предположениях о свойствах всплесков и параметрах среды на луче зрения.

Не было обнаружено ни одного нового источника в результате двухлетнего (518 ч наблюдений в период

июль 2015 г. – август 2017 г.) поиска всплесков в программе ALFABURST (A realtime fast radio burst) на 305-метровом телескопе в Аресибо [54], что неудивительно с учётом крайне малого поля зрения инструмента. Всё время наблюдений эквивалентно наблюдению площадки в 10 квадратных градусов в течение 1 ч. Для ярких всплесков оценки темпа дают порядка одного всплеска в сутки на такой площади неба. Однако ожидалось, что большая собирающая площадь телескопа позволит увидеть более слабые события, темп появления которых может быть выше. Тем не менее отрицательный результат соответствует ожиданиям и не позволяет наложить существенные ограничения на спектр, модель распределения всплесков в пространстве или их функцию светимости.

У нескольких БРВ удалось измерить поляризацию излучения. Впервые это было сделано для всплеска FRB 110523 [55]. Линейная поляризация составила 44 %, измеренное значение меры вращения $RM = -186,1 \pm \pm 1,4$ рад m^{-2} позволило оценить среднее взвешенное с концентрацией электронов магнитное поле на луче зрения: 0,38 мкГс. Анализ показал, что, вероятнее всего, основной вклад вносит среда вблизи источника (вклад нашей Галактики и межгалактической среды относительно мал).

FRB 140514, напротив, продемонстрировал лишь круговую поляризацию [36] на уровне 20 %. Затем ещё для трёх источников была измерена поляризация излучения БРВ. Во всех трёх случаях поляризация оказалась линейной (без круговой). У FRB 150418 поляризация составила лишь 8,5 % [38]. Столь небольшая величина не позволила сделать надёжных выводов о свойствах магнитного поля в среде на луче зрения. У источника FRB 150215 была обнаружена примерно 40%-ная линейная поляризация, однако мера вращения оказалось малой (нулевой в пределах ошибок) [37]. Зато у FRB 150807 излучение было линейно поляризовано на 80 % [39]. Небольшая величина меры вращения, $RM \approx 12$ рад m^{-2} , говорит о том, что среда в окрестности источника не является сильно замагниченной. Соответственно, это позволило авторам установить ограничение на межгалактическое магнитное поле и параметры турбулентности. Повторный всплеск FRB 121102 сильно выделяется и в этом отношении — его измеренная мера вращения на 100 % линейно поляризованных импульсов исключительно велика, $RM \sim 10^5$ рад m^{-2} , и сильно изменяется со временем [33]. (Подробнее об этом см. в разделе 3.2.)

Статистические свойства быстрых радиовсплесков рассматривались в ряде работ (см., например, [56–59] и ссылки в них). Пока, разумеется, все выводы характеризуются большой неопределённостью из-за малой статистики числа всплесков.

Оценки темпа появления всплесков постоянно уточняются, однако в целом они оказываются довольно стабильными и соответствуют диапазону примерно от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч событий в сутки на всём небе с флюэнсом более нескольких десятых [Ян мс]. При этом важно отметить, что самые слабые всплески, зарегистрированные радиотелескопом Паркса, имеют флюэнс 0,55 Ян мс. Данные считаются достаточно полными только для флюэнсов $F > 2$ Ян мс.

В статье [56] для темпа всплесков по всему небу приведено значение

$$\frac{dN}{dF} = (4,14 \pm 1,3) \times 10^3 F^{-1,14 \pm 0,2} \text{ сут}^{-1}, \quad (9)$$

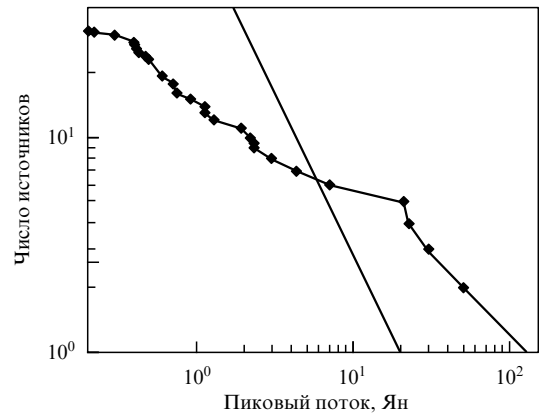


Рис. 3. Интегральное распределение быстрых радиовсплесков по пиковому потоку: $\log N(> S) - \log S_{\text{peak}}$. Прямая соответствует закону $N(> S) \sim S^{-3/2}$. (По данным из онлайн-каталога frbcat.org.)

(где флюэнс F выражается в единицах [Ян мс]). В работе [60] приводится величина темпа 587 сут^{-1} на потоках выше 1 Ян. Более детализованный результат (для разных областей неба: на высоких и низких галактических широтах) приведён той же группой исследователей в статье [61]. В работе [35] дано значение темпа $1,7 \times 10^3$ всплесков в сутки на всём небе по данным о выборке объектов, обнаруженных на телескопе Паркса, с флюэнсом более 2 Ян мс.

В нулевом приближении можно было бы предположить, что распределение БРВ по пиковому потоку ($\log N - \log S$) должно соответствовать закону для плоского пространства $N(> S) \sim S^{-3/2}$ (рис. 3). Данные вступают в противоречие с этим, что, однако, не позволяет окончательно отвергнуть космологические модели быстрых радиовсплесков. Авторы работы [57], используя статистические методы, показали, что распределение БРВ по потокам не противоречит равномерному распределению источников в евклидовом пространстве. Согласно результатам анализа [59] истинное распределение БРВ по потоку не является существенно более плоским, чем закон $S^{-3/2}$ (а может быть, даже оказывается более крутым).

Распределение БРВ по флюэнсу представлено на рис. 4. Флюэнс [эрг cm^{-2}] определялся как произведение

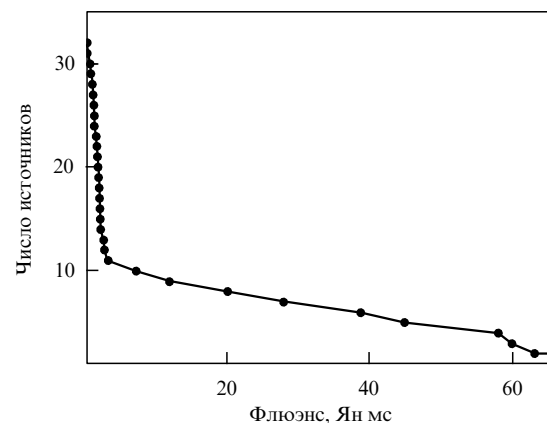


Рис. 4. Интегральное распределение БРВ по флюэнсу: $N(> F) - F$ (в линейном масштабе по обеим осям). (Данные из онлайн-каталога frbcat.org.)

потока в максимуме, приведённого в каталоге, на временную ширину импульса. Это распределение имеет довольно нетривиальный вид. Можно выделить две популяции, соответствующие интервалам флюэнса $0,5 < F < 3$ Ян мс и $3 < F < 100$ Ян мс. Любопытно, что в каждом из интервалов распределение хорошо аппроксимируется линейным законом $N = a - b \times F$, где a и b — положительные величины, причём разные для двух частей распределения (см. работу [51], в которой, насколько нам известно, впервые был отмечен необычный вид зависимости числа источников от флюэнса). Указанная бимодальность распределения по флюэнсу, так же как и линейность распределения в двух интервалах, не имеет пока разумного физического объяснения. Не исключено, что это обусловлено наблюдательной селекцией или малой статистикой. Кроме того, из 10–12 всплесков с самым большим флюэнсом в Парксе открыто лишь около половины, в то время как среди остальных (формирующих вторую популяцию на графике $N(> F) - F$ с меньшими потоками) парковские события доминируют.

3.2. Источник повторных всплесков

FRB 121102 выделяется среди быстрых радиовсплесков по нескольким причинам. Во-первых, это был первый БРВ, обнаруженный не в Парксе [62]. Наблюдение всплеска на 305-метровом радиотелескопе в Аресибо (Пуэрто-Рико) позволило с уверенностью говорить, что всплески не являются какими-то локальными артефактами парковской установки. Во-вторых, это единственный известный случай повторяющегося источника быстрых радиовсплесков. Наконец, наличие достаточно частых повторных всплесков позволило определить точные координаты источника, а также открыло возможность для попыток одновременной регистрации излучения в разных диапазонах спектра.

Всплеск был открыт в ходе наблюдений области галактического антицентра по программе большого обзора PALFA (1,4 GHz Pulsar Arecibo L-Alpha Survey), нацеленного на поиск пульсаров и связанных с ними феноменов, например RRAT, в галактической плоскости ($|b| < 5^\circ$). Наблюдения велись в полосе частот шириной 322 МГц с центром на частоте 1375 МГц с временным разрешением 65,5 мкс с помощью приёмника с многолучевой диаграммой направленности (использовалось семь лучей с полушириной главного лепестка 3,5 угл. мин). Для поиска одиночных импульсов данные подвергались процедуре дедисперсии в интервале значений меры дисперсии DM от 0 до 2038 пк см⁻³.

Единичный сильный всплеск с отношением сигнала к шуму $S/N = 14$ был обнаружен в данных наблюдений от 2 ноября 2012 г. Зависимость времени прихода импульса от частоты хорошо описывалась обычной дисперсионной задержкой при значении $DM = 557,4 \pm 2,0$ пк см⁻³. Всплеск наблюдался в четвёртом луче диаграммы с галактическими координатами центра на момент наблюдения $b = -0,223^\circ$, $l = 174,95^\circ$, которые и были определены как координаты всплеска. Всплеск наблюдался в боковом лепестке, поэтому его локализация была довольно грубой, ошибка превысила 5 угл. мин. Источник располагается на низкой галактической широте, что само по себе приводит к высокой мере дисперсии. Однако измеренная величина DM почти в три раза превысила оценку вклада Галактики в этом направлении $DM_{NE2001} = 188$ пк см⁻³ (индекс NE2001 обозначает, что для расчёта меры дисперсии использовалась модель [19]), что вместе с отсутствием известных компактных галактиче-

ских структур, которые могли бы повлиять на величину дисперсии, указывало на внегалактическое происхождение FRB 121102. Отметим, что оценка расстояния по величине этого избытка, $D \sim 1$ Гпк, хорошо согласовывалась в итоге с измеренным расстоянием до хозяйской галактики (см. ниже). Продолжительность всплеска $3 \pm 0,5$ мс, измеренный поток $0,4^{+0,4}_{-0,1}$ Ян. Было получено лишь ограничение на величину уширения импульса при распространении, $\tau_d < 1,5$ мс, что также указывало на расположение источника далеко за пределами Галактики.

В повторных наблюдениях этой области в 2012–2013 гг. общей продолжительностью в несколько тысяч секунд не было зафиксировано ни одного добавочного всплеска. Тем не менее наблюдения этой области и поиск повторных всплесков не прекратились, и в мае–июне 2015 г. в том же направлении были зарегистрированы 10 импульсов с мерой дисперсии, совпадающей с мерой дисперсии первого импульса. Так состоялось открытие повторных быстрых радиовсплесков [63].

Продолжительность повторных всплесков лежала в диапазоне 2,8–8,7 мс, что находилось в соответствии с распределением продолжительностей известных БРВ, однако потоки (0,02–0,30 Ян) были в среднем на порядок меньше "типичного" потока от БРВ. Также для различных всплесков FRB 121102 в весьма широких пределах варьировался спектр: в приближении степенного спектра, $S(\nu) \propto \nu^\alpha$, показатель степени α изменялся от –10 до 14. Не было обнаружено никакой периодичности в моментах прихода всплесков, ситуация качественно не изменилась и сейчас, когда число зарегистрированных всплесков возросло более чем на порядок.

Существование повторных всплесков от источника вызвало огромный интерес, и на многих инструментах (в первую очередь — в радиодиапазоне) были начаты обширные наблюдательные программы по их исследованию. Почти сразу это привело к замечательному успеху. Даже самый большой одиночный (single dish) радиотелескоп обладает посредственным угловым разрешением, что заметно затрудняет отождествление источника и исследования в других диапазонах. Наблюдения с помощью интерферометров позволили обойти эту трудность и привели к локализации положения всплеска с большой точностью: наблюдения на VLA установили положение всплесков с точностью 0,1" [64]. За 83 ч наблюдений на VLA в полосе частот 2,5–3,5 ГГц было зарегистрировано девять всплесков, три из них — во время совместных сеансов с радиотелескопом в Аресибо, который зарегистрировал лишь один из них. Это свидетельствует о сложной спектральной структуре всплесков, которая по имеющимся данным лучше всего может быть описана гауссовой кривой шириной 500 МГц. Переменность и сложность структуры всплесков недавно были подтверждены в ходе наблюдений на радиотелескопе GBT в полосе частот 4–8 ГГц: все 15 зарегистрированных всплесков имели нетривиальную структуру на масштабе 0,1–1 ГГц, а пик спектра некоторых импульсов располагался на частотах выше 6 ГГц [65].

Также был обнаружен слабый постоянный источник радиоизлучения (поток на частоте 3 ГГц составил $S_{3\text{GHz}} = 180$ мкЯн), положение которого в пределах ошибок наблюдений совпадает с положением всплесков. Наблюдения на крупных оптических телескопах Обсерватории Джемини (Gemini) и Обсерватории Кека (Keck) обнаружили тусклый объект, положение которого совпадало с положением постоянного источника. Расстояние до этого объекта было определено из наблюдений линий

бальмеровской серии водорода и линии дважды ионизованного кислорода [O III]. Полученное красное смещение $z = 0,193$ соответствует фотометрическому расстоянию $D = 972$ Мпк [66]. Объект был идентифицирован как карликовая галактика с диаметром около 4 кпк и звёздной массой $M_* = (4-7) \times 10^7 M_\odot$. Вероятность случайного совпадения радиоисточника и галактики составляет менее 3×10^{-4} . Более глубокие наблюдения с использованием космических телескопов им. Хаббла и им. Спитцера уточнили свойства галактики и местоположение в ней всплеска: источник всплесков связан с компактной областью звездообразования с поперечным размером 0,7 кпк, которая расположена на окраине галактики на расстоянии 2 кпк от номинального центроида яркости [67]. Уточнённая оценка звёздной массы галактики возросла до $M_* = 10^8 M_\odot$. Галактика отличается низкой металличностью, $\log_{10}[\text{O}/\text{H}] = -4,0 \pm 0,1$. Следует отметить, что безводородные сверхмощные сверхновые (SLSN-I) чаще наблюдаются именно в таких галактиках, что может указывать на их генетическое родство с FRB 121102.

Наблюдения с использованием радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами на телескопах консорциума EVN (European VLBI Network) и на VLBA (Very Long Baseline Array) установили, что размер постоянного источника составляет менее 0,2 угл. мс (соответствует 0,7 пк на расстоянии 1 Гпк). Источник наблюдается на частотах от 1 до 20 ГГц, обладает нетепловым спектром и является переменным на уровне $\sim 10\%$ на временных масштабах порядка 1 сут. Расстояние между положениями всплеска и постоянного источника не превышает 12 угл. мс (40 пк на расстоянии 1 Гпк), что с высокой вероятностью указывает на их взаимосвязь [64, 68]. С учётом известного расстояния до галактики радиосветимость постоянного источника составляет $L_R \sim 10^{39}$ эрг с^{-1} , а светимость отдельных всплесков достигает 5×10^{42} эрг с^{-1} . Полная энергия в индивидуальном всплеске может достигать величины $\mathcal{O}(10^{40})$ эрг.

Глубокие рентгеновские наблюдения на космических телескопах Chandra и XMM-Newton (X-ray Multi-Mirror Mission) позволили установить только верхний предел светимости постоянного источника в рентгеновском диапазоне 0,2–6 кэВ: $L_X < 3 \times 10^{41}$ эрг с^{-1} [69]. Многие модели (например, те, в которых источником БРВ является магнитар) предсказывают в различных диапазонах энергий мощные вспышки, совпадающие по времени с радиовсплесками, причём их полная энергия должна значительно превосходить энергию в радиодиапазоне. Отсутствие рентгеновских фотонов и гамма-фотонов в моменты радиовсплесков в данных наблюдений телескопов Chandra и Fermi LAT (Large Area Telescope) ограничивают сверху энергии вспышек в рентгеновском диапазоне и гамма-диапазоне величинами 4×10^{45} и 5×10^{47} эрг соответственно [69]. Также получены только верхние пределы для оптических вспышек [70], и пока не опубликованы результаты совместных наблюдений Аресибо и черенковского телескопа VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) в области очень высоких энергий, более 100 ГэВ [71].

В ходе очередной сессии наблюдений на телескопе в Аресибо в полосе частот 4,1–4,9 ГГц было обнаружено 16 импульсов [33]. После учёта поправки, обусловленной фарадеевским вращением, оказалось, что степень их линейной поляризации близка к 100%. Измеренная мера вращения превысила 10^5 рад м^{-2} . Более того, RM сильно изменялась от сеанса к сеансу — меры вращений, полученные по данным наблюдений на телескопе GBT,

оказались меньше на 10%. Такое большое значение меры вращения и её переменность могут быть связаны с нахождением источника в непосредственной близости от сверхмассивной чёрной дыры, в потоке аккрецируемого вещества. В свою очередь эта чёрная дыра может быть обнаруженным постоянным источником. Более вероятно, что источник погружён в молодую пульсарную туманность, тогда наблюдаемые свойства импульсов могут быть объяснены распространением сигнала через филаменты этой туманности.

Неудивительно, что обнаружение повторных всплесков и локализация хозяйской галактики вызвали появление значительного числа работ, пытающихся интерпретировать всю совокупность наблюдательных данных и построить модель FRB 121102. Сама наблюдаемая на протяжении нескольких лет повторяемость всплесков позволила практически полностью исключить катастрофические сценарии, например слияние двойных нейтронных звёзд. Кроме того, ввиду повторяемости всплесков исключается большинство "нетрадиционных" сценариев, таких как взаимодействие с аксионными кластерами или бомбардировка нейтронной звезды астероидами. Расположение вдали от центра хозяйской галактики свидетельствует против моделей, согласно которым всплески связаны с активным ядром галактики. Успешные модели должны также объяснять наблюдаемые свойства постоянного радиоисточника, отсутствие эволюции меры дисперсии и статистические распределения свойств всплесков.

В качестве основных сценариев (как и для источников неповторяющихся всплесков) остаются в первую очередь модели сверхгигантских импульсов молодых радиопульсаров и вспышки магнитаров, поскольку в их рамках удаётся качественно объяснить всю совокупность имеющихся данных. Как и для одиночных всплесков, источником энергии в первом случае является энергия вращения нейтронной звезды, а во втором — энергия магнитного поля (т.е. энергия электрических токов внутри нейтронной звезды).

Следует отметить, что по энергетическим соображениям вторая модель [72, 73] является предпочтительной, так как для объяснения FRB 121192 в модели сверхгигантских импульсов необходима высокая эффективность преобразования энергии вращения нейтронной звезды в энергию радиоизлучения, на несколько порядков превышающая такую эффективность, например, для пульсара в Крабовидной Туманности [74]. В обеих моделях речь идёт об очень молодых нейтронных звёздах, возрастом до 100 лет, источником постоянного излучения в обоих случаях может являться туманность пульсарного (магнитарного) ветра и/или молодой остаток сверхновой.

Важная информация может быть получена в результате изучения статистики времени прихода отдельных всплесков. Распределение времён прихода всплесков является сильно неоднородным, значительно отличающимся от стационарного пуассоновского, и сходным по характеру с аналогичным распределением у источников мягких повторяющихся гамма-всплесков (Soft Gamma Repeaters, SGR) [75]. Несмотря на детектирование уже более чем 200 всплесков, до сих пор не установлено никакой периодичности в приходе импульсов. Самым сильным косвенным указанием на возможное существование такого периода служит наблюдение двух пар всплесков, разделённых очень малым временным промежутком (37 и 34 мс), которое может быть следствием того, что нейтронная звезда вращается с периодом менее 3 мс [76].

Возможен также вариант, в котором богатая феноменология повторных всплесков связана не со свойствами источника, а с окружающей его средой. Значительные неоднородности среды в хозяйской галактике могут играть роль плазменных линз, вызывая усиление сигнала и его спектральную модуляцию [77].

Последний очень важный вопрос, которым задаются многие исследователи: насколько типичным представителем популяции БРВ является повторный всплеск? Хотя часто принимается гипотеза об однородности популяции, т.е. предполагается, что все всплески являются повторными. В работе [78] показано, что, скорее всего, это не так, поскольку в противном случае в наблюдениях на телескопе Паркса уже было бы обнаружено несколько повторных всплесков. Учитывая большую площадь небесной сферы, которая наблюдалась радиотелескопом Паркса, можно говорить о сравнительной редкости (или коротком времени жизни) феномена повторных всплесков.

4. Гипотезы о природе быстрых радиовсплесков

Проблема объяснения феномена БРВ может быть разделена на две части: физическую, касающуюся радиационного механизма получения очень высокой яркостной температуры, спектральных и временных свойств наблюдаемых импульсов БРВ, и астрофизическую, рассматривающую конкретные космические объекты или явления с нужными для БРВ свойствами, соответствующими пространственным распределением и частотой встречаемости (event rate), достаточно большой мощностью, возможностью испускания источником излучения с высокой яркостной температурой и т.д. Разумеется, любая реалистичная модель должна учитывать в равной мере оба указанных аспекта, но это оказывается далеко не просто.

Список гипотез, предложенных для объяснения БРВ, даже без детализации содержит более двух десятков пунктов, часть из которых упомянута в небольшом обзоре [79]. Некоторые из предложенных моделей основаны на экзотической физике (космические струны, белые дыры, заряженные чёрные дыры и т.д.), другие — на более привычных сценариях.

Мы начнём с краткого перечня моделей, которые сегодня не считаются хорошими претендентами на объяснение БРВ. Отдельно будет рассмотрена модель слияния нейтронных звёзд, поскольку в течение некоторого времени она полагалась одной из наиболее предпочтительных. Затем мы сосредоточимся на обсуждении двух подходов (вспышки магнитаров, сверхгигантские импульсы радиопульсаров), которые рассматриваются как основные претенденты на объяснение природы БРВ. Отметим, что популяция БРВ может быть разнородной, и вовсе не обязательно все события объясняются одним типом источников. В связи с этим будет рассмотрен единственный на сегодня источник повторяющихся БРВ (см. раздел 3.2). После обсуждения теоретических сценариев мы рассмотрим, как данные по БРВ могут быть использованы для задач космологии, внегалактической астрономии, а также для проверок фундаментальных теорий.

4.1. Менее перспективные гипотезы

Гипотезы о природе источников БРВ можно разделить на две основные категории, охватывающие большую часть предложенных моделей: нейтронные звёзды и

экзотические сценарии. Нейтронные звёзды, с одной стороны, являются известными источниками мощного радиоизлучения, включая вспышки, а с другой — могут легко обеспечить как необходимые энергетические характеристики, так и малую длительность радиоимпульсов. Последнее обстоятельство связано с тем, что характерное динамическое время вблизи поверхности, а также альфеновское время во внутренней магнитосфере нейтронной звезды исчисляются несколькими миллисекундами. Появление различных экзотических сценариев, очевидно, связано с тем, что открытие БРВ — это хорошая возможность попытаться связать плоды фантазии теоретиков с реальностью.

Практически сразу после публикации данных о первом всплеске был предложен [80] сценарий генерации коротких радиоимпульсов космическими струнами. Источником является особая точка сверхпроводящей струны (касп), связанная с перегибом. Позднее этот подход развивался в нескольких публикациях других авторов.

Другой экзотический сценарий — испарение первичной чёрной дыры — был упомянут в работе [21], где был представлен второй из опубликованных БРВ. Всплески электромагнитного излучения разной длины волны на финальных стадиях хокинговского испарения были предсказаны 40 лет назад в работе [81]. Однако при потоках, характерных для БРВ, такое событие может быть обнаружено лишь с близких расстояний, менее 300 пк, внутри Галактики.

Интересная модификация модели с испарением чёрной дыры рассмотрена в [82], где речь идёт о появлении белой дыры в процессе испарения чёрной, что возможно в сценарии петлевой квантовой гравитации. При этом масса объекта может быть достаточно велика, что позволяет генерировать более мощный сигнал (соответственно, видимый с больших расстояний), чем в случае стандартного хокинговского испарения.

Завершая перечень экзотических сценариев с одиночными чёрными дырами, упомянем работу [83], в которой предложена модель коллапса магнитосферы электрически заряженной чёрной дыры Керра–Ньюмена. Подчёркнём, что в этой модели, как и в подавляющем большинстве других экзотических сценариев, крайне трудно в рамках реалистичных предположений объяснить все характеристики наблюдаемых всплесков.

На другом полюсе (относительно сценариев с экзотической физикой) находится модель вспышек на обычных звёздах [9]. Это интересный пример сценария БРВ, поскольку он сразу же вызвал бурную критику, и его удалось быстро исключить с помощью ряда различных аргументов (см. [15, 84] и приведённые там ссылки). Отметим также, что сейчас все актуальные сценарии БРВ основываются на предположении о внегалактической природе источников.

В нескольких работах предлагались магнитогидродинамические сценарии генерации всплесков. В одной из них рассматривалось [85] тормозное излучение бесстолкновительной плазмы с сильной турбулентностью. По мнению авторов [85], такая ситуация может возникнуть при воздействии на плазму релятивистского джета. Согласно этой модели пучок релятивистских электронов, взаимодействуя с сильной плазменной турбулентностью, порождает когерентное радиоизлучение.

Авторы [86] рассмотрели двойную систему с радиопульсаром. Если тело (планета, астероид, белый карлик) находится в замагниченном пульсарном ветре, то возникают две стационарные альфеновские волны ("альфеновские крылья" — Alfvén wings). Из-за неустойчивостей

эти стационарные волны могут стать источниками радиоизлучения. Вследствие релятивистской фокусировки пик излучения наблюдается только тогда, когда наблюдатель находится точно на оси пульсар-источник. В рамках такой модели крайне трудно объяснить некоторые наблюдаемые особенности БРВ, в частности отсутствие периодических повторов с орбитальным периодом вращения тела вокруг нейтронной звезды.

Таким образом, мы подошли к нестандартным сценариям с участием нейтронных звёзд. В части нестандартных моделей принадлежность этих компактных объектов двойным системам является ключевым пунктом, а в части — нет. Так, в модели, предложенной в [87], речь идёт о вспышке сверхновой в системе, где вторым компонентом является нейтронная звезда с достаточно большой магнитосферой. Ударная волна, взаимодействуя с магнитосферой, формирует магнитосферный хвост. Плазменные неустойчивости в хвосте могут приводить к мощному когерентному радиоизлучению. Вариант этой модели, получивший название "космический гребешок" (cosmic comb), предложен в работе [88]. Проблемой данной модели, как и многих других, может быть невозможность воспроизвести высокий наблюдаемый темп всплесков (в частности, потому что требуется специальная ориентация двойной системы относительно наблюдателя), а также, разумеется, повторяемость событий от одного источника.

Нейтронные звёзды, как упоминалось выше, являются привлекательными с точки зрения объяснения БРВ объектами благодаря наличию сильного магнитного поля, позволяющего генерировать импульс с характерным малым временем. Это обстоятельство используется в двух моделях с участием одиночных нейтронных звёзд. В первой, предложенной в [89], происходит падение астероида на нейтронную звезду. Образовавшееся при этом облако ионизованного вещества начинает расширяться, двигаясь преимущественно вдоль магнитных силовых линий. Когерентное излучение тонкого слоя на поверхности этого файерболла (от англ. fireball — огненный шар), по мнению авторов [89], может объяснить феномен БРВ.

Во второй модели ключевым моментом является процесс Примакова, состоящий в превращении аксионов в фотоны в магнитном поле. Этот сценарий БРВ предложен в статьях [90, 91]. Аксион является одним из кандидатов в частицы тёмного вещества. Если количество аксионов во Вселенной достаточно велико, то их небольшие облака массой $10^{-12} - 10^{-11} M_{\odot}$, влетая в магнитосферы нейтронных звёзд, могут порождать радиовсплески. Однако в статье [92] показано, что такой кластер будет разрушен приливными силами задолго до столкновения, что увеличит длительность импульса до нескольких секунд.

Одним из катастрофических событий в жизни нейтронной звезды может быть деконфайнмент вещества в её недрах [93], который сопровождается перестройкой структуры недр компактного объекта. За чрезвычайно малое время (порядка 1 мс) изменяются радиус и гравитационная масса объекта. Разумеется, при этом выделяется большое количество энергии, в основном в виде нейтрино. Однако такое событие может (и должно) сопровождаться и электромагнитным всплеском. Учитывая, что структура магнитного поля также должна претерпеть существенные изменения, можно рассуждать и о коротком мощном радиовсплеске. Было предложено два сценария [94, 95], в которых превращение нейтронной звезды в кварковую сопровождается БРВ.

Наконец, необходимо представить сценарий, в котором источником является супрамассивная нейтронная звезда (supramassive neutron star) [96]. Супрамассивная нейтронная звезда — это компактный объект, который удерживается от коллапса благодаря быстрому вращению. По мере торможения возрастает плотность в центре — и наконец происходит коллапс. Именно этот момент и является временем испускания короткого радиовсплеска. Существенно, что такая модель в принципе позволяет развести моменты рождения нейтронной звезды и БРВ. Это важно, так как наблюдаемые всплески не сопровождались яркими феноменами в других диапазонах (сверхновые, гамма-всплески и пр.). Авторы [96] полагали, что коллапс может произойти через несколько сотен или даже тысяч лет после образования нейтронной звезды. Однако анализ [97] показал, что если нейтронная звезда образуется в результате слияния двух компонентов, то коллапс, вероятнее всего, происходит как максимум в течение нескольких часов после этого события. Причиной столь быстрого коллапса является очень эффективное торможение вращения из-за большого магнитного поля, которое, согласно [97], представляет собой неотъемлемый атрибут нейтронных звёзд в такой ситуации. Модель БРВ в результате коллапса супрамассивной нейтронной звезды вскоре после слияния двух нейтронных звёзд в тесной двойной системе рассмотрена в работе [98].

Слияние компактных замагниченных звёзд. Выше мы упомянули сценарии, связанные со слияниями двойных нейтронных звёзд. В настоящее время модели, в которых БРВ так или иначе связаны с такими событиями, считаются возможными кандидатами для объяснения БРВ, однако ясно, что они не могут объяснить всю их популяцию и тем более они неприменимы для объяснения повторного источника FRB 121102. В течение некоторого времени популярность моделей со слиянием была связана с обнаружением длинного радиотранзientа в области локализации FRB 150418 [38]. Однако дальнейшие исследования [41, 42] показали, что этот транзient обусловлен активностью галактического ядра, а не наличием источника БРВ. Таким образом, ассоциация FRB 150418 с эллиптической галактикой в настоящий момент признана ошибочной.

Первоначально модель слияния двух компактных замагниченных звёзд для объяснения феномена БРВ была упомянута в работах [99, 100]. Затем она детально обсуждалась в статье [101]. Разумеется, и ранее (см., например, [99], а также ссылки в [101]) рассматривался вопрос о генерации радиоизлучения при слиянии компактных объектов, но речь не шла о мощных вспышках миллисекундной длительности.

Предполагается, что слияние нейтронных звёзд приводит к формированию быстро вращающегося массивного замагниченного объекта, который затем коллапсирует в чёрную дыру. Это позволяет объяснить и высокую светимость, и небольшую длительность всплеска. Максимальный темп энерговыделения может быть оценён по стандартной формуле для электромагнитных потерь вращающегося замагниченного тела:

$$\dot{E} \approx 4 \times 10^{45} \left(\frac{B}{10^{13} \text{ Гс}} \right)^2 \left(\frac{R}{10^6 \text{ см}} \right)^6 \left(\frac{P}{1 \text{ мс}} \right)^{-4} [\text{эрг с}^{-1}]. \quad (10)$$

Здесь B — магнитное поле на поверхности, R — радиус, P — период вращения тела. Как и в случае радио-

пульсаров, в радиоизлучение переходит лишь малая часть полных потерь энергии. Однако наблюдаемые радиопотоки БРВ $\sim 10^{-13}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, соответствующие радиосветимостям порядка 10^{40} эрг с^{-1} при расстояниях до источника в несколько сотен Мпк, легко объясняются даже при достаточно небольших коэффициентах трансформации энергии вращения в радиоизлучение.

В работе [101] не детализировался механизм излучения. Авторы статьи [102] детально рассмотрели механизм униполярного индуктора в приложении генерации БРВ при слияниях нейтронных звёзд (ранее этот механизм рассматривался для случая слияний в работе [103], где было продемонстрировано степенное возрастание светимости для разных механизмов генерации радиоизлучения с характерным временем испускания основного сигнала менее 1 с).

Отметим, что оцениваемый темп появления БРВ (порядка 100 событий в сутки в области объёмом $\sim 1 \text{ Гпк}^3$) слишком велик, чтобы все их можно было объяснить слияниями нейтронных звёзд: при консервативной оценке темпа слияния двойных нейтронных звёзд 1 раз в 10^5 лет в галактике типа Млечного Пути [104] из объёма 1 Гпк^3 ожидается примерно 100 слияний в год, что на несколько порядков ниже оценки темпа БРВ ($\sim 2-3 \times 10^3$ в сутки). Современные оценки темпа слияний, уточнённые благодаря наблюдениям гравитационно-волнового сигнала GW170817 от слияния [105], на порядок выше, ~ 1540 в год из объёма в 1 Гпк^3 , но это не спасает ситуацию. Коротких радиовсплесков от GW170817 не зарегистрировано [106], однако следует отметить, что первые радионаблюдения начались лишь спустя несколько часов после наступления самого события [107]. Не исключено, что немаловажную роль сыграл также возможный фактор узкой направленности нетеплового радиоизлучения при слиянии двойных нейтронных звёзд в источнике GW170817.

Другой вариант сценария слияния двойных замагниченных звёзд предложен в работе [108], где рассматривается слияние нейтронной звезды и чёрной дыры. В этом сценарии предполагается, что приливное разрушение нейтронной звезды не происходит вплоть до момента наступления самых последних стадий слияния. Поэтому чёрная дыра может оказаться в области замкнутых силовых линий магнитного поля нейтронной звезды, т.е. внутри светового цилиндра, $R_l = c/\omega$. Светимость в радиодиапазоне в случае невращающейся чёрной дыры может быть выражена следующим образом [108]:

$$L = 1,3 \times 10^{40} [\text{эрг с}^{-1}] \left(1 - \frac{2M_{\text{BH}}}{r}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^2 \left(\frac{B}{10^{12} \text{ Гс}}\right)^2 \times \\ \times \frac{\eta}{10^{-2}} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10 M_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{r_{\text{NS}}}{10^6 \text{ см}}\right)^6 \left(\frac{r}{30 M_{\odot}}\right)^{-6}. \quad (11)$$

Здесь M_{BH} — масса чёрной дыры, B — магнитное поле на поверхности нейтронной звезды, r_{NS} — её радиус, r — расстояние от чёрной дыры до поверхности нейтронной звезды. Величина η характеризует эффективность излучения радиоволн. Для вращающейся чёрной дыры светимость может быть ещё выше.

В настоящее время считается [104], что темп слияния нейтронных звёзд с чёрными дырами ещё ниже, чем темп слияния нейтронных звёзд. Поэтому авторы [108] предполагают, что такой механизм может объяснить лишь небольшую субпопуляцию БРВ. При этом в [108] отмечается, что в таком сценарии вероятно появление бимо-

дальных всплесков. Примером такого события может служить всплеск FRB 121002 [5].

Наконец, были рассмотрены и слияния замагниченных белых карликов [109]. Темпа потерь вращательной энергии в данном случае недостаточно для объяснения энергетических характеристик БРВ, поэтому дополнительно авторы [109] привлекают механизм пересоединения силовых линий магнитного поля. В этой модели возникает когерентное излучение в полярной области быстровращающегося (период порядка 1 с) белого карлика с очень большим магнитным полем, более чем 10^9 Гс. Для обеспечения необходимой энергии во время вспышки требуется выделение около 1 % энергии магнитного поля в виде радиоизлучения. Иногда БРВ в таком сценарии могут сопровождаться вспышкой сверхновой Ia, если суммарная масса белых карликов превосходит критическую массу (близкую к пределу Чандрасекара $\simeq 1,4 M_{\odot}$). Пока подобные явления, связанные с БРВ, не наблюдались.

Многие из моделей, считающихся малореалистичными, так или иначе связаны с более вероятными сценариями. К их рассмотрению мы и переходим в разделе 4.2. Там же будут представлены и некоторые модификации этих моделей.

4.2. Наиболее перспективные гипотезы

Как отмечалось во введении, любая реалистичная модель БРВ должна обеспечить описание наблюдаемой высокой яркостной температуры радиоизлучения, короткого времени импульса, его энергии, а также нужного числа источников, их пространственного распределения и других свойств в соответствии с наблюдениями (см. подробнее раздел 3).

4.2.1. Сверхимпульсы радиопульсаров.

У некоторых пульсаров наблюдаются сверхимпульсы (или гигантские импульсы, ГИ); наиболее хорошо изученными являются ГИ в молодом пульсаре в Крабовидной Туманности. ГИ — это короткие, длительностью до нескольких микросекунд, всплески радиоизлучения, пиковая интенсивность которых по крайней мере в несколько сотен или тысяч раз выше интенсивности среднего импульса пульсара. Более того, при наблюдениях ярких ГИ от пульсара в Крабовидной Туманности была обнаружена наноструктура: всплеск разрешается на совокупность гораздо более коротких индивидуальных нановсплесков, которые в сумме и дают ГИ.

Рекордно высокие по интенсивности нановсплески в ГИ в Крабовидной Туманности наблюдались на частоте 9 ГГц в полосе частот 2 ГГц. Несмотря на столь широкую полосу наблюдений и соответствующее высокое временное разрешение, эти всплески не удалось разрешить, т.е. их длительность W составляла менее 0,4 нс, пиковый поток превышал 2 МЯн [110]. В нерелятивистском случае это указывало бы на излучение из области размером менее $cW \sim 10$ см и соответствующую яркостную температуру выше 2×10^{41} К. Учёт движения с релятивистскими скоростями (лоренц-фактор $\gamma \sim 10^2 - 10^3$) увеличивает размер области излучения до $10^3 - 10^5$ см и уменьшает яркостную температуру, тем не менее до всё ещё огромных значений: $10^{35} - 10^{37}$ К. Вне всякого сомнения, нановсплеск — это когерентное излучение из достаточно компактной области.

Природа возникновения ГИ, как и природа пульсарного радиоизлучения вообще, до сих пор окончательно не установлена. Свойства ГИ послужили основанием для модели БРВ как ГИ от нейтронных звёзд, наблюдае-

мых с больших расстояний [111–113]⁵. В этой модели БРВ является совокупностью большого количества ($N_i \sim 10^{12} d_{\text{Гpc}}^2$, где $d_{\text{Гpc}}$ — расстояние до всплеска в Гпк) нановсплесков, аналогичных "рекордному" (см. выше) импульсу от Крабовидной Туманности.

Для объяснения импульсов БРВ в рамках этой модели требуется наличие достаточно экстремальных условий в релятивистской плазме магнитосферы, которые, тем не менее, в принципе могут реализоваться в природе. Согласно энергетическим соображениям, естественными кандидатами являются нейтронные звёзды возрастом до 100 лет и периодом до 20 мс, поэтому данная модель обычно называется "моделью молодых нейтронных звёзд". Источники в модели находятся на небольших космологических расстояниях, с характерной величиной лишь несколько сотен Мпк. Для того чтобы воспроизвести наблюдаемый темп БРВ, необходимо постулировать, что каждый источник в течение активной фазы производит 10^4 – 10^5 всплесков. Это число достаточно мало, чтобы не вступать в противоречие с отсутствием на данный момент детектирования повторных всплесков для всех БРВ, кроме FRB 121102, который может иметь другую природу (см. раздел 3.2). Непосредственная наблюдательная проверка модели состоит в поиске наносекундной субструктуры импульсов, который, однако, может быть затруднён из-за эффектов распространения коротких радиоимпульсов в межзвёздной и межгалактической среде.

Дальнейшее развитие модель ГИ получила в работе [51]. Предполагая, что БРВ образуются в очень молодых быстровращающихся (с миллисекундными периодами) пульсарах, авторы [51] рассмотрели эффект изменения меры дисперсии в молодом остатке сверхновой, в котором находится пульсар. В этой модели повторные импульсы (если таковые обнаружены) должны иметь уменьшающуюся на временном масштабе порядка нескольких лет меру дисперсии. Также в данной модели естественным образом объясняется отсутствие детектирования БРВ на низких частотах (менее ~ 600 МГц) — высокая плотность молодого остатка сверхновой приводит к сильному свободно-свободному поглощению излучения на этих частотах [51, 115].

Предполагаемое сравнительно небольшое расстояние до источников БРВ также может быть использовано для дополнительной проверки этой модели [116]. Во-первых, следует ожидать корреляции положений БРВ с относительно близкими галактиками. Однако пока большие ошибки в определении положения всплесков и их малое количество не позволяют сделать определённого вывода, но, по оценкам, наличия порядка 100 зарегистрированных всплесков уже может быть достаточно для применения этого подхода. Во-вторых, молодые нейтронные звёзды в рассматриваемой модели должны быть мощными источниками рентгеновского излучения, так что они должны также наблюдаться как ультраяркие рентгеновские источники (Ultra-luminous X-ray Source, ULX). Для проверки такой гипотезы тоже необходима более точная локализация БРВ.

4.2.2. Магнитары. Сразу же после открытия БРВ в 2007 г. появилась статья [114] (см. также [117]), в которой

⁵ См. также короткий комментарий в работе [114], где отмечено, что линейное масштабирование потока от гигантских импульсов пульсара в Крабовидной Туманности с величиной потери энергии вращения может привести к параметрам, необходимым для объяснения БРВ, если взять большие, но реалистичные темпы замедления молодых пульсаров.

предполагалось, что всплески могут быть связаны с гипервспышками магнитаров — мощными короткими (возможно, повторяющимися лишь с интервалом порядка нескольких десятков или даже сотен лет) эпизодами выделения электромагнитной энергии ($\Delta E \sim 10^{44}$ – 10^{46} эрг) наиболее сильно замагниченными нейтронными звёздами — магнитарами. Гипервспышки магнитаров, вероятно, связаны с катастрофической эволюцией сверхмощного (до $B \sim 10^{15}$ Гс на поверхности) магнитного поля в магнитосфере нейтронной звезды (см. обзор [118]). В первую очередь аргументация авторов [114] была связана с тем, что статистика гипервспышек магнитаров, ~ 100 в сутки из местного объёма в 1 Гпк³, может быть сопоставима со статистикой БРВ. Кроме того, временные характеристики (крутой фронт роста потока излучения от вспышки) этих двух явлений близки между собой. Полное энерговыделение при гипервспышке магнитара также легко позволяет объяснить наблюдаемые потоки в радиодиапазоне. Простой скейлинг ожидаемой радиосветимости в рамках одной из моделей [119], предложенной для расчётов радиоизлучения от слабых вспышек магнитаров, даёт хорошее соответствие с наблюдаемыми потоками БРВ при предположении, что мера дисперсии в основном связана с распространением сигнала в межгалактической среде. Наконец, в модели гипервспышек магнитаров легко объясняется отсутствие регистрации сигнала в других диапазонах спектра с расстояний ~ 1 Гпк.

В работах [114, 117] не предложено физической модели механизма генерации радиоизлучения. В рамках сценария гипервспышки такая модель была предложена в статье [120] (затем аналогичный подход развивался в ряде публикаций, в частности в [121]). В этой модели радиовсплеск возникает в результате синхротронного мазерного механизма⁶ в релятивистской ударной волне в замагниченной плазме, окружающей магнитар. Например, это может быть аналог пульсарной туманности, сформированный магнитарным ветром. Такие образования действительно наблюдаются вокруг некоторых магнитаров и пульсаров с большими магнитными полями (см. [123–126]). Электромагнитный (ЭМ) импульс, возникший в магнитосфере после мощной вспышки магнитара, достигает границы пульсарной туманности (характерное расстояние $r \sim 10^{15}$ – 10^{16} см). При взаимодействии мощного ЭМ-импульса с туманностью от образующегося контактного разрыва отходят две ударные волны — прямая и обратная, а сам контактный разрыв движется с лоренц-фактором $\gamma_{\text{cd}} \sim 10^4$. За фронтами как головной, так и обратной ударных (релятивистских) волн, распространяющихся в замагниченной плазме туманности, возникает инверсная заселённость электронов с энергиями менее $\gamma_{\text{cd}} m_e c^2$ и создаются условия для синхротронного мазерного излучения частиц на частоте около 1 ГГц, определяемой релятивистской циклотронной частотой в магнитном поле за фронтом ударной волны $\sim e B_{\text{ЕМР}} / (\gamma_{\text{cd}} m_e c)$ (здесь $B_{\text{ЕМР}}$ — магнитное поле в ЭМ-импульсе в области взаимодействия, $B_{\text{ЕМР}} \sim 10^5$ Гс). Длительность радиоимпульса W определяется временем передачи энергии ЭМ-импульса плазме пульсарной туманности, которое оказывается порядка ширины исходного ЭМ-импульса: $l/c \sim 10^{-4}$ с.

Важным предсказанием модели [120] является одно-временный миллисекундный импульс жёсткого излучения от БРВ в ТэВ-ном диапазоне. Это синхротронное

⁶ Условия генерации ГГц-синхротронного мазерного излучения в замагниченной релятивистской плазме рассмотрены в работе [122].

излучение релятивистских частиц за фронтом головной ударной волны, попадающее в системе наблюдателя в ТэВ-ный диапазон. В принципе наблюдения на наземных гамма-телескопах (HESS (High Energy Stereoscopic System), MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) и др.) могут проверить это предсказание. Поиск постоянного ТэВ-ного излучения от источника повторных вспышек FRB 121102 (который, по-видимому, представляет собой особый случай), проведённый массивом черенковских телескопов VERITAS, результатов не дал [71], результаты синхронного поиска импульсов в ТэВ-ном и радиодиапазонах пока не опубликованы.

В случае синхротронного мазерного излучения временная структура радиоимпульса, в отличие от таковой в модели ГИ, в целом повторяет структуру исходного ЭМ-импульса, генерируемого при перестройке магнитосферы магнитара во время гигантской вспышки, и не должна иметь наносекундных субструктур. Это также может быть проверено в наблюдениях с высоким временным разрешением.

Возможно, родственные БРВ явления представляют собой события, обнаруженные авторами работы [127] в направлении Туманности Андромеды (M31). Проводя наблюдения на частоте 328 МГц на телескопе WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope), авторы [127] обнаружили миллисекундные радиовсплески. Дисперсия соответствует ожидаемой в направлении на M31. Всего было зарегистрировано несколько десятков всплесков. В одном случае обнаружено шесть всплесков в течение 1 ч от одного источника с дисперсией $54,7 \text{ пк см}^{-3}$. Также есть ещё несколько кандидатов в повторные всплески. В рамках магнитарной модели менее мощные радиовсплески могут сопровождать квазирегулярную активность магнитаров — источников мягких повторных гамма-всплесков (soft gamma-ray repeaters, SGR), которые могут наблюдаться из близких галактик [117].

Критика магнитарной гипотезы частично основана на работе [128], в которой проводился поиск радиосигнала от гипервспышки галактического магнитара SGR 1806-20. Поскольку источник находится как минимум на четыре порядка ближе, чем возможные источники БРВ, можно было бы ожидать чрезвычайно мощного радиовсплеска, который мог быть зарегистрирован боковыми лепестками диаграмм направленности телескопов. Но, так как был получен нулевой результат, можно с уверенностью говорить о том, что гипервспышка SGR 1806-20, наблюдавшаяся в декабре 2004 г., не сопровождалась радиовсплеском с широкой диаграммой направленности (в рассматриваемой модели БРВ не имеют узконаправленного излучения в радиодиапазоне). Однако это не является решающим аргументом, поскольку вывод основывается на единичном источнике, свойства которого могут отличаться от свойств прочих источников. В частности, магнитар SGR 1806-20 не окружён пульсарной туманностью.

4.3. Быстрые радиовсплески как зонды внегалактической среды и инструмент для проверки физических и космологических теорий

Быстрые радиовсплески представляют большой интерес не только сами по себе, но и как инструмент астрофизических и физических исследований. Во-первых, зондирование чрезвычайно коротким радиоимпульсом позволяет исследовать свойства внегалактической среды. Во-вторых, мощные вспышки, происходящие на чрезвычайно больших расстояниях от наблюдателя, представляют

интерес для космологии. Наконец, короткие импульсы, распространяющиеся в течение нескольких миллиардов лет, позволяют проводить проверку предсказаний фундаментальных теорий. В этом разделе мы рассмотрим указанные возможности.

Использование БРВ для изучения свойств межгалактической среды обсуждалось в ряде работ. Обычно при этом предполагалось, что мера дисперсии (а также мера вращения) в основном связана именно с межгалактической средой, а не с локальным окружением источника или его материнской галактикой. Однако очевидно, что даже если межгалактическая среда не доминирует, но разные вклады, тем не менее, удастся разделить и идентифицировать, то БРВ всё равно могут служить отличными зондами для изучения газа и магнитных полей в филаментах крупномасштабной структуры Вселенной, скоплениях галактик и т.д.

В статье [129] использовались данные численного моделирования крупномасштабной структуры при красных смещениях вплоть до $z = 5$, для того чтобы оценить ожидаемые величины меры дисперсии и меры вращения, а также относительные вклады разных элементов структуры (войдов, филаментов, скоплений галактик). Было показано, что основной вклад в меру дисперсии на интервале красных смещений $0,1 \lesssim z \lesssim 1,5$ вносят филаменты (на больших расстояниях доминируют войды). В меру вращения основной вклад дают скопления галактик. Однако если выбирать БРВ в направлениях, в которых луч зрения не пересекает скопления, то можно определить магнитное поле в филаментах.

В работе [130] рассмотрено, как данные о мере дисперсии БРВ, наблюдающихся за скоплением галактик, совместно с данными по эффекту Сюняева–Зельдовича для конкретного скопления могут быть использованы для определения параметров тёплой межгалактической среды. Детектирование нескольких БРВ, просвечивающих скопление, позволяет определить профиль плотности в нём, а эффект Сюняева–Зельдовича — профиль давления. Совместно эти данные дадут профиль температуры газа.

По мере накопления большой статистики БРВ станет возможным их использование для изучения свойств межгалактической среды в большом масштабе даже без детальной локализации каждого отдельного источника. Такой подход обсуждается в работе [131]. Отметим, однако, что для достижения этой цели, вероятно, окажется недостаточным использование только данных таких установок как UTMOST, CHIME, HIRAX, FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope). По всей видимости, лишь радиотелескоп нового поколения (в первую очередь Square Kilometer Array — SKA) сможет дать требуемое количество (~ 10000) всплесков.

Также около 10 тыс. БРВ потребуется, чтобы наложить серьёзные ограничения на компактные массивные объекты (Massive Astrophysical Compact HALO Object, MACHO) — кандидаты в холодную скрытую массу, на которых может происходить линзирование радиовсплесков [132]. Интересен диапазон масс примерно от $20 M_{\odot}$ до $100 M_{\odot}$, для которого пока получены недостаточно сильные ограничения на полный вклад в тёмное вещество. Задержка сигнала при таком линзировании составит несколько миллисекунд. Возможно, и меньшие задержки, связанные с более лёгкими линзами, могут влиять на свойства БРВ. Так называемое нанолинзирование БРВ обсуждалось недавно в работе [133]. Если в наблюдениях удастся достигнуть нужной точности, то можно будет установить очень жёсткое ограничение на

существование компактных лёгких линз, вносящих вклад в тёмное вещество.

Практически сразу после появления статьи [22] начались исследования, призванные, во-первых, проверить, могут ли БРВ быть объектами на космологических расстояниях (т.е. соответствует ли их статистика ожидаемой для космологического распределения), а во-вторых, началось обсуждение того, каким образом данные по БРВ (разумеется, при заметном росте статистики, а также, возможно, при отождествлении их в других спектральных диапазонах) могут быть использованы в космологии. К работам первого типа можно отнести, например, статьи [134, 135]. В первой из них на основе численного моделирования параметров распределения галактик были исследованы ожидаемые свойства популяции БРВ при предположении, что это "стандартные свечи". Было рассмотрено три варианта моделей. В первом варианте источники радиовсплесков коррелируют с полной звёздной массой (что соответствует, например, модели сливающихся нейтронных звёзд). Во втором — БРВ коррелируют с темпом звездообразования (как это ожидается в моделях, где источники связаны с молодыми объектами, например с активными магнитарами). Наконец, в третьем варианте предполагается, что феномен быстрых радиовсплесков так или иначе связан с наличием сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики. Ввиду малой статистики не удаётся исключить какую-либо из рассмотренных моделей. В работе [135] также рассмотрены свойства популяции БРВ при предположении космологических расстояний до источников, в частности, показано, что на имевшейся в тот момент (так же как и на имеющейся в настоящее время) статистике довольно трудно сделать выводы о свойствах популяции: необходимы по крайней мере многие десятки источников.

К работам второго типа, в которых рассматривается приложение БРВ для космологических исследований, могут быть отнесены статьи [136–138]. Общим выводом является то, что БРВ (если это действительно источники, находящиеся на красных смещениях $z \sim 1$) могут быть использованы в качестве источников информации о глобальных космологических параметрах, но только при увеличении статистики и при условии выяснения базовых свойств популяции, таких, например, как распределение источников по светимостям. Новый анализ перспектив использования БРВ для космологии проведён в [139]. Результаты работы [139] пессимистичны по сравнению с результатами более раннего анализа. Тем не менее её авторы полагают, что в будущем БРВ смогут внести вклад в оценку барионной плотности во Вселенной.

Если для БРВ одновременно будут получены массовые измерения DM и z , то это сделало бы их особенно полезным инструментом для космологии. Такая ситуация рассмотрена в работах [137, 138], где считается, что красные смещения могут быть измерены по наблюдениям предполагаемых гамма-всплесков, связанных с БРВ. В частности, это позволило бы независимо определить вклад барионов в полную плотность Вселенной, а также в случае наблюдения источников на больших красных смещениях исследовать параметры реионизации. Несколько десятков БРВ с известными красными смещениями (если источники находятся достаточно далеко) уже позволили бы ограничить некоторые космологические модели. Отметим также работу [140], где рассмотрена возможность определения собственного расстояния в космологии по наблюдениям большого числа (~ 500) БРВ с известными красными смещениями.

Наблюдения БРВ могут быть использованы для определения фундаментальных физических параметров и проведения независимой проверки физических принципов. В первую очередь речь идёт об ограничении на массу фотона, а также о проверке принципа эквивалентности и лоренц-инвариантности.

Чрезвычайно узкие импульсы БРВ позволяют с высокой точностью определять задержку между сигналами на разных частотах. Это позволяет использовать данные источники при проверке принципа эквивалентности. Например, рассматривается распространение сигнала в гравитационном потенциале нашей Галактики [141]. Использование радиоданных осложняется тем, что эффект уширения сигнала в межгалактической и межзвёздной среде не может быть однозначно отделён от гипотетического эффекта, связанного с нарушением принципа эквивалентности. Поэтому было бы крайне важным получить одновременные данные о всплесках не только в радиодиапазоне или независимо определить меру дисперсии сигнала. Кроме распространения в гравитационном потенциале Галактики можно рассмотреть сигналы от всплесков, расположенных за крупными скоплениями галактик [142]. Современные ограничения на параметр $\Delta\gamma$ (разность значений постньютоновского параметра γ для двух частот), полученные по данным о БРВ, составляют $O(10^{-8})$, однако они могут быть легко улучшены более чем на порядок при получении более точных данных [143].

Первые работы по оценке предела массы фотона [144, 145] появились после того, как было заявлено о возможной идентификации FRB 150418 с галактикой и, соответственно, определении красного смещения для этого источника. Поскольку впоследствии идентификация оказалась ложной, эти работы представляют интерес лишь с методической точки зрения. Однако после надёжного отождествления FRB 121102 и точного определения красного смещения для этого объекта появилась более интересная оценка [146]: $m_\gamma < 2,2 \times 10^{-14}$ эВ, т.е. $< 3,9 \times 10^{-50}$ кг.

5. Заключение

История изучения быстрых радиовсплесков насчитывает всего лишь 10 лет. За это время у БРВ было обнаружено много важных свойств (поляризация излучения, повторные всплески, идентификация материнской галактики для повторного всплеска), однако статистика БРВ растёт довольно медленно, и их природа остаётся неизвестной. Исключёнными из рассмотрения можно считать лишь "катастрофические" модели, в которых радиовсплеск сопровождается мощным излучением в других диапазонах. Даже в этом случае к такому выводу можно прийти лишь с учётом гипотезы об однородности популяции источников.

Прогресс в изучении БРВ можно в первую очередь связывать с появлением новых инструментов, таких как UTMOST, CHIME, HIRAX и др. В настоящее время в строй вводится новый 500-метровый радиотелескоп FAST [56]. Расчёты показывают, что этот инструмент сможет обнаруживать примерно один быстрый радиовсплеск в неделю. Примерно сравнимый темп всплесков сможет в ближайшем будущем давать инструмент UTMOST, а телескоп CHIME, по некоторым оценкам, сможет регистрировать всплески в несколько раз чаще (если их количество на низких частотах достаточно велико) [49].

Фантастически высокий темп регистрации — один всплеск в час! — сможет давать установка SKA (Square

Kilometre Array) [147, 148]. Однако это дело уже более отдалённого будущего.

В настоящее время продолжают успешные наблюдения на радиотелескопе Паркса, реализуется специализированная программа по поиску БРВ на 300-метровом телескопе в Аресибо [149]. Новая система Realfast по идентификации коротких транзитных событий вскоре будет запущена на VLA [150]. Кроме того, установка системы Apertif [151] на телескопе WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope) в Вестерборке (Нидерланды) позволит активно подключиться к поиску быстрых радиотранзиентов. Важно отметить, что WSRT будет наблюдать северное небо, пока недостаточно охваченное такими поисками.

Возможно, как и в случае решения загадки гамма-всплесков, ключевым станет идентификация события в других спектральных диапазонах. Это могут быть как гамма-наблюдения, с помощью которых легко осуществляется обзор всего неба, так и оптические наблюдения. В последнем случае надежды связываются с вводом в строй обзорного телескопа нового поколения LSST (Large Synoptic Survey Telescope) [152].

Развиваются методы быстрой идентификации БРВ и поиска сопутствующих транзиентов. Так, например, реализуется программа Deeper Wider Faster, включающая в себя более 30 инструментов, работающих в разных диапазонах спектра, а также установки, детектирующие космические лучи и гравитационные волны [153]. Координированный обмен информацией в режиме реального времени после регистрации быстрого радиовсплеска (например, на телескопе в Парксе) и большая подготовительная работа позволяют надеяться на получение важных результатов в ближайшее время.

Как бы то ни было, быстрые космические радиовсплески, вспыхивающие на небе несколько раз в минуту, пока остаются одной из самых интересных нерешённых проблем современной астрофизики.

Благодарности. Авторы благодарят рецензента за замечания. Работа С.Б.П. (разделы 2, 3.1, 4.1 и 4.3) и М.С.П. (раздел 3.2 и 4.2.1) поддержана грантом Российского научного фонда 14-12-00146. Работа К.А.П. поддержана грантом Российского научного фонда 16-12-10519 (разделы 1.1–1.3, 4.2.2 и общее редактирование). С.Б.П. благодарит М. Лютикова и В.С. Бескина за многочисленные обсуждения.

Список литературы

- Cordes J M, Lazio T J W, McLaughlin M A *New Astron.* **48** 1459 (2004)
- Hyman S D et al. *Nature* **434** 50 (2005)
- Roy S et al. *Astrophys. J. Lett.* **712** L5 (2010)
- Lorimer D R et al. *Science* **318** 777 (2007)
- Champion D J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460** L30 (2016)
- Katz J I *Phys. Rev. D* **89** 103009 (2014)
- Fender R et al., in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array, AASKA14, June 8–13, 2014, Giardini Naxos, Italy; PoS* **215** 051 (2015)
- Kellermann K I, Pauliny-Toth I I K *Astrophys. J.* **155** L71 (1969)
- Loeb A, Shvartzvald Y, Maoz D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **439** L46 (2014)
- Cordes J M, McLaughlin M A *Astrophys. J.* **596** 1142 (2003)
- Katz J I *Astrophys. J.* **818** 19 (2016)
- Xu S, Zhang B *Astrophys. J.* **832** 199 (2016)
- Yao J M, Manchester R N, Wang N *Astrophys. J.* **835** 29 (2017)
- Lyubarsky Y *Astrophys. J.* **682** 1443 (2008)
- Lyubarsky Y, Ostrovska S *Astrophys. J.* **818** 74 (2016)
- Постнов К А *УФН* **169** 545 (1999); Postnov K A *Phys. Usp.* **42** 469 (1999)
- McLaughlin M A et al. *Nature* **439** 817 (2006)
- Burke-Spolaor S *Proc. Int. Astron. Union* **8** (S291) 95 (2013)
- Cordes J M, Lazio T J W, astro-ph/0207156
- Schnitzeler D H F M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427** 664 (2012)
- Keane E F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **425** L71 (2012)
- Thornton D et al. *Science* **341** 53 (2013)
- Burke-Spolaor S et al. *Astrophys. J.* **727** 18 (2011)
- Kulkarni S R et al. *Astrophys. J.* **797** 70 (2014)
- Kocz J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420** 271 (2012)
- Katz J I *Astrophys. J.* **788** 34 (2014)
- Petroff E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **451** 3933 (2015)
- Petroff E et al. *Publ. Astron. Soc. Australia* **33** e045 (2016)
- Rane A, Lorimer D J *Astrophys. Astron.* **38** 55 (2017)
- Petroff E, arXiv:1709.02189
- Bannister K W et al. *Astrophys. J. Lett.* **841** L12 (2017)
- Farah W et al., arXiv:1803.05697
- Michilli D et al. *Nature* **553** 182 (2018)
- Crawford F et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460** 3370 (2016)
- Bhandari S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **475** 1427 (2018)
- Petroff E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **447** 246 (2015)
- Petroff E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **469** 4465 (2017)
- Keane E F et al. *Nature* **530** 453 (2016)
- Ravi V et al. *Science* **354** 1249 (2016)
- Williams P K G, Berger E *Astrophys. J. Lett.* **821** L22 (2016)
- Johnston S et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **465** 2143 (2017)
- Giroletti M et al. *Astron. Astrophys.* **593** L16 (2016)
- Yamasaki S, Totani T, Kawanaka N M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460** 2875 (2016)
- Xi S-Q et al. *Astrophys. J. Lett.* **842** L8 (2017)
- Palaniswamy D et al. *Astrophys. J.* **790** 63 (2014)
- DeLaunay J J et al. *Astrophys. J. Lett.* **832** L1 (2016)
- Coenen T et al. *Astron. Astrophys.* **570** A60 (2014)
- Rowlinson A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **458** 3506 (2016)
- Caleb M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **458** 718 (2016)
- Burke-Spolaor S et al. *Astrophys. J.* **826** 223 (2016)
- Lyutikov M, Burzawa L, Popov S B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **462** 941 (2016)
- Rajwade K M, Lorimer D R *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **465** 2286 (2017)
- Chawla P et al. *Astrophys. J.* **844** 140 (2017)
- Foster G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **474** 3847 (2018)
- Masui K et al. *Nature* **528** 523 (2015)
- Li L-B et al. *Res. Astron. Astrophys.* **17** 6 (2017)
- Oppermann N, Connor L D, Pen U-L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **461** 984 (2016)
- Ravi V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* sty1551 (2018); arXiv:1710.08026
- Macquart J P, Ekers R D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **474** 1900 (2018)
- Lawrence E et al. *Astron. J.* **154** 117 (2017)
- Vander Wiel S et al., arXiv:1612.00896
- Spitler L G et al. *Astrophys. J.* **790** 101 (2014)
- Spitler L G et al. *Nature* **531** 202 (2016)
- Chatterjee S et al. *Nature* **541** 58 (2017)
- Gajjar V et al. *The Astronomer's Telegram* (1067) (2017)
- Tendulkar S P et al. *Astrophys. J. Lett.* **834** L7 (2017)
- Bassa C G et al. *Astrophys. J. Lett.* **843** L8 (2017)
- Marcote B et al. *Astrophys. J. Lett.* **834** L8 (2017)
- Scholz P et al. *Astrophys. J.* **846** 80 (2017)
- Hardy L K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **472** 2800 (2017)
- Bird R, for the VERITAS Collab., arXiv:1708.04717
- Beloborodov A M *Astrophys. J. Lett.* **843** L26 (2017)
- Metzger B D, Berger E, Margalit B *Astrophys. J.* **841** 14 (2017)
- Kashiyama K, Murase K *Astrophys. J. Lett.* **839** L3 (2017)
- Wang F Y, Yu H J. *Cosmol. Astropart. Phys.* **3** 023 (2017)
- Katz J I *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **476** 1849 (2018)
- Cordes J M et al. *Astrophys. J.* **842** 35 (2017)
- Palaniswamy D, Li Y, Zhang B *Astrophys. J. Lett.* **854** L12 (2018)
- Katz J I *Mod. Phys. Lett. A* **31** 1630013 (2016)
- Vachaspati T *Phys. Rev. Lett.* **101** (14) 141301 (2008)
- Rees M J *Nature* **266** 333 (1977)
- Barrau A, Rovelli C, Vidotto F *Phys. Rev. D* **90** 127503 (2014)
- Liu T et al. *Astrophys. J.* **826** 82 (2016)
- Tuntsov A V *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** L26 (2014)
- Romero G E, del Valle M V, Vieyro F L *Phys. Rev. D* **93** 023001 (2016)
- Mottet F, Zarka P *Astron. Astrophys.* **569** A86 (2014)

87. Egorov A E, Postnov K A *Astron. Lett.* **35** 241 (2009)
88. Zhang B *Astrophys. J. Lett.* **836** L32 (2017)
89. Geng J J, Huang Y F *Astrophys. J.* **809** 24 (2015)
90. Ткачев И И *Письма в ЖЭТФ* **101** 3 (2015); Tkachev I I *JETP Lett.* **101** 1 (2015)
91. Iwazaki A *Phys. Rev. D* **91** 023008 (2015)
92. Pshirkov M S *Intern. J. Mod. Phys. D* **26** 1750068 (2017)
93. Drago A, Pagliara G *Phys. Rev. C* **92** 045801 (2015)
94. Alvarez-Castillo D E et al., arXiv:1506.08645
95. Shand Z et al. *Res. Astron. Astrophys.* **16** (5) 011 (2016)
96. Falcke H, Rezzolla L *Astron. Astrophys.* **562** A137 (2014)
97. Ravi V, Lasky P D *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441** 2433 (2014)
98. Zhang B *Astrophys. J. Lett.* **780** L21 (2014)
99. Pshirkov M S, Postnov K A *Astrophys. Space Sci.* **330** 13 (2010)
100. Lyutikov M *Astrophys. J.* **768** 63 (2013)
101. Totani T *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **65** L12 (2013)
102. Wang J S et al. *Astrophys. J. Lett.* **822** L7 (2016)
103. Lipunov V M, Panchenko I E *Astron. Astrophys.* **312** 937 (1996)
104. Postnov K A, Yungelson L R *Living Rev. Relat.* **17** 3 (2014)
105. Abbott B P et al. *Phys. Rev. Lett.* **119** 161101 (2017)
106. Abbott B P et al. *Astrophys. J. Lett.* **848** L12 (2017)
107. Alexander K D et al. *Astrophys. J. Lett.* **848** L21 (2017)
108. Mingarelli C M F, Levin J, Lazio T J W *Astrophys. J. Lett.* **814** L20 (2015)
109. Kashiya K, Ioka K, Mészáros P *Astrophys. J. Lett.* **776** L39 (2013)
110. Hankins T H, Eilek J A *Astrophys. J.* **670** 693 (2007)
111. Pen U L, Connor L *Astrophys. J.* **807** 179 (2015)
112. Cordes J M, Wasserman I *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **457** 232 (2016)
113. Connor L, Sievers J, Pen U L *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **458** L19 (2016)
114. Popov S B, Postnov K A, in *Evolution of Cosmic Objects Through their Physical Activity, Proc. of the Conf. Dedicated to Viktor Ambartsumian's 100th Anniversary, 15–18 September 2008, Yerevan, Byurakan, Armenia* (Eds H A Harutyunian, A M Mickaelian, Y Terzian) (Yerevan: Gitutyun, 2010) p. 129
115. Piro A L *Astrophys. J. Lett.* **824** L32 (2016)
116. Popov S B, Pshirkov M S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **462** L16 (2016)
117. Popov S B, Postnov K A, arXiv:1307.4924
118. Turolla R, Zane S, Watts A L *Rep. Prog. Phys.* **78** 116901 (2015)
119. Lyutikov M *Astrophys. J. Lett.* **580** L65 (2002)
120. Lyubarsky Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **442** L9 (2014)
121. Murase K, Kashiya K, Mészáros P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **461** 1498 (2016)
122. Ghisellini G *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **465** L30 (2017)
123. Vink J, Bamba A *Astrophys. J. Lett.* **707** L148 (2009)
124. Younes G et al. *Astrophys. J.* **757** 39 (2012)
125. Younes G et al. *Astrophys. J.* **824** 138 (2016)
126. Safi-Harb S *Proc. Int. Astron. Union* **291** 251 (2013)
127. Rubio-Herrera E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **428** 2857 (2013)
128. Tendulkar S P, Kaspi V M, Patel C *Astrophys. J.* **827** 59 (2016)
129. Akahori T, Ryu D, Gaensler B M *Astrophys. J.* **824** 105 (2016)
130. Fujita Y et al. *Astrophys. J.* **834** 13 (2017)
131. Shirasaki M, Kashiya K, Yoshida N *Phys. Rev. D* **95** 083012 (2017)
132. Muñoz J B et al. *Phys. Rev. Lett.* **117** 091301 (2016)
133. Eichler D *Astrophys. J.* **850** 159 (2017)
134. Dolag K et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **451** 4277 (2015)
135. Caleb M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **458** 708 (2016)
136. Zhou B et al. *Phys. Rev. D* **89** 107303 (2014)
137. Deng W, Zhang B *Astrophys. J. Lett.* **783** L35 (2014)
138. Gao H, Li Z, Zhang B *Astrophys. J.* **788** 189 (2014)
139. Walters A et al. *Astrophys. J.* **856** 65 (2018); arXiv:1711.11277
140. Yu H, Wang F Y *Astron. Astrophys.* **606** A3 (2017)
141. Wei J J et al. *Phys. Rev. Lett.* **115** 261101 (2015)
142. Zhang S-N, arXiv:1601.04558
143. Tingay S J, Kaplan D L *Astrophys. J. Lett.* **820** L31 (2016)
144. Wu X F et al. *Astrophys. J. Lett.* **822** L15 (2016)
145. Bonetti L et al. *Phys. Lett. B* **757** 548 (2016)
146. Bonetti L et al. *Phys. Lett. B* **768** 326 (2017)
147. Keane E F (SUPERB Collab.), arXiv:1602.05165
148. Macquart J P et al., in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array, AASKA14, June 8–13, 2014, Giardini Naxos, Italy; PoS* **215** 055 (2015)
149. Chennamangalam J et al., arXiv:1511.04132
150. Law C J et al. *Astrophys. Suppl. Ser.* **236** 8 (2018); arXiv:1802.03084
151. Maan Y, van Leeuwen J, arXiv:1709.06104
152. Lyutikov M, Lorimer D R *Astrophys. J. Lett.* **824** L18 (2016)
153. Andreoni I, Cooke J, arXiv:1802.01100

Fast radio bursts

S.B. Popov⁽¹⁾, K.A. Postnov^(1,2), M.S. Pshirkov^(1,3,4)

⁽¹⁾ Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Universitetskii prosp. 13, 119234 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, 420008 Kazan, Russian Federation

⁽³⁾ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation

⁽⁴⁾ Astro Space Centre, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Pushchino Radio Astronomy Observatory, 142290 Pushchino, Moscow region, Russian Federation

E-mail: ⁽¹⁾ sergepolar@gmail.com, ^(1,2) kpostnov@gmail.com, ^(1,3,4) pshirkov@gmail.com

First discovered in 2007, fast radio bursts (FRBs) are high power ($10^{-1} - 10^2$ Jy), millisecond-scale, highly dispersive single radio pulses whose record high brightness temperatures suggest a non-thermal emission mechanism. As of March 2018, a total of 32 FRBs have been recorded. There is also one repeating source, from which hundreds of bursts have already been detected. The rate of events is estimated to be several thousand per day per sky (neglecting repeated bursts), and their isotropic distribution on the sky suggests a likely cosmological origin. While numerous hypotheses have been proposed for FRBs since their discovery, the origin of these transients is not yet known. The most promising models either relate them to burst-type radiation from magnetars (neutron stars powered by the dissipation of their magnetic energy) or consider them analogous to giant pulses from some radio pulsars (strongly magnetized rotating neutron stars). Increasing statistics on the observed bursts and improving the characterization of the FRB population will allow the FRBs to become another tool to probe the intergalactic medium, estimate the cosmological parameters and test fundamental physical theories.

Keywords: fast radio bursts, neutron stars, radio astronomy, transient sources

PACS numbers: 95.85.Bh, 95.85.Fm, 97.60.Jd

Bibliography — 153 references

Received 7 December 2017

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (10) 1063–1079 (2018)

Physics – Uspekhi **61** (10) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038313>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.03.038313>