

ПЕРСПЕКТИВЫ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК, СОПУТСТВУЮЩИХ БЫСТРЫМ РАДИОВСПЛЕСКАМ, НА ТЕЛЕСКОПЕ СРГ/еРОЗИТА

© 2019 г. А. Д. Хохрякова¹, Д. А. Ляпина¹, С. Б. Попов^{1,2,3*}

¹ Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ НИУ Высшая Школа Экономики, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.; после доработки 28.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

В работе рассмотрена возможность обнаружения сопутствующего рентгеновского излучения от источников быстрых радиовсплесков с помощью телескопа еРОЗИТА в составе СРГ. Показано, что за 4 года обзорных наблюдений в поле зрения телескопа может попадать до 300 радиовсплесков. Около 1% из них будет зарегистрировано наземными радиотелескопами. При полном рентгеновском энерговыделении $\sim 10^{46}$ эрг в зависимости от спектральных параметров и поглощения в межзвездной и межгалактической средах вспышка может быть зарегистрирована с расстояний от 1 Мпк (тепловой спектр с температурой 200 кэВ и большим поглощением) до 1 Гпк (степенной спектр с фотонным показателем $\Gamma = 2$ и реалистичным поглощением). Таким образом, данные СРГ/еРОЗИТА позволят дать существенные ограничения на параметры источников быстрых радиовсплесков, а вероятно, и идентифицировать источники в рентгеновском диапазоне, что даст возможность выбрать модели, описывающие генерацию этих всплесков.

Ключевые слова: быстрые радиовсплески, рентгеновские наблюдения, магнитары.

DOI: 10.1134/S0320010819030033

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые радиовсплески (Fast Radio Bursts — FRB) — это короткие (от нескольких миллисекунд до десятка миллисекунд) яркие (потоки в максимуме до ~ 100 Ян) радиовспышки (см. обзор в [1]). Первое событие из данного класса транзиентов было представлено в 2007 г. в работе [2]. С тех пор обнаружено несколько десятков таких всплесков [3]¹.

Большая мера дисперсии, а также ряд других соображений, говорят о внегалактическом происхождении этого явления. В настоящий момент надежная идентификация сделана лишь для единственного источника повторных быстрых радиовсплесков — FRB 121102 (система обозначений: год-месяц-день). Источник находится в карликовой галактике с активным звездообразованием на красном смещении $z = 0.193$ (соответствующее фотометрическое расстояние 972 Мпк) [4].

На настоящий момент предложено огромное количество моделей, объясняющих природу источников FRB (см. “каталог моделей” в обзоре [5]). Это отражает широкий диапазон неопределенностей в описании природы этих объектов. Однако основные современные модели так или иначе связывают FRB с нейтронными звездами.

Диссипация магнитной энергии молодых нейтронных звезд — одна из наиболее перспективных гипотез о природе FRB. В частности, генерация FRB может быть связана с гипервспышками магнитаров (об этом типе источников и формах их активности см. обзор [6]). Данная модель была предложена сразу же после открытия первого всплеска [7]. Важным предсказанием этой модели является одновременный импульс излучения от FRB в рентгеновском и, возможно, гамма-диапазонах (см., например, работы [8, 9]). Светимость единственной наблюдавшейся гипервспышки источника SGR 1806–20 составляла $\sim 10^{47}$ эрг/с, а полное энерговыделение $\sim 10^{46}$ эрг [10].

* Электронный адрес: sergepolar@gmail.com

¹ См. онлайн-каталог <http://www.frbcat.org>.

В данной работе мы рассматриваем возможность регистрации жесткого излучения, сопровождающего FRB, с помощью рентгеновского телескопа СРГ/еРОЗИТА, подробное описание которого представлено в работе [11]. Получение положительного результата в таких наблюдениях позволит проверить или наложить жесткие ограничения на модель гипервспышек.

Телескоп СРГ/еРОЗИТА (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array) является основным инструментом миссии Спектр-Рентген-Гамма. С помощью этого прибора будет выполнено исследование всего неба в рентгеновском диапазоне: за 4 года работы СРГ/еРОЗИТА сделает 8 полных обзоров неба в диапазоне энергий от нескольких десятых кэВ до 10 кэВ.

В мягких рентгеновских лучах ($\sim 0.5\text{--}2$ кэВ) новый инструмент будет примерно в 20 раз чувствительнее своего предшественника — спутника ROSAT, также проводившего обзорные наблюдения всего неба. В жесткой полосе 2–10 кэВ это будет первым полным обзором неба с помощью фокусирующей рентгеновской оптики.

ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ВСПЫШЕК

Оценим количество вспышек FRB, которые будут попадать в поле зрения еРОЗИТА. На сегодняшний день различные оценки числа FRB качественно сходятся друг с другом, давая темп порядка нескольких тысяч вспышек в день на всем небе при потоке более нескольких десятых янских. В приводимых ниже оценках мы будем использовать величину $N_{\Sigma} = 10^4$ вспышек в день, что соответствует анализу, проведенному в работах [12, 13]. Поле зрения телескопа составляет 0.833 квадратных градуса. На всем небе 41 253 квадратных градуса. Таким образом, можно получить, что в день в поле зрения попадает примерно 0.2 вспышки, потенциально обнаружимые наземными радиотелескопами. Таким образом, в среднем одна вспышка будет попадать в поле зрения телескопа за 5 дней. А за 4 года обзорных наблюдений число вспышек будет примерно 300. Отметим, что сравнимое количество всплесков должно было попасть за ~ 18 лет работы спутника ХММ-Newton. Однако идентифицировать короткий неповторяющийся слабый всплеск достаточно трудно, а ввиду небольшого количества зарегистрированных FRB в радиодиапазоне не было ни одного случая, когда ХММ-Newton или же другой инструмент наблюдали бы область радиовсплеска в момент события (это в первую очередь связано с низким темпом регистрации радиовсплесков на протяжении работы ХММ-Newton, в ближайшие несколько лет количество обнаруженных всплесков будет существенно возрастать). Поэтому крайне важно оценить число

будущих задетектированных радиовсплесков, попадающих в поле зрения еРОЗИТА.

В настоящее время активно работают как старые радиоинструменты — 64-м телескоп в Парксе, антенна в Аресибо, GBТ (Green Bank Telescope), — так и новые установки, такие как ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder) и UTMOST (Molonglo Observatory Synthesis Telescope). Кроме того, поиски FRB будут проводиться на новой 500-метровой антенне FAST в Китае. Ожидается, что в ближайшем будущем установки HIRAX (Hydrogen Intensity Real-time Analysis eXperiment) и CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) смогут детектировать по несколько десятков вспышек в день [14]. Оптимистичные оценки повышают это число до ста вспышек в день для каждой из них [15]. Таким образом, разумное предположение состоит в том, что совместными усилиями наземные инструменты будут регистрировать около 1% всех вспышек. Из предположения, что вспышки происходят равномерно по всему небу (что является хорошим предположением ввиду внегалактического происхождения FRB и отсутствия корреляции с известными локальными внегалактическими структурами), можно рассчитать, что число задетектированных радиовсплесков, попадающих в поле зрения еРОЗИТА, будет:

$$N = \frac{N_X N_R}{N_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где N_R — число вспышек, регистрируемых наземными телескопами, N_X — число вспышек, регистрируемых телескопом еРОЗИТА. Таким образом, можно получить оценку, что за все время обзорных наблюдений на спутнике Спектр-РГ несколько вспышек (~ 3), зарегистрированных наземными радиотелескопами (HIRAX, CHIME, ASKAP, UTMOST и др.), попадет в поле зрения еРОЗИТА². Это делает актуальными более детальные оценки возможности регистрации рентгеновских вспышек, возможно, сопровождающих радиовсплески.

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ГИПЕРВСПЫШЕК

В этом разделе мы обсуждаем разные параметры рентгеновских вспышек, чтобы оценить, будет ли достаточно чувствительности телескопа еРОЗИТА для их регистрации.

Длительность основного пика гигантских и гипервспышек магнитаров составляет $\gtrsim 0.1\text{--}0.2$ с

² Отметим, что за время работы спутника возможно примерно одно попадание FRB, зарегистрированного радиотелескопами, в поле зрения инструмента ART-XC.

[16, 17]. Это превышает время накопления экспозиции прибора eРОЗИТА, составляющее 50 мс. Таким образом, хотя часть пришедших фотонов может не быть зарегистрирована индивидуально, тем не менее, можно ожидать, что гипервспышка приведет к нескольким отсчетам на детекторе.

Примем, что для достоверного детектирования сигнала телескоп должен зарегистрировать от источника 10 фотонов за все время рентгеновского всплеска³. Считая, что телескоп зарегистрировал 10 фотонов, построим зависимость необходимого для регистрации энерговыделения источника от расстояния до него для нескольких спектральных моделей.

Мы рассмотрим несколько вариантов, представляющих широкий диапазон спектров рентгеновских всплесков, которые потенциально могут сопровождать быстрые радиовсплески (в первую очередь такие, которые могут соответствовать гипервспышкам магнитаров). Это планковские спектры для температур $kT = 30$ кэВ и $kT = 200$ кэВ, а также степенные спектры с показателями $\Gamma = 0.5$ и $\Gamma = 2$ (показатели соответствуют фотонным спектрам).

Поскольку наблюдения проводятся в достаточно мягкой части рентгеновского спектра, поток фотонов будет значительно ослаблен за счет межзвездного поглощения (как в межзвездной среде Галактики, так и в межгалактической среде и межзвездной среде материнской галактики источника). При колонковой плотности атомов водорода N_H поток ослабевает в $e^{-\sigma N_H}$ раз. Для расчета величины σ мы использовали данные из статьи [18]:

$$\sigma = \frac{1}{E}C_2 + \frac{1}{E^2}C_1 + \frac{1}{E^3}C_0, \quad (2)$$

где E — энергия фотона, а коэффициенты C_0, C_1, C_2 взяты из вышеупомянутой работы. Учитывая оценочный характер работы, а также тот факт, что нас интересует лишь полное энерговыделение в достаточно широкой полосе рентгеновского диапазона спектра, неиспользование более детальных результатов по межзвездному поглощению (см., например, [19]) не представляется критичным. Отметим и то, что в случае FRB значительная часть

поглощения должна быть не связана с веществом нашей Галактики, т.е. точные расчеты параметра σ становятся еще более затруднительными.

Также нами учитывалась зависимость эффективной площади телескопа от длины волны (см. рис. 1). Несколько из семи элементов eРОЗИТА будут закрыты фильтрами, отсекающими мягкую часть спектра. Мы использовали данные по эффективной площади в предположении, что в пяти из семи элементов используются такие фильтры. Соответствующие данные взяты с сайта <https://wiki.mpe.mpg.de/eRosita>.

Степенной спектр

Модели рентгеновских вспышек со степенным спектром в приложении к FRB недавно рассматривались в работе [20]. Считаем, что спектр объекта задается уравнением

$$dN = CE^{-\Gamma}e^{-(E/E_{\text{cutoff}})}dE, \quad (3)$$

где $E_{\text{cutoff}} = 500$ кэВ — граница обрезания спектра, C — размерная константа, которая определяется из нормировки полного энерговыделения на 10^{47} эрг. Здесь и далее E — энергия фотона, выраженная в кэВ. Величина Γ бралась равной 0.5 и 2, как крайние случаи. Для $\Gamma = 0.5$ мы получили $C = 1.01 \times 10^{43}$ эрг^{-1/2}. При $\Gamma = 2$ интеграл расходится при $E \rightarrow 0$, поэтому было необходимо выбрать нижний предел интегрирования, отличный от нуля. Мы изменяли его в пределах от 10^{-5} до 0.1 кэВ, при этом оказалось, что C меняется не более, чем на порядок, что не принципиально влияет на дальнейшие оценки. Нижний предел был выбран равным 0.001 кэВ, при этом $C = 9.7 \times 10^{45}$ эрг. Это значение мы и использовали в дальнейшем.

Приходящая на детектор энергия излучения от источника на расстоянии r с учетом поглощения и зависимости эффективной площади телескопа от энергии фотона составит:

$$F_d = \int_{E_1}^{E_2} \frac{CE^{1-\Gamma}e^{-E/E_{\text{cutoff}}}e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}}(E)dE}{4\pi r^2}. \quad (4)$$

Здесь мы пренебрегаем эффектом красного смещения, так как расстояния для потенциально регистрируемых вспышек не превышают 1 Гпк, что соответствует $z < 0.2$. Кроме того, важно подчеркнуть приближенный характер наших оценок (например, из-за неопределенностей с поглощением на луче зрения).

Количество зарегистрированных фотонов равно:

$$N_d = \int_{E_1}^{E_2} \frac{CE^{-\Gamma}e^{-E/E_{\text{cutoff}}}e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}}(E)dE}{4\pi r^2}. \quad (5)$$

³ Если мы говорим о наличии радиотриггера, т.е. известно время прихода и координаты всплеска, то критерий 10 фотонов может быть существенно смягчен до 2–3 фотонов из компактной области, соответствующей угловому разрешению телескопа. С другой стороны, наличие конечного времени накопления сигнала (50 миллисекунд) у детектора может приводить к тому, что ~ 10 фотонов, пришедших за время 100–200 миллисекундной вспышки, будут “накладываться” друг на друга (pileup effect) в отдельных пикселях, понижая число реально зарегистрированных событий. Таким образом наш критерий “10 пришедших фотонов” представляется обоснованным.

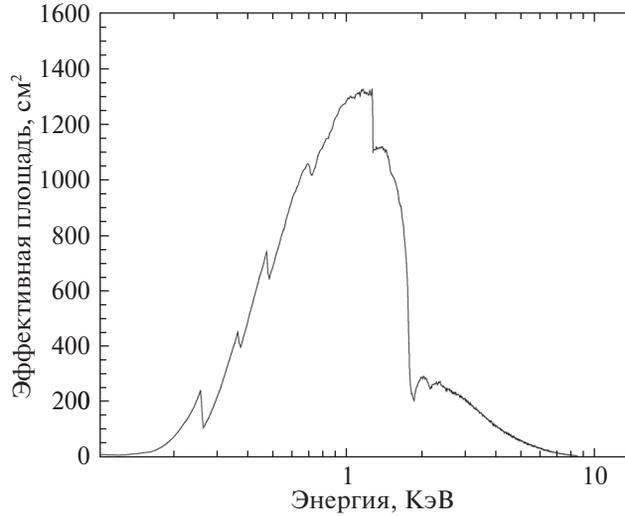


Рис. 1. Зависимость эффективной площади телескопа eROZITA от энергии фотонов. Данные представлены в предположении, что 5 из 7 телескопов закрыты фильтрами, отсекающими мягкую часть спектра.

Пример для расстояния 100 Мпк и энергии вспышки 10^{47} эрг приведен в табл. 1 для разных спектральных моделей и величины колонковой плотности.

Теперь, полагая, что от вспышки зарегистрировано 10 фотонов, мы можем посчитать зависимость полной энергии вспышки от расстояния. Расстояние r_{10} , с которого 10 фотонов приходит от вспышки с энергией 10^{47} эрг, определяется из формулы (5). А далее полная энергия равна $E_{\text{total}} = 10^{47} (r/r_{10})^2$ эрг. Отметим, что здесь мы считаем N_H фиксированным параметром, т.е. изменение r не приводит к изменению поглощения, поэтому сохраняется квадратичная зависимость. Такое упрощение возможно ввиду большой неопределенности параметра N_H .

Планковский спектр

Аналогичные вычисления мы провели в предположении, что спектр вспышки тепловой. Наблюдения показывают, что спектры гигантских вспышек магнитаров можно хорошо описать именно

Число зарегистрированных фотонов для вспышки на расстоянии 100 Мпк с энергией 10^{47} эрг

$N_H, \text{см}^{-2}$	$kT = 30 \text{ кэВ}$	$kT = 200 \text{ кэВ}$	$\Gamma = 0.5$	$\Gamma = 2$
0	1.9	0.017	12.6	13000
10^{22}	1.35	0.012	4.8	1600
10^{24}	0.087	0.0008	0.087	4.7

планковским спектром с температурой от ~ 30 до ~ 200 кэВ (см., например, обзор [21] и ссылки в нем). Рентгеновское излучение связывают с файерболом, удерживаемым магнитосферой с характерным размером до малых сотен километров⁴.

В случае такого спектра имеем:

$$B_E(T, E) = \frac{2}{c^2 h^3} \frac{E^3}{e^{\frac{E}{kT}} - 1}, \quad (6)$$

$$F_d = \int_{E_1}^{E_2} \frac{C_p \pi B_E(T, E) e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}}(E) dE}{4\pi r^2}, \quad (7)$$

где C_p находится из условия нормировки спектра на полное энерговыделение 10^{47} эрг.

$$N = \int_{E_1}^{E_2} \frac{C_p \pi B_E(T, E) E^{-1} e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}}(E) dE}{4\pi r^2}. \quad (8)$$

$$E_{\text{total}} = 4\pi r^2 E_0 \times \frac{\int_0^\infty \pi B_E(T, E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \pi B_E(T, E) E^{-1} e^{-\sigma N_H} S_{\text{eff}} dE}. \quad (9)$$

Результаты для всех рассмотренных спектров показаны на рис. 2 и 3 при разных величинах колонковой плотности N_H .

⁴ Разумеется, радионизлучение, соответствующее FRB, имеет нетепловую (и когерентную) природу и генерируется, по всей видимости, в другой пространственной области. Например, в оболочке, аналогичной пульсарной туманности, окружающей магнитар (см. [8]). Такие оболочки наблюдаются у некоторых галактических магнитаров.

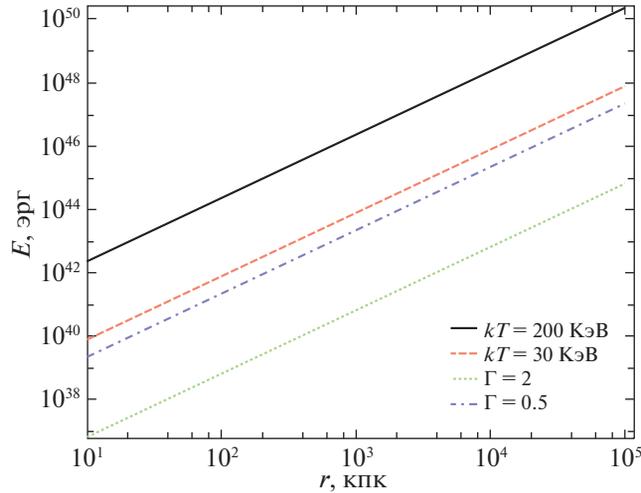


Рис. 2. Зависимость энергии вспышки от расстояния для разных моделей спектров гипervспышки при предположении, что зарегистрировано 10 фотонов. Число атомов водорода на луче зрения принято $N_H = 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

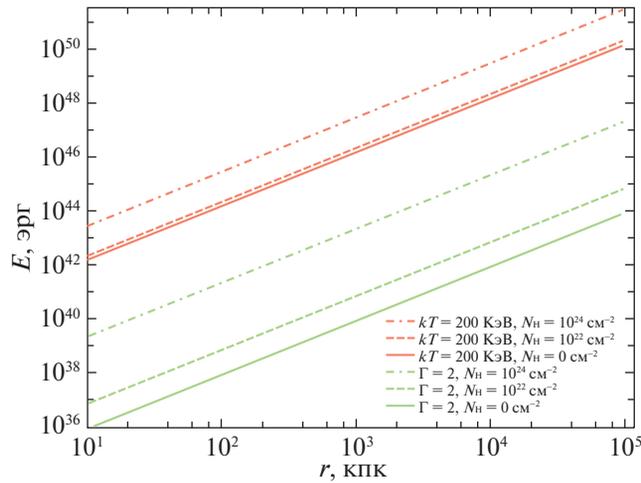


Рис. 3. Зависимость энергии вспышки от расстояния для степенного (жирные зеленые линии) и планковского спектра (тонкие красные) при предположении, что зарегистрировано 10 фотонов. Сплошные линии соответствуют $N_H = 0$, штриховые — $N_H = 10^{22} \text{ см}^{-2}$, и штрих-пунктирные — $N_H = 10^{24} \text{ см}^{-2}$.

Отметим, что вспышки могут быть зарегистрированы и телескопом ART-XC. Предварительные оценки показали, что для теплового спектра с $kT = 30 \text{ кэВ}$ ($N_H = 10^{22} \text{ см}^{-2}$) можно ожидать несколько отсчетов при энергии вспышки 10^{46} эрг с расстояний порядка десятков Мпк. Однако из-за того, что поле зрения ART-XC примерно втрое меньше, чем у eROSITA, соответственно уменьшается и ожидаемое число потенциально регистрируемых событий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Оценки расстояний до FRB показывают, что, если в мере дисперсии доминирует межгалактическая среда (а не вещество в непосредственной окрестности источника), то типичные значения

должны составлять порядка 1 Гпк, а минимальные расстояния — порядка 100 Мпк (см., например, оценки по дисперсии в межгалактической среде для всплесков, зарегистрированных установкой ASKAP [22]). Это говорит о том, что только для мягких степенных спектров рентгеновских вспышек и достаточно большого энерговыделения можно ожидать, что большинство событий будет потенциально регистрируемо с помощью eROSITA. Тем не менее существенно, что есть и альтернативные модели, в которых заметная часть меры дисперсии FRB набирается в среде вблизи источника (см., например, [23] и ссылки там). В таком случае средние расстояния будут меньше. Отметим, однако, что в работе [23] рассматривается не магнитарная, а пульсарная модель, в рамках которой не

возникает существенного рентгеновского излучения. С другой стороны, в сценарии гипервспышек магнитаров вокруг источника скорее всего будет недостаточно плотная межзвездная среда, чтобы привести к значительному вкладу в меру дисперсии. Таким образом, маловероятно, что, если FRB являются относительно близкими ($\lesssim 100$ Мпк), радиовсплеск будет сопровождаться мощной рентгеновской вспышкой.

В данной работе мы не рассматривали вариант с мягким тепловым спектром $kT = 10$ кэВ, использованным, например, в работе [20]. Это связано с тем, что такой мягкий спектр должен быть нетипичен для гипервспышек магнитаров. Так, например, в случае гипервспышки SGR 1806–20 спектр может быть описан планковской формой с температурой ~ 200 кэВ [17]. Разумеется, при более мягком спектре и том же полном энерговыделении поток в диапазоне eРОЗИТА возрастет, и вспышка будет регистрироваться с расстояний $\gtrsim 100$ Мпк.

Отметим, что проведенное рассмотрение применимо и для оценок регистрации телескопом eРОЗИТА гипервспышек внегалактических магнитаров вне возможной связи с быстрыми радиовсплесками. Разумеется, идентифицировать слабую вспышку именно как событие, связанное с активностью далекого магнитара, будет в подавляющем большинстве случаев нелегко. Однако при хорошей локализации, позволяющей идентифицировать материнскую галактику, а также при наличии повторов, это будет возможно.

Отметим также, что по окончании обзорной программы на спутнике Спектр-Рентген-Гамма появится возможность продолжительных совместных наблюдений областей неба с помощью инструментов eРОЗИТА и ART-XC и радиотелескопов. Это будет особенно актуально при обнаружении источников повторяющихся всплесков на расстояниях менее нескольких сотен Мпк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы исследовали возможность регистрации гипервспышек, сопровождающих излучение FRB на телескопе eРОЗИТА. Оценки показывают, что в год примерно одна гипервспышка попадет в поле зрения eРОЗИТА одновременно с регистрацией FRB на одном из наземных радиотелескопов. При этом чувствительности рентгеновского телескопа оказалось вполне достаточно для регистрации гипервспышки с энергией 10^{46} эрг с расстояний порядка десятков-сотен Мпк при реалистичных спектральных параметрах.

Авторы признательны рецензенту за полезные комментарии, способствовавшие улучшению статьи. Авторы выражают признательность Н.И. Шакуре и К.Л. Маланчеву за комментарии. А.Д. Хорякова и Д.А. Ляпина (проведение расчетов и оценок)

благодарят Программу развития МГУ в номинации “Выдающиеся научные школы МГУ”. Работа С.Б. Попова (постановка задачи и руководство работой) была поддержана грантом РФФИ 19-12-00084.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.Б. Попов, К.А. Постнов, and М.С. Пширков. Быстрые радиовсплески. *Усп. физ. наук*, 188(10): 1063–1079, 2018.
2. D.R. Lorimer, M. Bailes, M.A. McLaughlin, D.J. Narkevic, F. Crawford. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin. *Science*, 318:777, November 2007.
3. E. Petroff, E.D. Barr, A. Jameson, E.F. Keane, M. Bailes, M. Kramer, V. Morello, D. Tabbara, and W. van Straten. FRBCAT: The Fast Radio Burst Catalogue. *PASA*, 33:e045, September 2016.
4. S.P. Tendulkar, C.G. Bassa, J.M. Cordes, G.C. Bower, C.J. Law, S. Chatterjee, E.A. K. Adams, S. Bogdanov, S. Burke-Spolaor, B.J. Butler, P. Demorest, J.W. T. Hessels, V.M. Kaspi, T.J.W. Lazio, N. Maddox, B. Marcote, M.A. McLaughlin, Z. Paragi, S.M. Ransom, P. Scholz, A. Seymour, L.G. Spitler, H.J. van Langevelde, and R.S. Wharton. The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102. *ApJL*, 834:L7, January 2017.
5. E. Platts, A. Weltman, A. Walters, S.P. Tendulkar, J.E.B. Gordin, and S. Kandhai. A Living Theory Catalogue for Fast Radio Bursts. *ArXiv e-prints: 1810.05836*, October 2018.
6. R. Turolla, S. Zane, and A.L. Watts. Magnetars: the physics behind observations. A review. *Reports on Progress in Physics*, 78(11):116901, November 2015.
7. S.B. Popov and K.A. Postnov. Hyperflares of SGRs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts. In H. A. Harutyunian, A. M. Mickaelian, and Y. Terzian, editors, *Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity*, pages 129–132, November 2010.
8. Y. Lyubarsky. A model for fast extragalactic radio bursts. *MNRAS*, 442:L9–L13, July 2014.
9. K. Murase, K. Kashiyama, and P. Mészáros. A burst in a wind bubble and the impact on baryonic ejecta: high-energy gamma-ray flashes and afterglows from fast radio bursts and pulsardriven supernova remnants. *MNRAS*, 461:1498–1511, September 2016.
10. D.M. Palmer, S. Barthelmy, N. Gehrels, R.M. Kippen, T. Cayton, C. Kouveliotou, D. Eichler, R.A.M.J. Wijers, P.M. Woods, J. Granot, Y.E. Lyubarsky, E. Ramirez-Ruiz, L. Barbier, M. Chester, J. Cummings, E.E. Fenimore, M.H. Finger, B.M. Gaensler, D. Hullinger, H. Krimm, C.B. Markwardt, J.A. Nousek, A. Parsons, S. Patel, T. Sakamoto, G. Sato, M. Suzuki, and J. Tueller. A giant γ -ray flare from the magnetar SGR 1806–20. *Nature*, 434:1107–1109, April 2005.

11. A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, M. Brusa, K. Dennerl, M. Freyberg, P. Friedrich, A. Georgakakis, F. Haberl, G. Hasinger, N. Meidinger, J. Mohr, K. Nandra, A. Rau, T.H. Reiprich, J. Robrade, M. Salvato, A. Santangelo, M. Sasaki, A. Schwobe, J. Wilms, and t. German eROSITA Consortium. eROSITA Science Book: Mapping the Structure of the Energetic Universe. *ArXiv e-prints: 1209.3114*, September 2012.
12. D. Thornton, B. Stappers, M. Bailes, B. Barsdell, S. Bates, N.D.R. Bhat, M. Burgay, S. Burke-Spolaor, D.J. Champion, P. Coster, N. D'Amico, A. Jameson, S. Johnston, M. Keith, M. Kramer, L. Levin, S. Milia, C. Ng, A. Possenti, and W. van Straten. A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances. *Science*, 341:53–56, July 2013.
13. S. Vander Wiel, S. Burke-Spolaor, E. Lawrence, C.J. Law, and G.C. Bower. Rare Event Statistics Applied to Fast Radio Bursts. *ArXiv e-prints*, December 2016.
14. K.M. Rajwade and D.R. Lorimer. Detecting fast radio bursts at decametric wavelengths. *MNRAS*, 465:2286–2293, February 2017.
15. A. Walters, A. Weltman, B.M. Gaensler, Y.-Z. Ma, and A. Witzemann. Future Cosmological Constraints From Fast Radio Bursts. *ApJ*, 856:65, March 2018.
16. K. Hurley, T. Cline, E. Mazets, S. Barthelmy, P. Butterworth, F. Marshall, D. Palmer, R. Aptekar, S. Golenetskii, V. Il'Inskii, D. Frederiks, J. McTiernan, R. Gold, and J. Trombka. A giant periodic flare from the soft γ -ray repeater SGR1900+14. *Nature*, 397:41–43, January 1999.
17. K. Hurley, S.E. Boggs, D.M. Smith, R.C. Duncan, R. Lin, A. Zoglauer, S. Krucker, G. Hurford, H. Hudson, C. Wigger, W. Hajdas, C. Thompson, I. Mitrofanov, A. Sanin, W. Boynton, C. Fellows, A. von Kienlin, G. Lichti, A. Rau, T. Cline. An exceptionally bright flare from SGR 1806-20 and the origins of shortduration γ -ray bursts. *Nature*, 434:1098–1103, April 2005.
18. R. Morrison and D. McCammon. Interstellar photoelectric absorption cross sections, 0.03–10 keV. *ApJ*, 270:119–122, July 1983.
19. J. Wilms, A. Allen, and R. McCray. On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium. *ApJ*, 542:914–924, October 2000.
20. P. Scholz, S. Bogdanov, J.W. T. Hessels, R.S. Lynch, L.G. Spitler, C. G. Bassa, G.C. Bower, S. Burke-Spolaor, B.J. Butler, S. Chatterjee, J.M. Cordes, K. Gourdji, V.M. Kaspi, C.J. Law, B. Marcote, M.A. McLaughlin, D. Michilli, Z. Paragi, S.M. Ransom, A. Seymour, S.P. Tendulkar, and R.S. Wharton. Simultaneous XRay, Gamma-Ray, and Radio Observations of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102. *ApJ*, 846:80, September 2017.
21. P. Esposito, N. Rea, and G.L. Israel. Magnetars: a short review and some sparse considerations. *ArXiv e-prints: 1803.05716*, March 2018.
22. R.M. Shannon, J.-P. Macquart, K.W. Bannister, R.D. Ekers, C.W. James, S. Osłowski, H. Qiu, M. Sammons, A.W. Hotan, M.A. Voronkov, R.J. Beresford, M. Brothers, A.J. Brown, J.D. Bunton, A.P. Chippendale, C. Haskins, M. Leach, M. Marquarding, D. McConnell, M.A. Pilawa, E.M. Sadler, E.R. Troup, J. Tuthill, M.T. Whiting, J.R. Allison, C.S. Anderson, M.E. Bell, J.D. Collier, G. Gurkan, G. Heald, and C.J. Riseley. The dispersion-brightness relation for fast radio bursts from a wide-field survey. *Nature*, 562:386–390, October 2018.
23. M. Lyutikov, L. Burzawa, and S.B. Popov. Fast radio bursts as giant pulses from young rapidly rotating pulsars. *MNRAS*, 462:941–950, October 2016.