

Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова  
Физический факультет

Кафедра физики частиц и космологии

# Курсовая работа

## Поиск гамма-излучения от быстрых радио всплесков.

Курсовая работа  
студента 216 группы  
Дмитриева А.С.

Научные руководители:  
кандидат физ.-мат. наук Александр Григорьевич Панин  
доктор физ.-мат. наук Григорий Игоревич Рубцов

Москва 2017

# Оглавление

Введение	3
Данные и обработка	4
Результаты и анализ	7
Заключение	10

# Введение

Быстрые радио всплески (Fast Radio Burst, FRB)(D.R. Lorimer et al. 2007 [?]) — радиоимпульсы неизвестной природы на частоте около 1 ГГц и длительностью несколько миллисекунд. FRB были впервые были зарегистрированы с помощью радиотелескопа Parkes. На данный момент известно 21 такое событие, данные о них представлены в каталоге (<http://www.astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcat>). Мера дисперсии, измеренная для каждого всплеска, составляет величину, превышающую 300 ( $\text{pc} \times \text{cm}^{-3}$ ), что указывает на их внегалактическое происхождение и огромное расстояние до источника. Если предположить, что вспышка является ненаправленной, то энергия излучения составляет величину порядка  $\sim 10^{38}$  erg.

В литературе рассматриваются несколько сценариев генерации FRB. Первый основан на том, что характеристики всех FRB совпадают на качественном уровне, что указывает на один и тот же тип источников для всех зарегистрированных FRB. В качестве возможных источников в литературе рассматриваются “молодые” нейтронные звезды или магнетары (Kulkarni et al. 2015 [?]; Katz 2016 [?]; Cordes & Wasserman 2016 [?]; Lyutikov et al. 2016 [?]; Popov & Pshirkov 2016 [?]; Yang et al. 2016 [?]; Kumar et al. 2017 [?]). Вспышки от более “старых” магнетаров также могут являться предполагаемыми источниками FRB (Popov & Postnov 2013 [?]; Lyubarsky 2014 [?]; Pen & Connor 2015 [?]; Beloborodov 2017 [?]). Существуют модели, источником быстрых радиовсплесков в которых являются пульсары (Katz J. I. 2017 [?], Bing Zhang 2017 [?]). В других моделях предполагается, что гамма-всплески (GRB) и радиовсплески имеют единую природу.

Немалое внимание исследователей уделяется сценариям генерации FRB, в которых каждая вспышка может иметь различную природу. Эта гипотеза подкрепляется наблюдением "повторяющегося" всплеска FRB121102. Подобные интересные особенности различных событий накладывают достаточно серьезные ограничения на многие модели, основанные на единой природе FRB.

Таким образом, на данный момент существует целый ряд различных моделей, объясняющих FRB. Для дальнейшего исследования возможной природы этого явления представляет интерес получение дополнительных данных о характеристиках FRB, в том числе в другой области спектра излучения. В данной работе проведено исследование наличия возможного гамма-излучения от FRB на основе анализа открытых данных телескопа Fermi LAT.

# Данные и обработка

Гамма-телескоп Fermi регистрирует  $\gamma$ -фотоны в промежутке энергий от 30 МэВ до 10 ТэВ, наблюдая большую часть небесной сферы при движении по орбите Земли. В процессе регистрации телескоп записывает  $\gamma$ -фотоны и соответствующие им координаты, зенитный угол, энергии и т.д., а также координаты нахождения спутника в это время, необходимые для анализа полученных данных.

Анализ данных производился следующим образом. Из каталога событий FRB были взяты данные о времени и координатах вспышки. Далее из каталога Fermi LAT выбирались фотоны с временами регистрации в интервале  $\pm 150$  секунд от времени вспышки, в радиусе  $15^\circ$  от источника FRB. Анализ был произведен с помощью пакета программ Fermi Science Tools, который предоставлен коллаборацией Fermi для обработки данных, полученных с телескопа. Обработка производилась в соответствии с документацией Cicerone и рекомендациями к анализу данных.

В данной работе были проанализированы радиовсплески, представленные в таблице ???. Времена регистрации сигнала от этих вспышек соответствуют времени стабильной работы спутника Fermi.

На первом этапе анализа из файла с фотонами (файл Photon), были выбраны «качественные события» (source, clean, ultraclean). Была рассчитана экспозиция для энергии фотонов около 100 MeV области  $15^\circ$  вблизи координат каждого события в интервале  $\pm 150$  секунд от времени вспышки. Нулевая экспозиция при этом означает, что в момент вспышки телескоп Fermi наблюдал за другим участком неба. События с нулевой экспозицией выбывают из дальнейшего анализа. Результаты приведены в таблице ???.

На втором этапе обработки производился отбор фотонов в пределах PSF (Point Spread Function), см. рисунок ???, чтобы исключить фотоны, которые были зарегистрированы детектором под большим углом и с высокой энергией. В этом случае высока вероятность того, что источник данных фотонов лежит вне исследуемой области. Для анализа фотонов в работе использовался график Total 95%.

Таким образом, проведенный анализ показал, что только для FRB130628 спутником Fermi был зарегистрирован один фотон. Однако этот фотон был зарегистрирован за 64.5 секунд до всплеска, потому высока вероятность, что он не имеет отношения к FRB.

Name	RA[2000]	Dec[2000]	UTC
FRB150807	340.096	-55.2667	2015-08-07 17:53:55
FRB150418	109.146	-19.0111	2015-04-18 04:29:04
FRB140514	338.525	-12.3128	2014-05-14 17:14:09
FRB131104	101.042	-51.2778	2013-11-04 18:03:59
FRB130729	205.338	-5.99528	2013-07-29 09:01:49
FRB130628	135.758	3.43778	2013-06-28 03:57:59
FRB121102	83.0375	33.0869	2012-11-02 06:35:53
FRB121002	273.696	-85.1981	2012-10-02 13:09:14
FRB120127	348.775	-18.4272	2012-01-27 08:11:20
FRB110703	352.713	-2.87333	2011-07-03 18:59:38
FRB110626	315.929	-44.7386	2011-06-26 21:33:15
FRB110523	326.3	-0.160278	2011-05-23 15:06:19
FRB090625	46.9458	-29.9267	2009-06-25 21:53:49
FRB160608	114.175	-40.7978	2016-06-08 03:52:24
FRB160317	118.446	-29.6086	2016-03-17 08:30:58

Таблица 1: Положение источников излучения FRB.

Name	Expose ( $cm^2 * s$ )	Name	Expose ( $cm^2 * s$ )
FRB150418	868860.0	FRB121002	0.0
FRB110626	4081.03	FRB140514	0.0
FRB110703	92355.7	FRB121102	0.0
FRB090625	576644.0	FRB120127	0.0
FRB130628	200222.0	FRB150807	0.0
FRB160317	42409.54	FRB130729	0.0
FRB160608	582084	FRB110523	0.0
FRB131104	0.0	—	—

Таблица 2: Экспозиция области вблизи FRB для энергии 100 MeV.

Аналогичная обработка была проведена для файла extended, в котором содержатся данные, включающие события более низкого класса (TRANSIENT). В этом случае также были рассчитаны экспозиции областей вблизи всплеска (см. таблицу ??), и был произведен анализ событий с помощью PSF Total 95%. Для FRB130628 зарегистрирован один фотон. Но так как файл extended включает в себя в том числе данные из файла Photon, то это то же самое событие, что и в первом случае.

Таким образом, для возможного диапазона энергий из тех всплесков, что подлежат обработке, только для одного FRB был зарегистрирован фотон. Однако, зарегистрированный фотон, скорее всего, не относится к самому всплеску.

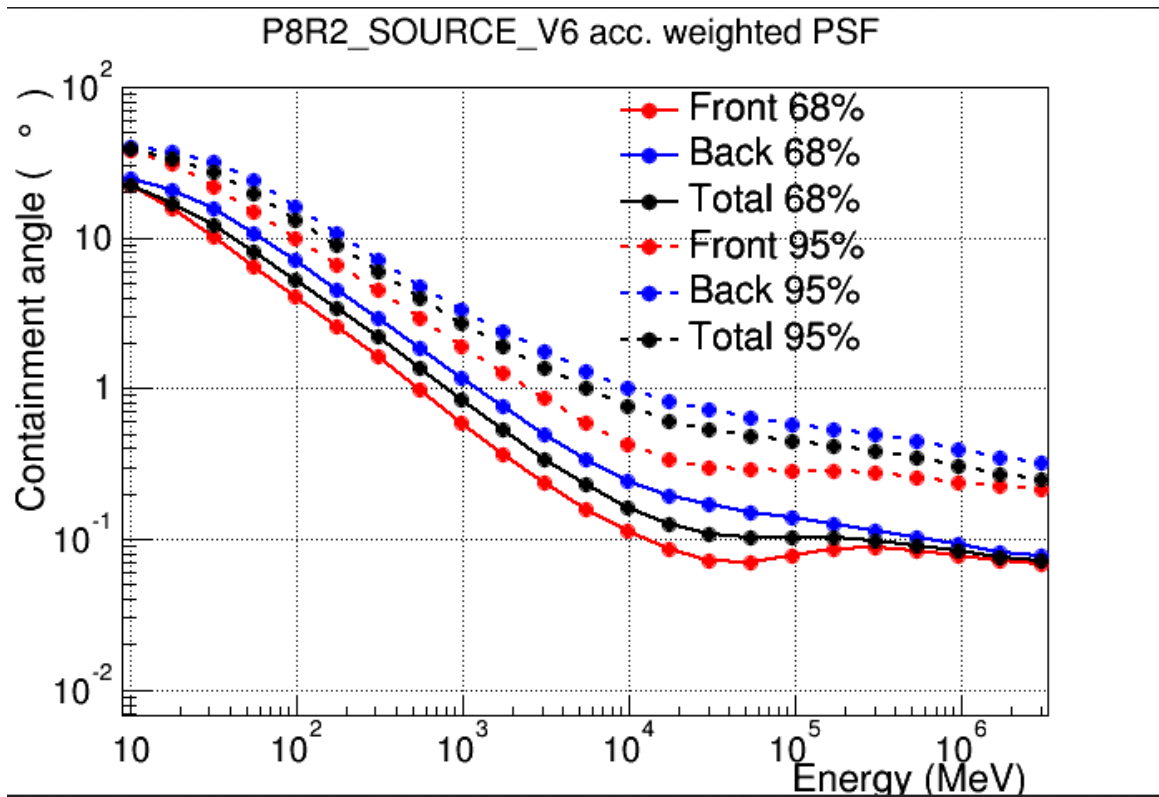


Рис. 1: Рекомендуемые PSF.

Name	Expose (cm <sup>2</sup> ·s)	Name	Expose (cm <sup>2</sup> ·s)
FRB150418	1472020	FRB121002	0.0
FRB110626	22933.5	FRB140514	0.0
FRB110703	268470.0	FRB121102	0.0
FRB090625	1122930	FRB120127	0.0
FRB130628	489562.0	FRB150807	0.0
FRB160317	1134031	FRB130729	0.0
FRB160608	1452660	FRB110523	0.0
FRB131104	0.0	—	—

Таблица 3: Экспозиция области вблизи FRB для энергии 100 MeV. (extended)

# Результаты и анализ

Отсутствие зарегистрированных фотонов во времена FRB позволяет получить ограничение на поток из этой области неба, в том числе от возможного источника радиовсплеска. Модели, предложенные для описания быстрых радиовсплесков должны будут удовлетворять этому ограничению.

Name	R (Gpc)	t (ms)
FRB121002	4.04	0.064
FRB140514	1.71	0.064
FRB121102	1.24	0.0655
FRB150418	1.88	0.064
FRB120127	1.67	0.064
FRB150807	0.66	0.064
FRB110626	2.10	0.064
FRB110703	3.07	0.064
FRB130729	2.51	0.064
FRB110523	1.84	1.024
FRB090625	2.60	0.064
FRB130628	1.39	0.064
FRB160317	2.54	0.65536
FRB160608	1.46	0.65536

Таблица 4: **Характеристики радиовсплесков.**

Величина потока, регистрируемого детектором, связана с экспозицией соотношением:

$$N = H * I , \quad (1)$$

где  $N$  — число фотонов,  $H$  — экспозиция,  $I$  — поток, регистрируемый детектором. Так как в данном случае фотонов не было зарегистрировано, то ограничение на определяемый поток сверху можно оценить:

$$I = \frac{0.9}{H} , \quad (2)$$

где 0.9 — коэффициент, зависящий от уровня достоверности (Gary J. Feldman, Robert D. Cousins. 1999 [?]). Аналогично можно поставить ограничение на

суммарный поток от каждого всплеска. Такое ограничение будет полезно для построения моделей, в которых все FRB имеют единую природу (см. таблицу ??).

Для сравнения результатов с различными моделями удобно определить энерговыделение.

$$E_{\gamma} = 100MeV * I * t * 4\pi * R^2 \quad (3)$$

где  $R$  — расстояние до источника всплеска,  $t$  — продолжительность всплеска, взятые из каталога FRB,  $E$  — энерговыделение всплеска в  $\gamma$ -диапазоне. Результаты и используемые характеристики всплесков приведены в таблицах ??, ??.

Name	$H$ ( $cm^2s$ )	$H_{extended}$ ( $cm^2s$ )	$I$ ( $\frac{EV}{cm^2s}$ )	$I_{extended}$ ( $\frac{EV}{cm^2s}$ )	$E_{\gamma}$ (erg)	$E_{(extended)\gamma}$ (erg)
FRB121002	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB140514	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB121102	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB150418	868860.0	1.47202* $10^6$	1.03484* $10^{-6}$	6.11405* $10^{-7}$	4.48735* $10^{42}$	2.65122 * $10^{42}$
FRB120127	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB150807	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB110626	4081.03	22933.5	2.20527* $10^{-4}$	3.92439* $10^{-5}$	1.19317* $10^{45}$	2.1233 * $10^{44}$
FRB110703	92355.7	268470.0	9.74493* $10^{-6}$	3.35233* $10^{-6}$	1.12683* $10^{44}$	3.87637 * $10^{43}$
FRB130729	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB110523	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB090625	576644.0	1.12293* $10^6$	1.56075* $10^{-6}$	8.01475* $10^{-7}$	1.29444* $10^{43}$	6.64719 * $10^{42}$
FRB130628	200222.0	489562.0	4.49501* $10^{-6}$	1.83838* $10^{-7}$	1.06552* $10^{43}$	4.35779 * $10^{41}$
FRB131104	0.0	0.0	—	—	—	—
FRB160317	42409.54	1134031	2.12216* $10^{-6}$	7.93629* $10^{-7}$	1.72007* $10^{44}$	6.43259 * $10^{43}$
FRB160608	582084	1.45266* $10^6$	1.54617* $10^{-6}$	6.19553* $10^{-7}$	4.14061* $10^{43}$	1.13640 * $10^{43}$
SUM	2.36666 * $10^6$	5.96261* $10^6$	3.80283* $10^{-6}$	1.50941* $10^{-7}$	—	—

Таблица 5: Ограничения сверху на поток и энерговыделение.

Для сравнения энерговыделения в радио- и  $\gamma$ -диапазонах излучения приведены таблице ??.



Name	$E_\gamma$ (erg)	$E_{(\text{extended})\gamma}$ (erg)	$E_{\text{radio}}$ (erg)
FRB150418	$4.48735 * 10^{42}$	$2.65122 * 10^{42}$	$0.66 * 10^{39}$
FRB110626	$1.19317 * 10^{45}$	$2.1233 * 10^{44}$	$0.30 * 10^{39}$
FRB110703	$1.12683 * 10^{44}$	$3.87637 * 10^{43}$	$4.40 * 10^{39}$
FRB090625	$1.29444 * 10^{43}$	$6.64719 * 10^{42}$	$2.42 * 10^{39}$
FRB130628	$1.06552 * 10^{43}$	$4.35779 * 10^{41}$	$0.19 * 10^{39}$
FRB160317	$1.72007 * 10^{44}$	$6.43259 * 10^{43}$	$3.03 * 10^{39}$
FRB160608	$4.14061 * 10^{43}$	$1.13640 * 10^{43}$	$0.32 * 10^{39}$

Таблица 6: Энерговыведение в радио- и  $\gamma$ -диапазонах энергий.

Видно, что верхняя граница энерговыведения в  $\gamma$ -диапазоне на несколько порядков превышает значение энерговыведения в радио диапазоне. Можно сказать, что полученные ограничения являются довольно слабыми, так как подобные энергии трудно достижимы.

# Заключение

В работе получено ограничение на поток возможного гамма-излучения от источников быстрых радиовспышек. Модели FRB, в которых среди прочего имеет место гамма-излучения во время радиовспышки, должны удовлетворять полученным ограничениям. К таким моделям потенциально относятся модели с пульсарами, а также разные модели, в которых радиовспышка происходит в результате какого-либо катастрофического события (например, столкновение черной дыры и нейтронной звезды). Хотя ограничение на энерговыделение и оказалось слабым (к примеру для FRB090625  $E_\gamma = 1.29444 * 10^{43}$ ,  $E_{(\text{extended})\gamma} = 6.64719 * 10^{42}$ ), тем не менее новая информация о FRB может быть использована при создании новых моделей, или же как один из критериев проверки существующих теорий.

# Литература

- [1] D.R. Lorimer et al. 2007, arXiv:0709.4301
- [2] Katz J. I. 2017, arXiv:1702.02161
- [3] Beloborodov, A. M. 2017, arXiv preprint arXiv:1702.08644
- [4] Katz, J. I. 2016, ApJ, 826, 226
- [5] Popov, S. B., & Postnov, K. A. 2013, arXiv preprint arXiv:1307.4924
- [6] Popov, S. B., & Pshirkov, M. S. 2016, MNRAS, 462, L16
- [7] Kulkarni, S. R., Ofek, E. O., & Neill, J. D. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1511.09137 [astro-ph.HE]
- [8] Cordes, J. M., & Wasserman, I. 2016, MNRAS, 457, 232
- [9] Yang, Y.-P., Zhang, B., & Dai, Z.-G. 2016, ApJL, 819, L12
- [10] Kumar, P., Lu, W., & Bhattacharya, M. 2017, ArXiv e-prints, arXiv:1703.06139 [astro-ph.HE]
- [11] Lyubarsky, Y. 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, slu046
- [12] Pen, U.-L., & Connor, L. 2015, The Astrophysical Journal, 807, 179
- [13] Lyutikov, M., Burzawa, L., & Popov, S. B. 2016, MNRAS, 462, 941
- [14] Bing Zhang, 2017 arXiv:1701.04094
- [15] Gary J. Feldman, Robert D. Cousins. 1999, arXiv:physics/9711021