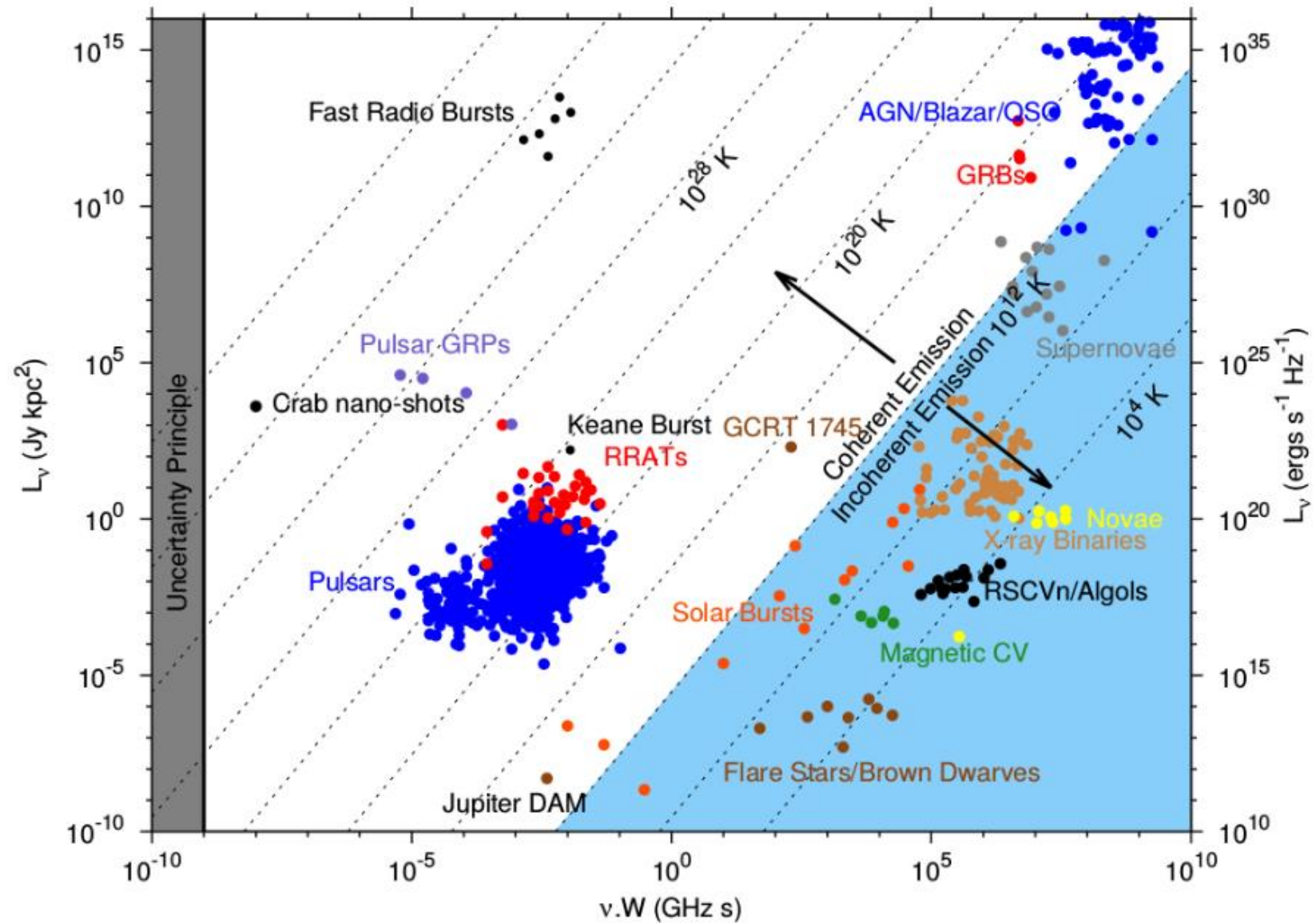


Быстрые радиовсплески: магнитары, пульсары ...или что-то еще?



Сергей Попов
Максим Лютиков
Константин Постнов
Максим Пширков

Радиотранзиенты



1507.00729, 1411.1067

Миллисекундные радиовсплески

В 2007 г. был обнаружен первый всплеск.
Но пока он был один – были сомнения.
В 2012 – еще один, но сомнения остались.

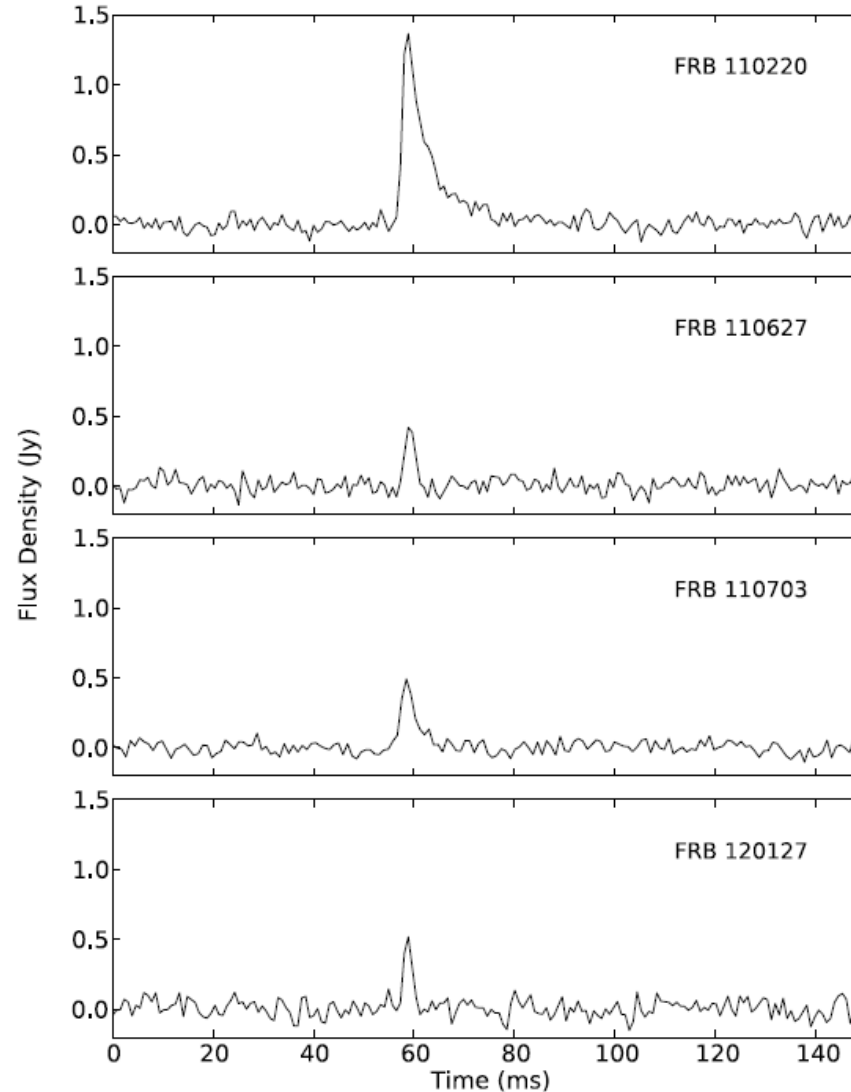
В 2013 – сомнения долой! Еще четыре!

Темп ~ неск. тысяч в день на всем небе.

Это явно новый класс событий,
происхождение которых неизвестно:

- магнитары
- гамма-всплески
- слияния нейтронных звезд
- сверхновые
- слияния белых карликов
- массивные нейтронные звезды
- вспышки на обычных звездах (?)

Появилось устойчивое название
Fast Radio Bursts



1307.1628

Каталог быстрых радиовсплесков

FRB Catalogue

This catalogue contains up to date information for the published population of Fast Radio Bursts (FRBs). This site is maintained by the FRBcat team and is updated as new sources are published or refined numbers become available. Information for each burst is divided into two categories: intrinsic properties measured using the available data, and derived parameters produced using a model. The intrinsic parameters should be taken as lower limits, as the position within the telescope beam is uncertain. Models used in this analysis are the NE2001 Galactic electron distribution (Cordes & Lazio, 2002), and the Cosmology Calculator (Wright, 2006).

You may use the data presented in this catalogue for publications; however, we ask that you cite the paper, when available (Petroff et al., 2016) and provide the url (<http://www.astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcat/>).

Catalogue Version 1.0

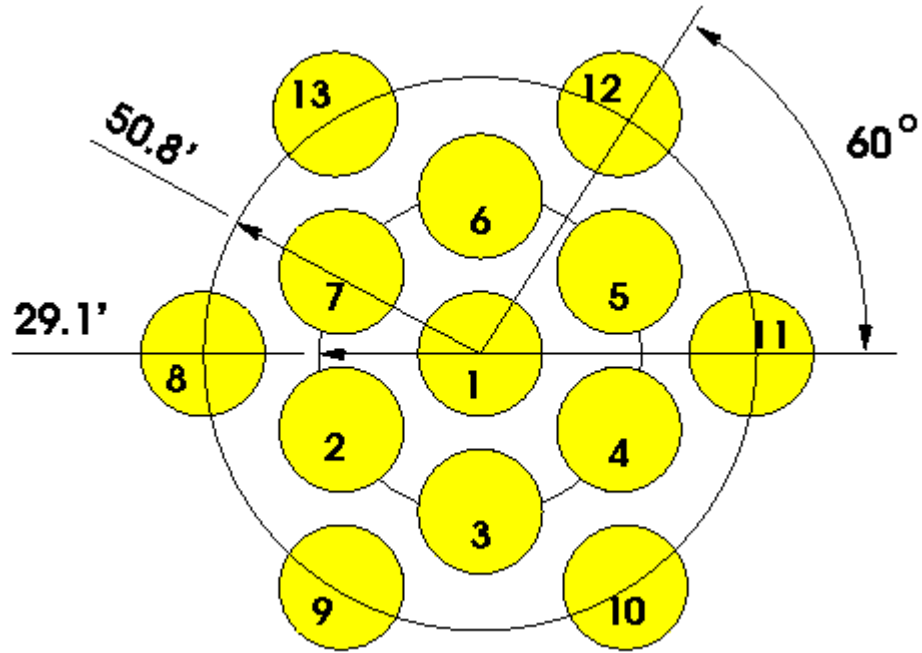
Event	Telescope	gl [deg]	gb [deg]	FWHM [deg]	DM [cm ⁻³ pc]	S/N	W _{obs} [ms]	S _{peak,obs} [Jy]	F _{obs} [Jy ms]	Ref
FRB010125	parkes	356.641	-20.020	0.25	790(3)	17	9.40 ^{+0.20} _{-0.20}	0.30	2.82	1
FRB010621	parkes	25.433	-4.003	0.25	745(10)		7.00	0.41	2.87	2
FRB010724	parkes	300.653	-41.805	0.25	375	23	5.00	>30.00 ^{+10.00} _{-10.00}	>150.00	3
FRB090625	parkes	226.443	-60.030	0.25	899.55(1)	30	1.92 ^{+0.83} _{-0.77}	1.14 ^{+0.42} _{-0.21}	2.19 ^{+2.10} _{-1.12}	4
FRB110220	parkes	50.828	-54.766	0.25	944.38(5)	49	5.60 ^{+0.10} _{-0.10}	1.30 ^{+0.00} _{-0.00}	7.28 ^{+0.13} _{-0.13}	5
FRB110523	GBT	56.119	-37.819	0.26	623.30(6)	42	1.73 ^{+0.17} _{-0.17}	0.60	1.04	6
FRB110626	parkes	355.861	-41.752	0.25	723.0(3)	11	1.40	0.40	0.56	5
FRB110703	parkes	80.997	-59.019	0.25	1103.6(7)	16	4.30	0.50	2.15	5
FRB120127	parkes	49.287	-66.203	0.25	553.3(3)	11	1.10	0.50	0.55	5
FRB121002	parkes	308.219	-26.264	0.25	1629.18(2)	16	5.44 ^{+3.50} _{-1.20}	0.43 ^{+0.33} _{-0.06}	2.34 ^{+4.46} _{-0.77}	4
FRB121102	arecibo	174.950	-0.225	0.05	557(2)	14	3.00 ^{+0.50} _{-0.50}	0.40 ^{+0.40} _{-0.10}	1.20 ^{+1.60} _{-0.45}	7
FRB130626	parkes	7.450	27.420	0.25	952.4(1)	21	1.98 ^{+1.20} _{-0.44}	0.74 ^{+0.49} _{-0.11}	1.47 ^{+2.45} _{-0.50}	4
FRB130628	parkes	225.955	30.655	0.25	469.88(1)	29	0.64 ^{+0.13} _{-0.13}	1.91 ^{+0.29} _{-0.23}	1.22 ^{+0.47} _{-0.37}	4
FRB130729	parkes	324.787	54.744	0.25	861(2)	14	15.61 ^{+9.98} _{-6.27}	0.22 ^{+0.17} _{-0.05}	3.43 ^{+6.55} _{-1.81}	4
FRB131104	parkes	260.549	-21.925	0.25	779(1)	30	2.08	1.12	2.33	8
FRB140514	parkes	50.841	-54.611	0.25	562.7(6)	16	2.80 ^{+3.50} _{-0.70}	0.47 ^{+0.11} _{-0.08}	1.32 ^{+2.34} _{-0.50}	9
FRB150418	parkes	232.665	-3.234	0.25	776.2(5)	39	0.80 ^{+0.30} _{-0.30}	2.20 ^{+0.60} _{-0.30}	1.76 ^{+1.32} _{-0.81}	10
FRB150807	parkes	336.709	-54.400	0.25	266.5(1)		0.35 ^{+0.05} _{-0.05}	128.00 ^{+5.00} _{-5.00}	44.80 ^{+8.40} _{-7.90}	11

<http://www.astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcat/>

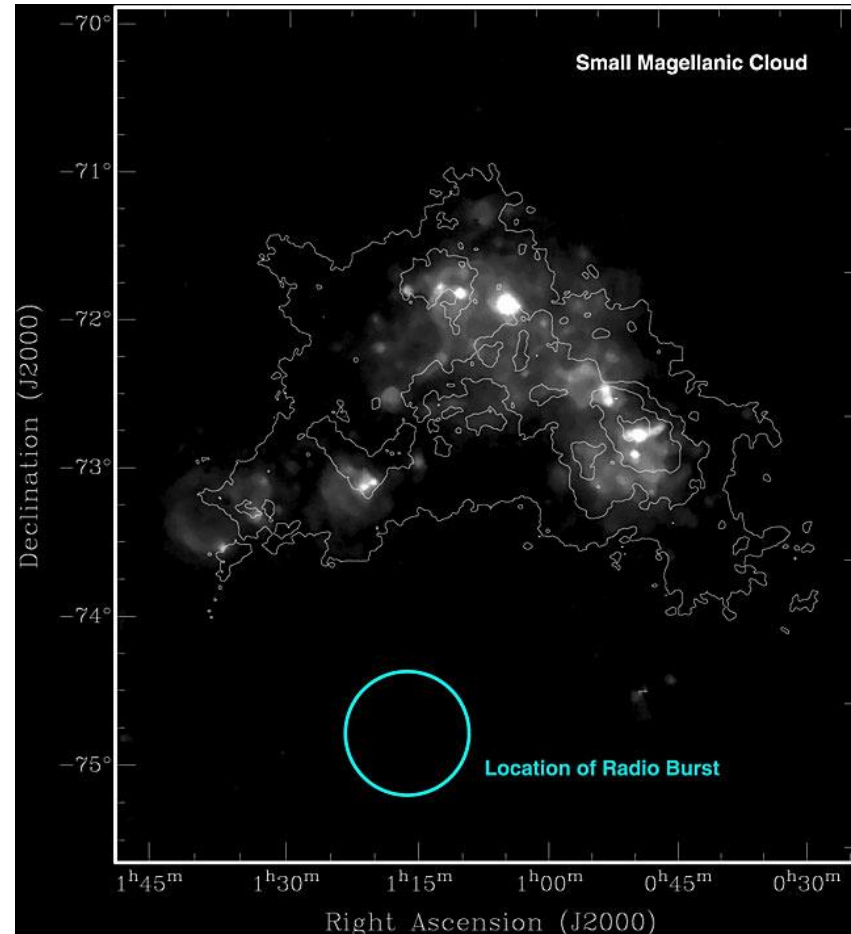
1601.03547

Локализация

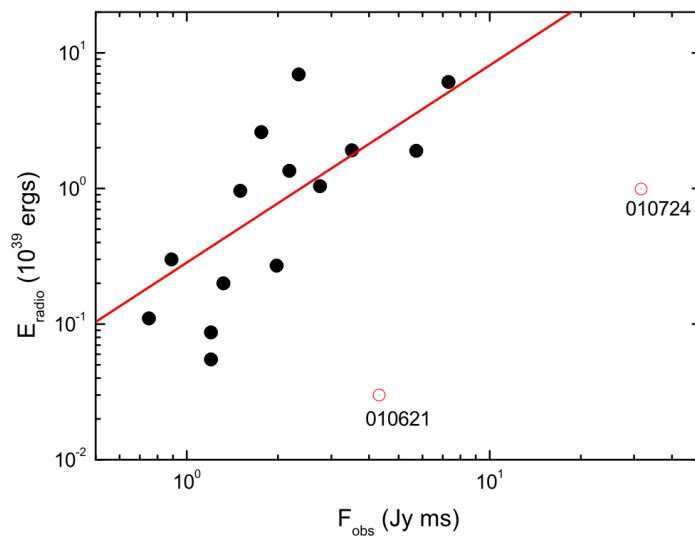
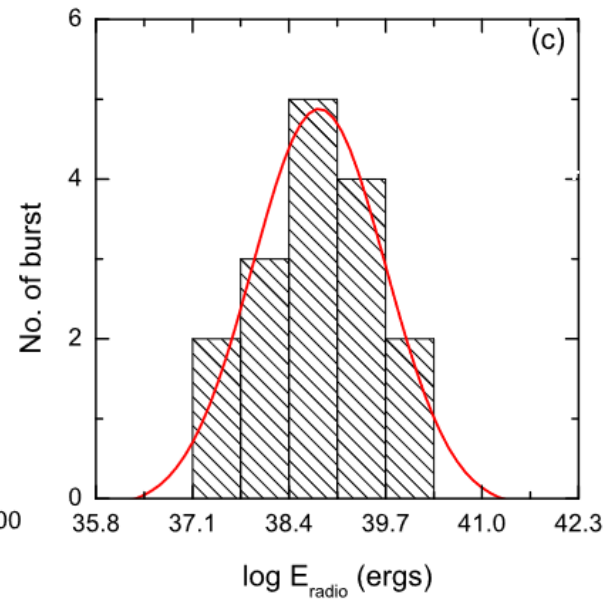
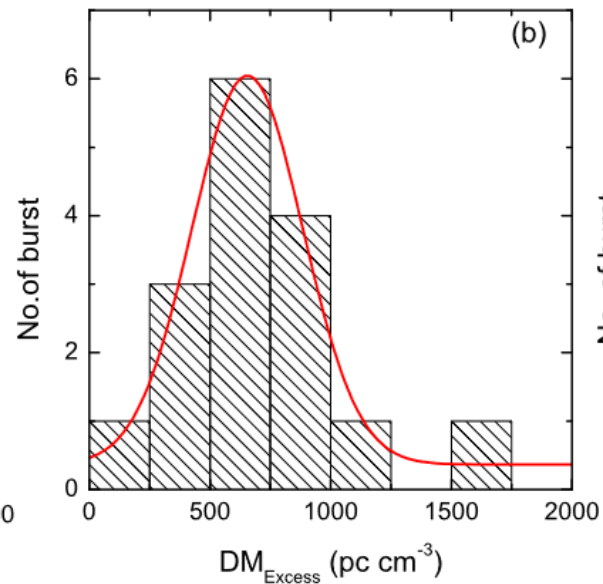
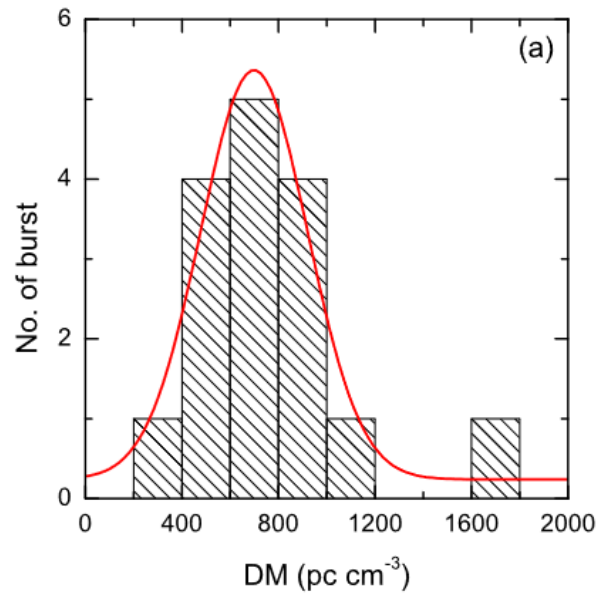
Радиус области неопределенности ~ 10 угловых минут



Обычно БРВ виден только в одном биме.



Статистические свойства всплесков

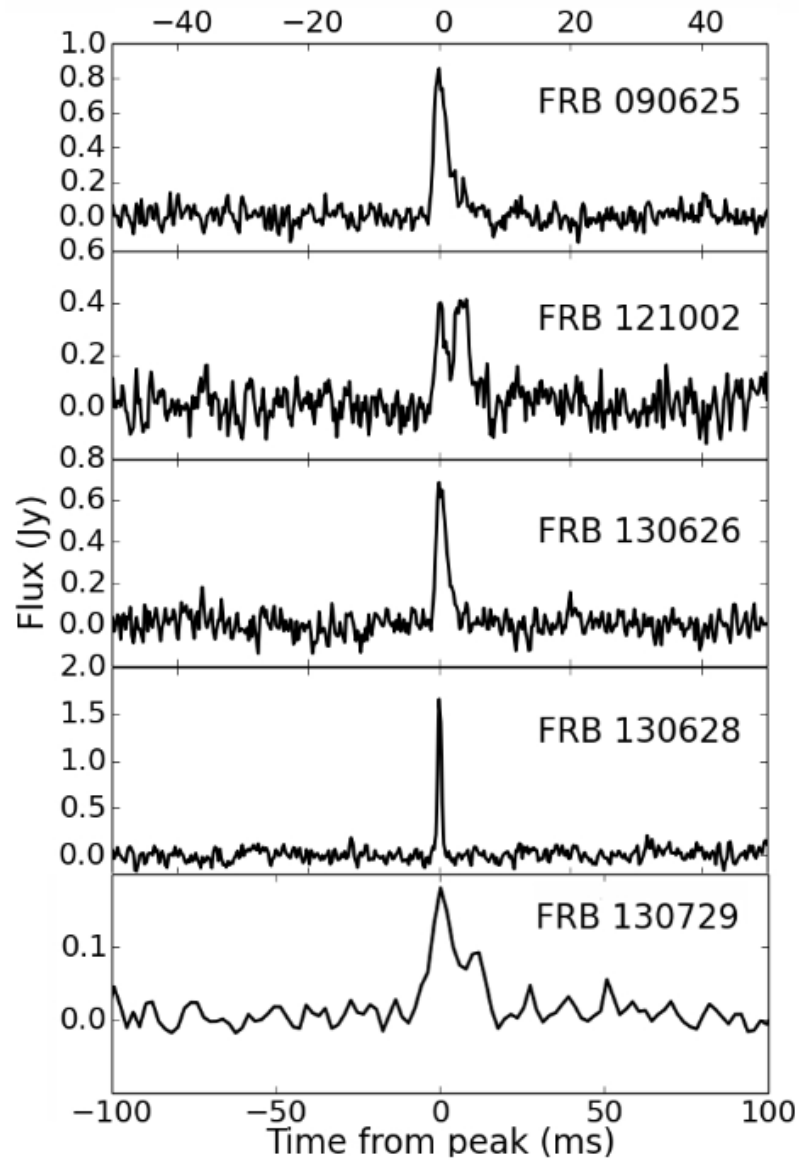


Пока всплесков мало, но уже пытаются изучить их статистические свойства. Самый первый – лоримеровский всплеск, - слегка выпадает из многих распределений.

$$\frac{dN}{dF_{\text{obs}}} = (4.4 \pm 0.4) \times 10^3 F_{\text{obs}}^{-1.18 \pm 0.15} \text{ sky}^{-1} \text{ day}^{-1}$$

С учетом повторных всплеском темп выше.

Сдвоенные всплески

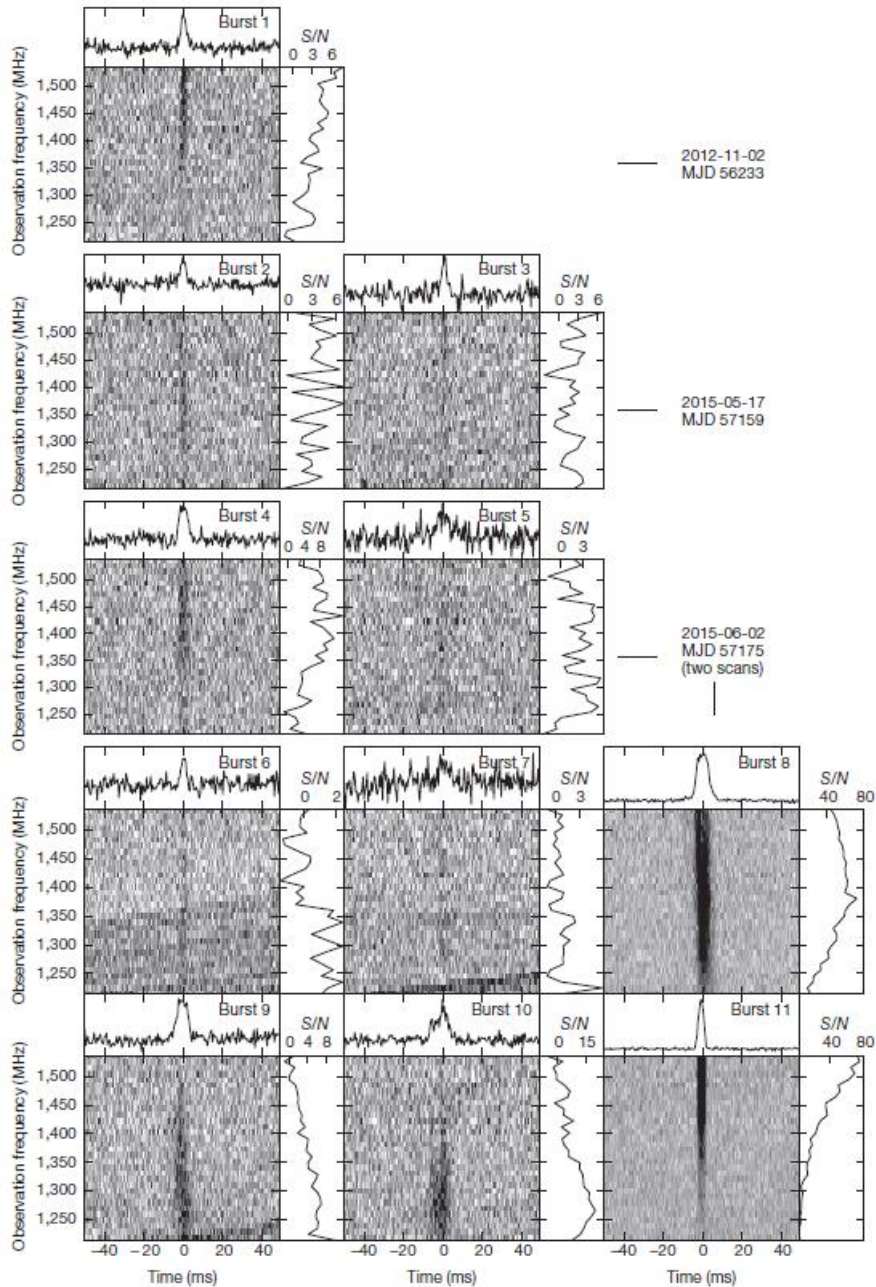


Обнаружение всплеска с двумя пульсами ставит серьезные проблемы перед рядом теоретических моделей.

А в некоторых они, наоборот, предсказываются, или являются довольно естественными.



Повторные всплески



Впервые удалось увидеть повторные всплески от FRB 121102.

Наблюдения на Аресибо.

10 событий.

Темп ~ 3/час

Всплески слабые (<0.02-0.3 Ян)

Некоторые из всплесков имеют двойную структуру.

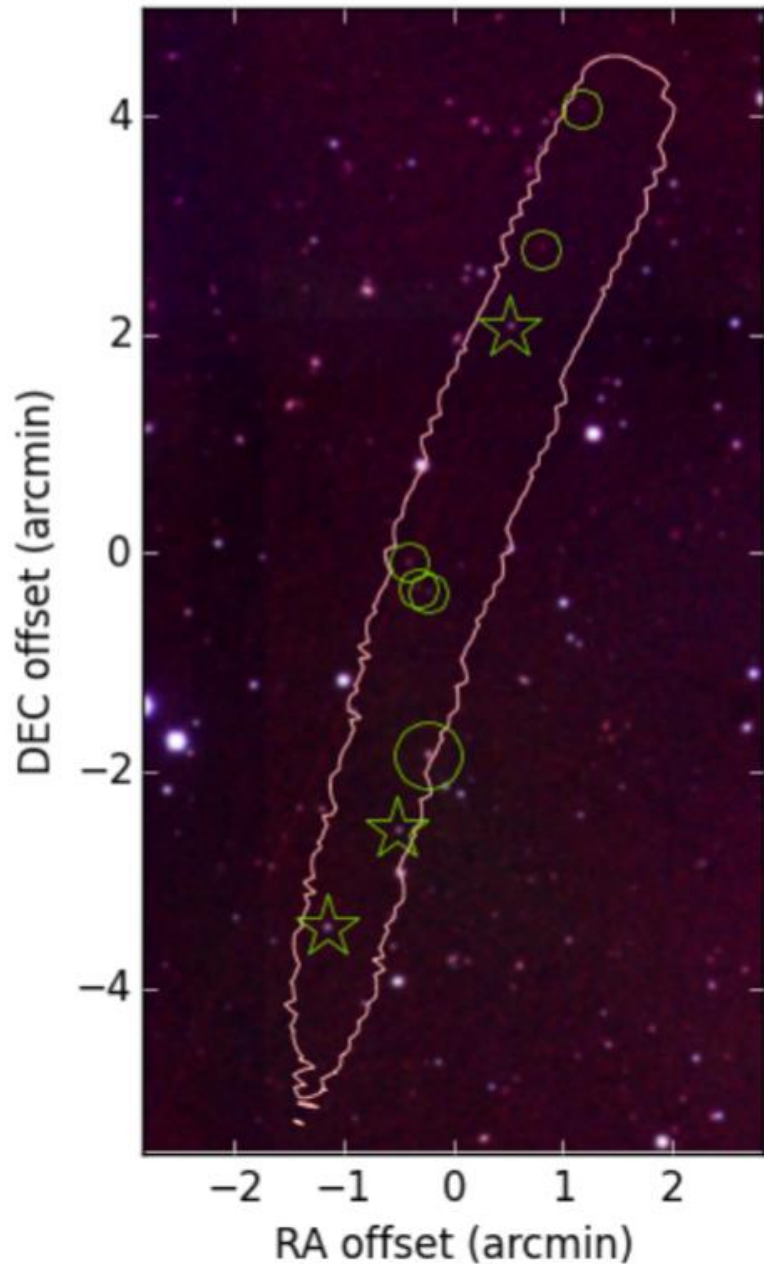
Переменный спектр.

Это может быть уникальный источник, т.е. он может не быть типичным представителем популяции FRBs.

$$dN/d\mathcal{F} \propto \mathcal{F}^{-1.78 \pm 0.16}$$

(Wang & Yu 2016)

Самый яркий всплеск: FRB 150807



120+/-30 Ян

Обнаружение в реальном времени.

Нет вспышки или транзиента в других диапазонах.
Нет повторных всплесков.

Удалось измерить меру вращения.

Мера дисперсии одна из самых низких ~267.

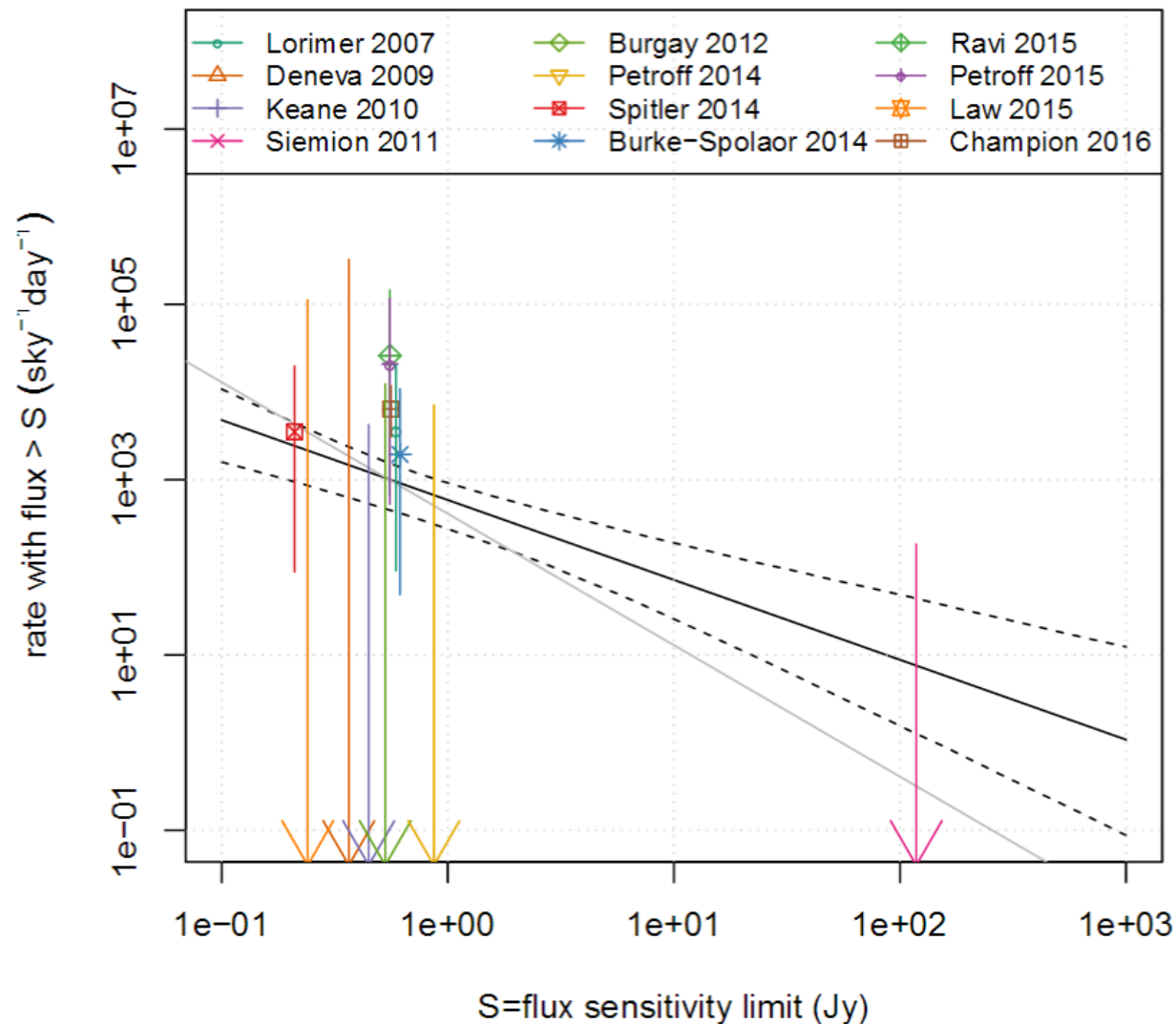
Число ярких (>50 Ян) всплесков может быть
~150-200 в день.

Локализация
9 угловых минут

1611.05758

Новые оценки темпа всплесков

587 в день с потоком выше 1 Янского
Неоднородный пуассоновский процесс.



Черная линия –
новый результат.

Пунктирные –
неопределенность (95%).

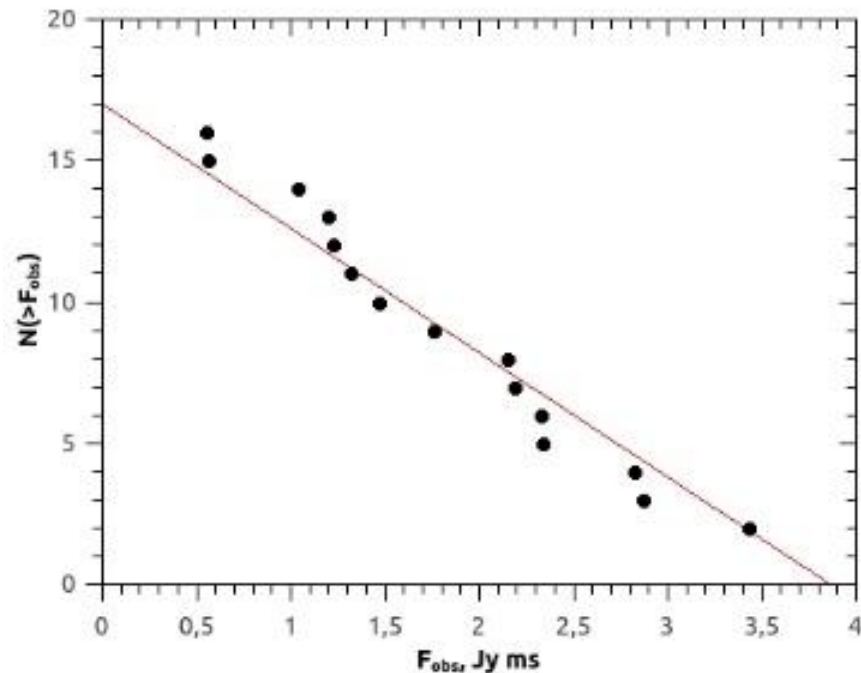
Серая линия построена
при предположении, что
в Log N – Log S показатель
равен 3/2.

См. также 1612.00896

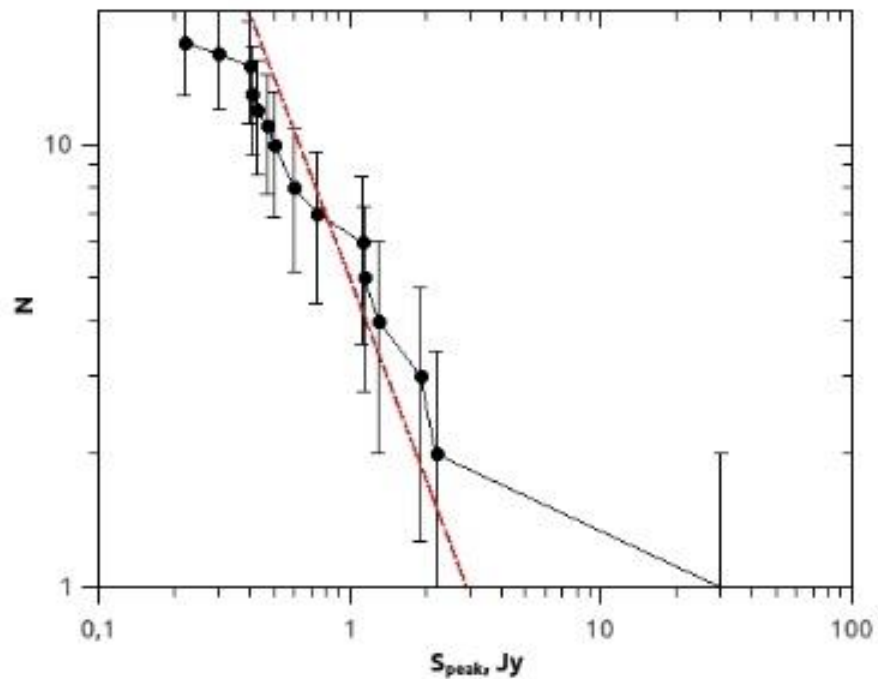
1611.00458

Флюэнс и пиковая светимость

Пока мало статистики для серьезного анализа распределения $\text{Log } N - \text{Log } S$ для флюэнса или полной светимости.



Флюэнс (без трех самых ярких)

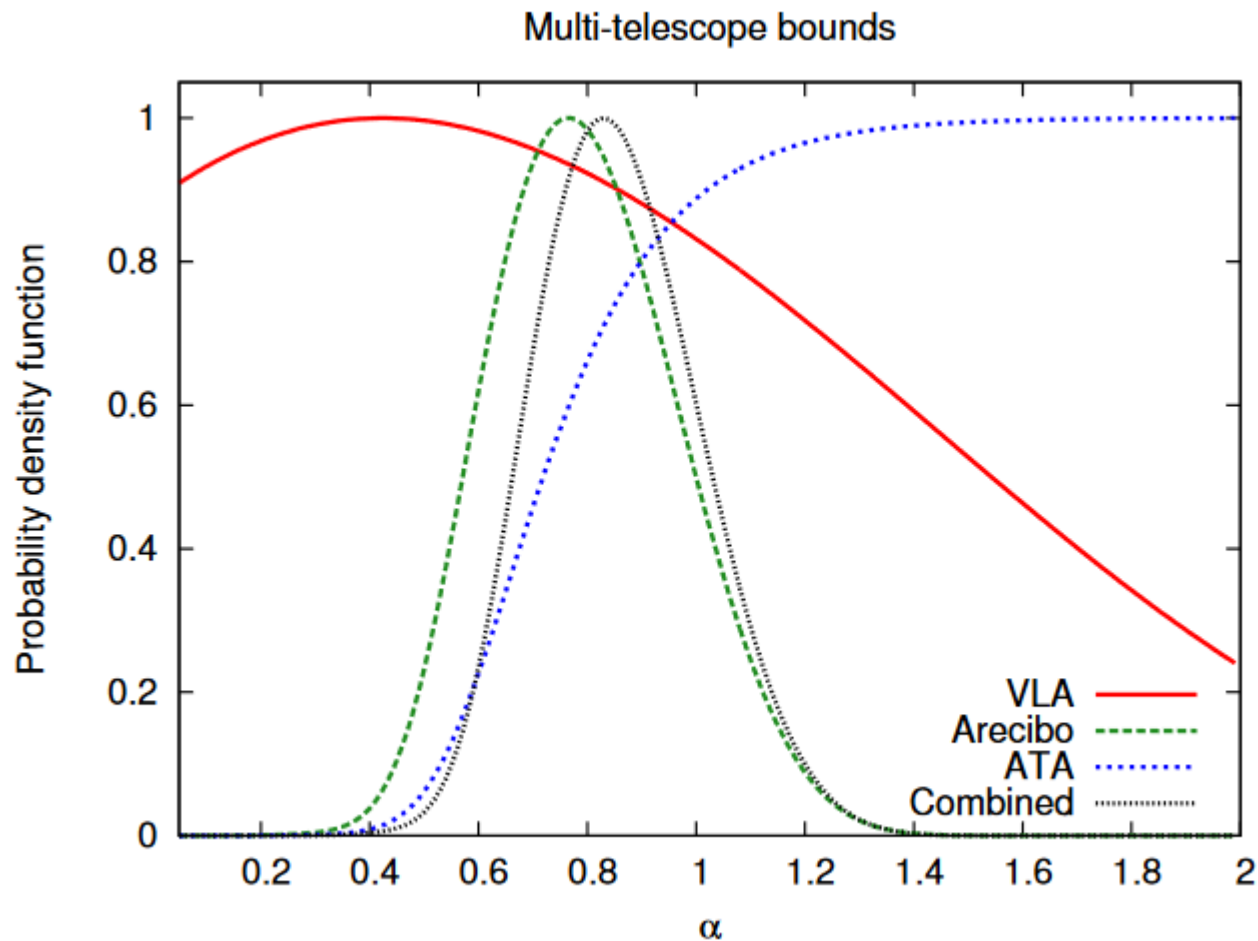


Пиковая светимость

См. также 1604.03909, где проведен детальный анализ и тест V/V_{max} .

Log N - Log F (fluence)

Наклон не равен $3/2$, а является более плоским (больше ярких всплесков).



Это делает перспективным поиск с помощью комплекса малых (6 м) антенн.

Гипотезы, гипотезы ...

Сейчас известно около 20 источников всплесков.

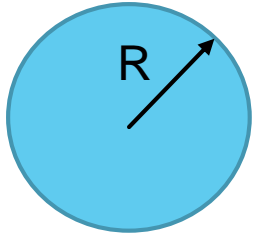
Для их объяснения придумано около 20 существенно разных моделей!

1. Магнитары
2. Космические струны
3. Первичные черные дыры
4. Сверхновая в системе с пульсаром
5. Слияние нейтронных звезд
6. Слияние белых карликов
7. Супрамассивные нейтрон. звезды
8. Вспышки обычных звезд
9. Коллапс нейтронной звезды в дыру
10. Батарея черной дыры
11. МГД процессы на компаньоне в тесной двойной системе
12. Белые дыры
13. Сверхгигантские импульсы пульсаров
14. Аксионные звезды и тп.
15. Деконфайнмент
16. Падение астероидов и тп. на нейтр.зв.
17. Миллисекундный магнитар
18. Джеты
19. Заряженные черные дыры

При этом многие упомянутые гипотезы имеют разные варианты, существенно отличающиеся друг от друга.

Сейчас публикуется примерно 1-2 статьи в неделю на тему БРВ.

Нейтронные звезды и экзотика



У нейтронной звезды масса порядка солнечной и радиус порядка 10 км.

Это дает скорость падения $v=(2GM/R)^{1/2} \sim 0.5$ с

Время падения $t=R/v < 0.1$ msec

Поэтому легко получать короткие события.

То же самое для черных дыр.

Кроме того, отсутствие сопутствующих вспышек в других диапазонах, и вообще недостаток данных, позволяет привлекать весьма необычные сценарии космических транзиентов.

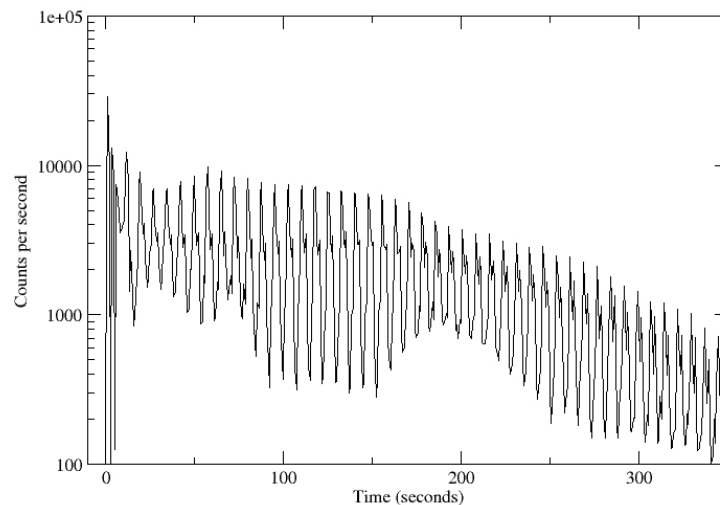
Кроме того, у нейтронных звезд есть сильное магнитное поле, и они известны как вспыхивающие радиоисточники.

Поэтому модели FRB легко свести к формуле: компактные объекты или экзотика.

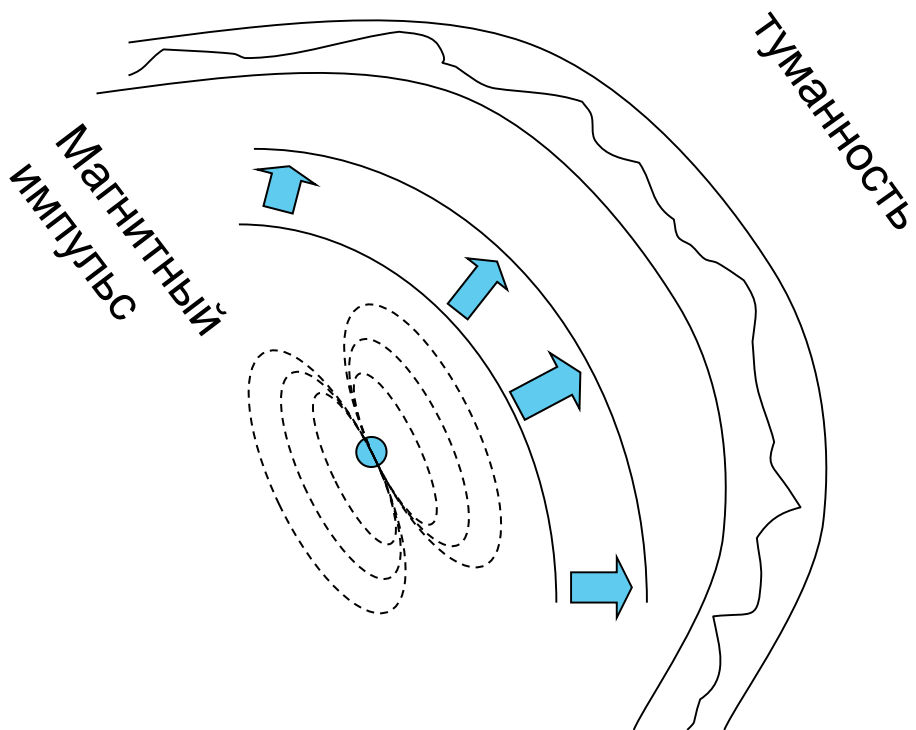


Гипервспышки магнитаров?

Сразу же после публикации Lorimer et al. (2007) мы предложили модель (0710.2006, 1307.4924), в которой вспышки связаны с гипервсплесками магнитаров. Темп, временные характеристики и отсутствие всплеска в других диапазонах находят прекрасное объяснение. Энергетика также соответствует.



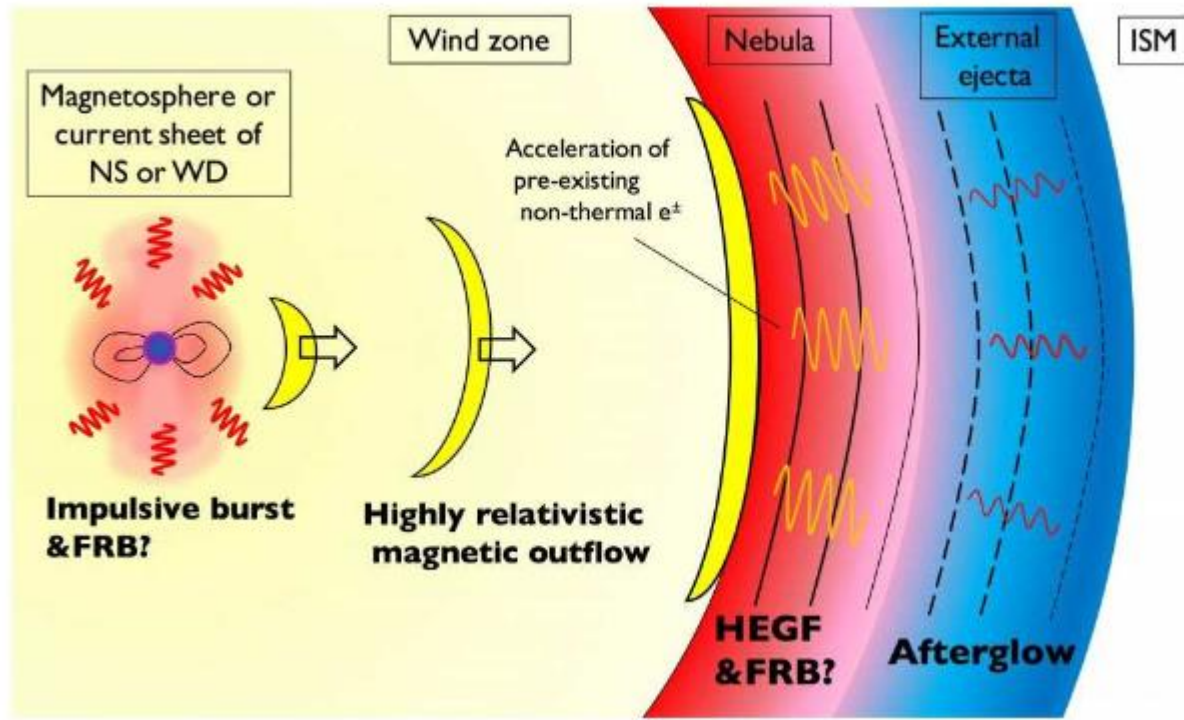
1401.6674



Юрий Любарский в 2014 году построил теоретическую модель, которая позволяет объяснить радиовсплески в рамках магнитарной модели. Пока модель не опровергнута наблюдениями. Для подтверждения необходимо обнаружить магнитарную вспышку. Или, что следует из расчетов Любарского, излучение на очень высоких энергиях.

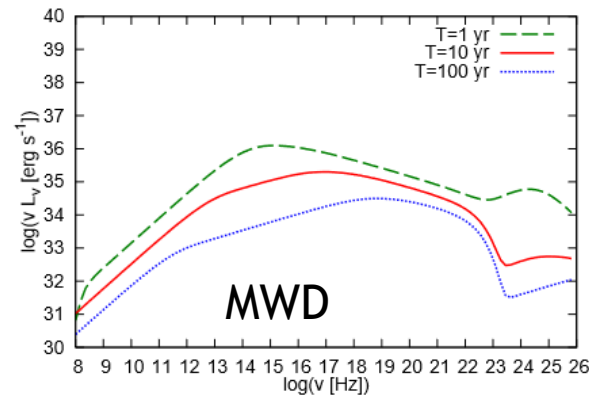
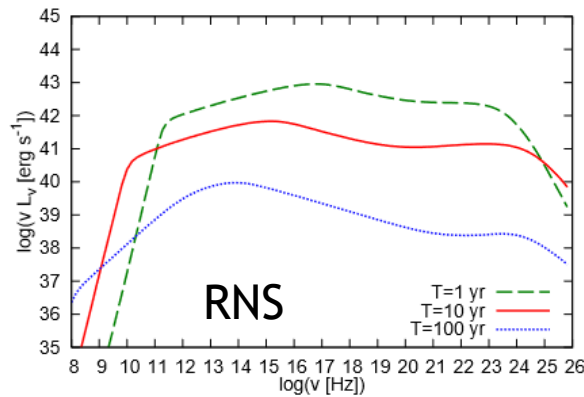
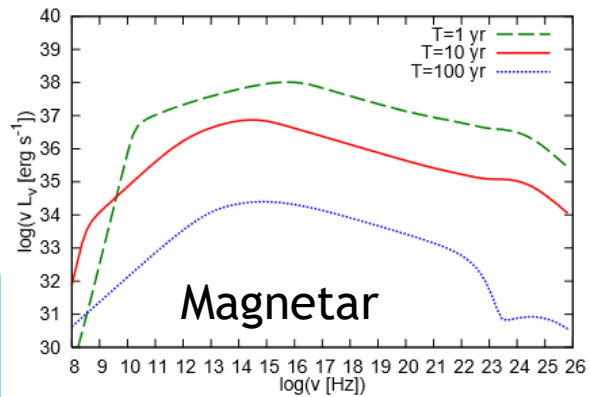
Излучение туманности

1603.08875



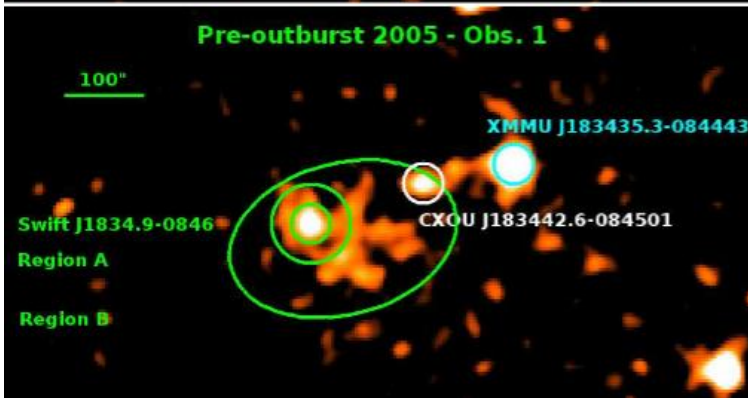
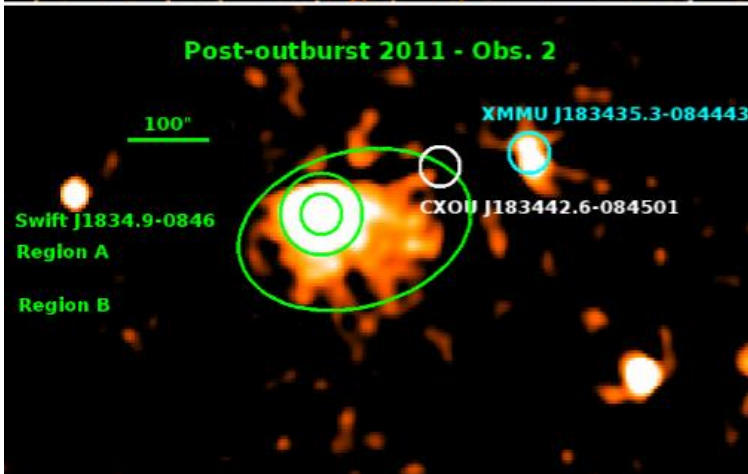
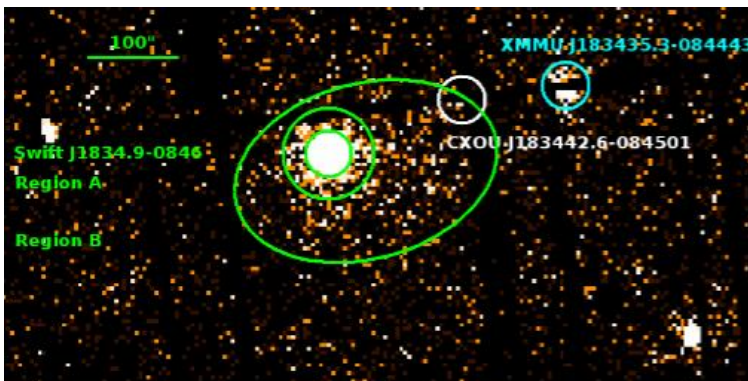
Рассмотрение модели с излучением туманности Получило развитие.

Рассмотрены туманности вокруг магнитаров, быстро вращающихся НЗ и белых карликов.

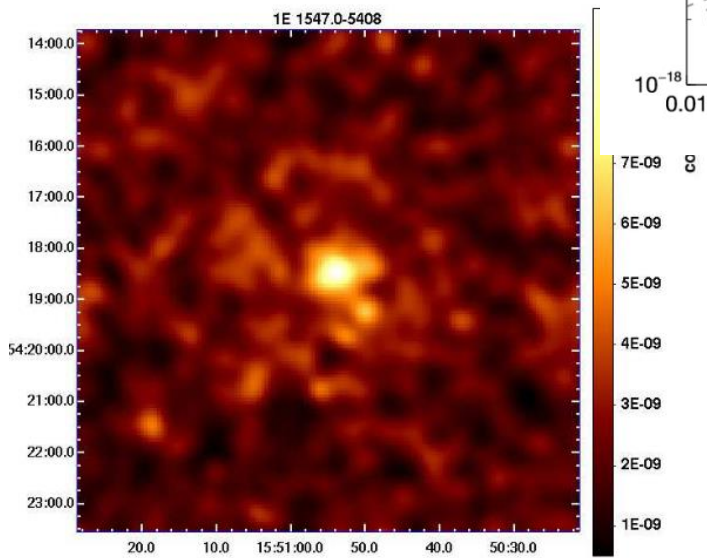
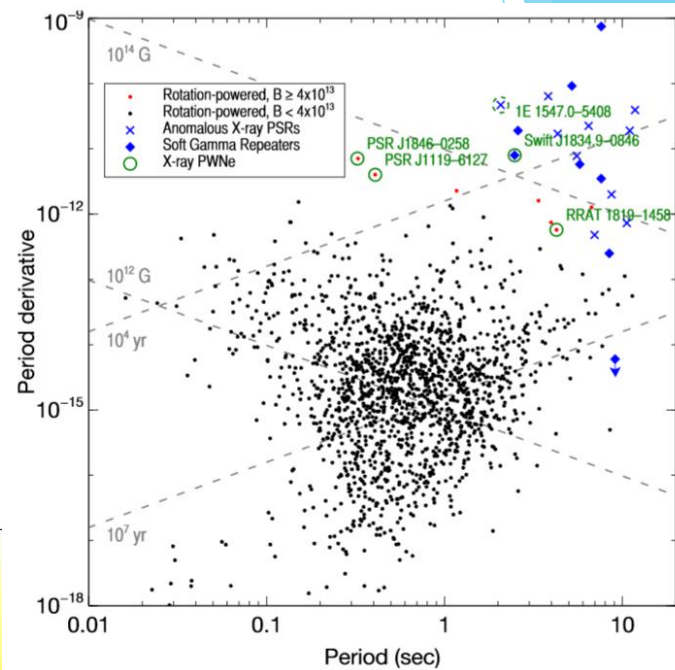


Туманности вокруг магнитаров

1206.3330. Новые результаты в 1604.06472



О генерации
пульсарных
туманностей
вокруг магнитаров
см. 1606.01391



0909.3843

1211.0852

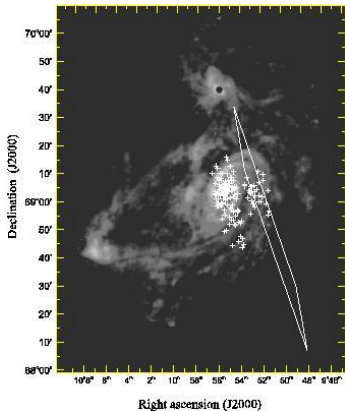
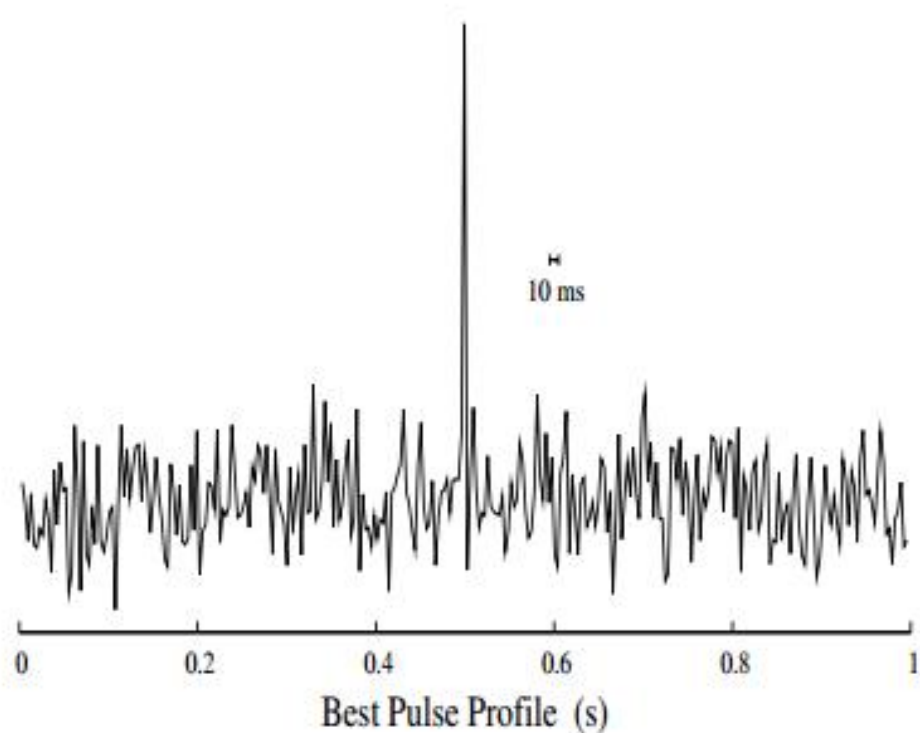
У нейтронных звезд с сильными магнитными полями (включая нормальные магнитары) наблюдаются т.н. пульсарные туманности.

Вспышки из М31

Rubio-Herrera et al. (2013) обнаружили миллисекундные радиовсплески от туманности Андромеды.

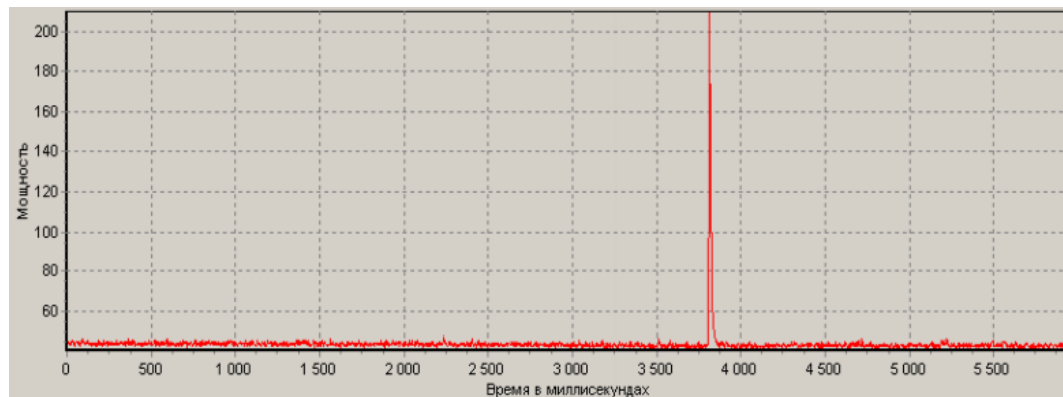
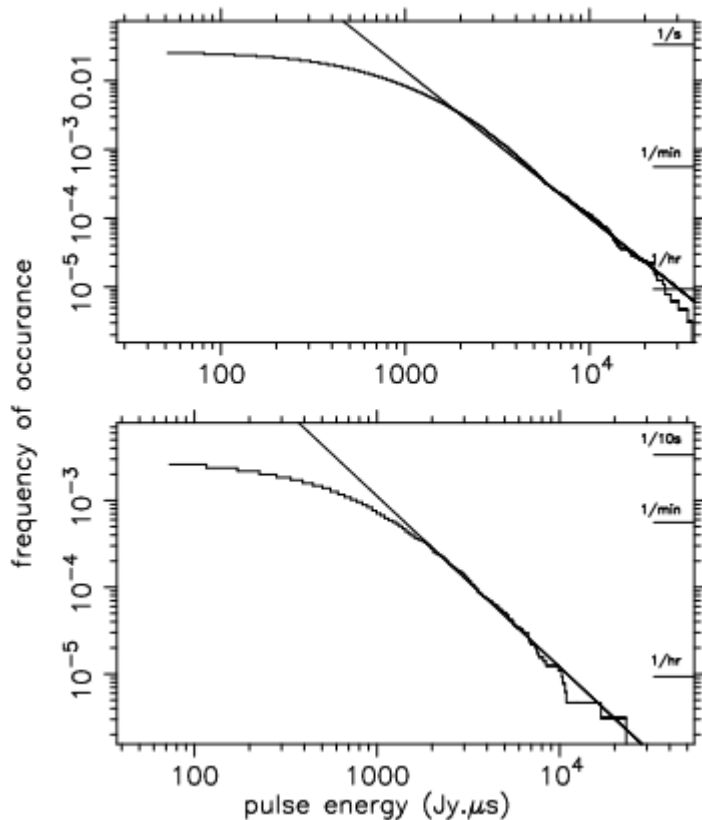
Они похожи на слабую версию быстрых радиовсплесков. Возможно, они повторяются.

Это похоже на масштабированную версию, где за радиовсплески отвечают уже более слабые магнитарные вспышки. Было бы интересно увидеть такие же от других галактик и получить распределение по светимости.



Заметим, что Фредерикс и др. (2005) обнаружили кандидата в гипервсплеск магнитара в М31.

Сверхгигантские импульсы внегалактических радиопульсаров



<http://www2011.mpe.mpg.de/363-heraeus-seminar/Contributions/0Poster/p6.pdf>

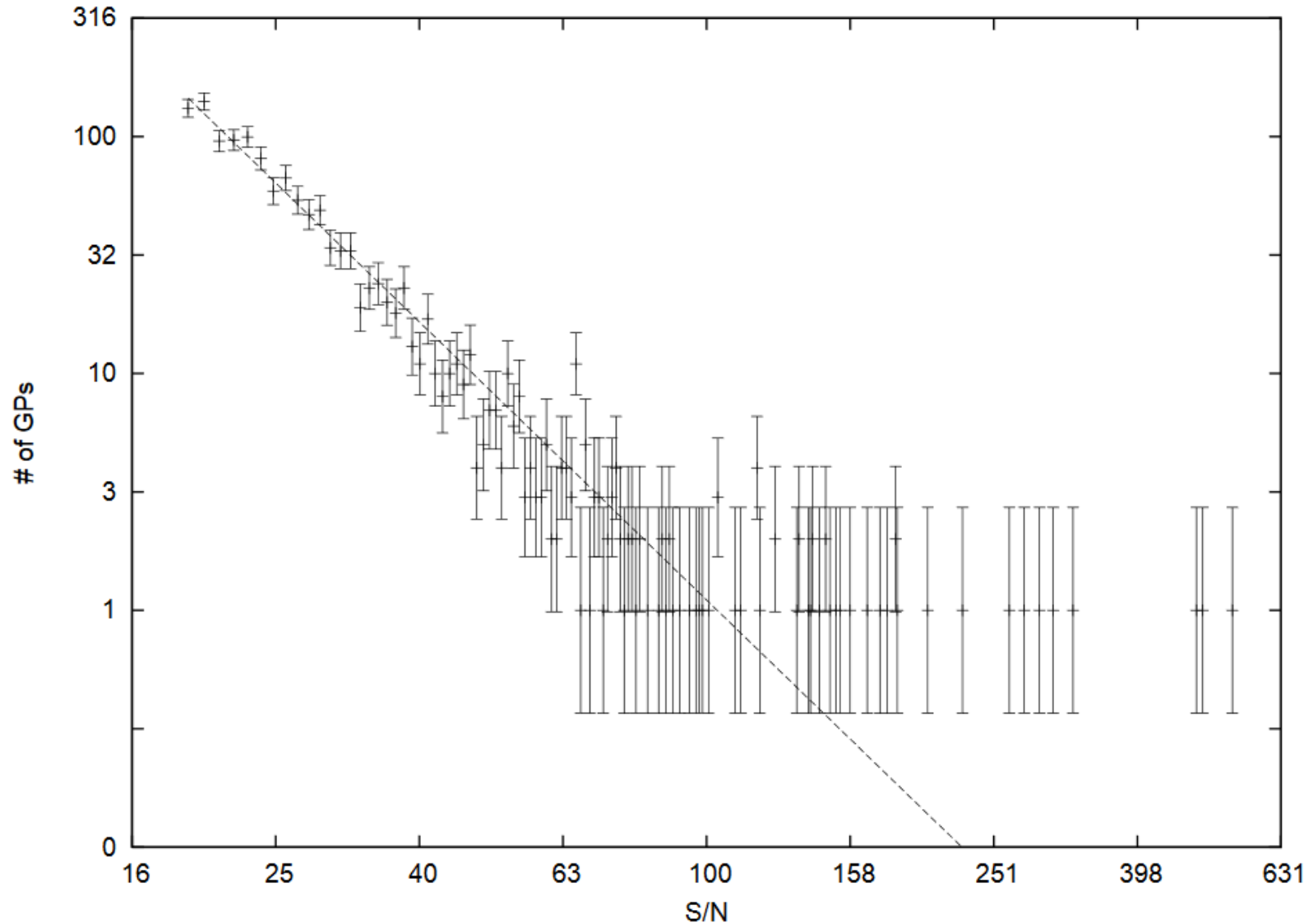
Известны гигантские импульсы пульсаров. Возможно, распределение тянется дальше, и есть супергигантские импульсы. Они могут быть видны и с внегалактических расстояний.

В некоторых моделях вспыхивающие пульсары находятся в достаточно молодых и плотных остатках сверхновых, что помогает объяснить некоторые из свойств всплесков.

1501.00753, 1505.05535

Распределение гигантских импульсов Краба

Дифференциальное распределение по мощности имеет наклон ~ -3 (для разных времен и частот колеблется между 2.3 и 3.5).



1210.0452

Всплески как суперимпульсы

$$\eta = \frac{L_{GP}}{\dot{E}_{Crab}} = \frac{\nu c^3 d_{Crab}^2 S_\nu P_{NS}^4}{4\pi^3 B_{NS}^2 R_{NS}^6} \approx 10^{-2},$$

$$L_{FRB} = \eta \dot{E} \rightarrow B_{NS} = \frac{c^{3/2} d \sqrt{(\nu F_\nu)} P_{NS}^2}{2\pi^{3/2} R_{NS}^{3/2} \sqrt{\eta}} = 2 \times 10^{13} d_{100\text{Mpc}} F_{30\text{Jy}}^{1/2} \tau_{5\text{msec}}^2 \sqrt{\nu_9 \eta_{-2}^{-1/2}} \text{ G.}$$

$$\tau_{SD} = \frac{\pi \eta I_{NS}}{d^2 F_\nu \mu P^2} \sim \text{few years.}$$

Суперимпульсы молодых пульсаров в плотных остатках сверхновых

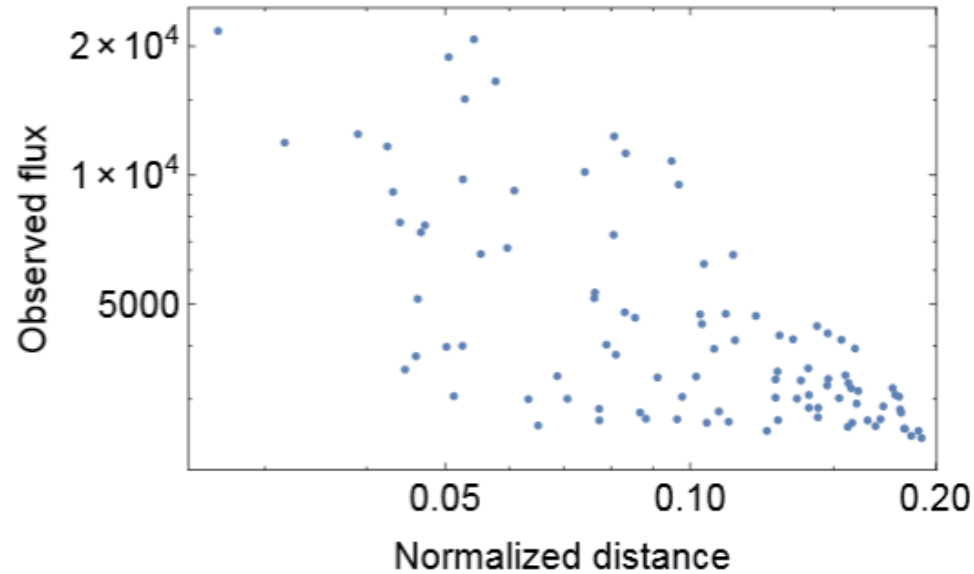
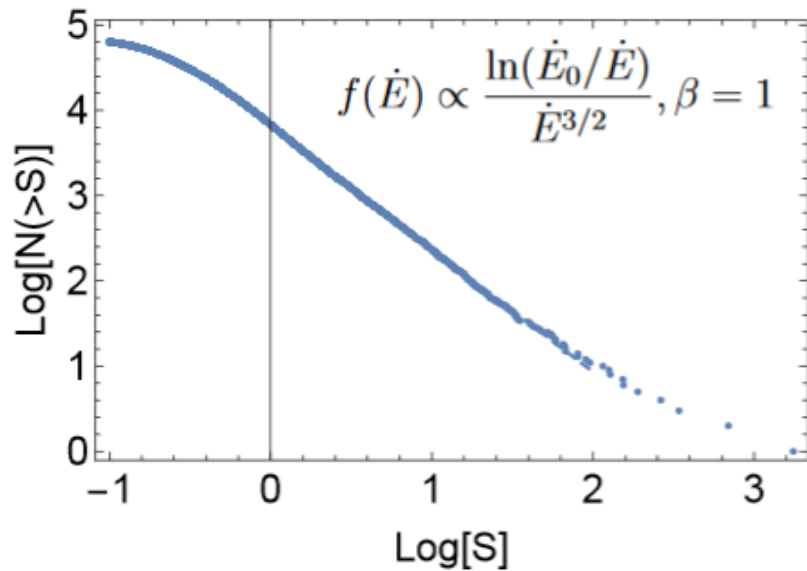
Возраст 30-100 лет

Равномерное распределение по \dot{E} в логарифме

Поглощение низкочастотного излучения в остатке

Повторяемость всплесков

Всплески равномерно распределены по расстояниям до них



Дисперсия в плотном остатке сверхновой

$$DM \approx \frac{M_{ej}}{m_p r^2} \quad r = \sqrt{M_{ej}/m_p} \frac{1}{\sqrt{DM}} = 0.34 \text{pc} \sqrt{m_\odot} DM_{375}^{-1/2}$$

$$\frac{M_{swept}}{M_{ej}} = \sqrt{M_{ej}/m_p} \frac{n_{ISM}}{DM^{3/2} \text{pc}^{3/2}} = 4.5 \times 10^{-4} n_{ISM} \sqrt{m_\odot} \ll 1,$$

$$v_{ej} = \sqrt{\frac{2E_{ej}}{M_{ej}}}. \quad t = \frac{M_{ej}}{\sqrt{2DM E_{ej} m_p}} = 35 \text{yrs} m_\odot$$

$$\tau = 8 \times 10^{-2} n^2 \nu^{-2.1} r T^{-1.35} = 0.05 DM_{375}^{5/2} m_\odot^{-1/2} \nu_9^{-2.1}$$

Частота всплесков

Темп вспышек сверхновых $3 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ (Dahlen et al. 2012).

Это дает примерно 1 сверхновую в день в 100 Мпк.

Возраст и продолжительность активности наших источников ~ 30 лет.

Т.е. у нас 10 000 источников в 100 Мпк.

Наблюдаемый темп FRB $\sim 3 \cdot 10^3$ в день.

Т.е., каждый источник должен давать по всплеску в день

(можно взять 200 Мпк, тогда мы можем взять лишь $\sim 10\%$ самых энергичных).

Гигантские импульсы Краба с потоком 100-200 кЯн при росте \dot{E} в 100 000 раз дадут всплески порядка Ян с 100-200 Мпк.

Самые мощные гигантские импульсы (2 Мян) перейдут в неск. десятков Ян.

Число гигантских импульсов $\sim S^{-3}$.

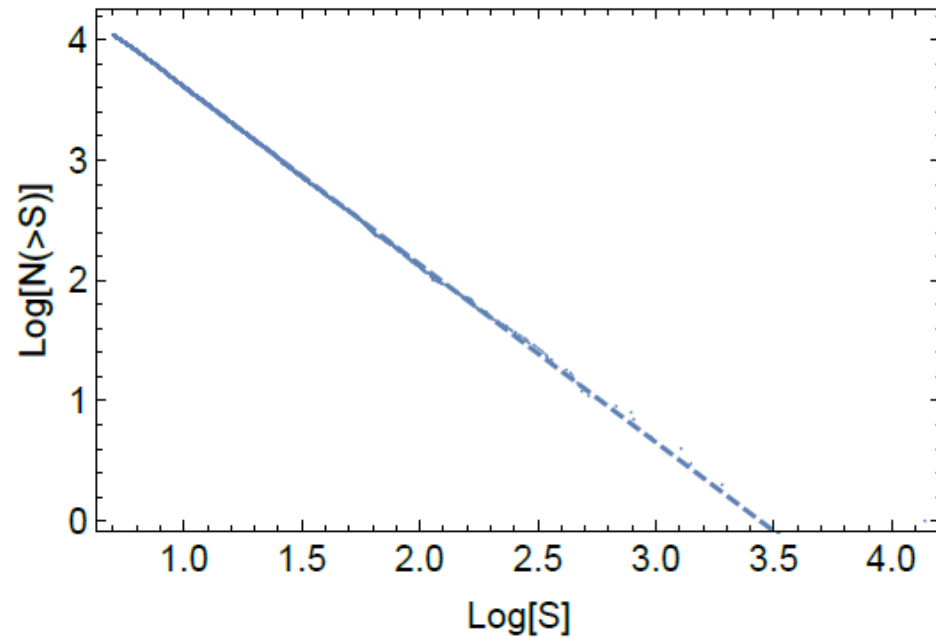
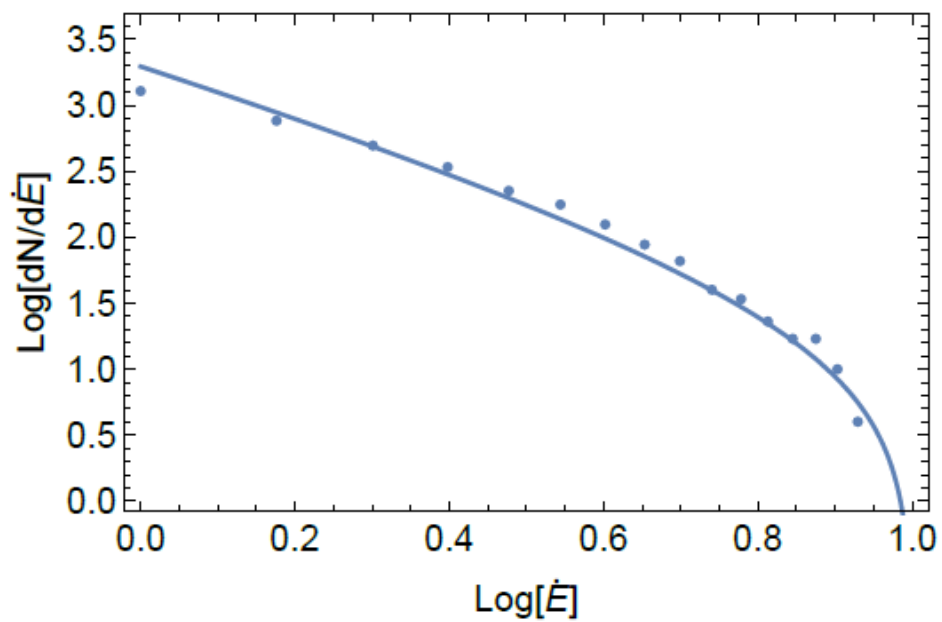
Для FRB мы получаем, что самые яркие (типа лоримеровского) должны наблюдаться раз в несколько месяцев.

Монте-Карло моделирование

$$f_{inj} \propto \dot{E}^{-1}$$

$$\partial_t \dot{E} \propto -\dot{E}^{-3/2}$$

$$S \propto \dot{E}/r^2$$



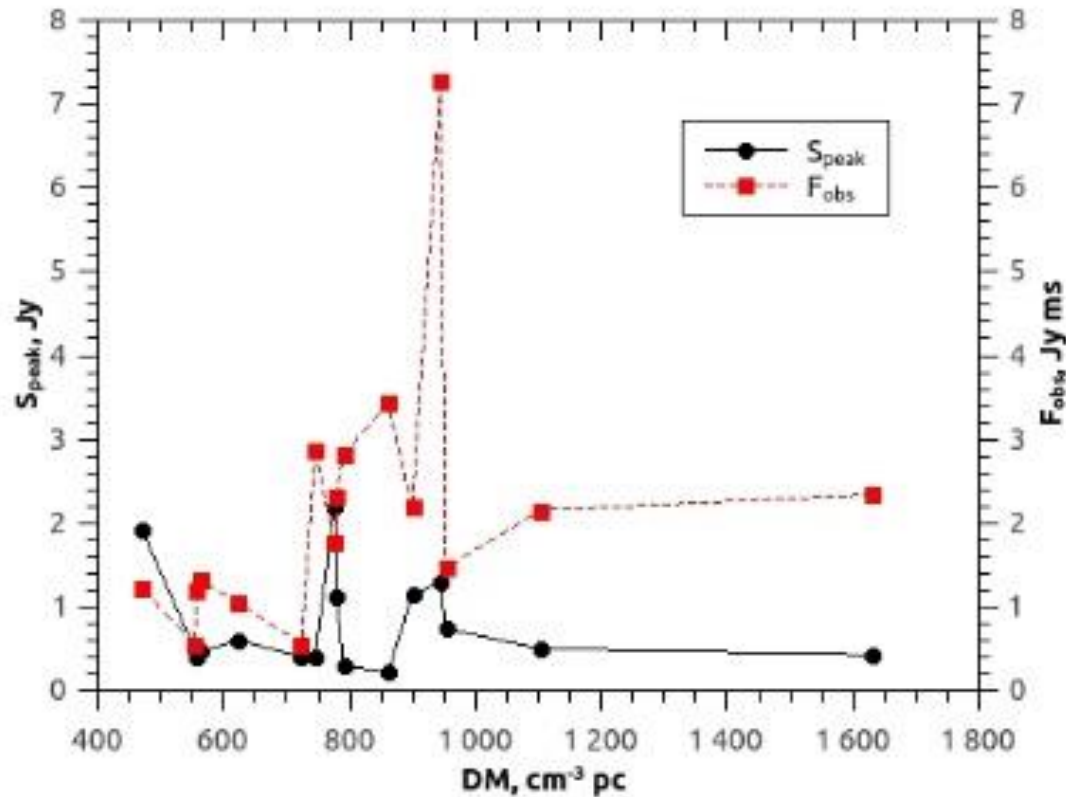
Распределение по расстояниям и DM

$$S \propto \frac{\dot{E}}{r^2} \propto \dot{E} f(\dot{E})^{2/3}$$

$$\dot{E} = \frac{\dot{E}_0}{(1 + t/\tau)^2}$$

$$S \propto \dot{E}^{(1-2\alpha/3)} \propto r^{-2+3/\alpha}$$

$$DM = \frac{M_{ej}^2}{2E_{ej}m_p\tau} \frac{\dot{E}}{(\dot{E} + \dot{E}_0)^2}$$



Мера дисперсии не коррелирует ни с флюэнсом, ни с пиковой светимостью.

Это находится в соответствии с результатами предложенной модели.

FRB vs. ULX

В модели, в которой всплески порождаются молодыми пульсарами на $d \sim (100-200)$ Мпк, можно ожидать, что эти НЗ будут стабильными источниками рентгеновского излучения большой мощности – ULX.

For a typical FRB with peak flux $S_{\text{peak}} = 1$ Jy we obtain radio luminosity:

$$L_r = 1.7 \times 10^{40} (S_{\text{peak}}/1 \text{ Jy}) (d/100 \text{ Mpc})^2 \text{ erg s}^{-1}.$$

Then, rotational energy losses are:

$$\dot{E} = 1.7 \times 10^{42} (S_{\text{peak}}/1 \text{ Jy}) (d/100 \text{ Mpc})^2 (\eta/0.01)^{-1} \text{ erg s}^{-1}.$$

Using the relation from Possenti et al. we obtain the X-ray luminosity:

$$L_X = 1.8 \times 10^{41} (S_{\text{peak}}/1 \text{ Jy})^{1.34} \times \\ \times (d/100 \text{ Mpc})^{2.68} (\eta/0.01)^{-1.34} \text{ erg s}^{-1}.$$

And so, the X-ray flux is:

$$f_X = 1.5 \times 10^{-13} (S_{\text{peak}}/1 \text{ Jy})^{1.34} \times \\ \times (d/100 \text{ Mpc})^{0.68} (\eta/0.01)^{-1.34} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

For large distances we obtain higher f_X for a given S_{peak} , for smaller — weaker. If a source with peak flux 1 Jy is at 10 Mpc, then $f_X = 3.2 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Correspondently, for 200 Mpc we have $f_X = 2.5 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

$$L_X \approx 2 \times 10^{42} \left(\dot{E}/10^{43} \text{ erg s}^{-1} \right)^{1.34} \text{ erg s}^{-1},$$

(Possenti et al. 2002)

Поиск ULX позволит подтвердить или закрыть модель в ближайшие годы.

Будущие наблюдения

FAST



FAST –
всплеск за неделю
1602.06099

SKA –
всплеск за час
1602.05165,
1501.07535



SKA

В недалеком будущем заработают новые крупные инструменты. Возможно, они помогут внести ясность. Кроме того, работающие системы, такие как LOFAR и другие, также могут сыграть свою роль. Хотя наблюдать лучше на высоких частотах (порядка 1 ГГц), а не на низких (LOFAR).

По всей видимости, как и случае гамма-всплесков, понадобится одновременное обнаружение быстрого радиовсплеска и сопутствующего излучения в другом диапазоне.

Ближайшее будущее



Продолжаются наблюдения на радиотелескопе Parkes с новой системой мониторинга помех.

Работает новая система ALFABURST в Аресибо (1511.04132)

Идет поиски по архивам разных радиотелескопов.

Ключевые моменты:

- Повторяемость
- Обнаружение в другом диапазоне



Специальные проекты



SUPERB
Survey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts

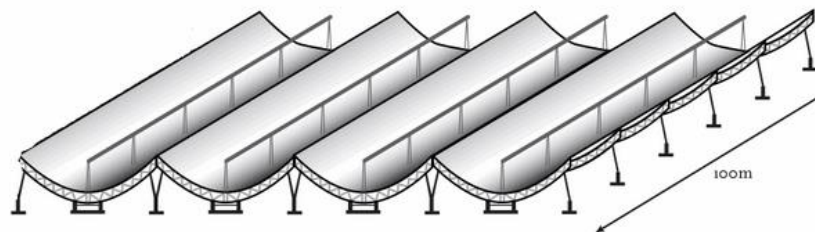
<https://sites.google.com/site/publicsuperb/>



<http://astronomy.swin.edu.au/research/utmost/>
всплеск раз в неделю 1601.02444

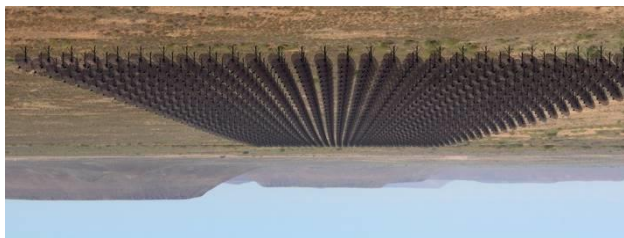
CHIME

The Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment



CHIME – всплеск
раз в день!
1601.02444

1406.2288



HIRAX. Строится прототип
Южный вариант CHIME
1607.02059

<http://chime.phas.ubc.ca/>