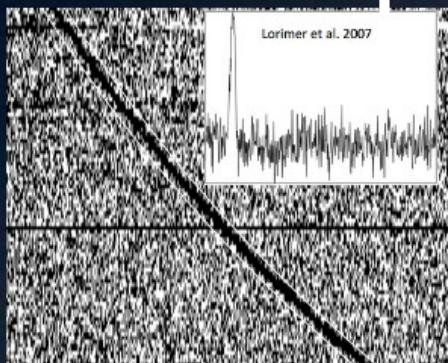
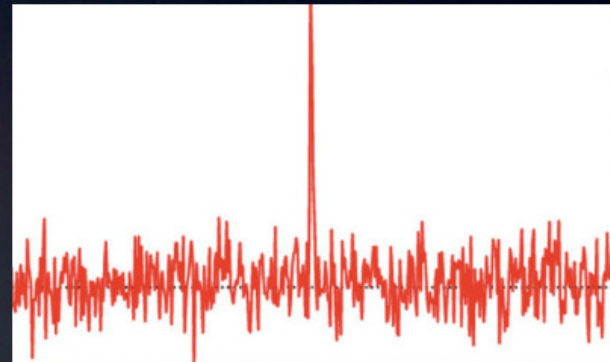


Быстрые радиовсплески

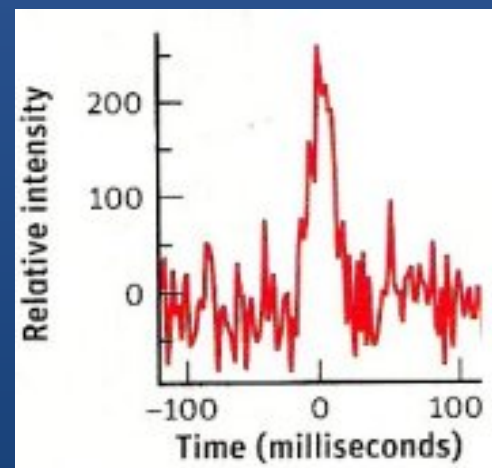
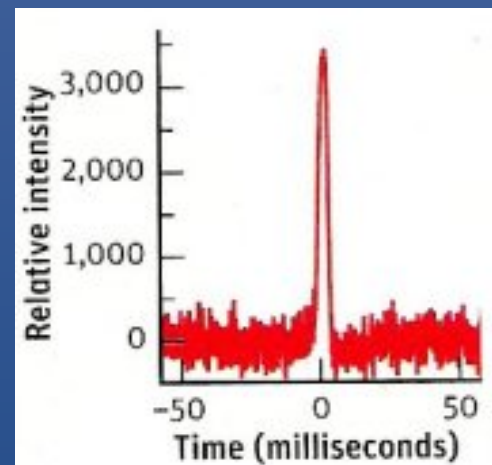
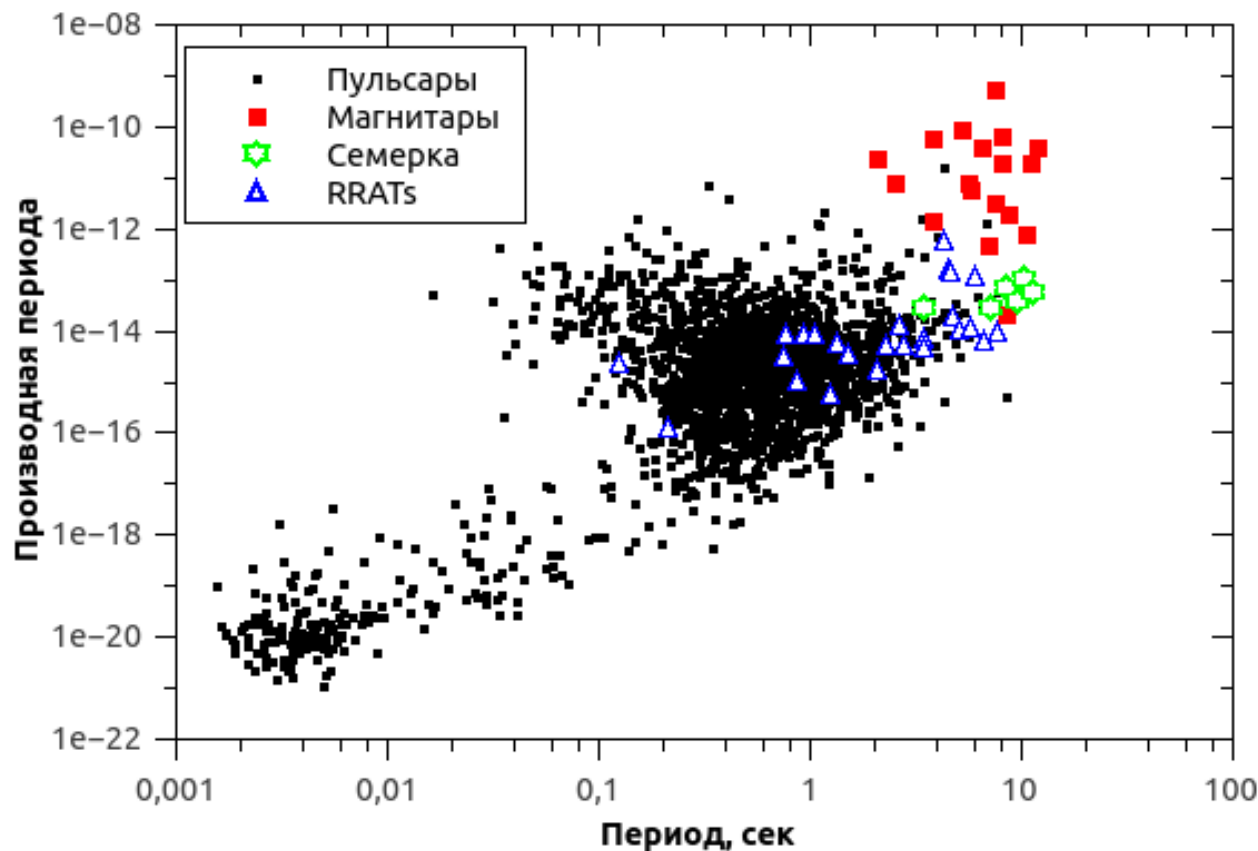


Сергей Попов

План доклада

1. Развитие технологии. Открытие RRATs (2006)
2. Лоример и др. (2007)
3. Идеи. GRB2.0
4. Поиски новых событий в архивах – нулевой результат
5. Keane et al. (2012)
6. Perytons – новый тип всплесков?
7. Thornton et al. (2013)
8. Идеи: 2013-2014
9. Perytons - микроволновки. Petroff et al. (2015)
10. FRB в реальном времени. Petroff et al. (2015)
11. Новые данные (темп, архивы и тп.)
12. Повторные всплески и возможная идентификация
13. Модели (космология и тп.)
14. Магнитарная модель «на коне» или ?
15. Будущее (SKA, FAST)

RRATs – Вращающиеся радиотранзиенты

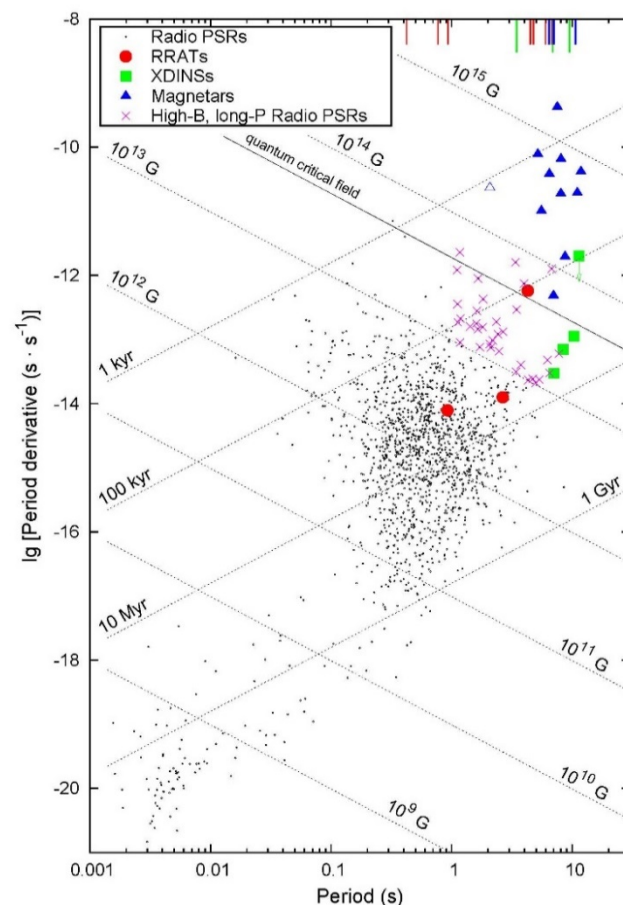
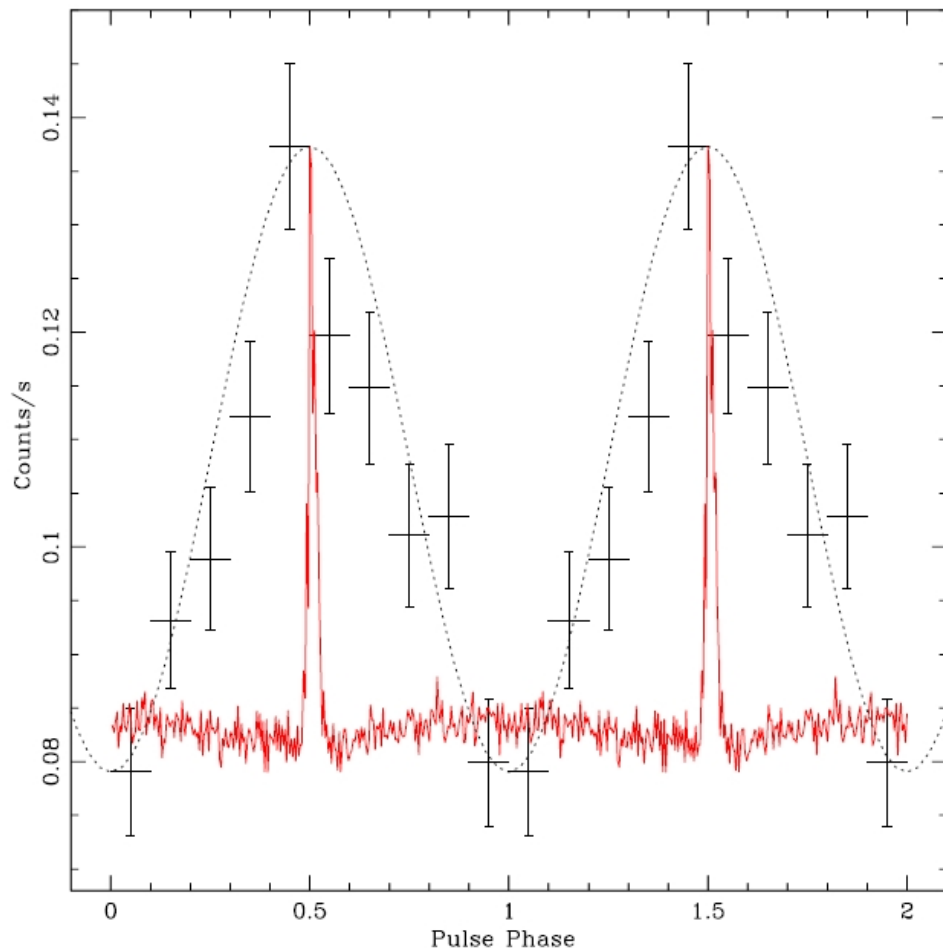


Миллисекундные радиовсплески нейтронных звезд.
Удалось измерить период вращения и его производную.
Причины всплесков не известны до сих пор.

Открыты в 2006 году,
см. [astro-ph/0511587](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511587).

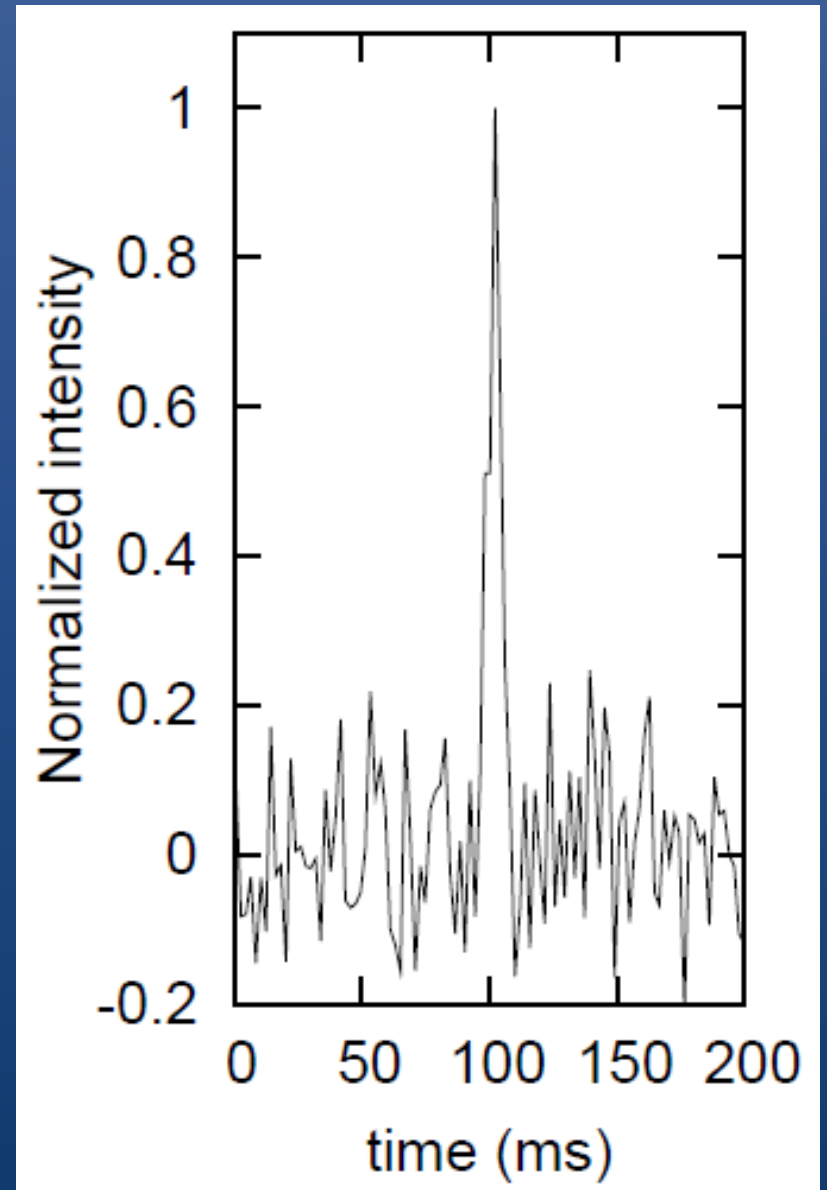
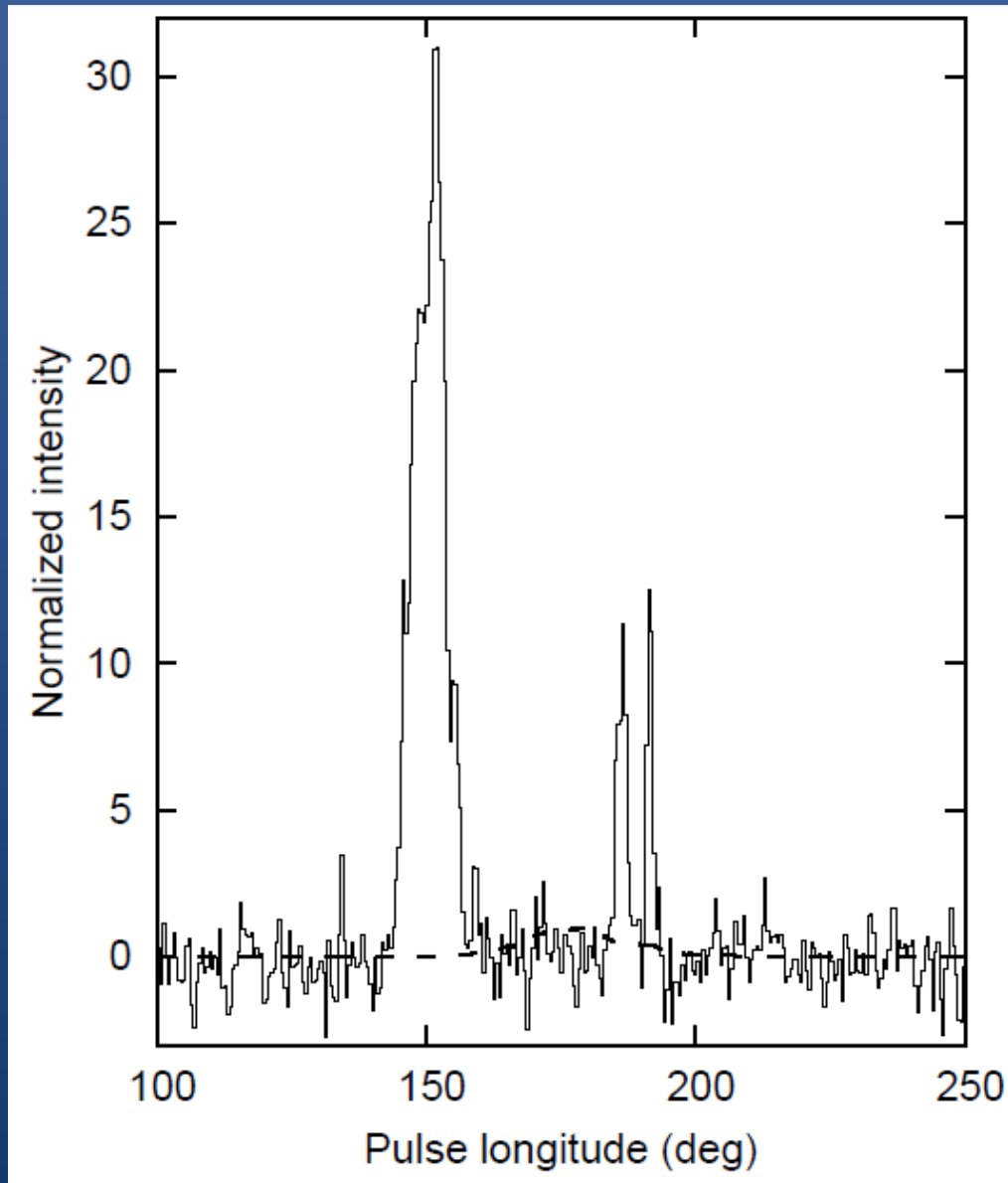
RRAT, похожий на M7

RRAT J1819-1458

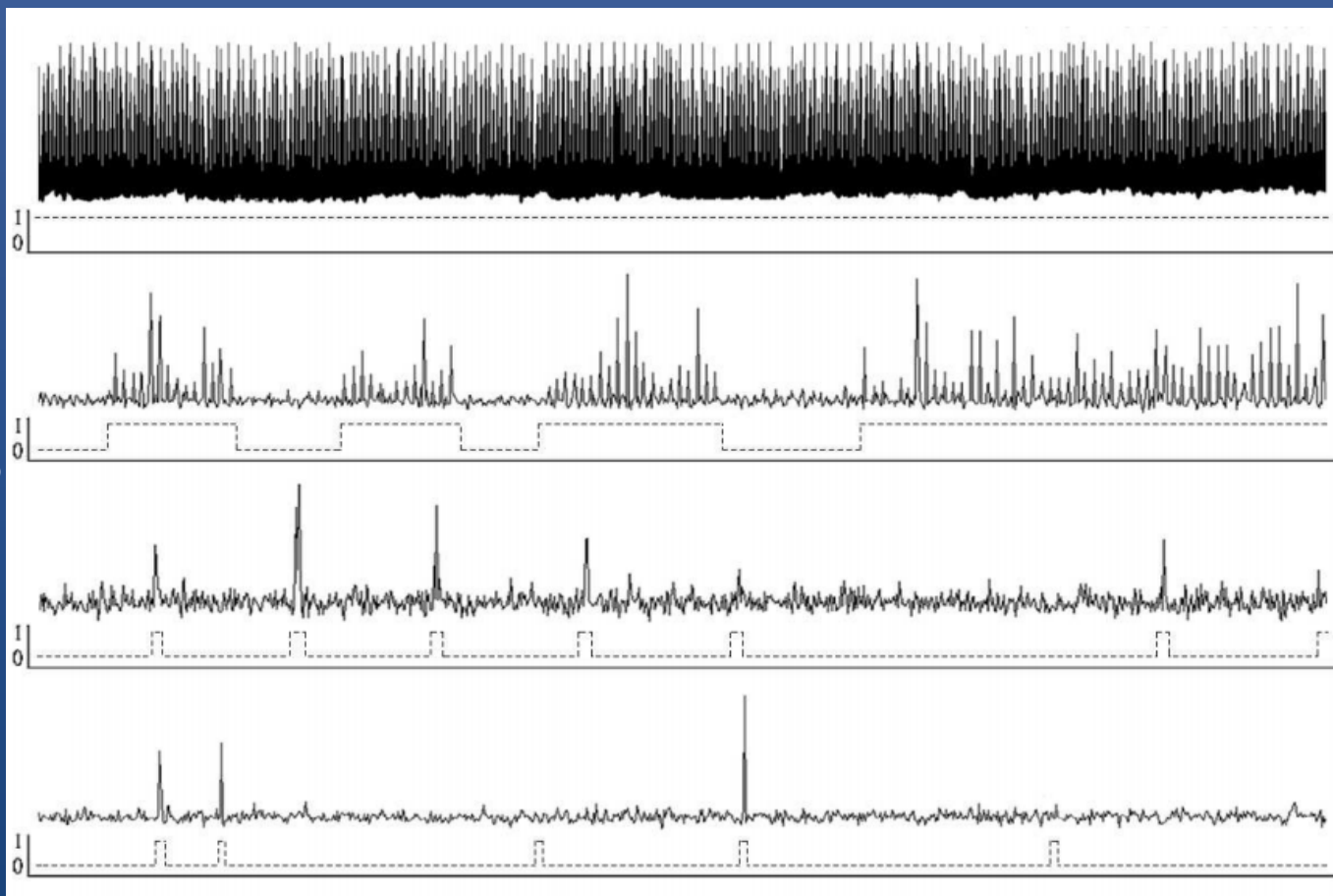


Один из источников был обнаружен в рентгеновском диапазоне, и его свойства оказались похожими на свойства Великолепной семерки.

Всплески пульсара B0656+14



RRAT – это пульсары?



Vela

PSR
J1646-6831

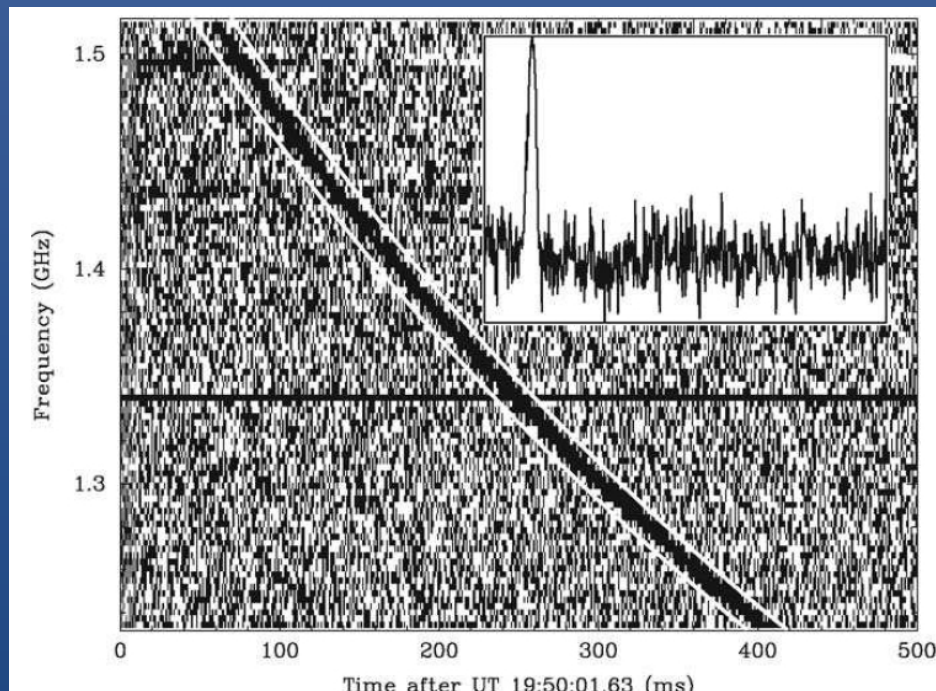
J1647-36

J1226-32

Сейчас считается, что всплески RRATs – это форма магнитосферной активности. Похожие всплески есть у радиопульсаров, и провести резкую границу между ними очень трудно.

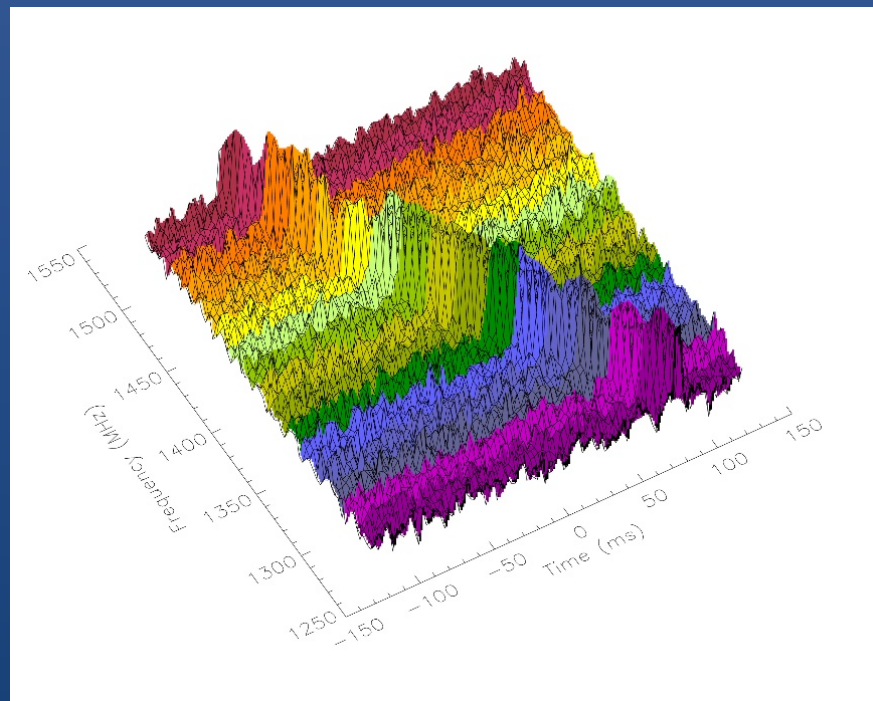
Миллисекундные радиовсплески

Science 318, 777 (2007)



Открыты в 2007 году.

Происхождение неизвестно.



Одно из самых интересных открытий 2007 г.

В направлении всплеска не были видно вспышек в других диапазонах.

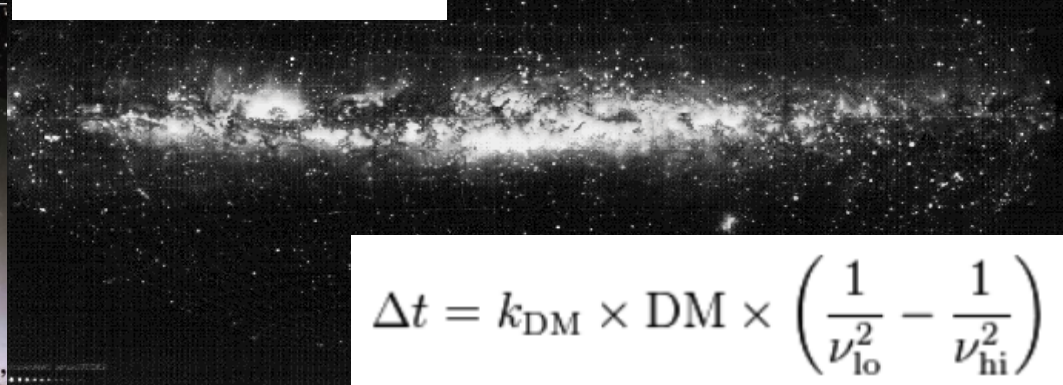
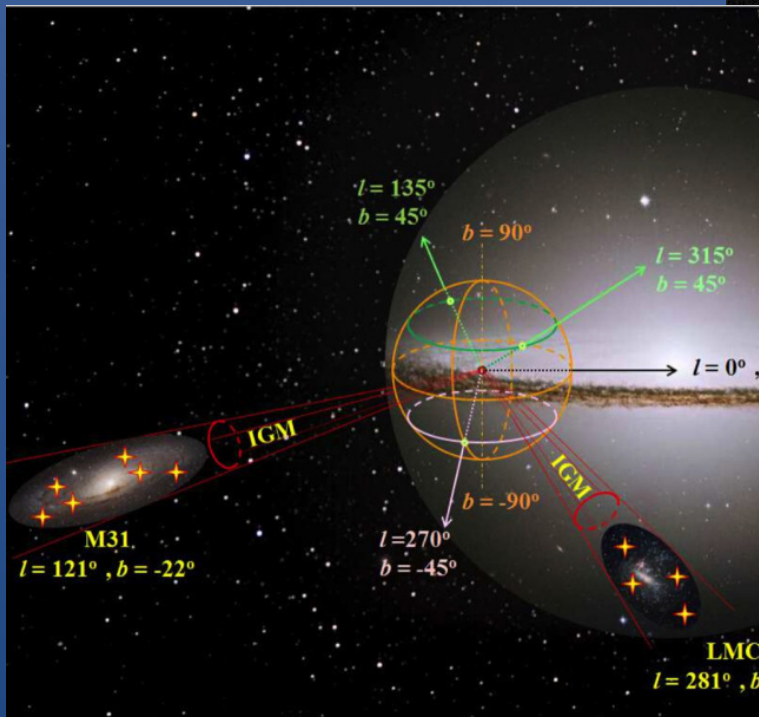
Идентифицировать источник не удалось.

[О том, как не перепутать RRAT и FRB, см. 1512.02513]

Большая мера дисперсии.
Если дисперсия набирается на межгалактической среде, то светимость в радио $\sim 10^{43}$ эрг/с

Мера дисперсии

$$t = k_{\text{DM}} \times \left(\frac{\text{DM}}{\nu^2} \right)$$



$$\Delta t = k_{\text{DM}} \times \text{DM} \times \left(\frac{1}{\nu_{\text{lo}}^2} - \frac{1}{\nu_{\text{hi}}^2} \right)$$

Multiwavel
Milky Way



Мод

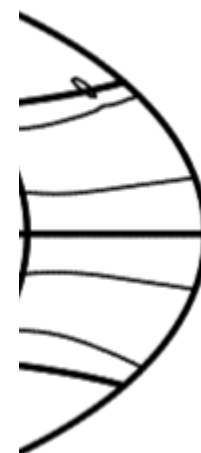
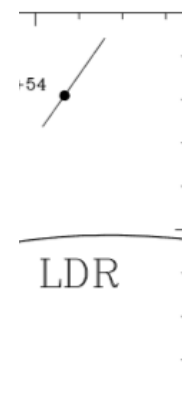
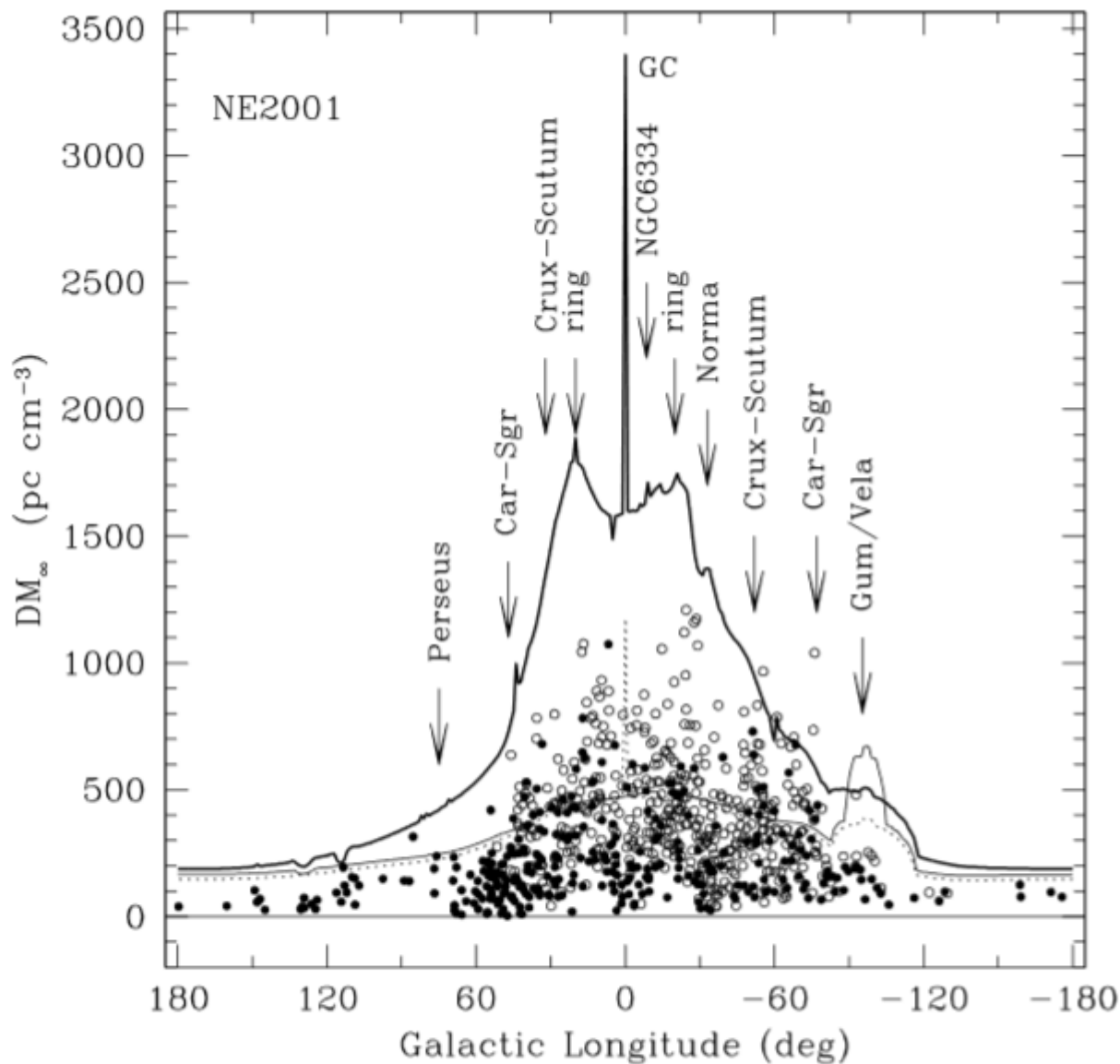
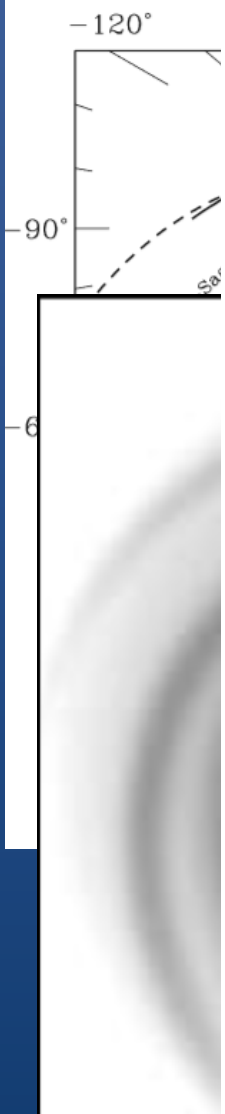
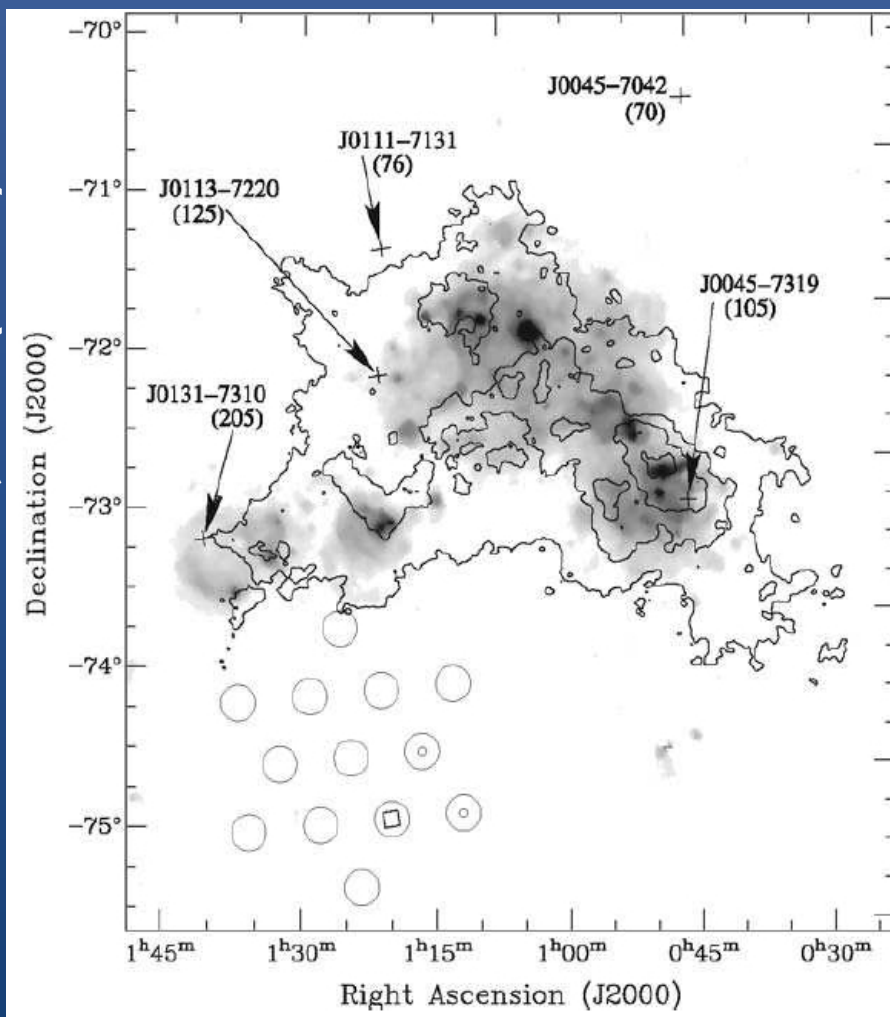


FIG. 11.— Plot of $DM_\infty(\ell, b)$, the maximum DM obtained by integrating the NE2001 model. Heavy solid line: $b = 0^\circ$.

Первый всплеск



Открыт в Парксе
Дунканом Лоримером и др.

~30-40 Ян, < 5 мсек.

3 градуса от Малого
Магелланового Облака



$$\mathcal{L} = 1.3 \times 10^{41} \text{ erg/s} \left(\frac{S_\nu}{1 \text{ Jy}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{1.4 \text{ GHz}} \right) \left(\frac{\Omega}{1 \text{ sr}} \right) \left(\frac{D}{1 \text{ Gpc}} \right)^2.$$

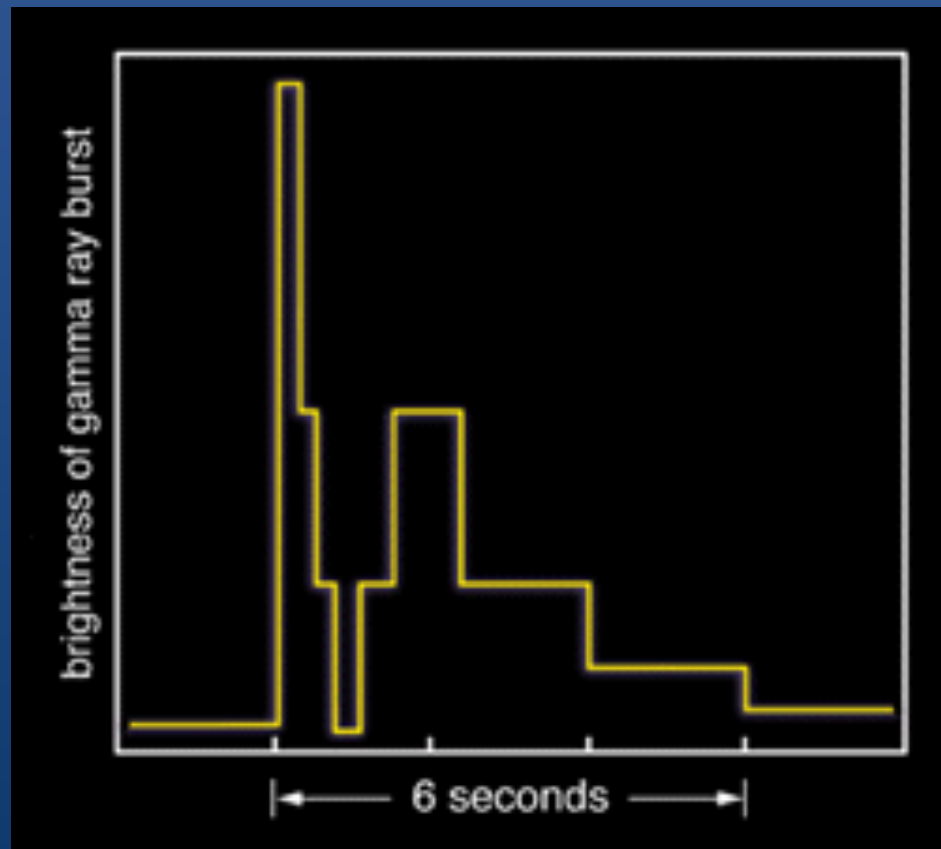
История повторяется? GRB2.0?

<http://www.lanl.gov/about/history-innovation/innovation-timeline.php>



Только в конце 90-х гг. удалось одновременно увидеть всплески и в рентгеновском диапазоне. Это позволило наконец-то идентифицировать их.

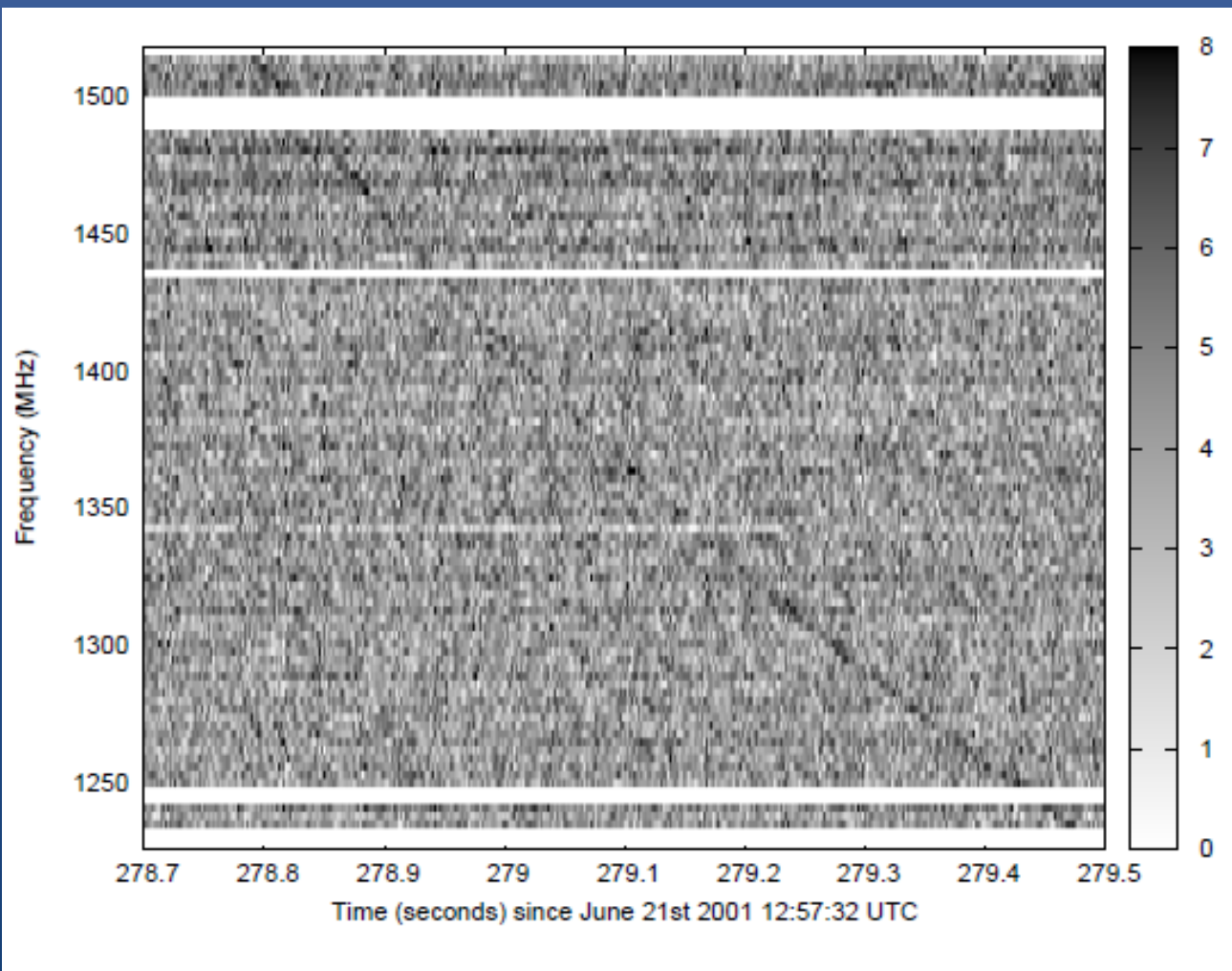
В конце 60 гг. были открыты космические гамма-всплески. 30 лет они оставались загадкой, т.к. в направлении всплеска не удавалось увидеть сигнал в другом спектральном диапазоне.



<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/epo/vu/overview/bursts/firstbst/firstbst.html>

Второй случай?

1206.4135



В плоскости
Галактики.

Гипотеза:
испарение
черной дыры!

Радиовсплески
от испаряющихся
черных дыр
были предсказаны
уже давно.
Более того,
одной из мотиваций
ученого, создавшего
ключевую технологию
Wi-Fi, было открыть
в радио такие вспышки

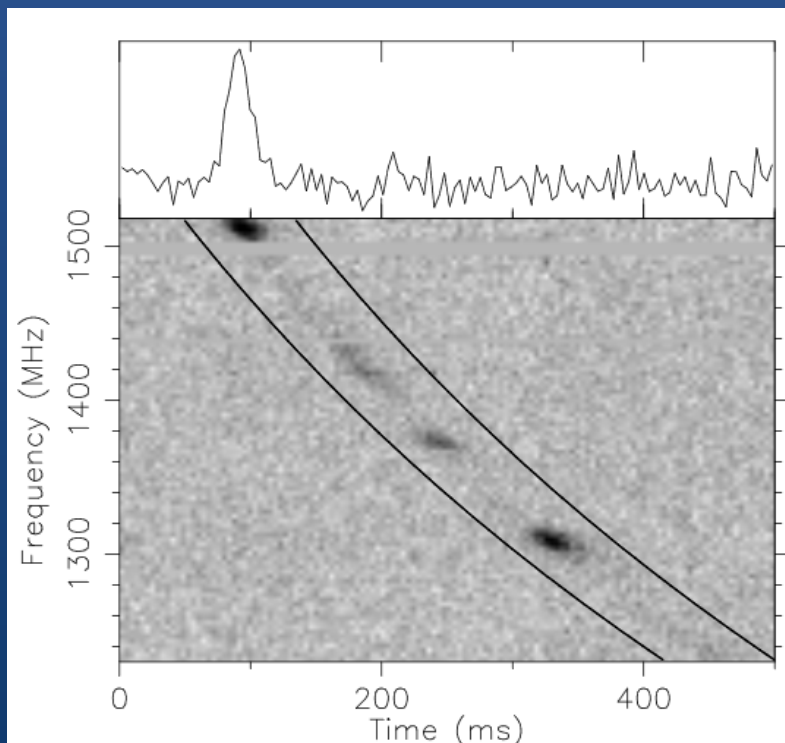
Т.к. всплеск отличался от лоримеровского, то ясности
в ситуацию с быстрыми радиовсплесками это не внесло.

Perytons

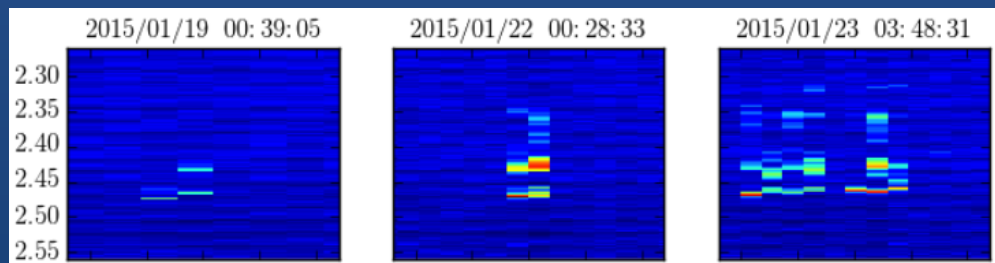
Перитоны начали активно обсуждать несколько лет назад. Их свойства сразу говорили о том, что это должны быть всплески где-то вблизи (максимум – земная атмосфера).

Однако по некоторым параметрам они похожи на БРВ.

Появлялись они только в рабочие часы или по выходным, что указывало на искусственное происхождение.



Всего на 2015 год было зарегистрировано около полусотни таких событий. Все на телескопе Parkes.



Решение проблемы перитонов оказалось довольно неожиданным. Здесь помогла установка новой Системы мониторинга помех.

Сомнения

Открытие перитонов заставило усомниться в реальности события Лоримера.

Быстрые радиовсплески открывались только по архивным данным.

Поиск в разных архивах в течение нескольких лет не давал результатов – новых примеров быстрых радиовсплесков не было.

Даже теоретики притихли



Миллисекундные радиовсплески

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

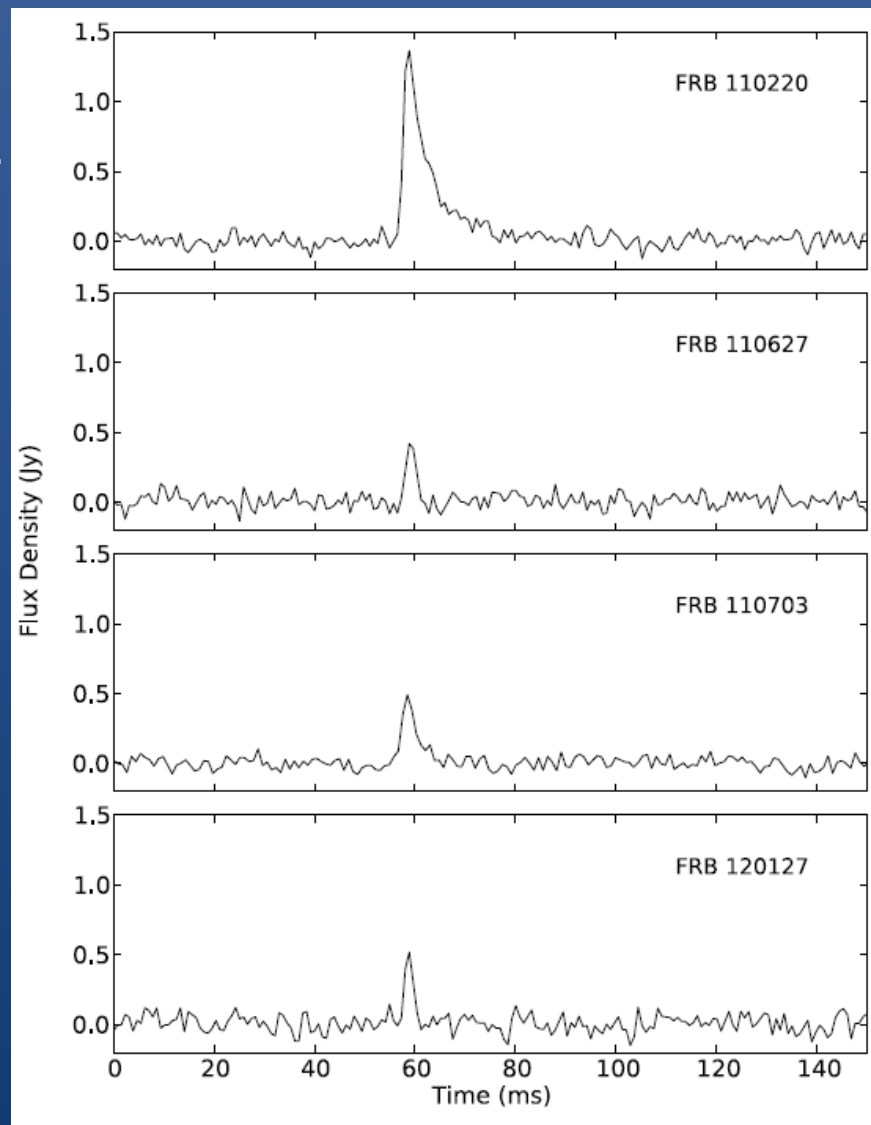
В 2013 – сомнения долой! Еще четыре!

Темп ~ неск. тысяч в день на всем небе.

Это явно новый класс событий,
происхождение которых неизвестно:

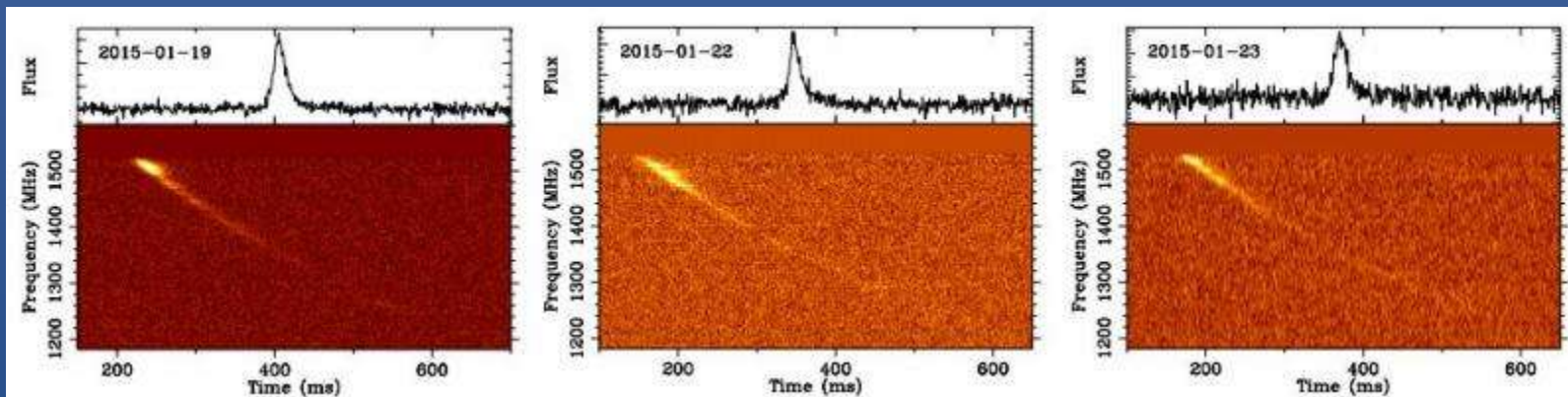
- магнитары
- гамма-всплески
- слияния нейтронных звезд
- сверхновые
- слияния белых карликов
- массивные нейтронные звезды
- вспышки на обычных звездах (?)

Появилось устоявшееся название
Fast Radio Bursts



Перитоны – микроволновки!

1504.02165



Dr. Emily Petroff

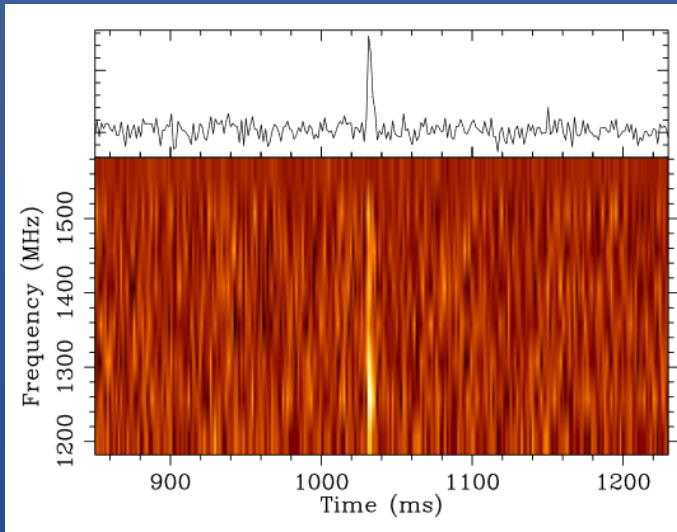


Dr. Sarah Burke-Spolaor

Исследование показало, что перитоны возникают при преждевременном открытии дверцы микроволновки, если телескоп находится в некотором особом положении. Идентификация источника этих помех сделала еще более надежным представление о том, что сами быстрые радиовсплески – это реальный астрономический феномен.

Первый всплеск в реальном времени

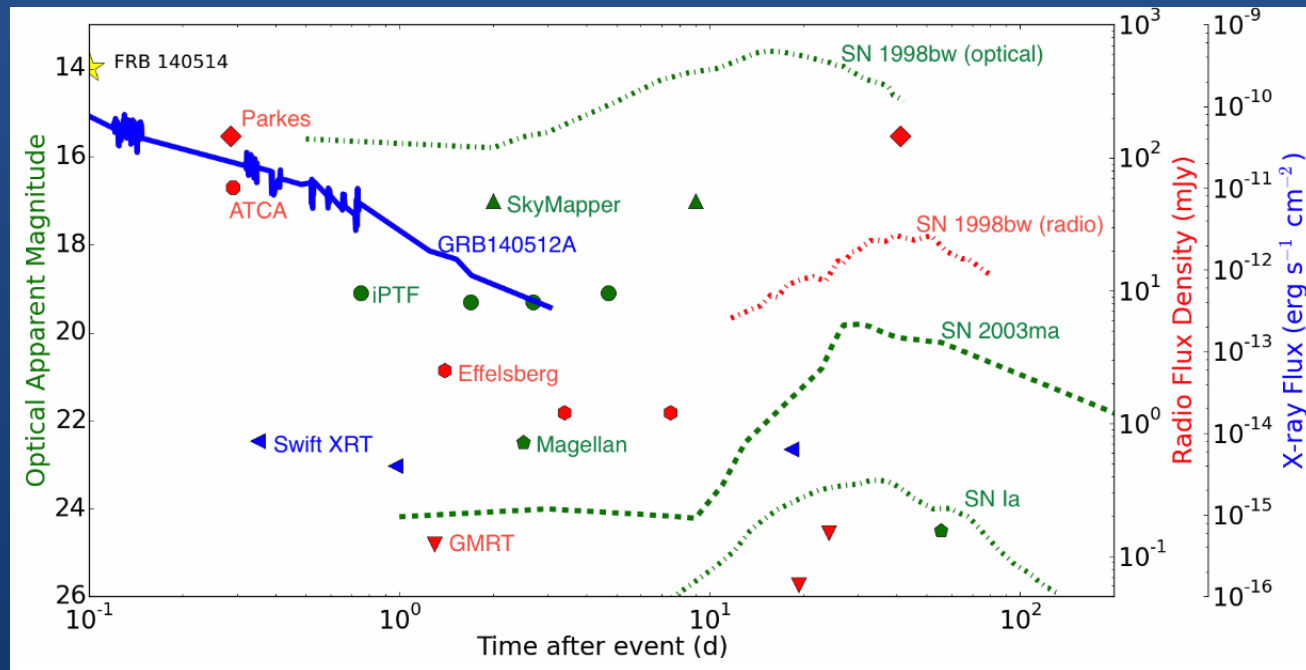
1412.0342



В мае 2014 года впервые удалось увидеть быстрый радиовсплеск в реальном времени. Т.е., он был обнаружен непосредственно при наблюдениях, а не найден в архиве.

Это позволило запустить программу наблюдений в других диапазонах спектра. К сожалению, ничего не было найдено.

Отсутствие данные в других диапазонах закрывает модель с близкой сверхновой и с длинным гамма-всплеском.



Спектры



- ★ Upper limit of 48 events at 440 Jy ms at 1.4 GHz scaled to 11 Jy ms (Siemion et al. 2012)
- Rate of 10^4 events at ~ 3 Jy ms at 1.4 GHz scaled to 11 Jy ms (Thornton et al. 2013)
- Lower limit of 10^4 events above 0.6 Jy ms at 1.4 GHz scaled to 11 Jy ms (Thornton et al. 2013)
- Upper limit of 150 events at 71 Jy ms at 140 MHz scaled to 11 Jy ms (Coenen et al. 2014)
- Upper limit of 29 events at 310 Jy ms at 145 MHz scaled to 11 Jy ms (Karastergiou et al. 2015)
- Rate of 2500 events above 2 Jy ms at 1.4 GHz scaled to 11 Jy ms (Keane & Petroff. 2015)
- ◆ Upper limit of 7×10^4 events at 0.9 Jy ms at 1.4 GHz scaled to 11 Jy ms (Law et al. 2015)
- ▼ Rate of 5000 events above 1 Jy ms at 800 MHz scaled to 11 Jy ms (Masui et al. 2015)
- Upper limit of 700 events at 700 Jy ms at 150 MHz scaled to 11 Jy ms (Tingay et al. 2015)
- ▲ Upper limit of 10^3 events at 11 Jy ms at 843 MHz (This work)

Практически все всплески были открыты на Парксе.

На Аресибо БРВ также видели на частоте 1.4 ГГц.

Только ГБТ видел один всплеск на частоте ~ 800 МГц.

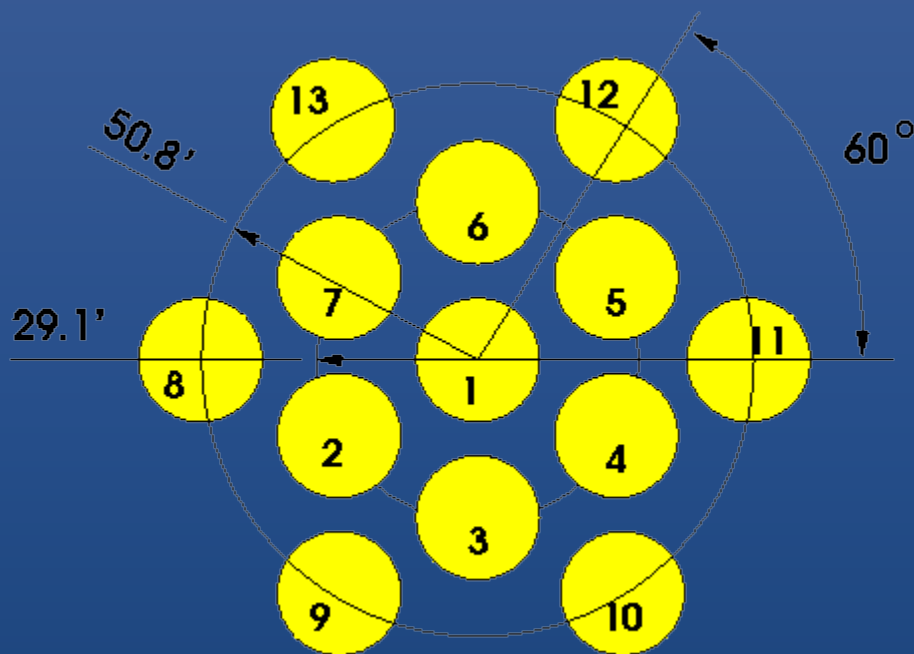
На других частотах данных нет.

Данных из других диапазонов спектра тоже нет.

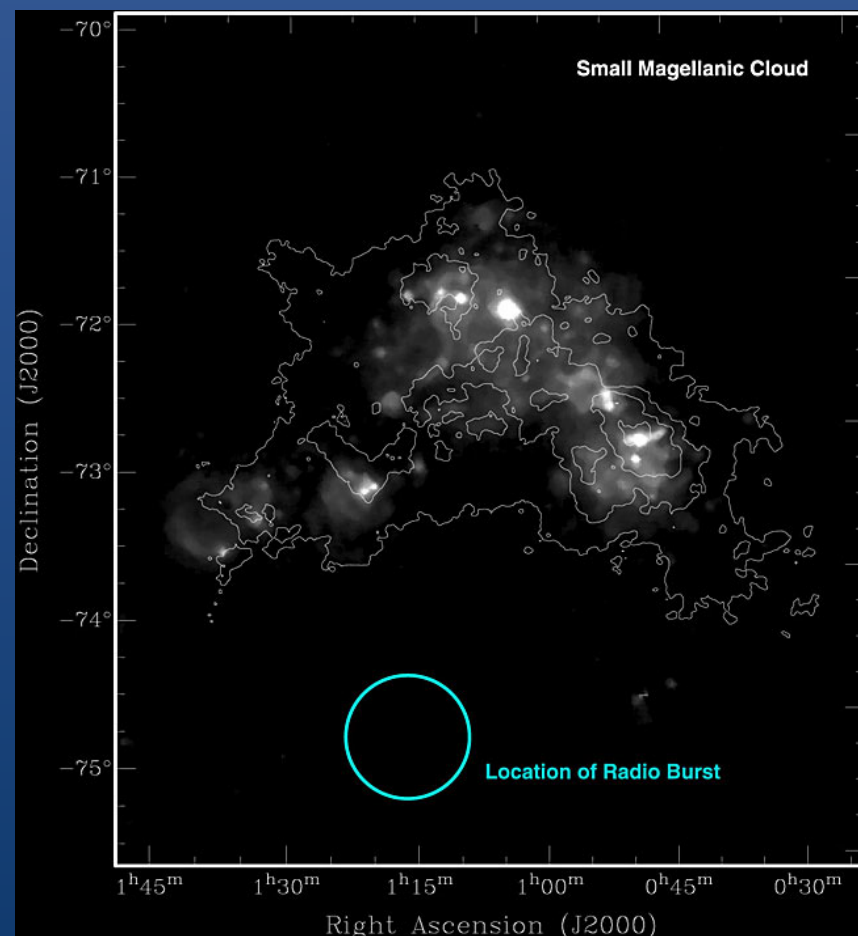
Поэтому спектр известен плохо.

Локализация

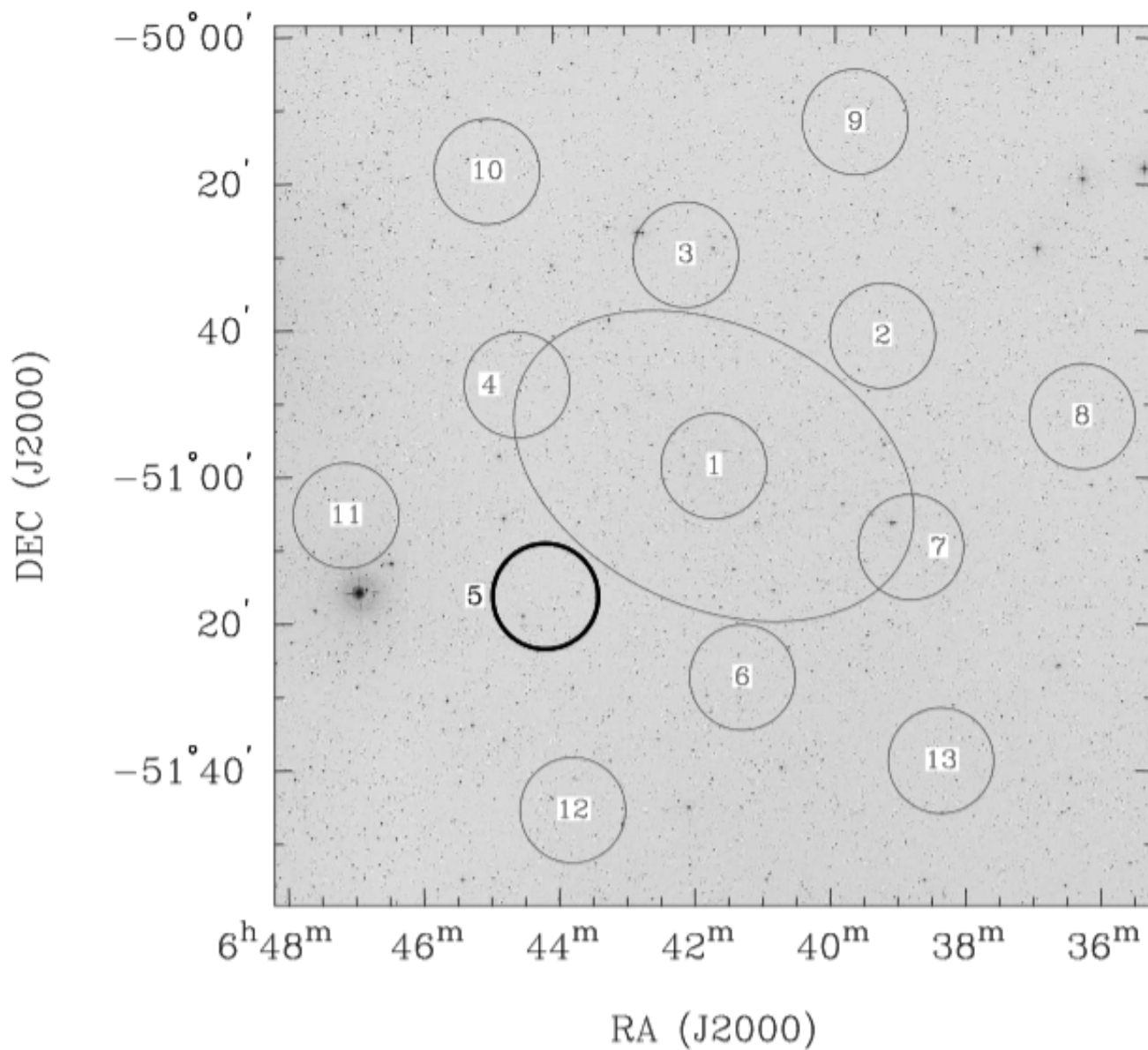
Радиус области неопределенности ~ 10 угловых минут



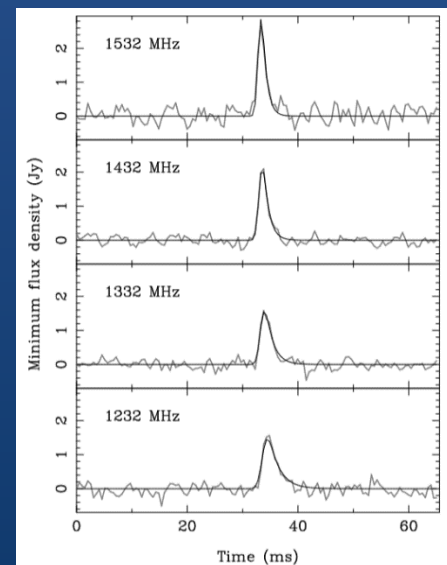
Обычно БРВ виден только в одном биме.



Близкая карликовая галактика?



В одном случае БРВ
наблюдался вблизи
карликовой
галактики.
Но это, скорее всего,
случайность.

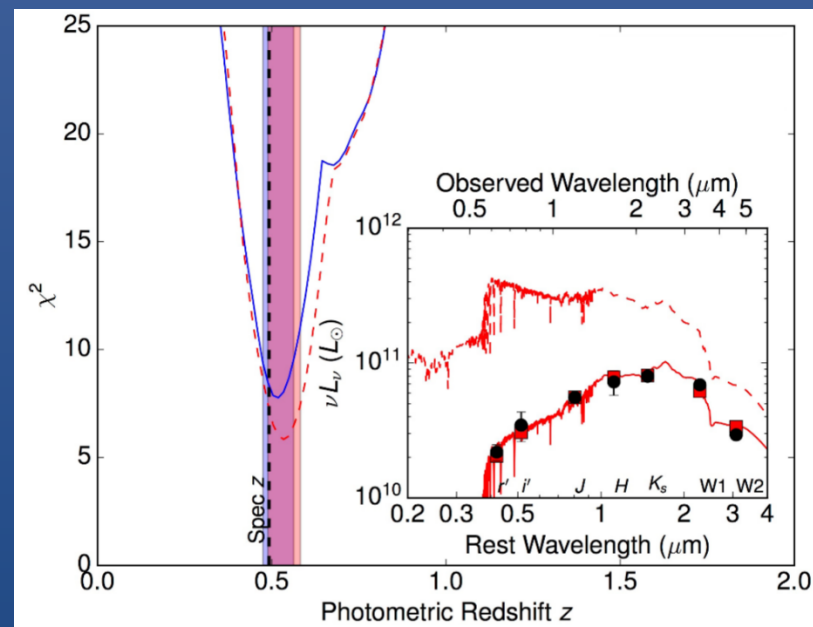
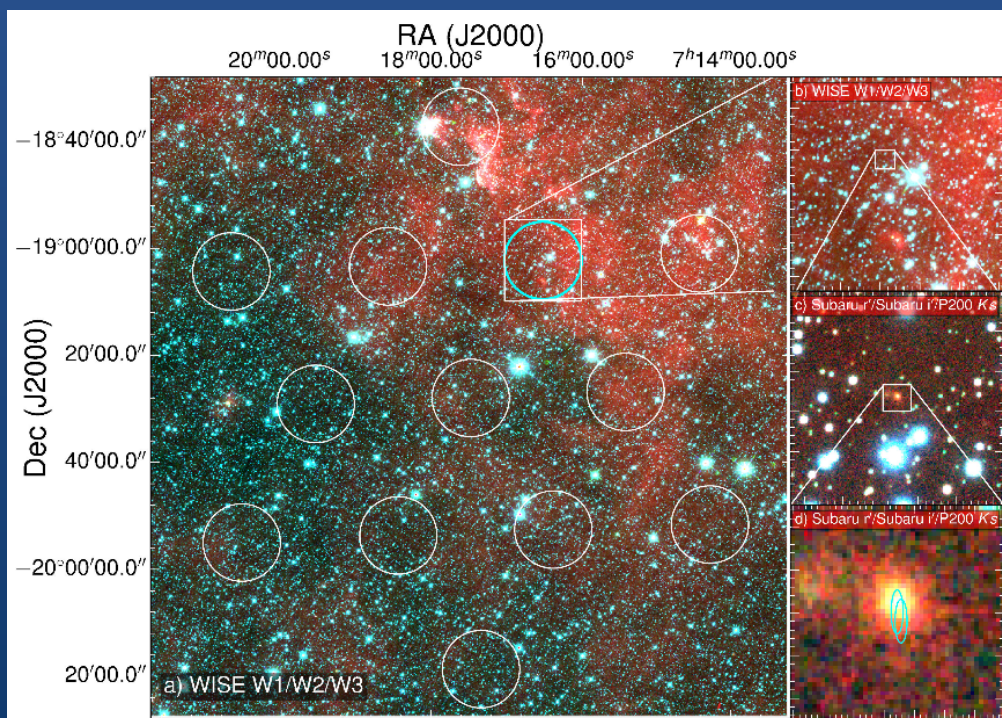


Короткий всплеск и галактика

$z=0.5$

Слабый спадающий радиотранзистент
на масштабе ~ 6 дней

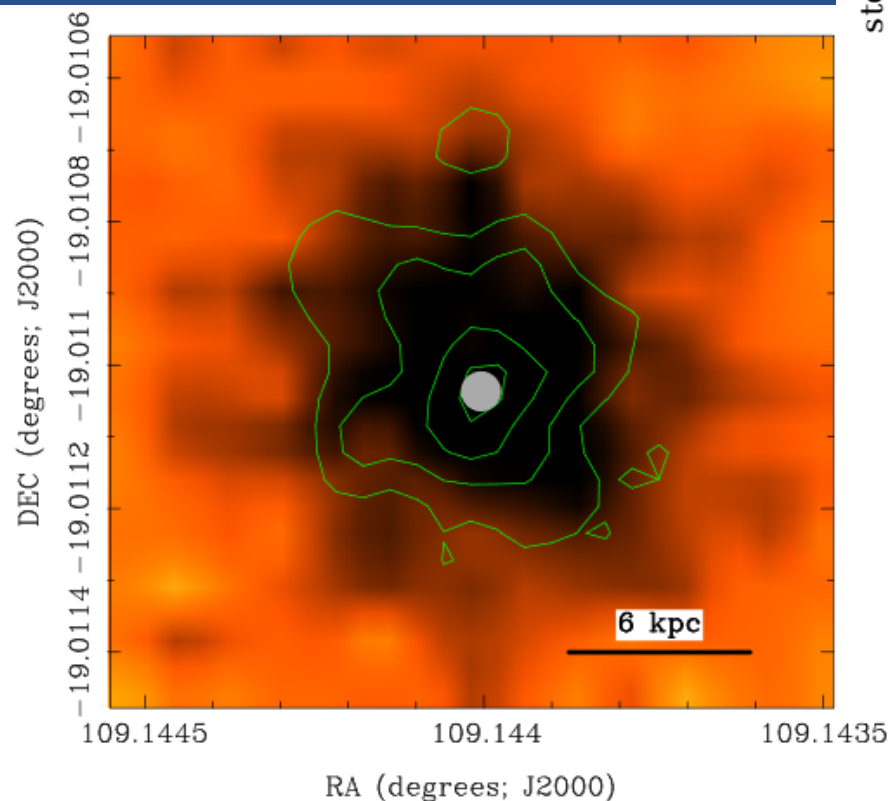
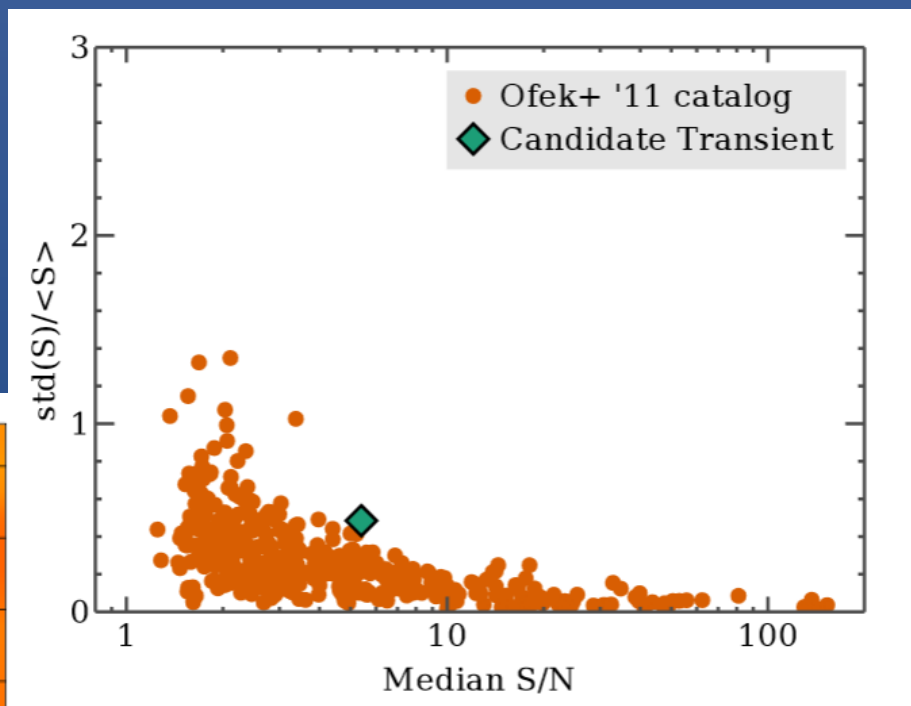
FRB 150418



Лучше всего подходит
модель слияния НЗ.
Два типа всплесков?

Критика результата Keane et al.

Возможно, что совпадение радиовсплеска с медленным транзиентом случайно. А сам медленный транзиент является проявлением активности АГЯ.



Новые данные подтверждают, что послесвечение совпадает с активным ядром галактики. Кроме того, возможная доля всплесков с послесвечениями не может быть более 0.25.

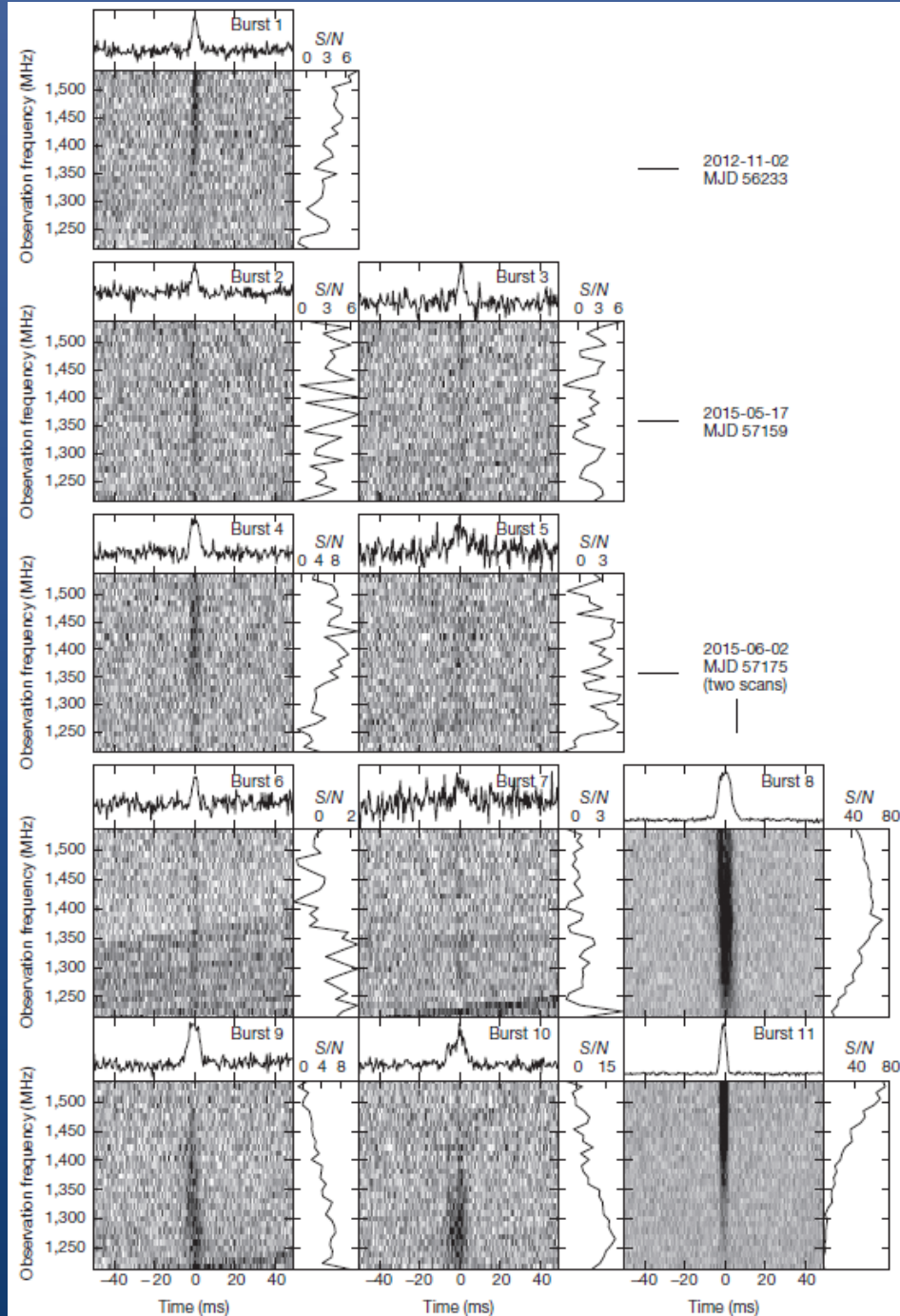
См. однако 1603.04825.

Повторные всплески

Впервые удалось увидеть
повторные всплески от FRB 121102.

10 событий.
Темп ~ 3/час

1603.00581



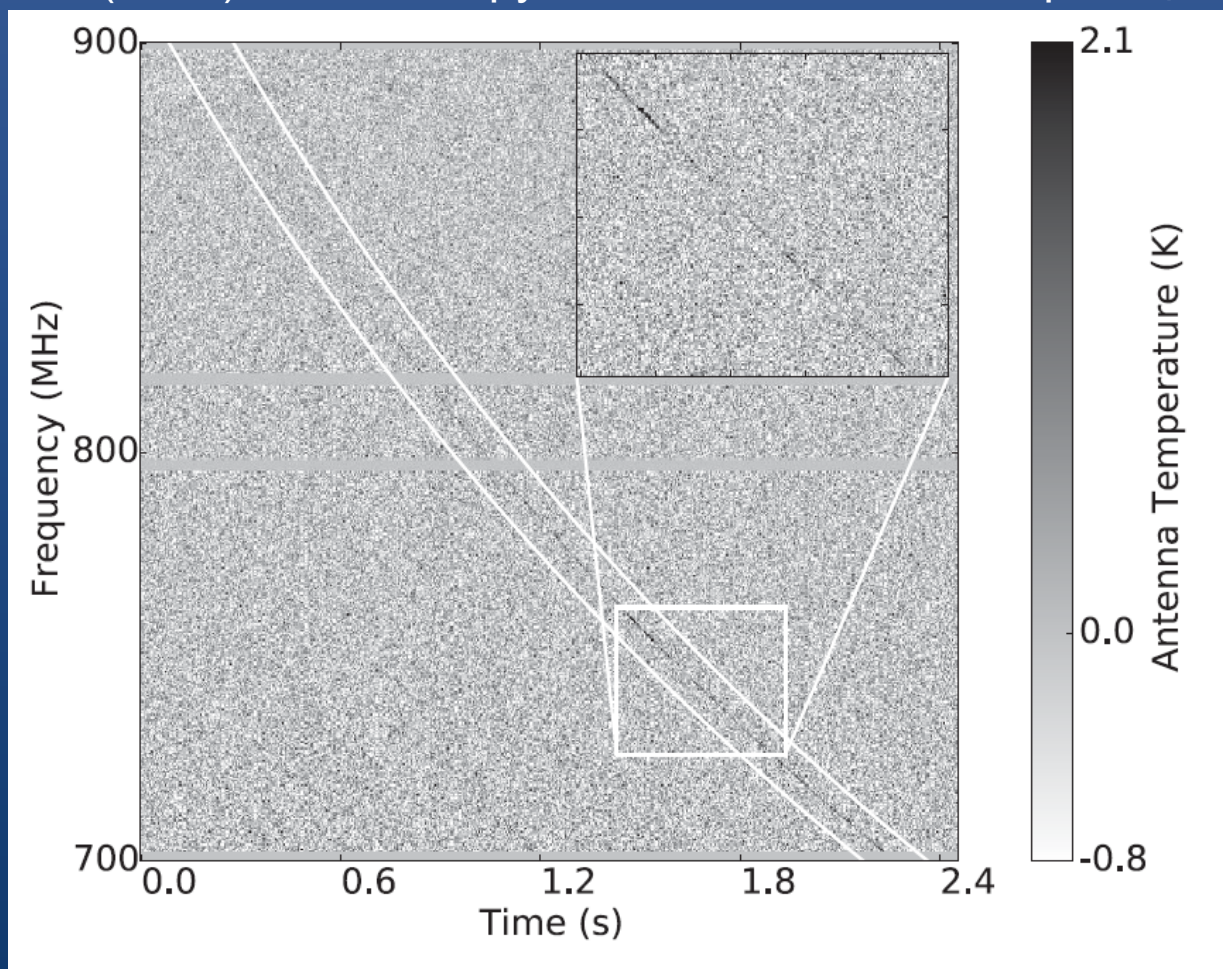
Наблюдение поляризации

В работе Petroff et al. (1412.0342) была обнаружена круговая поляризация источника FRB 140514 на уровне около 20%.

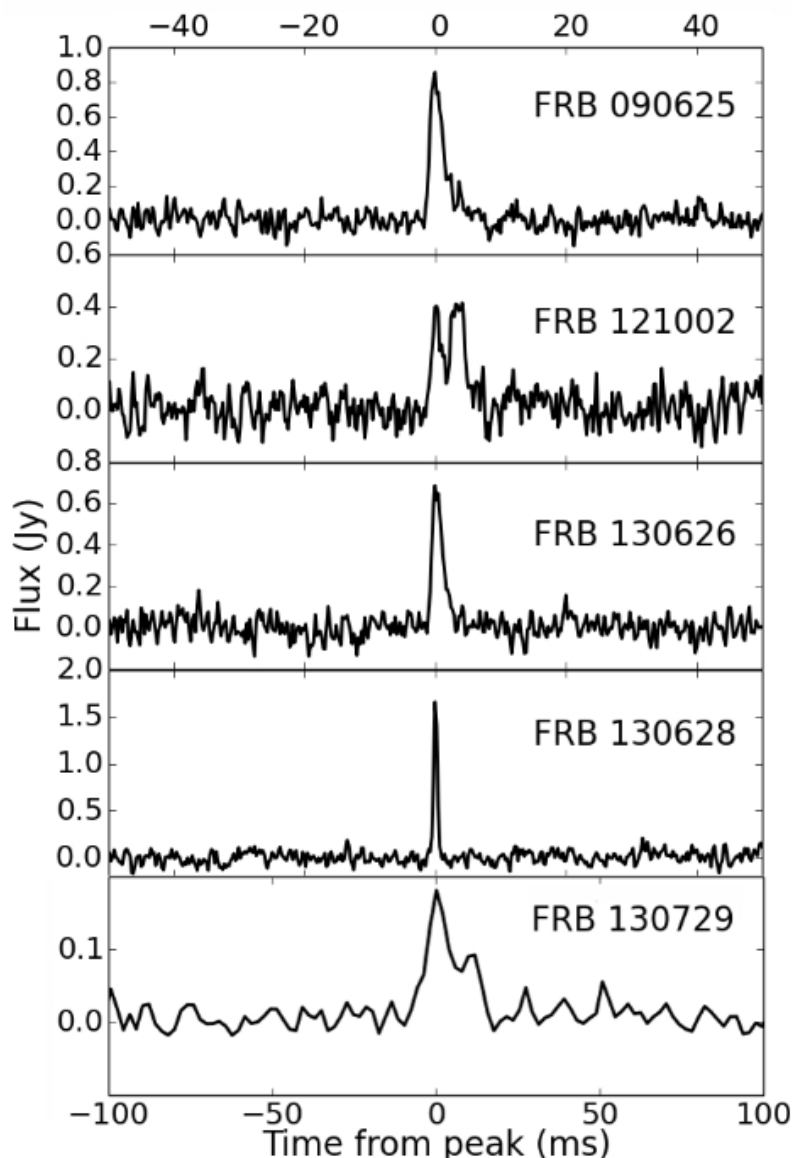
Затем в работе Masui et al. (2015) была обнаружена и линейная поляризация всплеска FRB 110523.

Эти данные неплохо укладываются в модели, в которых вспыхивает нейтронная звезда в остатке сверхновой и/или плотной пульсарной туманности.

Это модели со сверхгигантскими импульсами молодых радиопульсаров и модели с магнитарами.



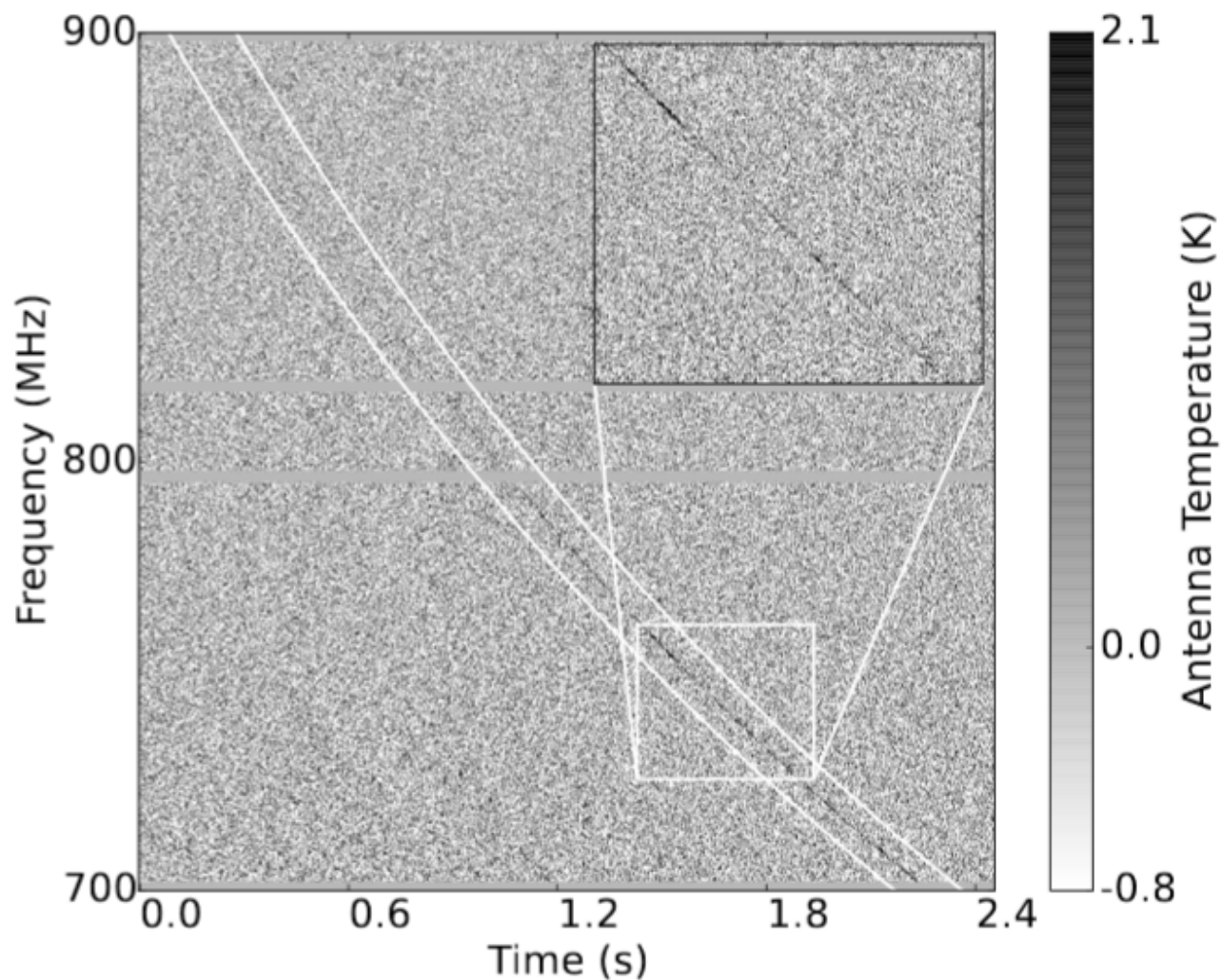
Сдвоенные всплески



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

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

Фарадеевское вращение



0.38 микрогаусс

Вблизи источника должно быть
довольно плотное вещество с магнитным полем.

1512.00529

Данные по известным всплескам

1511.02870

	Distance (Gpc)	S_ν (Jy)	$\mathcal{L}_{\text{radio}}$ (erg/s)	Ref
FRB 010724	1.0	30	5.03×10^{43}	Lorimer et al. (2007)
FRB 110220	2.8	1.3	1.71×10^{43}	Thornton et al. (2013)
FRB 110703	3.2	0.5	8.58×10^{42}	Thornton et al. (2013)
FRB 131104	1.0	2.0	3.35×10^{42}	Ravi et al. (2015)
FRB 110627	2.2	0.4	3.24×10^{42}	Thornton et al. (2013)
FRB 120127	1.7	0.5	2.42×10^{42}	Thornton et al. (2013)
FRB 140514	1.7	0.47	2.28×10^{42}	Petroff et al. (2015)
FRB 011025	2.1	0.3	2.22×10^{42}	Burke-Spolaor & Bannister (2014)
FRB 121102	1.0	0.4	6.70×10^{41}	Spitler et al. (2014)
FRB 010621	0.7	0.4	3.28×10^{41}	Keane et al. (2012)

1412.4829

FRB	ℓ ($^\circ$)	b ($^\circ$)	DM_{obs} (pc cm^{-3})	Peak flux (Jy)	Fluence (Jy ms)	Freq. (GHz)	Ref.	DM_{ISM} (pc cm^{-3})	DM_{halo} (pc cm^{-3})	$\text{DM}_{\text{local sim}}$ (pc cm^{-3})	DM_{cosmo} (pc cm^{-3})
010125 ¹	356.6	-20.0	790 ± 3	$1.10^{+0.22}_{-0.16}$	$11.2^{+6.0}_{-4.0}$	1.4	1,2	110	30	13	650
010621	25.4	-4.0	746 ± 1	$1.04^{+0.26}_{-0.22}$	$8.6^{+7.2}_{-3.8}$	1.4	3,2	537	—	—	—
010724	300.8	-41.9	375 ± 1	> 3.16	> 63.0	1.4	4,2	44	30	20	301
110220	50.8	-54.7	944.38 ± 0.05	$2.22^{+2.24}_{-0.20}$	$14.6^{+4.8}_{-3.4}$	1.3	5,2	35	30	5	879
110626	355.8	-41.7	723.0 ± 0.3	$1.26^{+0.40}_{-0.26}$	$1.8^{+2.6}_{-0.4}$	1.3	5,2	47	30	10	646
110703	81.0	-59.0	1103.6 ± 0.7	$0.9^{+0.42}_{-0.20}$	$3.6^{+4.6}_{-2.2}$	1.3	5,2	33	30	14	1041
120127	49.2	-66.2	553.3 ± 0.3	$1.24^{+0.26}_{-0.20}$	$1.6^{+1.2}_{-0.6}$	1.3	5,2	32	30	9	491
121102	175.0	-0.2	557 ± 2	$0.8^{+0.8}_{-0.2}$	$2.4^{+8.0}_{-2.0}$	1.4	6,2	192	30	10	335
131104	260.6	-21.9	$778.5^{+0.2}_{-0.3}$	$2.2^{+0.1}_{-0.2}$	$1.9^{+0.08}_{-0.18}$	1.4	7	71	30	10	678
140514	50.8	-54.6	562.7 ± 0.6	$0.94^{+0.22}_{-0.16}$	$2.6^{+4.6}_{-1.0}$	1.4	8,2	35	30	5	498

См. также список в 1508.04884 + новые в 1511.07746

Таблица известных на данный момент всплесков

	Catalogue venus.fandm	Petroff et al. 1508.04884	Dolag et al. 1412.4829
010125	*		*
010621	*		*
010724	*		*
090625		*	
110220	*	*	*
110523	Masui et al.		
110627	*	*	*
110703	*	*	*
120127	*	*	*
121002		* (+L)	
121102	*		*
130626		*	
130628		*	
130729		1511.07746	
131104	*		*
140514	*	*	*

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 Emily Petroff and Evan Keane 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., in prep.) and provide the url (<http://www.astronomy.swin.edu.au/pulsar/frbcatalog/>).

Catalogue Version 1.0

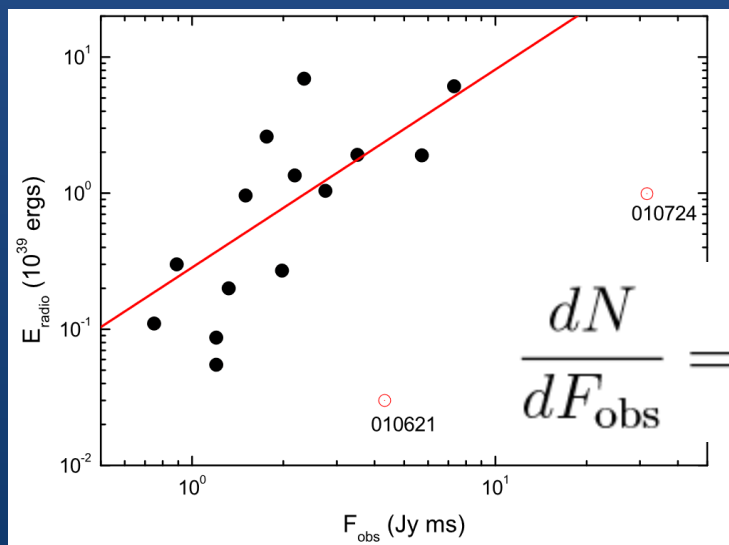
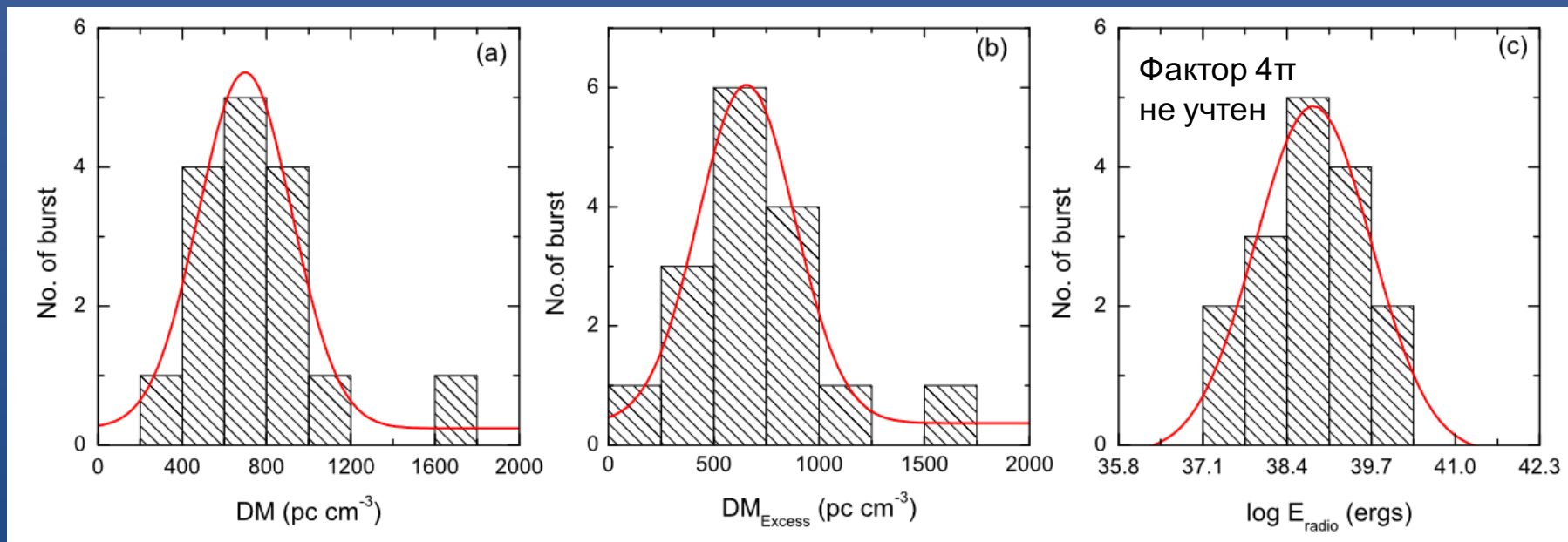
Event	Telescope	gl [deg]	gb [deg]	FWHM [deg]	DM [cm ⁻³ pc]	S/N	W _{obs} [ms]	S _{peak,obs} [Jy]	F _{obs} [Jy ms]	Ref
FRB010125	parkes	356.641	-20.020	0.25	790(3)	17	9.40 ^{+0.20} _{-0.20}	0.30	2.82	1
FRB010621	parkes	25.433	-4.003	0.25	748(3)	18	8.00 ^{+4.00} _{-2.25}	0.53 ^{+0.26} _{-0.09}	4.24 ^{+5.24} _{-1.71}	2
FRB010724	parkes	300.653	-41.805	0.25	375(3)	100	20.00 ^{+0.00} _{-0.00}	1.57 ^{+0.00} _{-0.00}	31.48	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	260.465	-21.838	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

The full catalogue can be viewed in [tabular format](#) or downloaded as either [CSV](#) or [Tab](#) delimited text files.

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

Статистические свойства всплесков

1602.06099



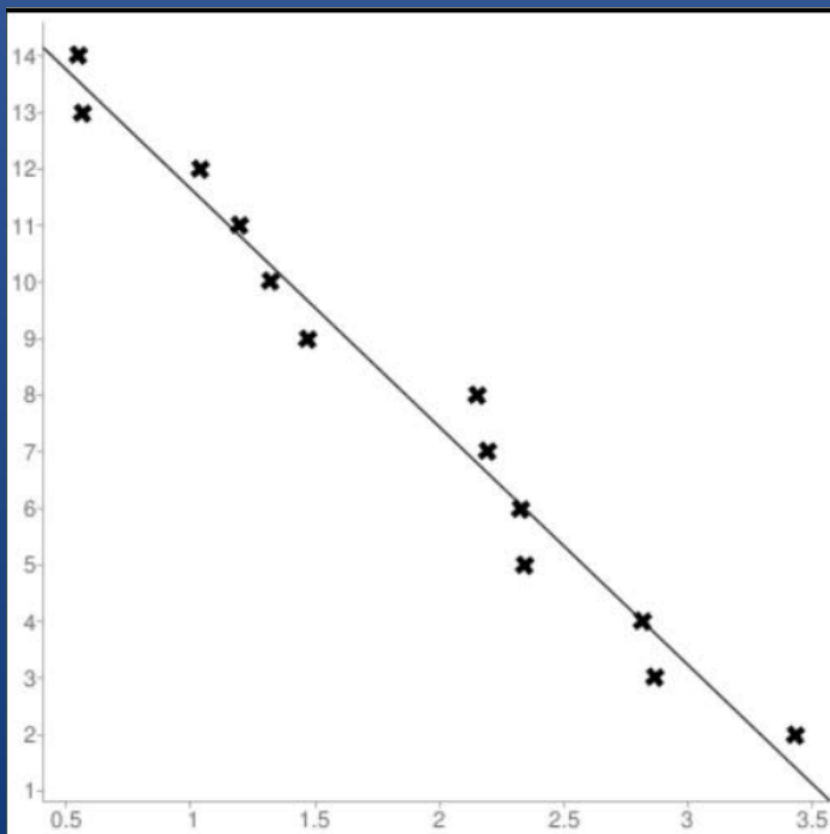
Пока всплесков мало, но уже пытаются изучить их статистические свойства. Самый первый – лоримеровский всплеск, - слегка выпадает из многих распределений.

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

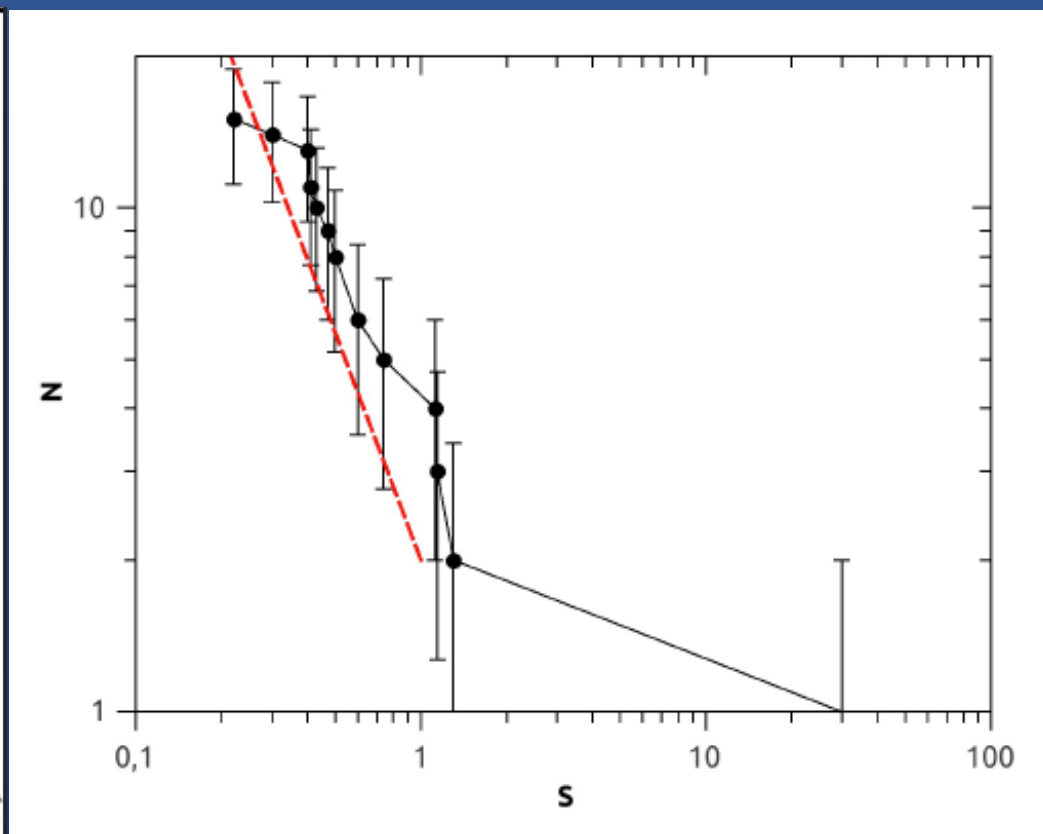
Флюэнс и пиковая светимость

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

arXiv:1603.02891



Флюэнс (без двух самых ярких)



Пиковая светимость

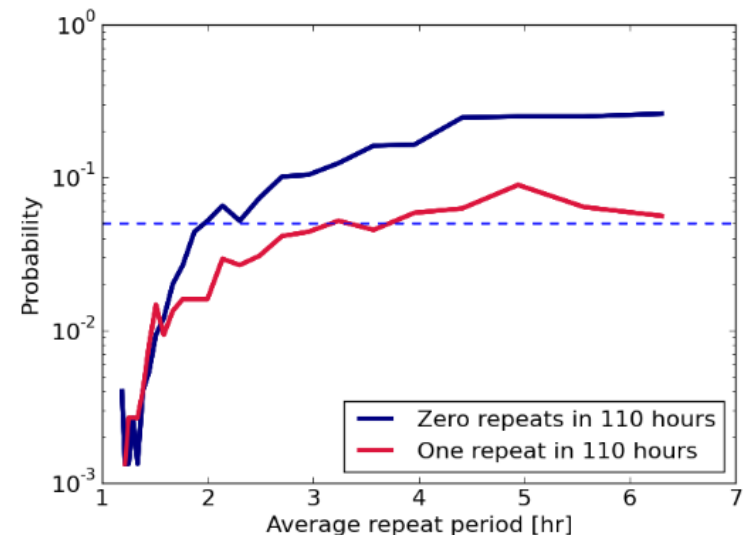
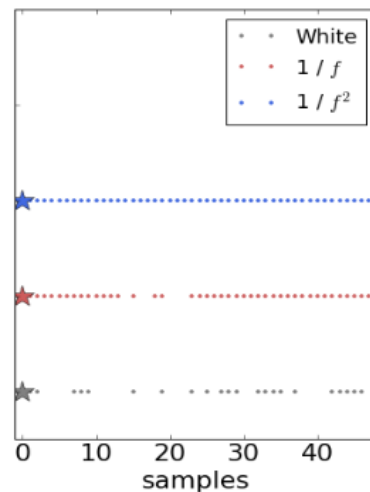
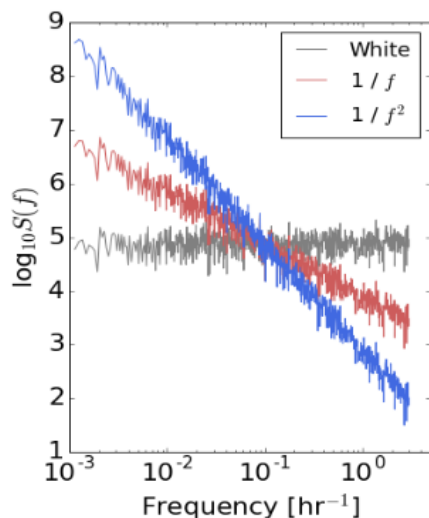
Темп и повторы

Темп всплесков составляет несколько тысяч событий в день. Это верно и для частоты ~ 1.4 GHz, и для ~ 700 -900 MHz (1602.07292).

Пока есть только слухи о повторных всплесках. Такие данные поставят катастрофические модели в очень сложную ситуацию.

Разные авторы пытаются посчитать вероятность повторов в разных моделях, а также определить лучшую стратегию поиска всплесков.

Получается, что в ряде моделей лучше всего искать в областях, где уже были обнаружены всплески.



Гипотезы, гипотезы ...

Сейчас известно более 15 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 $v=(2GM/R)^{1/2} \sim 0.5 c$

Время падения $t=R/v < 0.1 \text{ msec}$

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.



<http://bestiary.ca/>

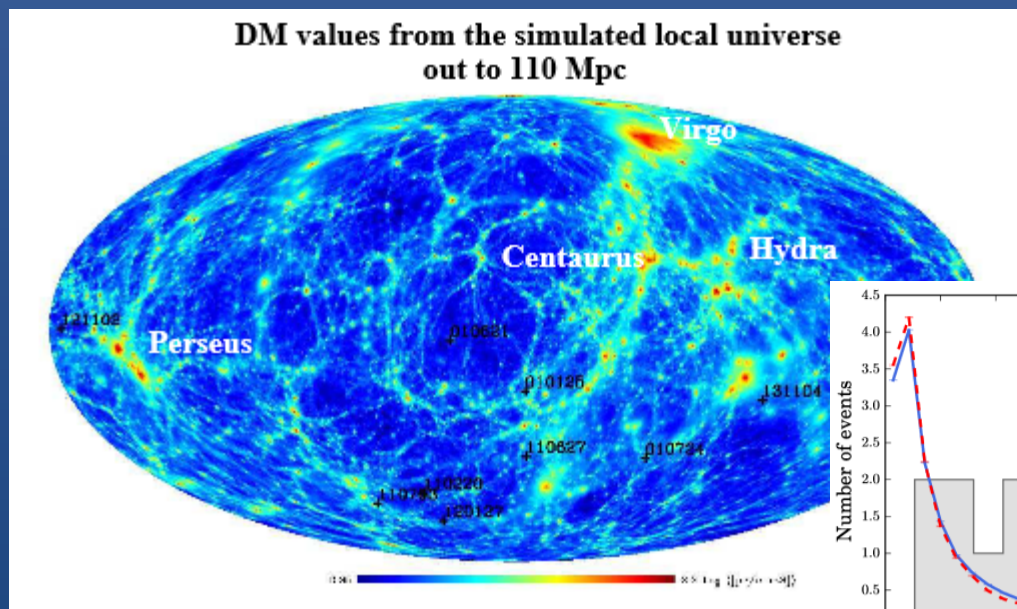
Кроме того, у нейтронных звезд есть сильное магнитное поле, и они известны как вспыхивающие радиоисточники.

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



FRB и КОСМОЛОГИЯ

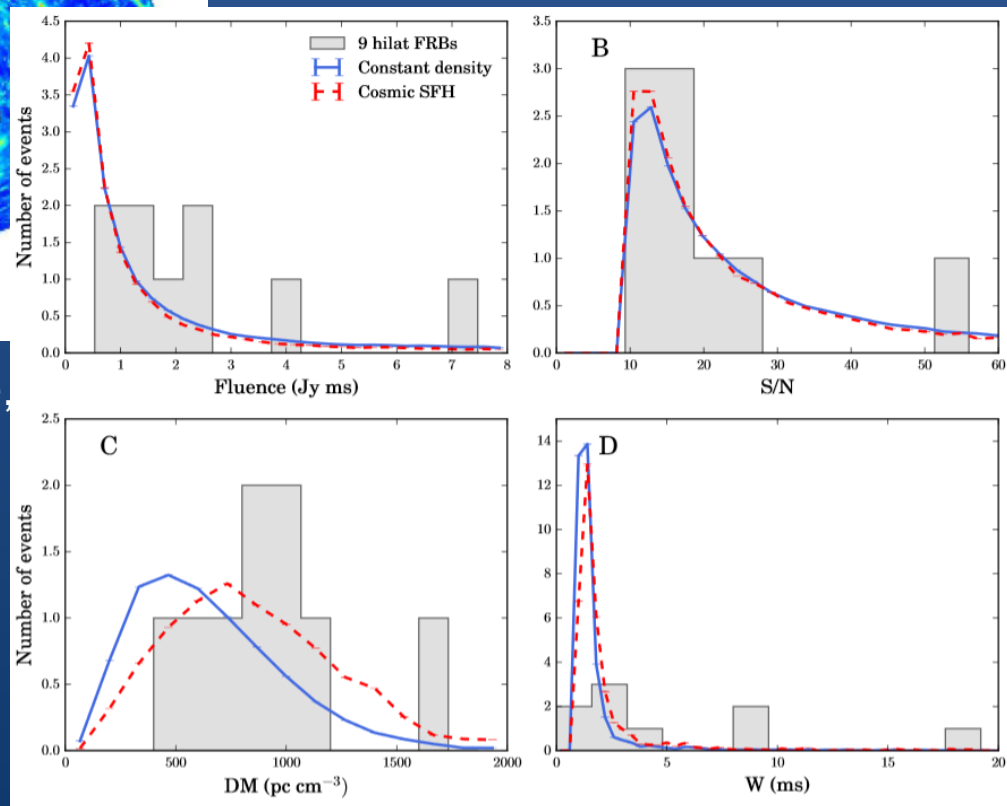
Если быстрые радиовсплески приходят с космологических расстояний, то их можно использовать в космологических целях. Как зонды.



1512.02738

Пока же проводится моделирование, и результаты говорят о том, что всплески хорошо укладываются в космологическую картину.

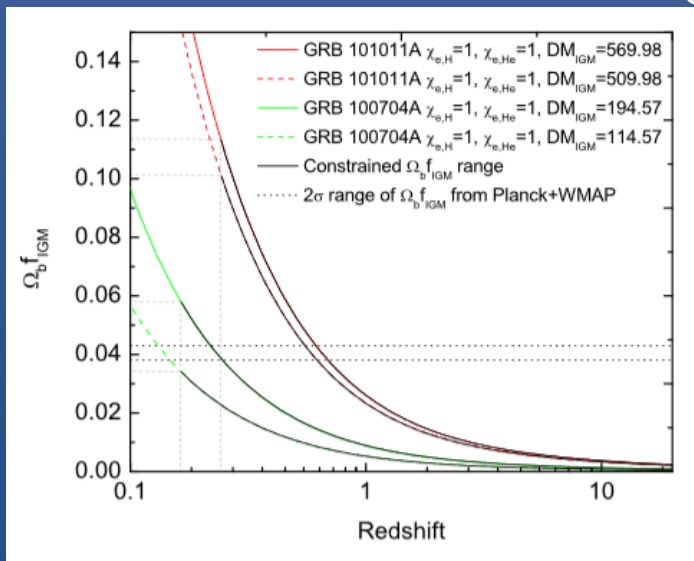
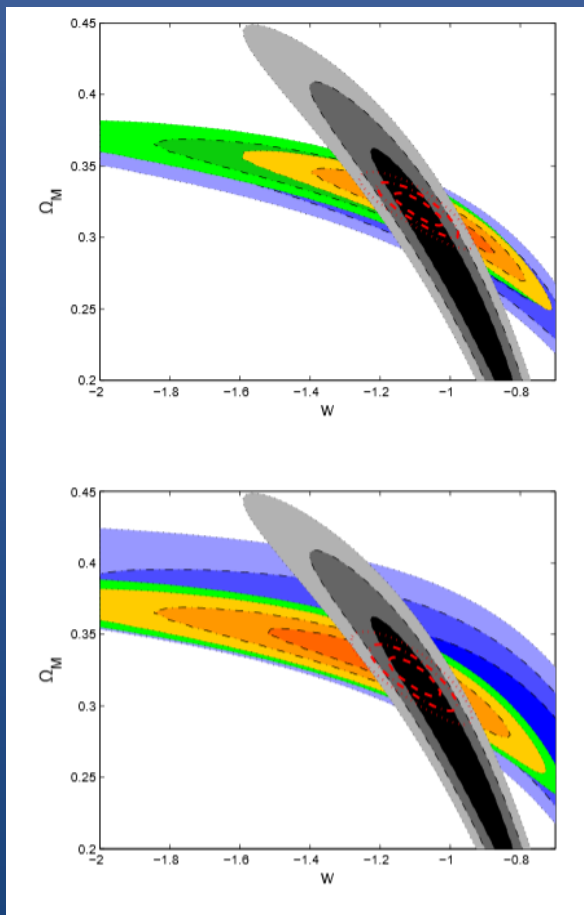
Надо больше источников!



Космологические зонды

Надо много всплесков,
и надо, чтобы они
совпадали с гамма
или еще с чем-то.

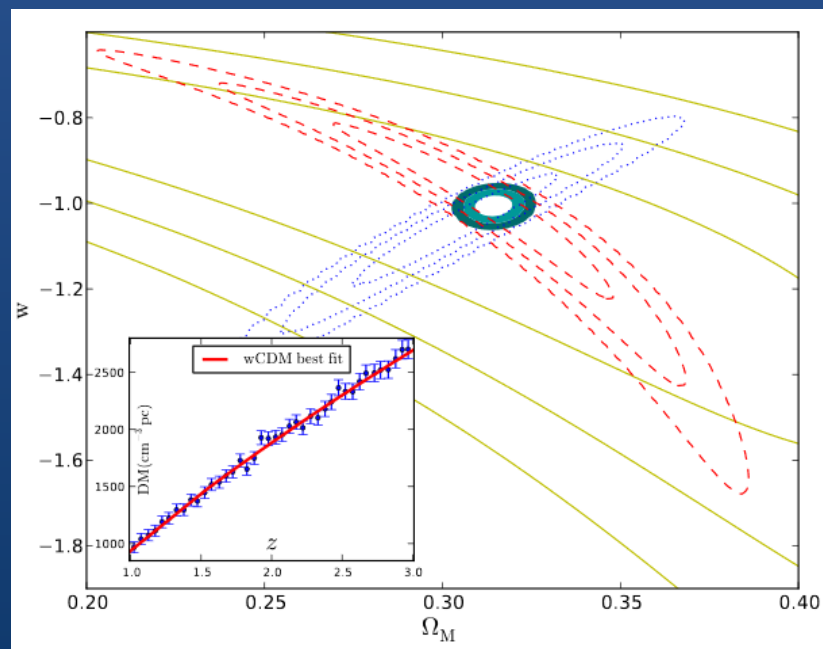
1402.2498



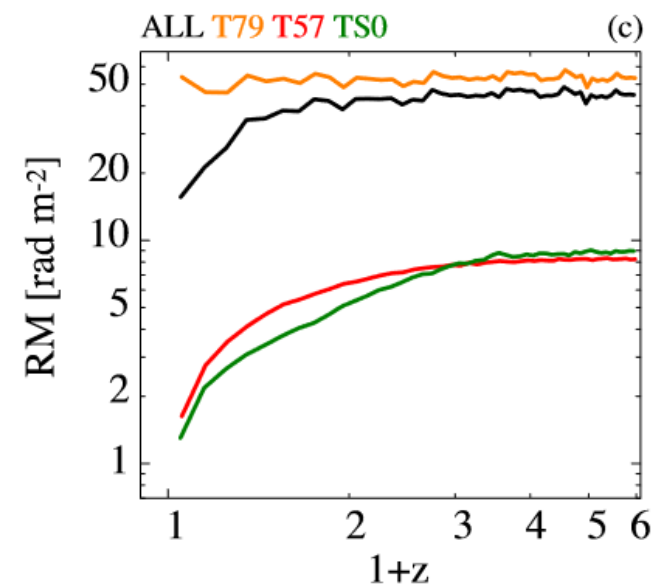
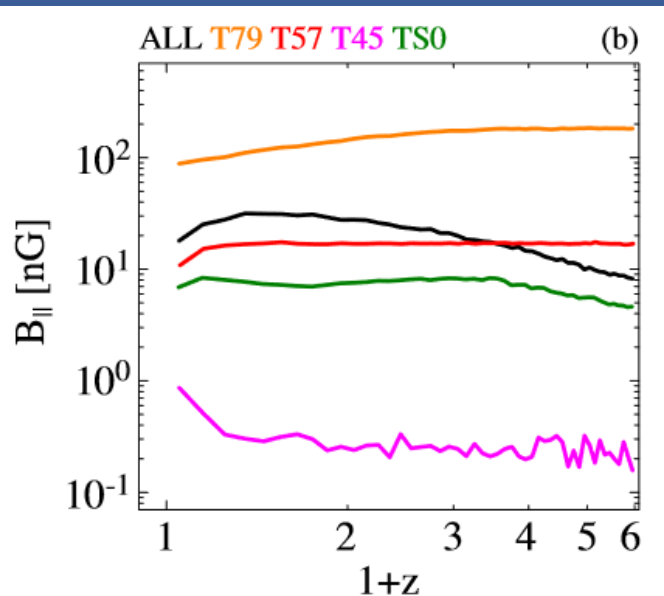
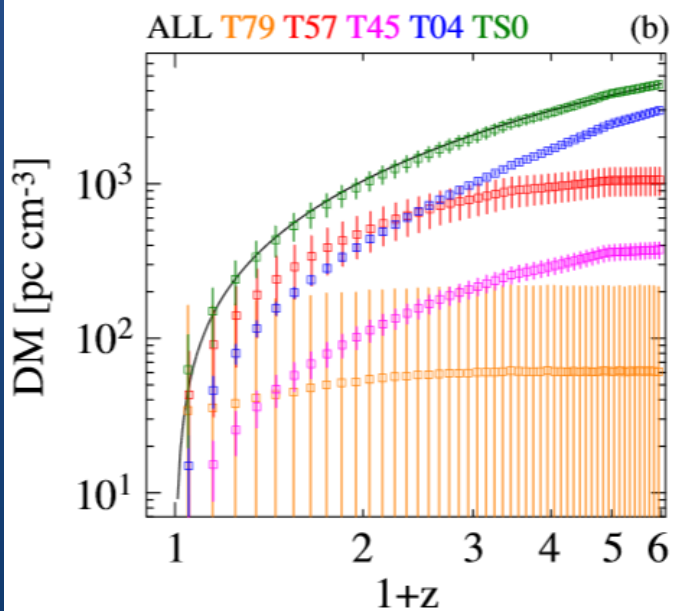
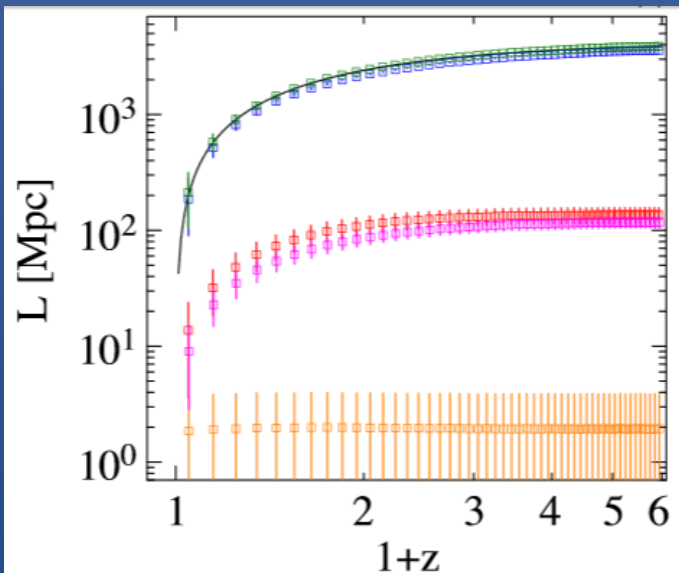
1401.0059

1401.2927

Данные по FRB/GRB можно
будет использовать для
получения космологических
параметров

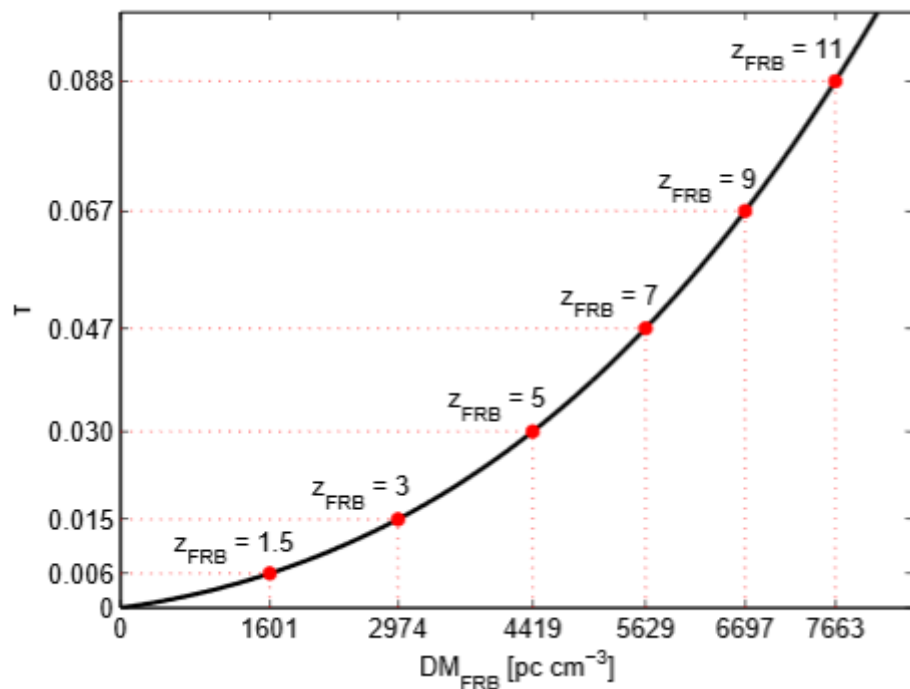


Изучение свойств межгалактической среды

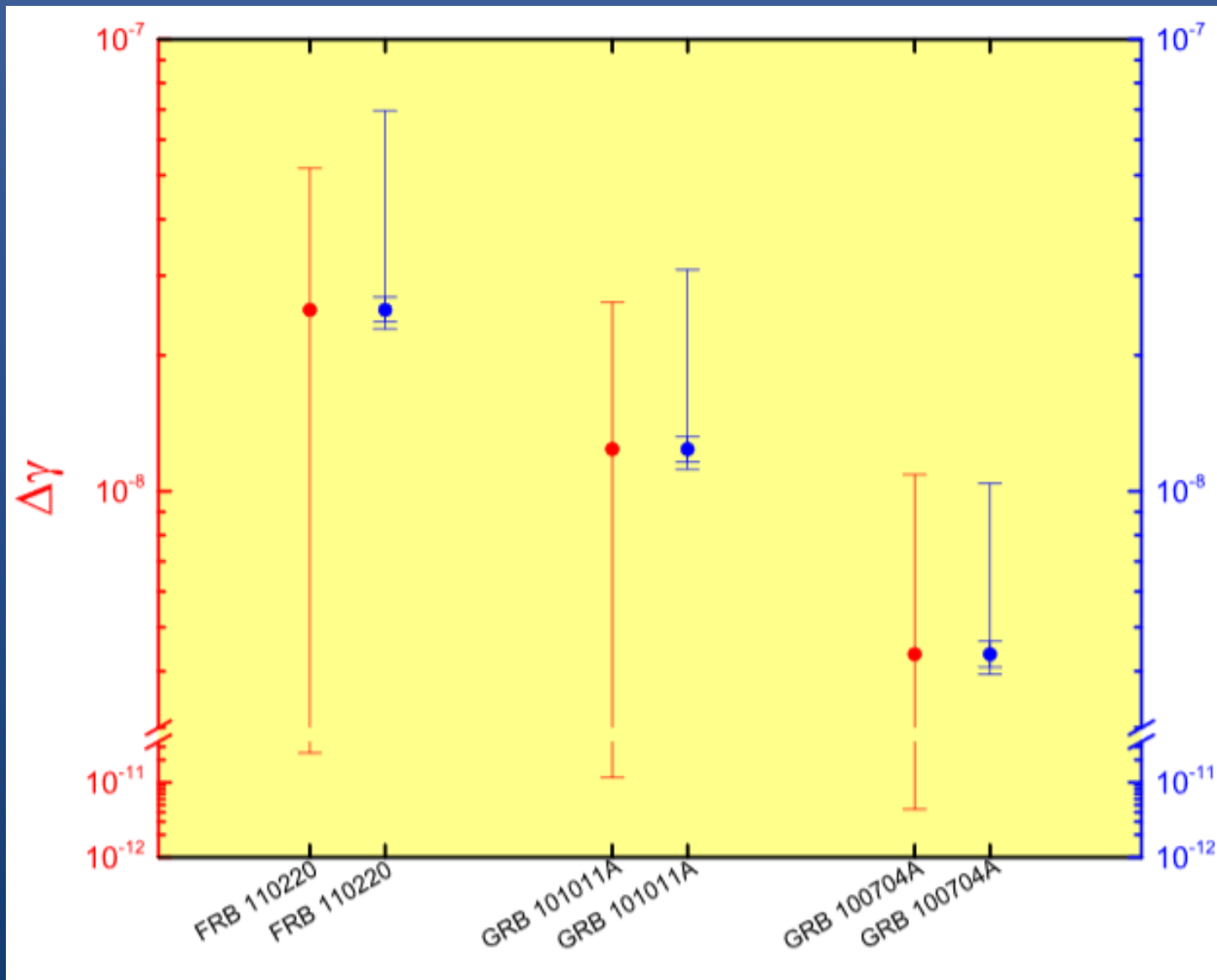


Очень далекие БРВ и реликтовое излучение

Обнаружение БРВ, испущенных в эпоху реионизации, может дать важную информацию о реликтовом излучении и протекании реионизации.



Проверка принципа эквивалентности

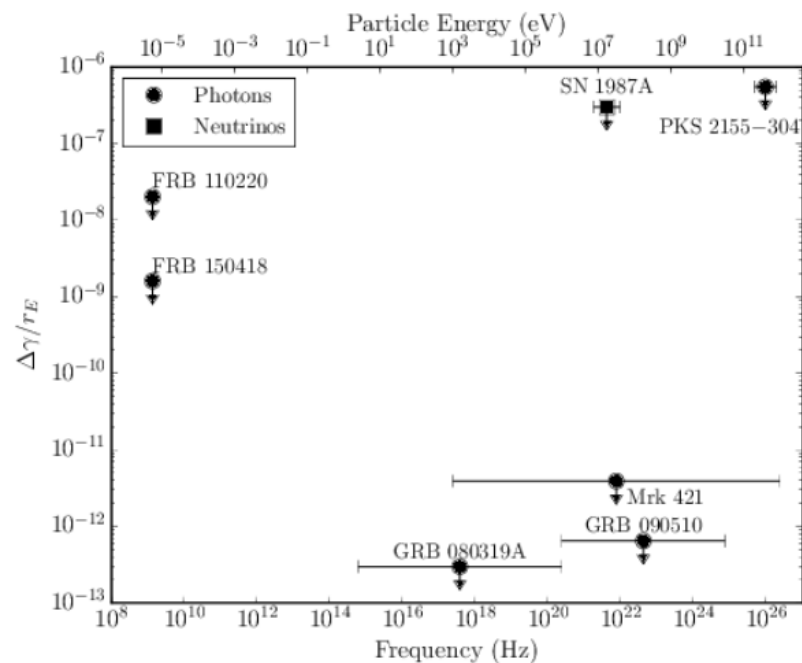
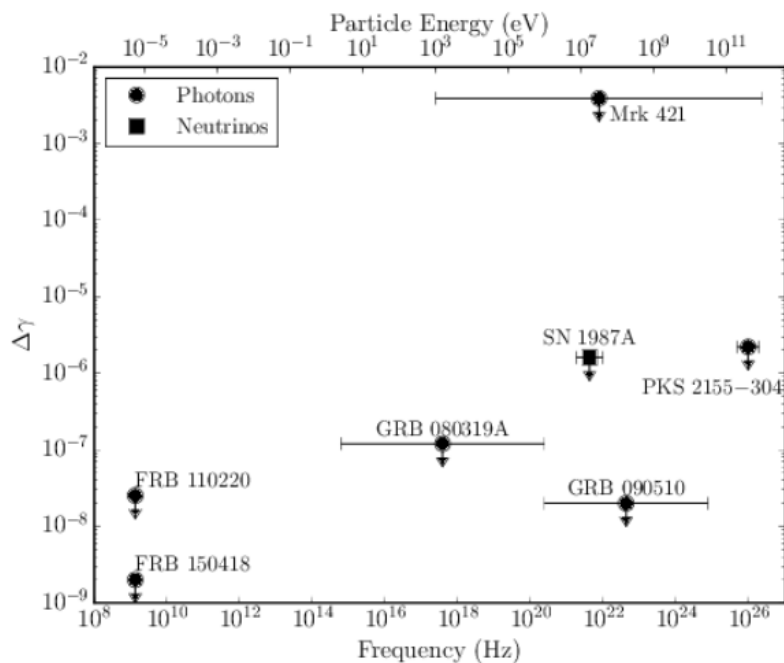


Также можно проверять лоренц-инвар. Особенно, если увидеть FRB, совпадающий с GRB.

См. также 1509.00150, 1601.04558

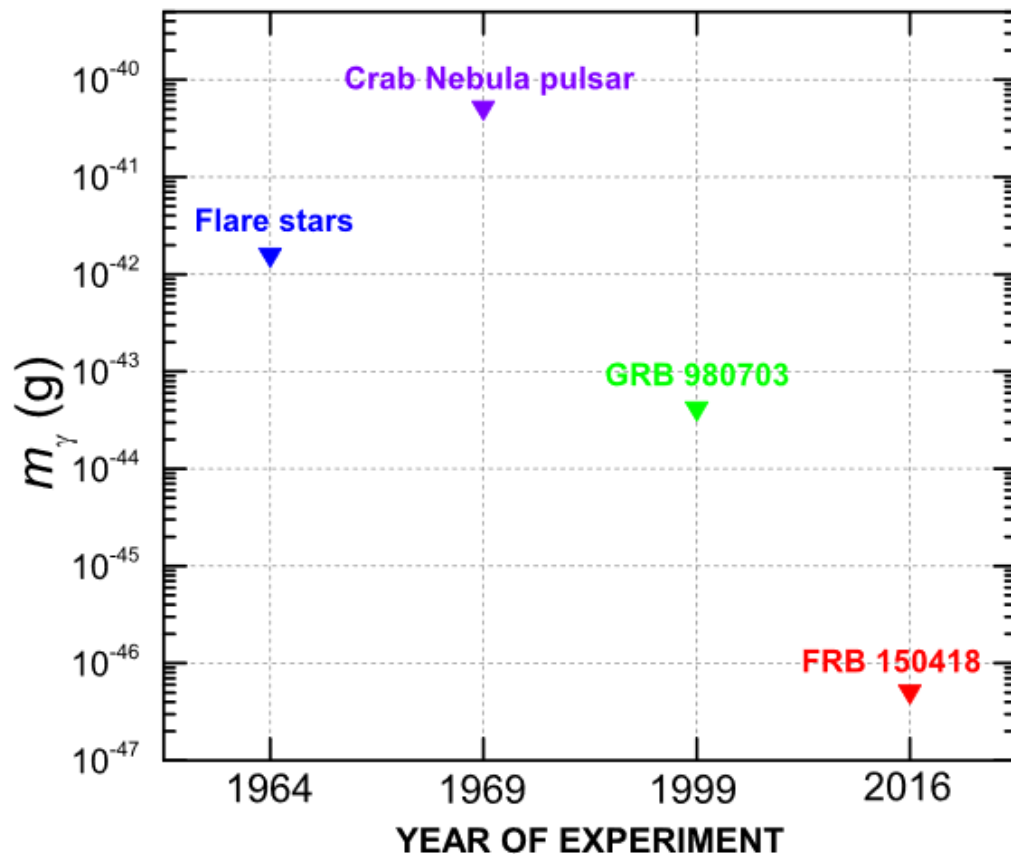
Улучшение предела на параметр γ

Локализация всплеска и идентификация материнской галактики (если эта идентификация верна) позволяют улучшить предел на параметр γ .



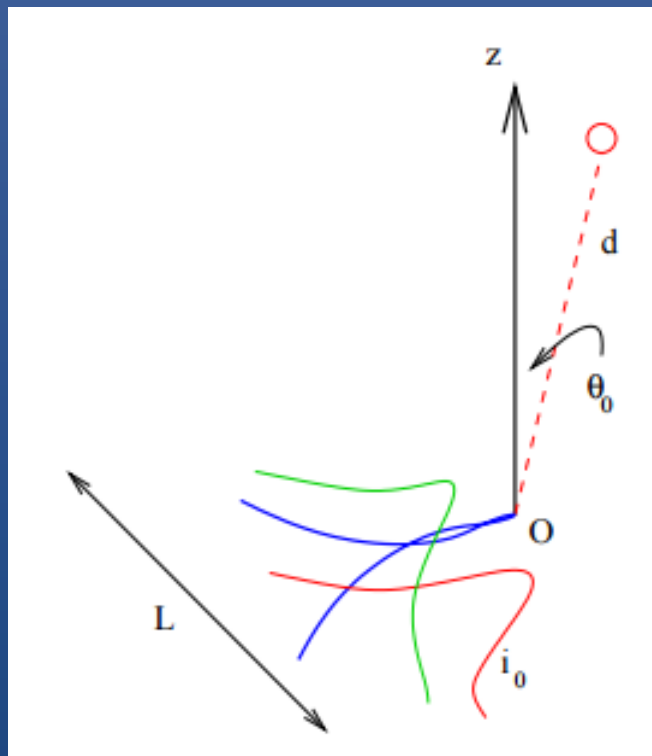
Предел на массу фотона

$$m_\gamma = (1.56 \times 10^{-47} \text{ g}) \left\{ \frac{\Delta t_{m_\gamma \neq 0} / \text{s}}{\left[\left(\frac{\nu_l}{\text{GHz}} \right)^{-2} - \left(\frac{\nu_h}{\text{GHz}} \right)^{-2} \right] H_1(z)} \right\}^{1/2}$$



См. также 1602.09135

Космические струны



Струны могут вести себя довольно причудливым образом.

В частности, могут возникать точки струны — каспы, - которые разгоняются до околосветовой скорости.

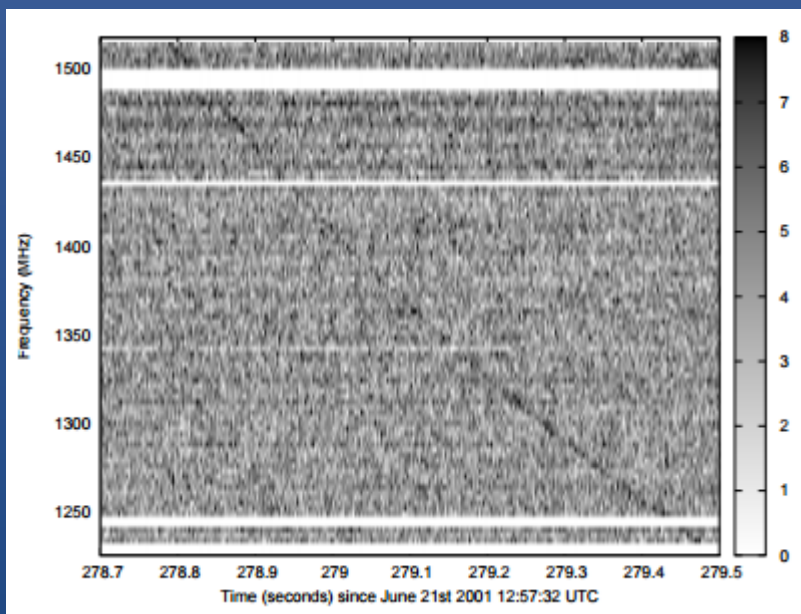
Каспы становятся мощными источниками электромагнитного излучения.

Именно это и лежит в основе модели.

Сверхпроводящие струны
Vachaspati 0802.0711

Также гипотеза космических струн в приложении к FRB рассматривалась в ряде других работ: 1110.1631, 1409.5516,

Первичные черные дыры



Не подходит в качестве внегалактического источника, т.к. полная светимость мала. Должны быть видны с < 200 пк.

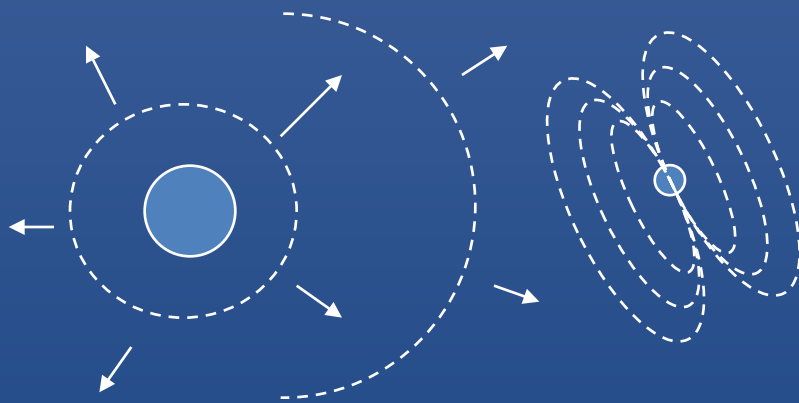
Давно предсказывались (Rees, Blanford 1977).

Эффекты дополнительных измерений могут привести к более высокому энерговыделению, но все равно речь идет о расстояниях порядка 300 пк.

Keane et al. 1206.4135

Могут сопровождаться всплеском жесткого излучения (если всплеск происходит достаточно близко).

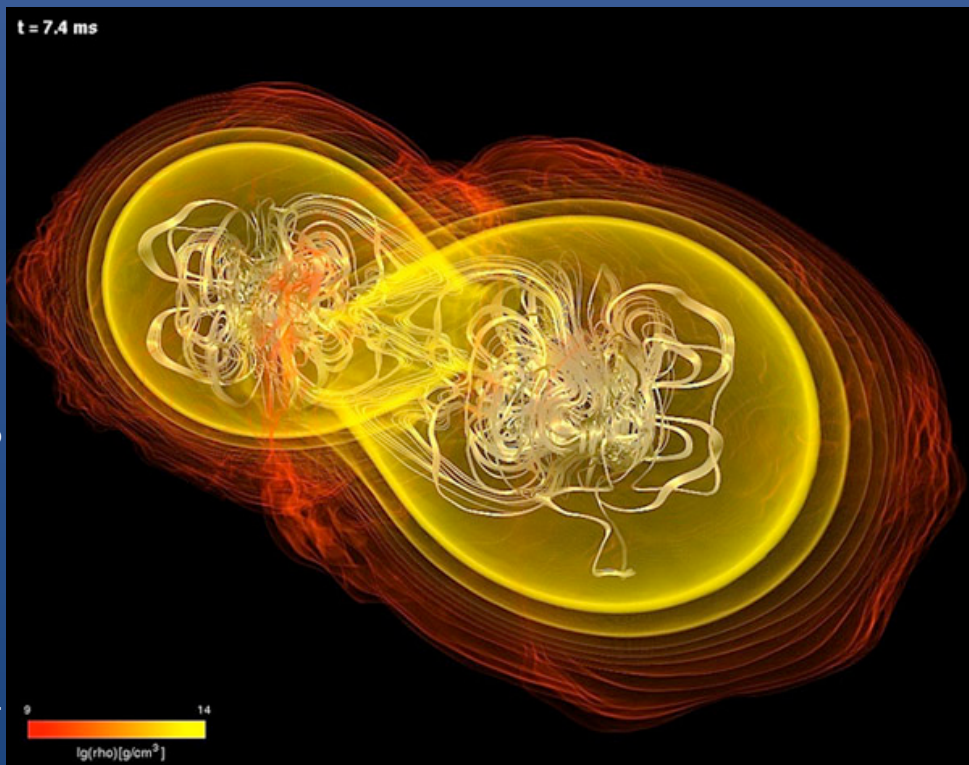
Сверхновая и пульсар



Ударная волна сверхновой в массивной тесной двойной системе может провзаимодействовать с магнитосферой нейтронной звезды, создав магнитосферный хвост. Пересоединение в хвосте может привести к появлению всплеска. (Егоров, Постнов 0810.2219)

Т.о., радиовсплеск ВСЕГДА должен сопровождаться вспышкой сверхновой.

Слияния нейтронных звезд



Придумано несколько сценариев, в которых в результате слияния нейтронных звезд возникает радиоисточник (Липунов, Панченко; Hansen, Lyutikov; Постнов, Пширков).

Но в приложении к FRBs основной является работа Totani (1307.4985).

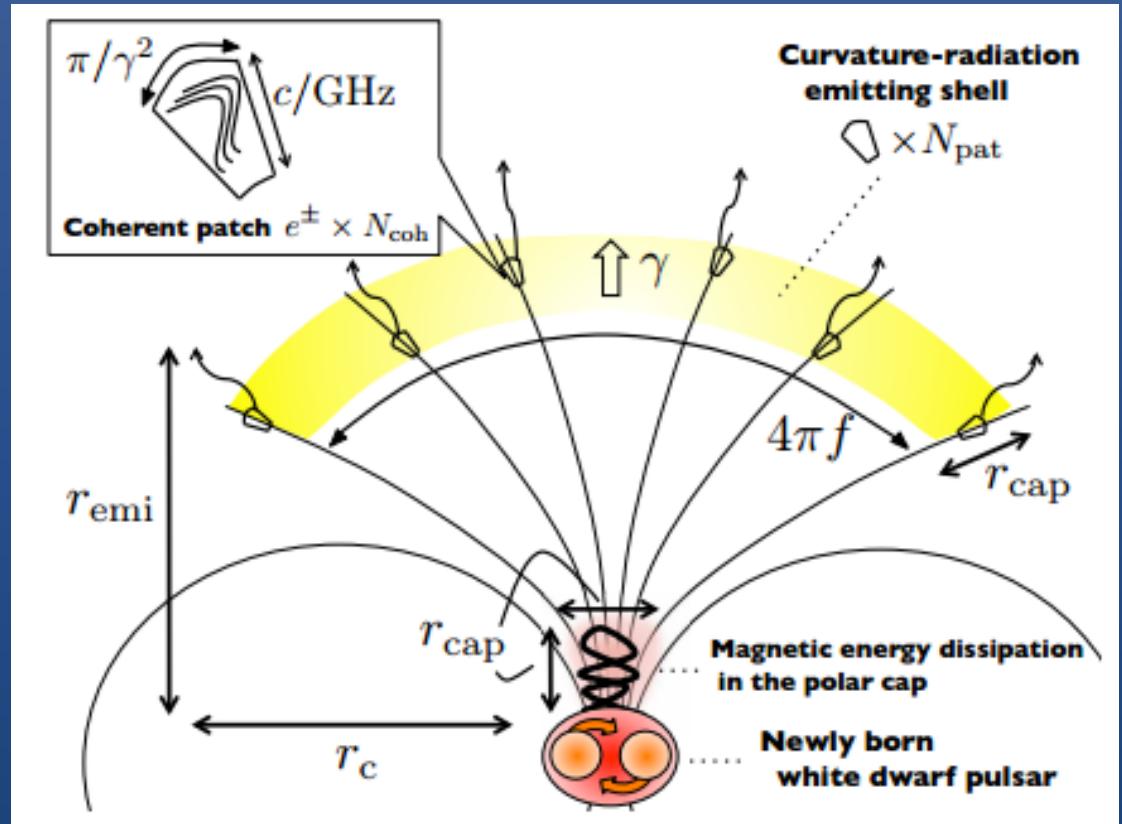
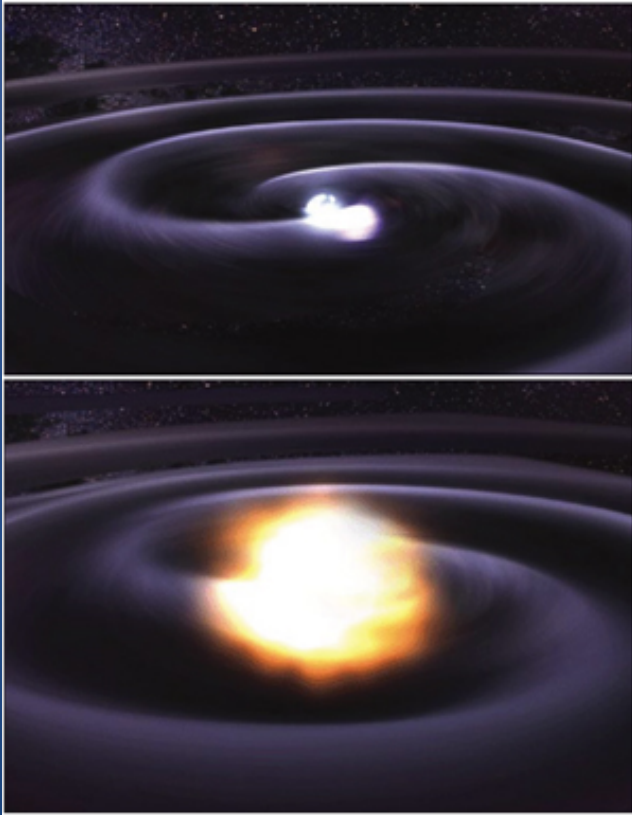
$$\dot{E} = -6.2 \times 10^{45} \left(\frac{B}{10^{12.5} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^6 \times \left(\frac{P}{0.5 \text{ msec}} \right)^{-4} \text{ erg s}^{-1}.$$

Довольно легко получить быстрое вращение и сильное магнитное поле. Но по физике есть много вопросов, т.к. ситуация очень нестационарная и плохо изученная.

Должны сопровождаться гравитационно-волновым всплеском

Слияния белых карликов

<http://cerncourier.com/cws/article/cern/31855>

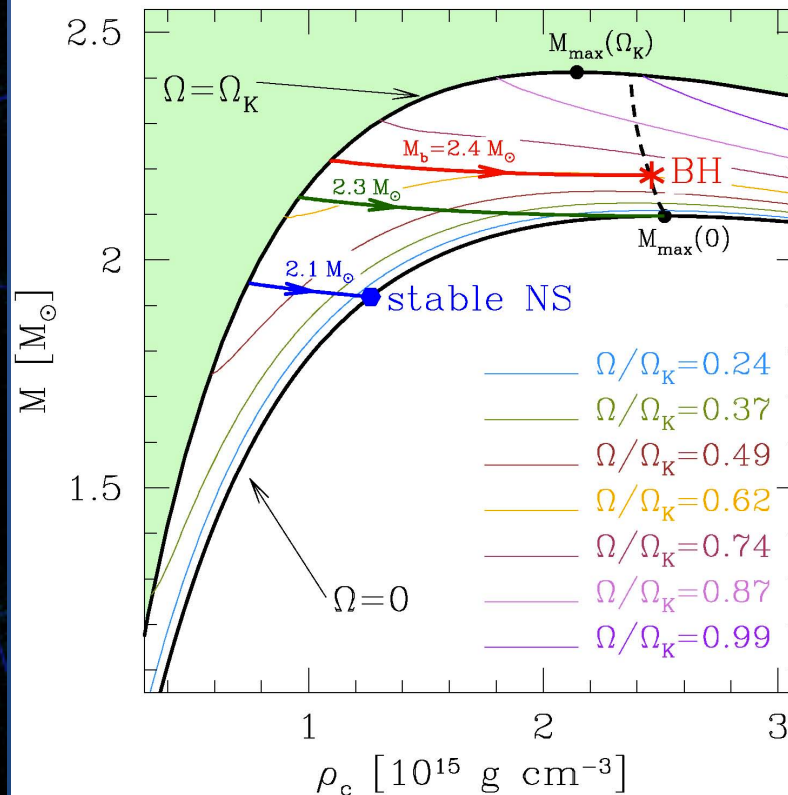
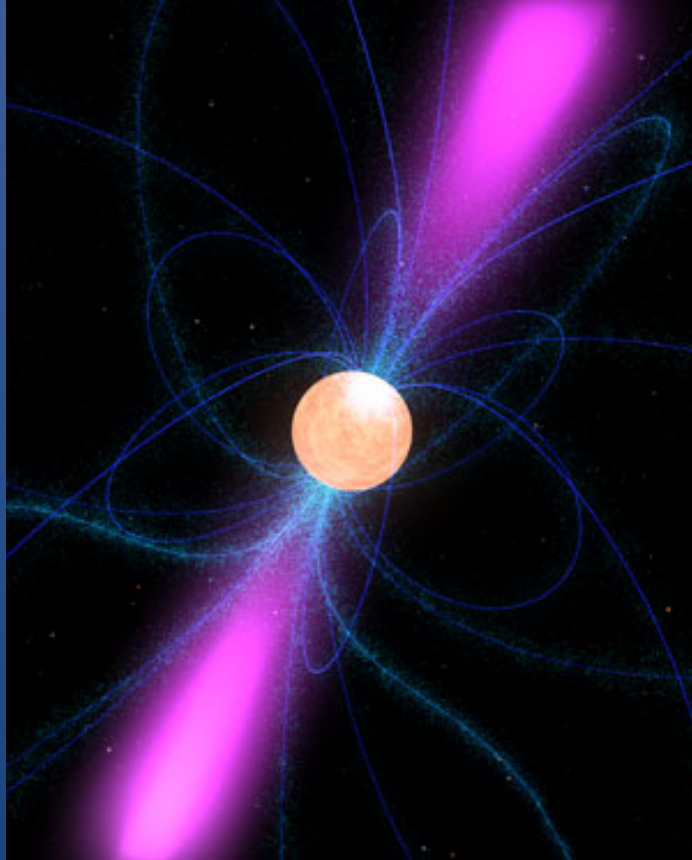


Основные события разыгрываются на полярной шапке, что необходимо для согласования характерной длительности всплеска с временами процессов.

Сопровождается сверхновой Ia и, возможно, рентгеновским излучением за счет возвратной аккреции (fall-back).

Супрамаассивные нейтронные звезды

<http://www.astro.ru.nl/~falcke/PR/blitzar/>



“blitzar”

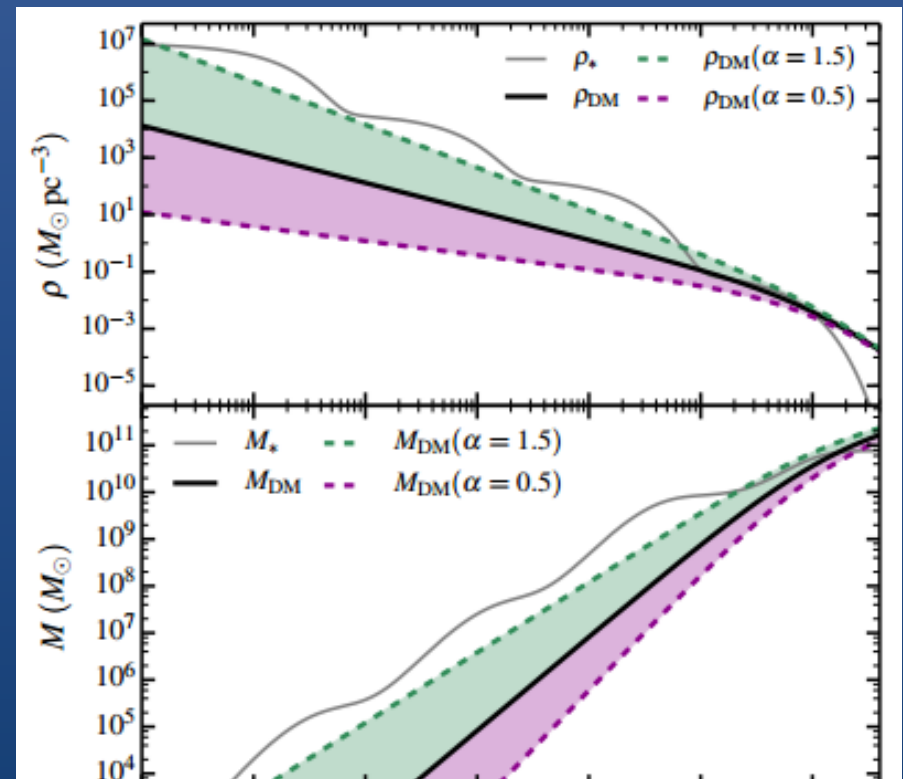
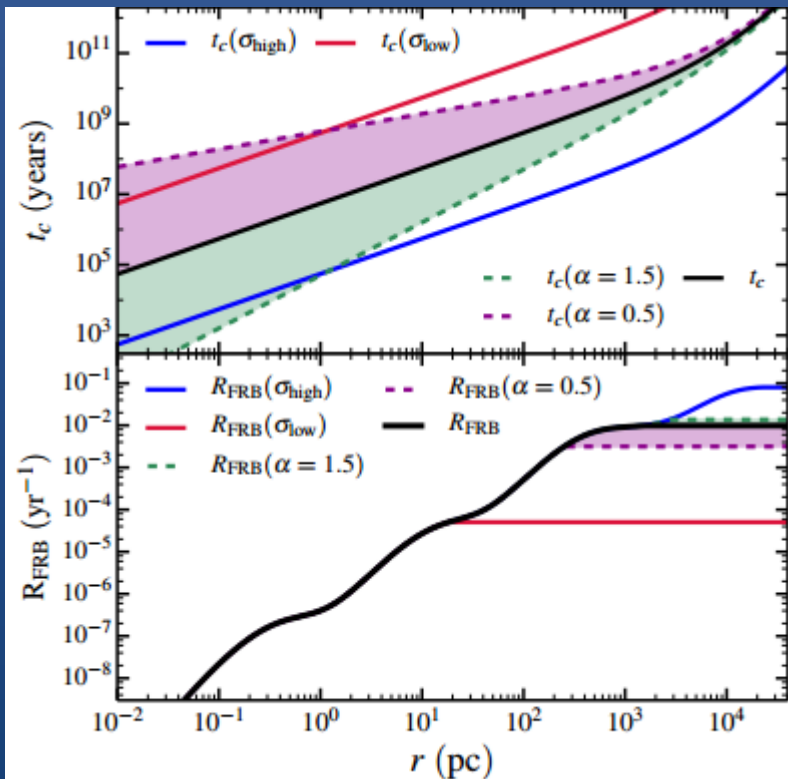
Falcke, Rezzola 1307.1409

Нейтронная звезда может быть устойчивой относительно коллапса из-за очень быстрого вращения. Такая ситуация может возникнуть при слияниях, при аккреции в двойной или же прямо при рождении. Коллапс может произойти спустя тысячи лет после образования НЗ. Могут сопровождаться сверхновой, коротким гамма всплеском или всплеском гравволн. Могут давать двойные всплески.

Поможем коллапсу!

Коллапс из-за аккреции темного вещества.

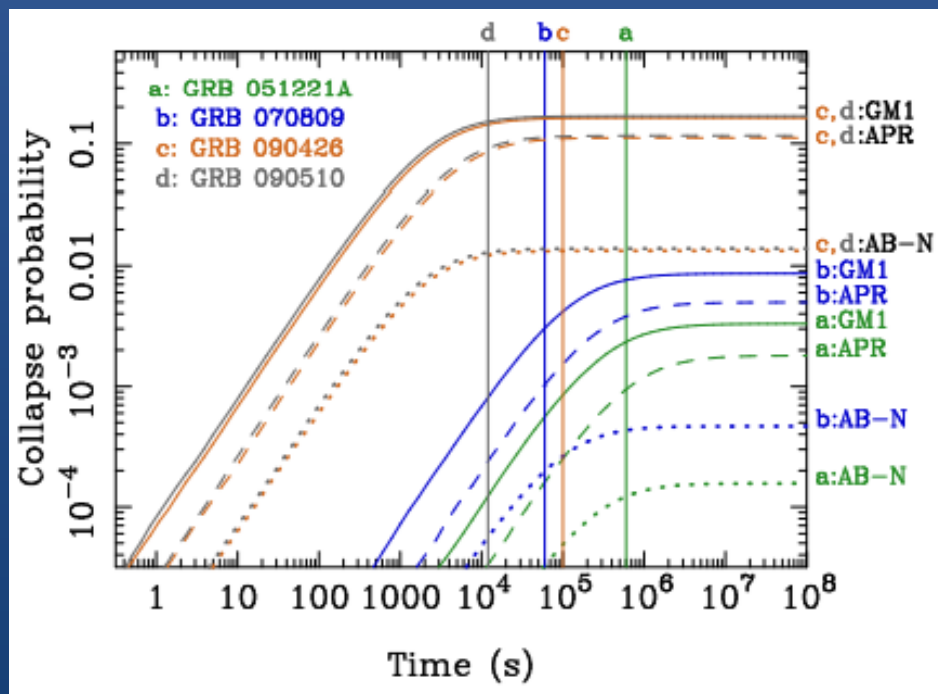
Более эффективен в центральных областях галактик.



Коллапс нейтронной звезды

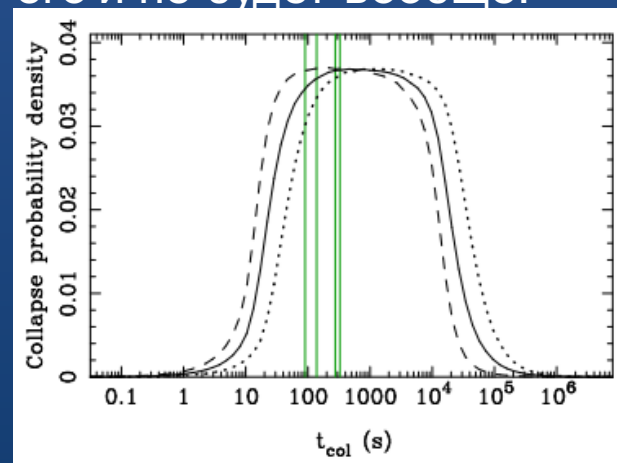
Развитие модели blitzar (Ravi, Lasky 1403.6327).

Возникновение супрамассивного магнитара после слияния и последующий коллапс в черную дыру.



$$t_{\text{col}} = \frac{3c^3 I}{4\pi^2 B_p^2 R^6} \left[\left(\frac{M_p - M_{\text{TOV}}}{\alpha M_{\text{TOV}}} \right)^{2/\beta} - p_0^2 \right].$$

Если коллапс не произошел за полдня, то, скорее всего, его и не будет вообще.



Возникает спустя часы после слияния.

Т.е. после короткого гамма-всплеска и всплеска гравитационного излучения.

Нормальные звезды

Вспышки звезд главной последовательности
на расстояниях менее нескольких тысяч световых лет.
Мера дисперсии связана с оболочкой вокруг звезды.

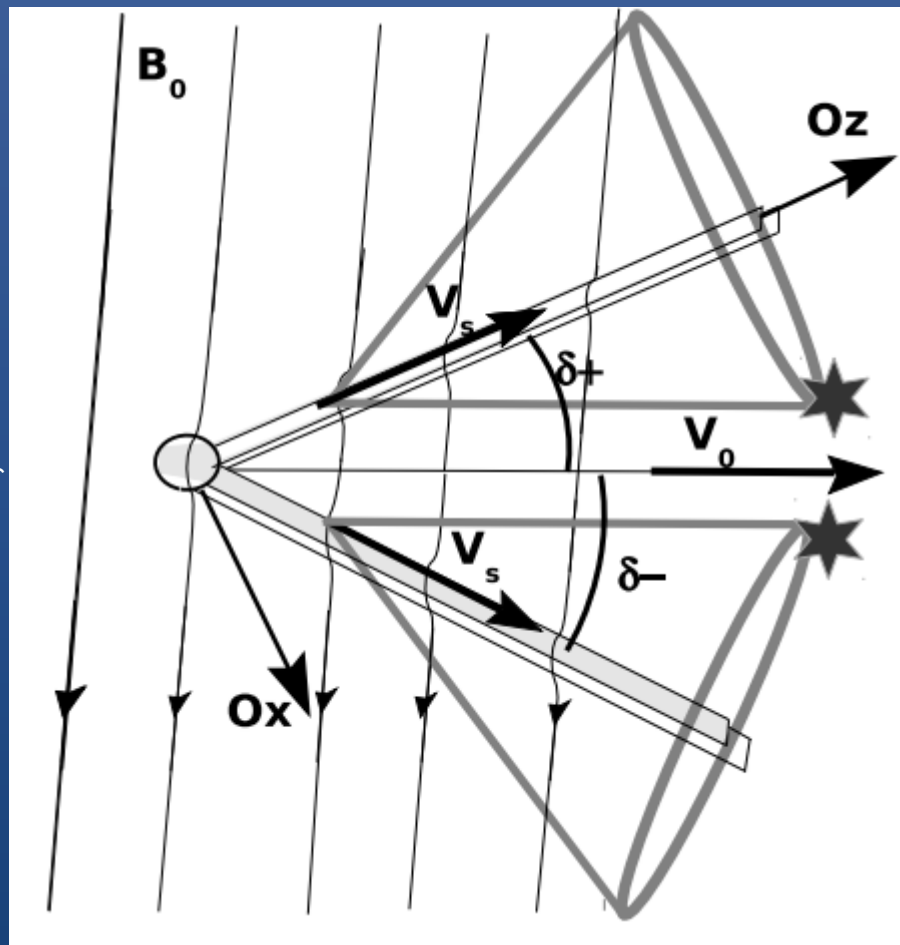


Модель закрыта наблюдениями. <https://www.cfa.harvard.edu/news/2013-30>
Предсказывалось распределение, соответствующее близким
галактическим источникам. Плюс, должны были бы быть обнаружены
сами вспыхивающие звезды.

Не звезды!

Показано, что радиовсплески необходимой мощности не могут быть сгенерированы, если плотность плазмы в области генерации излучения и вблизи нее настолько велика, чтобы обеспечить необходимую меру дисперсии.

МГД процессы в двойной системе

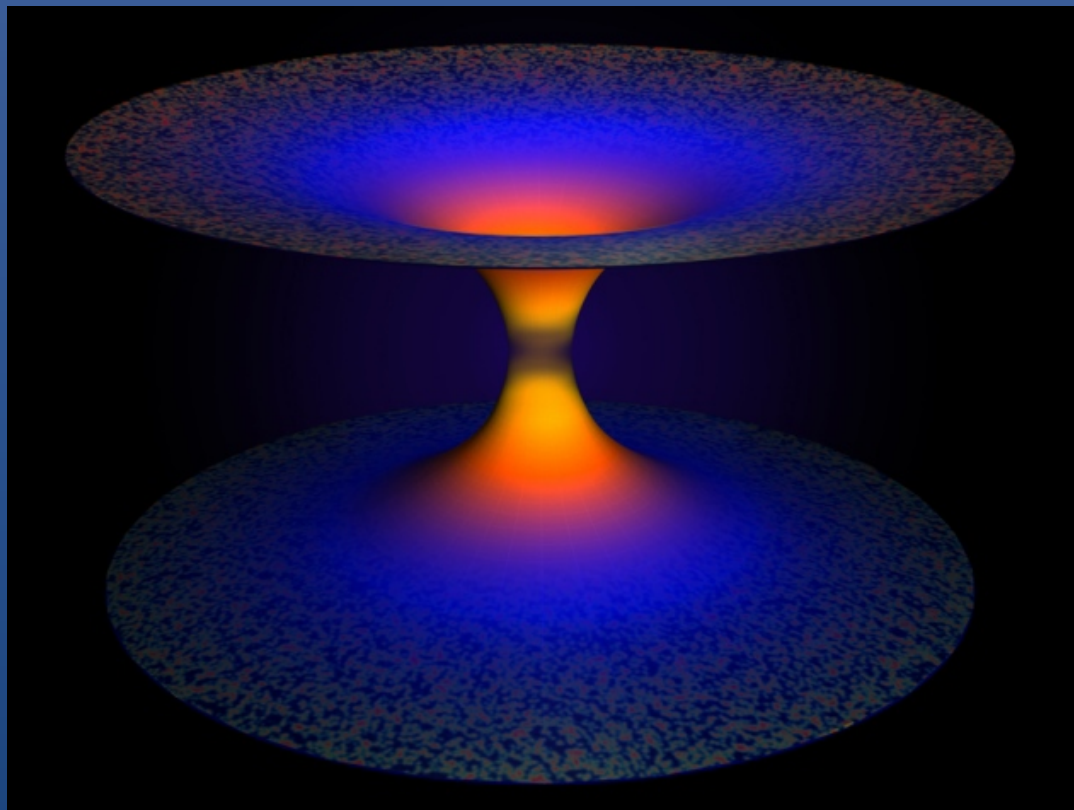


Если вокруг пульсара вращается тело (планета и тп.), то будет происходить довольно сложное взаимодействие ветра пульсара с телом, приводящее к ряду интересных эффектов. Одним из них может быть направленное радиоизлучение, возникающее в результате неустойчивости в сформировавшейся структуре вокруг тела в ветре.

Если наблюдатель оказывается точно на луче, то он будет наблюдать резкую вспышку радиоизлучения.

Максимальное расстояние несколько Мпк.
Поэтому ожидалась бы ассоциация с близкими галактиками.

Белые дыры (из черных)



Изначальные расчеты не предсказывали появление радиоизлучения. Но авторы 1409.4031 полагают, что в модели достаточно неопределенностей, чтобы предполагать и появление радиоволн. Длина волны соответствует размеру взрывающейся дыры.

Мы плохо знаем, как испаряются черные дыры. В некоторых моделях это сопровождается появлением белой дыры (при коллапсе квантовые петли нельзя упаковать бесконечно плотно).

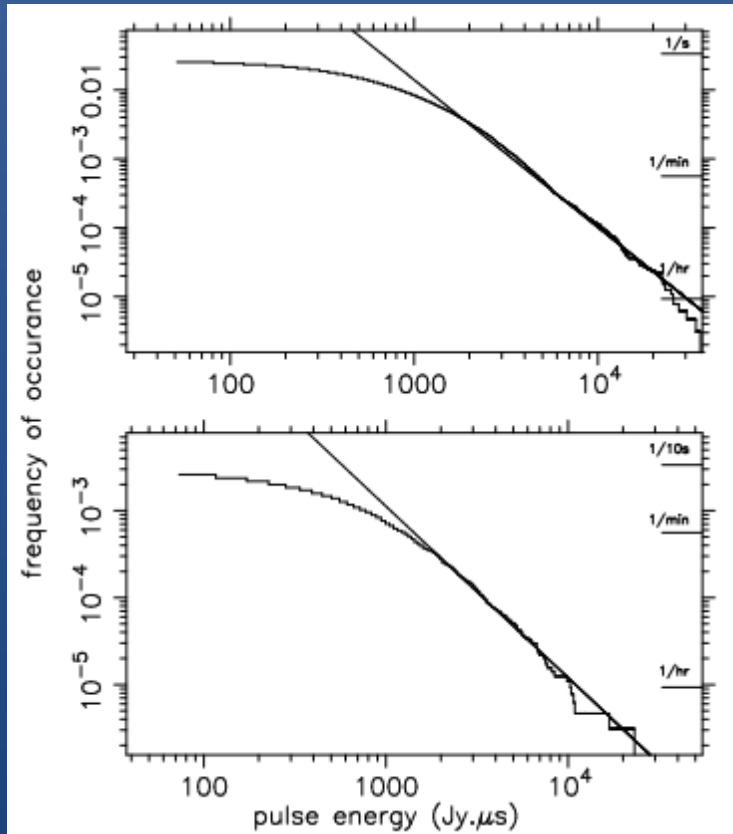
Испарением черных дыр уже было названо как возможная причина FRBs. В этом случае ударная волна взаимодействует с внешним магнитным полем.

Но излучение в случае появления белых дыр имеет совсем другую природу — это уже эффект квантовой гравитации.

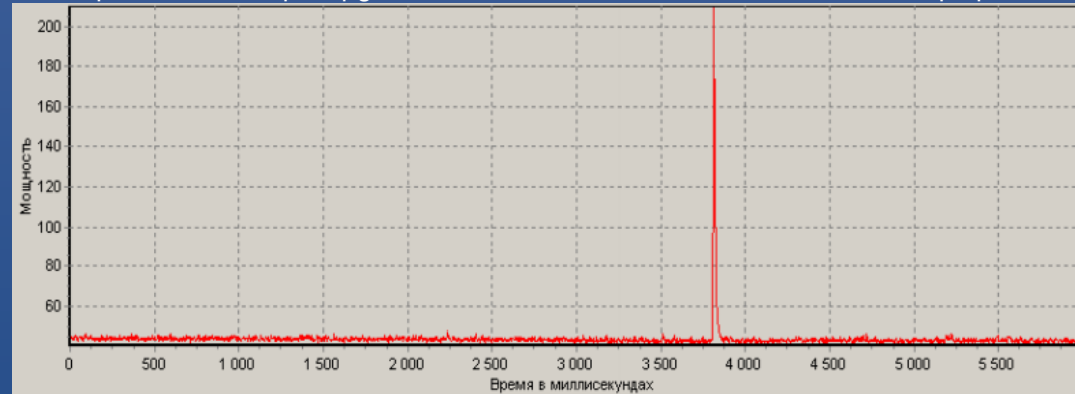
1409.4031

Сверхгигантские импульсы внегалактических радиопульсаров

1004.2803



<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

Суперимпульсы молодых пульсаров в плотных остатках сверхновых

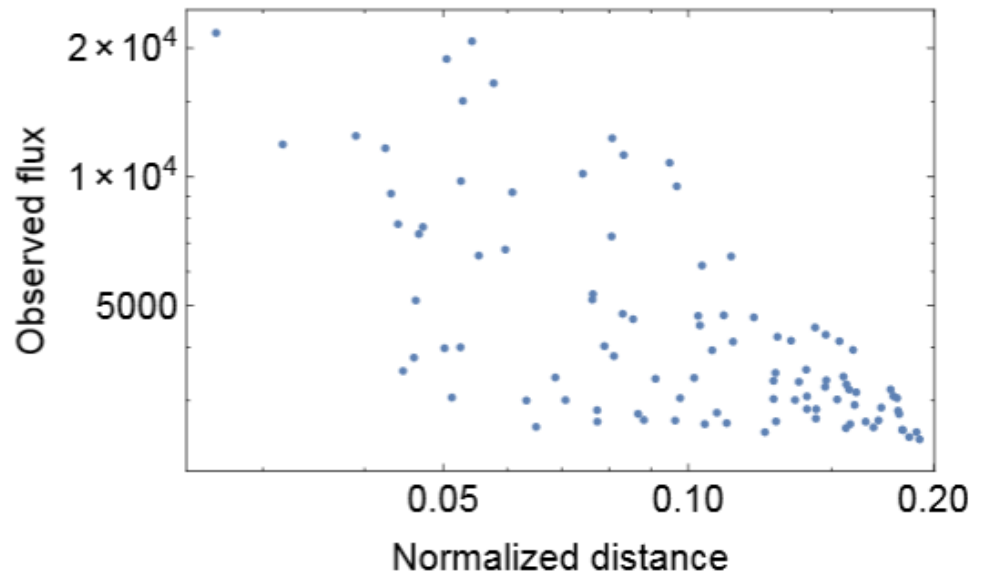
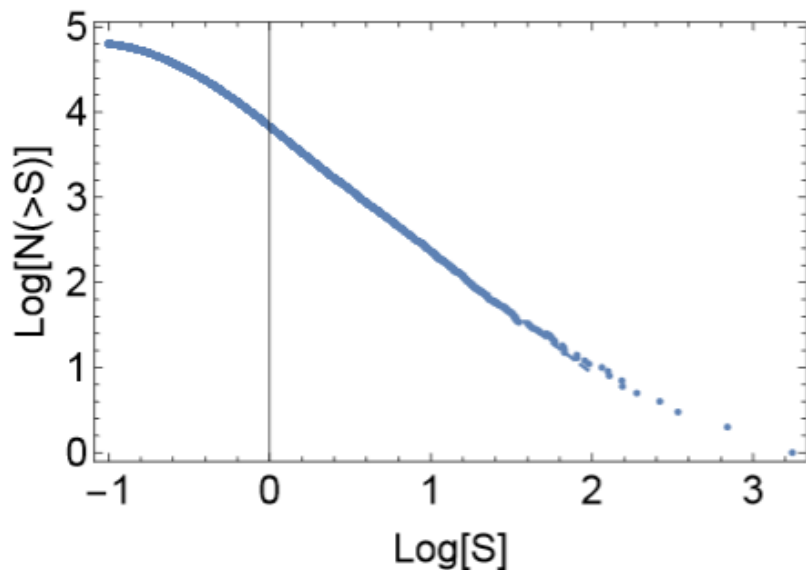
Возраст 30-100 лет

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

$$\text{DM} \approx \frac{M_{ej}}{m_p r^2}$$

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

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

$$v_{ej} = \sqrt{\frac{2E_{ej}}{M_{ej}}}.$$

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

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

Всплески как суперимпульсы

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

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

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

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.

Начальные параметры

$$f(P) \propto P^{1/2}$$



$$f(\dot{E}) \propto \dot{E}^{-11/8}$$

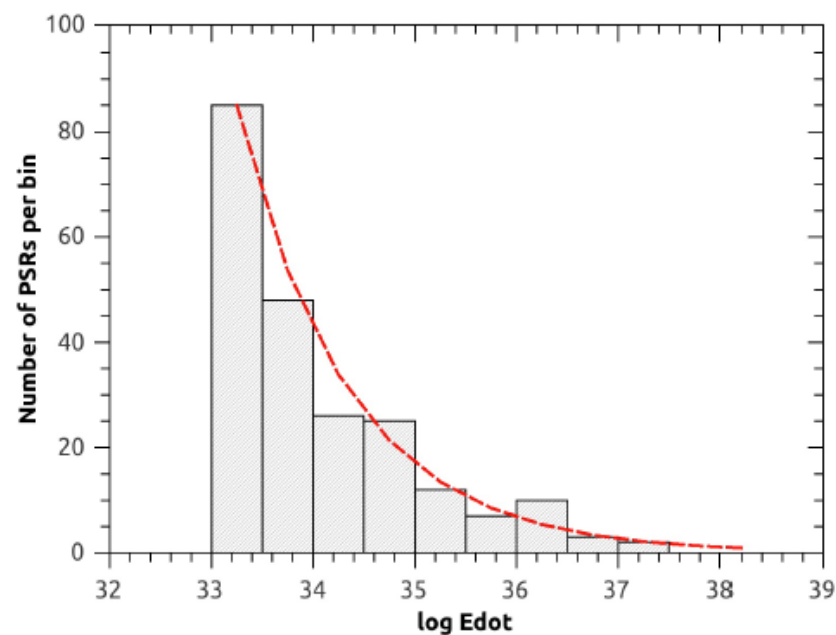
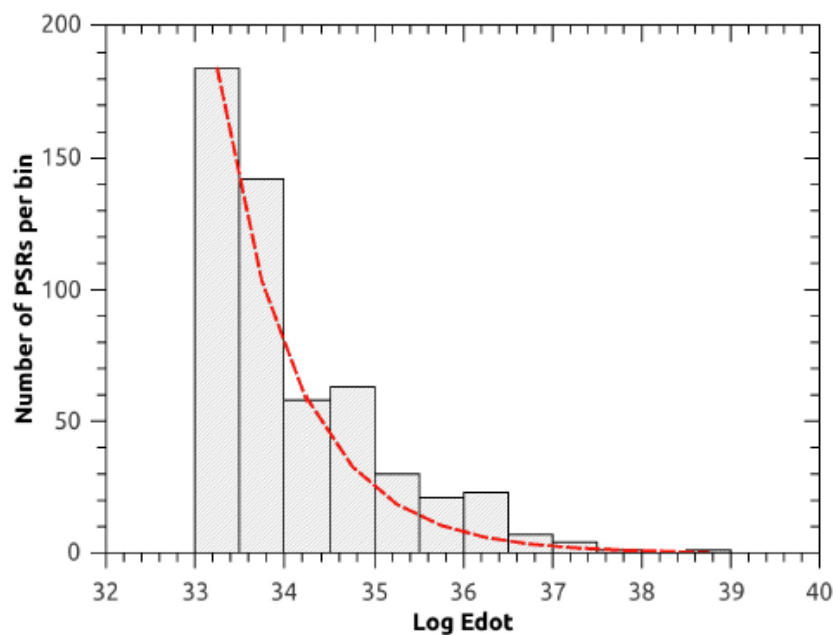
$$f_{inj}(\dot{E}) \propto \dot{E}^{-\beta}$$

$$f(\dot{E}) \propto c_1 \dot{E}^{-1/2-\beta} + c_2 \dot{E}^{-3/2}, \beta \neq 1$$

$$f(\dot{E}) \propto \frac{\ln(\dot{E}_0/\dot{E})}{\dot{E}^{3/2}}, \beta = 1$$

Подходит темп рождения,
равномерно распределенный по $\dot{E}$
в логарифмическом масштабе

$$f_{inj} \propto 1/\dot{E}$$

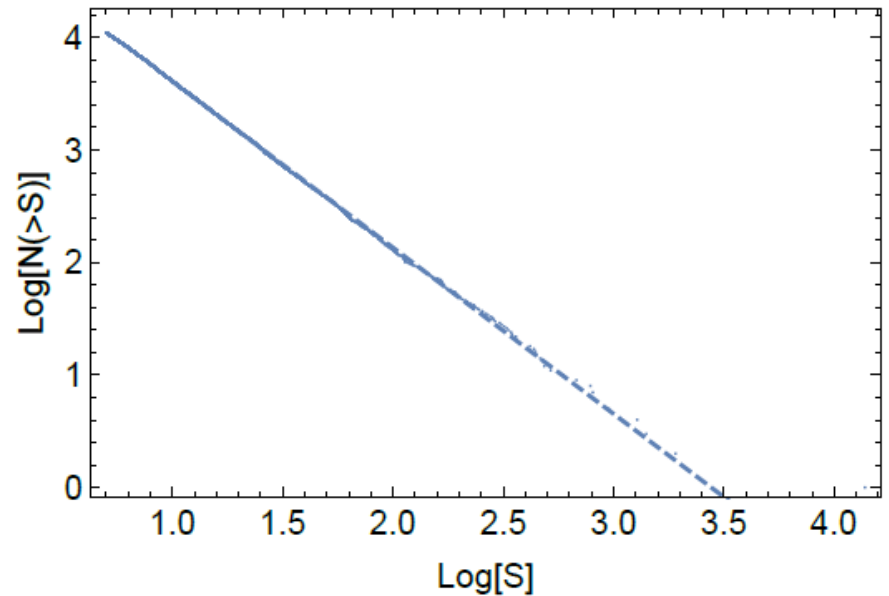
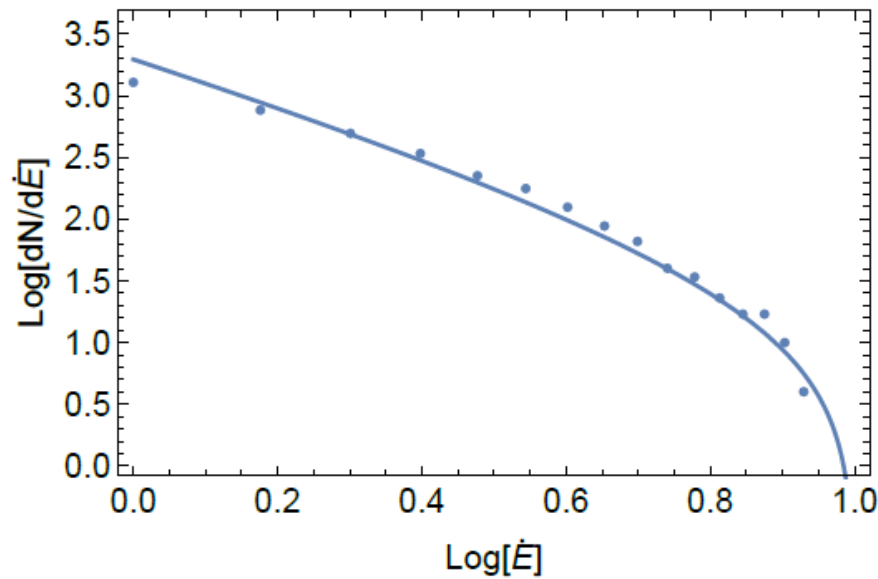


Монте-Карло моделирование

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

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

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



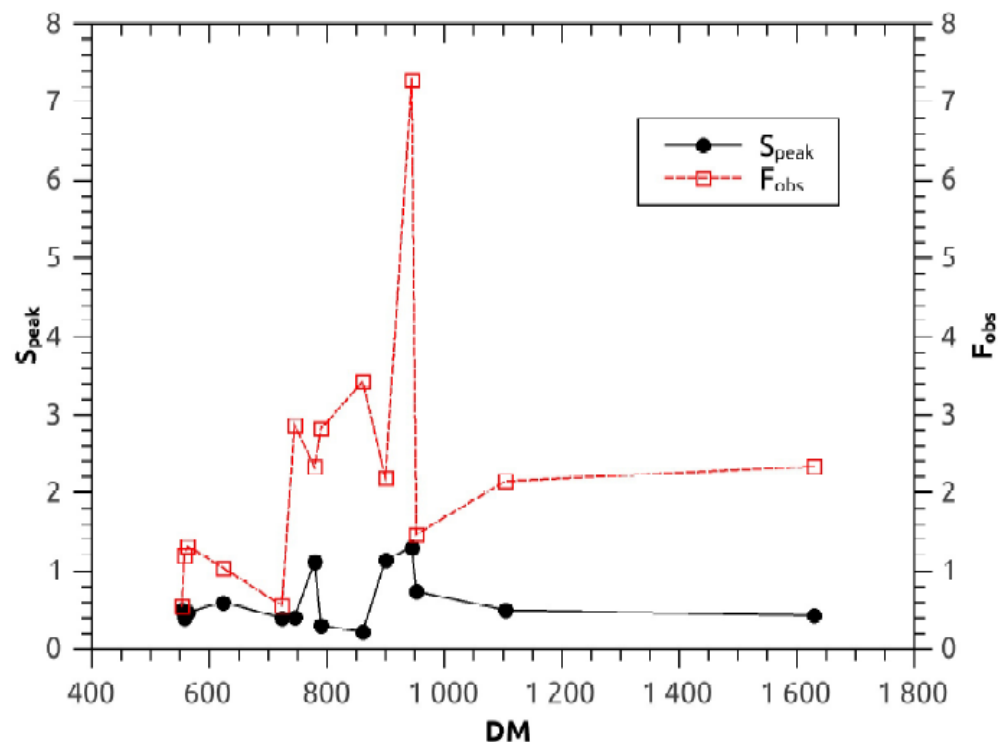
Распределение по расстояниям и DM

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

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

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

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



Аксионы



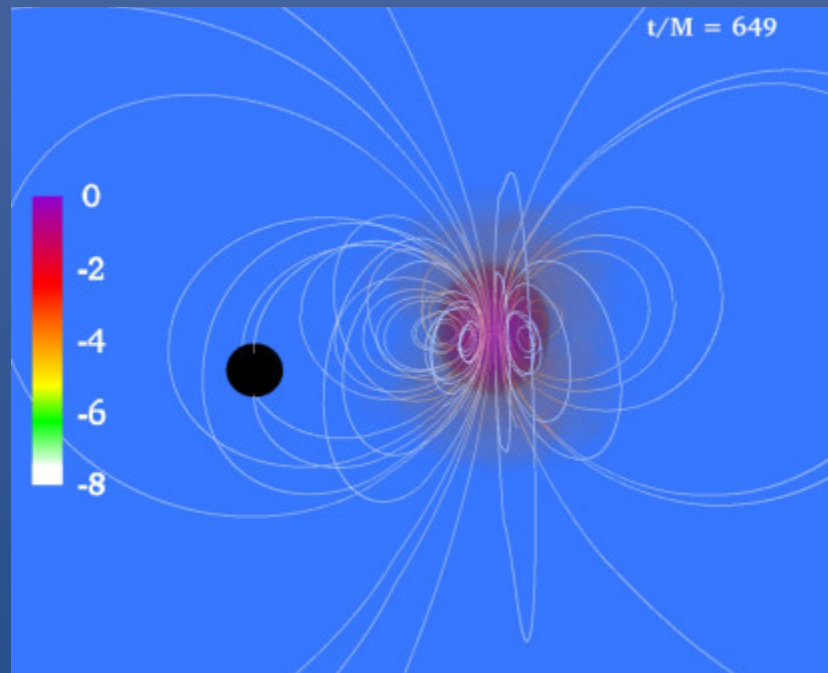
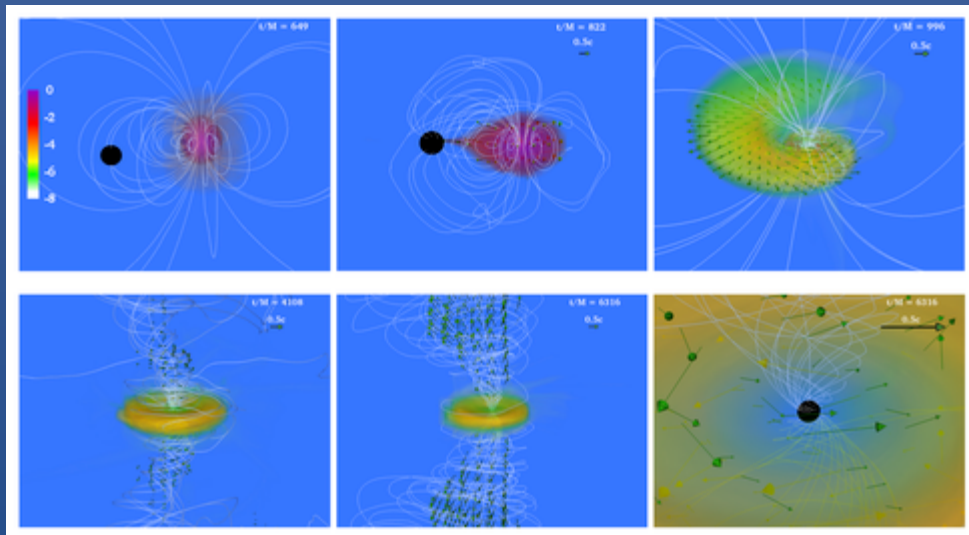
Аксионы — кандидаты в частицы темного вещества.
Аксионные миникластеры.
Возникают в молодой вселенной.
Масса — как у крупного астероида.
Размер — как у звезды.

Кластер может становиться более компактным из-за образования бозе-конденсата.
Размер может быть порядка сотен км, что соответствует ожидаемой области излучения быстрого радиовсплеска (длительность $\times$ скорость света).
Масса компактного кластера может составлять примерно массу Земли!

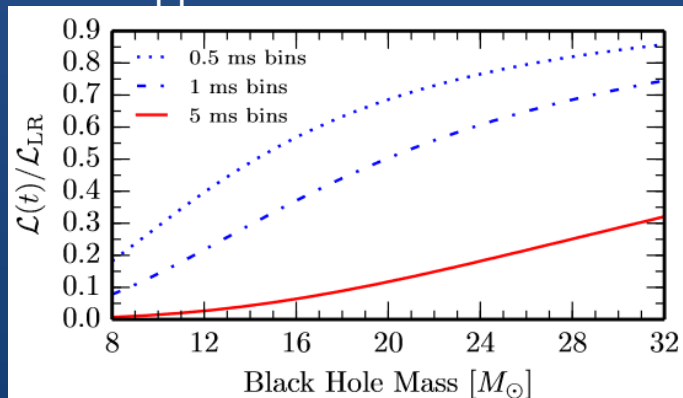
Влетание аксионного кластера в магнитосферу нейтронной звезды должно приводить к конверсии аксионов в фотоны, а значит — к вспышке электромагнитного излучения.

1411.3900, 1410.4323, 1512.06245

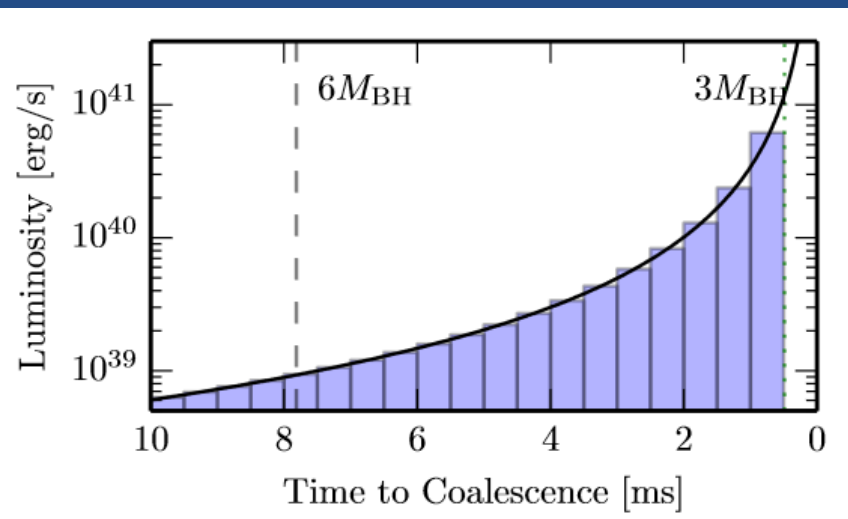
Батарея черной дыры



Эта модель должна работать не для всех всплесков,
т.к. ожидаемый темп относительно мал.

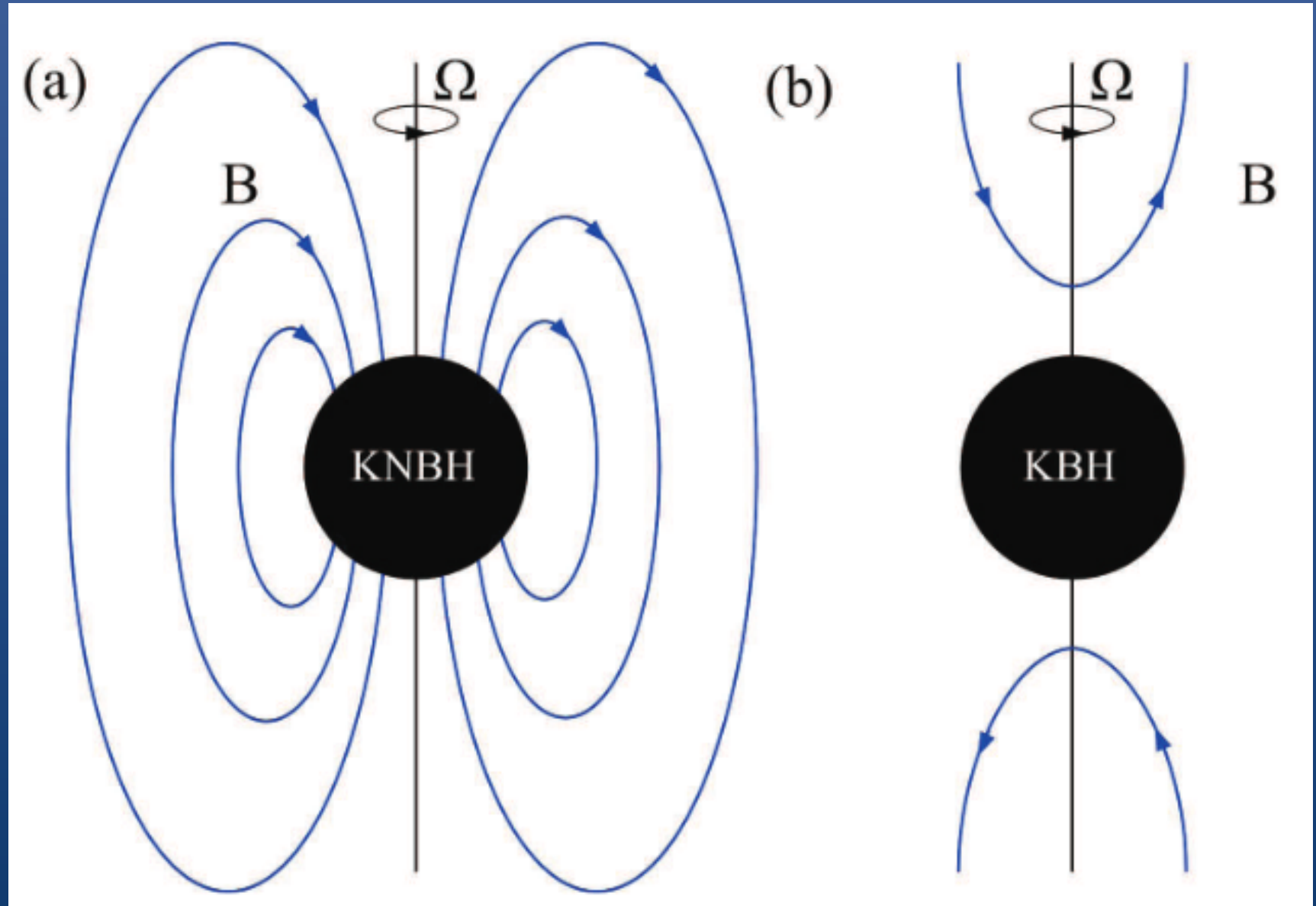


(d) Relative luminosity of precursor to main burst at light ring



Должно сопровождаться гравитационно-волновым всплеском

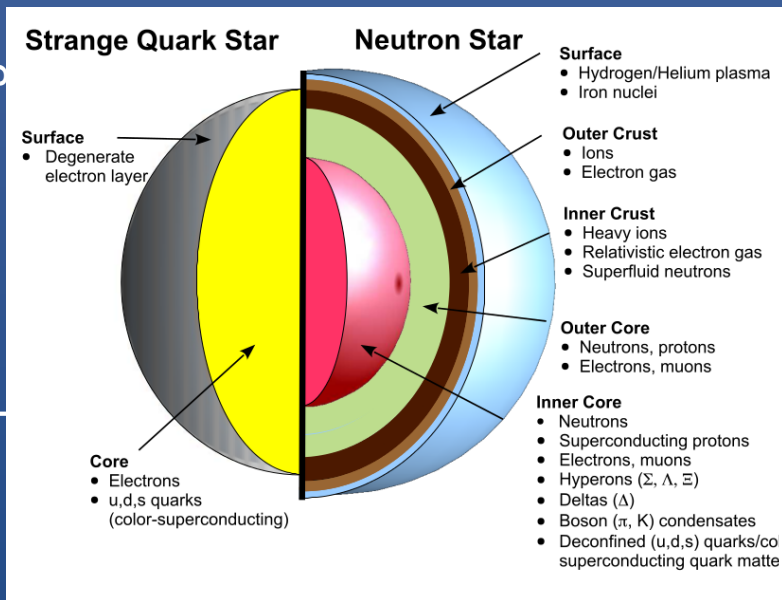
Коллапс магнитосферы черной дыры Керра-Ньюмена



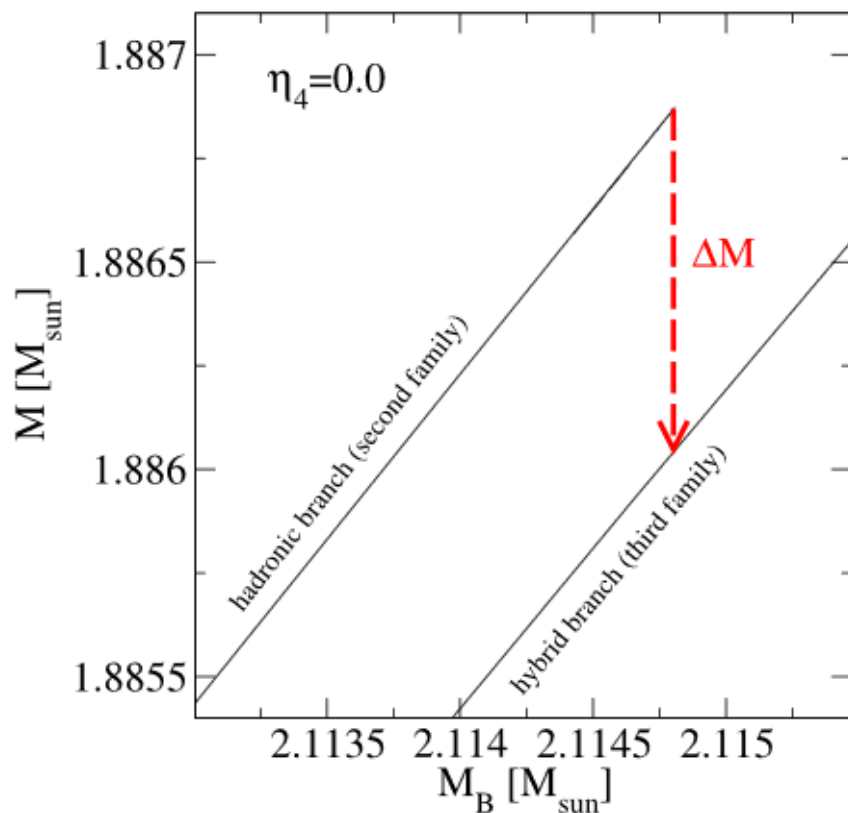
1602.06907

Деконфайнмент – рождение кварковой звезды

<http://astrobites.org>



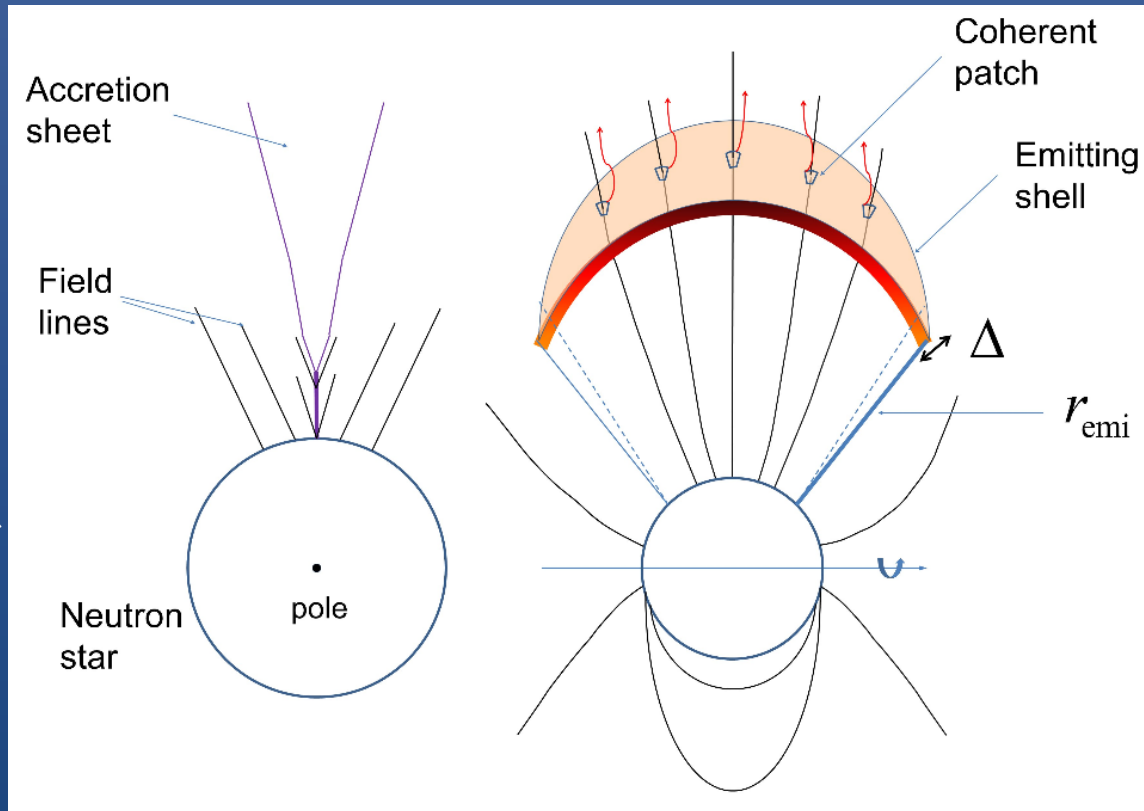
В процессе своей эволюции нейтронная звезда или ее часть могут испытать деконфайнмент: обычное вещество превратится в кварковое. Это сопровождается энергovyделением.



1506.08645

Также FRB пытаются воспроизвести в модели т.н. «кварковой новой» (1505.08147).

Падение астероидов



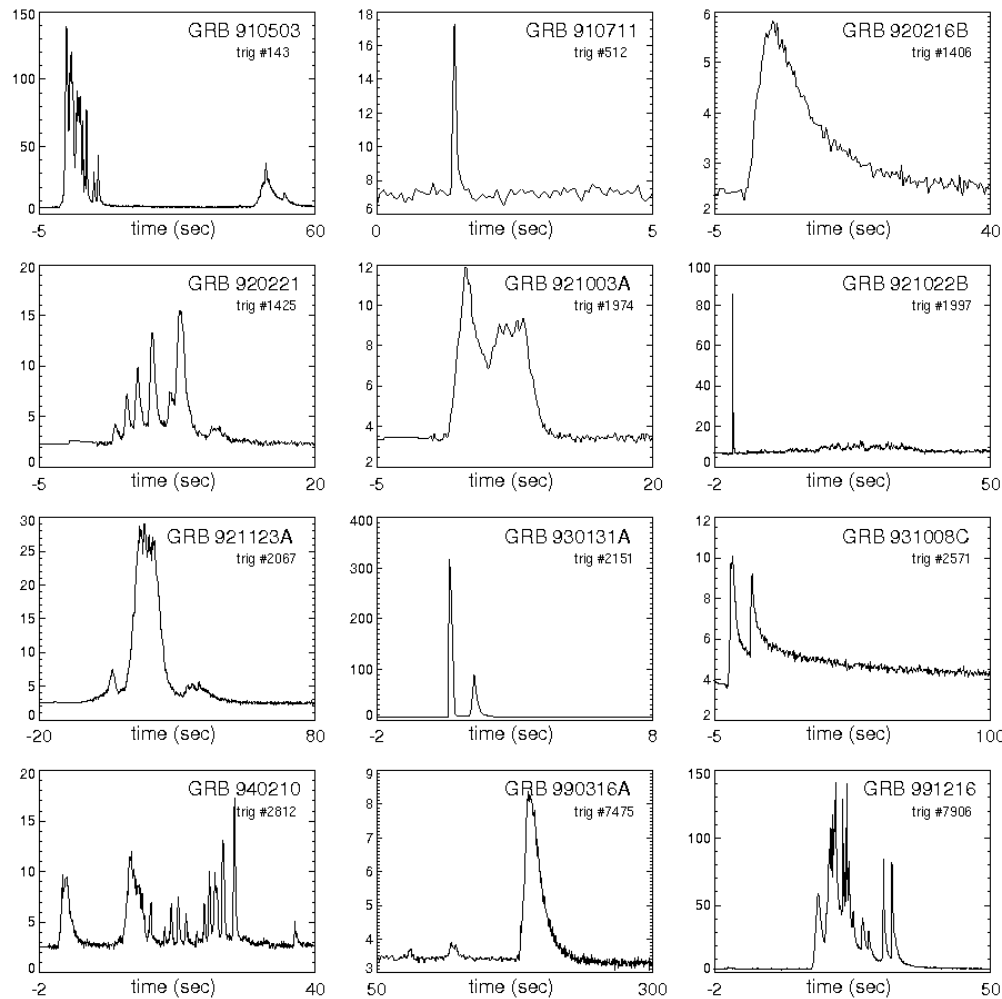
Для FRB активно предлагают механизмы, которые ранее предлагались (лет 30 назад) для объяснения гамма-всплесков. Вот один из них.

Дело в том, что для НЗ характерное время падения вблизи поверхности составляет миллисекунды. Поэтому любой феномен с такой длительностью соблазнительно объяснить так

После падения массивного астероида возникает отекающая оболочка. Затем часть вещества разгоняется, и в результате генерируется радио излучение. Механизм радиоизлучения не слишком очевиден. Должна быть слабая рентгеновская вспышка.

Гамма-всплески

Многие модели FRB так или иначе связаны с гамма-всплесками.

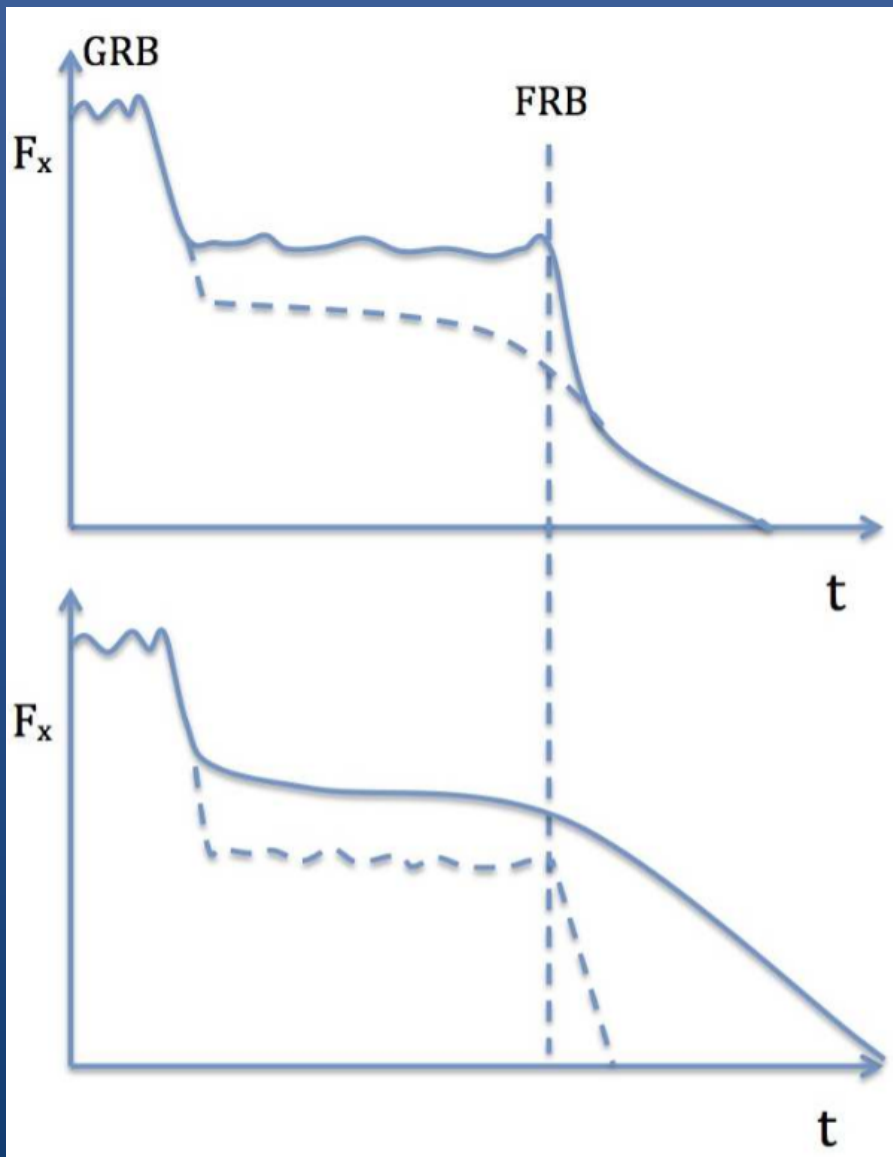


Сама история FRB чем-то похожа (пока) на историю гамма-всплесков.

Слияния нейтронных звезд, супрамассивные НЗ, миллисекундные магнитары потенциально связаны с GRB.

Поиски гамма-всплесков, связанных с быстрыми радиовсплесками не дал результатов (1406.1850).

Супрамассивные НЗ и гамма-всплески

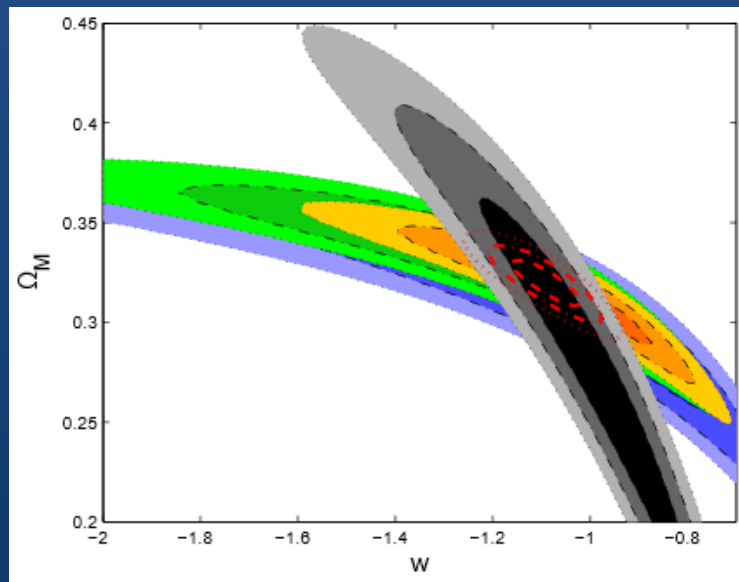


Модель включает в себя образование миллисекундного магнитара (Усов 1992).

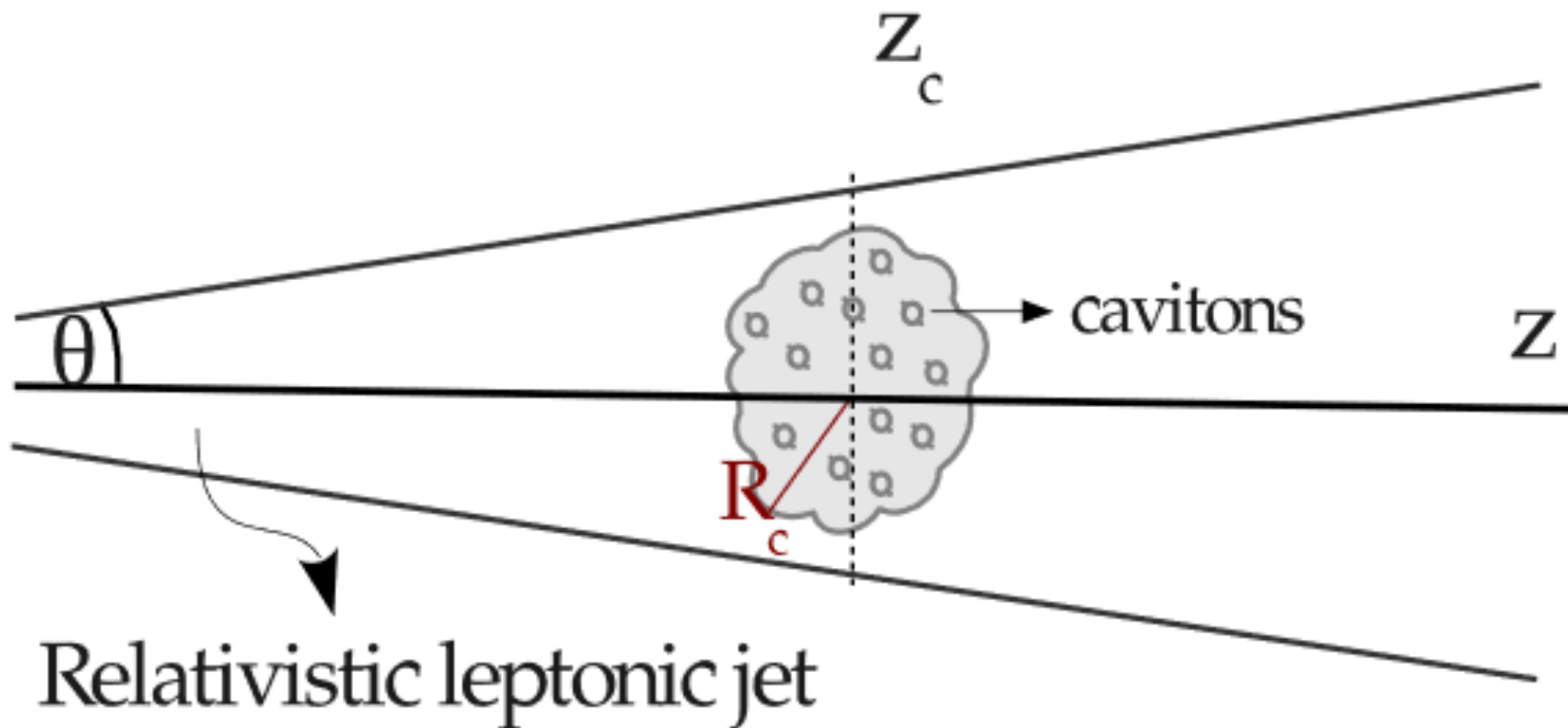
При этом не все FRB должны сопровождаться GRB, и наоборот.

Тогда возникают проблемы с темпом FRB.

Статистика совместных данных по FRB и GRB (если эта модель верна) даст важные данные для космологии.



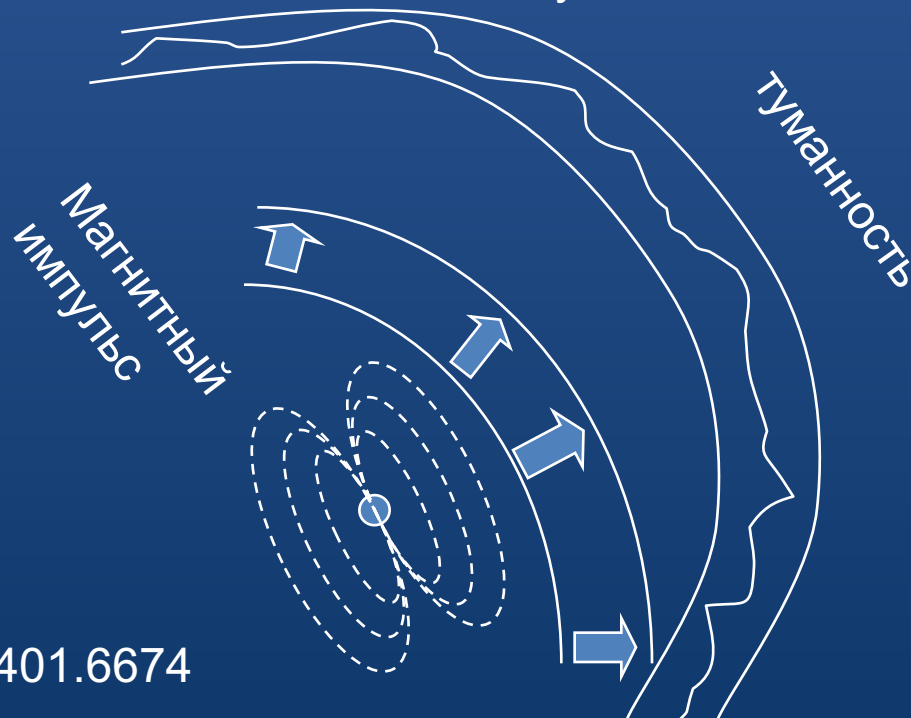
Джеты: Гамма-всплески и активные ядра галактик



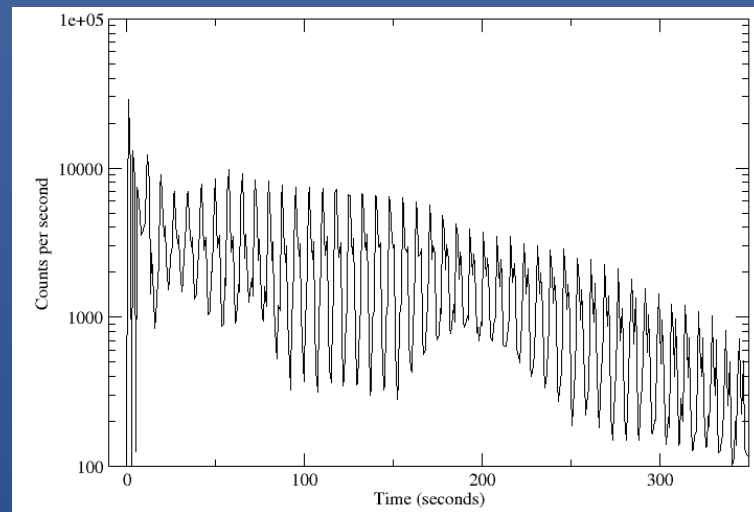
Тормозное излучение в сильной плазменной турбулентности, возбужденной потоком релятивистских электронов.

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.



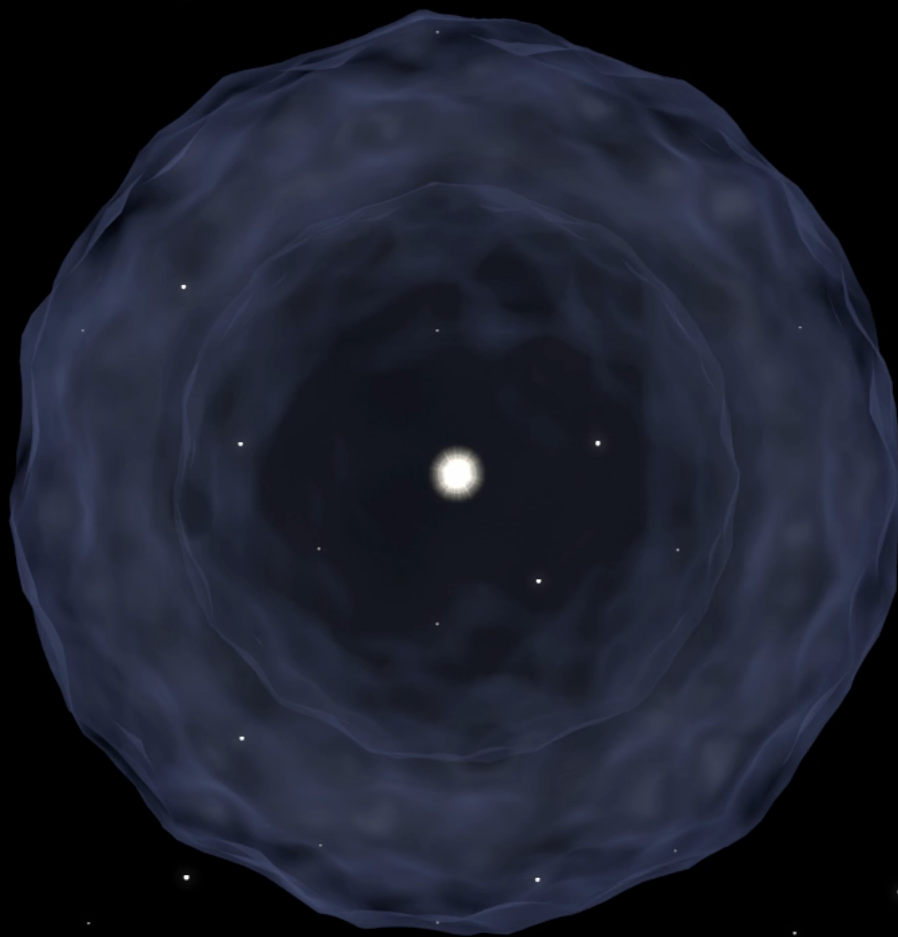
1401.6674



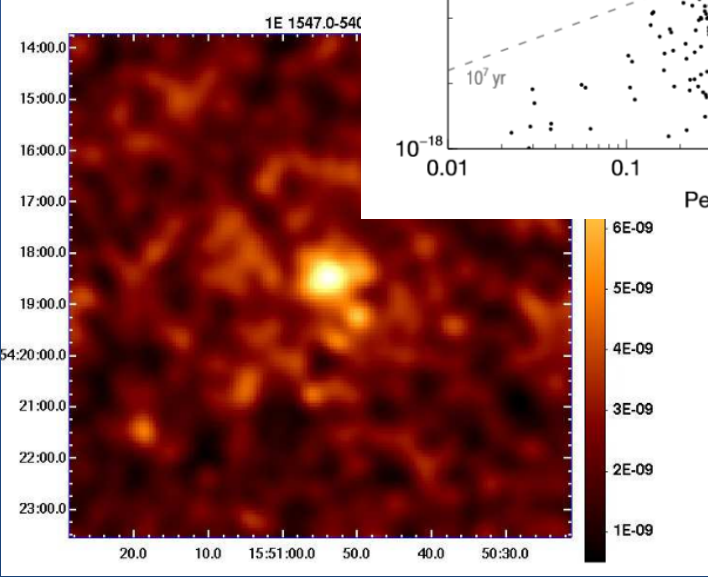
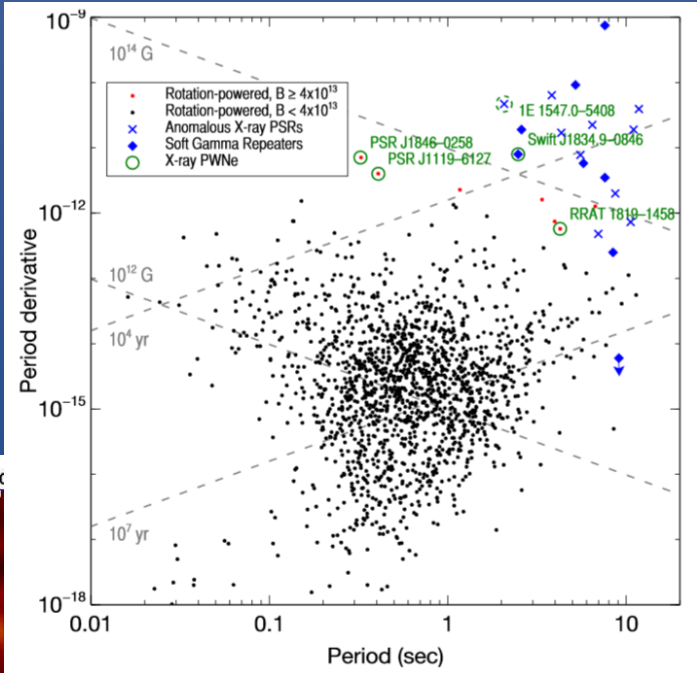
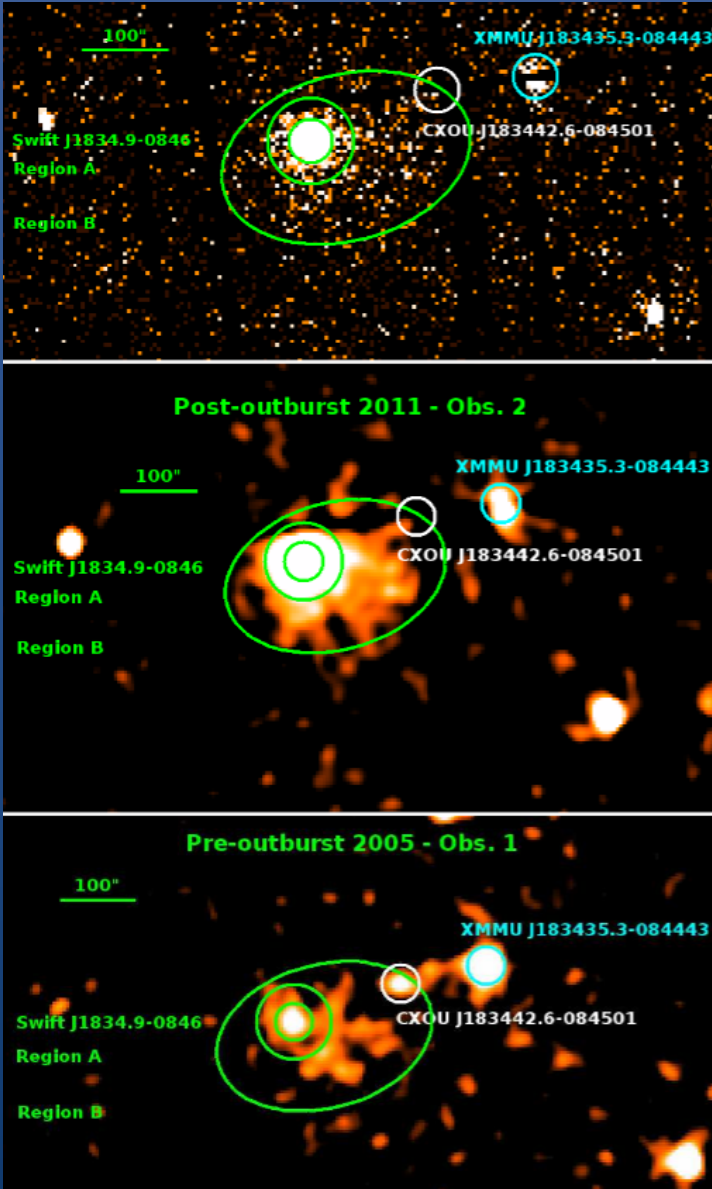
Юрий Любарский в 2014 году построил теоретическую модель, которая позволяет объяснить радиовсплески в рамках магнитарной модели. Пока модель не опровергнута наблюдениями. Для подтверждения необходимо обнаружить магнитарную вспышку. Или, что следует из расчетов Любарского, излучение на очень высоких энергиях.

Модель надо развивать

Магнитар в плотной туманности



Туманности вокруг магнитаров



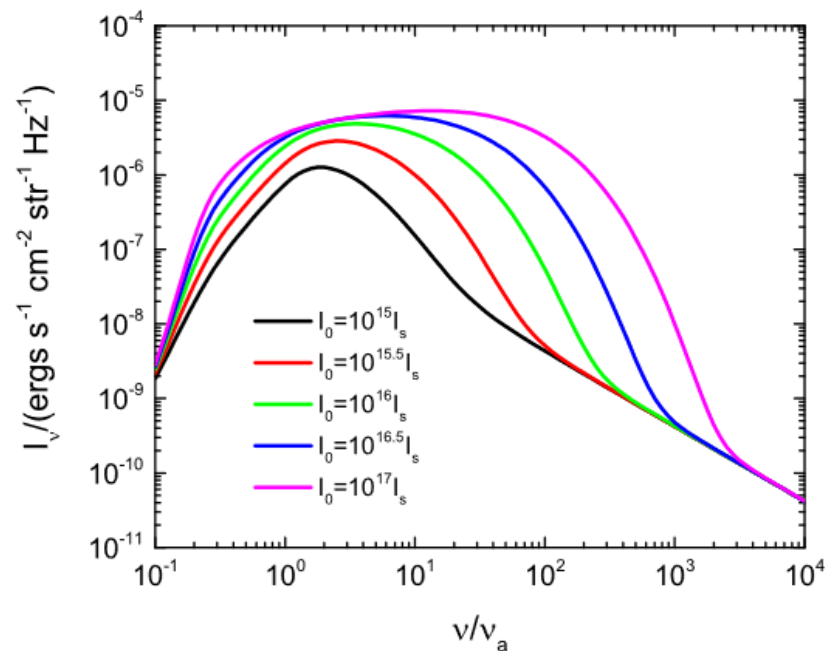
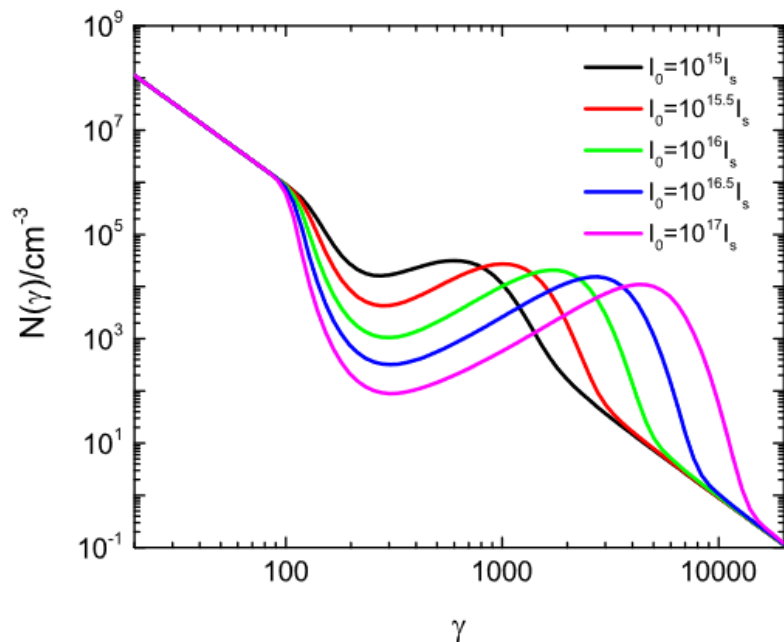
У нейтронных звезд с сильными магнитными полями (включая нормальные магнитары) наблюдают т.н. пульсарные туманности.

1206.3330

0909.3843

1211.0852

Взаимодействие всплеска с туманностью



Всплеск вблизи туманности может привести к ее подсветке (возбуждению) и появлению спектральных деталей.

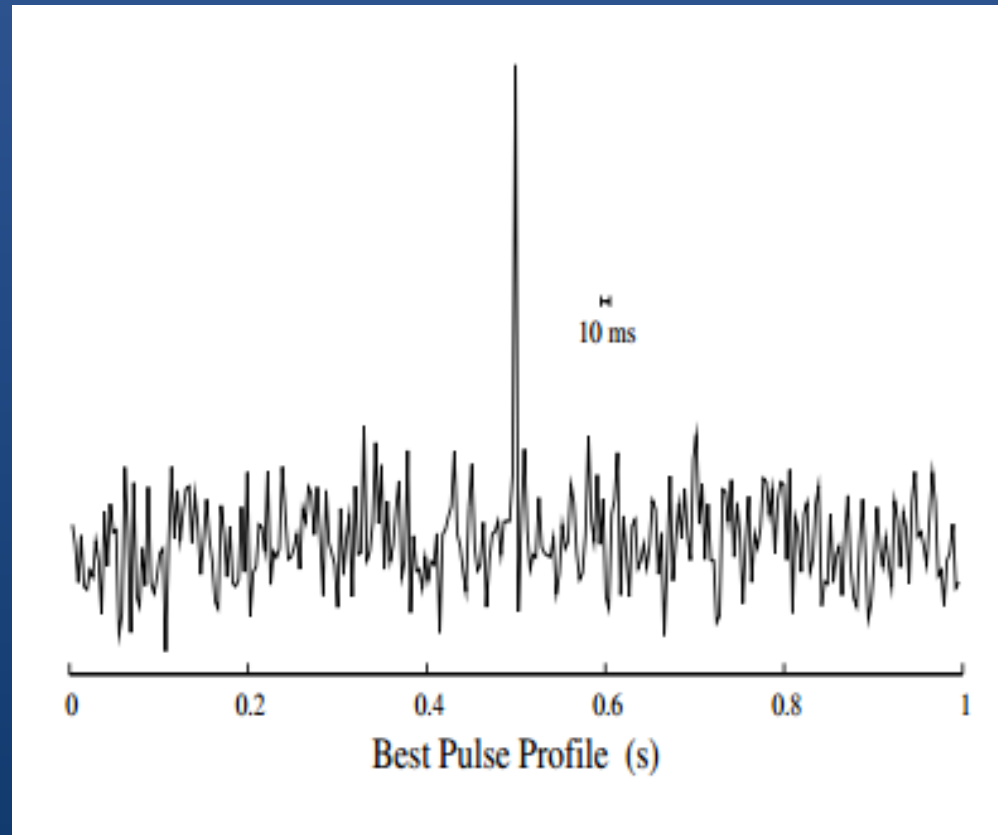
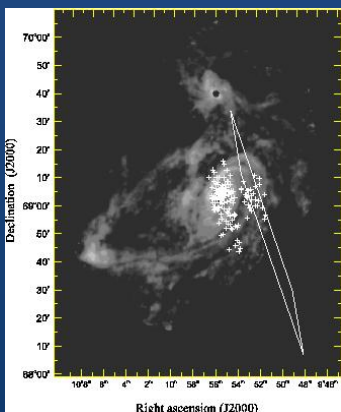
Вспышки из М31

Затем 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.



«Ядерные» магнитары и др.

Существуют разные варианты магнитарной гипотезы:

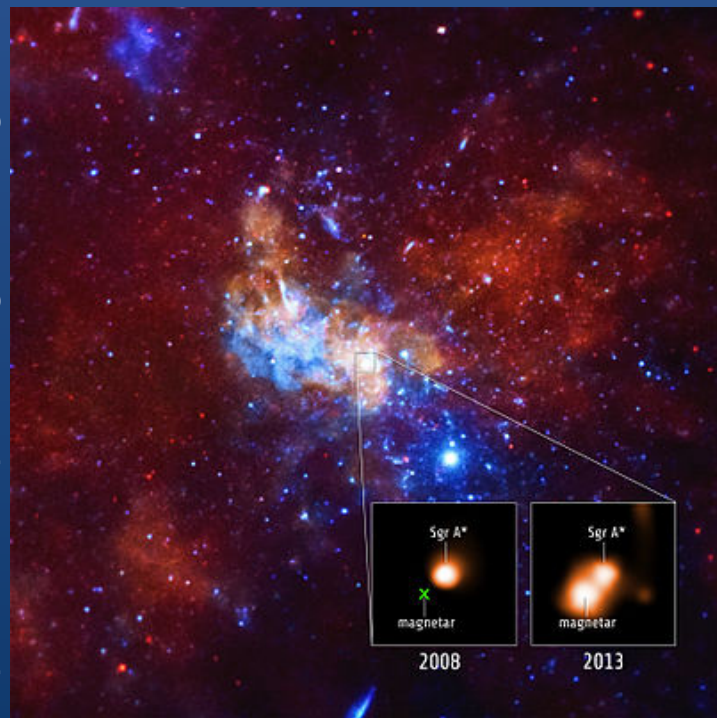
- «Ядерные» магнитары – магнитары в ядрах галактик, подобные SGR J1745-290 (1501.01341).

У этого объекта мера дисперсии $DM=1778$.

Идея состоит в том, что FRB дают внегалактические магнитары в центрах галактик.

- Молодые магнитары (1511.09137).

<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetar>



По мере роста количества данных магнитарная гипотеза (возможно с некоторыми уточнениями и вариациями) становится все более и более привлекательной.

Еще одна версия магнитарной модели

Аннигиляция



Поток гамма-лучей



Комптоновское рассеяние на холодной плазме



Поток релятивистских электронов



Плазменная неустойчивость

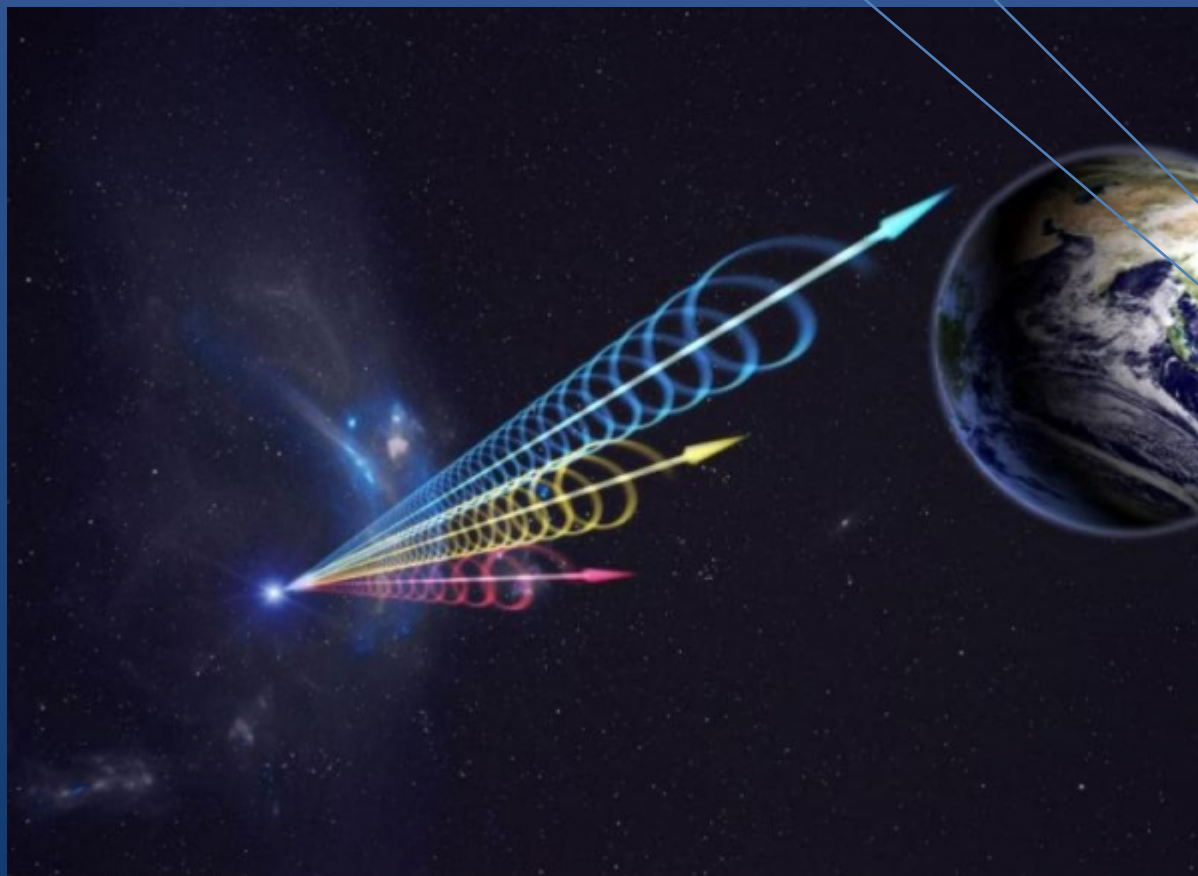
Новые аргументы в пользу магнитаров

- Фарадеевское вращение (1512.00529)
- Плотная среда вокруг (1511.09137)
- Двухкомпонентные профили (1511.07746)

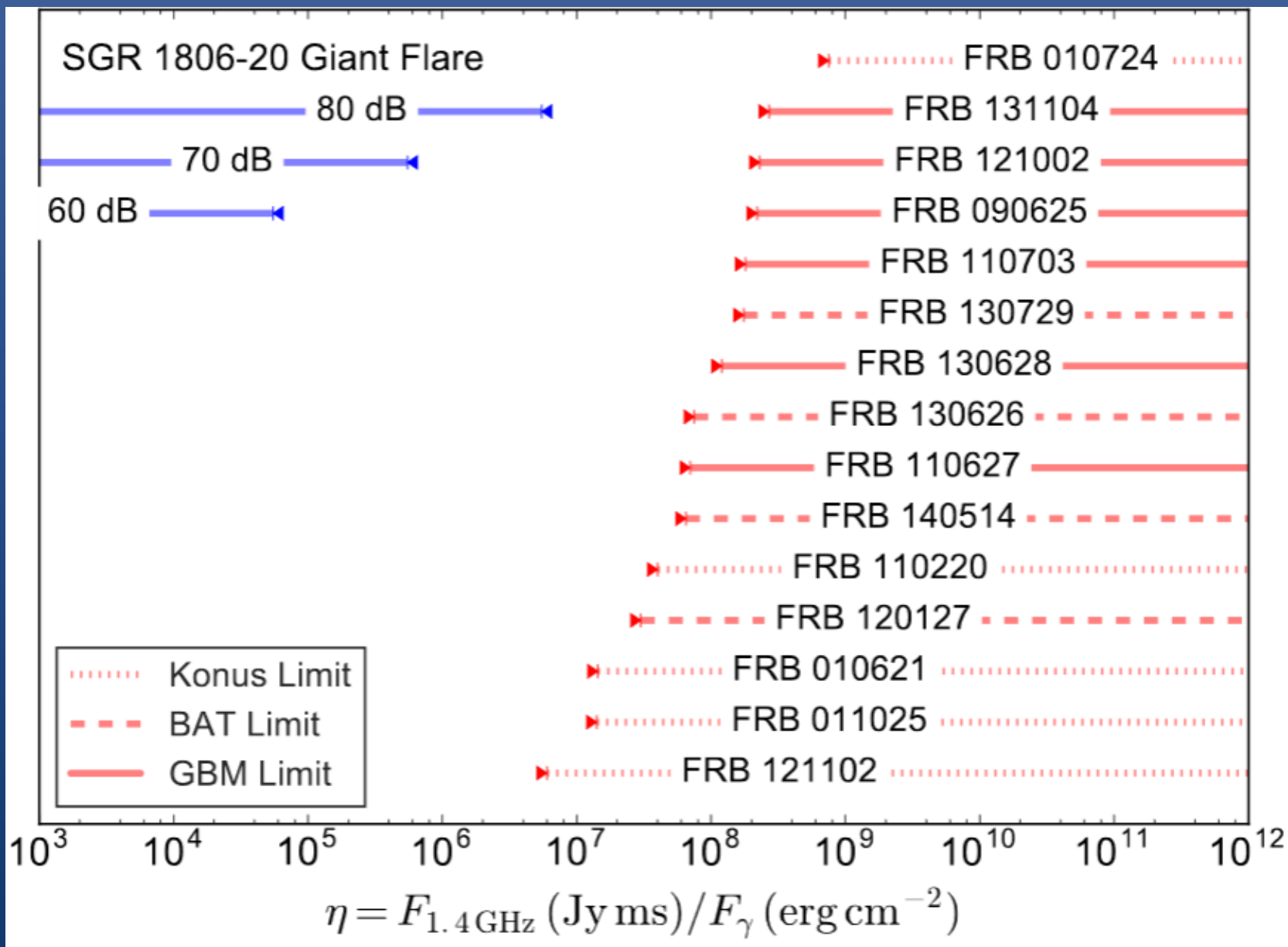
«... the detection in this instance of source-local magnetization and scattering favours models involving young stellar populations such as magnetars over models involving the mergers of older neutron stars.»

«Hyper-giant flares from young magnetars emerge as the most likely progenitors.»

«However the Cordes & Wasserman (2015) model of supergiant pulses and the Popov & Postnov (2007) hyperflares could both account for this structure.»



Проблемы магнитарной гипотезы



Текущий рейтинг гипотез

- Обнаружение повторных всплесков с высоким темпом дает аргументы в пользу супергигантских импульсов пульсаров
- Идентификация материнской эллиптической галактики и обнаружение сопутствующего медленного радиотранзиента дает аргументы в пользу слияния
- Комплекс данных дает несколько косвенных аргументов в пользу магнитарной гипотезы.

Выводы:

- На сегодняшний день есть три хорошие рабочие гипотезы.
- Возможно, популяция БРВ не однородна, т.е. все три гипотезы могут быть верны.

Будущие наблюдения

FAST



FAST –
всплеск за неделю

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).

SKA



SKA –
всплеск за час

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

Ближайшее будущее



Работает новая система ALFABURST
в Аресибо (1511.04132)

Идет поиски по архивам
разных радиотелескопов.

Ключевые моменты:

- Повторяемость
- Обнаружение в другом диапазоне

Продолжаются наблюдения
на радиотелескопе Parkes
с новой системой
мониторинга помех.



Специальные проекты

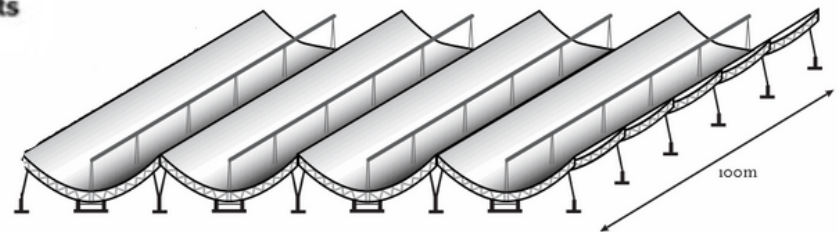


SUPERB
Survey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts

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

CHIME

The Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment



1406.2288



<http://astronomy.swin.edu.au/research/utmost/>

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

Итого

- В 2007 г. был открыт новый класс транзиечных объектов
- Всплески (пока?) видны только в радио
- Известно менее 20 всплесков
- Число моделей превосходит число известных всплесков
- Сейчас есть три хорошие модели, поддерживаемые данными
- Ситуация похожа на проблему гамма-всплесков лет 40 назад
- Ждем, что новые наблюдения позволят выбрать верную модель

