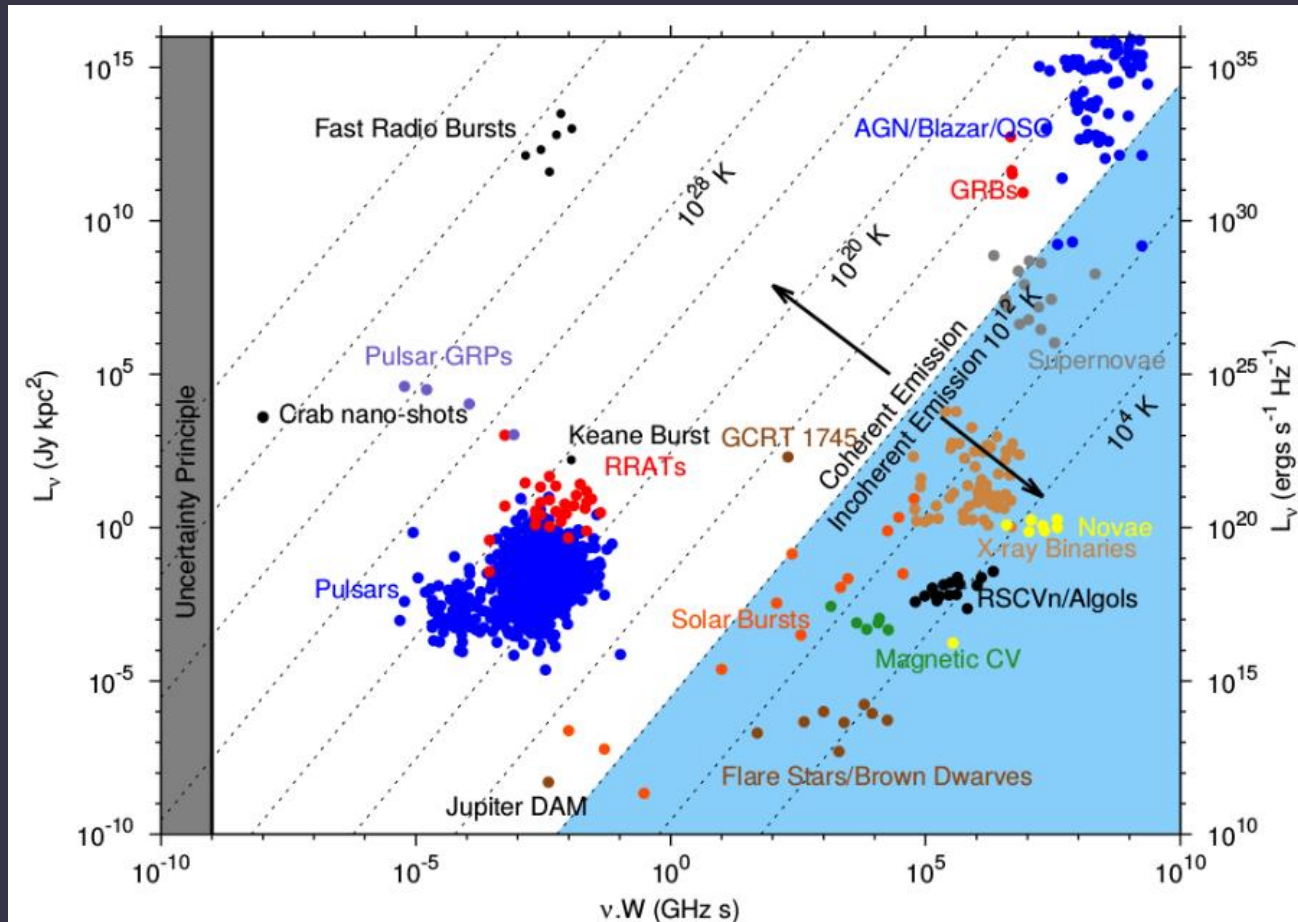


Fast radio bursts: a new exotic puzzle in astrophysics

SERGEI POPOV (SAI MSU)

CO-AUTHORS: K. POSTNOV, M. PSHIRKOV, M. LYUTIKOV, L. BURZAWA

Radiotransients



Many different types of transient sources are already detected at radio wavelengths.

However, detection of very short and non-repeating flares of unknown sources without identification at other bands is a very complicated task.

Rotating Radio Transients (RRATs) – millisecond radio bursts from neutron stars, - have been identified in 2006.

In 2007 the first example of a new class of millisecond radio transients have been announced: the first extragalactic millisecond radio burst.

Brightness temperature

Black-body radiation

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Brightness temperature

$$T_b = \frac{h\nu}{k} \ln^{-1} \left(1 + \frac{2h\nu^3}{I_\nu c^2} \right)$$

For $h\nu \ll kT$ we have

$$T_b = \frac{I_\nu c^2}{2k\nu^2}$$

$$2\pi kT_b = \frac{S_\nu D^2}{(W_\nu)^2}$$

$$W \sim l/c,$$

$$T_b \approx 10^{35.8} [\text{K}] \left(\frac{S_\nu}{1 \text{ Ян}} \right) \left(\frac{(D/1 \text{ Гпк})}{(\nu/1 \text{ ГГц})(W/1 \text{ мс})} \right)^2$$

Inverse Compton catastrophe

Inverse-Compton losses

very strongly cool the relativistic electrons

if the source brightness temperature

exceeds $T_b \sim 10^{12}$ K in the rest frame of the source

see astro-ph/0611667

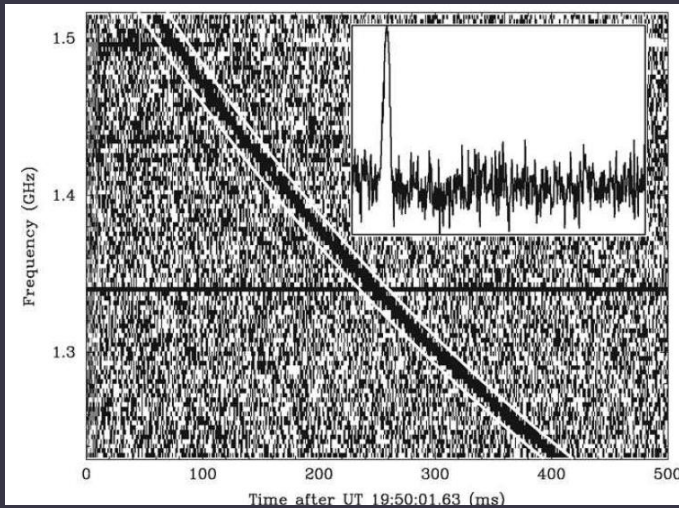
$$\frac{L_{\text{IC}}}{L_s} = \left(\frac{T_B}{T_{\text{thresh}}} \right)^5 \left[1 + \left(\frac{T_B}{T_{\text{thresh}}} \right)^5 \right]$$

$$\left(\frac{\nu_m}{10^9 \text{ Hz}} \right) \left(\frac{T_B}{10^{12} \text{ K}} \right)^5 = 1$$

History of FRBs

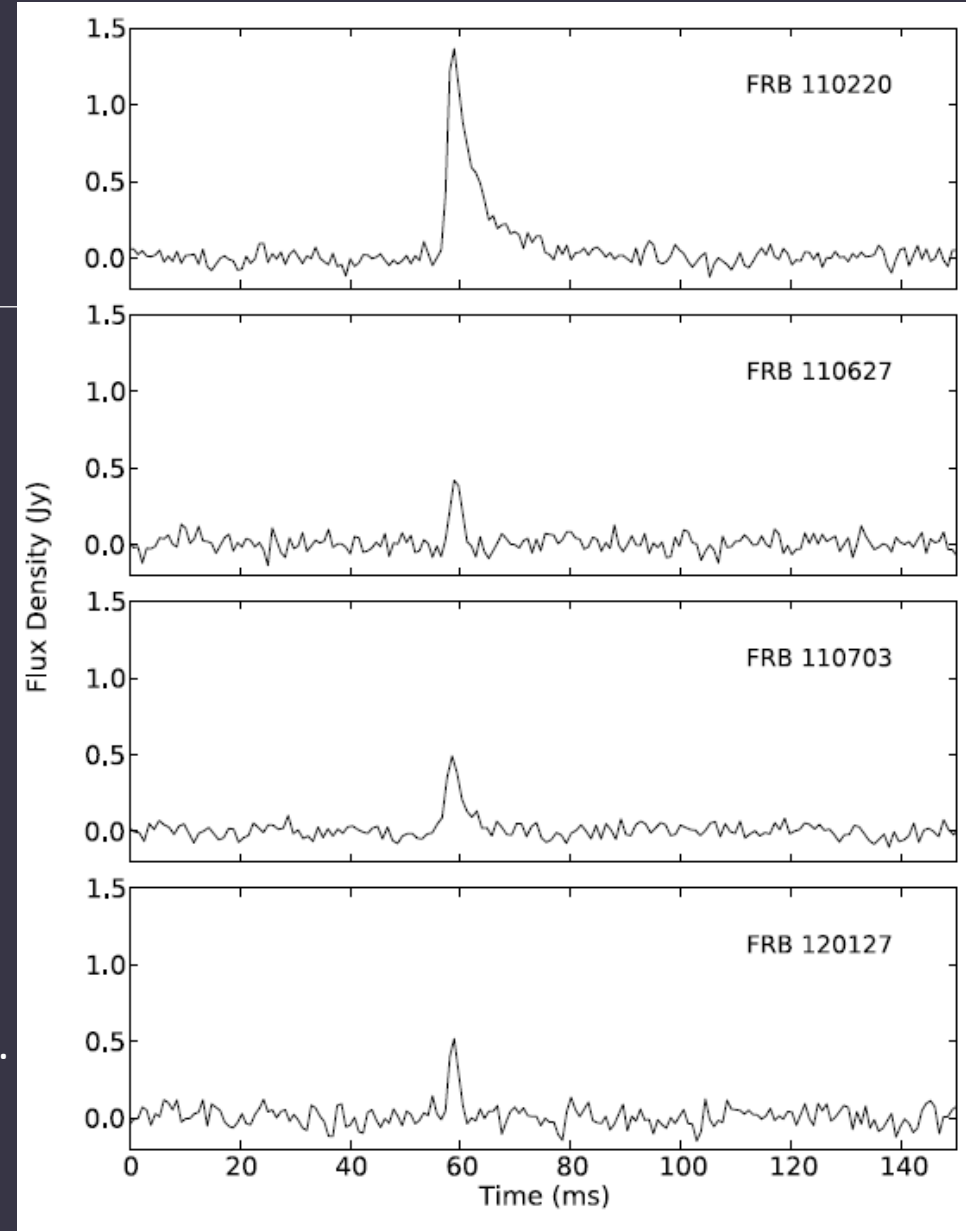
- 2007 Lorimer et al. The first event announced.
- 2012 Keane et al. The second event.
- 2013 Thornton et al. Four events. The story really starts.
- 2016 Spitler et al. The first repeating source.
Chatterjee et al. Identification of the host galaxy

Lorimer et al.

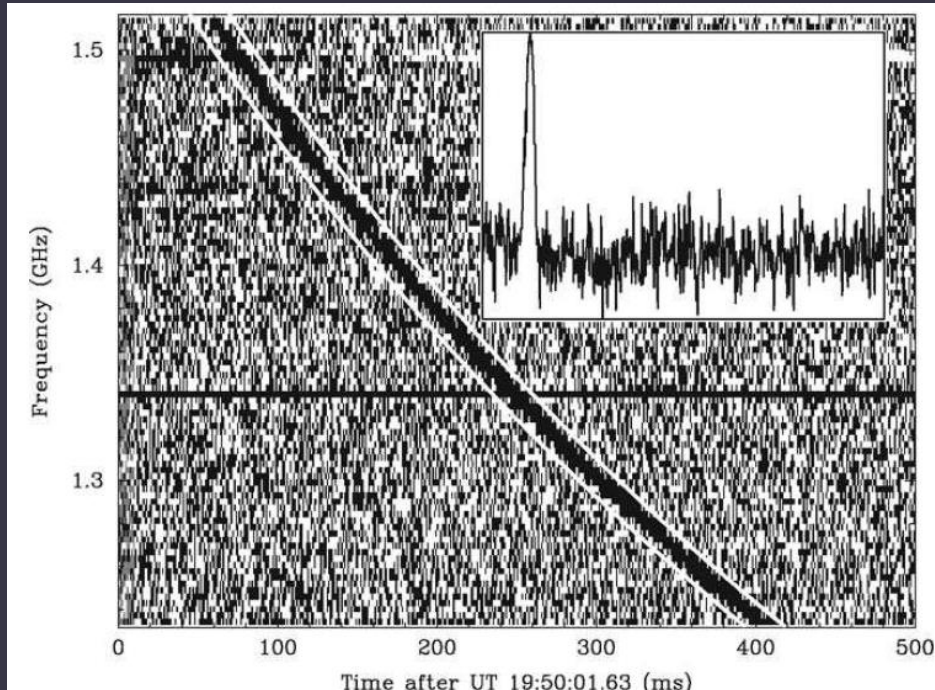


Large dispersion measure points to extragalactic origin.

This is supported by isotropic sky distribution and many other considerations.

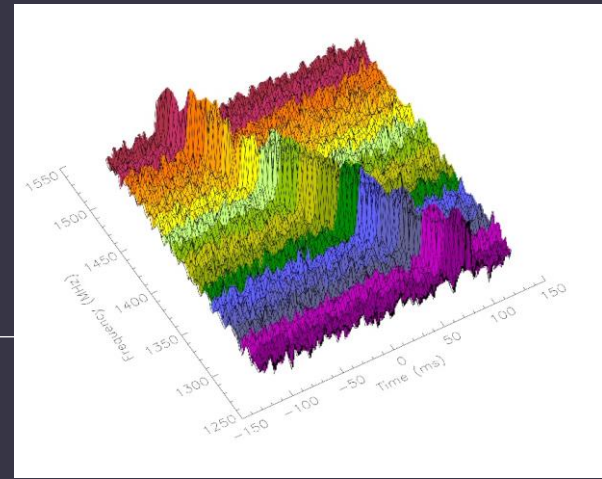


Миллисекундные радиовсплески



Открыты в 2007 году.

**Происхождение
неизвестно.**



Одно из самых интересных открытий 2007 г.

В направлении всплеска не были видны вспышек в других диапазонах.

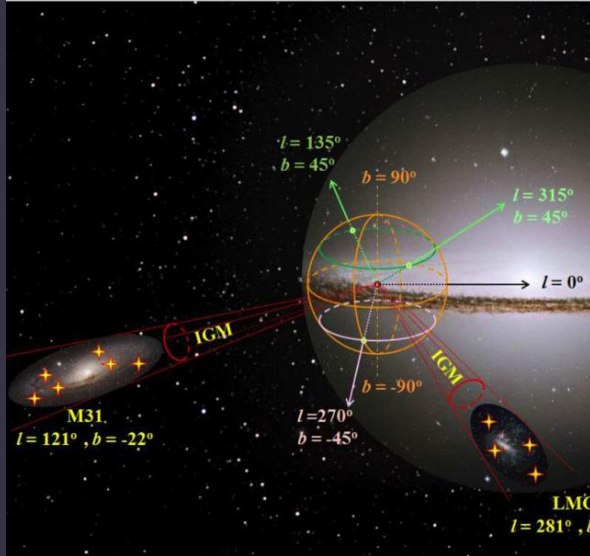
Идентифицировать источник не удалось.

[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

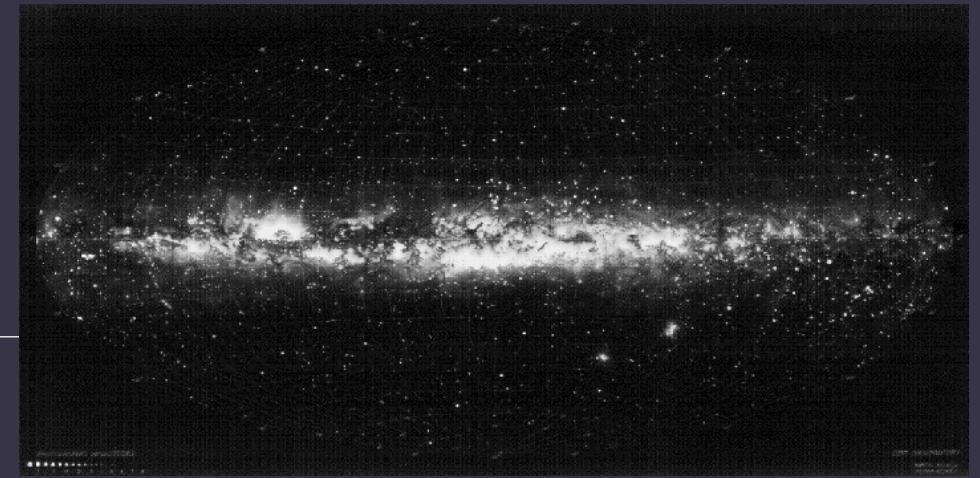
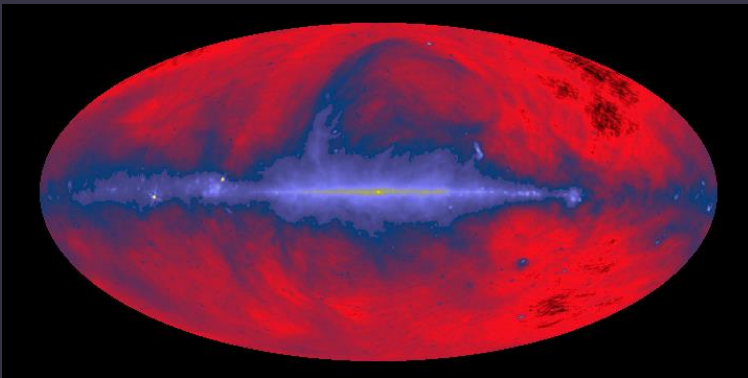
Мера дисперсии

1504.00200

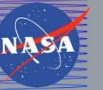
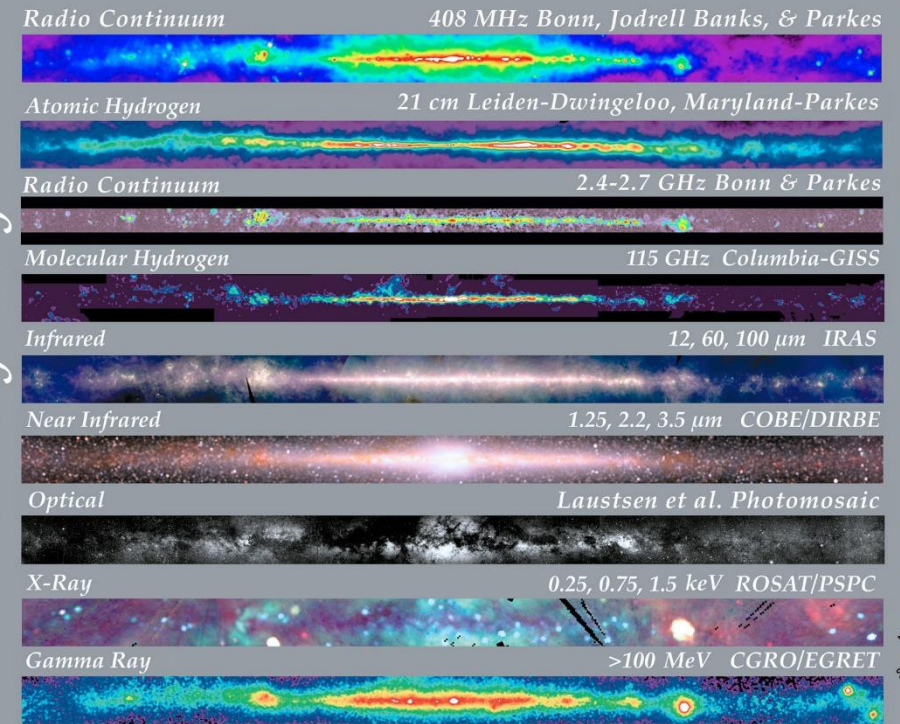


$$t = k_{\text{DM}} \times \left(\frac{\text{DM}}{\nu^2} \right)$$

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



Multiwavelength Milky Way



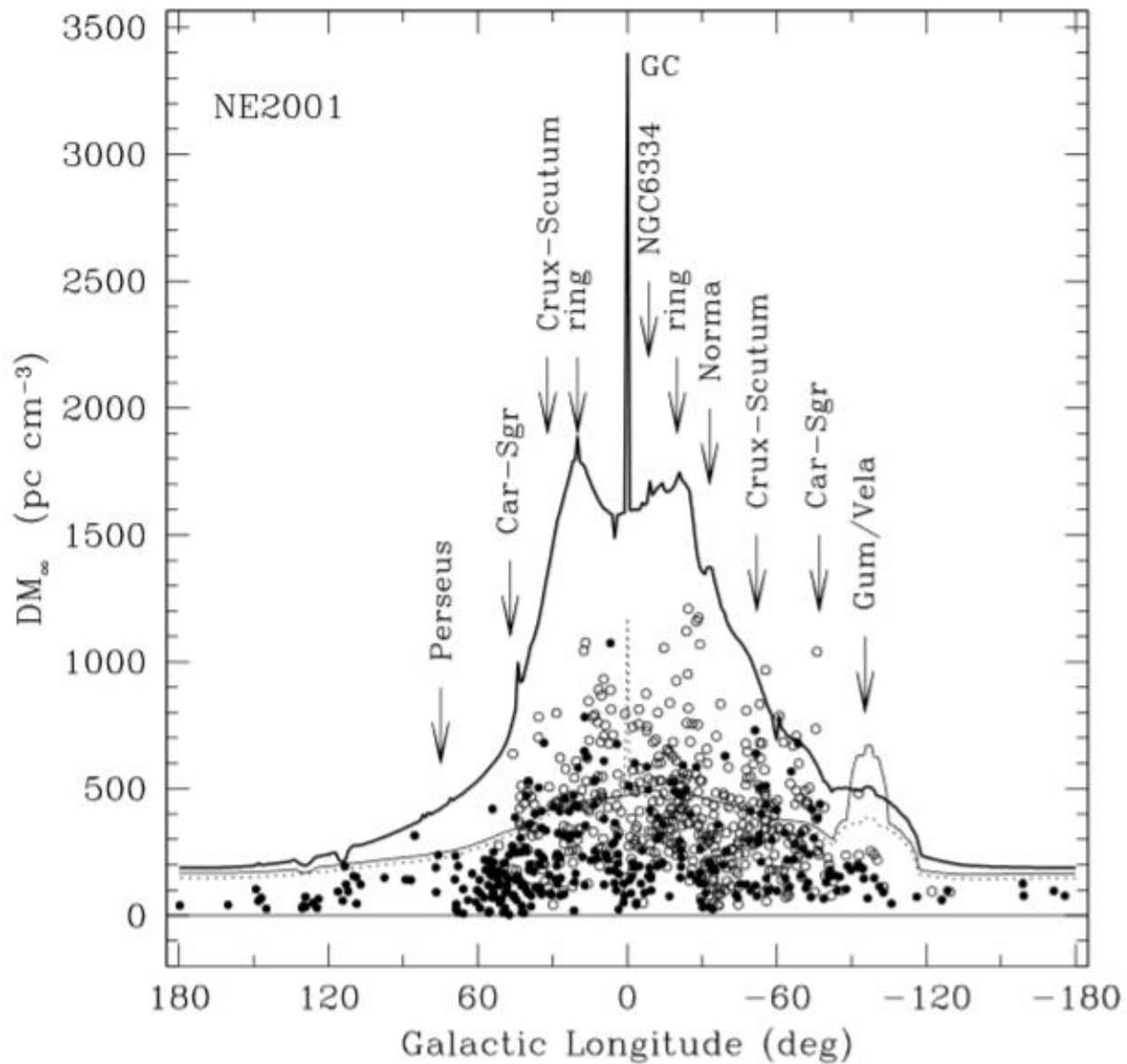
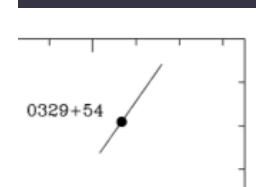
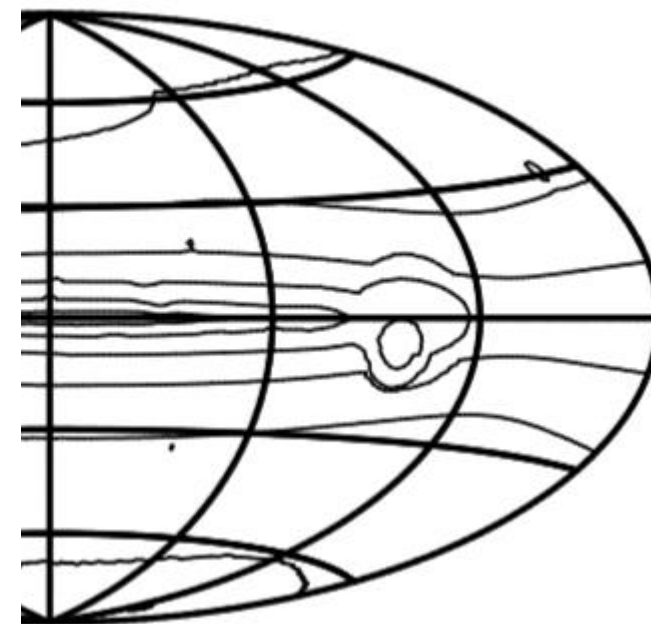


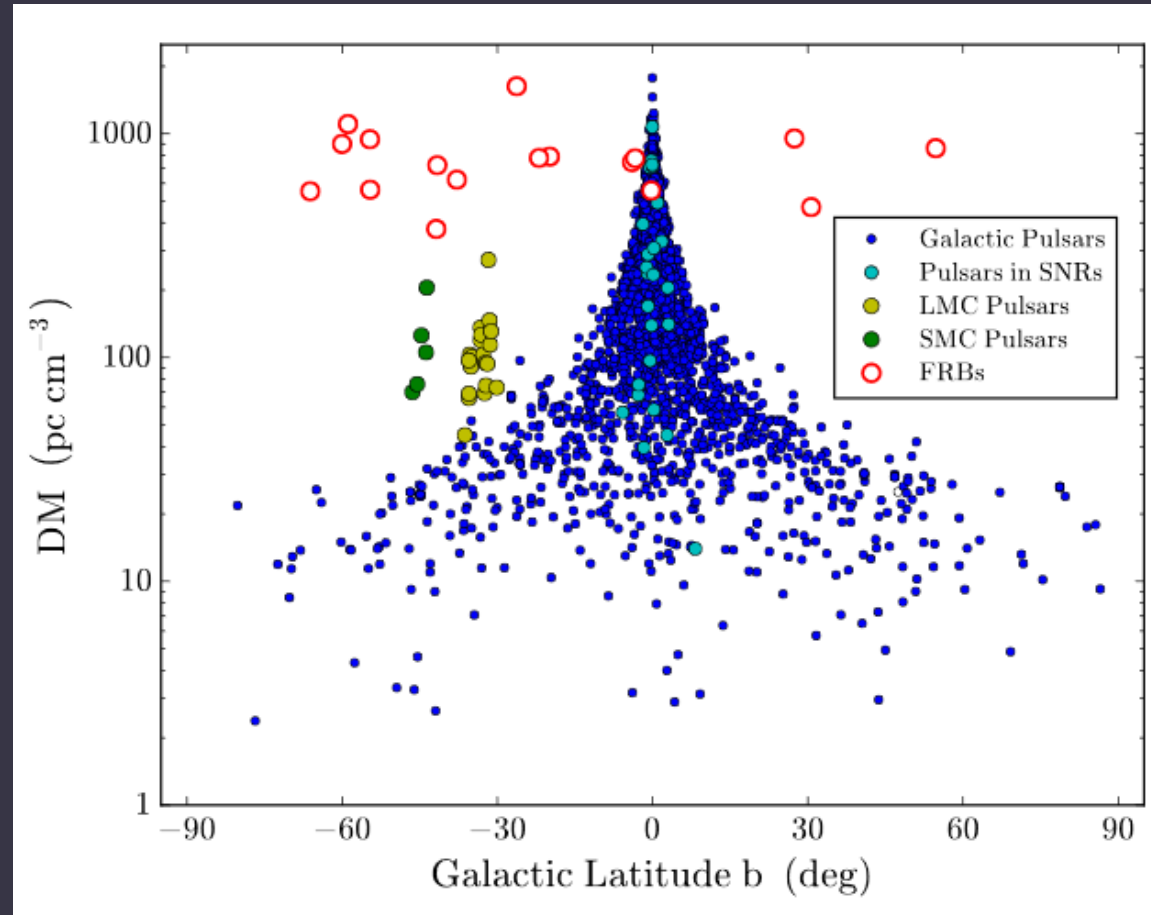
FIG. 11.— Plot of $DM_\infty(\ell, b)$, the maximum DM obtained by integrating the NE2001 model. Heavy solid line: $b = 0^\circ$.



SPERSION MEASURE

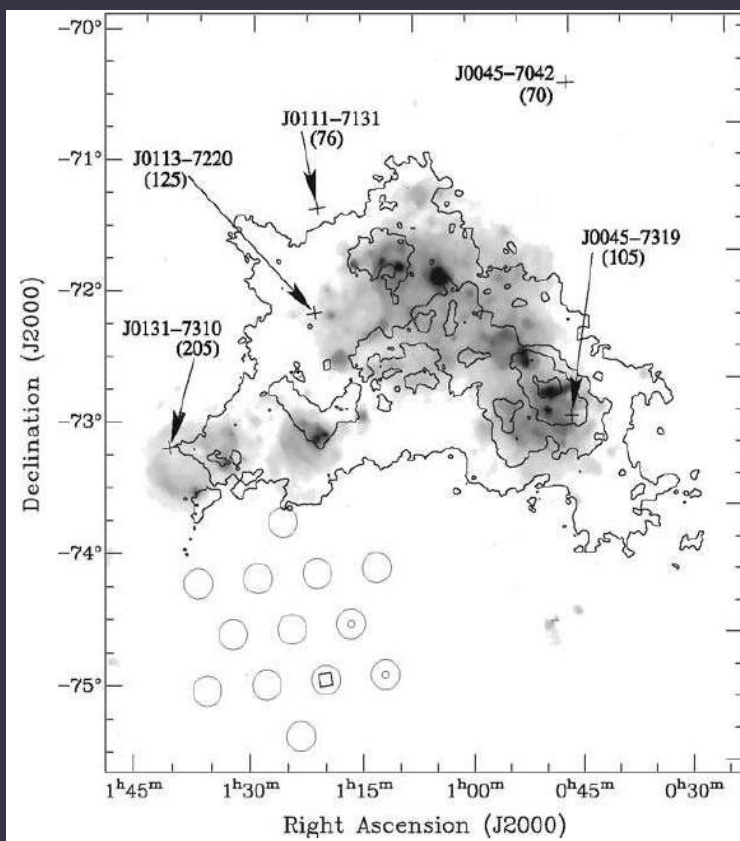


Сравнение с пульсарами



Первый всплеск

Science 318, 777 (2007)



Открыт в Парксе
Дунканом Лоримером и др.

~30-40 Ян, < 5 мсек.

3 градуса от Малого
Магелланового Облака



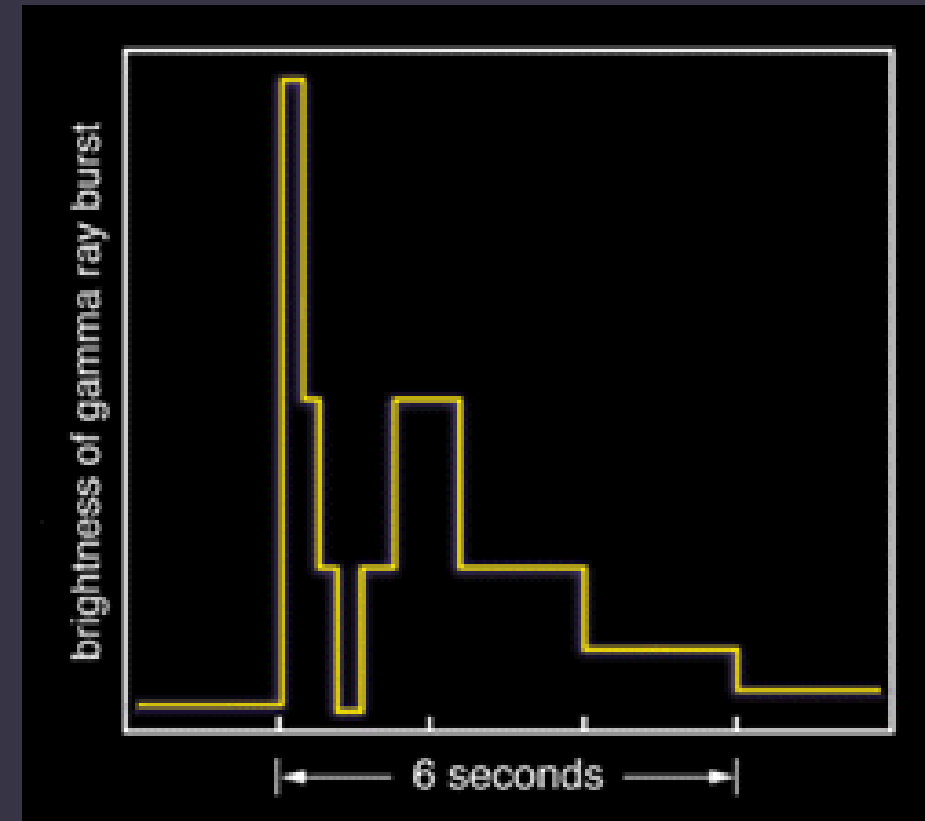
$$\mathcal{L} = 1.3 \times 10^{41} \text{ erg/s} \left(\frac{S_\nu}{1 \text{ Jy}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{1.4 \text{ GHz}} \right) \left(\frac{\Omega}{1 \text{ sr}} \right) \left(\frac{D}{1 \text{ Gpc}} \right)^2$$

История повторяется? GRB2.0?



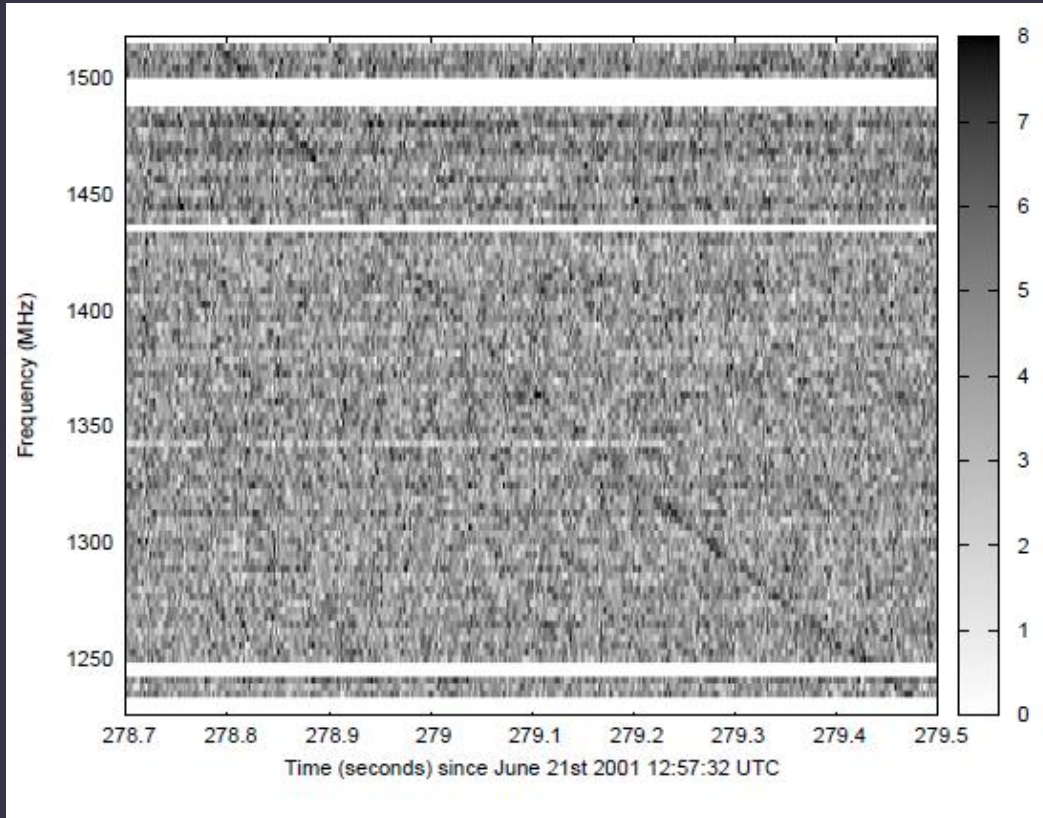
В конце 60 гг. были открыты космические гамма-всплески. 30 лет они оставались загадкой, т.к. в направлении всплеска не удавалось увидеть сигнал в другом спектральном диапазоне.

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



Второй случай?

1206.4135



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

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.

Perytons

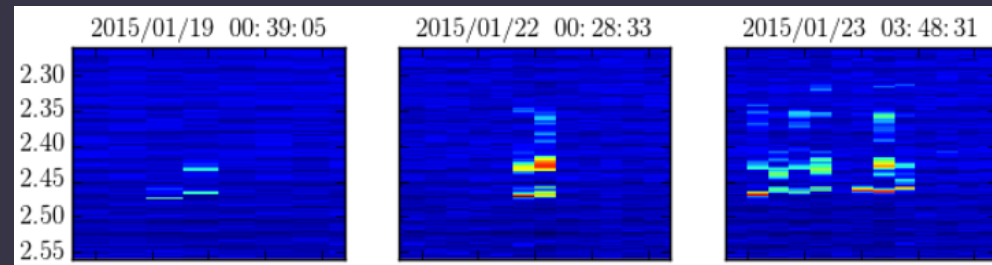
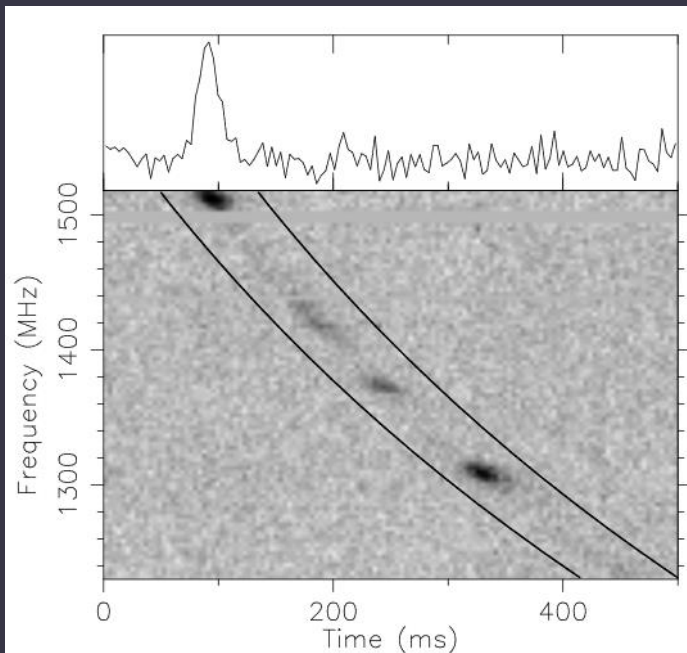
Перитоны начали активно обсуждать несколько лет назад. Их свойства сразу говорили о том, что это должны быть всплески где-то вблизи (максимум – земная атмосфера).

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.



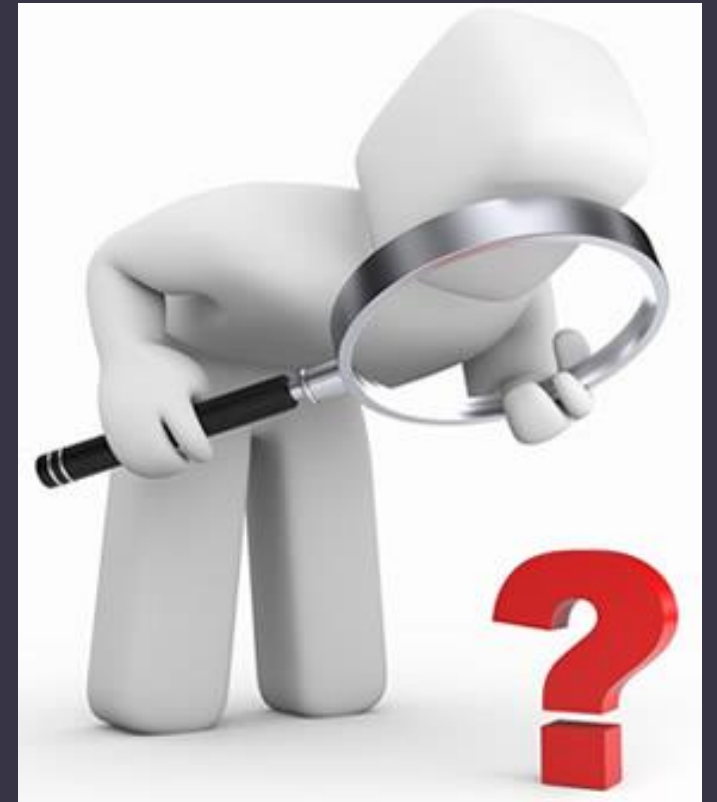
Сомнения

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

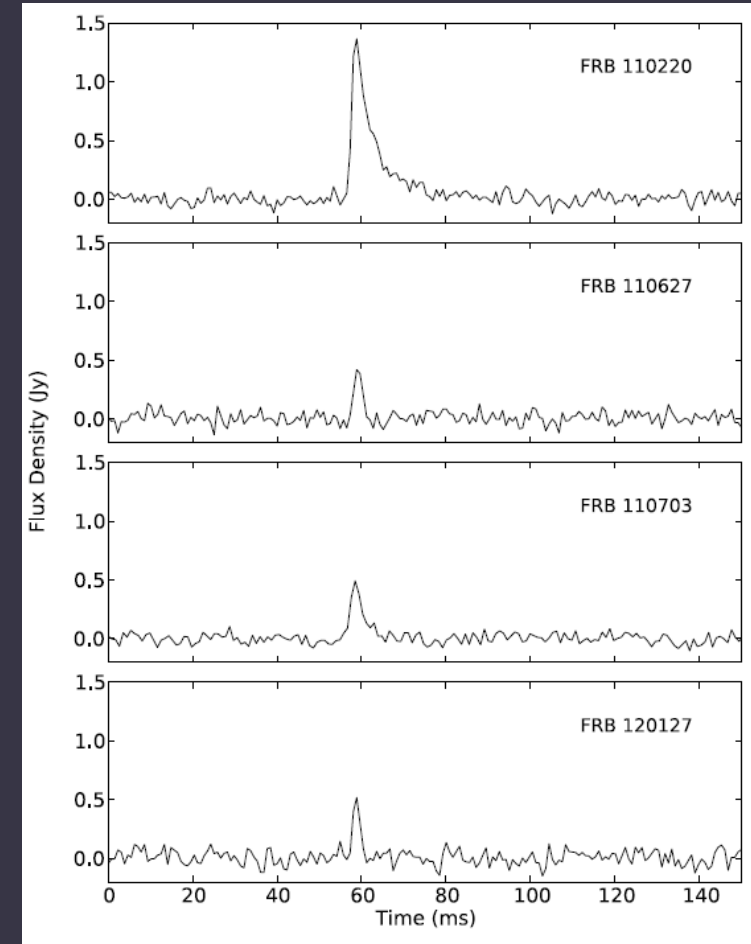
В 2007 г. был обнаружен первый всплеск.
Но пока он был один – были сомнения.
В 2012 – еще один, но сомнения остались.

В 2013 – сомнения долей! Еще четыре!

Темп ~ неск. тысяч в день на всем небе.

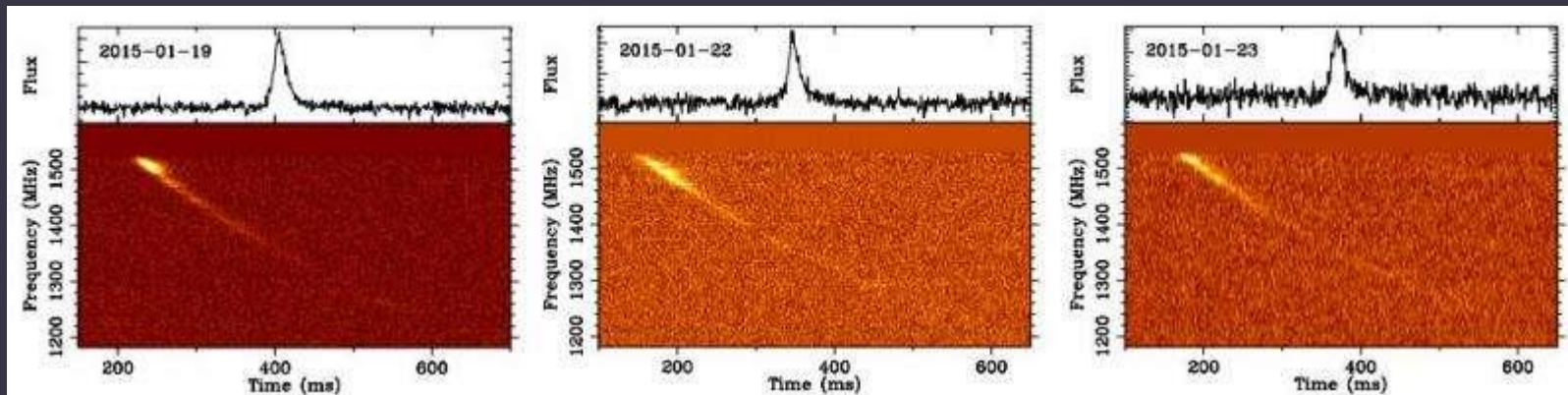
Это явно новый класс событий,
происхождение которых неизвестно:

Появилось устоявшееся название
Fast Radio Bursts



Перитоны – микроволновки!

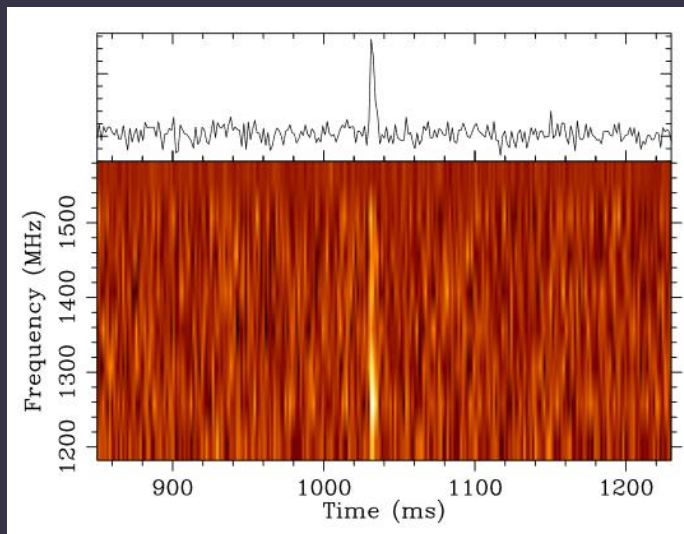
1504.02165



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.

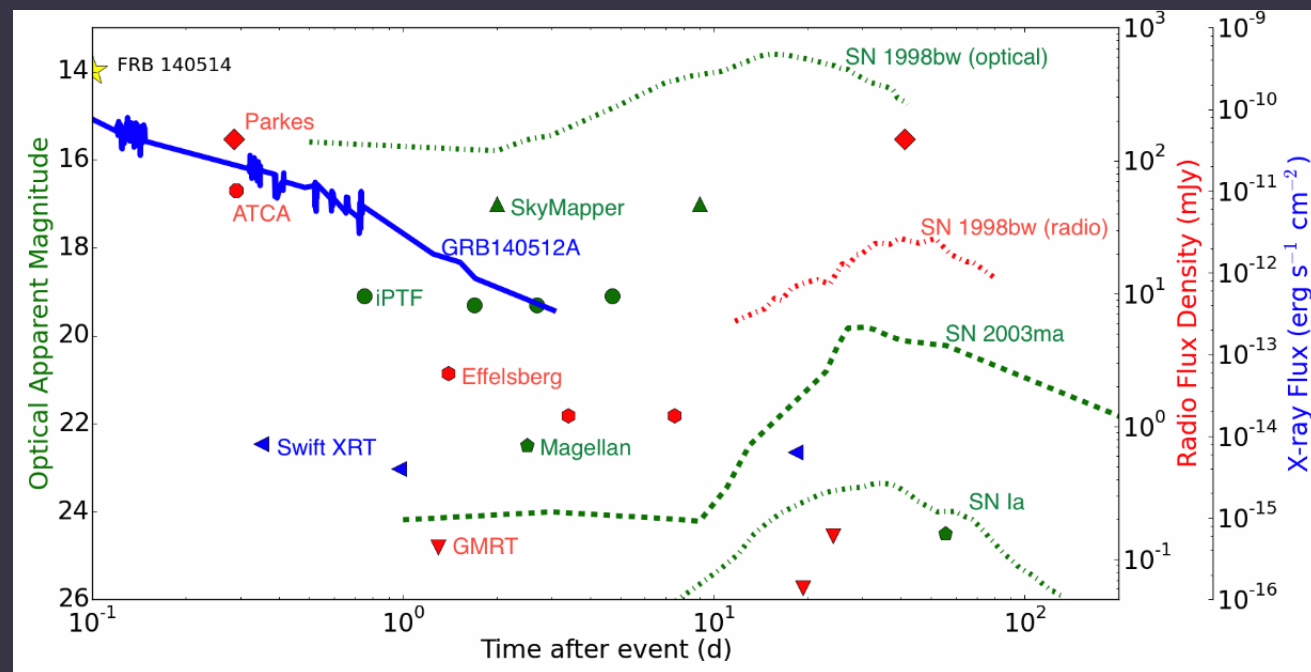
Первый всплеск в реальном времени

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.

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




Catalogue

32 FRBs
+
one repeater

UTMOST – 5
ASKAP – 1
GBT – 1
Arecibo – 1 (repeater)

Rate: several thousands
per day per sky



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. Sources can now be added to the FRBCAT automatically via the VOEvent Network, details of this process are given in Petroff et al., 2017. FRBs confirmed via publication, or received with a high importance score over the VOEvent Network, are given 'Verified' status and are shown on the default homepage; to see all events (including unverified candidates received via the VOEvent Network) toggle the "Show all/Show verified" button below.

Information for each burst is divided into two categories: intrinsic properties measured using the available data, and derived parameters produced using a model. Cosmological values are obtained using the Cosmology Calculator (Wright, 2006). The intrinsic parameters should be taken as lower limits, as the position within the telescope beam may be uncertain. Where multiple fits or measurements of a burst have been made each one is provided as a separate sub-entry for the FRB.

You may use the data presented in this catalogue for publications; however, we ask that you cite the paper (Petroff et al., 2016) and provide the url (<http://www.frbcatalog.org>). Any issues relating to the use of the catalogue should be addressed to FRBCAT team (primary contact: Emily Petroff).

Visible columns Show verified Export to CSV Search Clear

	FRB	UTC	Telescope	RAJ	DECJ	GL	GB	DM	Width	SNR
+	FRB180311	2018/03/11 04:11:54.800	Parkes	21:31:33.42	-57:44:26.7	337.3	-43.7	1575.6	12	11.5
+	FRB180309	2018/03/09 02:49:32.990	Parkes	21:24:43.8	-33:58:44.5	10.9	-45.4	263.47	0.576	411
+	FRB180301	2018/03/01 07:34:19.760	Parkes	06:12:43.4	04:33:44.8	204.4	-6.4	520	3	16
+	FRB171209	2017/12/09 20:34:23.500	Parkes	15:50:25	-46:10:20	332.2	6.24	1458	2.5	40
+	FRB170922	2017/09/22 11:22:23.400	UTMOST	21:29:50.61	-07:59:40.49	45.1	-38.7	1111	26	22
+	FRB170827	2017/08/27 16:20:18.000	UTMOST	00:49:18.66	-65:33:02.3	303.2	-51.7	176.4±0	0.4	90

<http://frbcatalog.org/>

Самый яркий всплеск: FRB 150807

120+/-30 Ян

Обнаружение в реальном времени.

Нет вспышки или транзиента в других диапазонах.

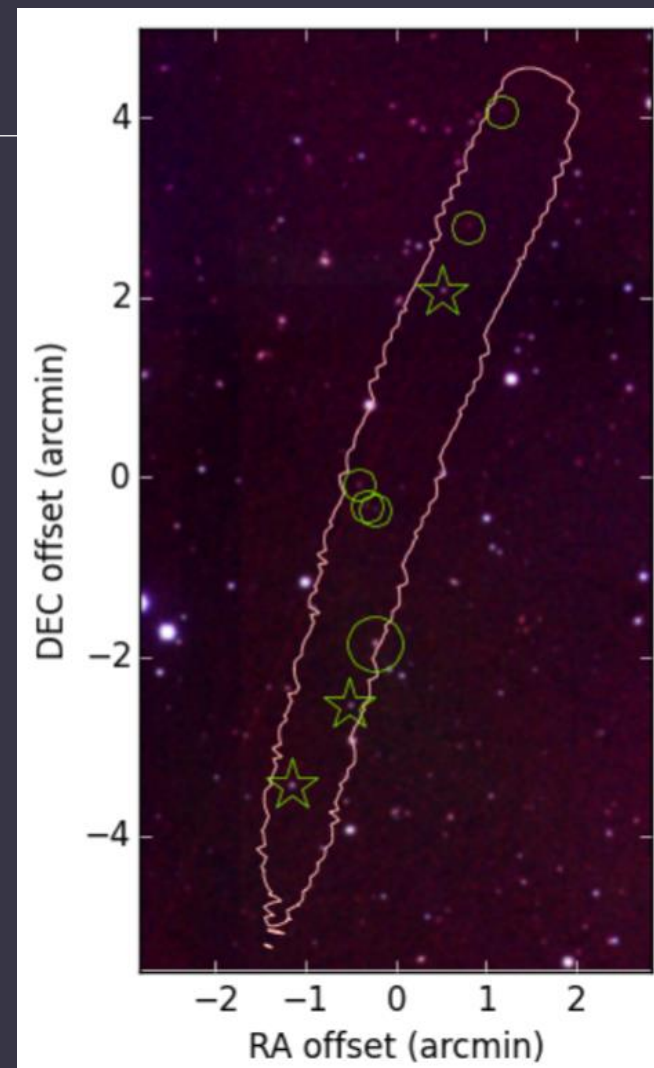
Нет повторных всплесков.

Удалось измерить меру вращения.

Мера дисперсии одна из самых низких ~267.

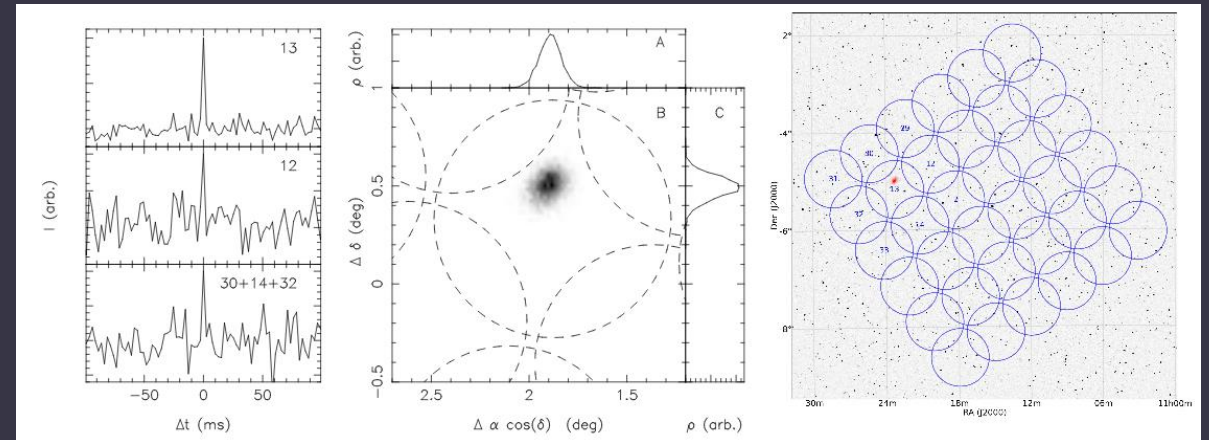
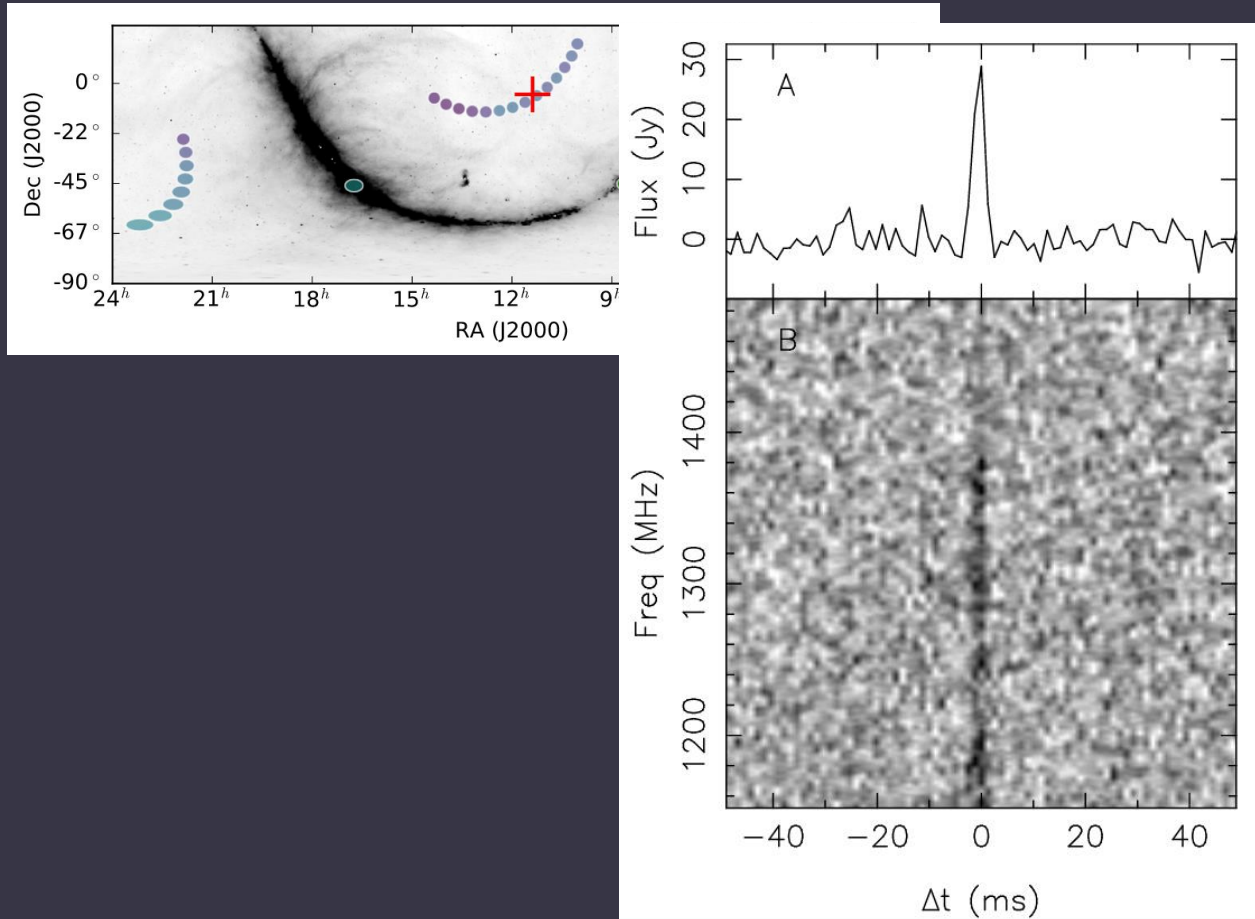
Число ярких (>50 Ян) всплесков может быть
~150-200 в день.

Локализация
9 угловых минут



Ультраяркий всплеск

Флюэнс 58 Ян мсек.
Мера дисперсии ~ 610 .
Длительность 2.6 мсек.
Локализация $8' \times 8'$.
Пиковый поток 25-30 Ян.

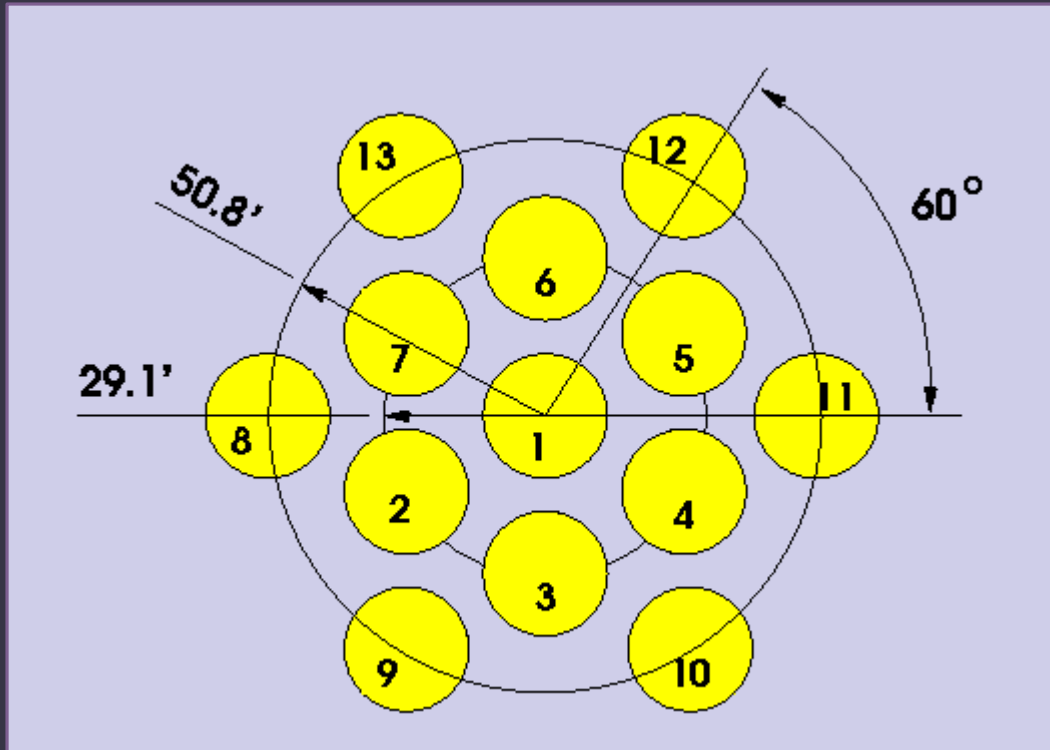


Всплеск был зарегистрирован в нескольких бимах.

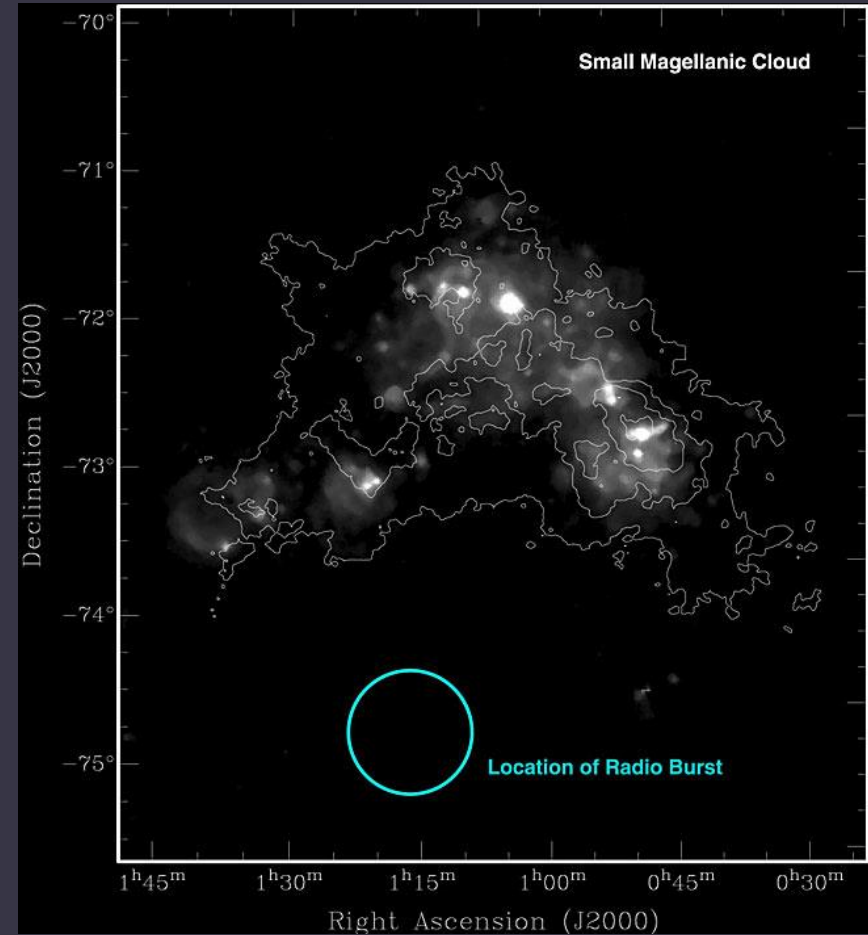
Темп ярких всплесков согласуется с более ранними оценками.

Localization

Radius of uncertainty circle ~ 10 arcmin



Usually FRBs are seen just in one beam.



Повторные всплески

Впервые удалось увидеть повторные всплески от FRB 121102.

Наблюдения на Аресибо.

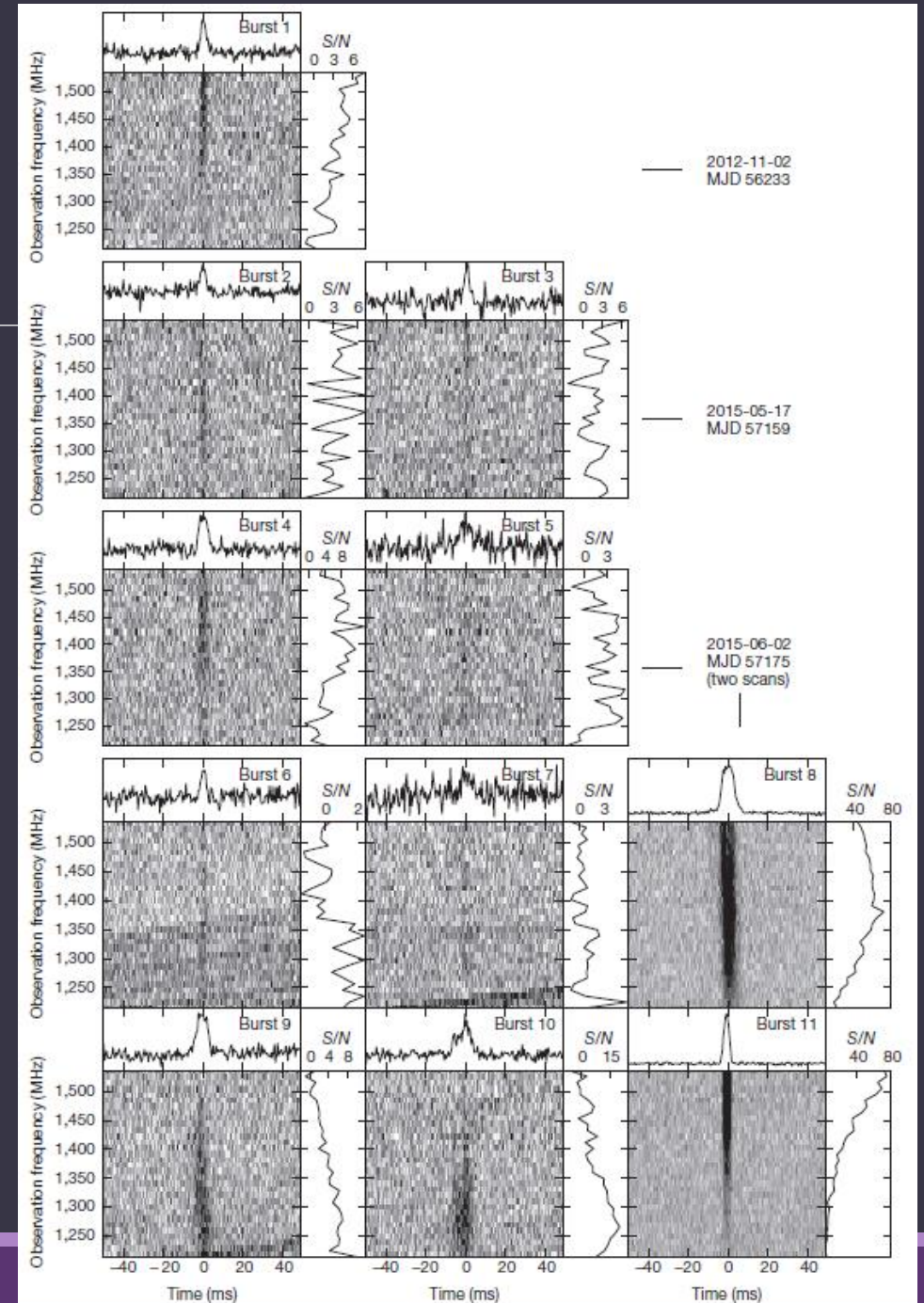
10 событий.

Темп ~ 3/час

Всплески слабые ($<0.02-0.3$ Ян)

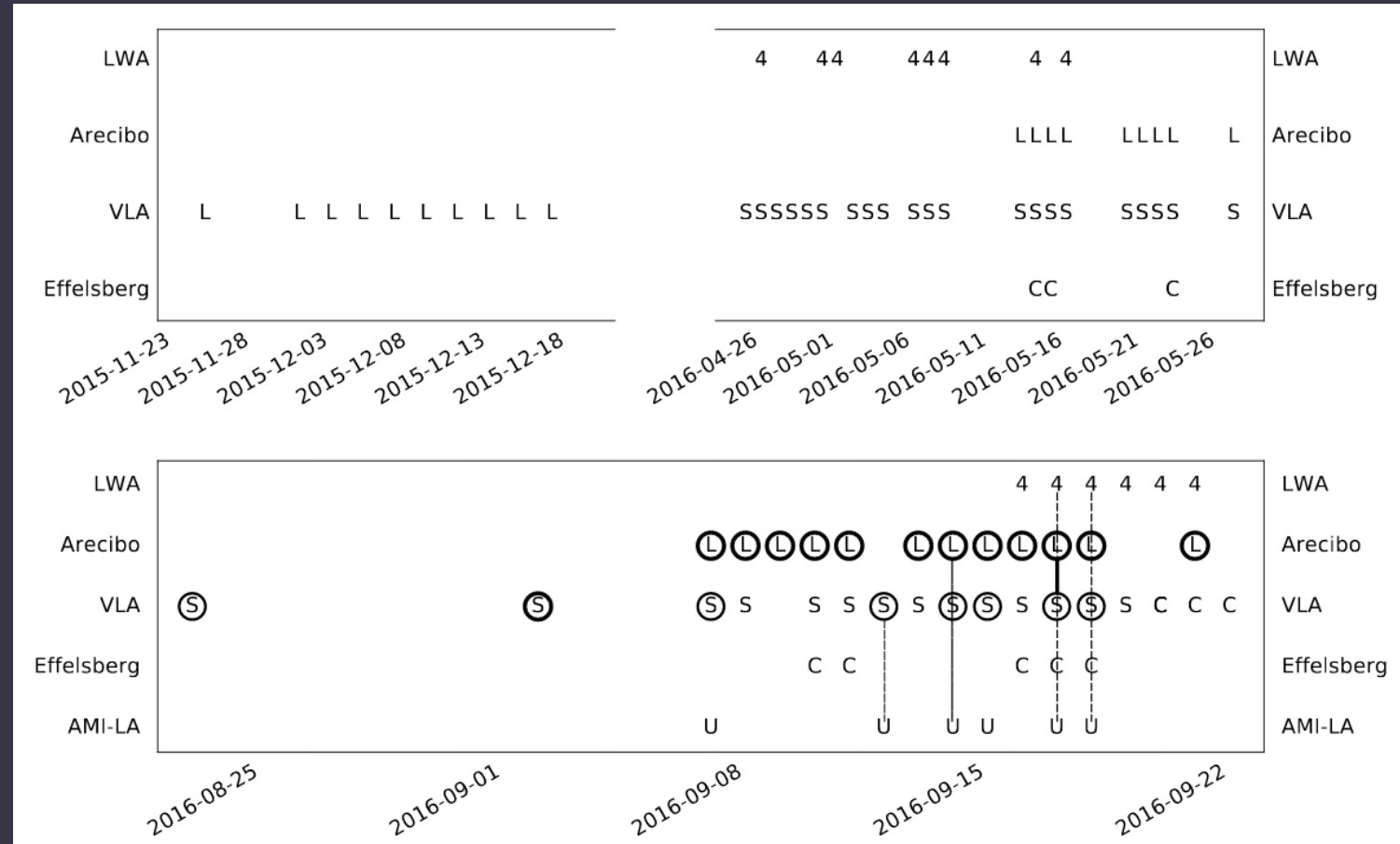
Переменный спектр.

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



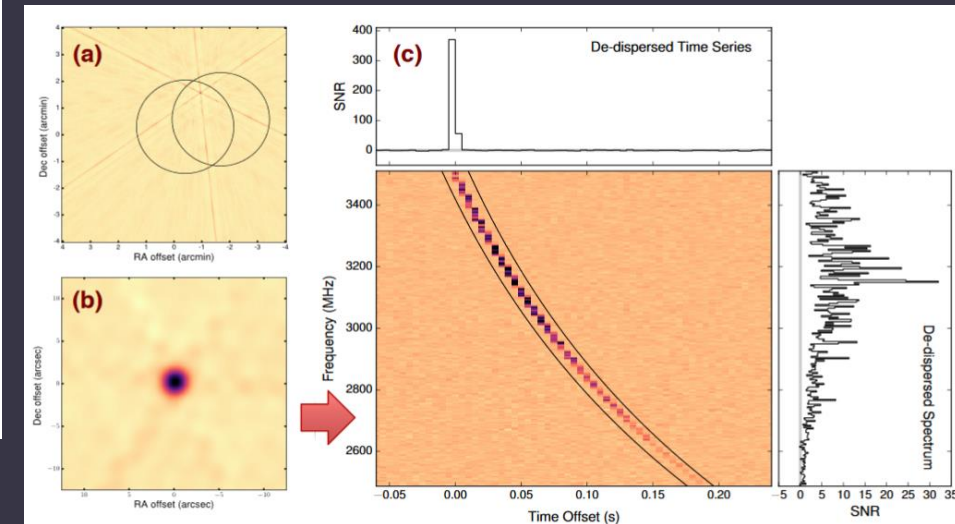
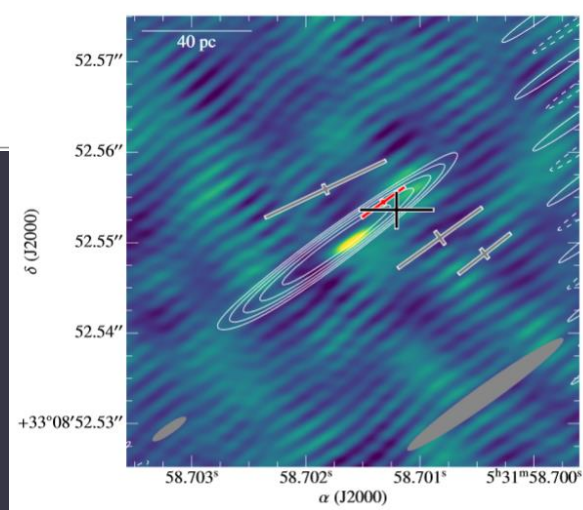
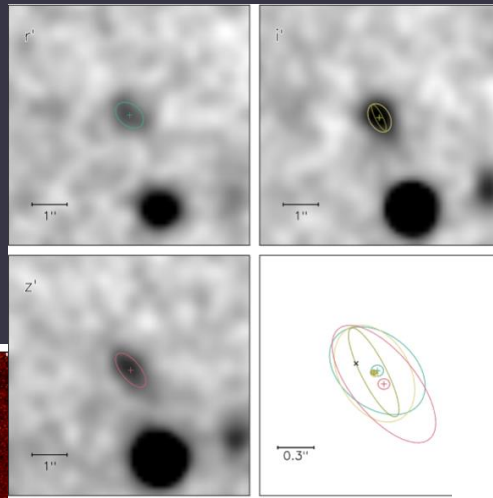
VLA, Arecibo и все-все-все

Темп всплесков – раз в несколько часов.
 Но они могут идти пачками.
 Одновременная регистрация
 на VLA и Аресибо.



Галактика FRB

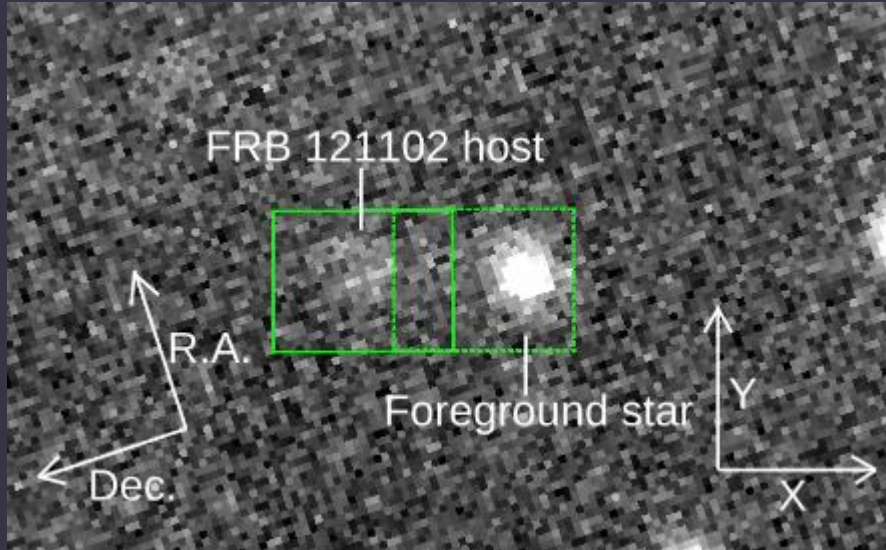
Для повторного источника FRB 121102 удалось отождествить материнскую галактику. Это карликовая галактика с высоким темпом звездообразования на $z \sim 0.2$ (1 Гпк).



1701.01098, 1701.01099, 1701.01100

Излучения H-alpha в галактике FRB 121102

1705.04693

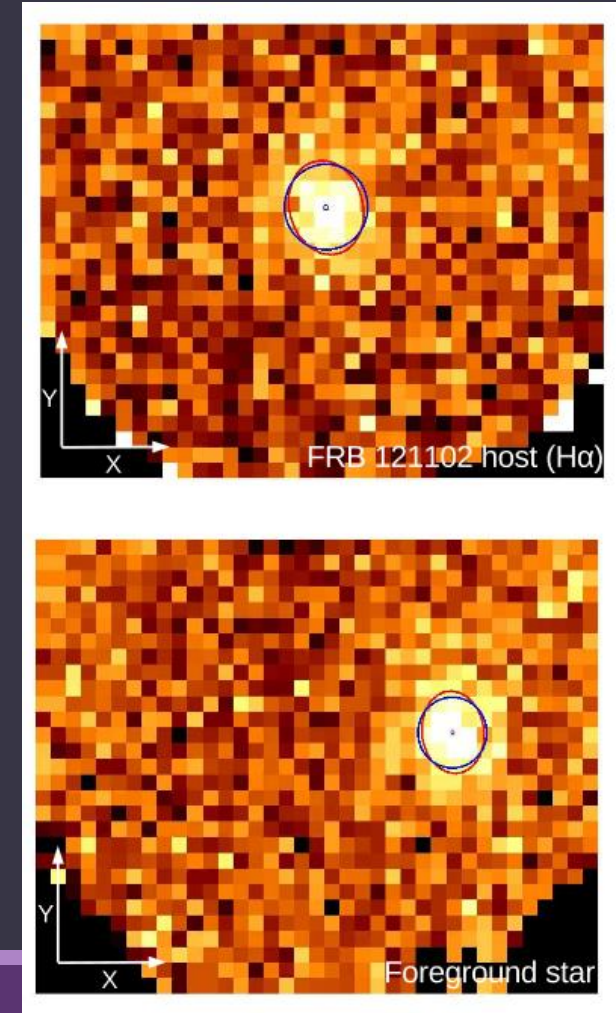


Совпадение положения FRB с областью H-alpha говорит в пользу моделей с молодыми нейтронными звездами.

Область H-alpha может давать большой вклад в наблюдаемую меру дисперсии источника.

Изображение на Кеке.

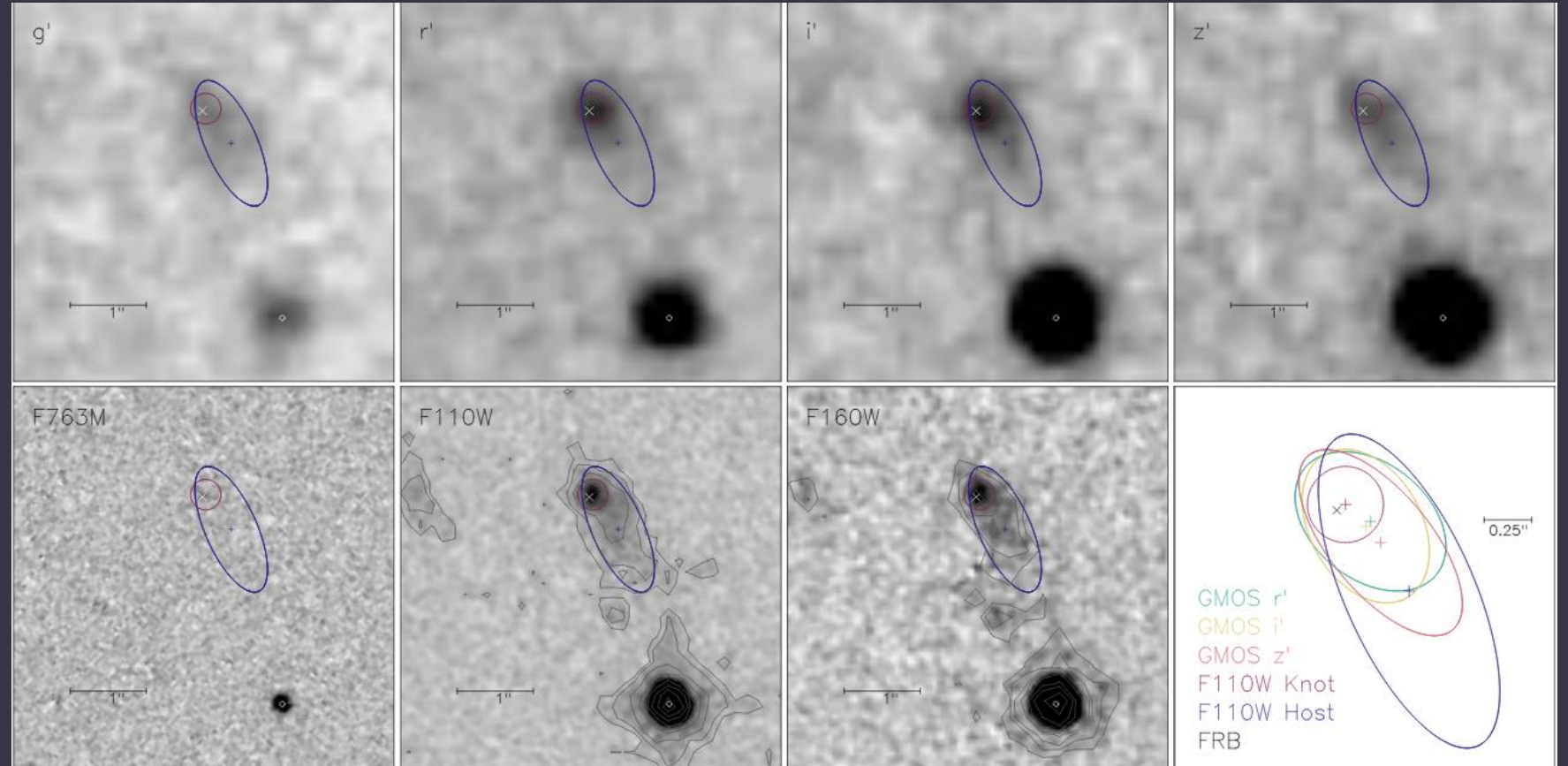
Прямоугольники показывают области, наблюдавшиеся на Субару.



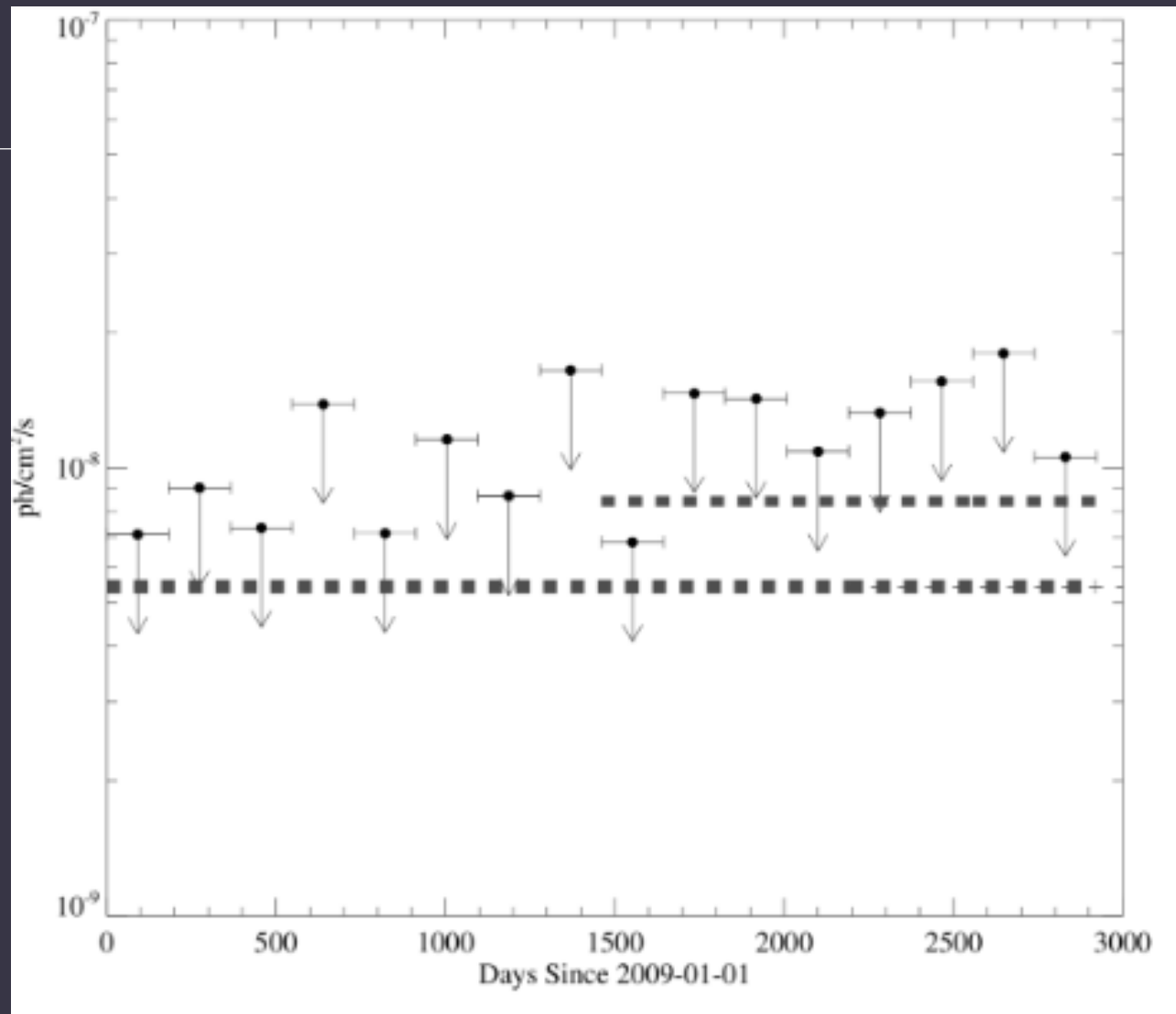
Область звездообразования и FRB 121102

Gemini, Hubble, Spitzer

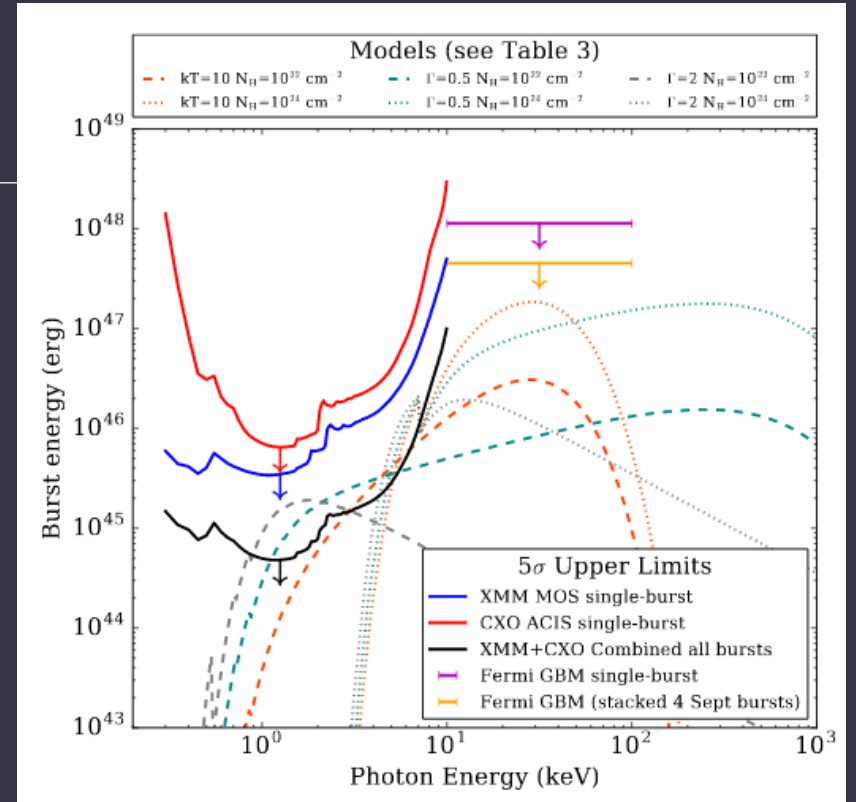
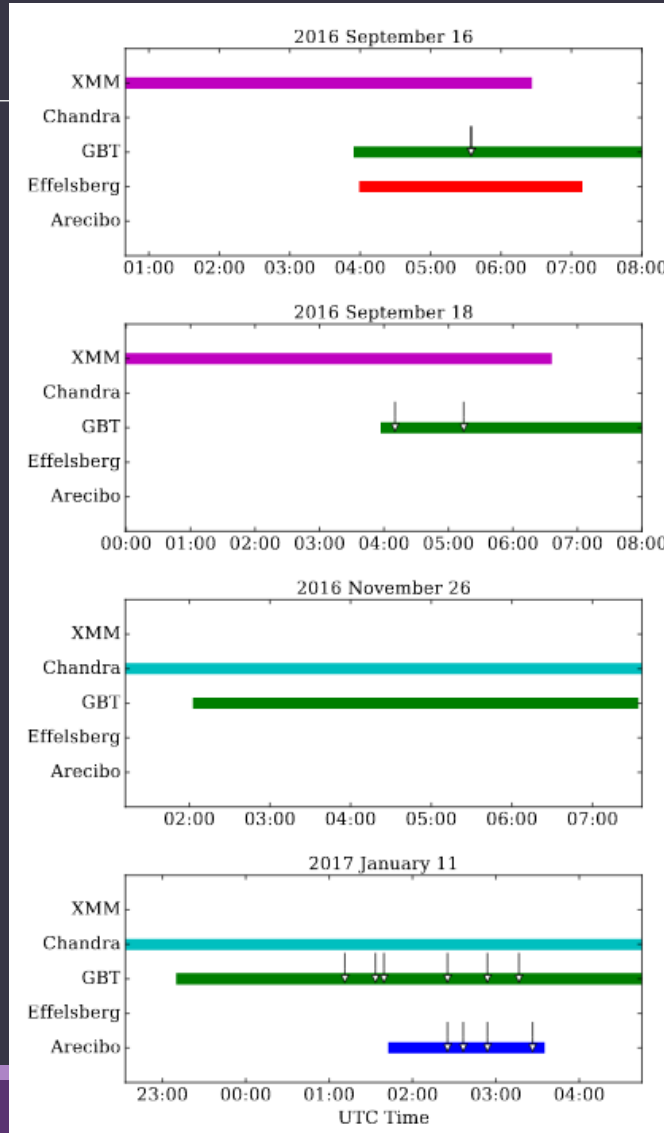
Иррегулярная маломассивная
малометаллическая галактика.



Пределы для повторного FRB по данным Fermi



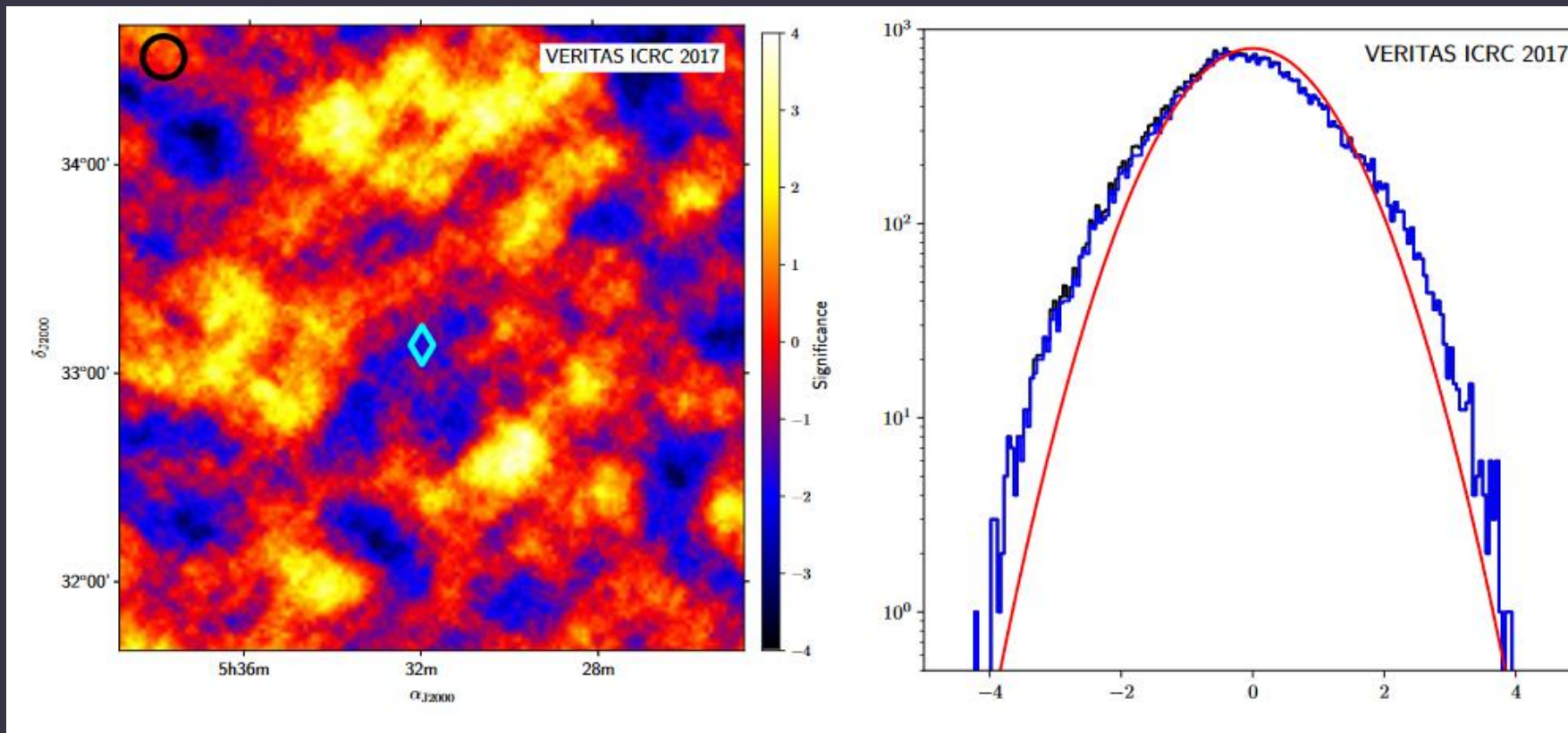
Одновременные наблюдения в радио и рентгене



Model	N_H (cm^{-2})	kT/Γ (keV/-)	Absorbed 0.5–10 keV	Unabsorbed 0.5–10 keV	Extrapolated 10 keV–1 MeV
			Fluence Limit ($10^{-11} \text{ erg cm}^{-2}$)	Energy Limit ^a (10^{45} erg)	Energy Limit ^a (10^{47} erg)
Blackbody	10^{22}	10	5	6	2
Blackbody	10^{24}	10	13	110	30
Cutoff PL	10^{22}	0.5	3	4	13
Cutoff PL	10^{24}	0.5	11	120	400
Soft PL	10^{22}	2	1.3	3	0.04
Soft PL	10^{24}	2	8	300	40

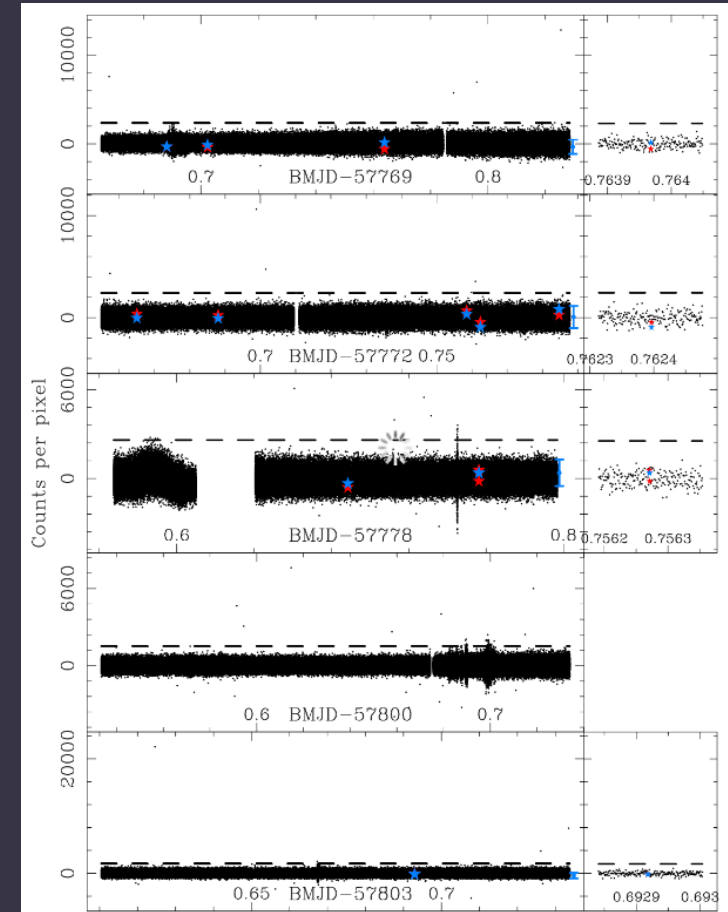
Наблюдения FRB 121102 на VERITAS

За >10 часов чистого времени наблюдений сигнал не обнаружен.
Сигнал выше 1 TeV должен отсутствовать из-за EBL.



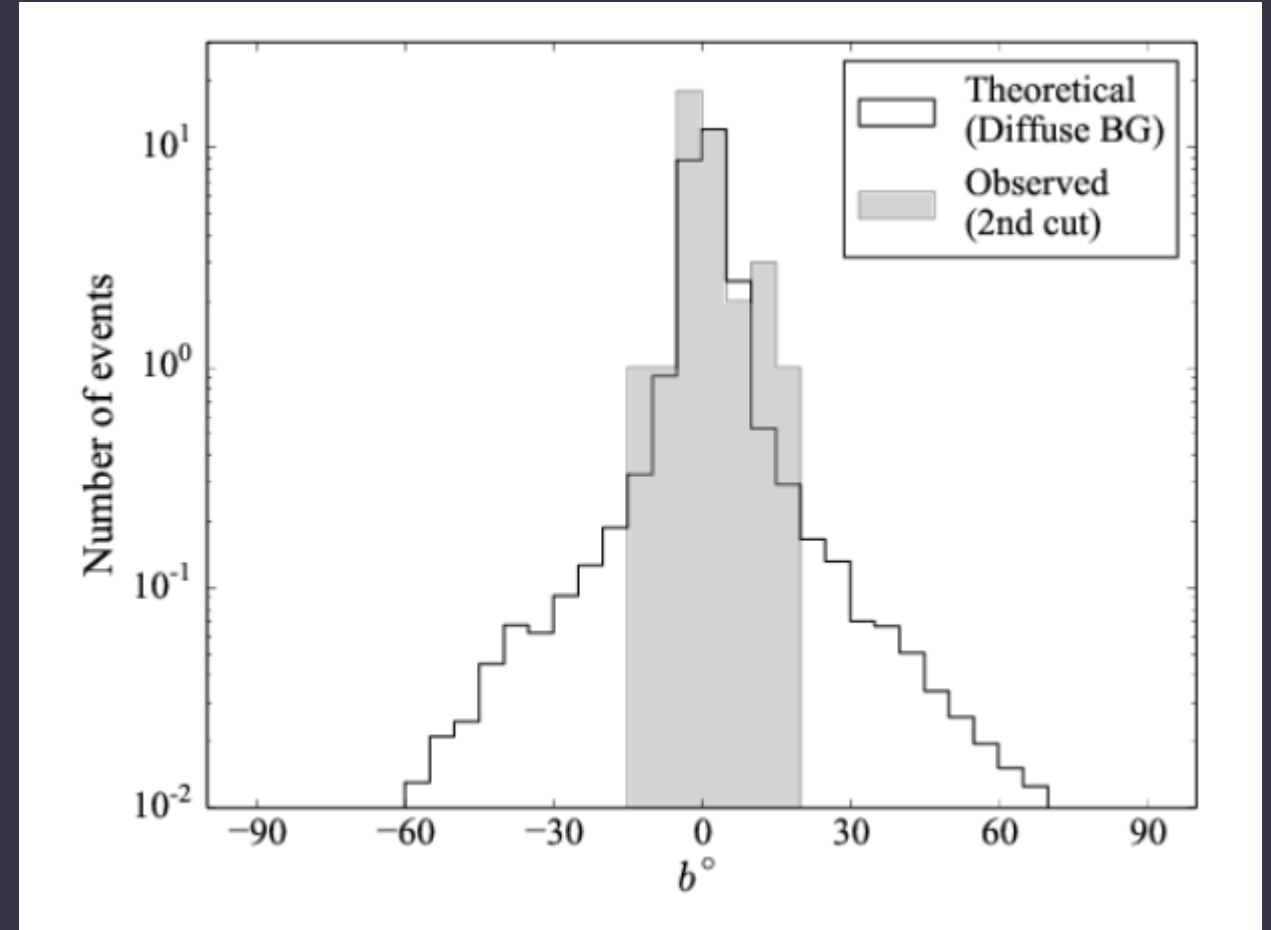
Отсутствие оптических вспышек FRB121102

Одновременные наблюдения в радио
(100-м Эффелсберг) и на 2.4-м в оптике.
13 всплесков в радио. В оптике - ничего.

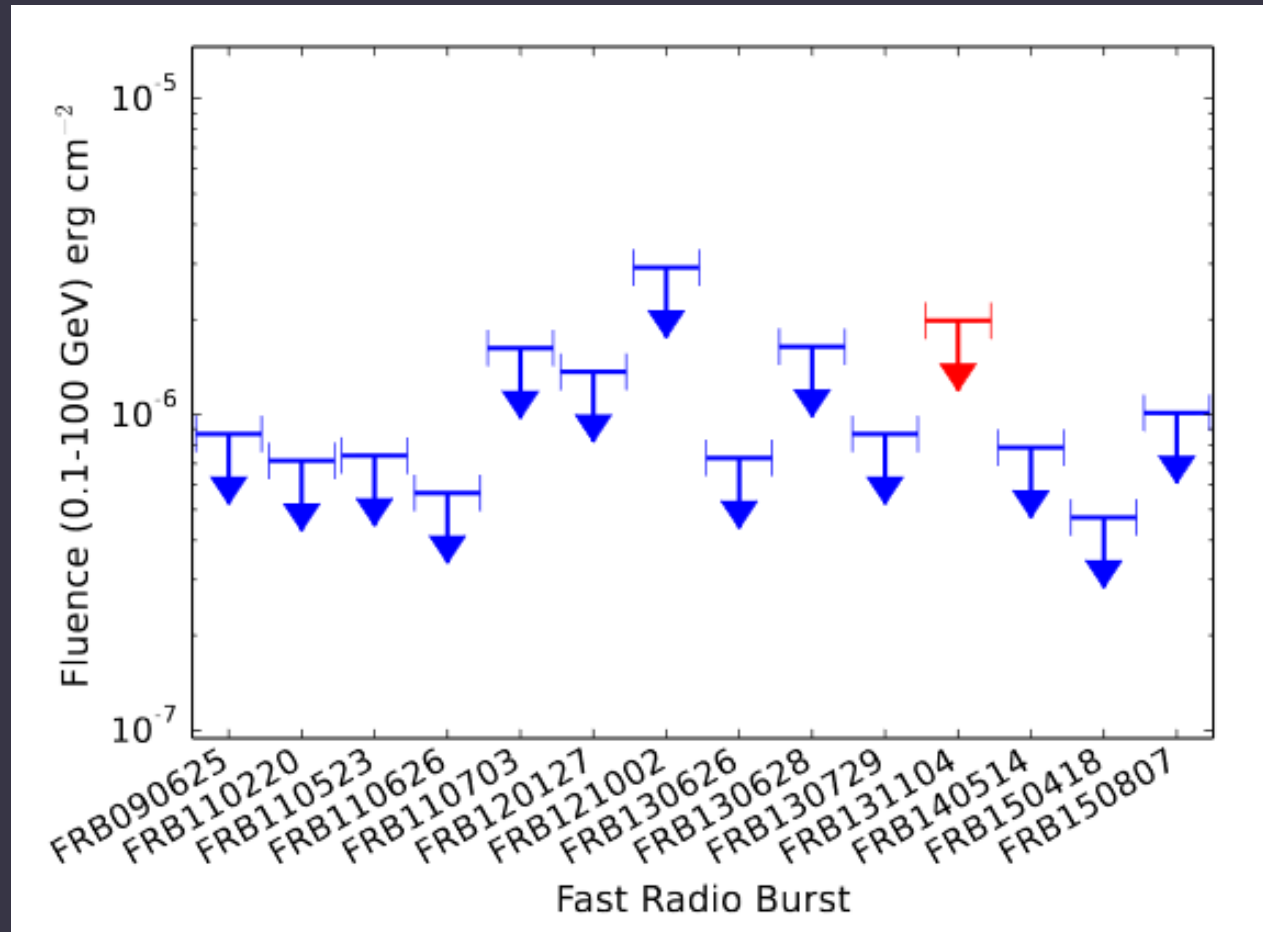


Поиск сопутствующих гамма-всплесков

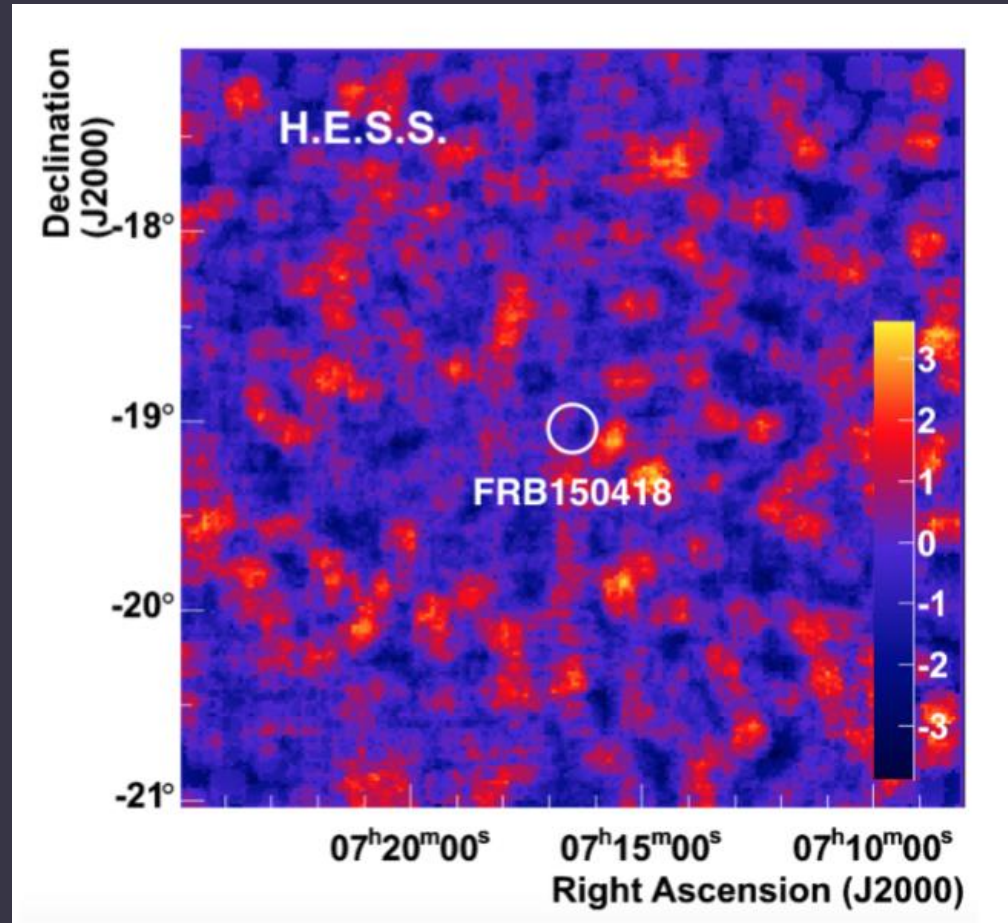
Поиск миллисекундных гамма-вспышек в данных Fermi-LAT не дал превышения над ожидаемым фоном на низких галактических широтах. На высоких широтах вспышек не найдено вообще.



Пределы по данным FERMI



Поиск ТэВного излучения



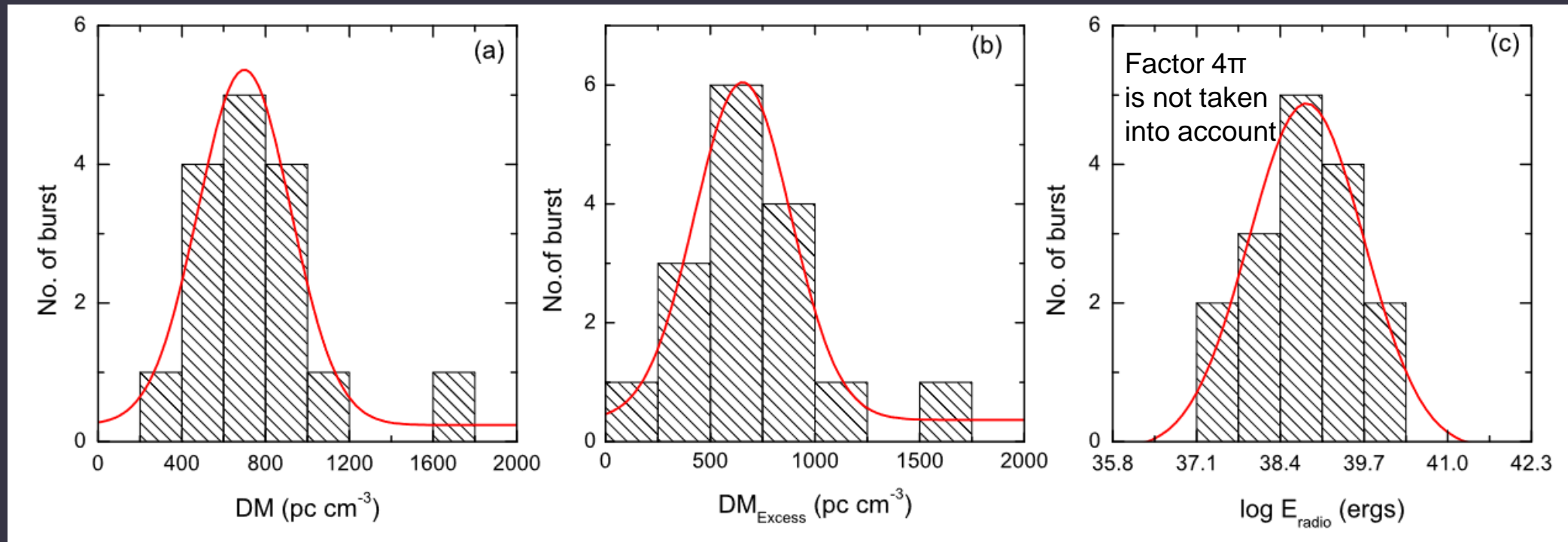
H.E.S.S.
FRB 150418

Наблюдения
через 15-16 часов.

Около часа
чистых данных.

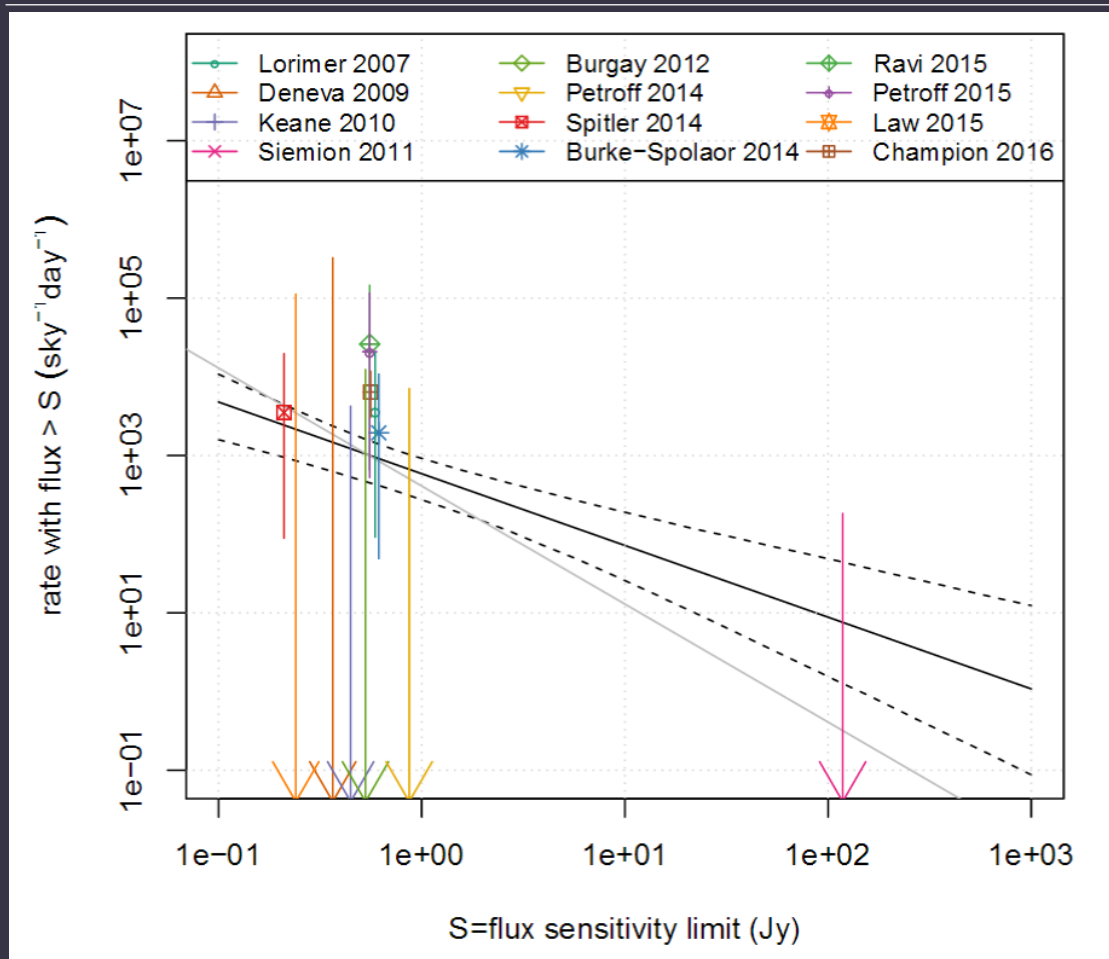
Ничего не видно.

Statistical properties of FRBs



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

Новые оценки темпа всплесков



Черная линия –
новый результат.
Пунктирные –
неопределенность (95%).

Серая линия построена
при предположении, что
в $\text{Log } N - \text{Log } S$ показатель
равен $3/2$.

См. также 1612.00896

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

Наблюдение поляризации

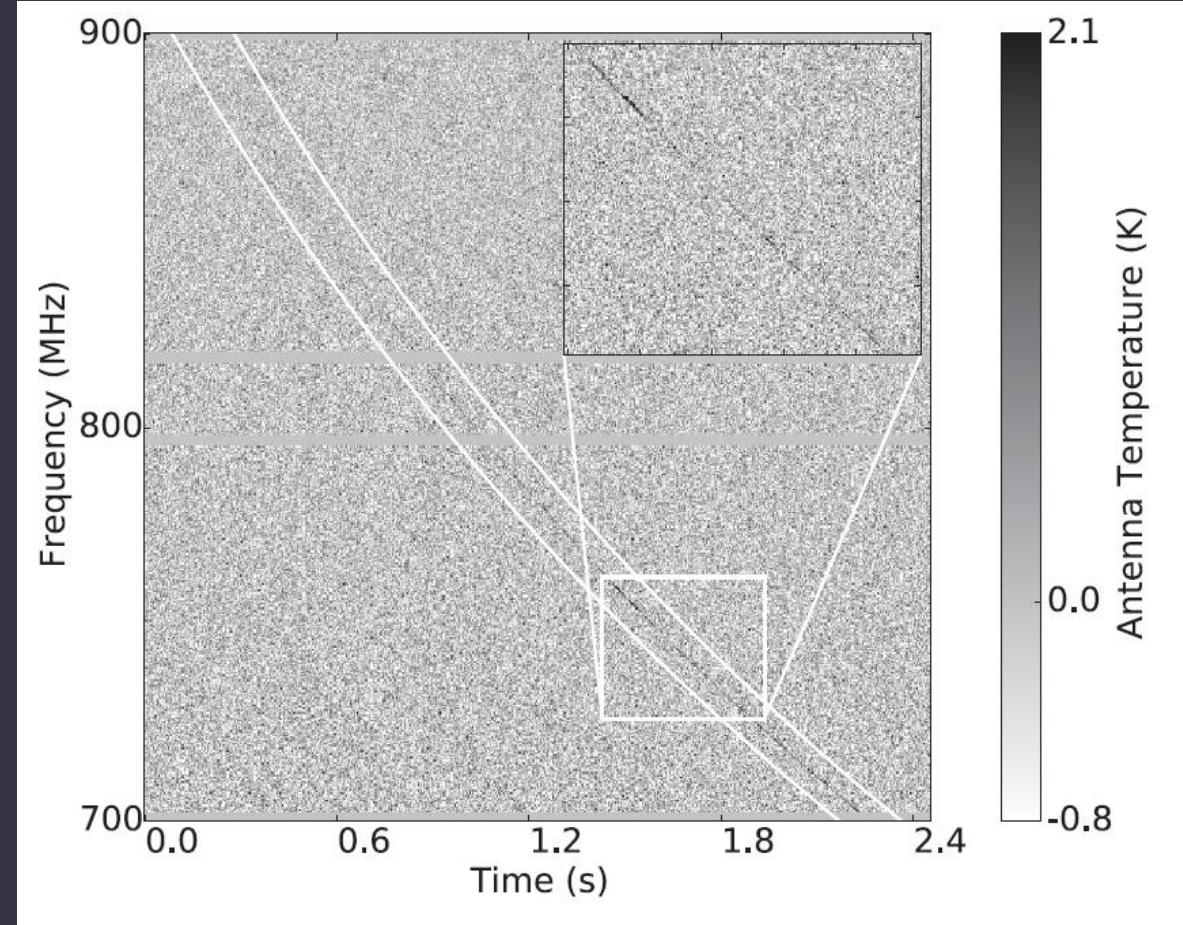
В работе Petroff et al. (1412.0342) была обнаружена круговая поляризация источника FRB 140514 на уровне около 20%.

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

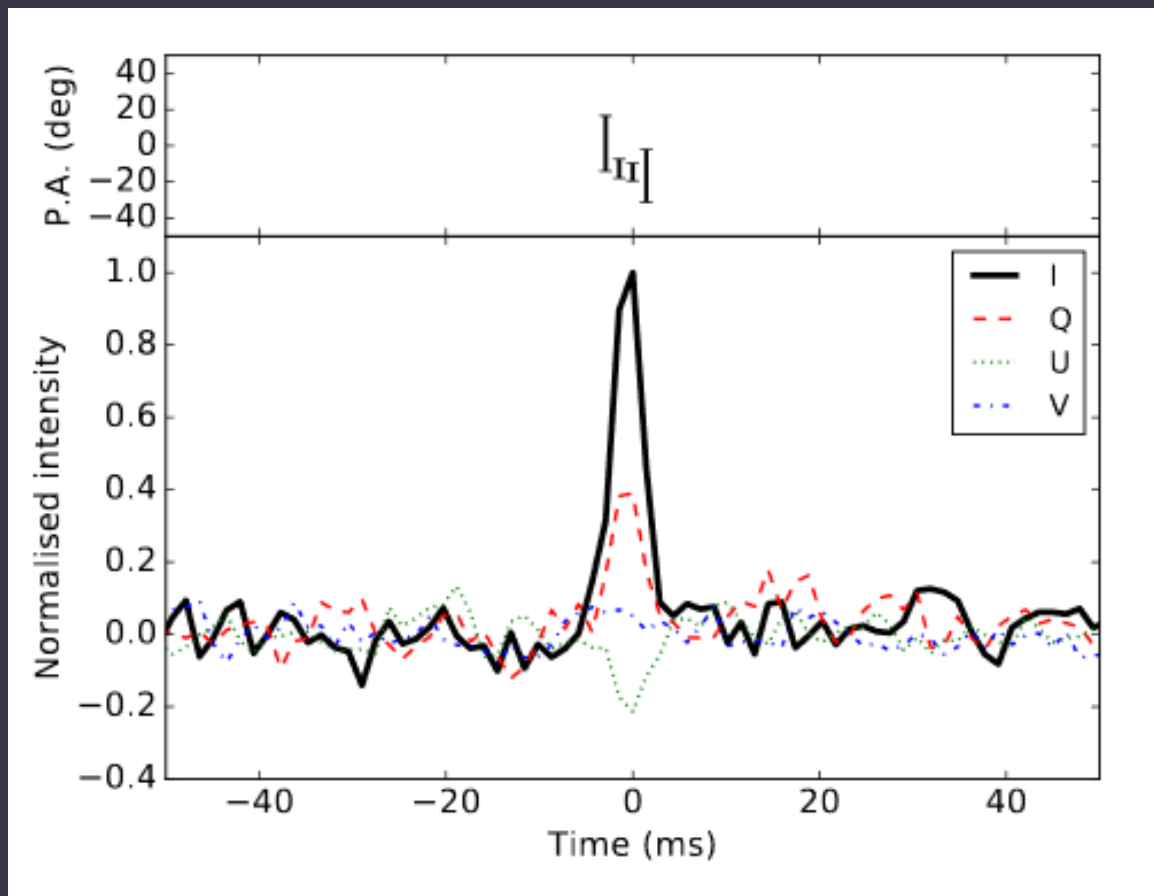
0.38 микрогаусс

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.



Еще один всплеск с поляризацией



FRB150215

Всплеск в реальном времени.
Других транзиентов
не было обнаружено.

В плоскости Галактики
DM~1100

Поток ~0.7 Jy

Длительность ~2.8 msec

Линейная поляризация ~43%

RM~0 (в пределах ошибок)

FRBs. Different hypotheses

Millisecond extragalactic radio bursts of that intensity without immediate identification with other bursts have not been predicted by earlier studies.

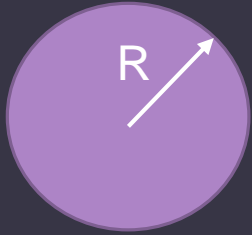
Since 2007 many hypotheses have been proposed.

A real flow started in late summer of 2013 after the paper by Thornton et al.

- Magnetars
- Super radio pulsars
- Evaporating black holes
- Coalescing NSs
- Coalescing WDs
- Coalescing NS+BH
- Supramassive NSs
- Deconfinement of a NS
- Axion clouds and NSs
- Cosmic strings
- Charged BHs
- NS collapse



Нейтронные звезды и экзотика



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



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

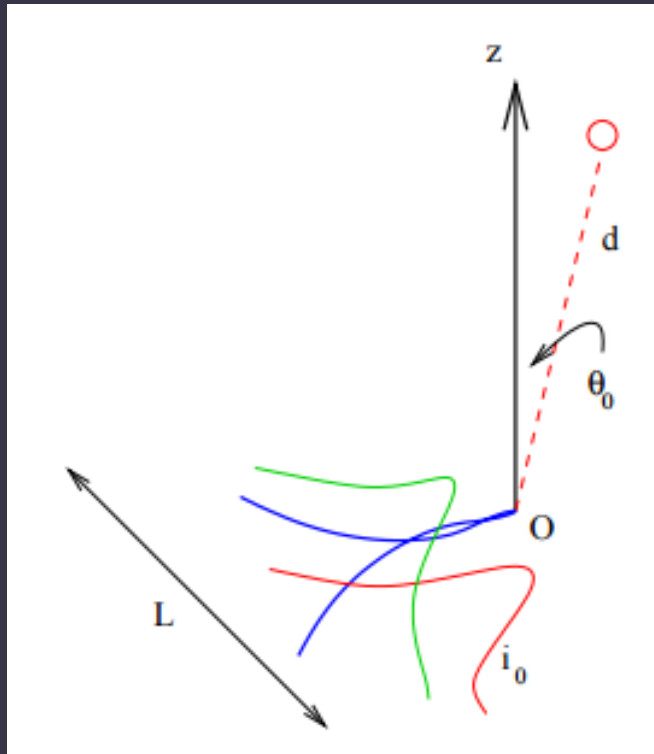
Поэтому легко получать короткие события.

То же самое для черных дыр.

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

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

Космические струны

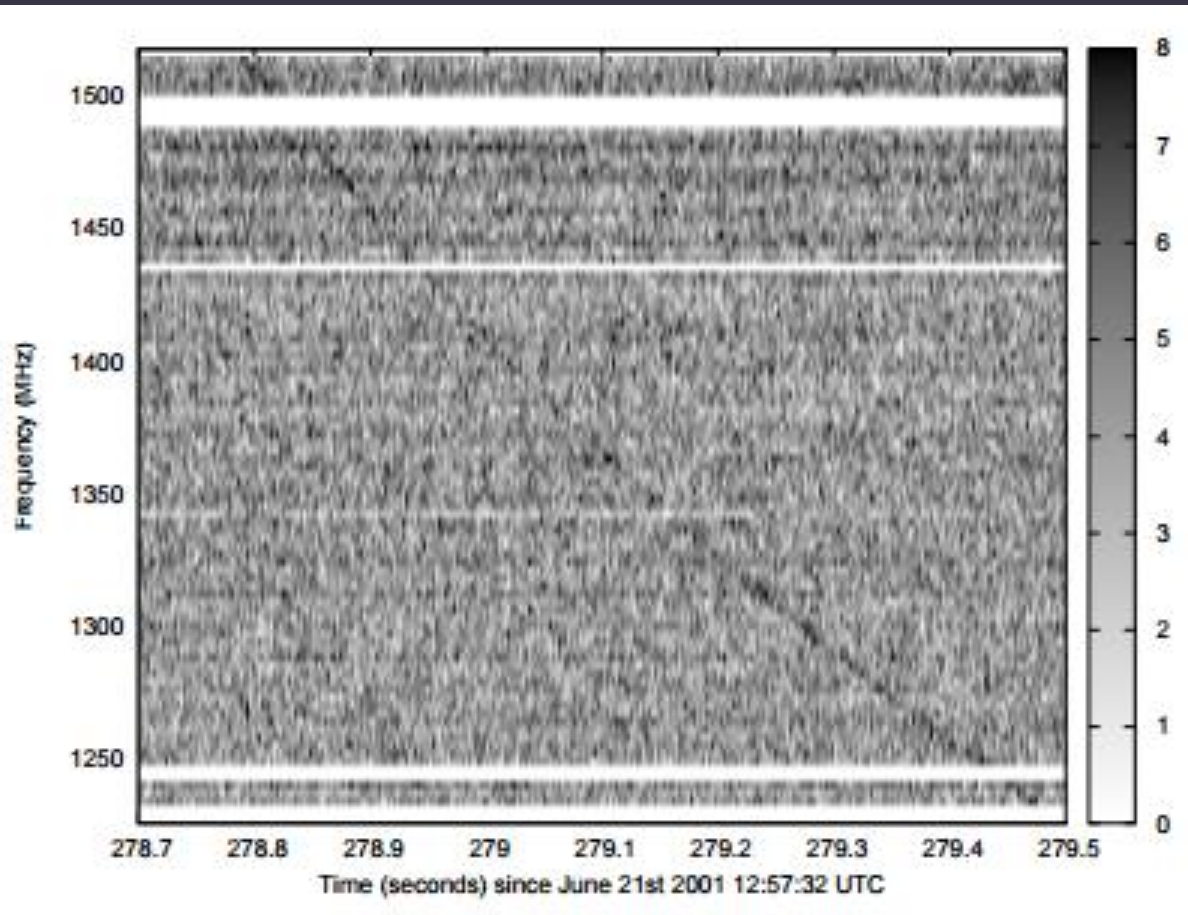


Сверхпроводящие струны
Vachaspati 0802.0711

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.

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

Первичные черные дыры



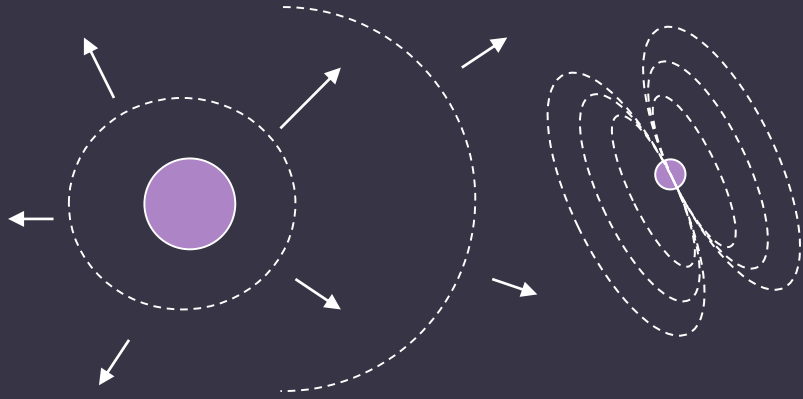
Не подходит в качестве внегалактического источника, т.к. полная светимость мала. Должны быть видны с < 200 пк.

Давно предсказывались (Rees 1977).

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

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

Сверхновая и пульсар

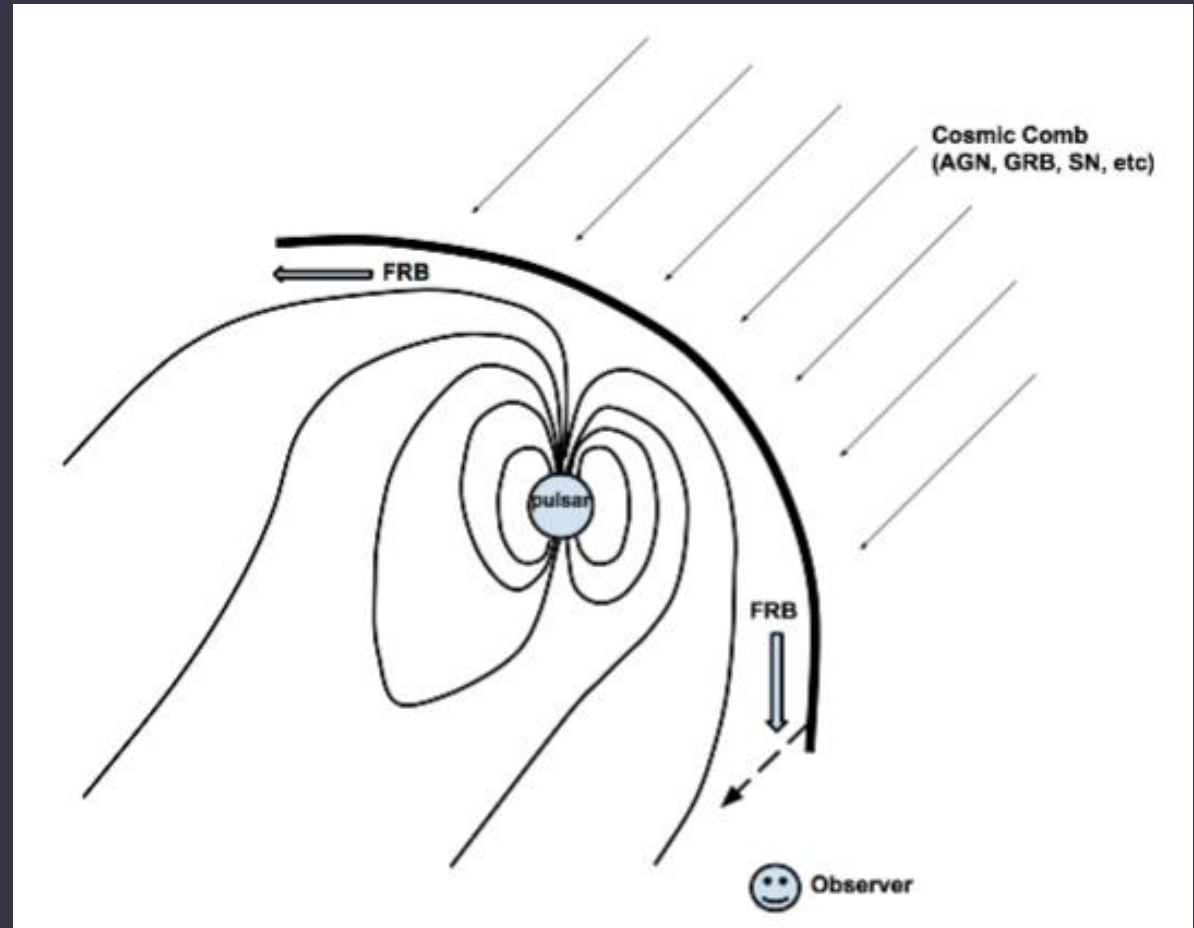


Ударная волна сверхновой в массивной тесной двойной системе может провзаимодействовать с магнитосферой нейтронной звезды, создав магнитосферный хвост. Пересоединение в хвосте может привести к появлению всплеска. (Егоров, Постнов 0810.2219)

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

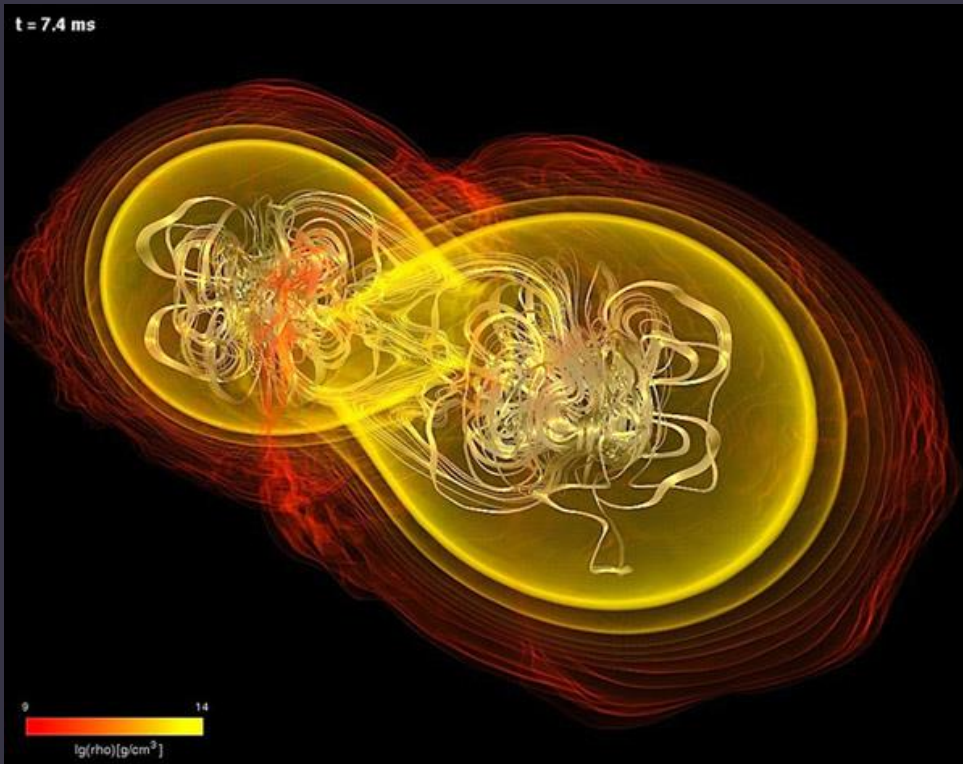
Срыв магнитосферы

Модель позволяет сделать всплеск совпадающим с другим мощным транзиентом (АЯГ, гамма-всплеском).



Слияния нейтронных звезд

<http://www.int.washington.edu/PROGRAMS/14-2a/>



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).

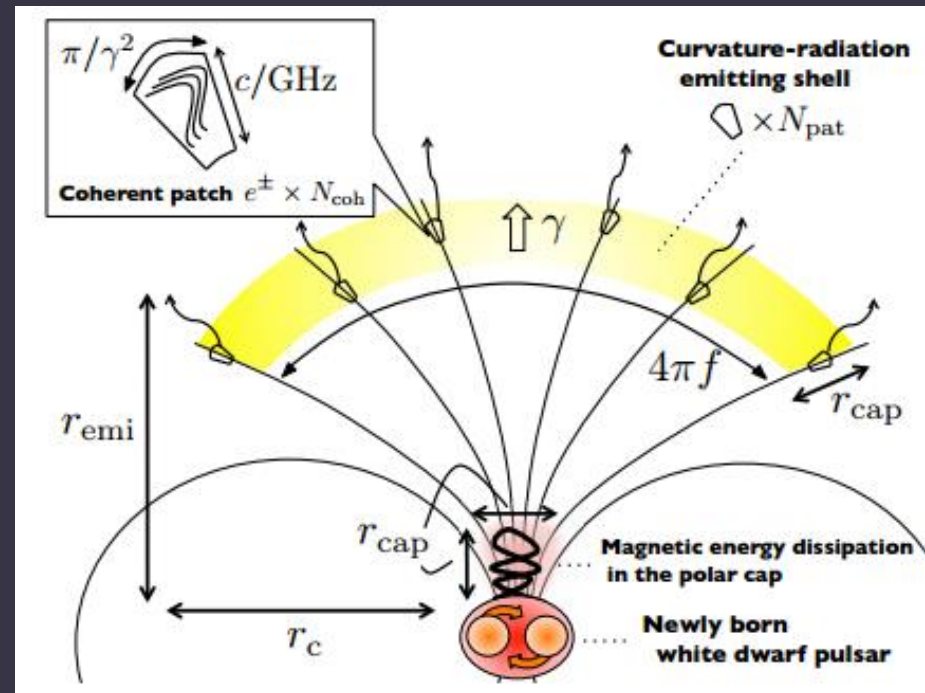
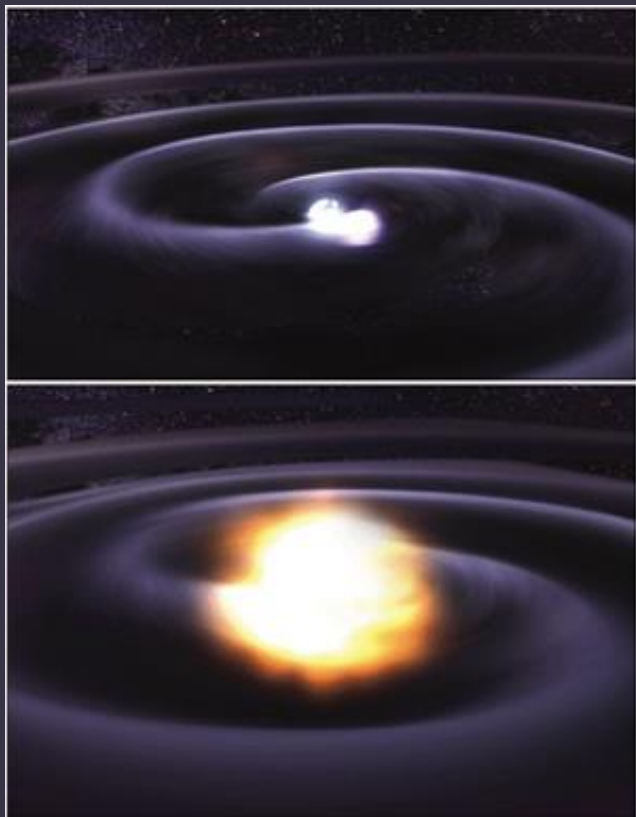
$$\dot{E} = -6.2 \times 10^{45} \left(\frac{B}{10^{12.5} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^6 \times \left(\frac{P}{0.5 \text{ msec}} \right)^{-4} \text{ erg s}^{-1} .$$

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>



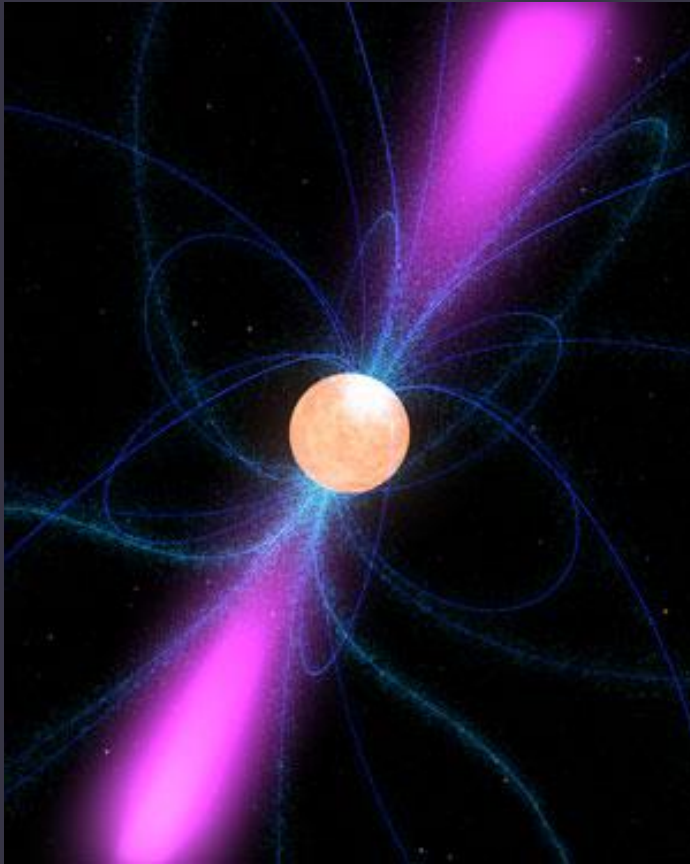
Основные события разыгрываются на полярной шапке, что необходимо для согласования характерной длительности всплеска с временами процессов.

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

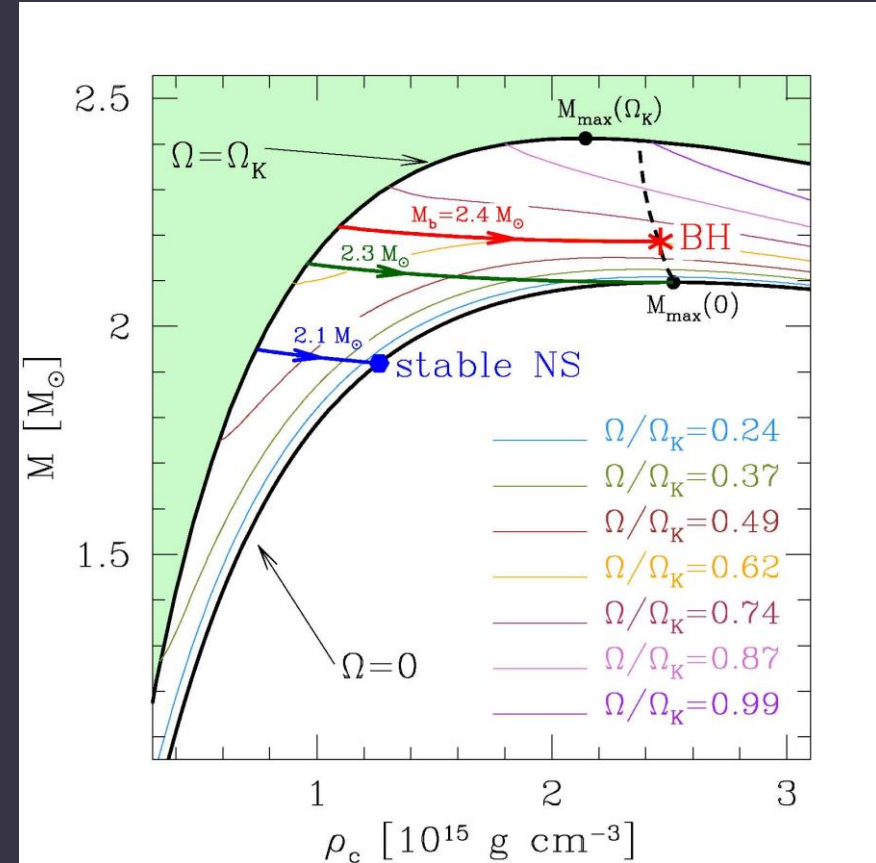
Kashiyama et al. 1307.7708

Супрамассивные нейтронные звезды

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

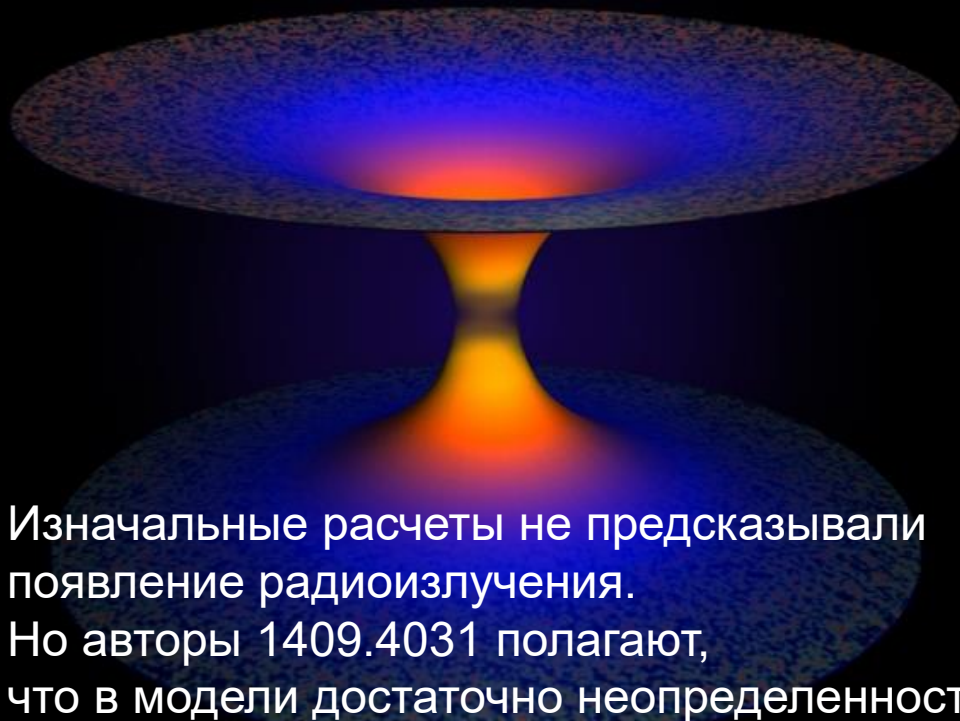


Нейтронная звезда может быть устойчивой относительно коллапса из-за очень быстрого вращения. Такая ситуация может возникать при слияниях, при аккреции или же прямо при рождении. Коллапс может произойти спустя тысячи лет после образования НЗ. Могут сопровождаться сверхновой, коротким гамма всплеском или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



“blitzar”

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.

Аксионы

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

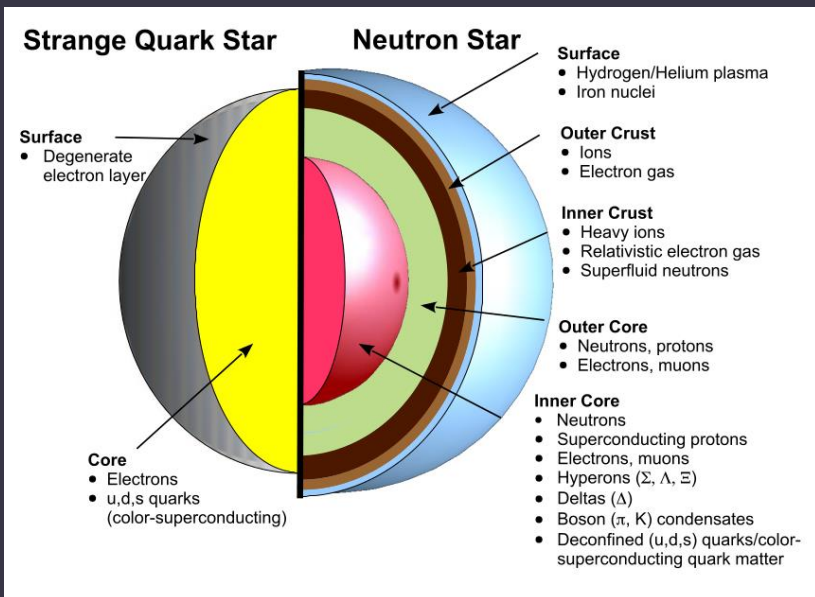
Кластер может становиться более компактным из-за образования бозе-конденсата.

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!

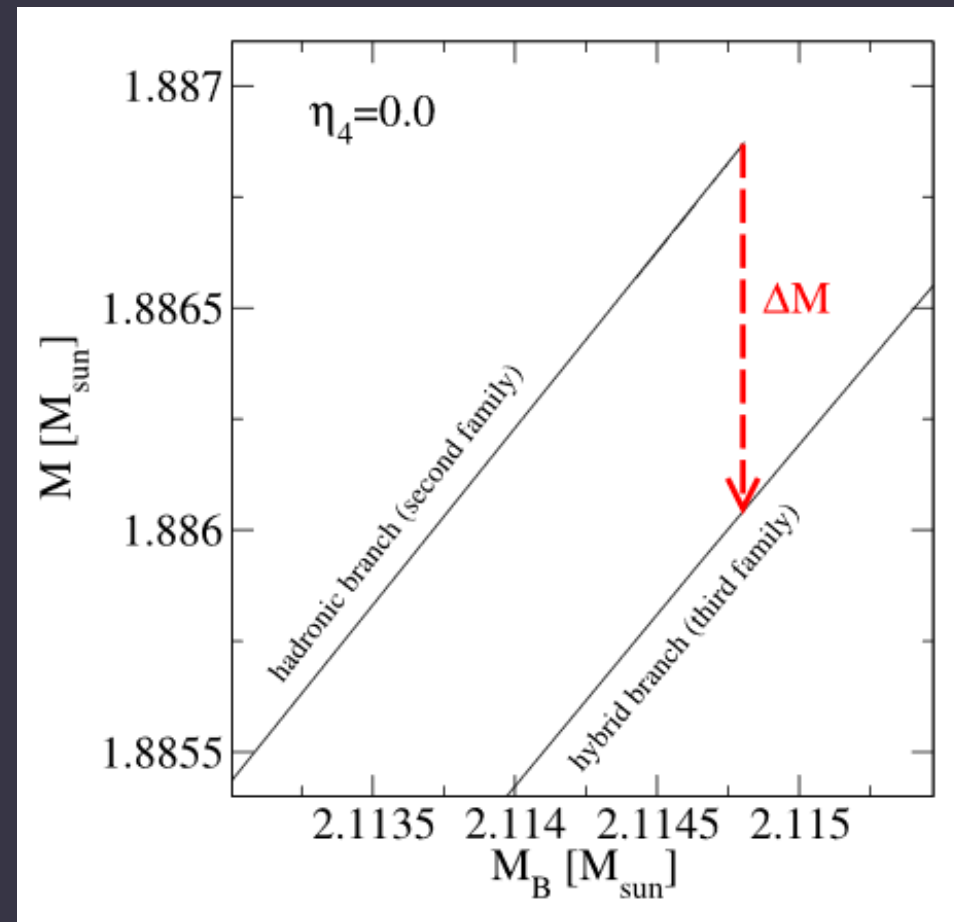
Влетание аксионного кластера в магнитосферу нейтронной звезды должно приводить к конверсии аксионов в фотоны, а значит – к вспышке электромагнитного излучения.



Деконфайнмент – рождение кварковой звезды

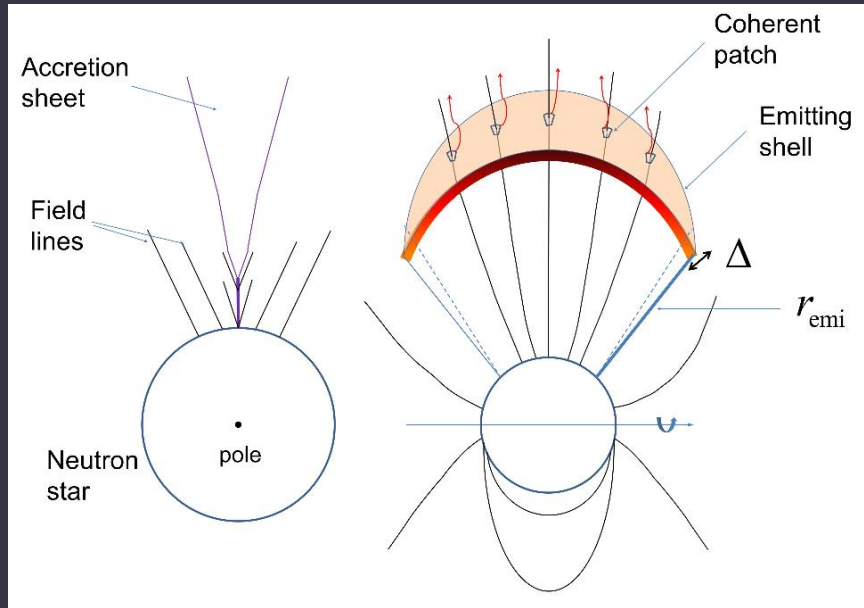


В процессе своей эволюции нейтронная звезда или ее часть могут испытать деконфайнмент: обычное вещество превратится в кварковое. Это сопровождается энергосвободением.



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

Падение астероидов



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.

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.

О модификации модели с повторными всплесками см. 1603.08207

Об испарении астероидов пульсарами см. 1605.05746.

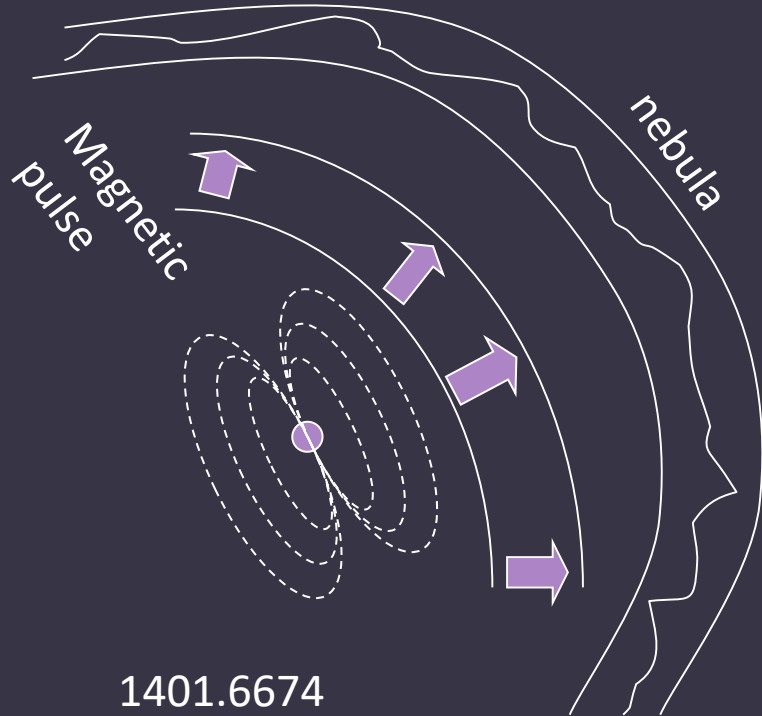
Magnetar model

The first idea of possible connection between FRBs and magnetars has been proposed already in 2007 by Popov, Postnov: arXiv 0710.2006.

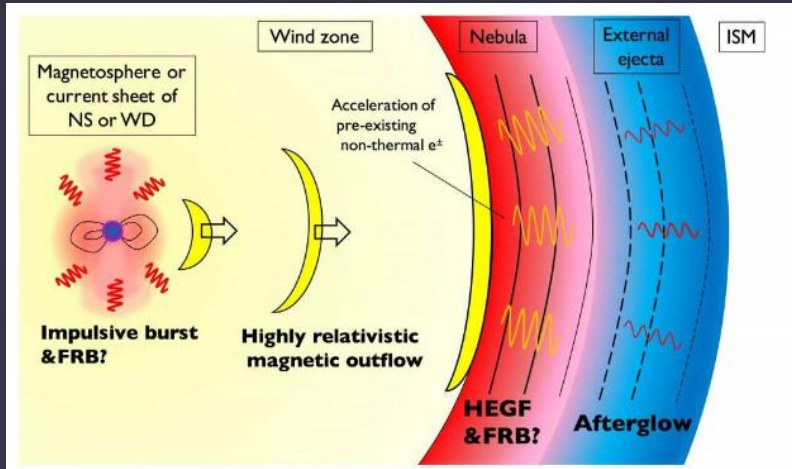
This hypothesis has been based on rate and energetics considerations, mainly. FRB bursts might be related to giant flares of magnetars

Later this approach was developed by Lyubarsky (2014).

In the model by Lyubarsky the radio burst happens due to synchrotron maser emission after interaction between a magnetic pulse after a giant flare of a magnetar with surrounding nebula.

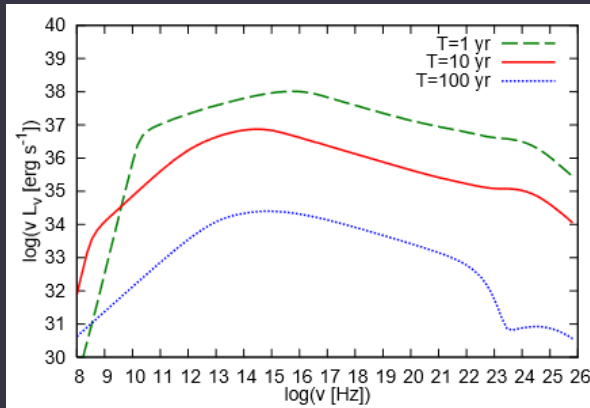


Nebula emission

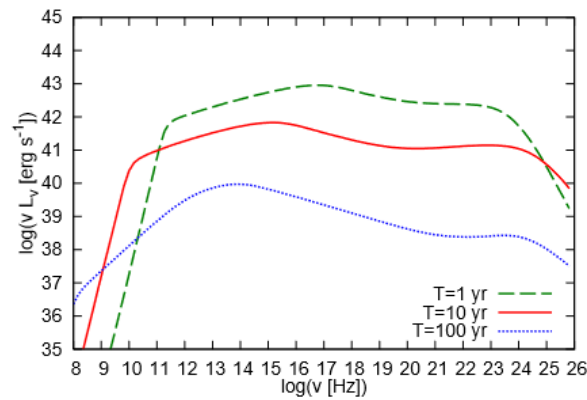


The model of a nebular emission after a huge energy release in a central source was developed by several authors.

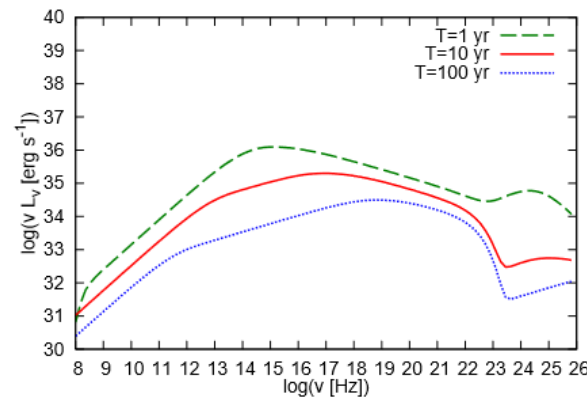
1603.08875



Magnetar



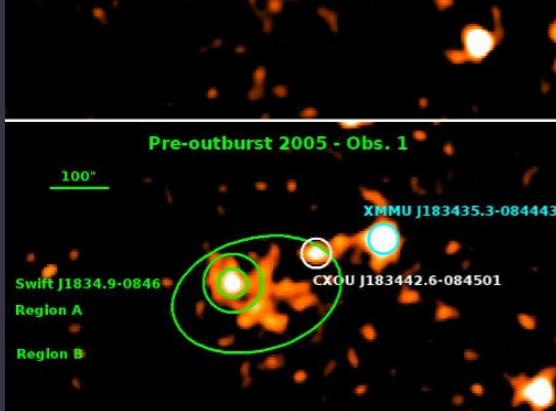
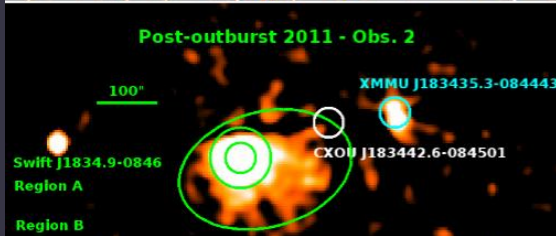
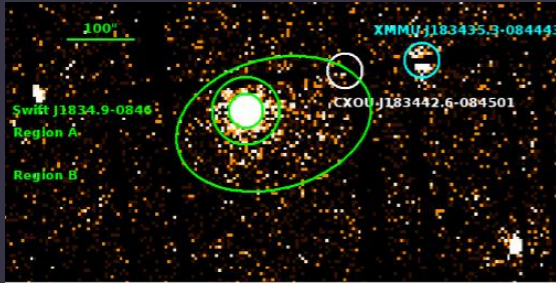
RNS



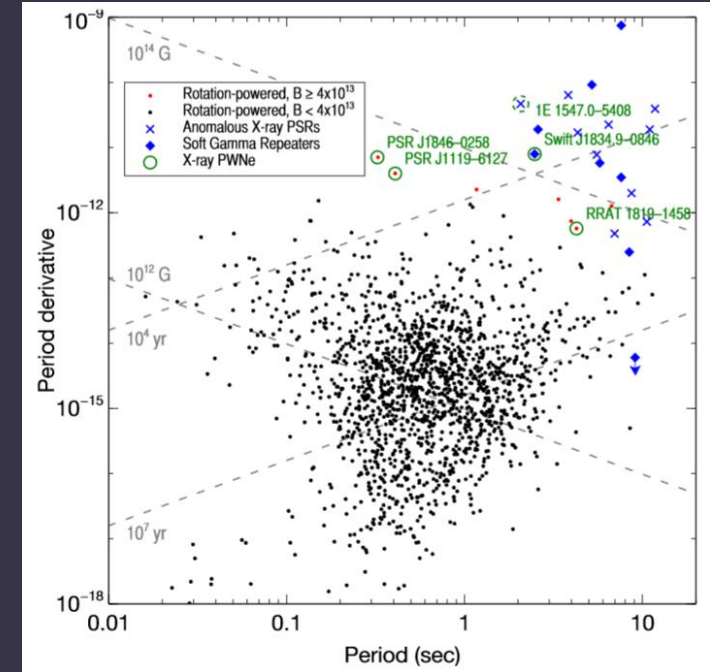
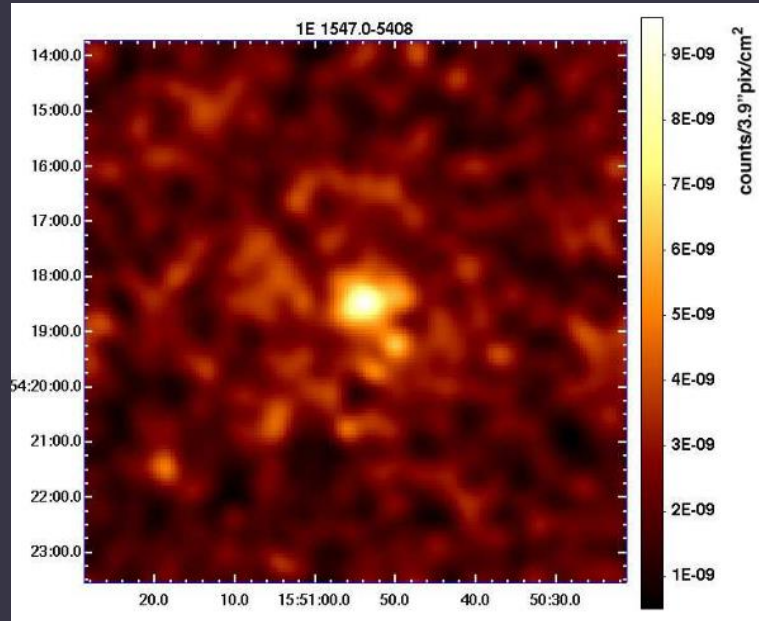
MWD

Nebulae around magnetars

1206.3330. New results in 1604.06472



There are examples of nebulae around magnetars and highly magnetized radio pulsars.



0909.3843

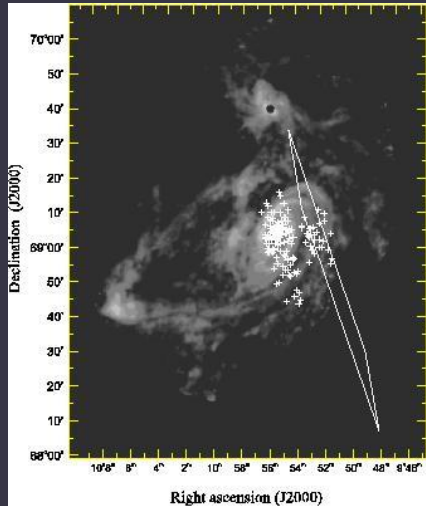
About formation of pulsar nebulae around magnetars see 1606.01391

1211.0852

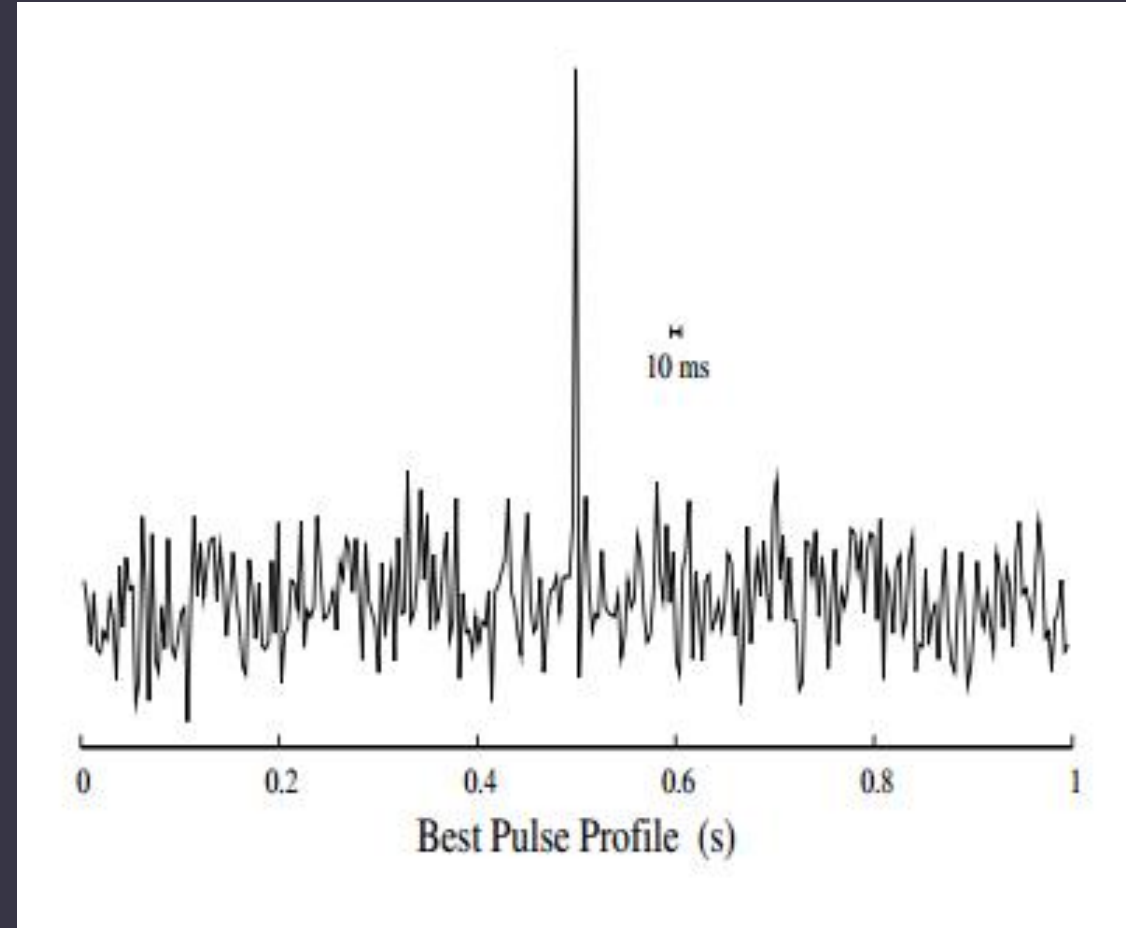
Radio flares from M31

Rubio-Herrera et al. (2013)
discovered millisecond radio bursts
from the Andromeda galaxy.

It looks like a scaled version of FRBs.
In the magnetar model such (more frequent) bursts
can be related to weaker flares of magnetars.

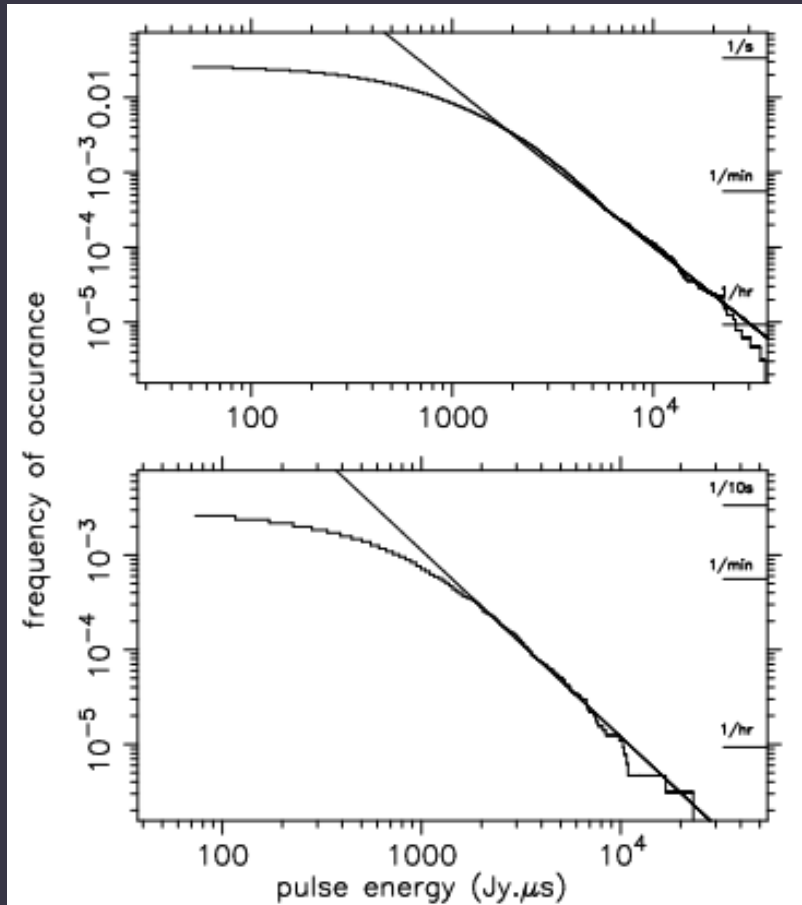


Note, that Frederiks et al. (2005)
proposed a candidate for a
giant magnetar flare in M31.



Radio pulsar model

1004.2803



In the case of the Crab pulsar so-called giant pulses are known.

It has been suggested (1501.00753, 1505.05535) that young pulsars with large \dot{E} can rarely produce much more energetic events.

Scaling allows to reproduce energetics of FRBs.

FRBs as supergiant pulses

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

Estimates are done via scaling of parameters of the Crab. Rather normal magnetic field but rapid rotation formally can explain FRB energetics.

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

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

With magnetic field and spin period it is possible to estimate the characteristic spin-down time.

Supergiant pulses of young radio pulsars in dense supernova remnants

Age 30-100 years

Uniform distribution in \dot{E} in logarithmic scale

Absorption of low-frequency radiation in the remnant

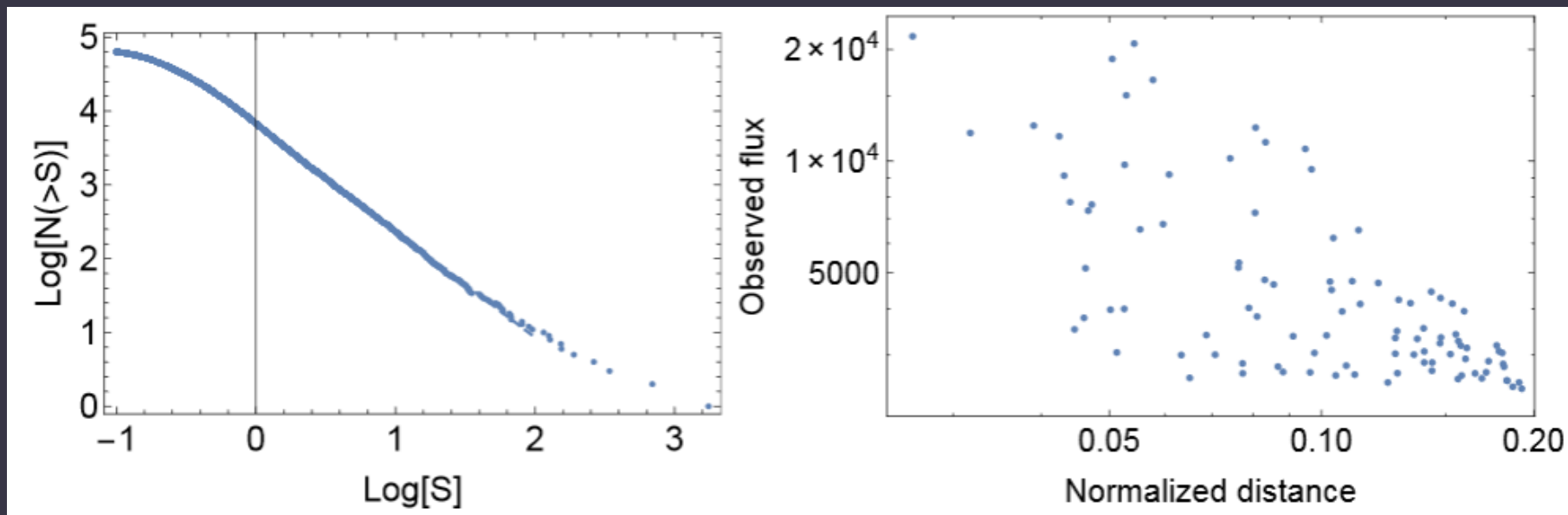
Repeating bursts

Bursts are uniformly distributed in distance

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

Steady state solution for magneto-dipole spindown and

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



Dispersion in a dense supernova remnant

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

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

Dispersion in a dense SNR might explain observed DM of FRBs in the model when they are near-by at distances $\sim 100\text{-}200$ Mpc.

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

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

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

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

Burst rate

SN rate $\sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$ (Dahlen et al. 2012).

This gives ~ 1 SN per day in 100 Mpc.

Ages and typical lifetime of our sources ~ 30 -100 years.

Thus, we have $\sim 10\,000 - 30\,000$ sources in 100 Mpc.

The observed rate of FRBs $\sim 3 \cdot 10^3$ per day.

Then, each source might give a flare per few days.

If we increase the distance up to 200 Mpc then we can use just 10% of most energetic neutron stars.

Giant pulses of the Crab with fluence 100-200 kJy for Edot increase by factor 100 000 are scaled to flares with the flux ~ 1 Jy from 100-200 Mpc.

Number of giant pulsars depends on flux as $\sim S^{-3}$.

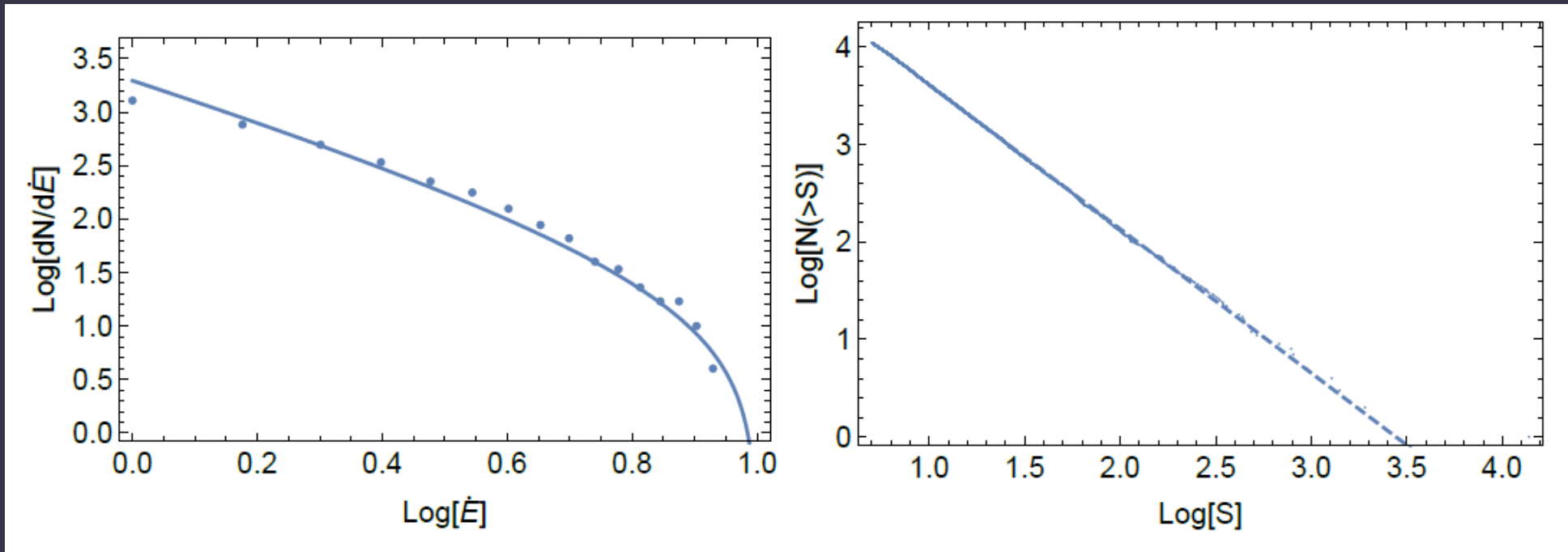
For FRBs we then obtain that most bright event might be observed once per few months.

Monte Carlo simulations

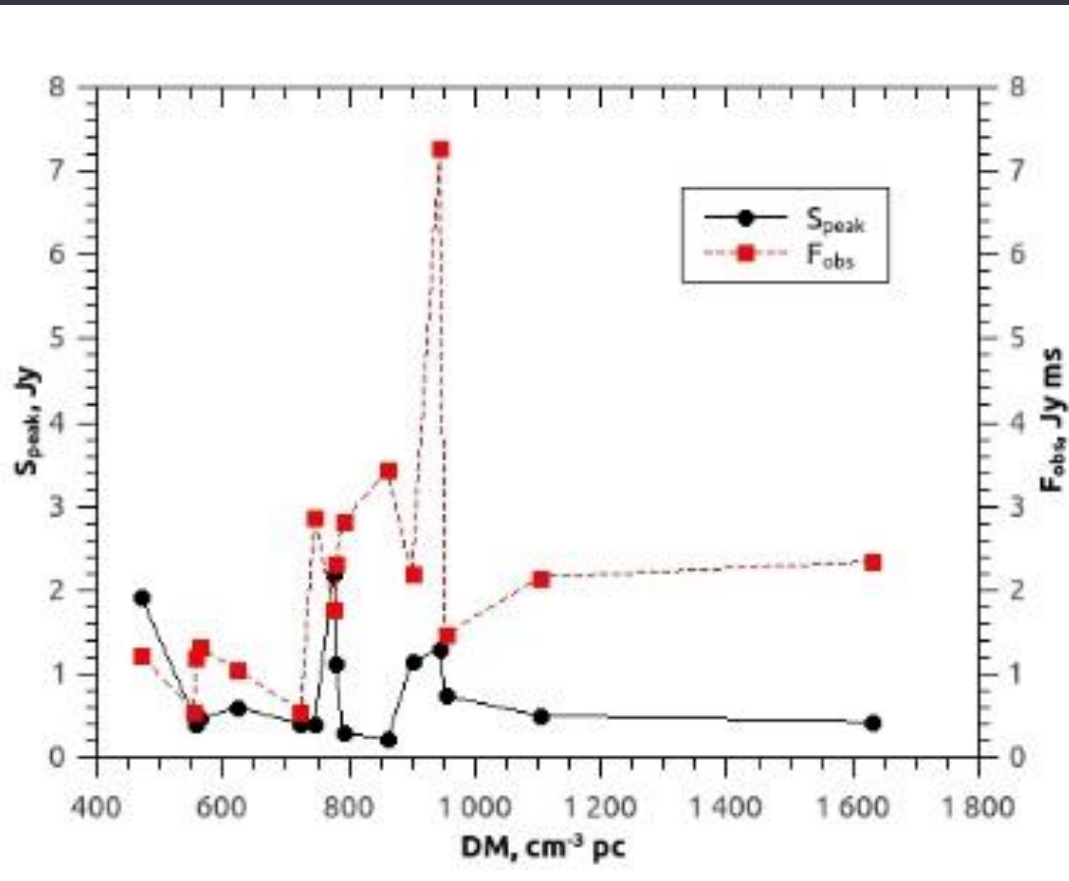
$$f_{inj} \propto \dot{E}^{-1}$$

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

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



Distribution in distance and DM



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

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

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

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

Dispersion measure does not correlate with fluence or peak luminosity.

This is in correspondence with the model.

FRB vs. 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 $f_X = 2.5 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

In the model of supergiant pulses it is natural to expect that at distances 100-200 Mpc young energetic PSRs might be strong X-ray sources, similar to ULXs.

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

(Possenti et al. 2002)

Searches for possible counterparts of FRBs in X-ray in near-by (100-200 Mpc) galaxies can confirm or falsify the model.

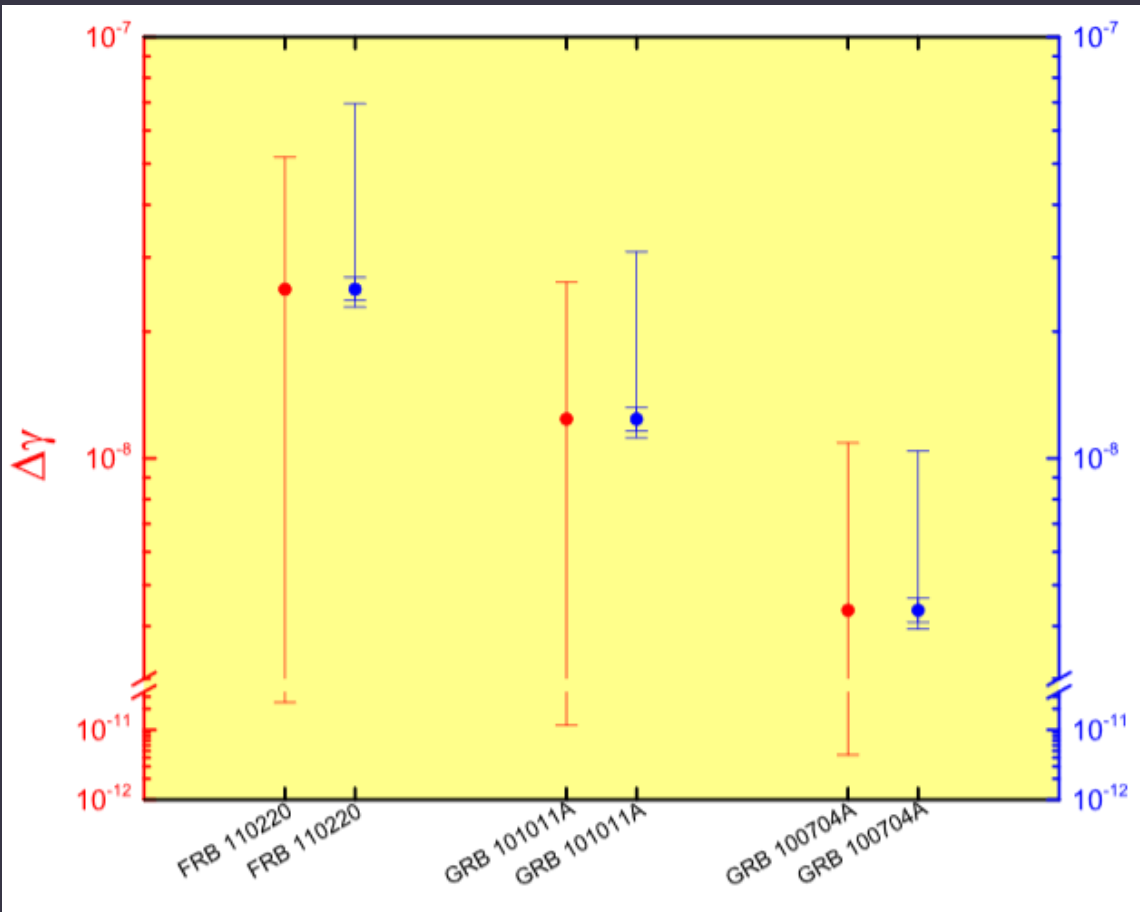
Текущий рейтинг гипотез

- Обнаружение повторных всплесков с высоким темпом дает аргументы в пользу супергигантских импульсов пульсаров или активности молодого магнитара
- Идентификация материнской карликовой галактики с высоким темпом звездообразования дает аргументы в пользу молодых НЗ
- Повторный всплеск может быть нетипичным
- Комплекс данных дает несколько косвенных аргументов в пользу магнитарной гипотезы.

Выводы:

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

Проверка принципа эквивалентности

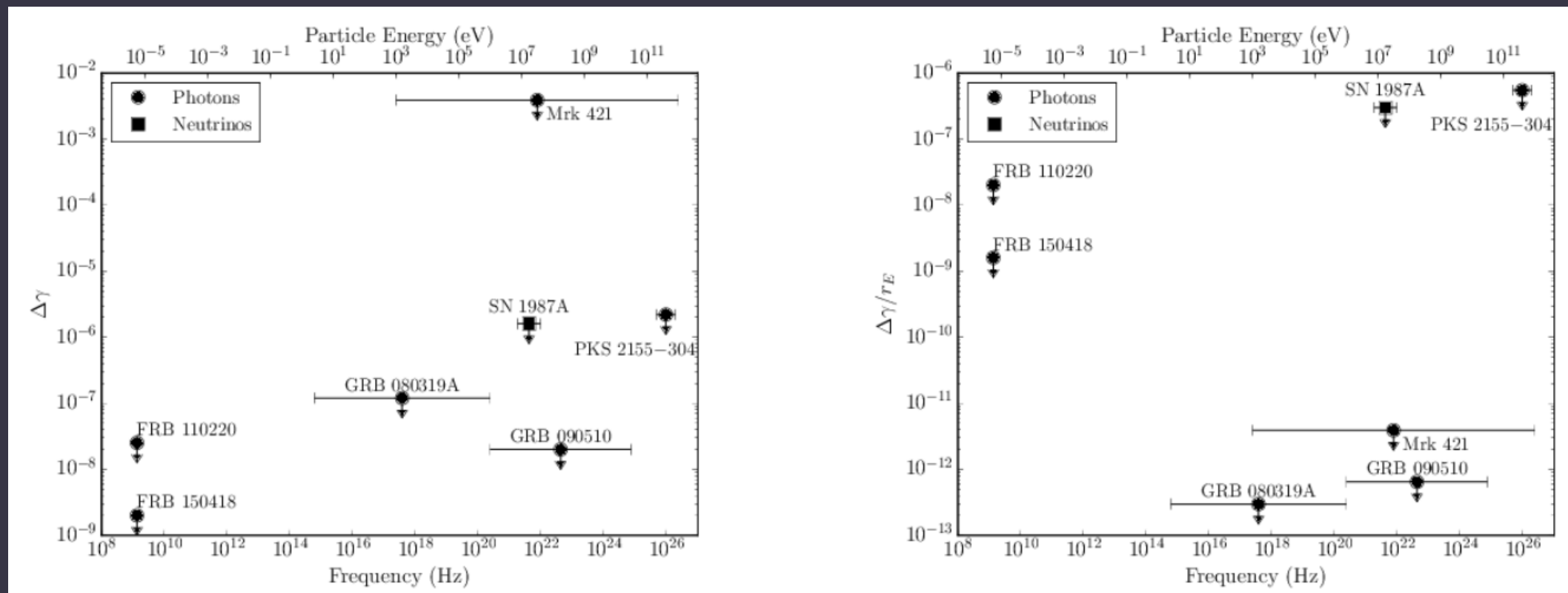


Также можно проверять лоренц-инвариантность. Особенно, если увидеть FRB, совпадающий с GRB.

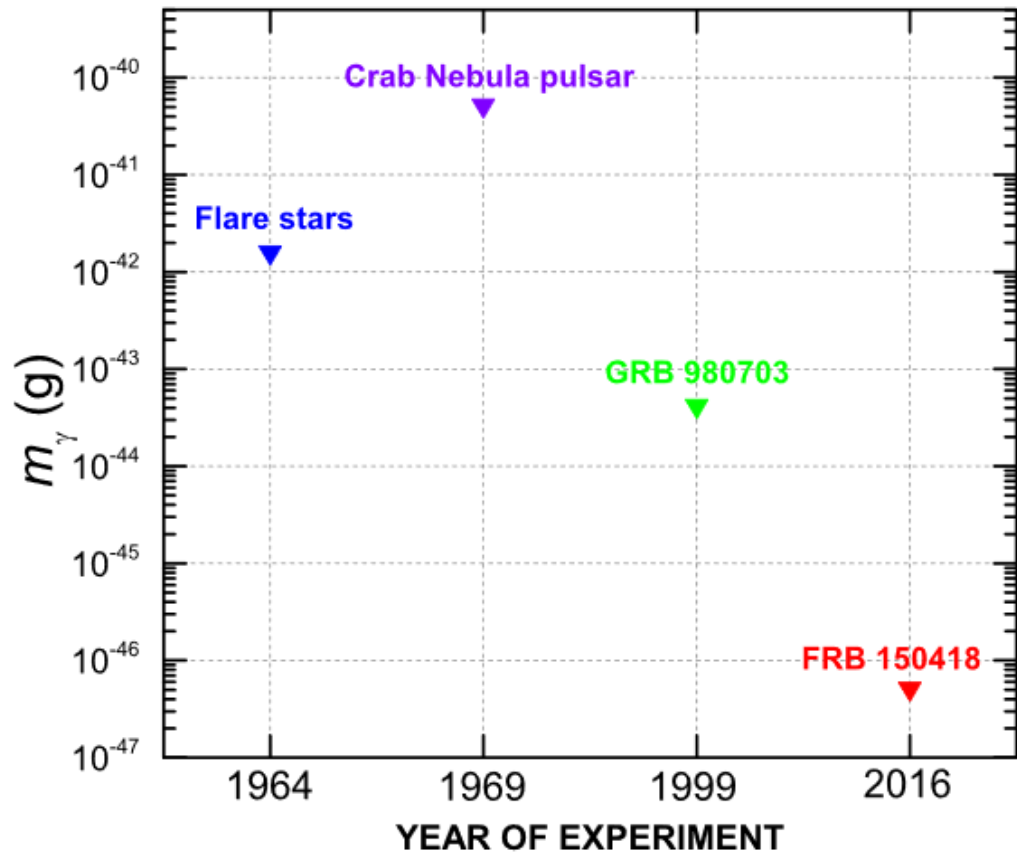
См. также 1509.00150, 1601.04558

Улучшение предела на параметр γ

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



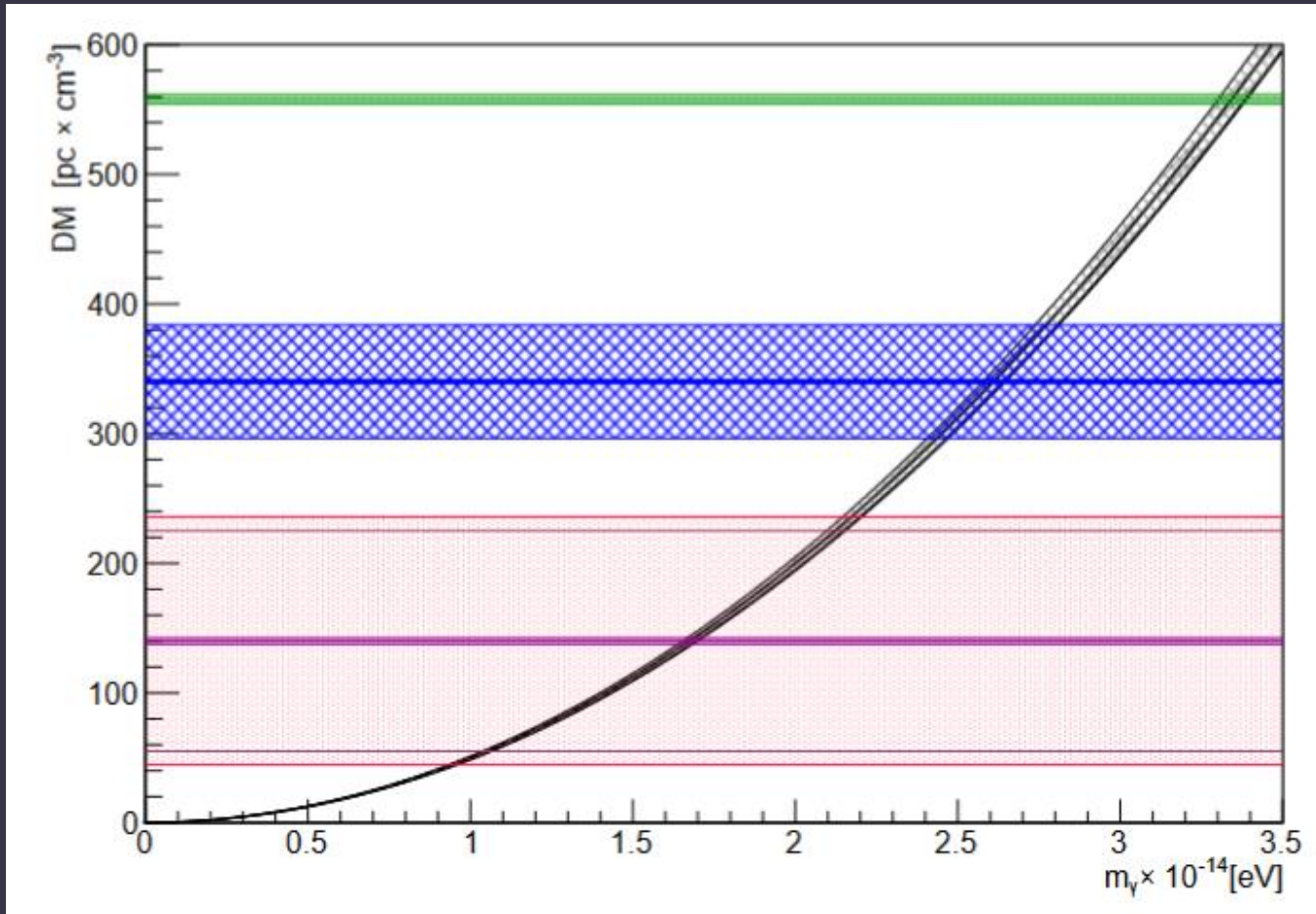
Предел на массу фотона



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

См. также 1602.09135

Новый предел на массу фотона



$$m_{\gamma} \lesssim 2.2 \times 10^{-14} \text{ eV c}^{-2} \quad (3.9 \times 10^{-50} \text{ kg})$$

Future observations

FAST



FAST – burst per week

1602.06099



SKA

SKA – burst per hour!

1602.05165, 1501.07535

Near future

Observation at other telescopes,
especially for the repeating source.

Attempts to identify something
at other wavelengths.

Observations at Parkes
with a new monitoring system.



UTMOST

The Transient Universe In Real Time

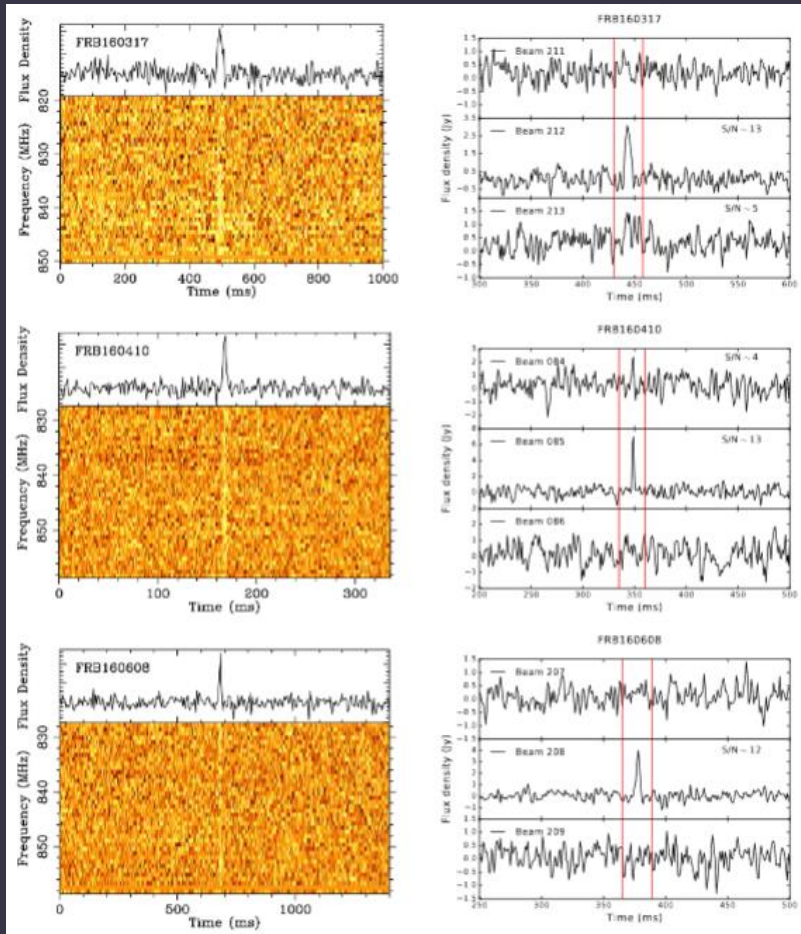
New system ALFABURST at Arecibo.
1511.04132

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

Burst per week, see 1601.02444



Первые результаты UTMOST



843 МГц.
Три всплеска за 180 дней наблюдения.
Повторов нет.

$$\mathcal{F}_{\text{lim}} \approx 11 \left(\frac{W}{\text{ms}} \right)^{1/2} \text{ Jy ms}$$

$$\mathcal{R}(\mathcal{F} \gtrsim 11 \text{ Jy ms}) \gtrsim 0.78_{-0.57}^{+1.24} \times 10^2 \text{ events sky}^{-1} \text{ d}^{-1}$$

$$\mathcal{R}(\mathcal{F} \gtrsim 69 \text{ Jy ms}) \sim 5.0_{-4.7}^{+18.7} \text{ events sky}^{-1} \text{ d}^{-1},$$

Или спектр плоский,
и тогда $\text{Log } N - \text{Log } S$ не $-3/2$, а -1 .
Или при $-3/2$ спектр -1 .

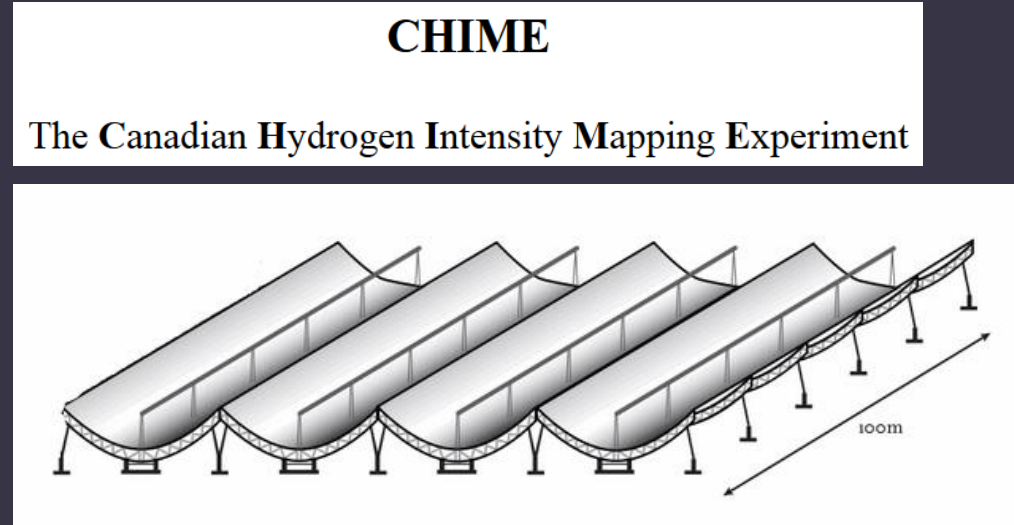
Special projects partly dedicated to FRBs



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



1607.02059



CHIME – burst per day!
1601.02444

HIRAX.
South variant of CHIME

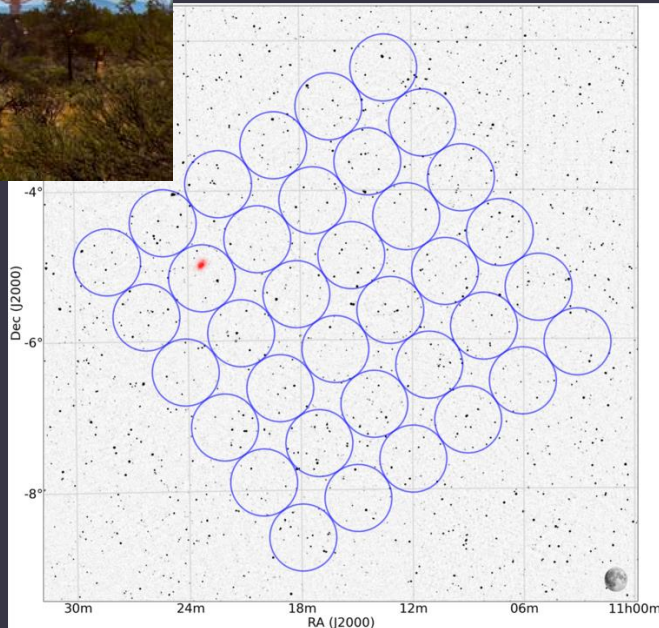
<http://chime.phas.ubc.ca/>

ASKAP and Apertif

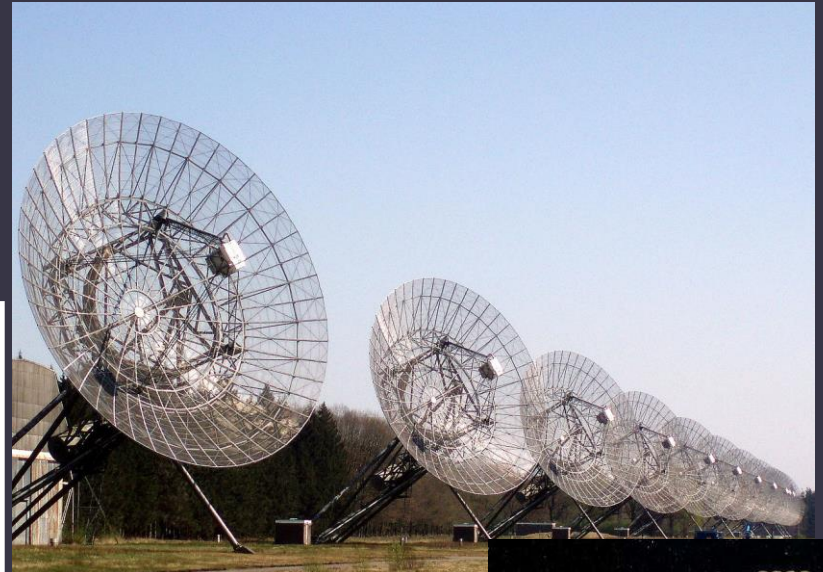
ASKAP



Few bursts per week.
1709.02189



Westerbork



Northern sky.
Doubling the number?
Rapid on-line
identification – follow-up.
FRB per week.

1709.06104

