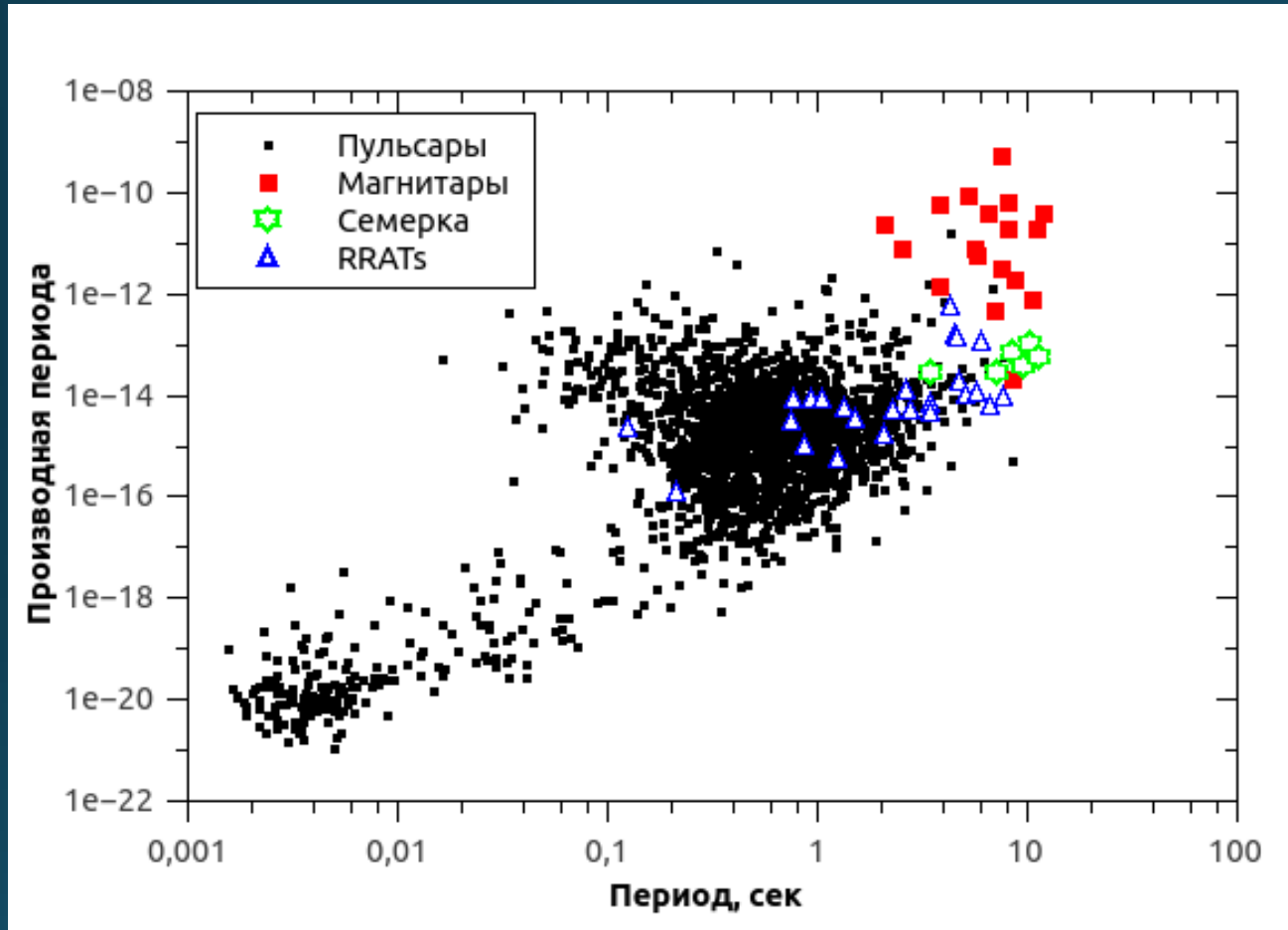


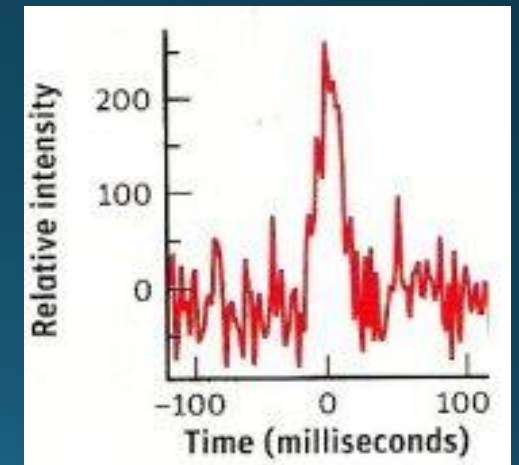
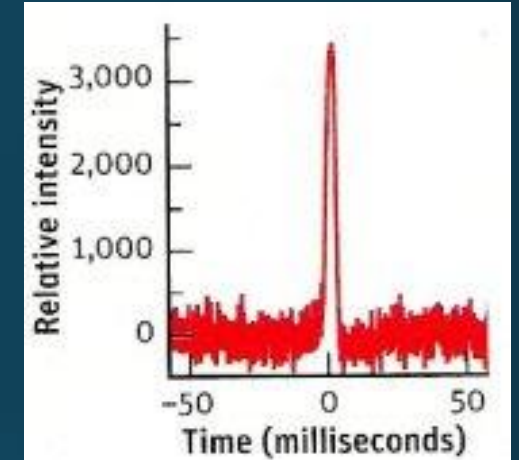
Быстрые радиовсплески

С.Б. Попов

RRATs – Вращающиеся радиотранзиенты

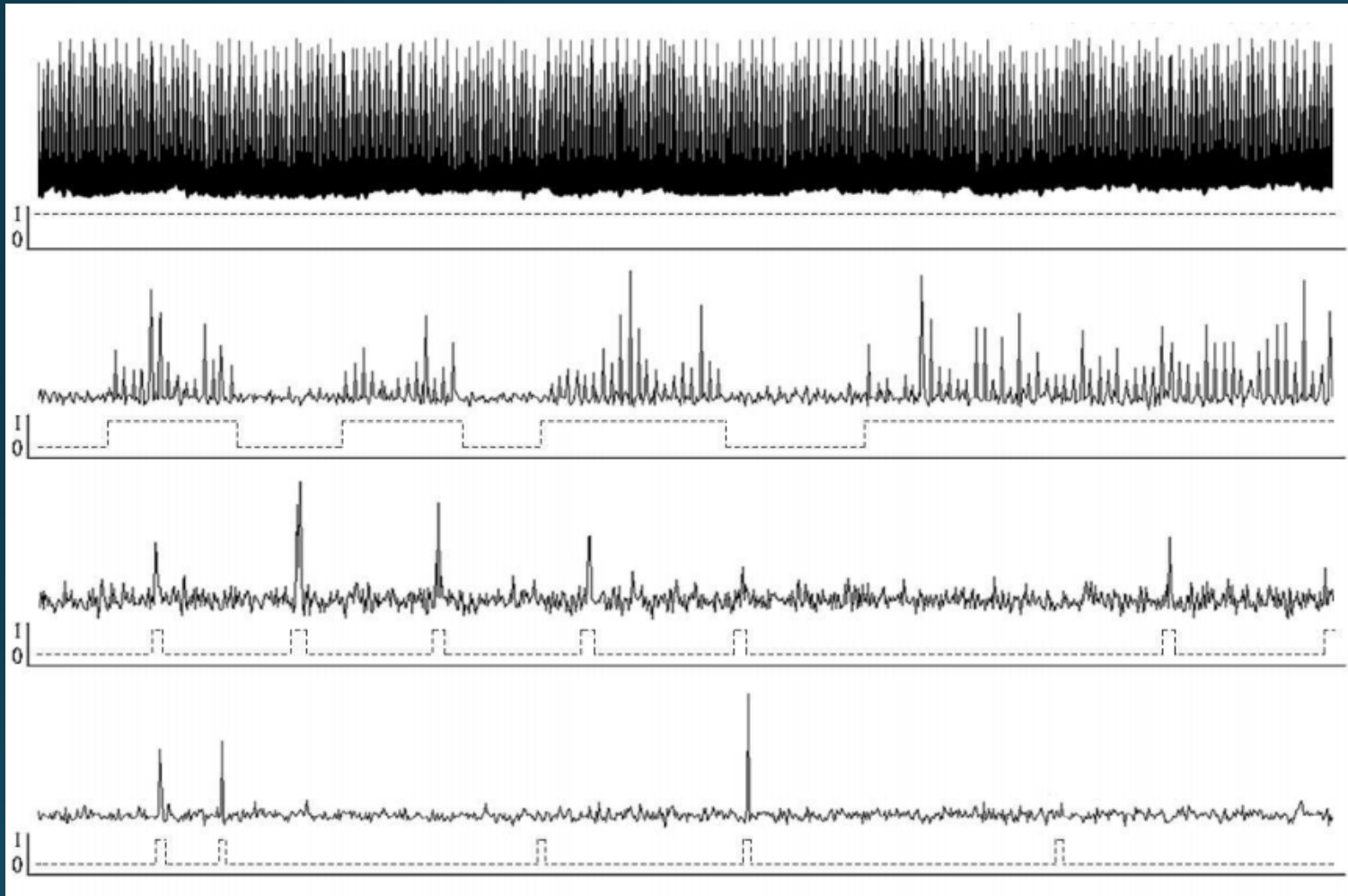


Миллисекундные радиовсплески нейтронных звезд.
Удалось измерить период вращения и его производную.
Причины всплесков не известны до сих пор.



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

RRAT – это пульсары?



Vela

PSR
J1646-6831

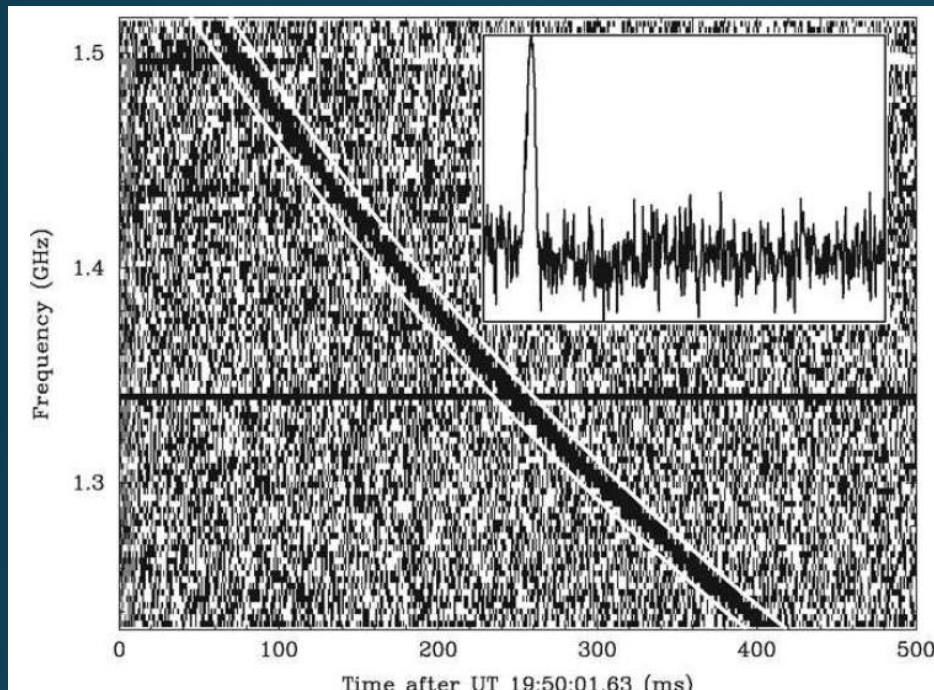
J1647-36

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)



Одно из самых интересных открытий 2007 г.

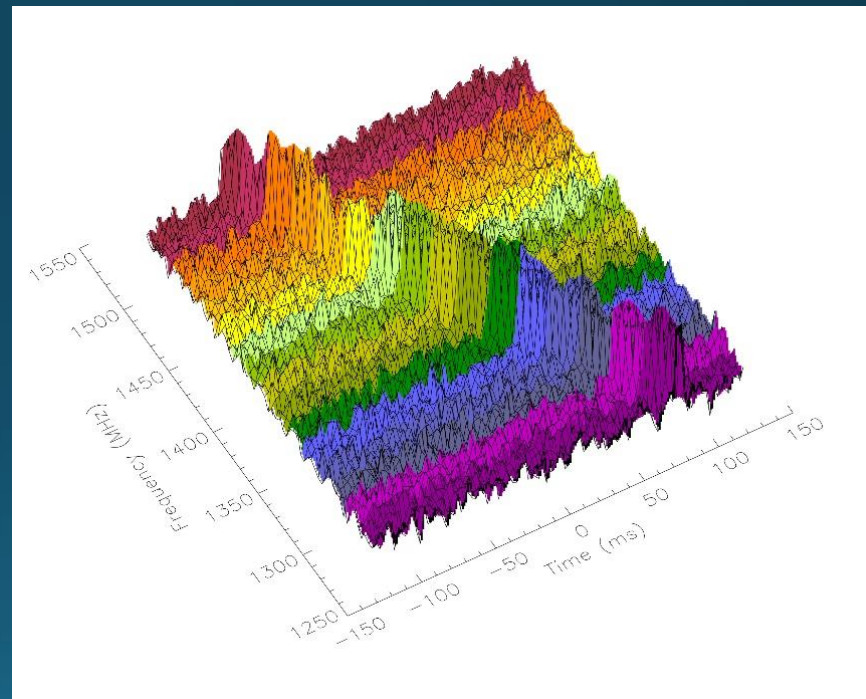
В направлении всплеска не были видно вспышек в других диапазонах.

Идентифицировать источник не удалось.

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

Открыты в 2007 году.

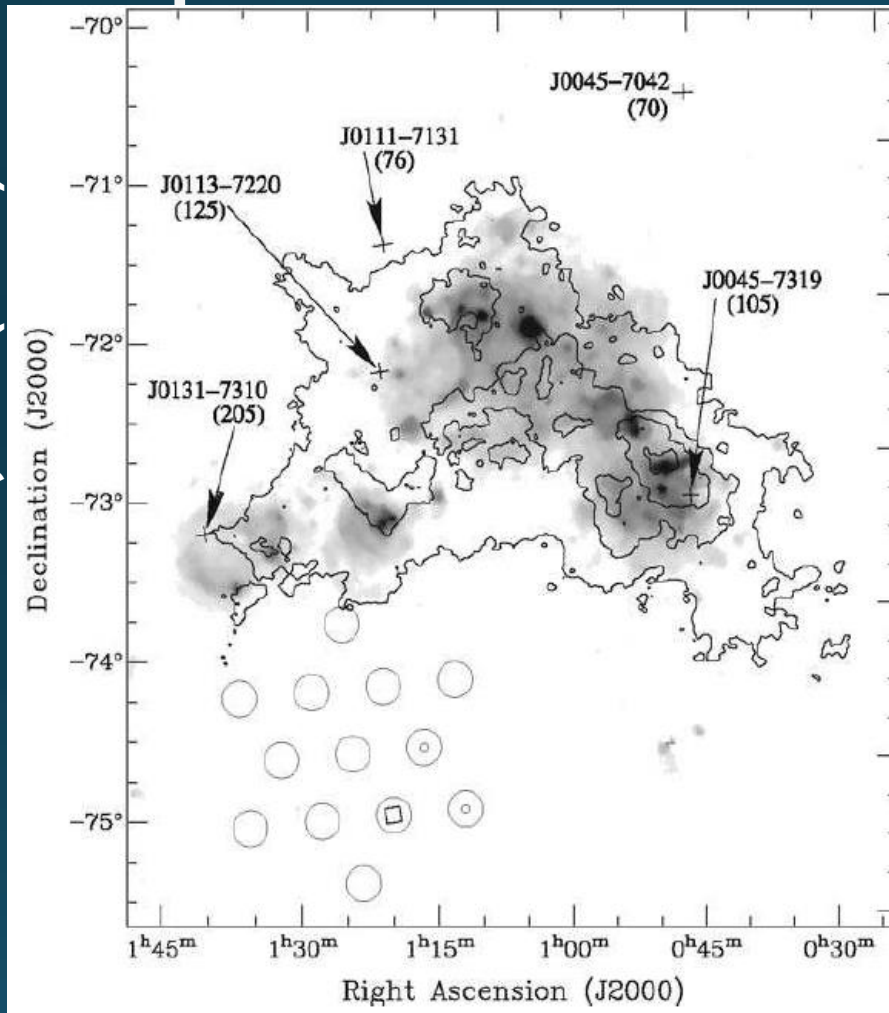
Происхождение неизвестно.



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

Первый всплеск

Science 318, 777 (2007)



Открыт в Парксе
Дунканом Лоримером и др.

~30-40 Ян, < 5 мсек.

3 градуса от Малого
Магелланового Облака



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

1511.02870

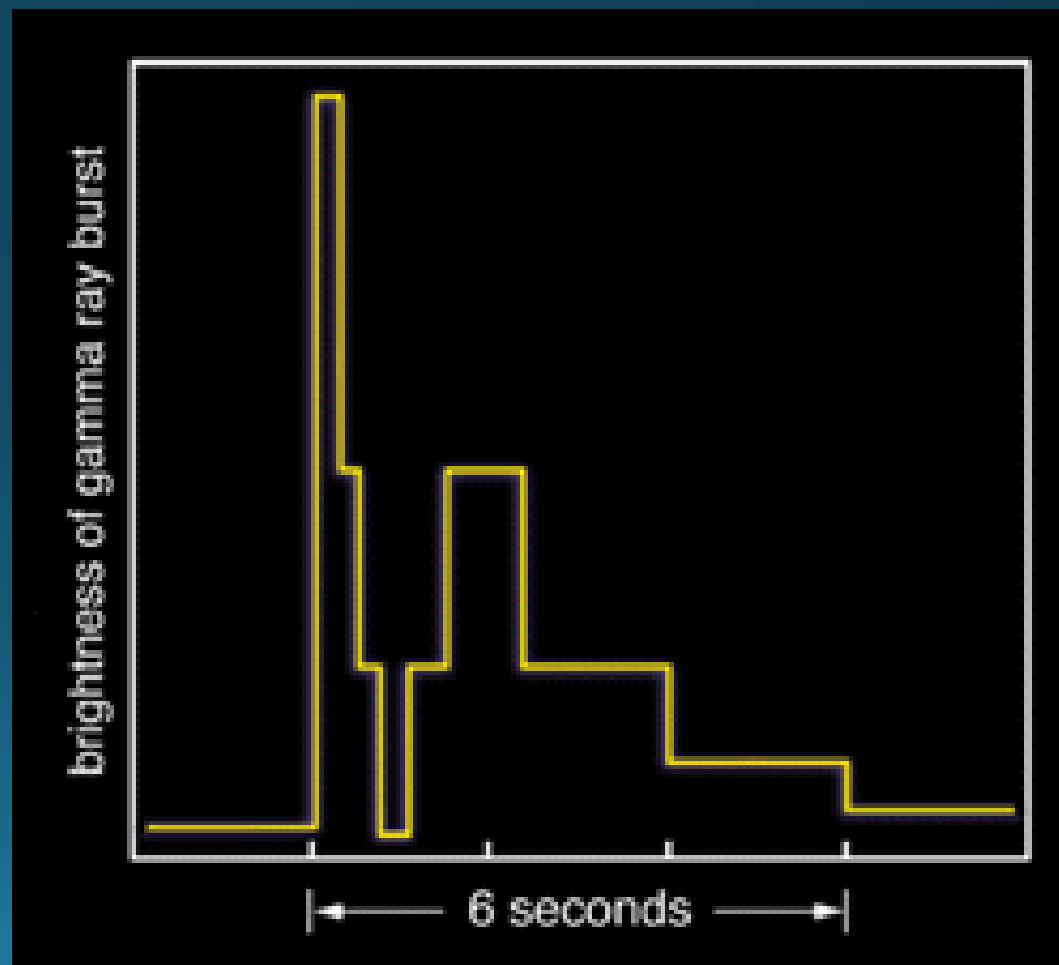
История повторяется? GRB2.0?

<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.

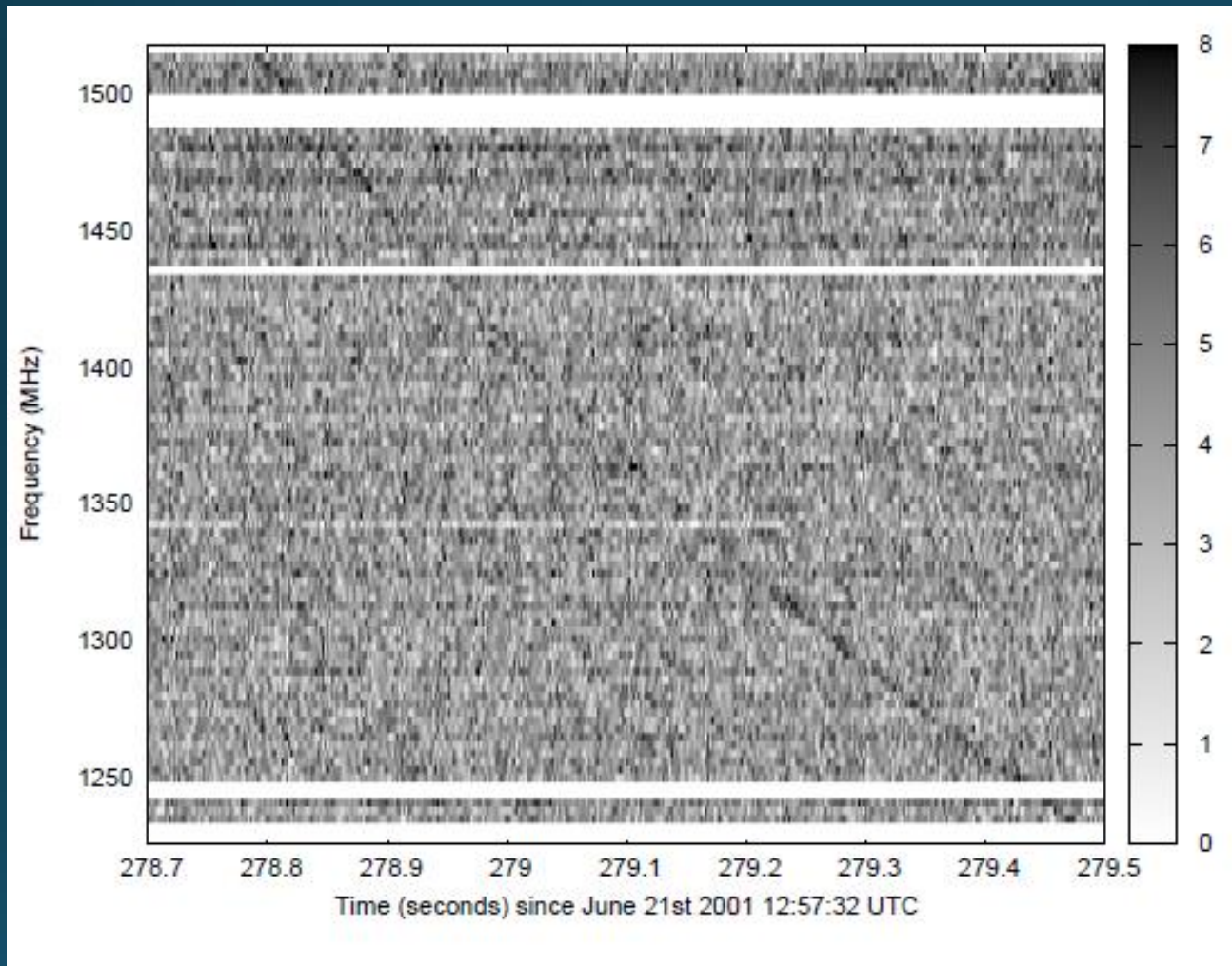
В конце 60 гг. были открыты космические гамма-всплески. 30 лет они оставались загадкой, т.к. в направлении всплеска не удавалось увидеть сигнал в другом спектральном диапазоне.



<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.

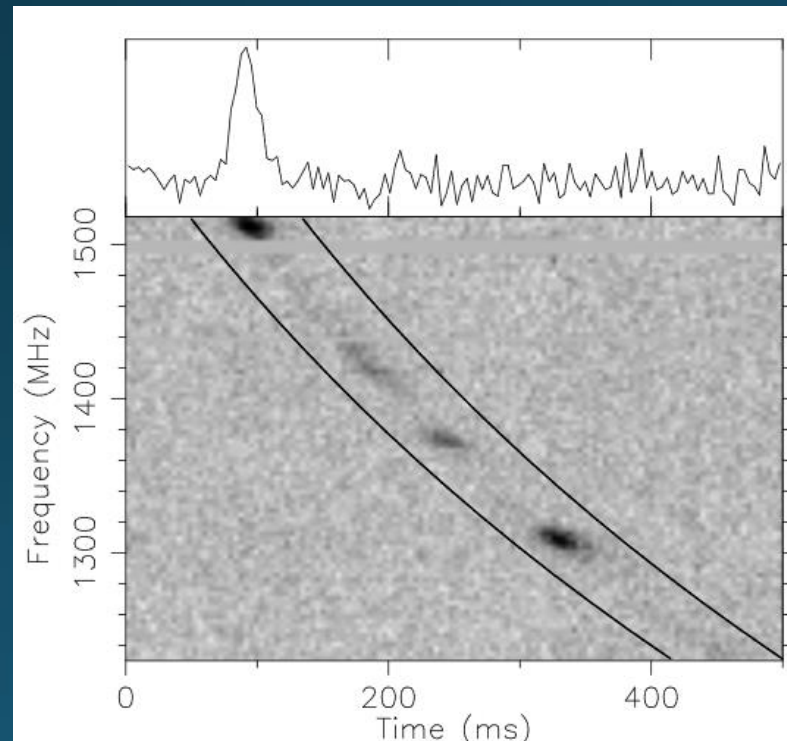
Т.к. всплеск отличался от лоримеровского, то ясности
в ситуацию с быстрыми радиовсплесками это не внесло.

Perytons

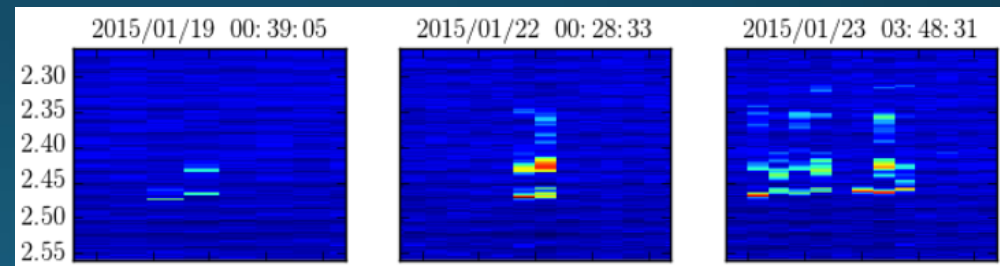
Перитоны начали активно обсуждать несколько лет назад. Их свойства сразу говорили о том, что это должны быть всплески где-то вблизи (максимум – земная атмосфера).

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



<http://www.onex.in/images/doubts.jpg>

Миллисекундные радиовсплески

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

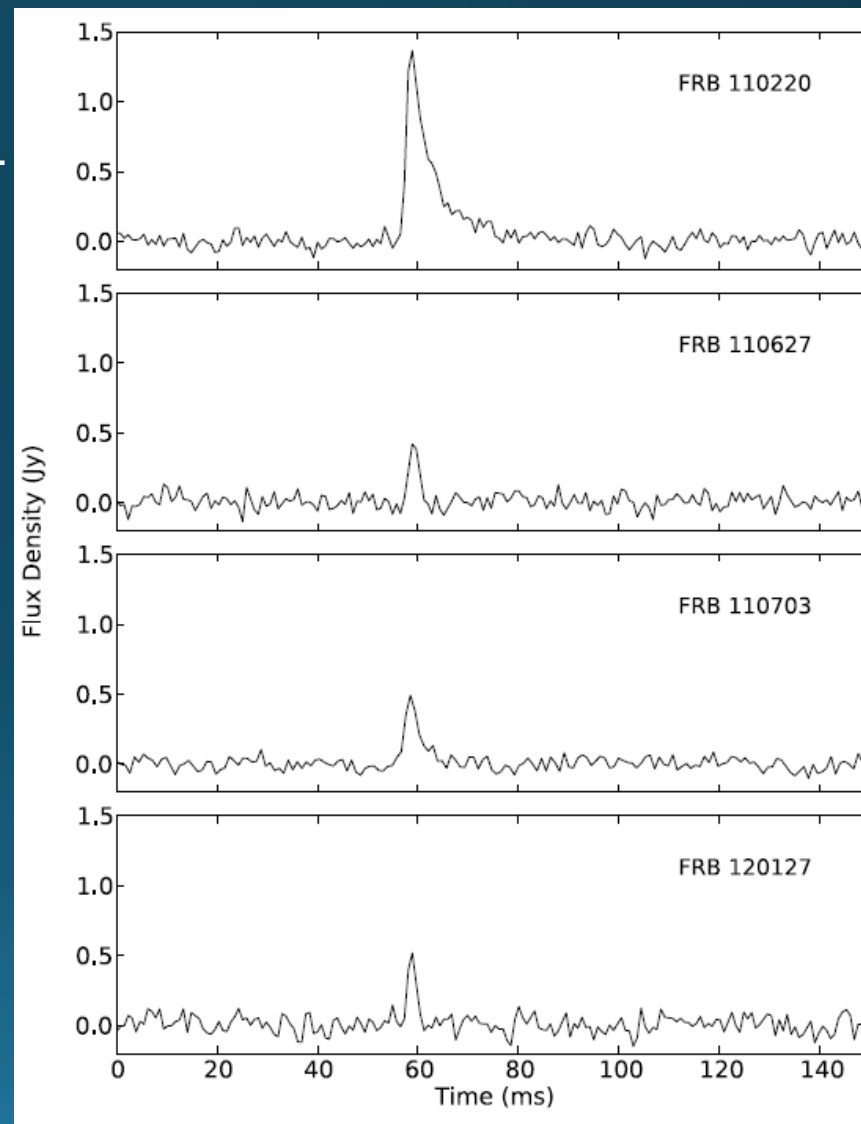
В 2013 – сомнения долой! Еще четыре!

Темп ~ неск. тысяч в день на всем небе.

Это явно новый класс событий,
происхождение которых неизвестно:

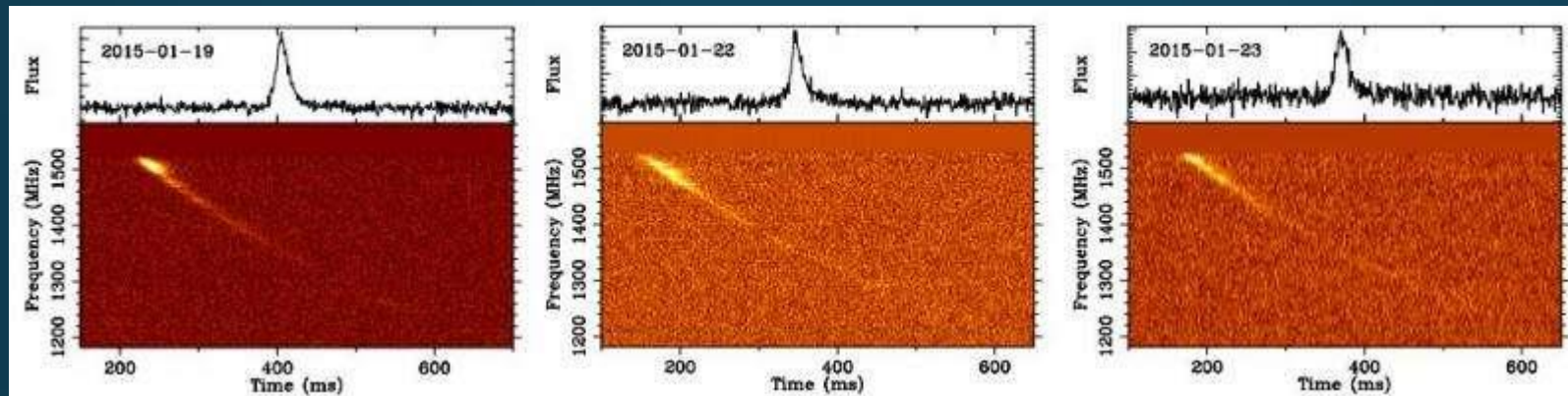
- магнитары
- гамма-всплески
- слияния нейтронных звезд
- сверхновые
- слияния белых карликов
- массивные нейтронные звезды
- вспышки на обычных звездах (?)

Появилось устоявшееся название
Fast Radio Bursts



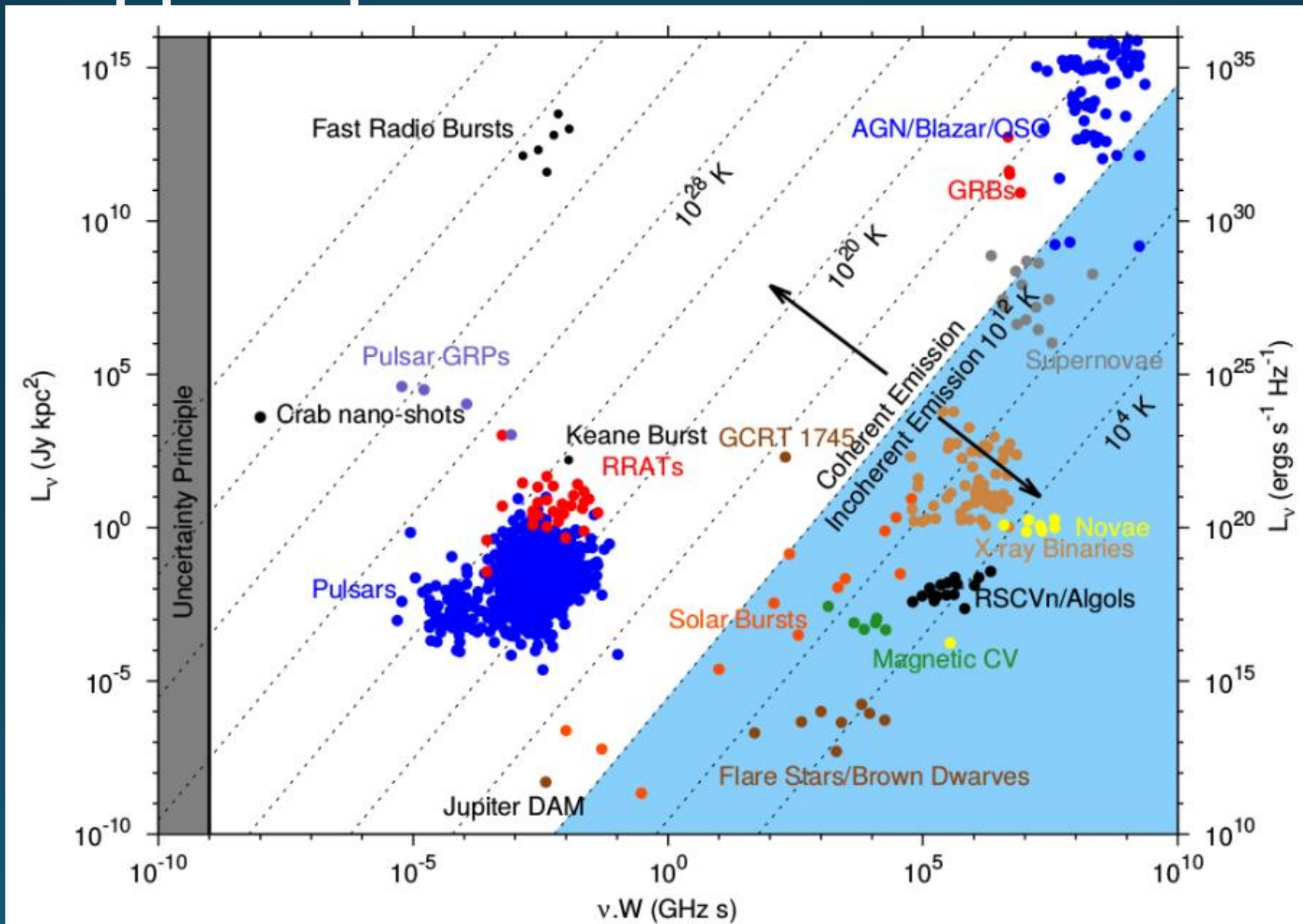
Перитоны – микроволновки!

1504.02165



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.

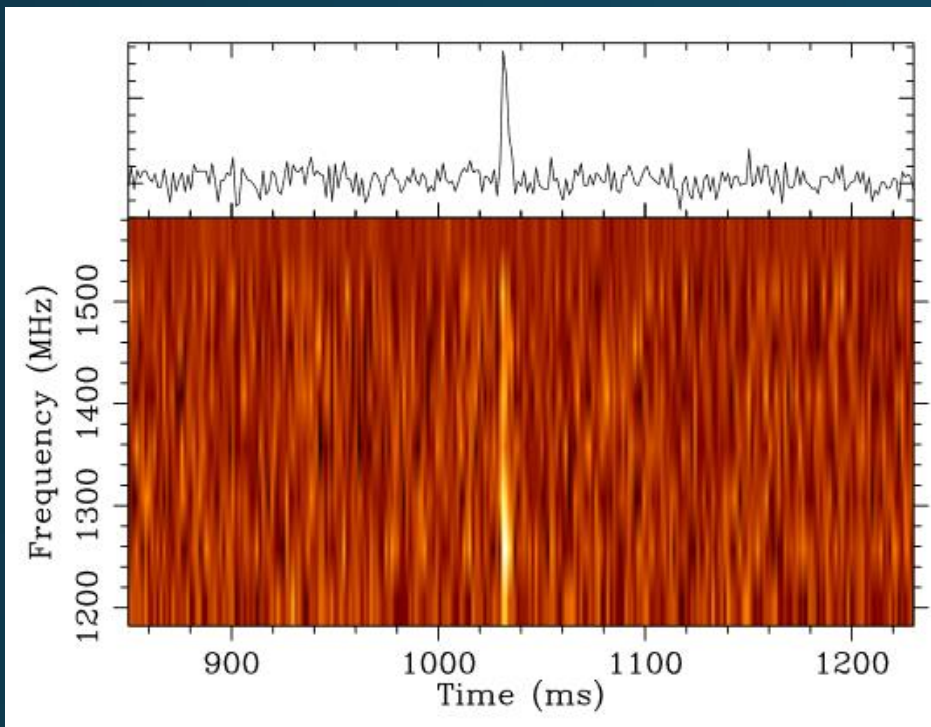
Радиотранзиенты



1507.00729, 1411.1067

Первый всплеск в реальном времени

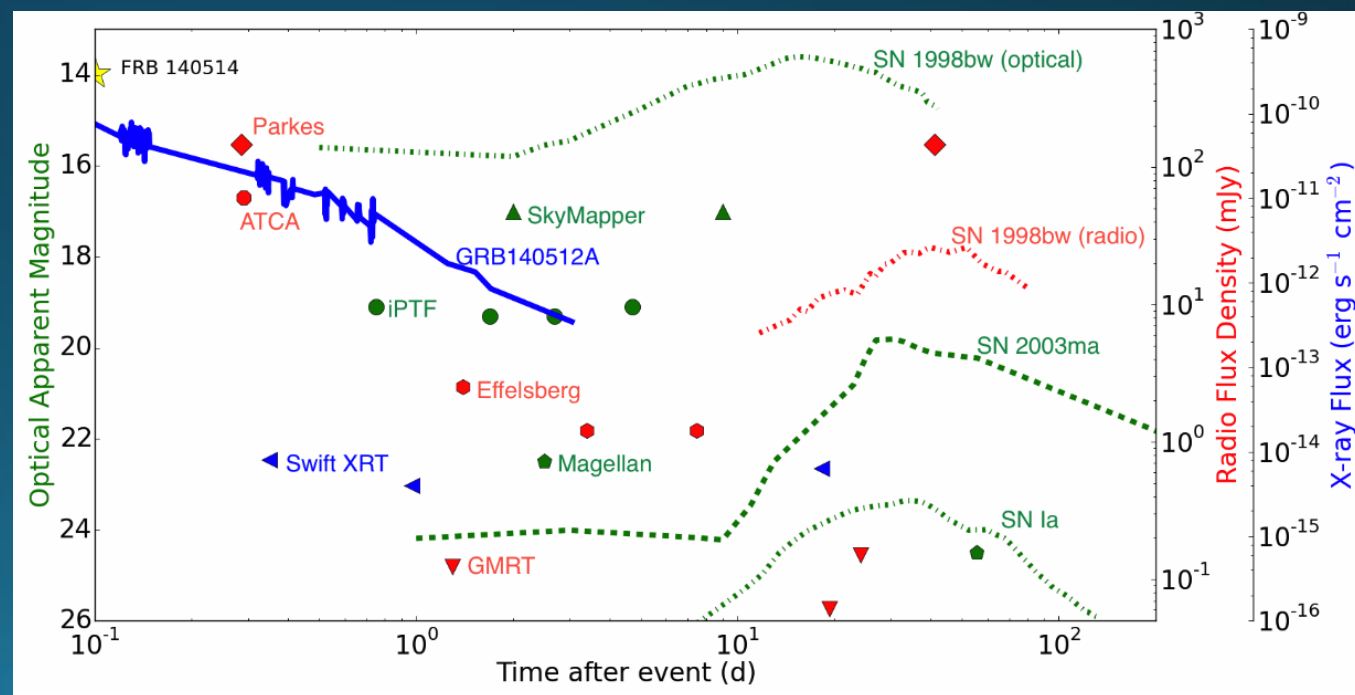
1412.0342



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

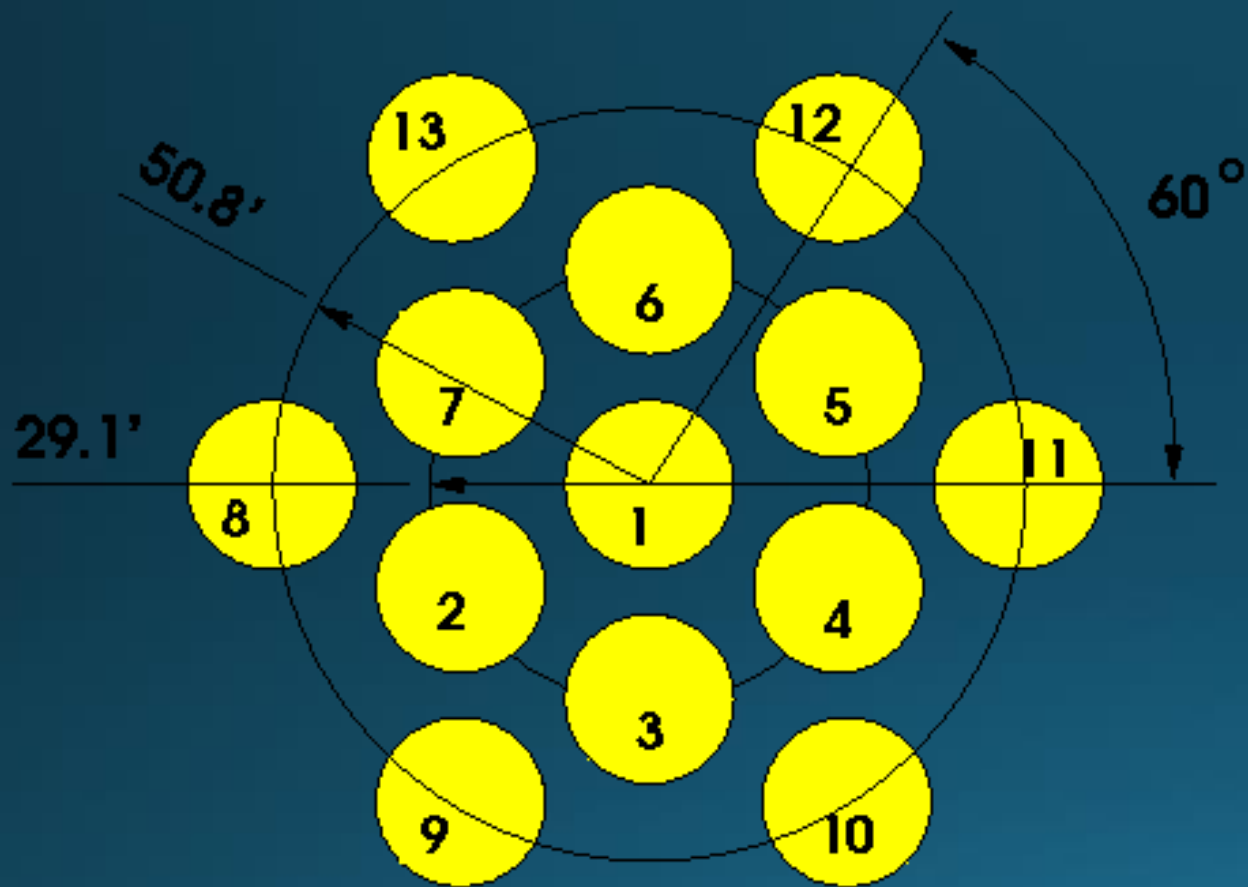
В мае 2014 года впервые удалось увидеть
быстрый радиовсплеск в реальном времени.
Т.е., он был обнаружен непосредственно
при наблюдениях, а не найден в архиве.

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

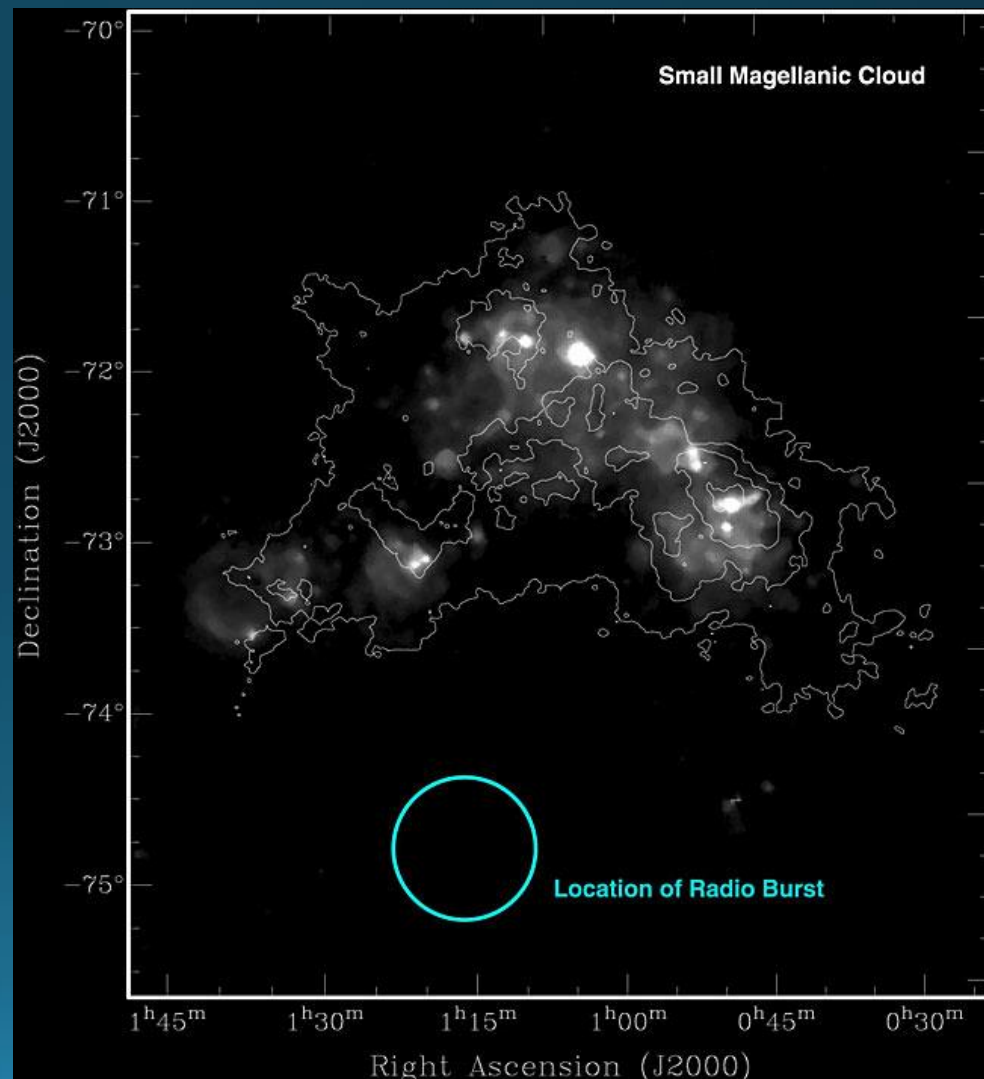


Локализация

Радиус области неопределенности ~ 10 угловых минут



Обычно БРВ виден только в одном биме.



Повторные всплески

Впервые удалось увидеть
повторные всплески от FRB 121102.

Наблюдения на Арэсибо.

10 событий.

Темп ~ 3/час

Всплески слабые (<0.02-0.3 Ян)

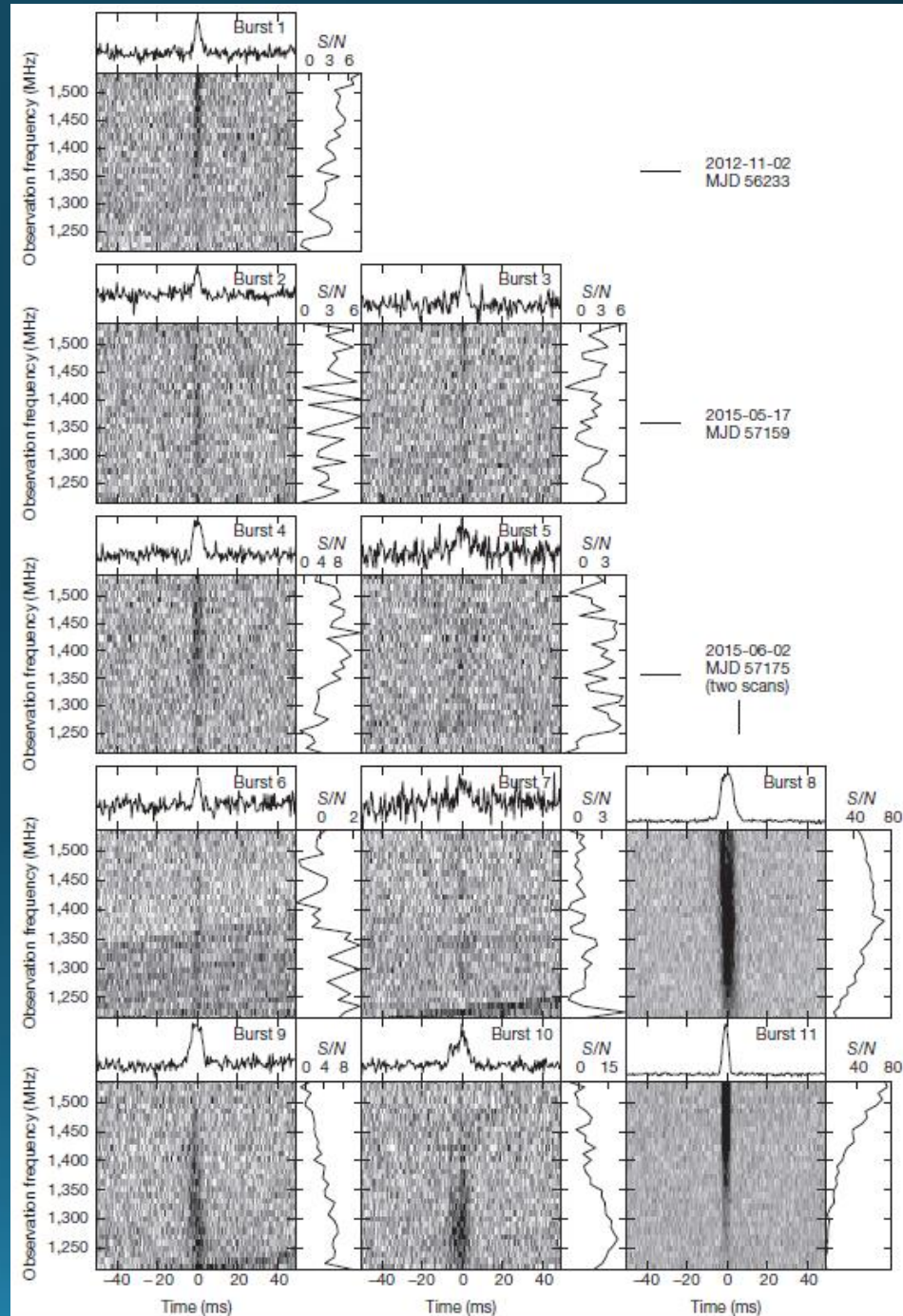
Некоторые из всплесков имеют
двойную структуру.

Переменный спектр.

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

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

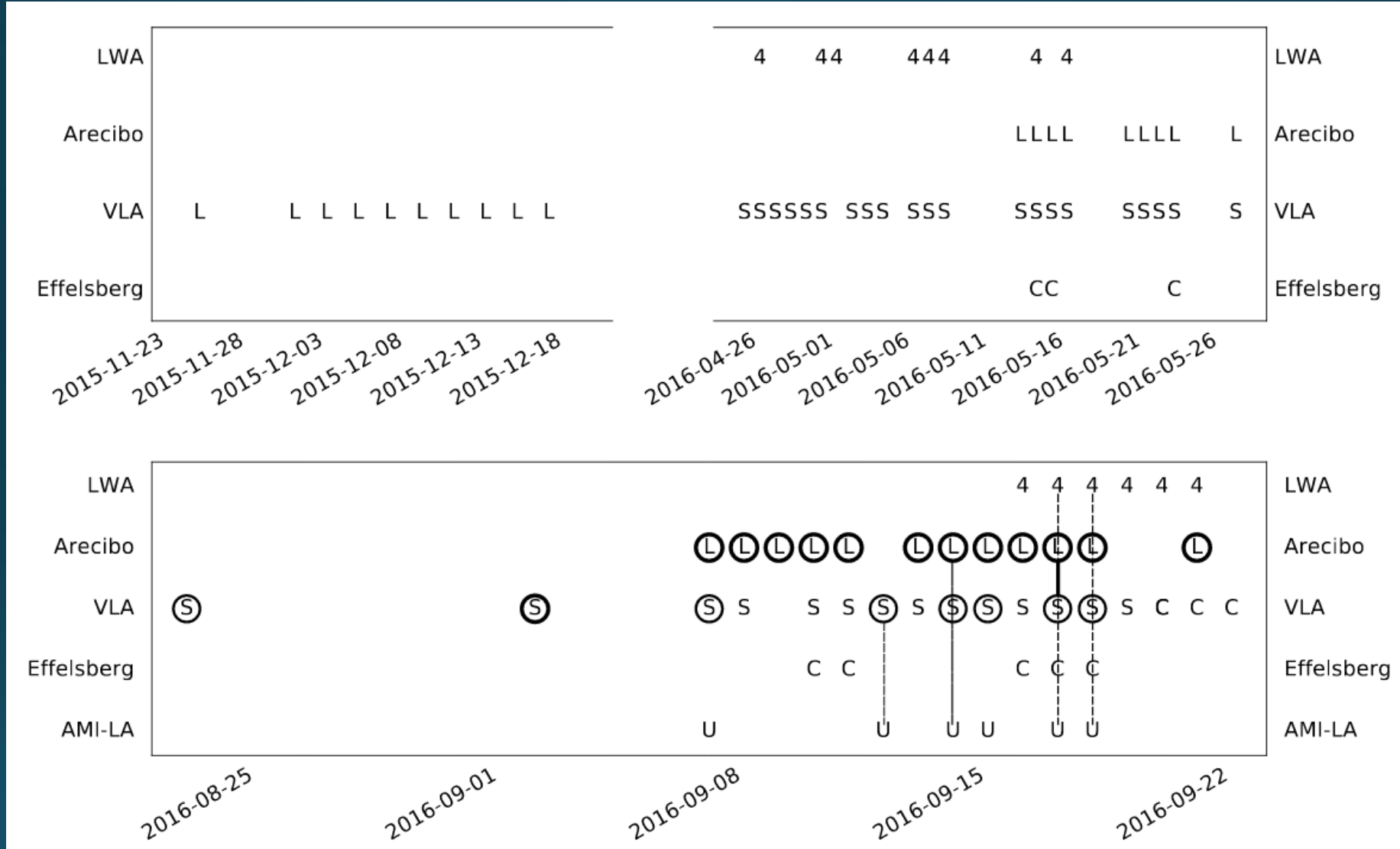
(Wang & Yu 2016)



1603.00581

VLA, Arecibo и все-все-все

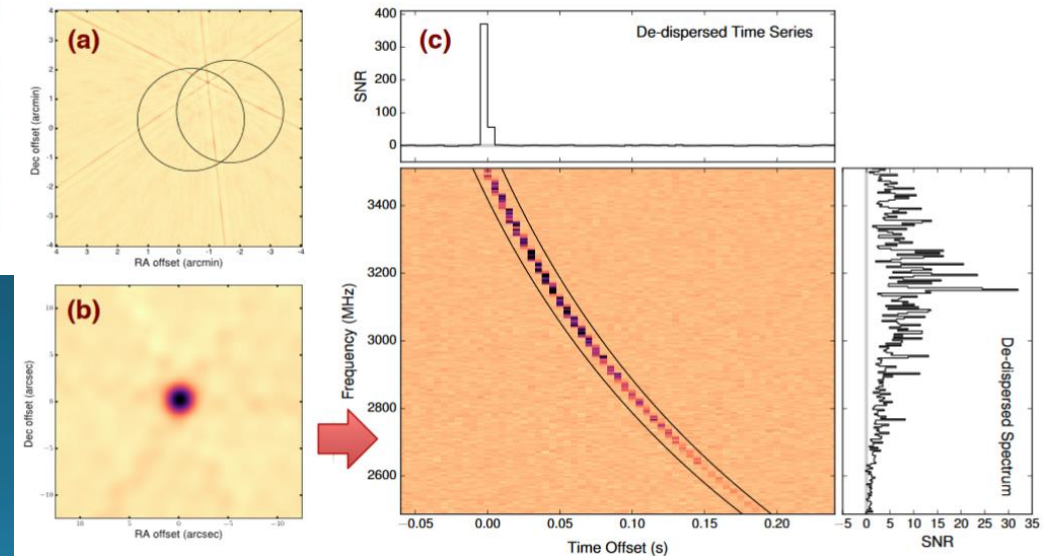
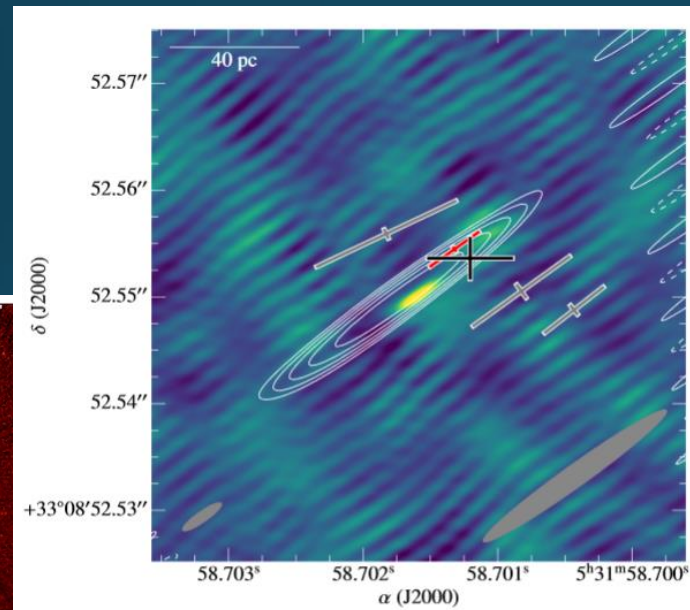
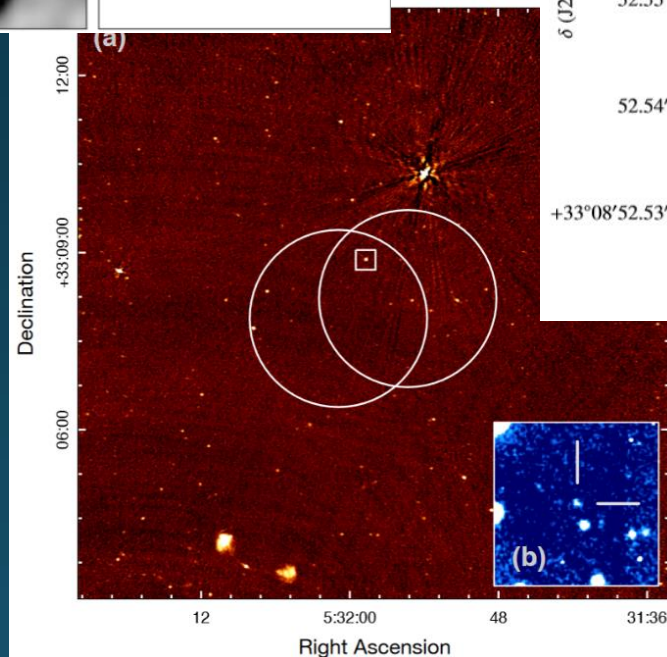
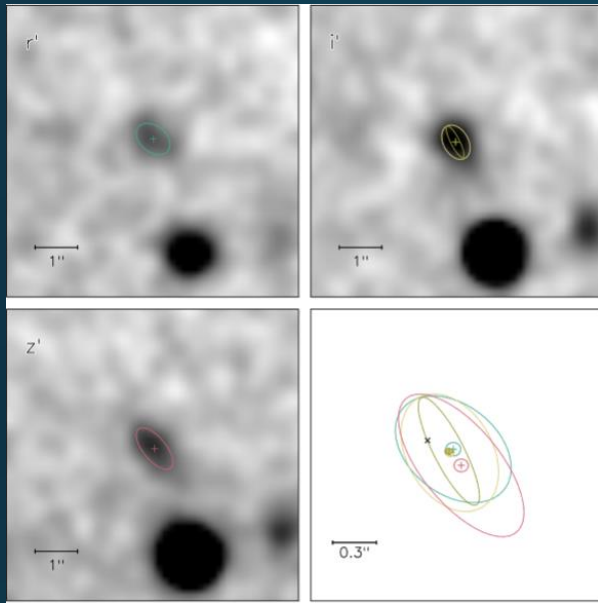
1705.07553



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

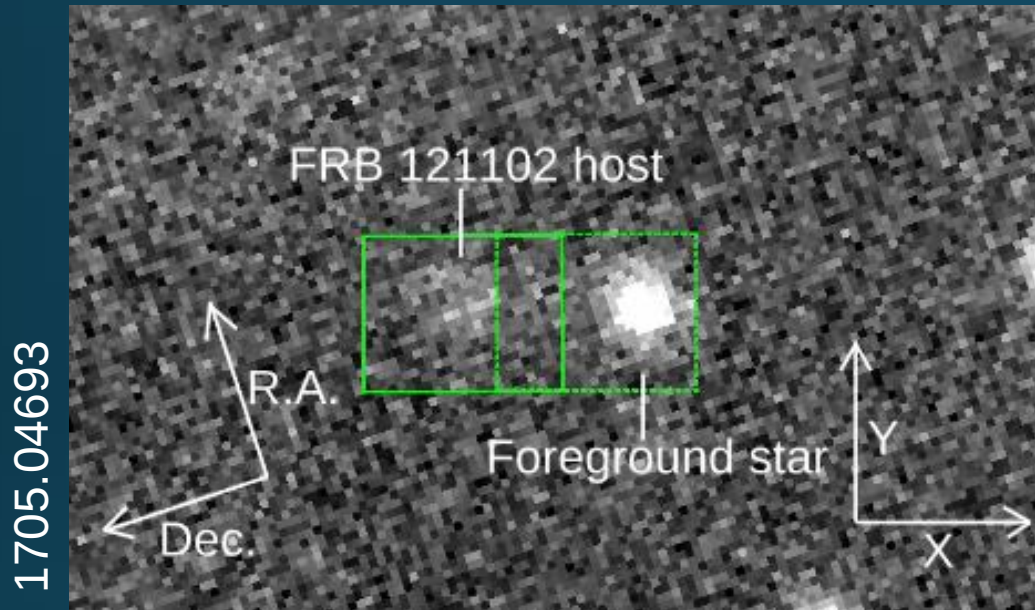
Галактика FRB

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

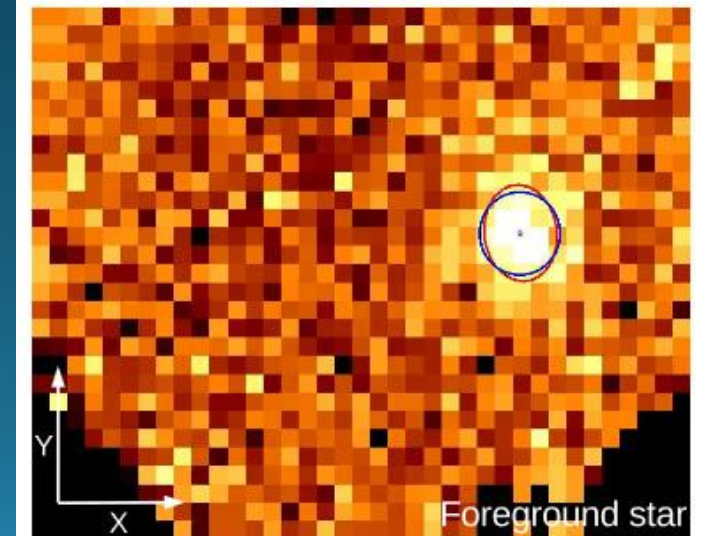
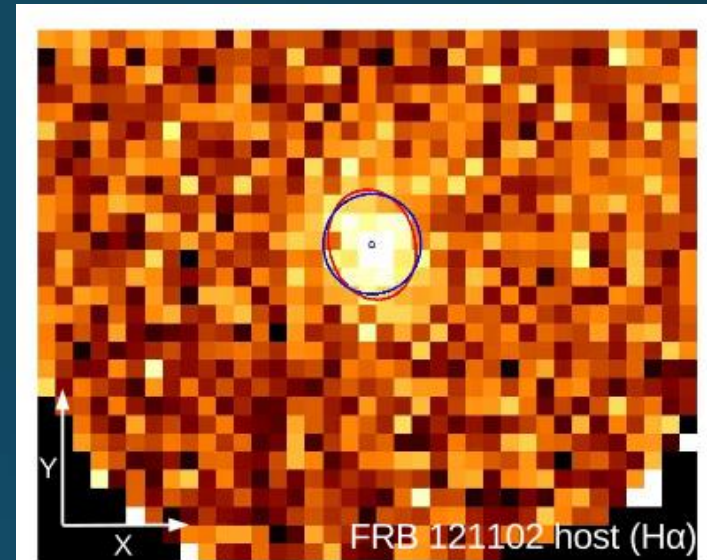
Излучения H-alpha в галактике FRB 121102



Изображение на Кеке.
Прямоугольники показывают области,
наблюдавшиеся на Субару.

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.



Каталог быстрых радиовсплесков



FRB Catalogue

This catalogue contains up to date information for the published population of Fast Radio Bursts (FRBs). This site is maintained by the FRBCAT team and is updated as new sources are published or refined numbers become available. 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 "Verified events/All events" button below.

Information for each burst is divided into two categories: observed parameters from the available data, and derived parameters produced using a model. Cosmological values are obtained using the Cosmology Calculator ([Wright, 2006](#)). The observed parameters are sometimes either lower or upper limits, due to the limitations of the data acquisition systems. 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.frbcat.org>). Any issues relating to the use of the catalogue should be addressed to FRBCAT team (primary contact: Emily Petroff).

An up-to-date CSV file containing all parameters for all FRBs is available at the following stable link: <http://www.frbcat.org/frbcats.csv>

Visible columns

Verified events

 Export to CSV

Search

Clear

	FRB ▾	UTC ▾	Telescope ▾	RAJ ▾	DECJ ▾	gl ▾	gb ▾	DM ▾	Width ▾	S/N ▾
+	FRB180817.J...	2018/08/17 01:49:20.202	CHIME/FRB	15:33	+42:12	68	54	1006.84±0.002	0.37	69.9
+	FRB180814.J...	2018/08/14 14:20:14.440	CHIME/FRB	15:54	+74:01	108	37	238.32±0.01	0.18	29.7
+	FRB180814.J...	2018/08/14 14:49:48.022	CHIME/FRB	04:22	+73:44	136	16	189.38±0.09	2.6	24
+	FRB180812.J...	2018/08/12 11:45:32.872	CHIME/FRB	01:12	+80:47	123	18	802.57±0.04	1.25	19.8
+	FRB180810.J1...	2018/08/10 22:40:42.493	CHIME/FRB	11:59	+83:07	125	34	169.134±0.002	0.28	56.7

<http://frbcats.org/>

Гипотезы, гипотезы ...

Сейчас известно более 20 всплесков.

Для их объяснения придумано около 20 существенно разных моделей!

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

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

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

Нейтронные звезды и экзотика



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

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

Время падения $t=R/v < 0.1$ msec

Поэтому легко получать короткие события.

То же самое для черных дыр.

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



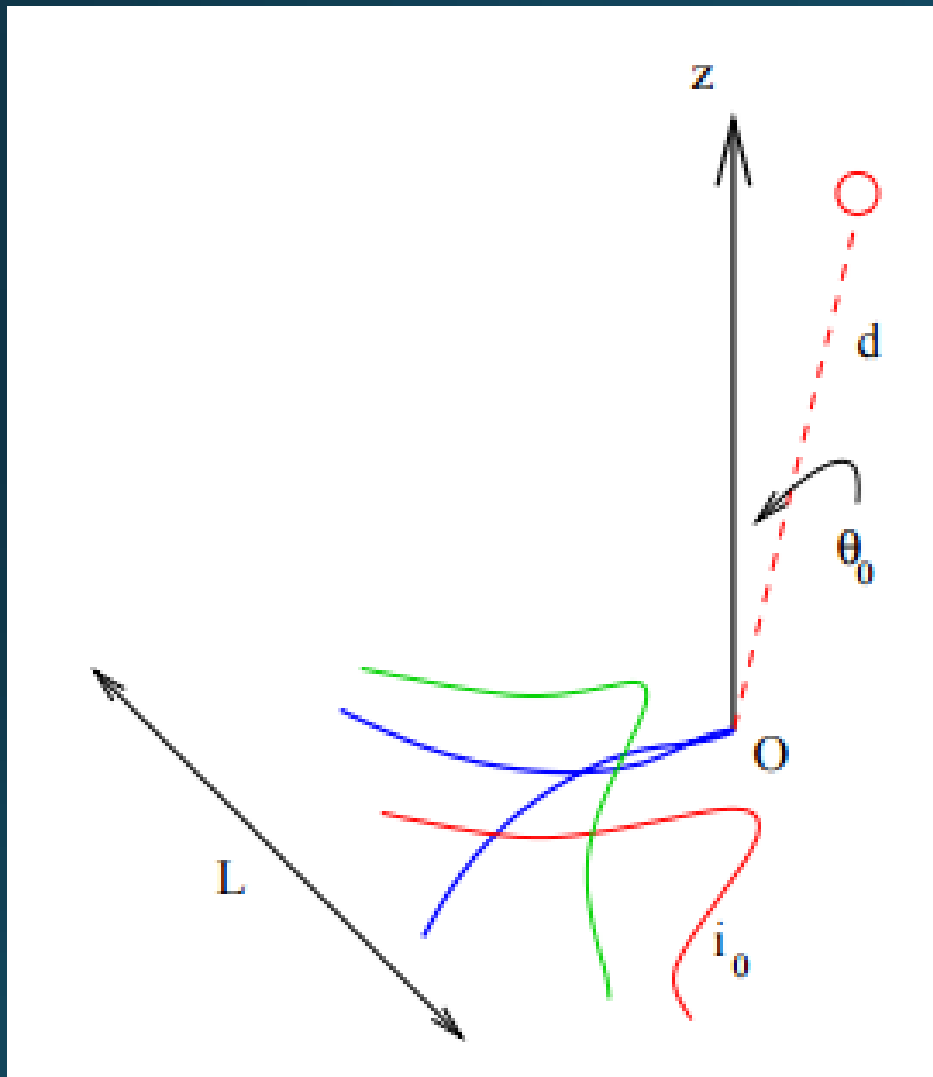
<http://bestiary.ca/>

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.



Космические струны

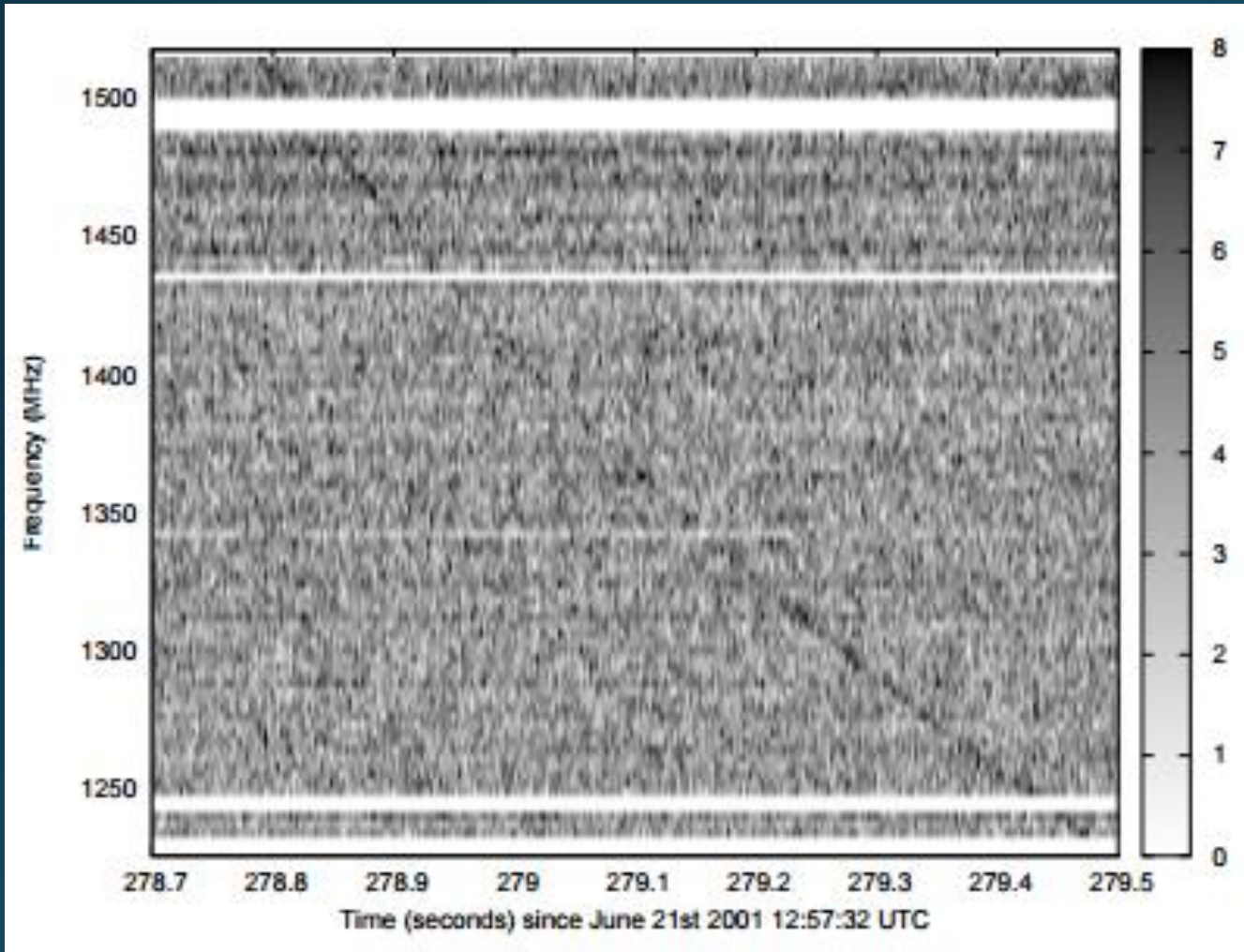


Сверхпроводящие струны
Vachaspati 0802.0711

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



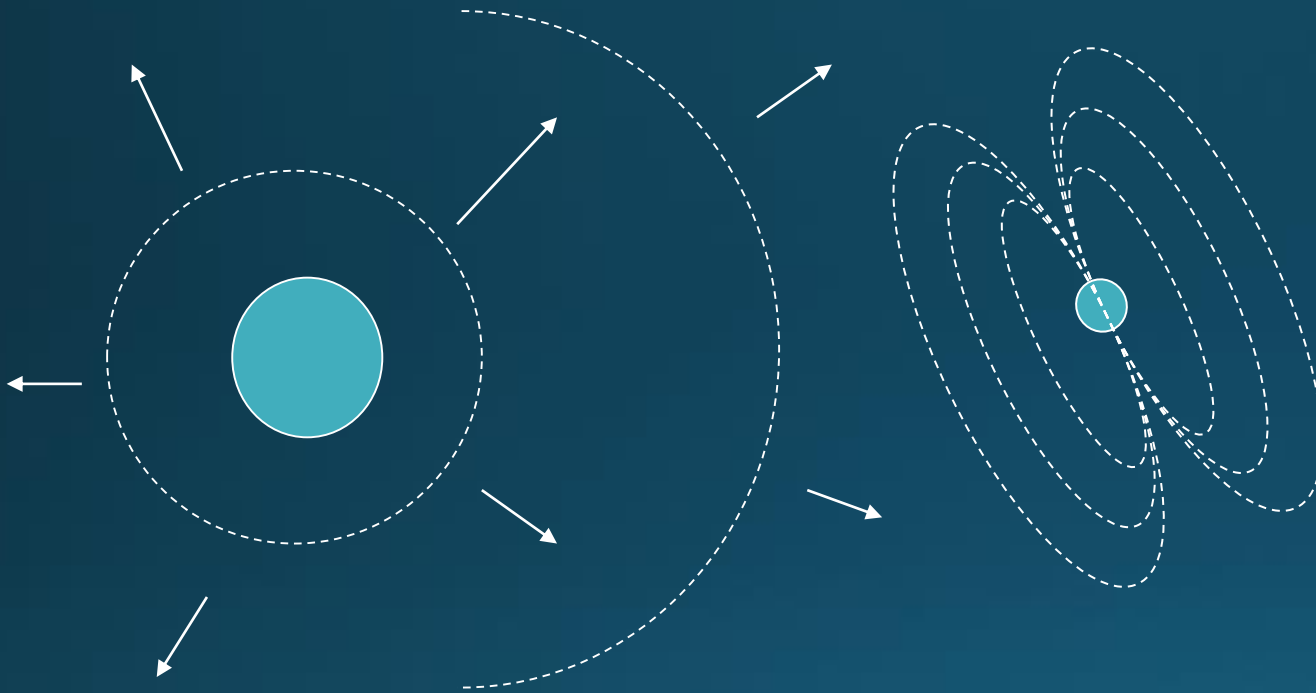
Не подходит в качестве внегалактического источника, т.к. полная светимость мала. Должны быть видны с <200 пк.

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).

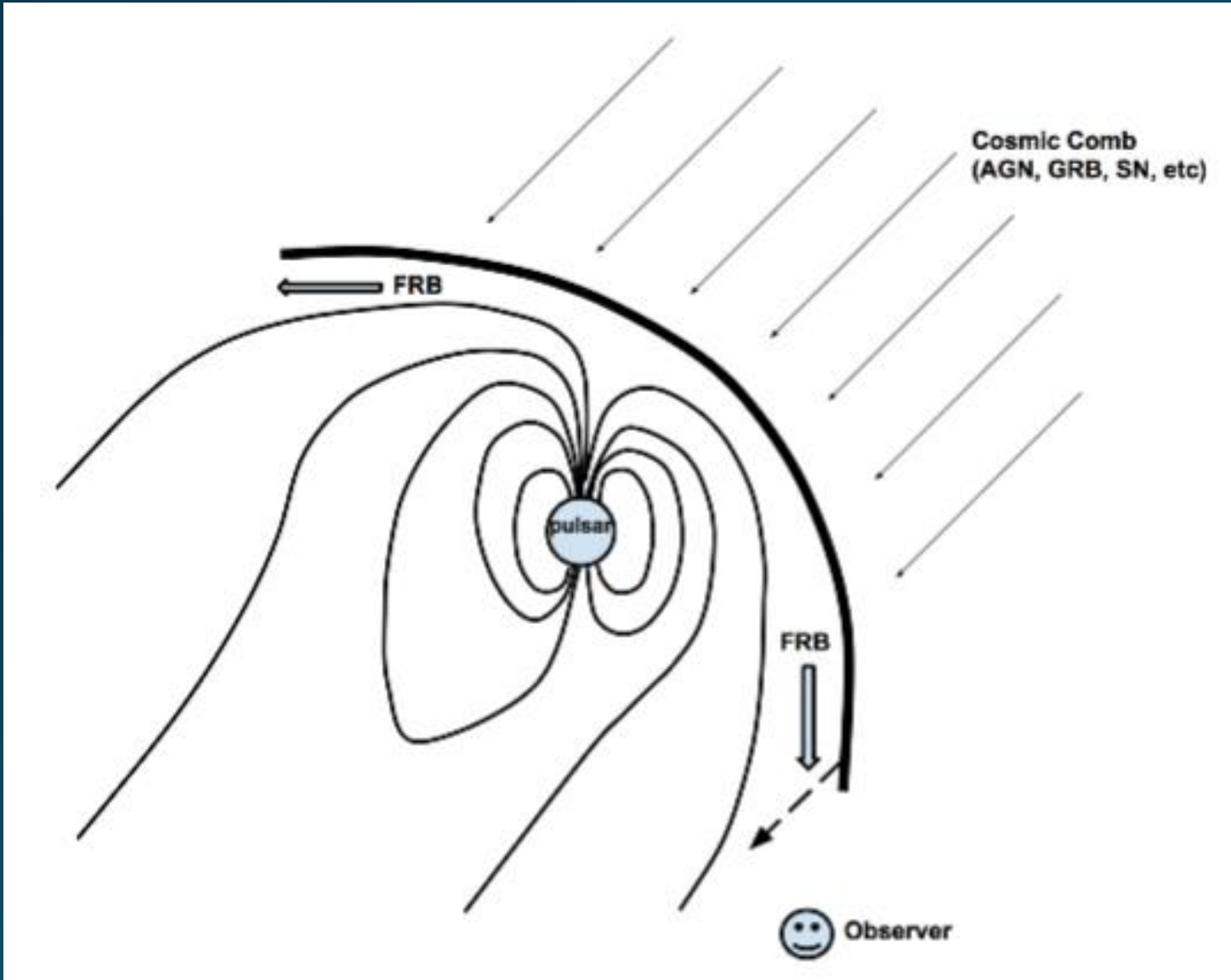
Сверхновая и пульсар



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.

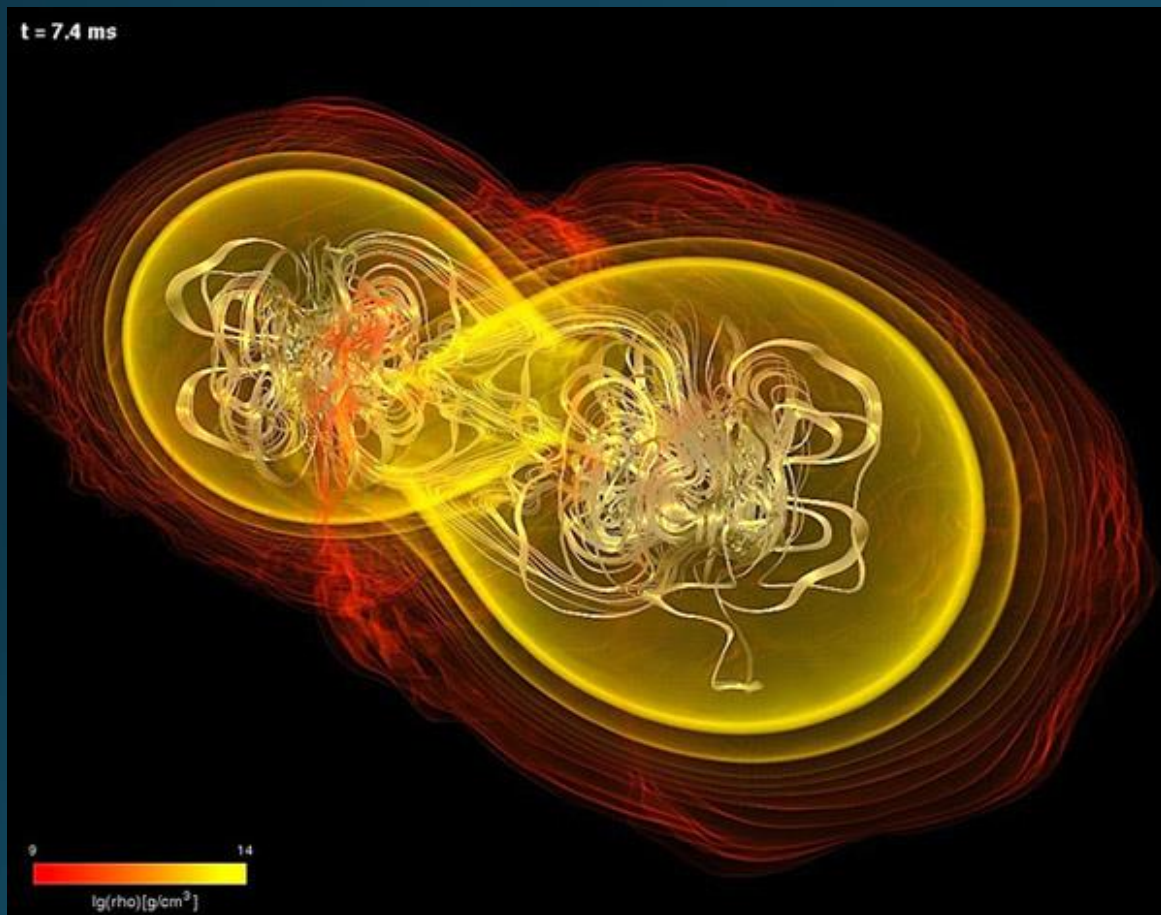
Срыв магнитосферы



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).

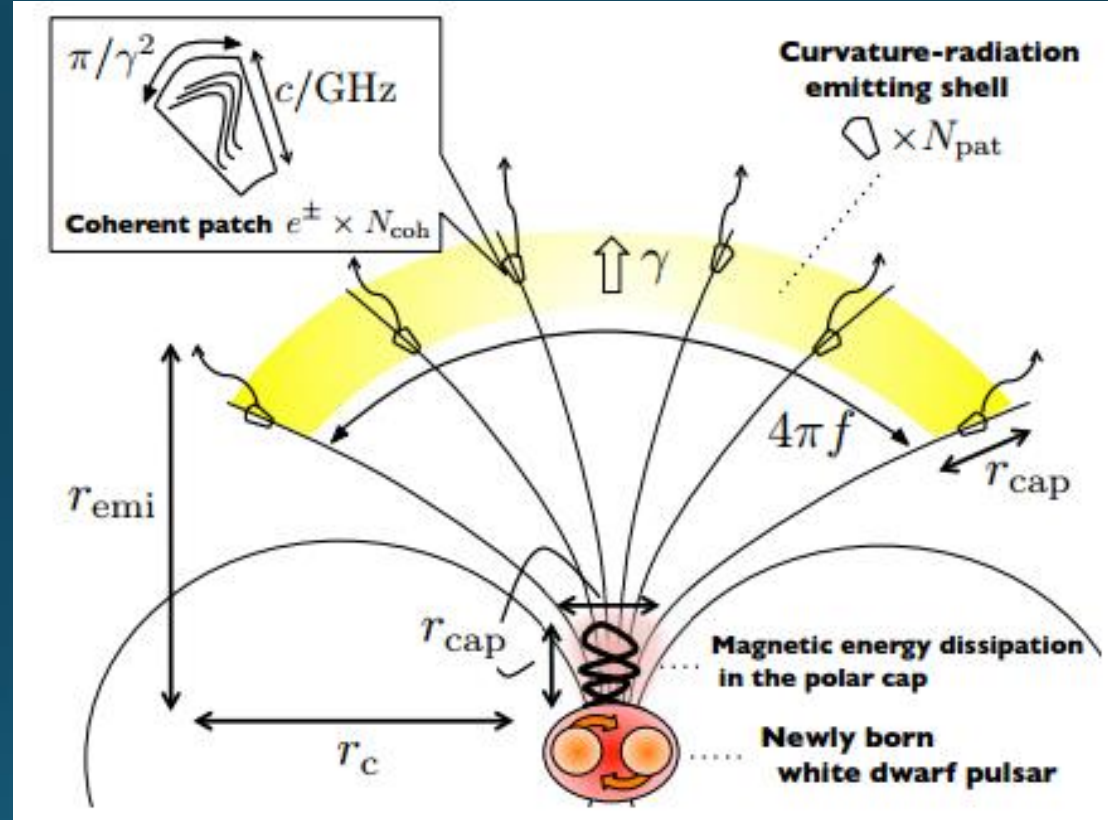
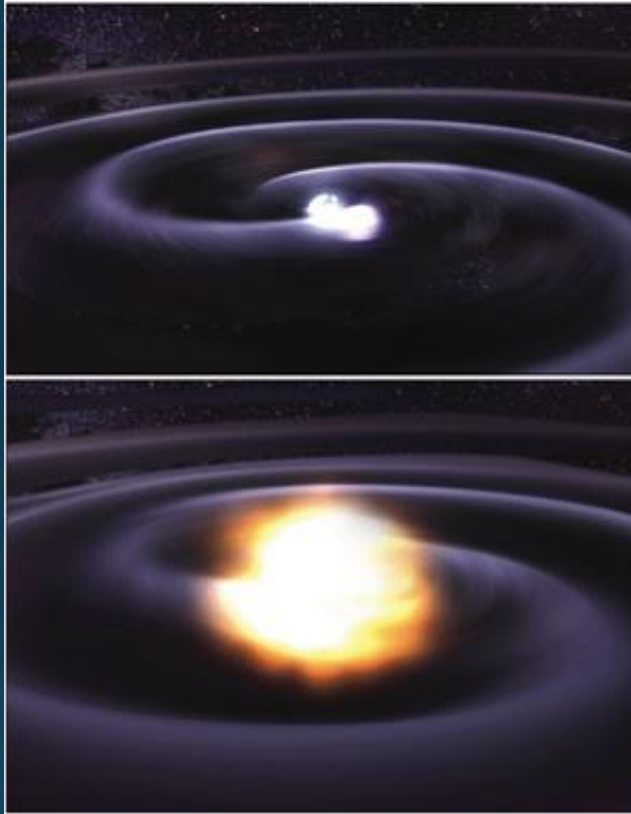
$$\dot{E} = -6.2 \times 10^{45} \left(\frac{B}{10^{12.5} \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^6 \times \left(\frac{P}{0.5 \text{ msec}} \right)^{-4} \text{ erg s}^{-1}.$$

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>



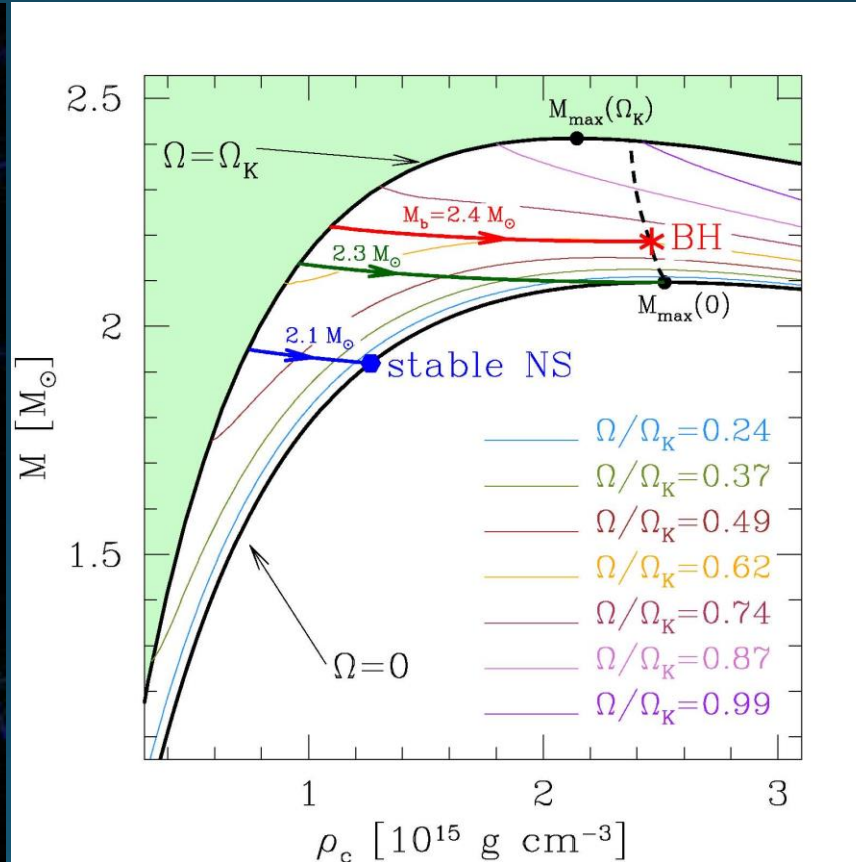
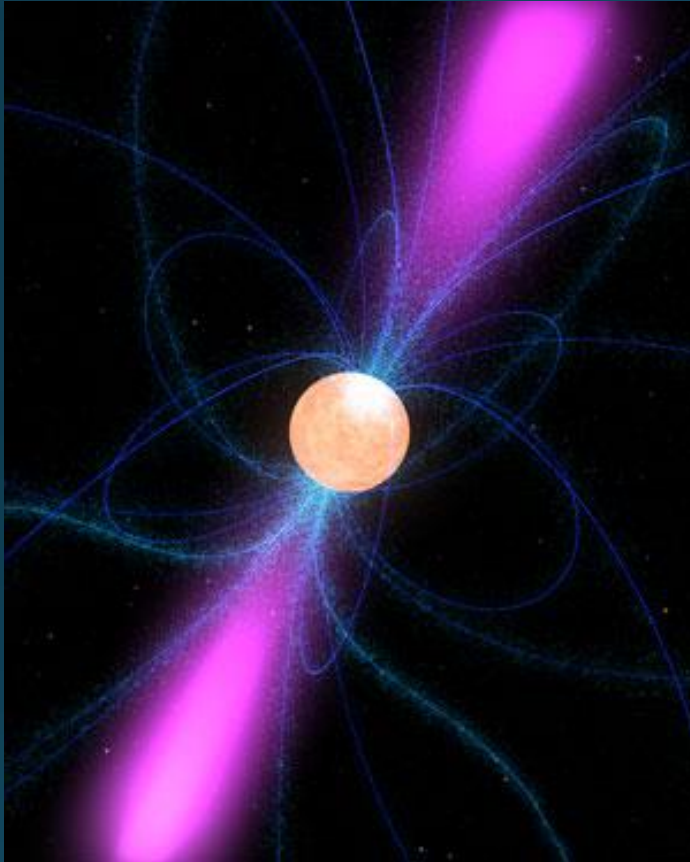
Kashiyama et al. 1307.7708

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).

Супрамассивные нейтронные звезды

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



"blitzar"

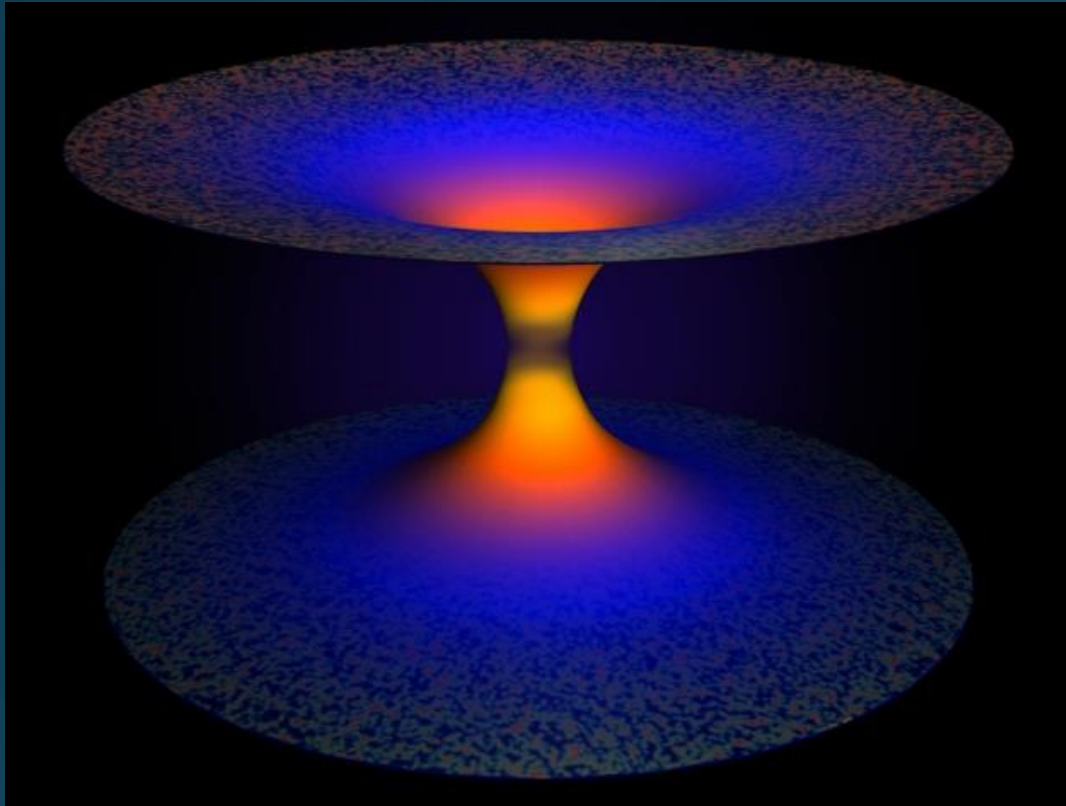
Falcke, Rezzola 1307.1409

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.

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).

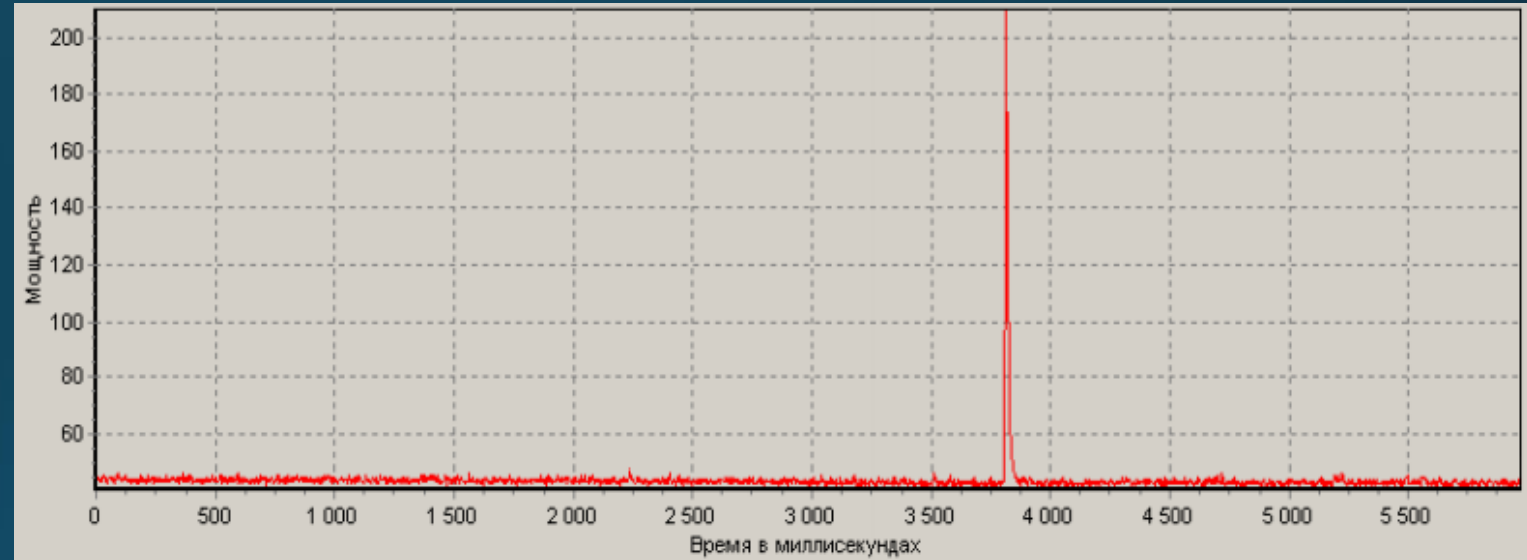
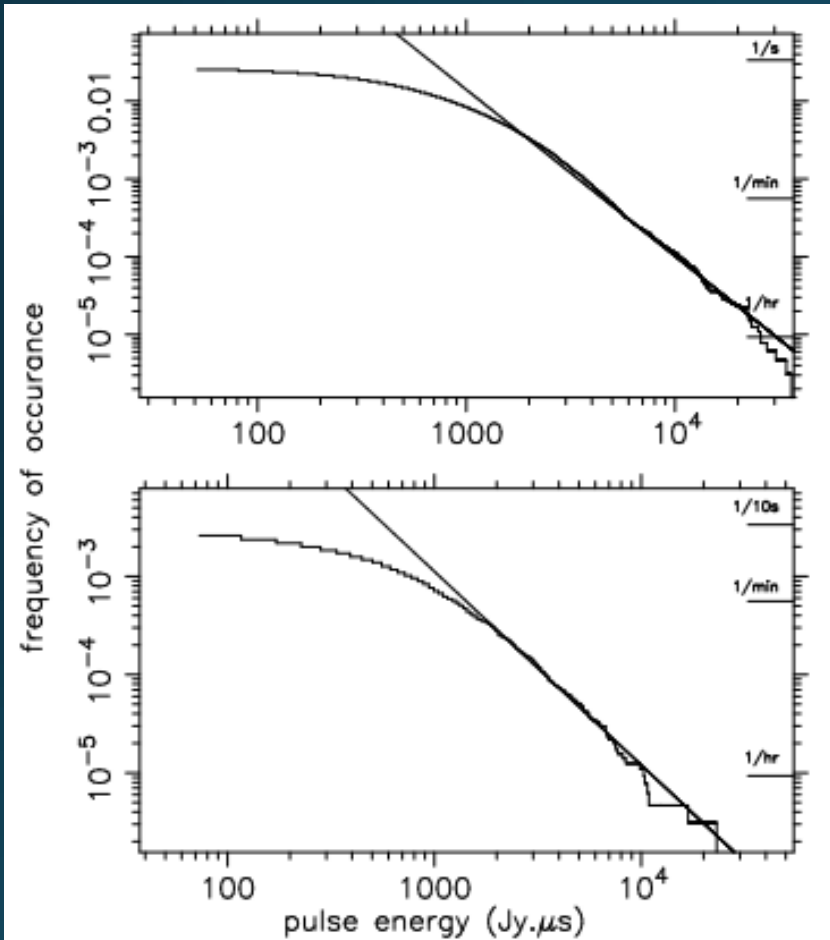
Испарением черных дыр уже было названо как возможная причина FRBs. В этом случае ударная волна взаимодействует с внешним магнитным полем.

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

1409.4031

Сверхгигантские импульсы внегалактических радиопульсаров

<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

Аксионы



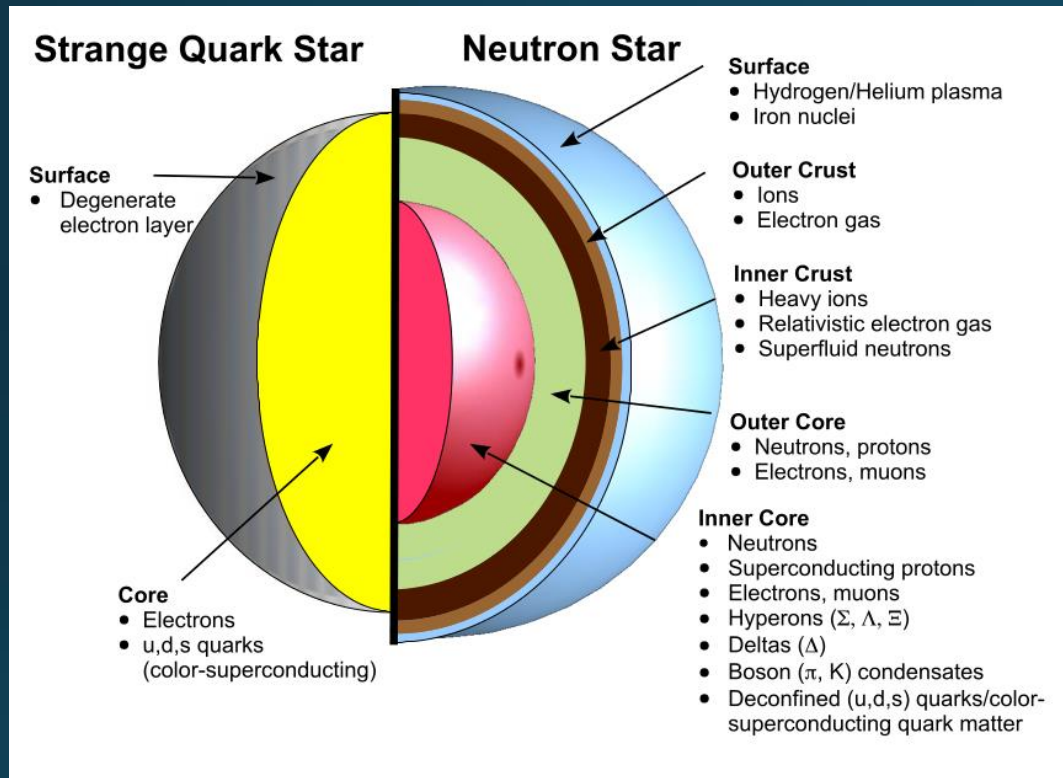
Аксионы – кандидаты в частицы темного вещества.
Аксионные миникластеры.
Возникают в молодой вселенной.
Масса – как у крупного астероида.
Размер – как у звезды.

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!

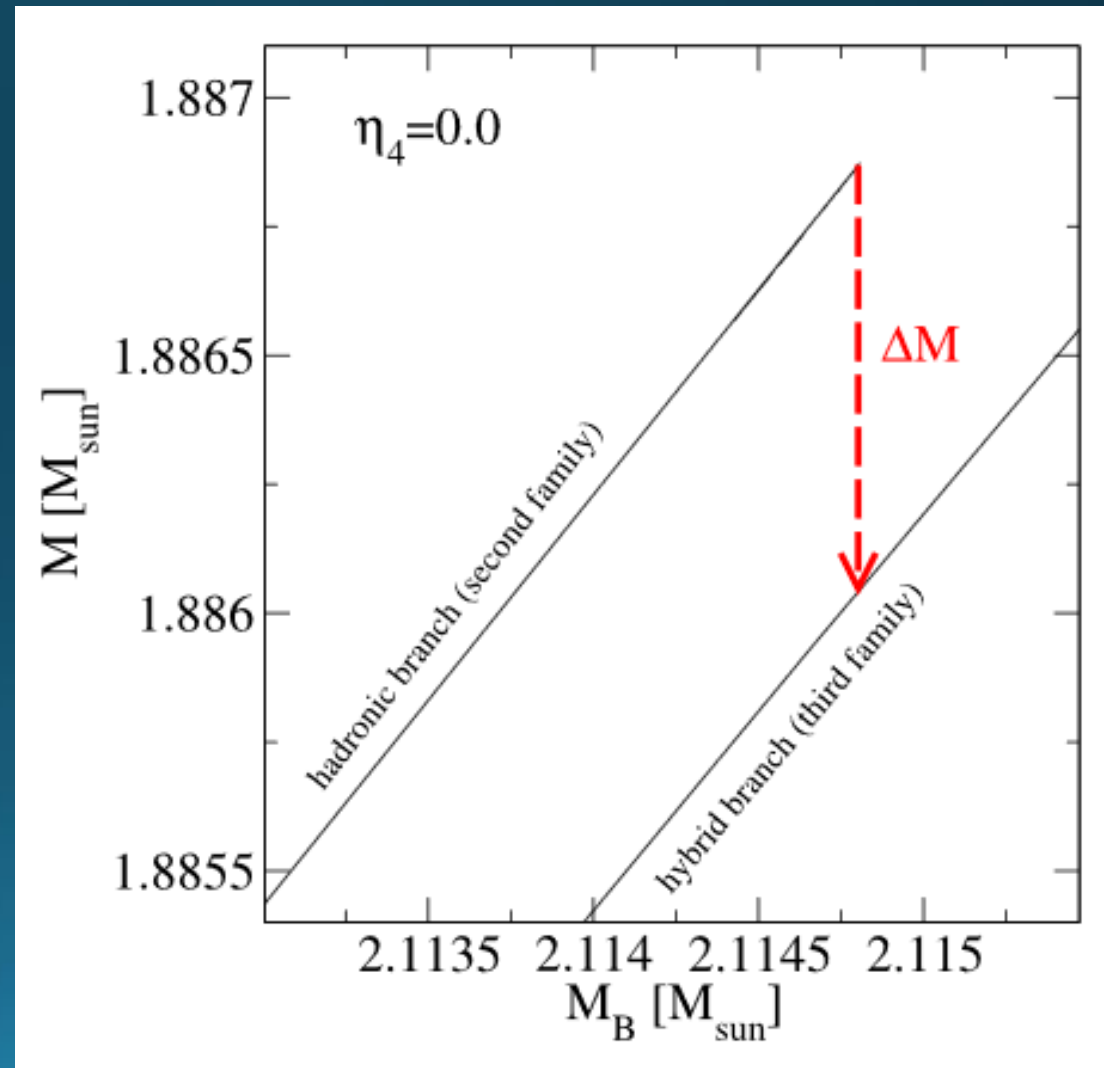
Влетание аксионного кластера в магнитосферу нейтронной звезды должно приводить к конверсии аксионов в фотоны, а значит – к вспышке электромагнитного излучения.

1411.3900, 1410.4323, 1512.06245, 1707.04827

Деконфайнмент – рождение кварковой звезды

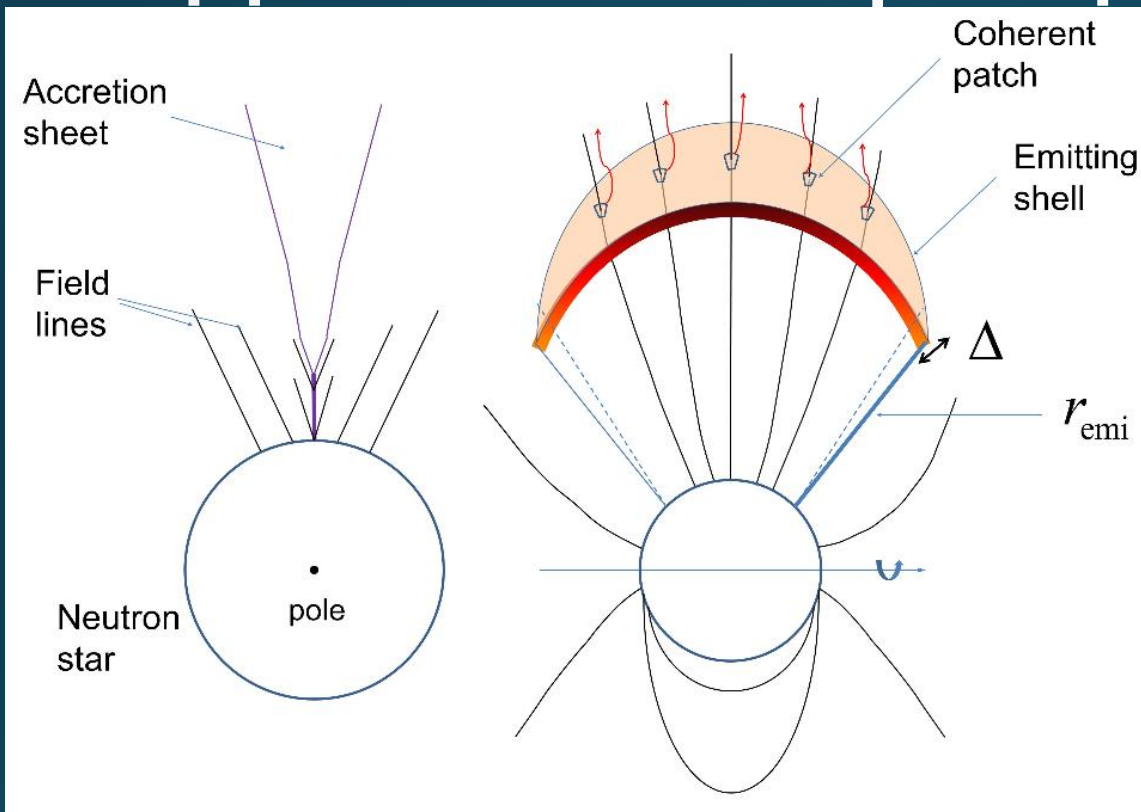


В процессе своей эволюции нейтронная звезда или ее часть могут испытать деконфайнмент: обычное вещество превратится в кварковое. Это сопровождается энергovyделением.



Падение астероидов

1502.05171, см. также 1512.06519



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.

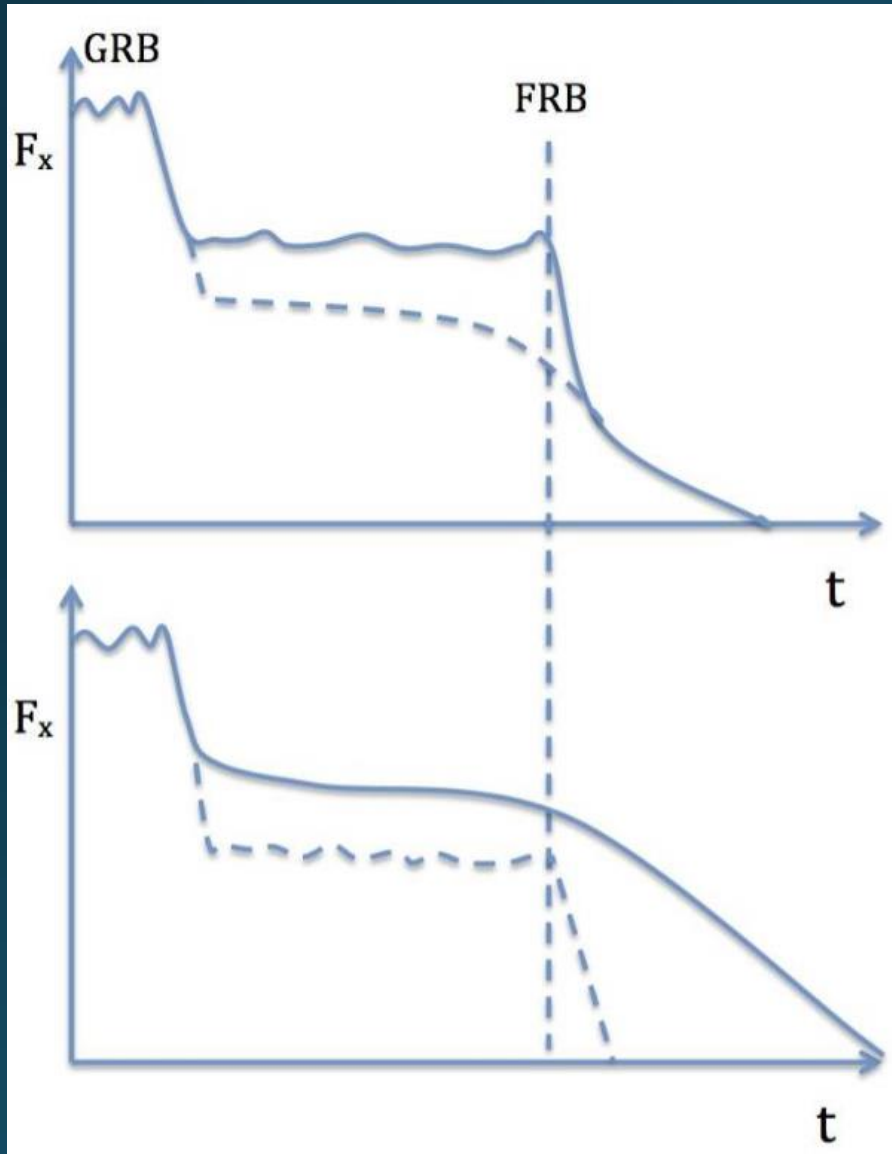
После падения массивного астероида возникает отекающая оболочка. Затем часть вещества разгоняется, и в результате генерируется радио излучение.

Механизм радиоизлучения не слишком очевиден. Должна быть слабая рентгеновская вспышка.

Об испарении астероидов пульсарами см. 1605.05746.

О модификации модели с повторными всплесками см. 1603.08207

Супрамаассивные НЗ и гамма-всплески

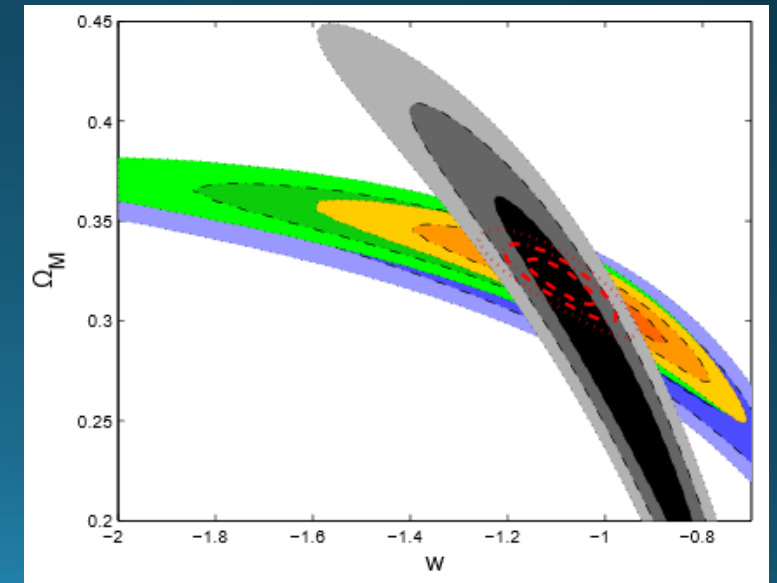


Модель включает в себя образование миллисекундного магнитара (Усов 1992).

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

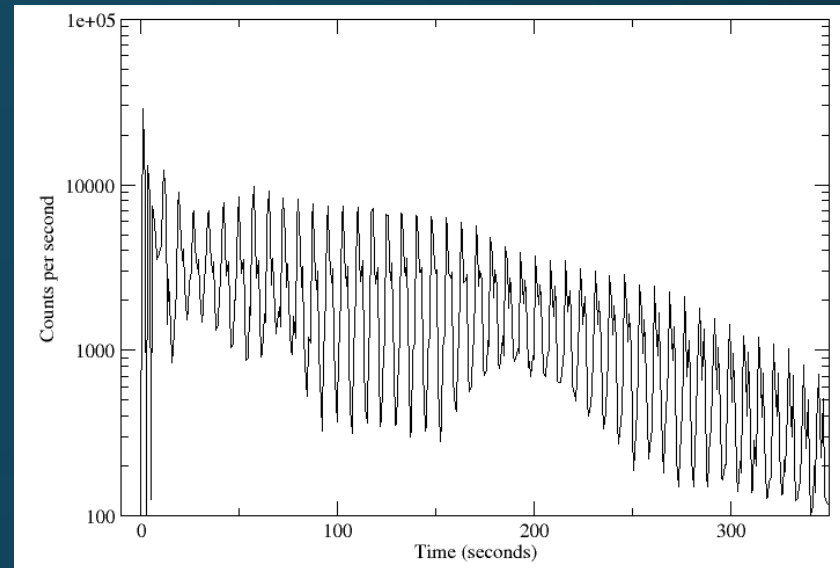
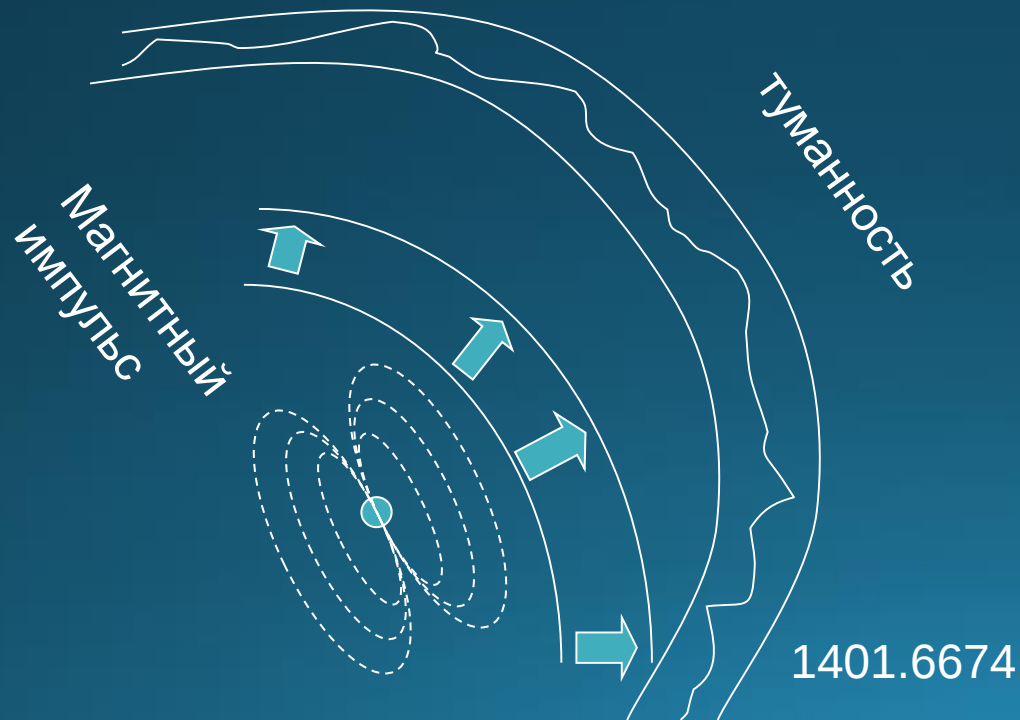
Тогда возникают проблемы с темпом FRB.

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



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.



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.

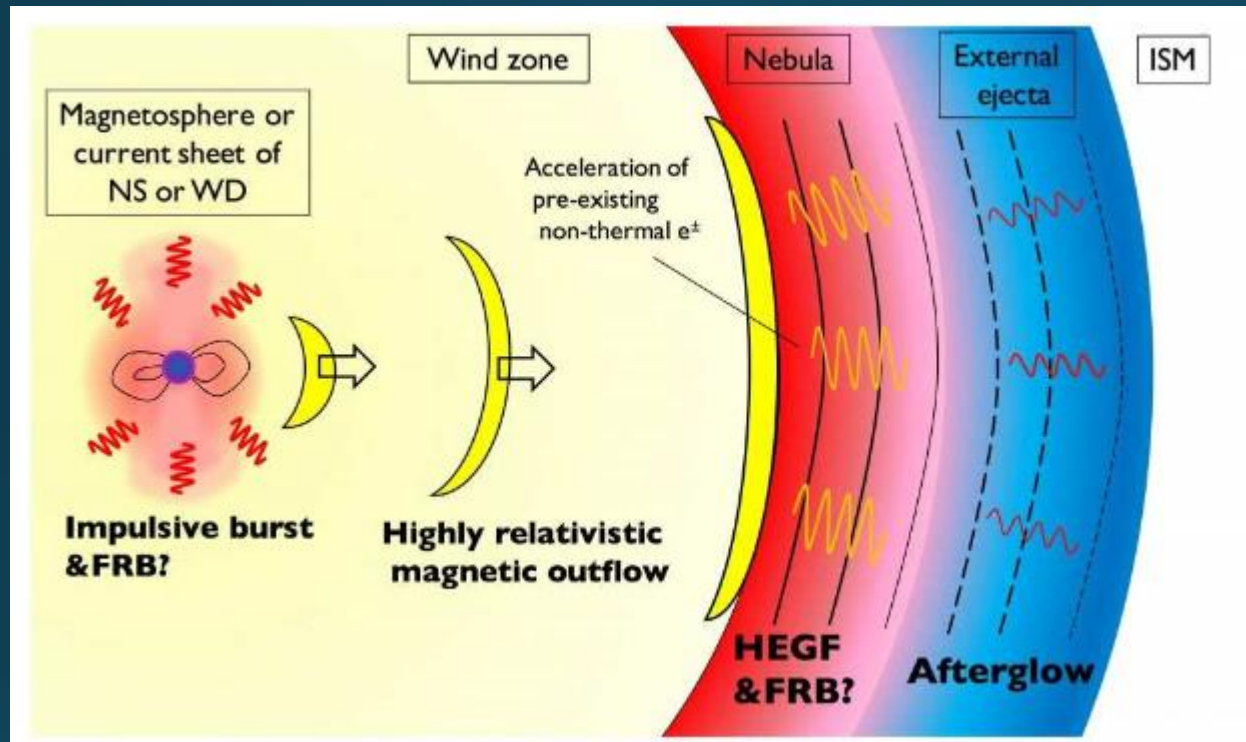
Модель надо развивать

Магнитар в плотной туманности



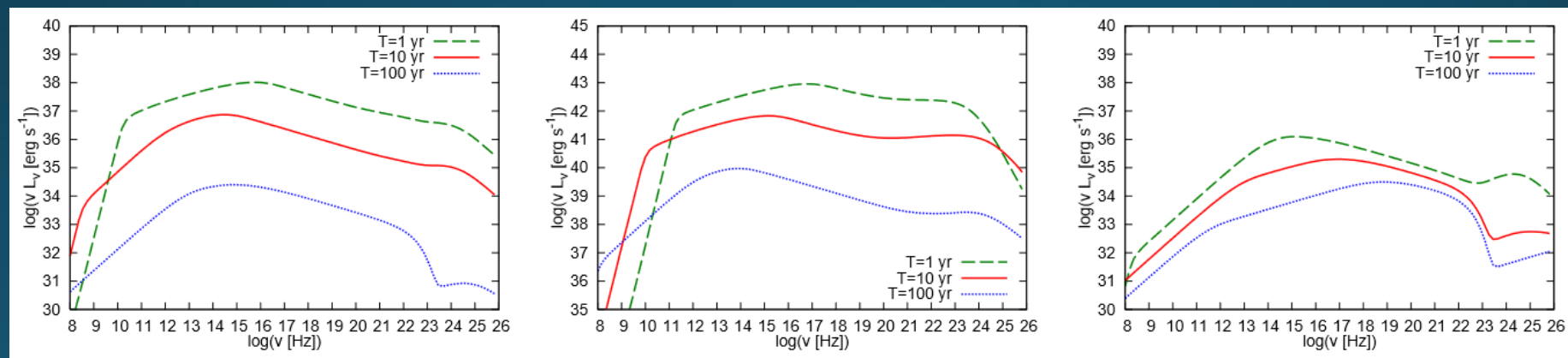
Анимация Алексея Кудаква

Излучение туманности



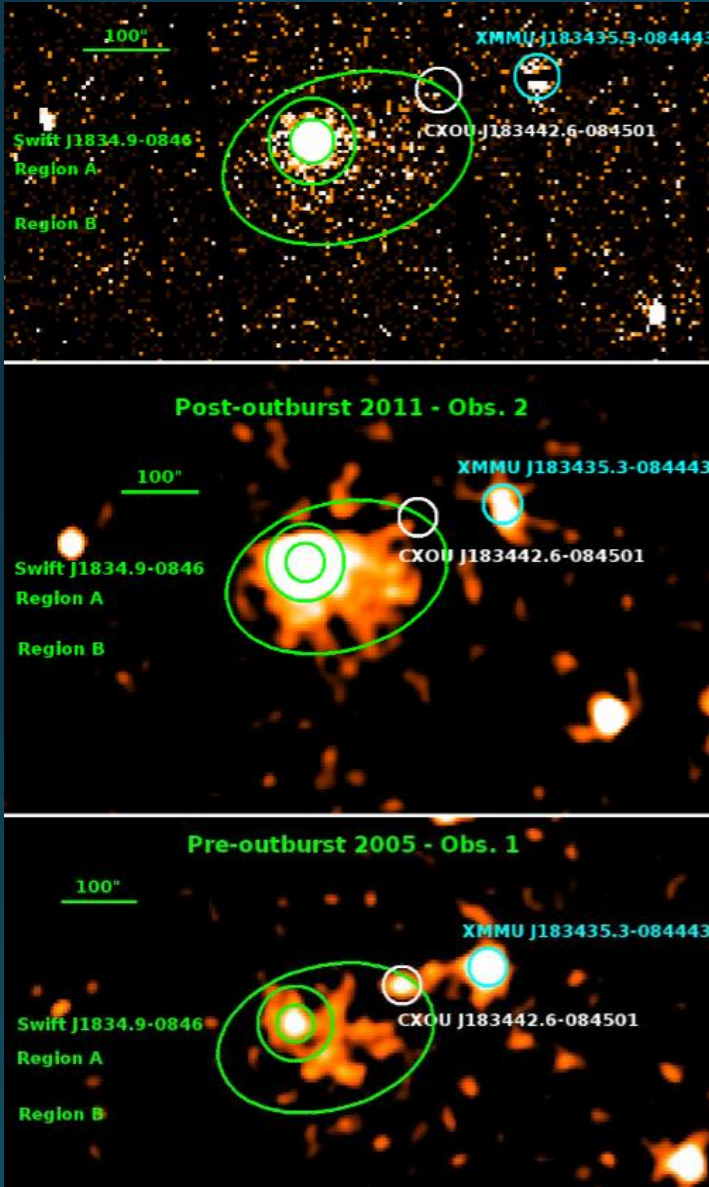
Рассмотрени модели с излучением туманности получило развитие.

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

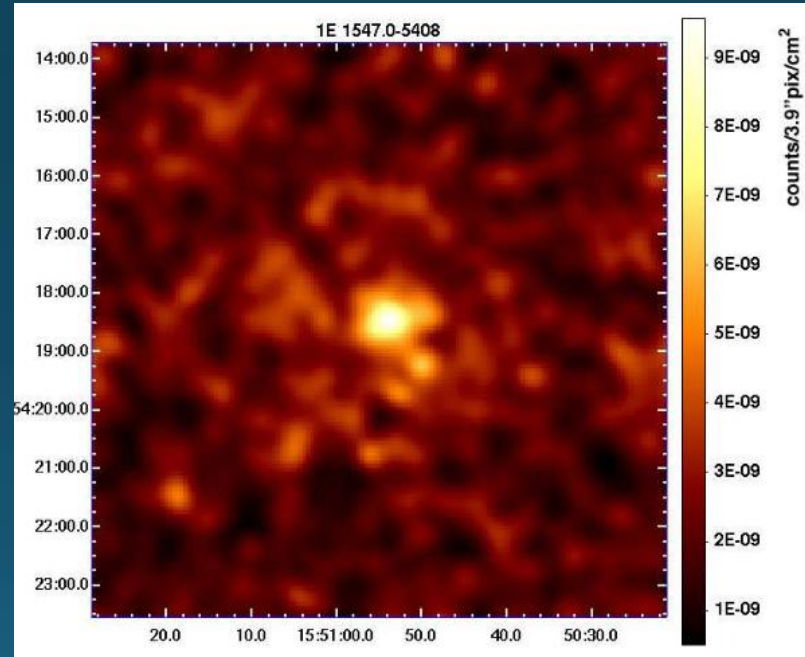


Туманности вокруг магнитаров

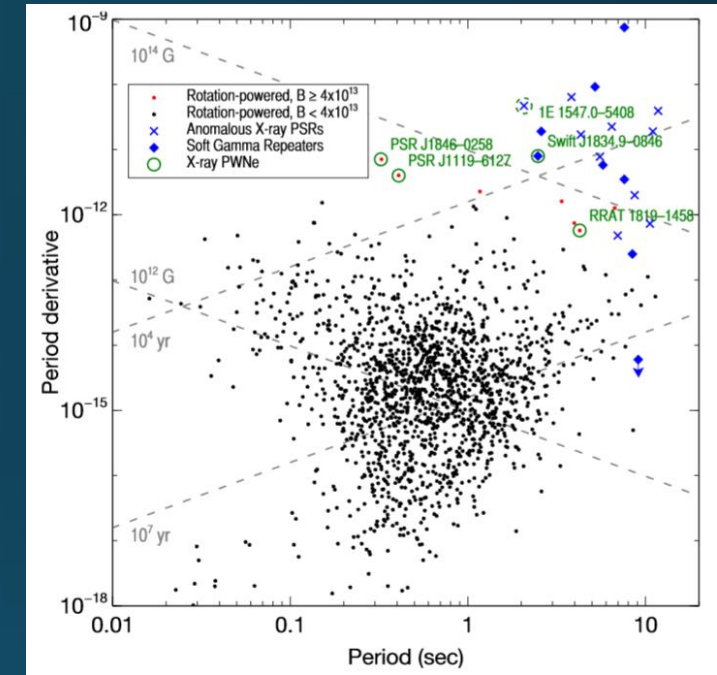
1206.3330. Новые результаты в 1604.06472



О генерации
пульсарных
туманностей
вокруг магнитаров
см. 1606.01391



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



1211.0852

0909.3843

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.

Будущие наблюдения

FAST



FAST —
всплеск за неделю
1602.06099

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
1602.05165,
1501.07535

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

Ближайшее будущее



Продолжаются наблюдения на радиотелескопе Parkes с новой системой мониторинга помех.

Работает новая система ALFABURST в Аресибо (1511.04132)

Идет поиски по архивам разных радиотелескопов.

Ключевые моменты:

- Повторяемость
- Обнаружение в другом диапазоне



Специальные проекты



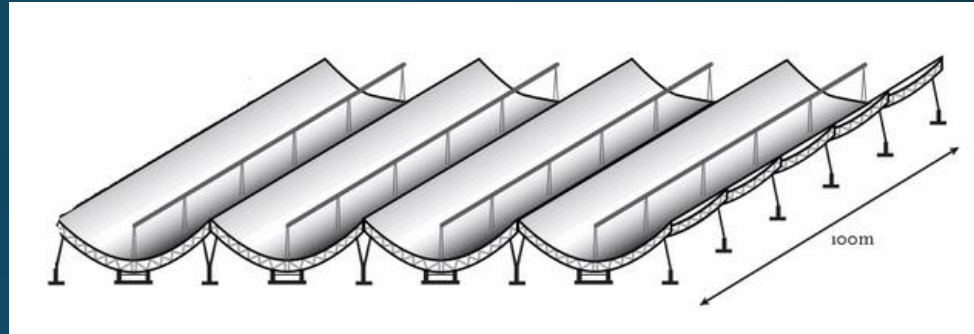
<https://sites.google.com/site/publicsuperb/>



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

CHIME

The Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment



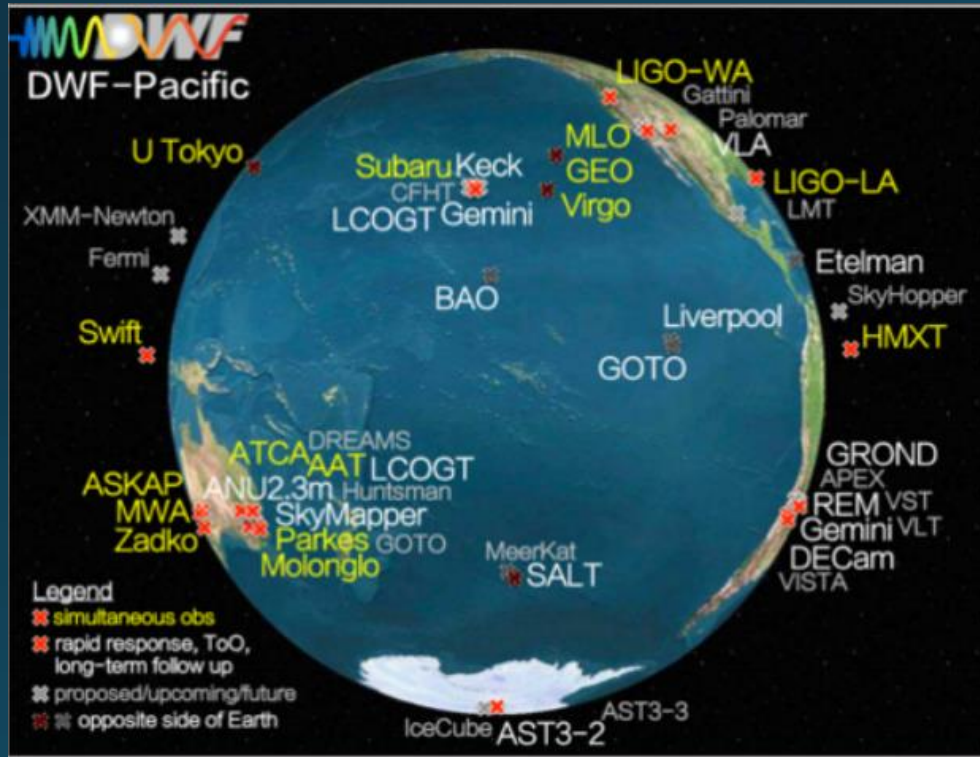
<http://chime.phas.ubc.ca/>

CHIME – всплеск раз в день!

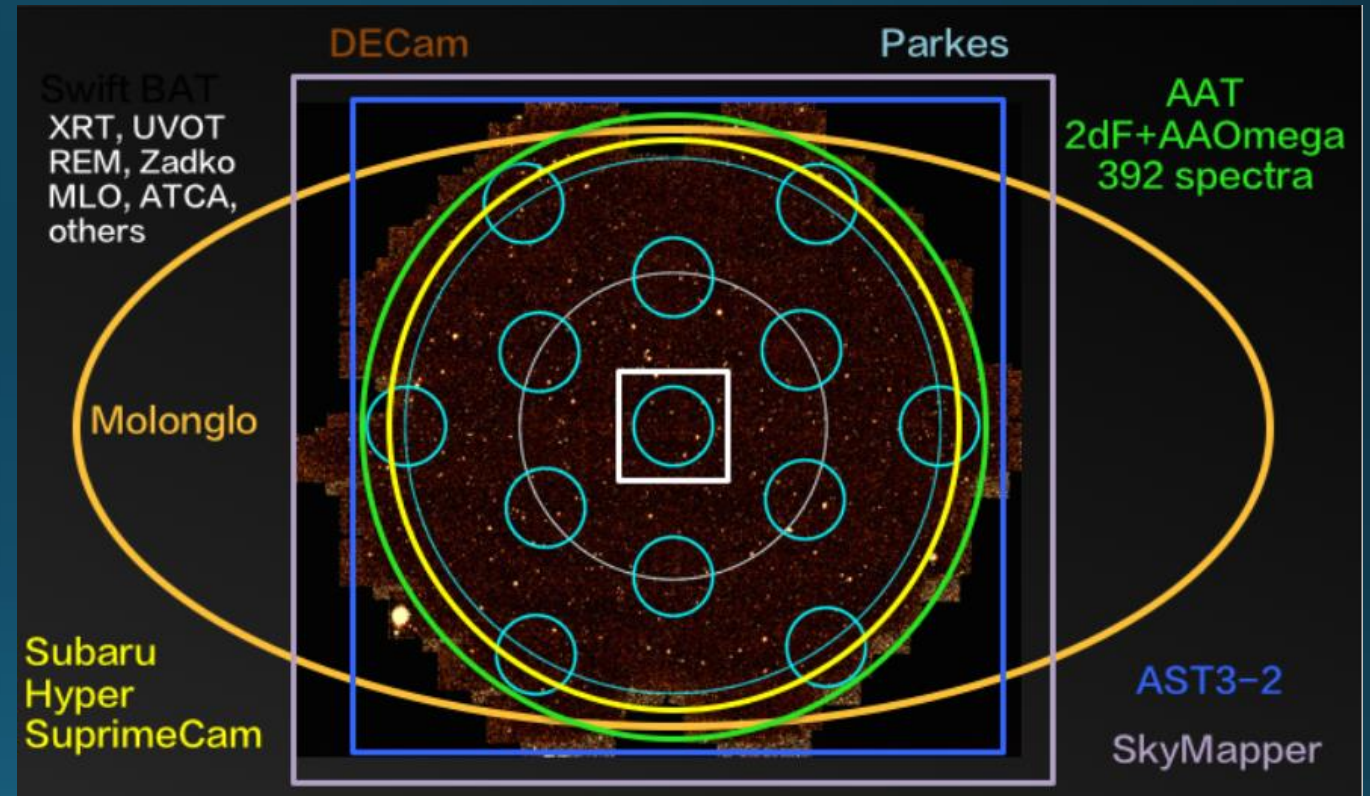


HIRAX. Строится прототип
Южный вариант CHIME
1607.02059

Multi-messenger searches



Deeper Wider Faster



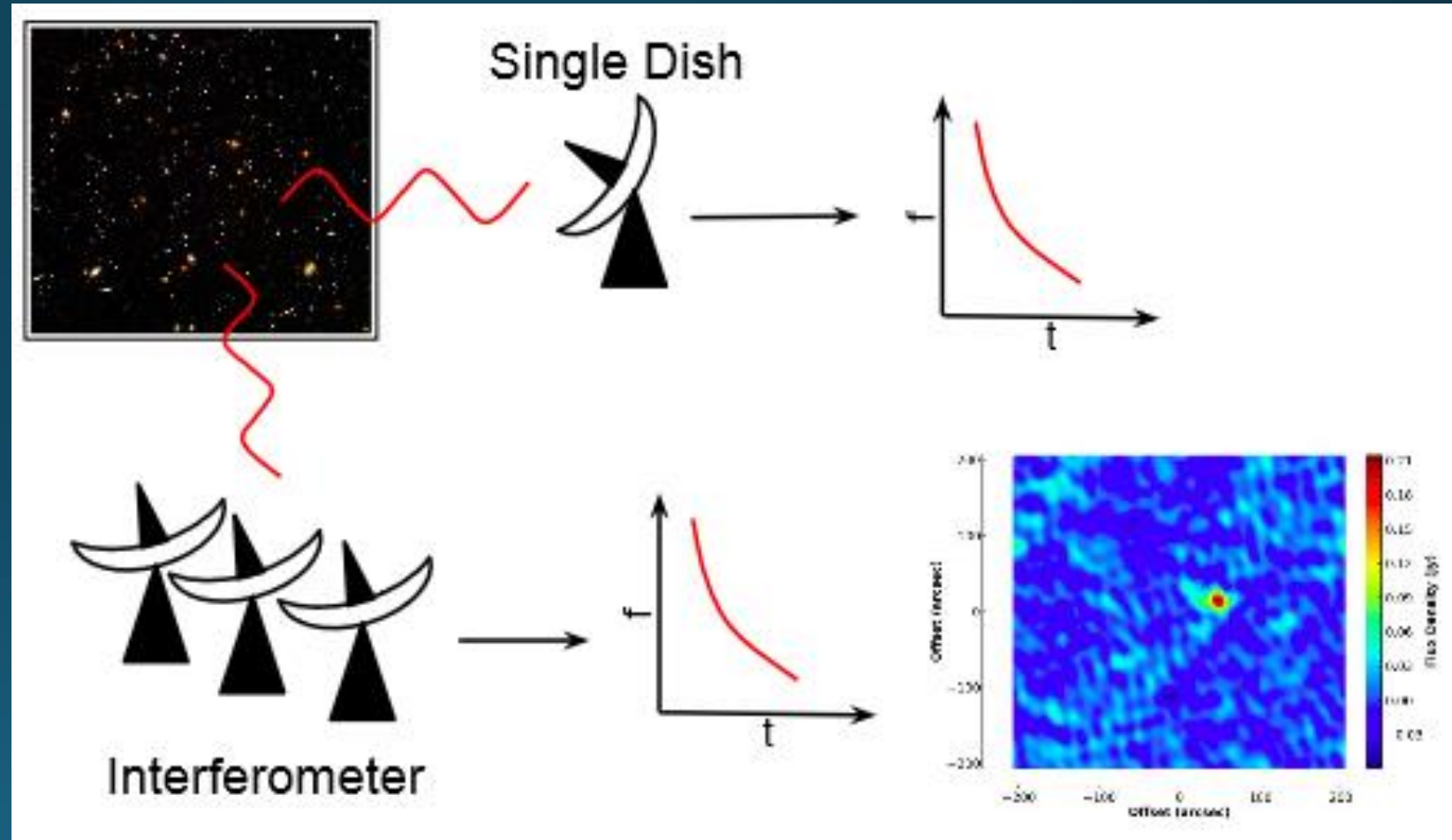
<http://dwfprogram.altervista.org/>

Realfast: new system on VLA

New system for rapid analysis
of fast transients (not only FRBs).

Installed in 2018.

Rapid localization.

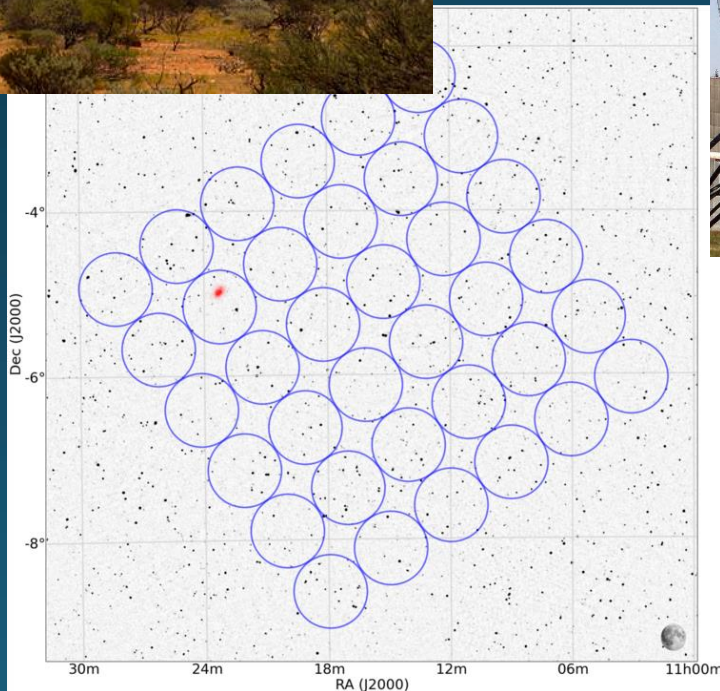


ASKAP and Apertif

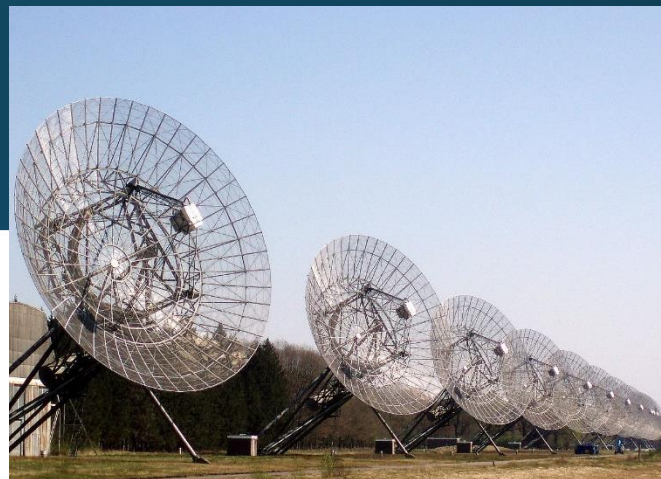
ASKAP



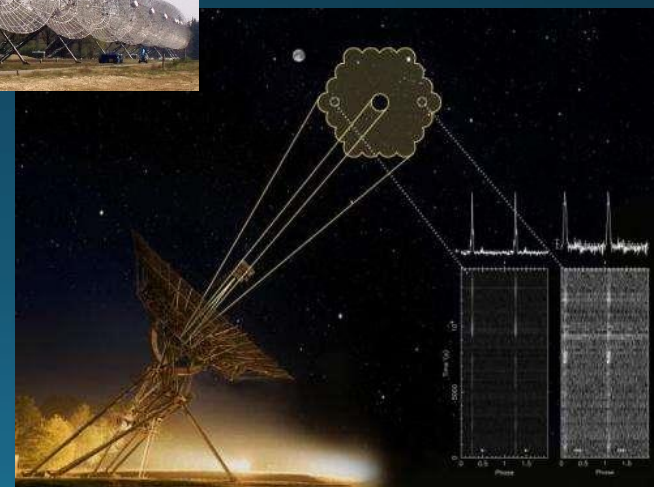
Few bursts per week.
1709.02189



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



Westerbork

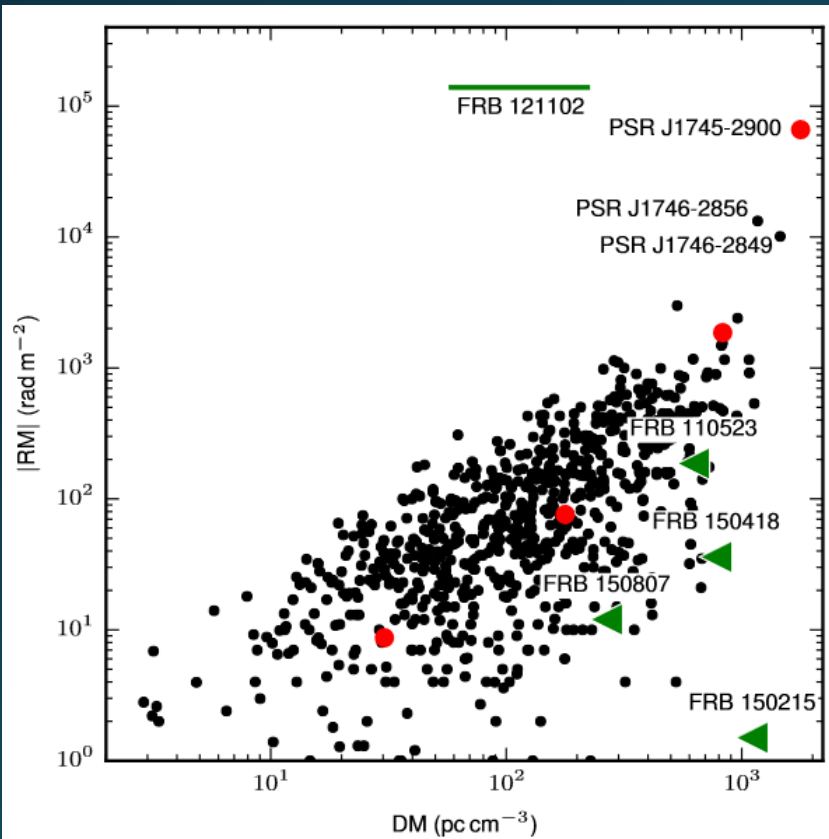


1709.06104

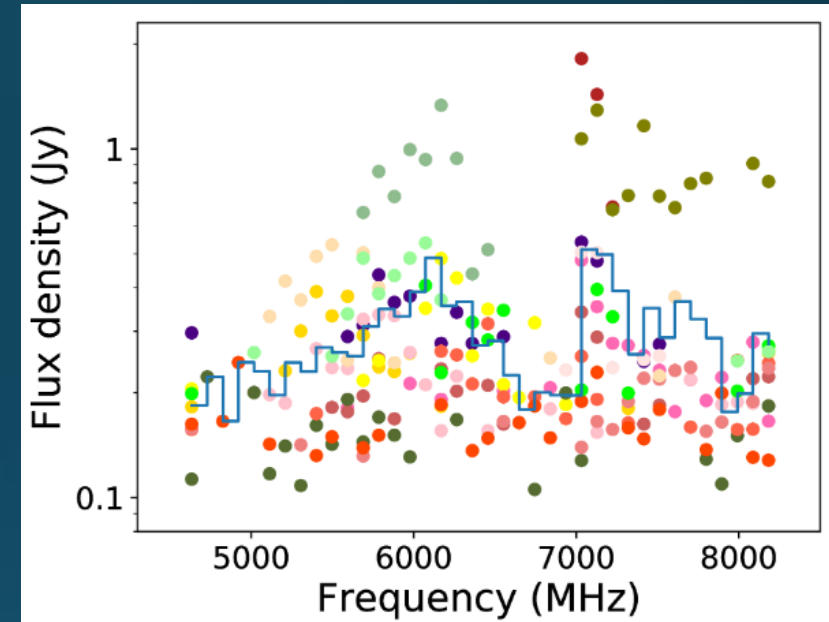
Новые данные по FRB

I. Данные по повторному источнику

Экстремальная среда вокруг.
Определено по большой и
переменной мере вращения.



Впервые всплески
удалось зафиксировать
на высокой частоте:
от 5 до 8 ГГц.



II. Много новых всплесков от ASKAP



1801.03965

1804.04101

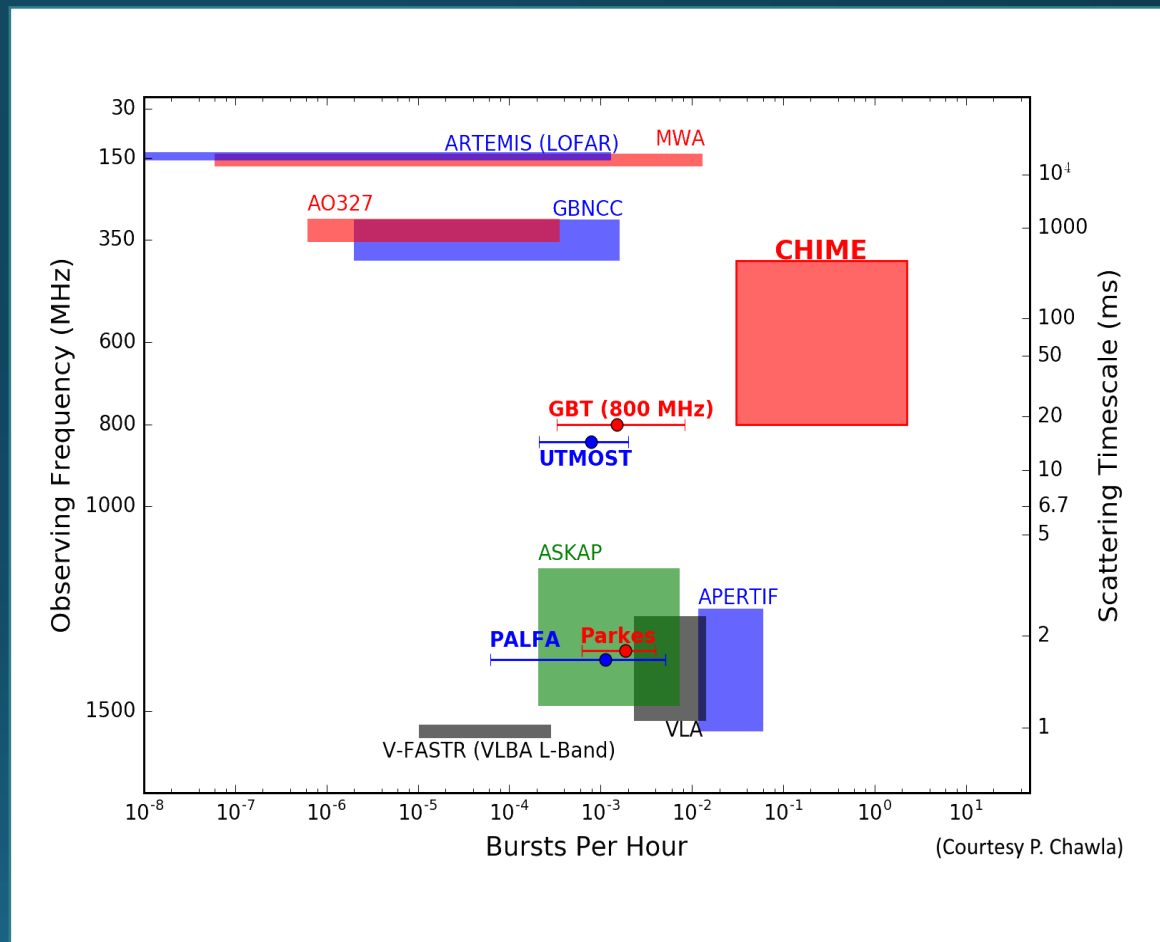
1810.04356

Новые данные по FRB

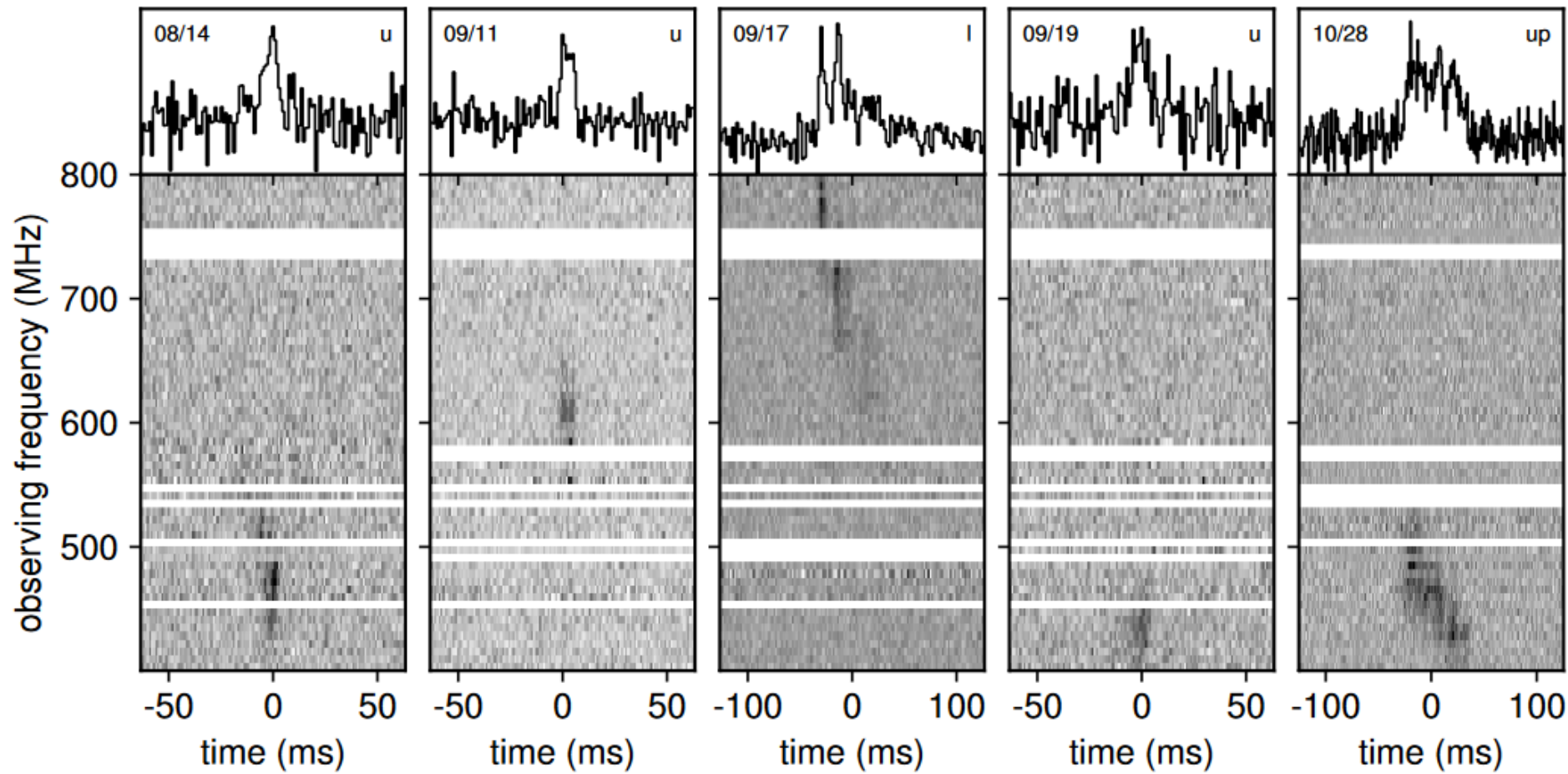


В 2018 г. уже были зарегистрированы первые FRB на CHIME.

Должна заработать система Apertif на радиотелескопах WSRT в Нидерландах.



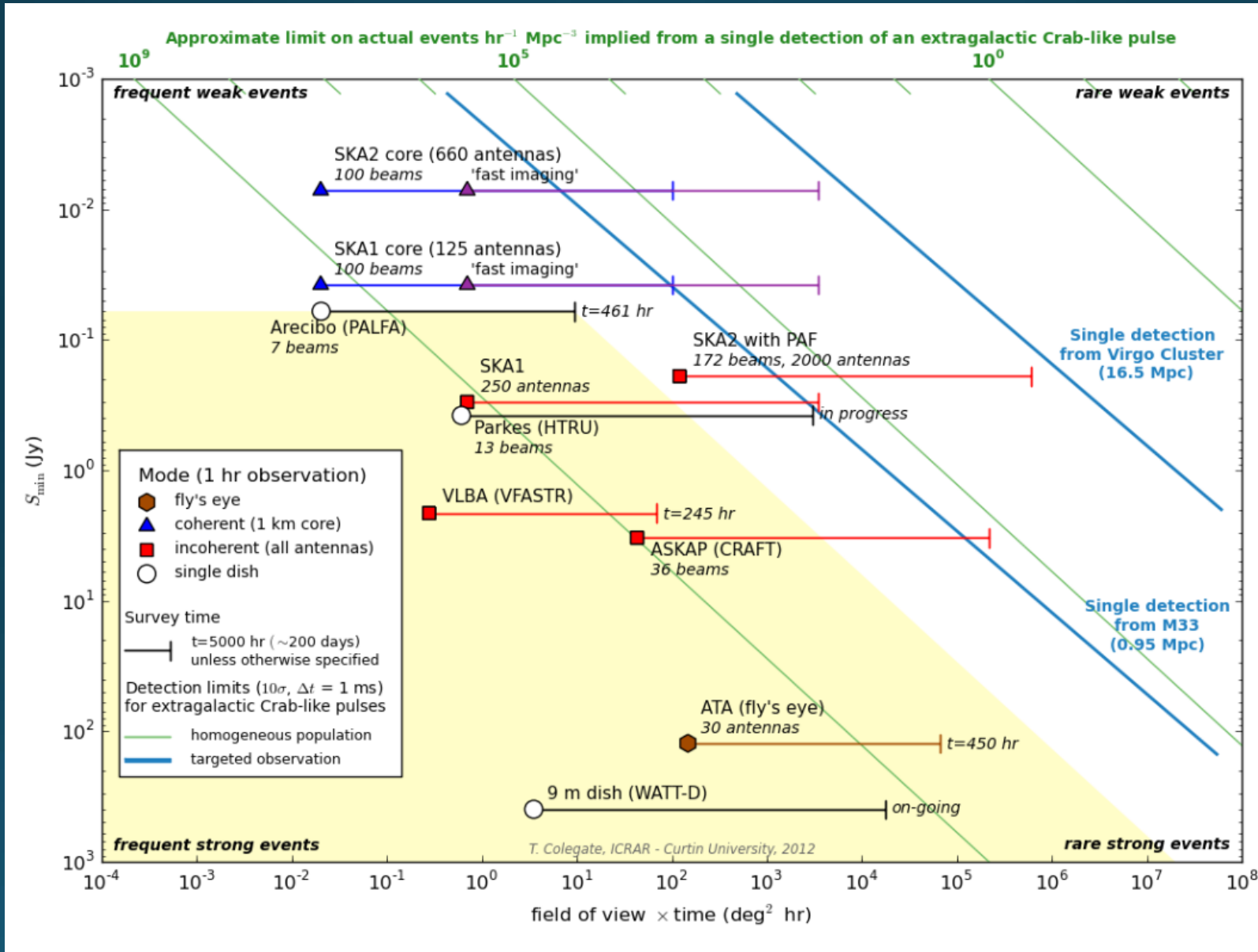
Первый урожай CHIME



12 новых FRB + источник повторных всплесков.
Регистрация на низких частотах: вплоть до 400 МГц.

Регистрация всплесков разными инструментами

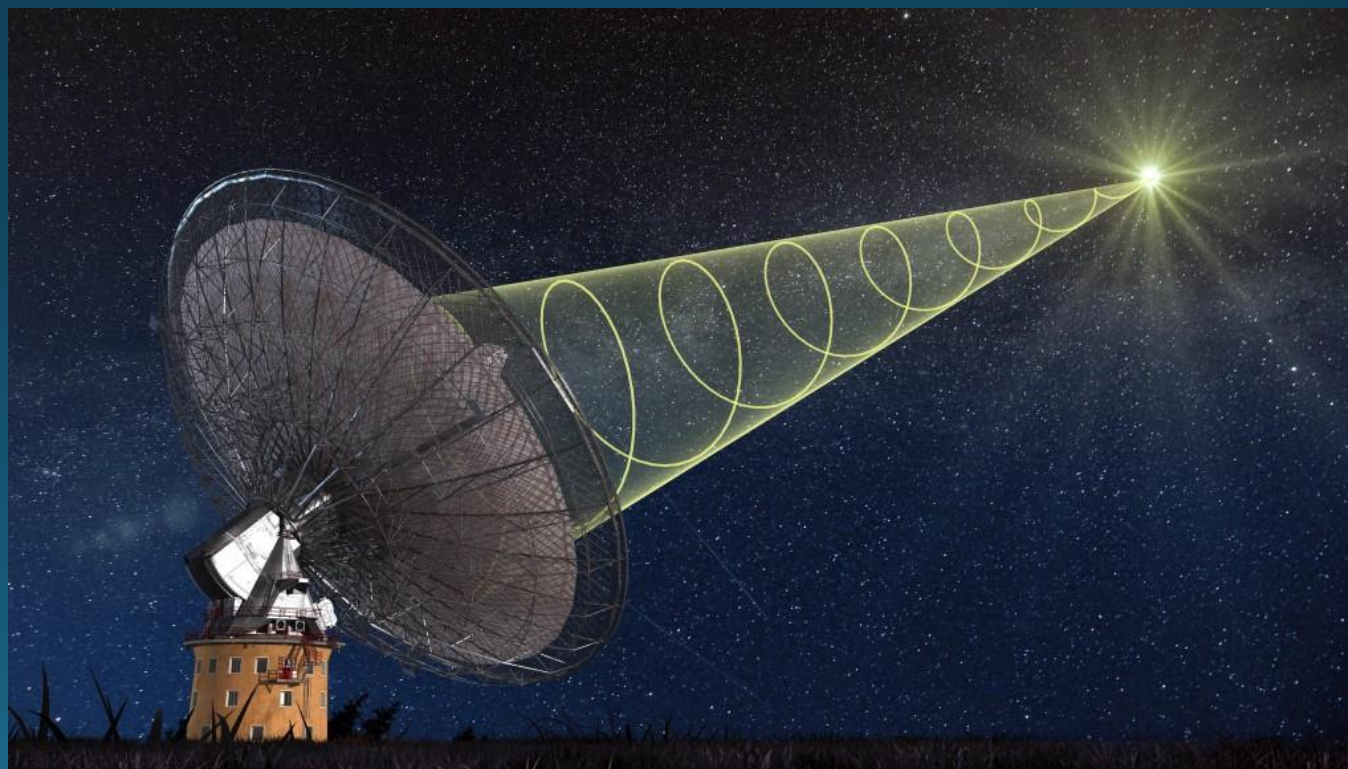
Hall et al. (2012)



Итого

- В 2007 г. был открыт новый класс транзиечных объектов
- Всплески (пока?) видны только в радио
- Известно менее 20 вспышек
- 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

См. обзор
Попов, Постнов, Пширков
УФН N10 (2018)
www.ufn.ru



Swinburne Astronomy Productions