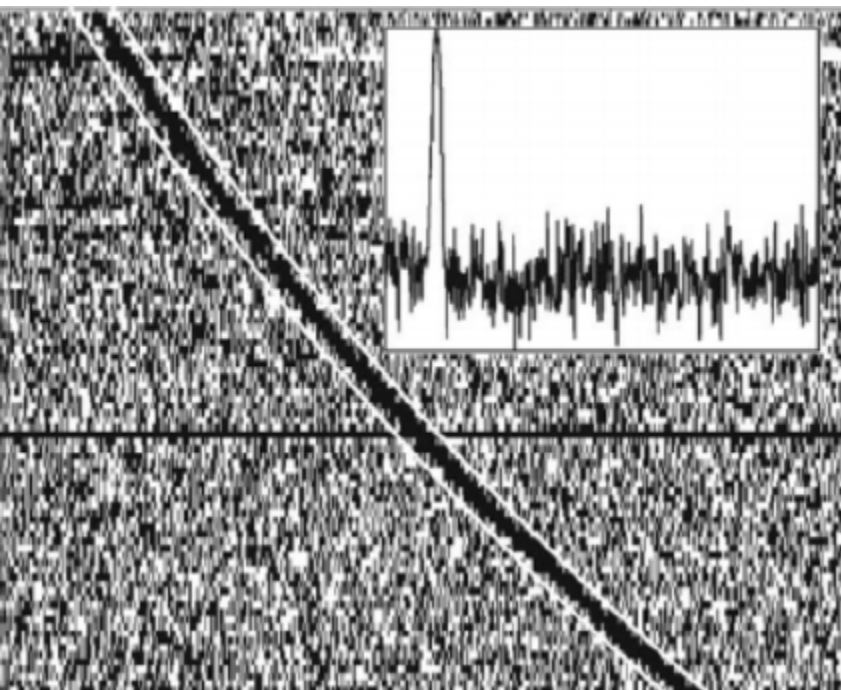




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Sursauts Radio Rapides (FRB): Observations



Françoise Combes



Une découverte récente

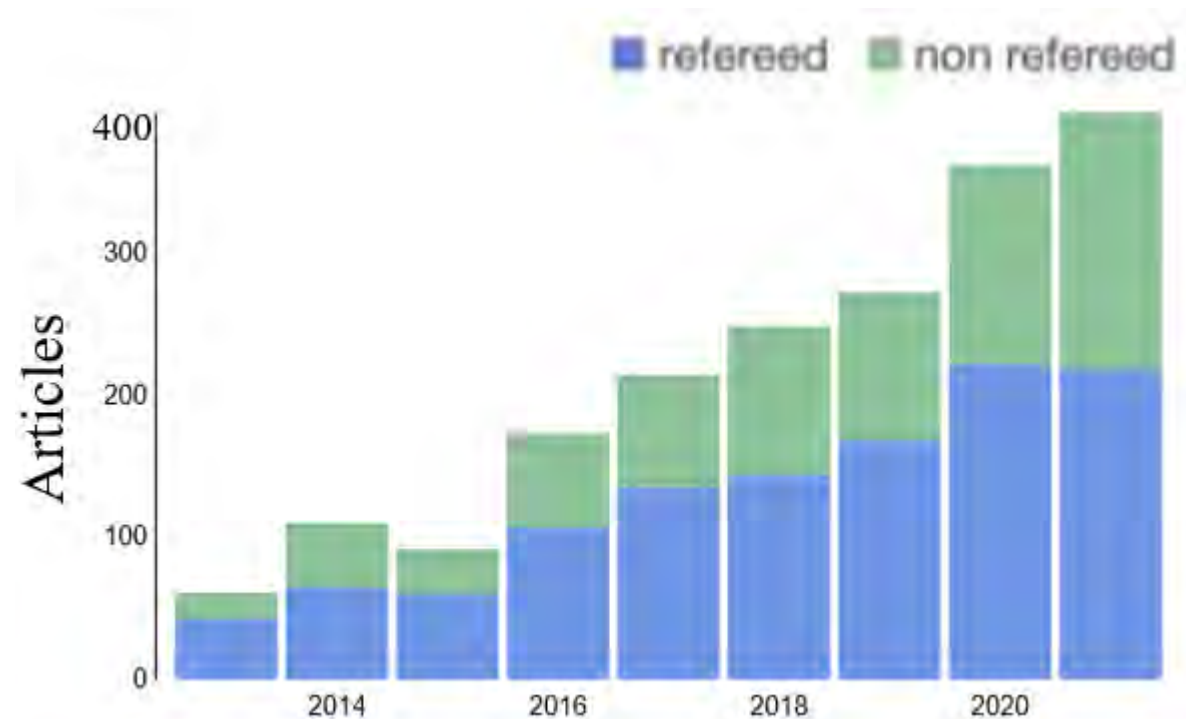
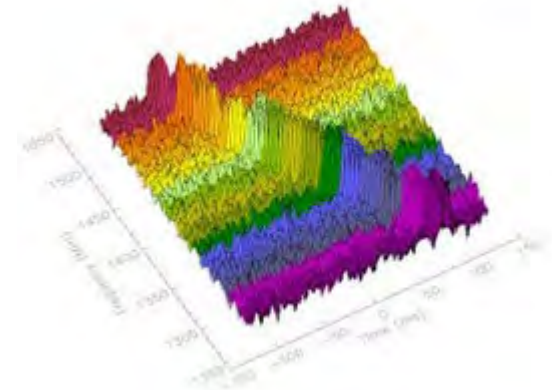
→ Un peu d'histoire

→ Propriétés: distribution, fréquence

→ Découverte des Répéteurs

→ Identification des galaxies hôtes

→ Un sursaut dans la Galaxie

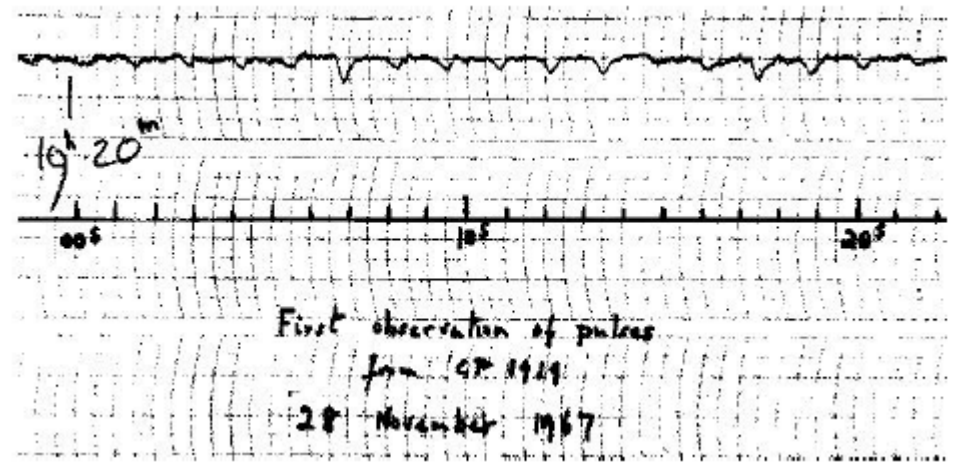


« Fast Radio Bursts » dans l'Abstract

Les pulsars en 1967



Jocelyn Bell en 67: rouleaux de papier de 5,3 km de long

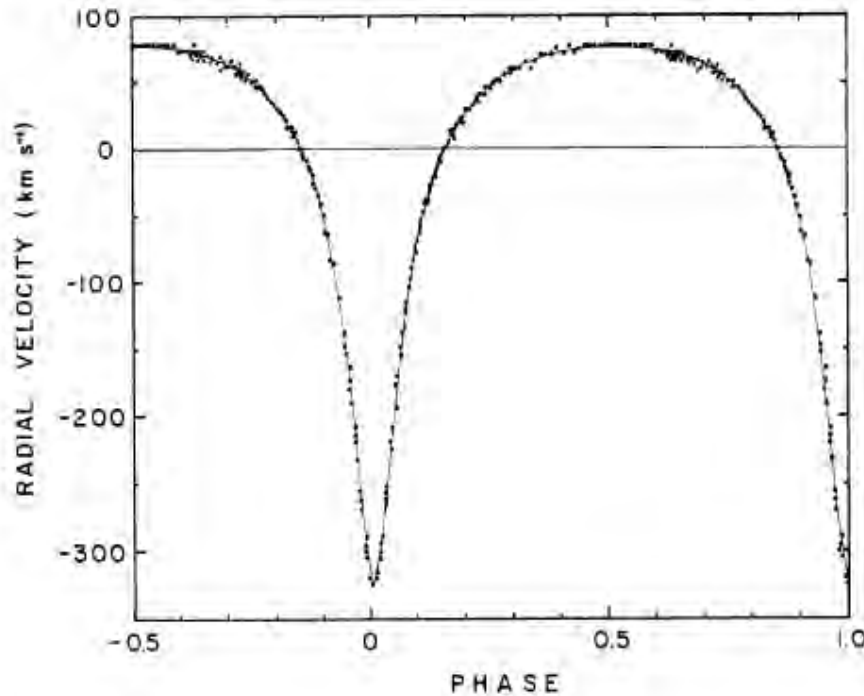


A cette période Cooley & Tuckey lancent les FFT..

Hulse & Taylor en 1975

Découverte à Arecibo d'un pulsar binaire:
utilisation des FFT!

→ l'orbite se resserre



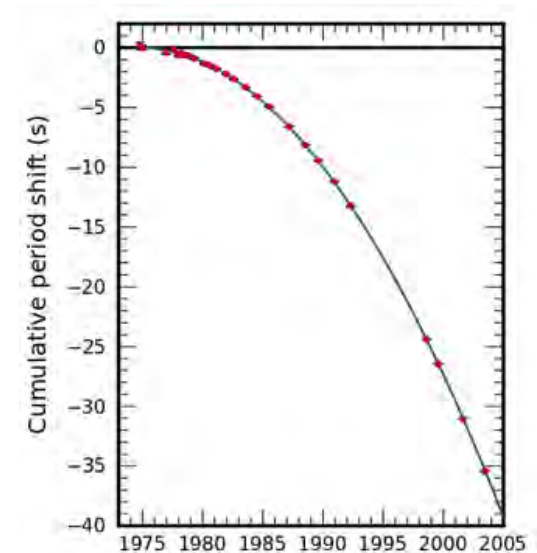
$P=59\text{ms}$
Orbite 0.3jour
→ 200 Ma



J.H. Taylor

R.A. Hulse

Nobel 1993 pour la
découverte indirecte des
ondes gravitationnelles



1975

Year

2005

Découverte des RRAT

Dans les années 2000, à peu près 2000 pulsars avaient été découverts, Maura McLaughlin en 2006 trouve dans le survey de pulsars de Parkes des sources « Rotating Radio Transients » **RRAT**

pulse de qqs ms, espacés de plusieurs min ou h



Maura McLaughlin

Difficile de distinguer des interférences
Technique de coïncidences, avec un
Instrument multi-beams (13)



La mesure de dispersion (DM)

La dispersion est dûe à la traversée le long de la ligne de visée du milieu interstellaire ionisé

Les électrons diffusent la lumière, qui n'a pas la même vitesse que dans le vide

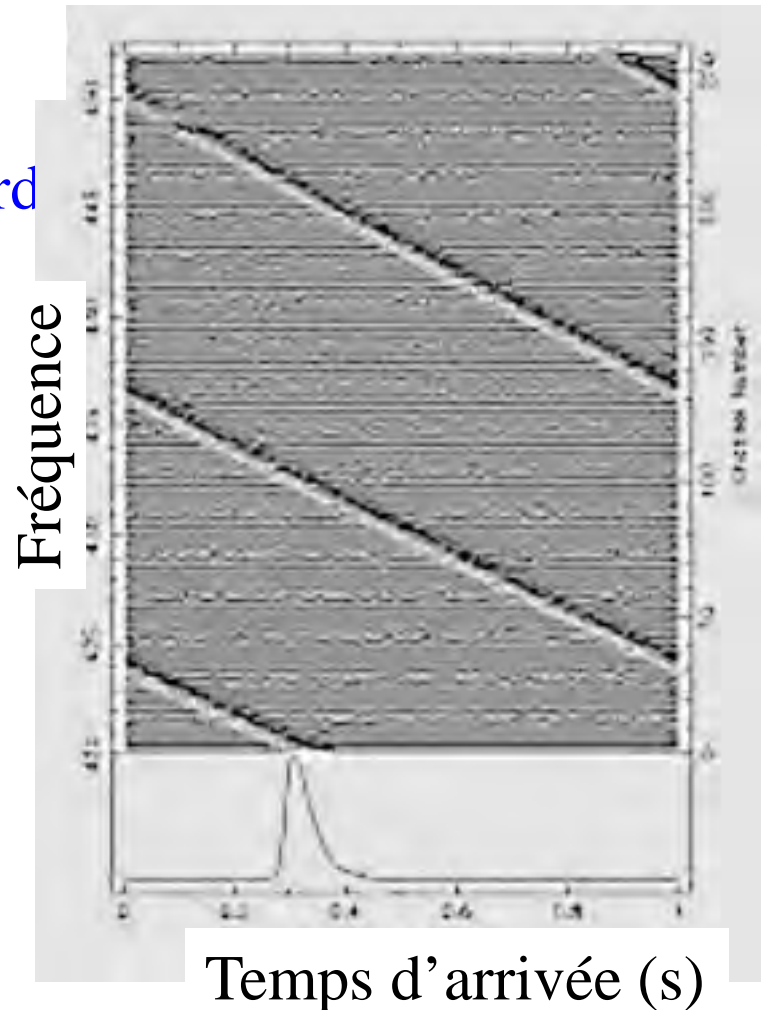
Sa vitesse dépend de la fréquence,

Le signal basse fréquence arrive plus tard par rapport aux fréquences hautes

La mesure de la dispersion donne la densité n_e sur la ligne de visée

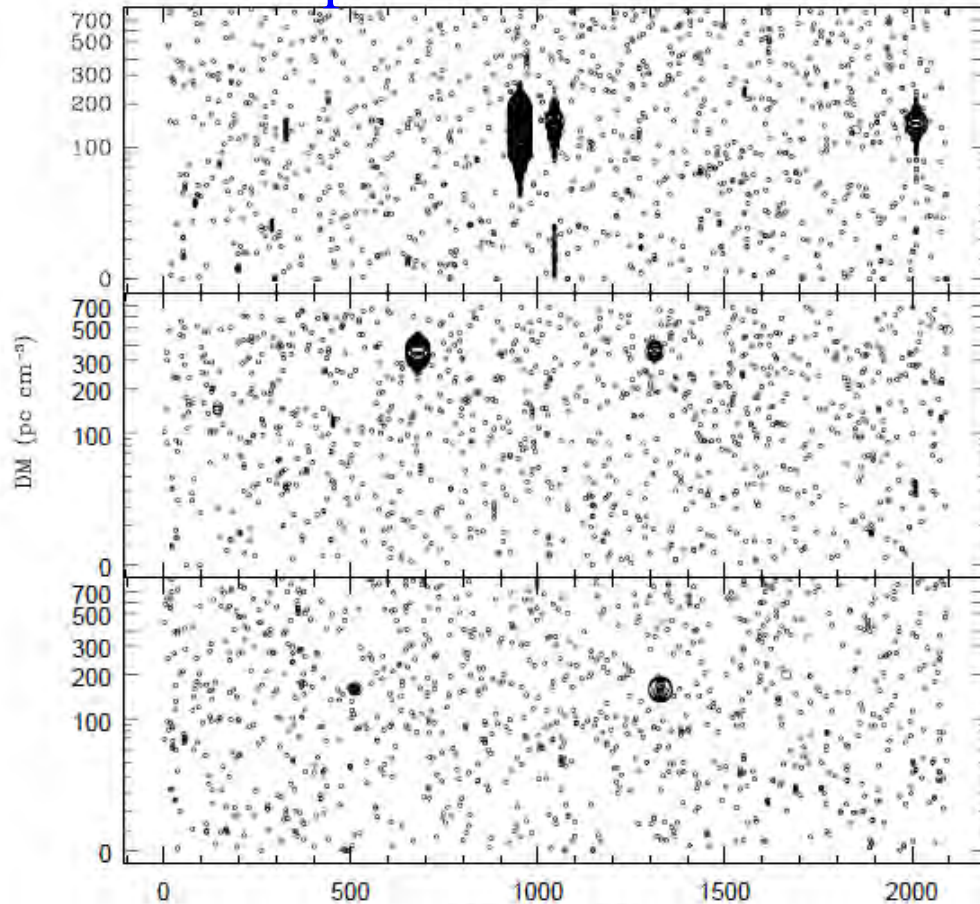
Pour une densité n_e moyenne, cela donne la distance

$$\text{DM} = n_e L \quad \text{en pc /cm}^3$$



RRAT en 2006

DM Dispersion Measure



Arrival time (seconds)

DM=0 → RFI

3 sources, qui ne sont pas des pulsars, mais ont des sursauts, qui peuvent se reproduire **sporadiquement**, avec la même dispersion DM

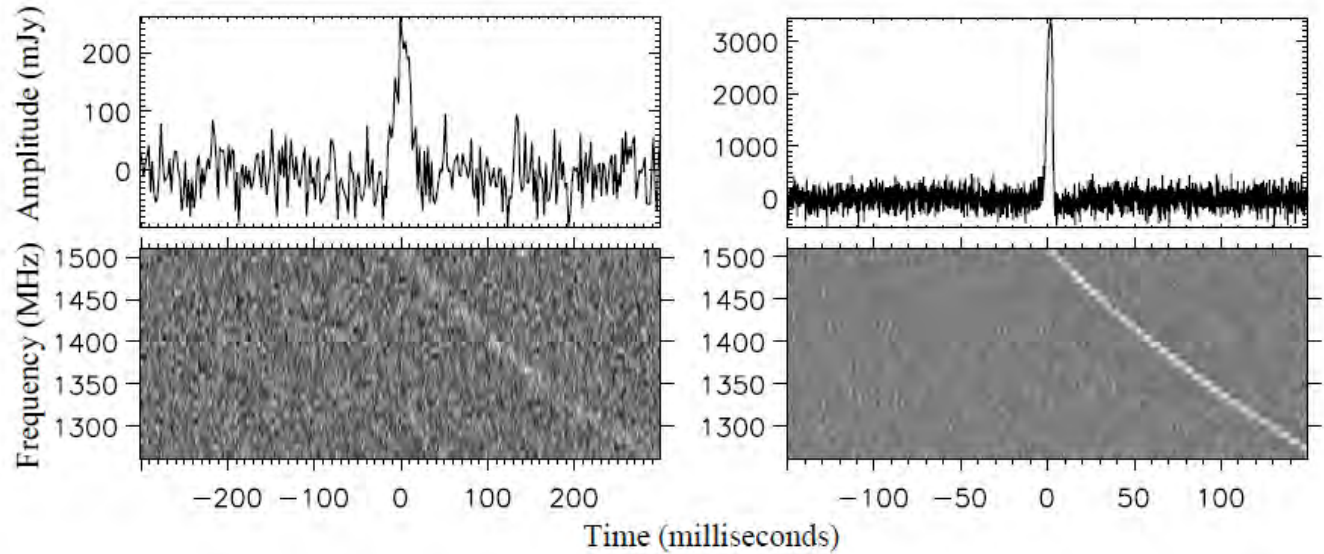
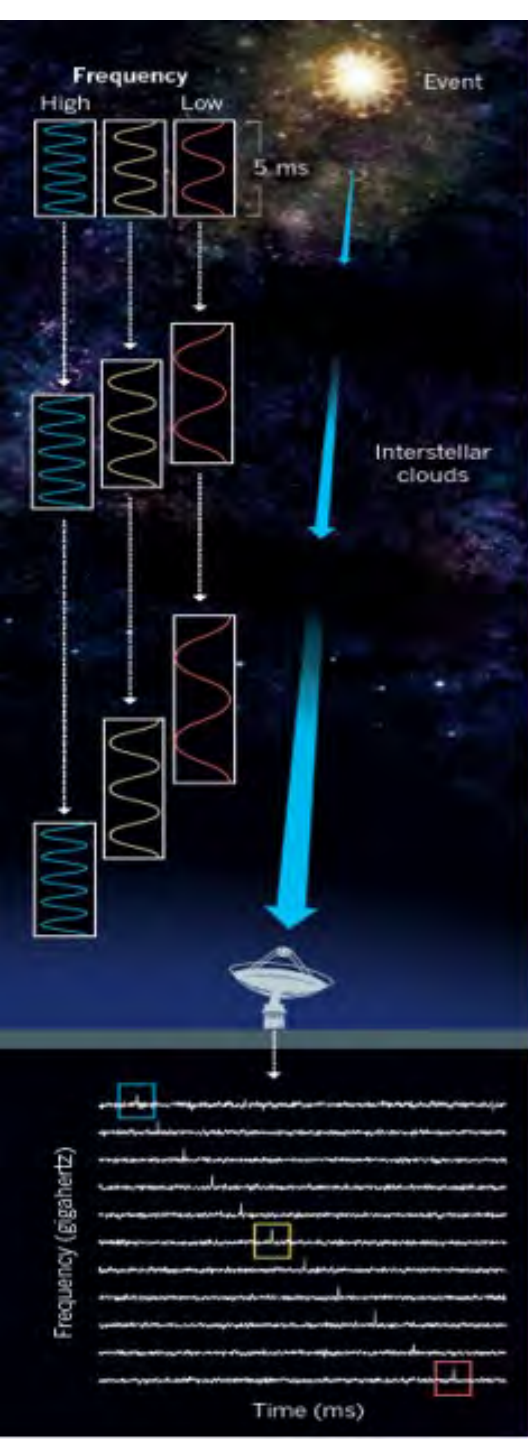
La FFT ne peut pas trouver ces objets!

→ La recherche de pulsars a empêché de trouver tous les sursauts

Sans doute d'autres transients?

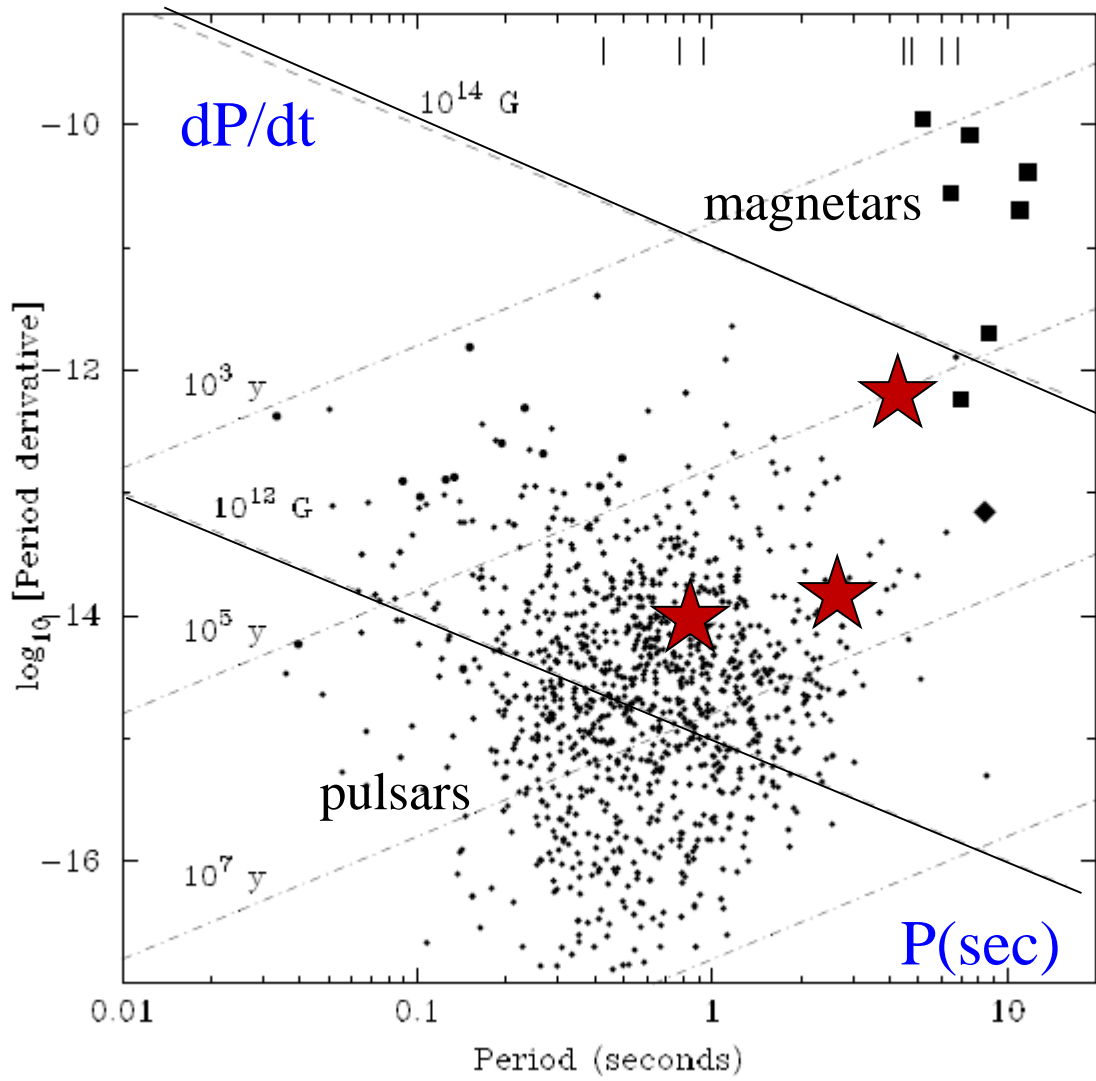
RRAT en 2006

Pour sommer les signaux entre eux, il faut d'abord dé-disperser



La dispersion DM $\sim 150 \rightarrow$ ces objets sont dans la Galaxie, comme les pulsars.

Identification dans le diagramme P-dP/dt



RRAT

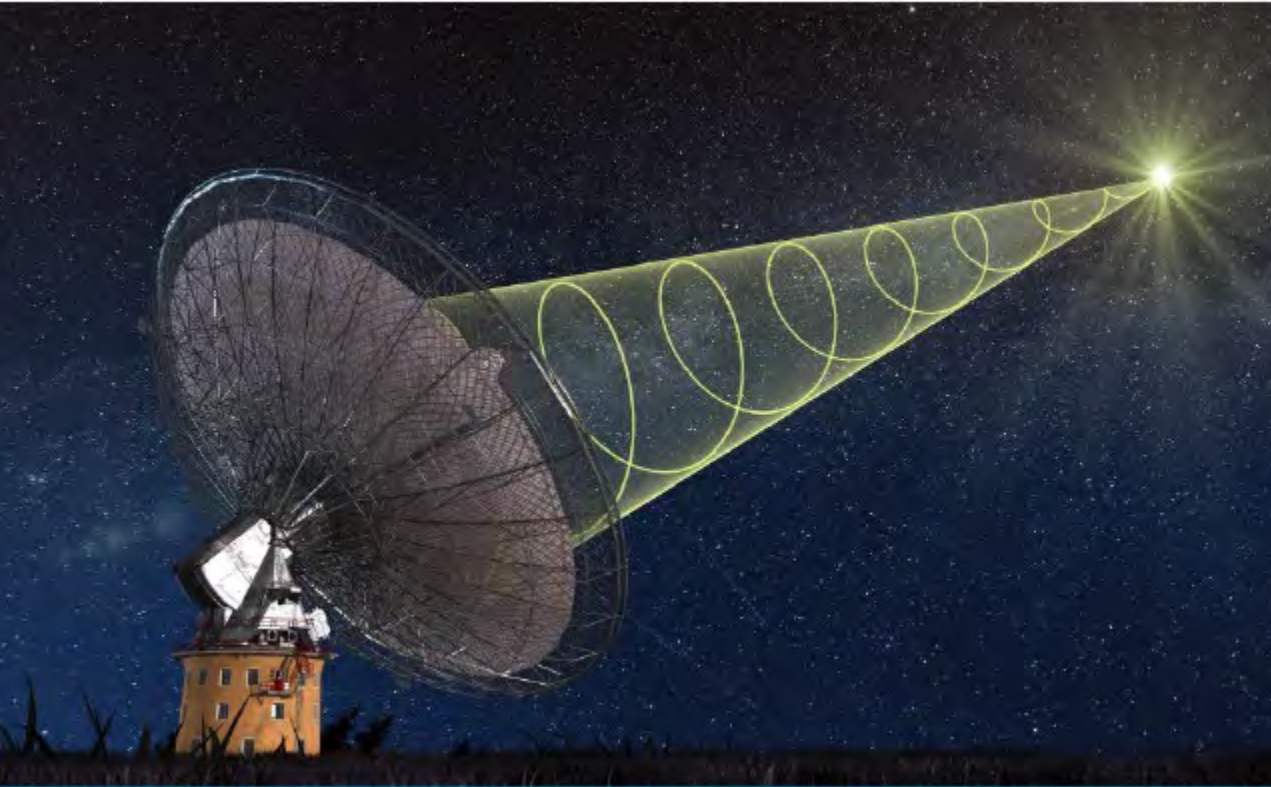
Durée du sursaut 2-30ms,
Répétitions 4min-3h

Typiquement 1sec par jour

→ Étoiles à neutron qui
tournent, irrégulières

Statistiques: **population
bien supérieure** à celle
des pulsars

Un événement en 2007



Les radio-astronomes s'aperçoivent qu'avec les FFT et les études de pulses, **beaucoup d'objets ont été manqués!**

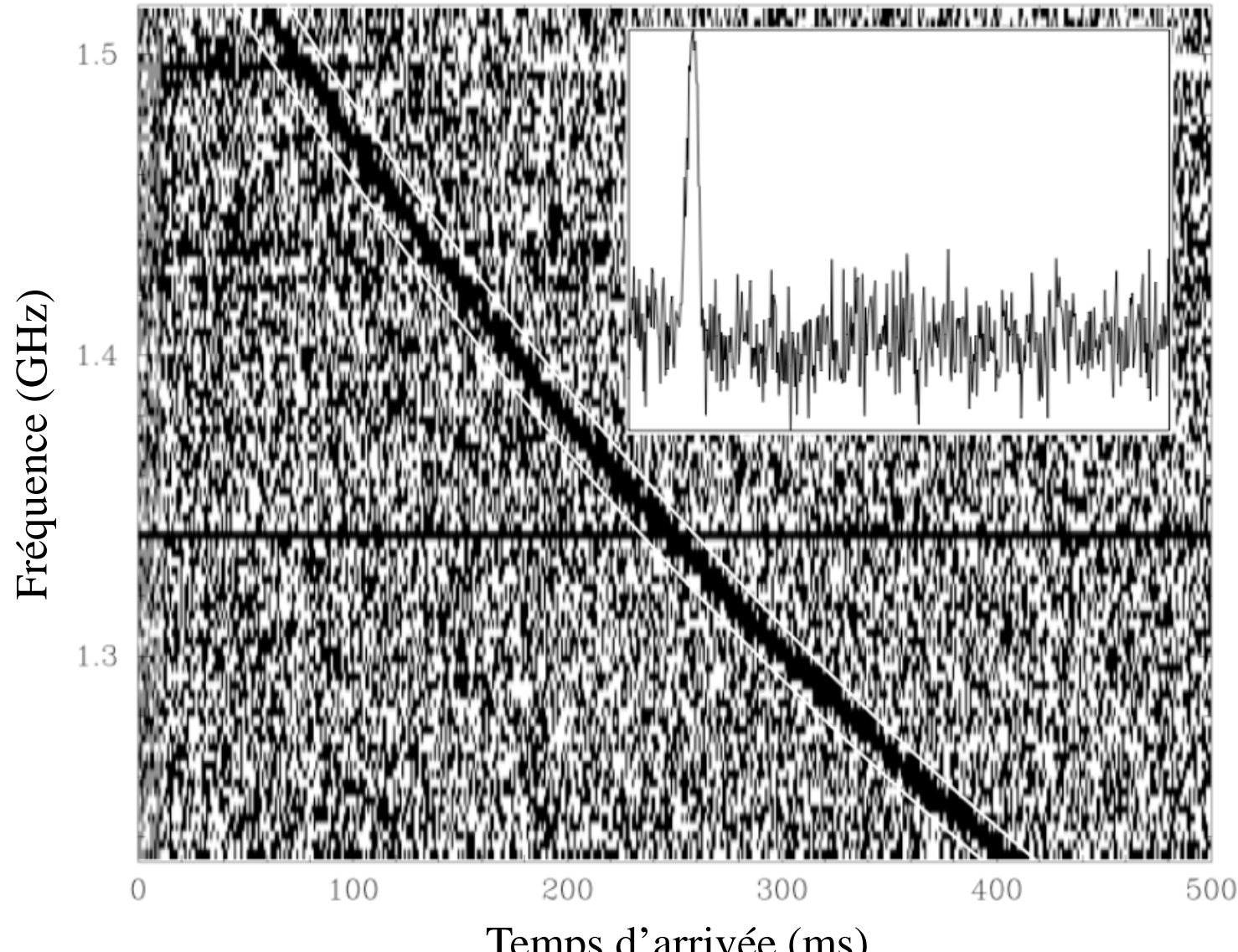
Après une recherche fébrile dans les archives, et élimination des interférences, ou des objets terrestres (dispersion nulle)
→ Découverte d'objets mystérieux..

Le sursaut de Lorimer

Détecté en 2001, mais publié en 2007!



Duncan Lorimer



DM= 375
bien plus
grande que MW
→ extra-gal

→ Puissant

Sursaut de Lorimer

Source de 30 Jy, durée < 5ms (résolution), à 3 degrés du SMC
Dans une mosaïque, survey des Nuages de Magellan en 2001

DM donne une distance < 1000 Mpc, extra-galactique

La largeur du sursaut s'étale avec la fréquence, compatible avec
la dispersion le long de la ligne de visée

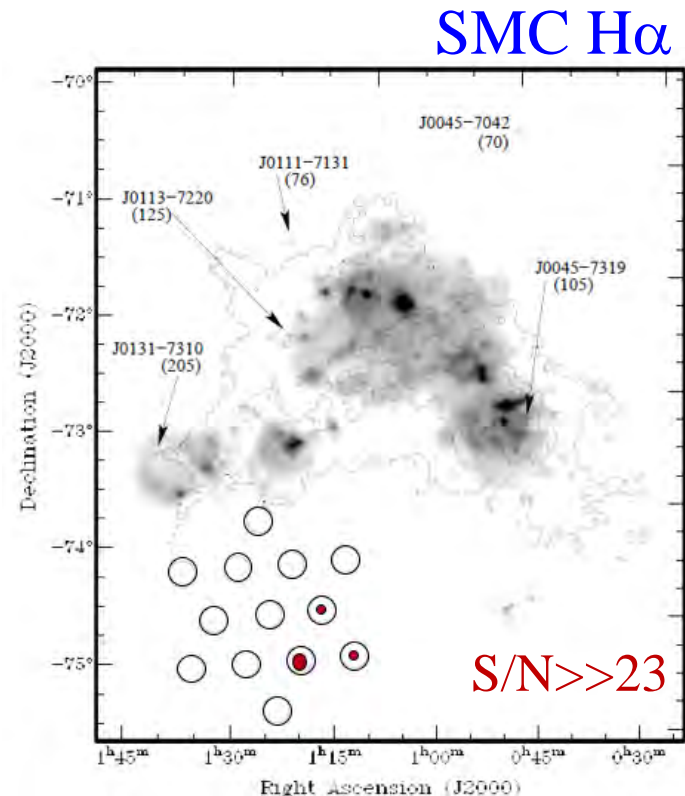
Le flux croît à basse fréquence $S \propto \nu^{-4}$

Pas de répétition en 90h d'observation
Supernova ou fusion d'objets compacts?

A grande distance, Energie considérable!

5 pulsars
(DM)

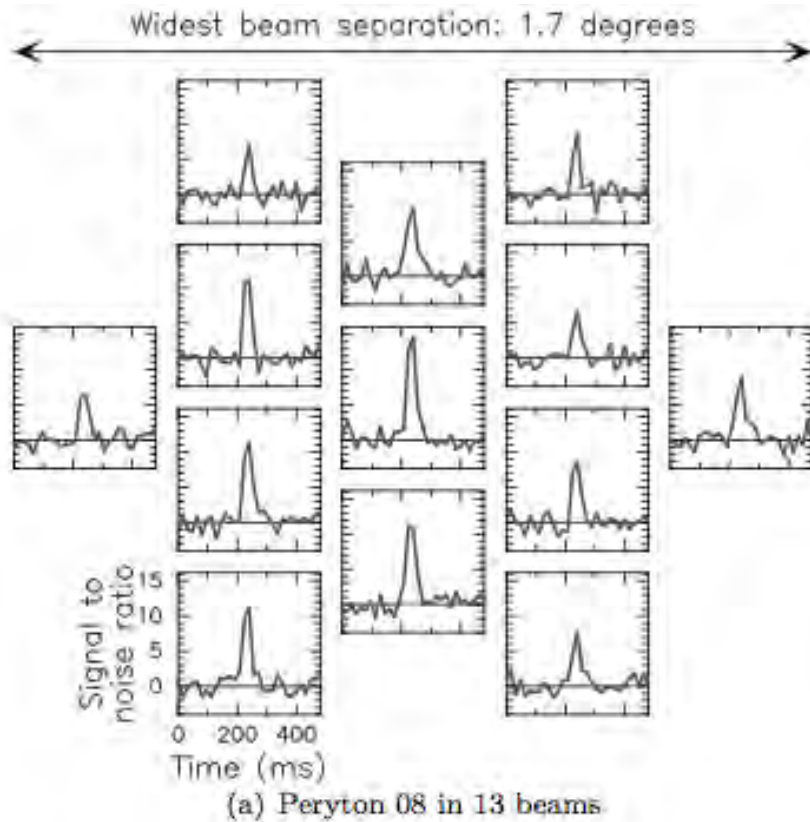
Lorimer et al 2007



Les Perytons



Sarah Burke-Spolaor



Recherche dans
les précédents surveys

→ 12 RRATs

Mais en plus, découverte de 16 pulses
semblables au sursaut de Lorimer

Dans le lobe secondaire du télescope

→ Origine terrestre

Signal présent dans les 13 beams!

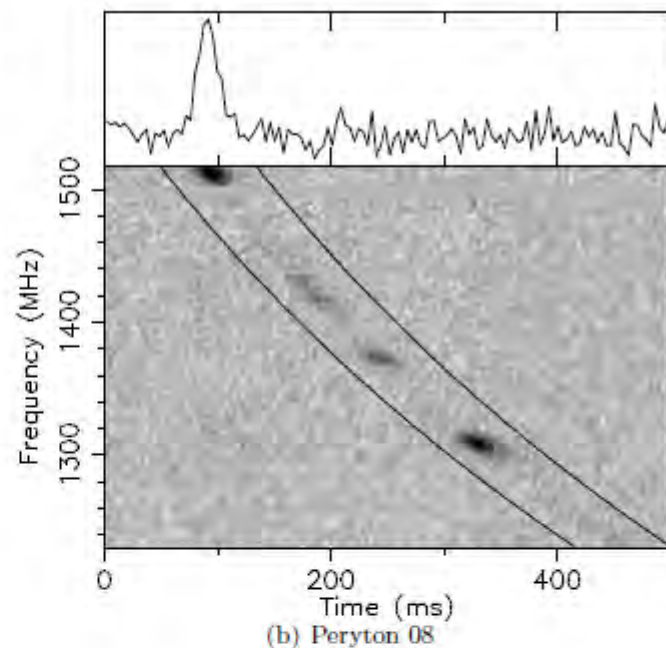
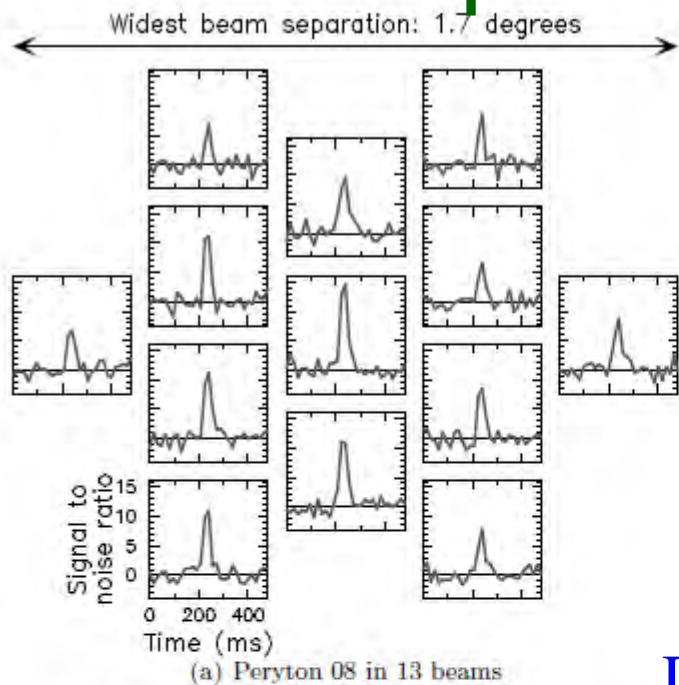
Ne peuvent être que terrestres (éclair?=
(sursaut solaire + atmosphère?)

Burke-Spolaor et al 2011

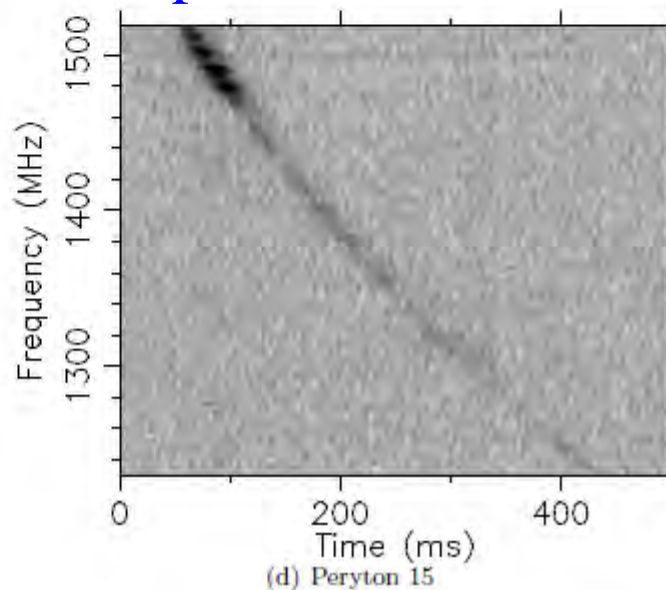
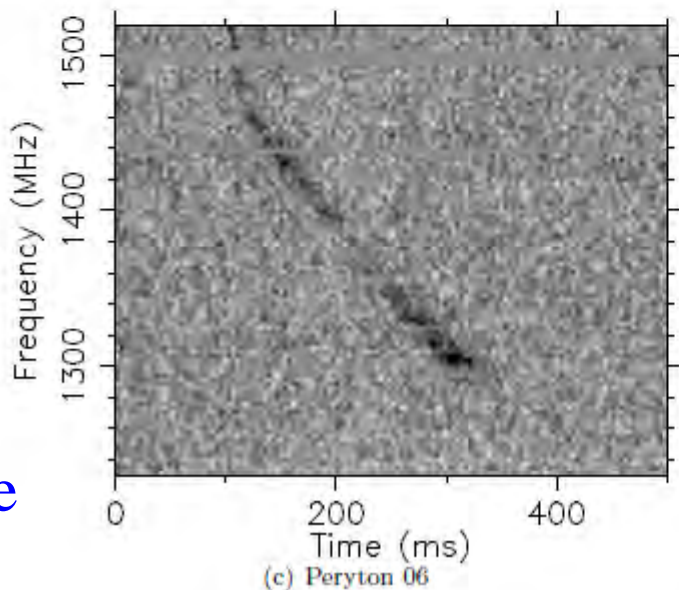


Un peryton

Dispersion DM~300?



DM comparable au sursaut de Lorimer



Durée
qqms



Etat des lieux en 2010: Confusion

What	Lorimer	Perytons	RRATs
# Beams	1	All	1
Dispersed	Yes	Yes	Yes
DMs	~400	300-500	< 300
Repeat	No	No?	Yes
Origin	Extragalactic?	Atmosphere ?	Galactic
Source	Unknown	Lightning?	Pulsars

Le sursaut de Lorimer est-il un peryton?

Confirmation des FRB: 2013

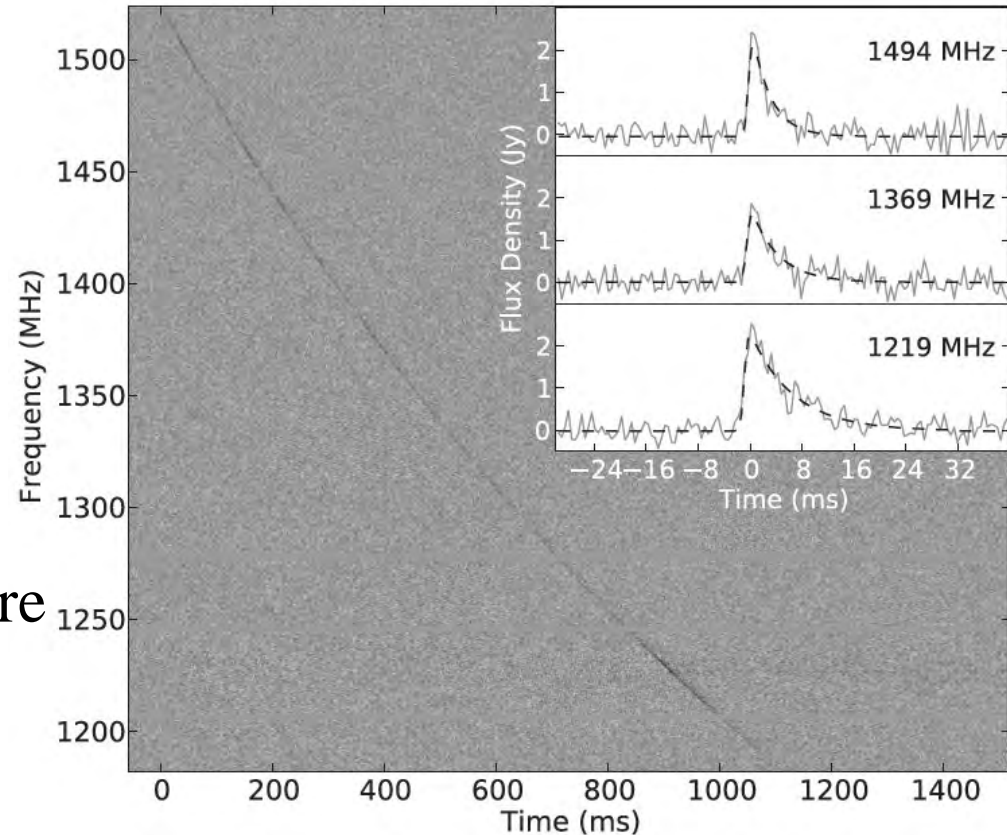
4 FRB détectés, à haute latitude galactique,
Avec une dispersion corresp. au milieu interstellaire
Vus seulement dans 1-2 beams, DM~500-1000
Dû au milieu inter-galactique + galaxie-hôte
 $\delta t \propto DM v^{-2}$, Largeur $W \propto v^{-4}$



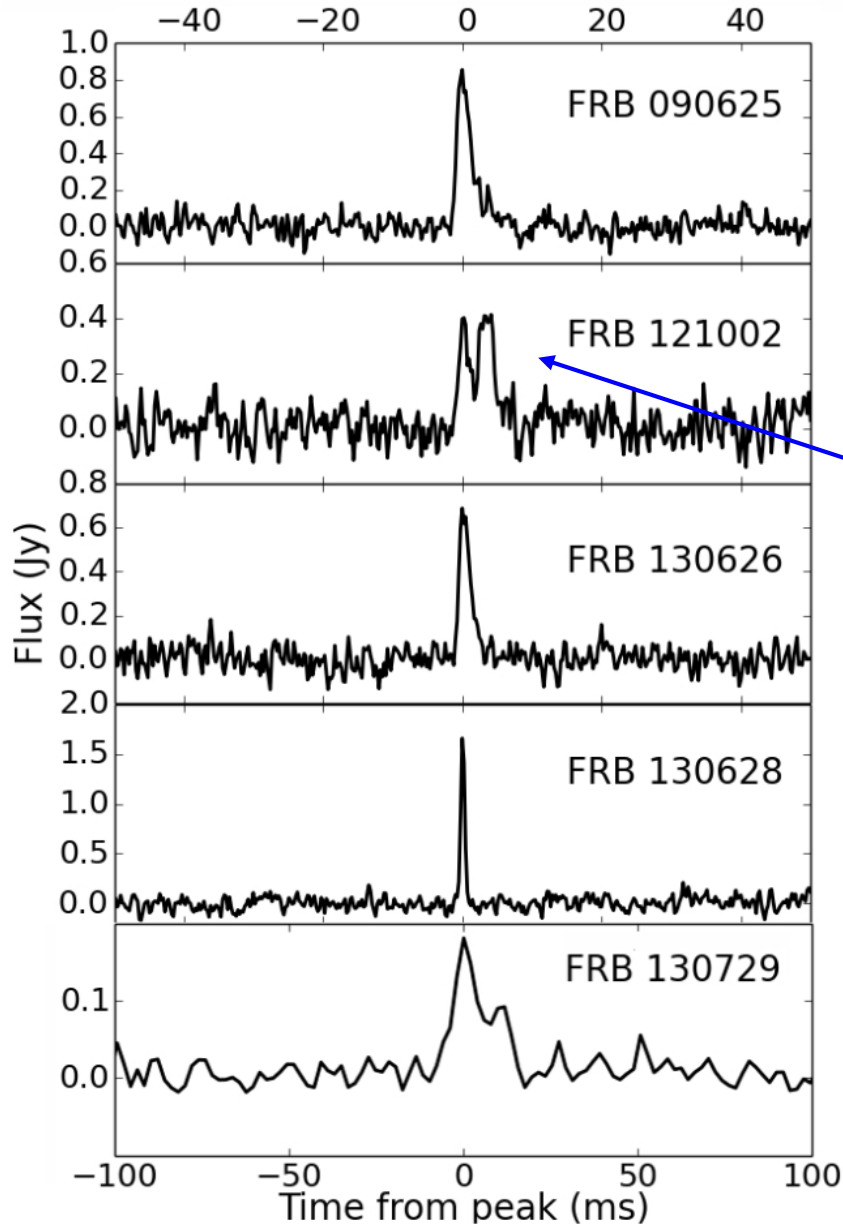
Dan Thornton

Galaxies hôtes $z=0.5-1$,
Distances jusqu'à 3000 Mpc!
Au contraire les perytons ont
toujours la même DM

La fréquence des FRB
2-3 ordres de grandeur supérieure
à celle des GRB, et presque
= supernovae



De plus en plus de FRB



Flux $\delta t =$ Fluence =
0.13 Jy ms pour un FRB de 0.128 ms
et 1.5 Jy ms pour 16 ms de durée

Un FRB est double
Difficile d'imaginer une fusion
d'objets compacts?

→ Fréquence 7000 FRB/jour
Dans tout le ciel
1/1000ans/galaxie

Plus nombreux à haute latitude
galactique

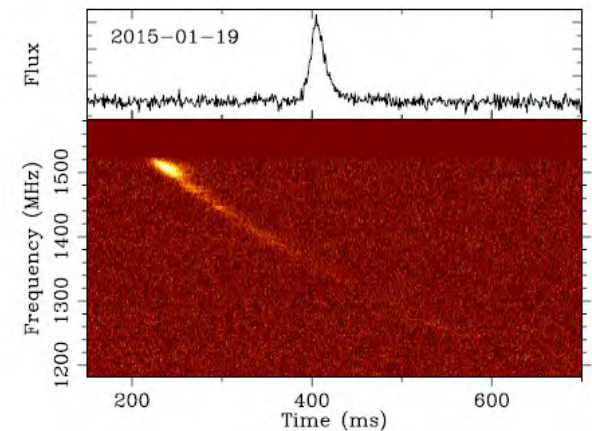
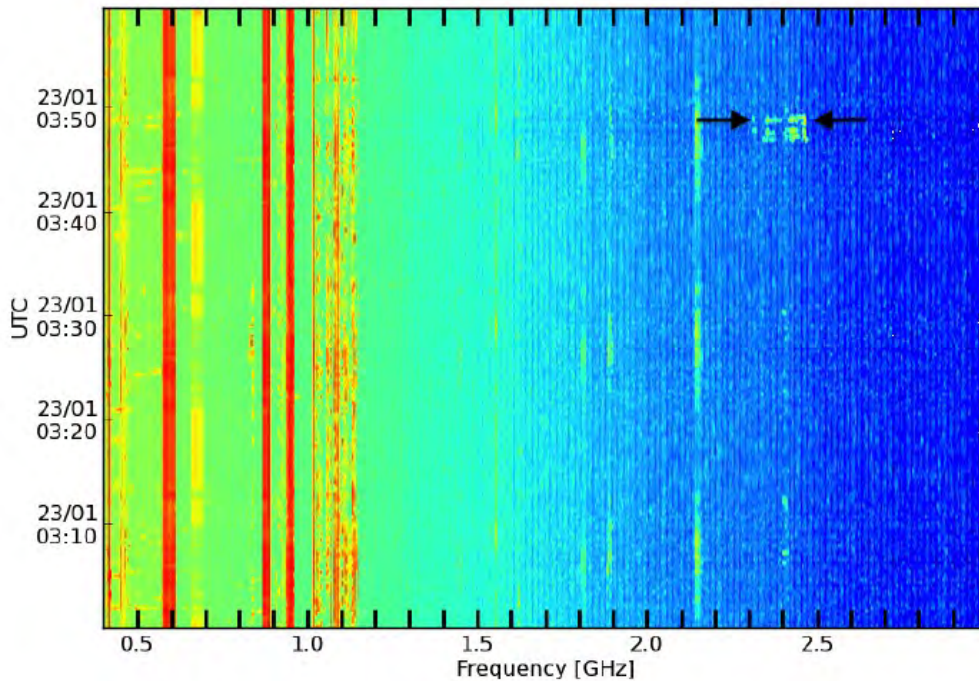
Champion et al 2016

Le mystère des perytons résolu

Lors de l'ouverture prématurée d'un micro-onde, le magnetron envoie un signal pendant qqes ms (*seulement aux heures de bureau!*)



Emily Petroff



Détecté par le filtre RFI de Parkes
aux fréquences 2.3-2.5GHz de Comm

Petroff et al 2015

Mime la dispersion!

Propriétés des sursauts Radio (FRB)

Le sursaut de *Lorimer, Bailes, McLaughlin & Narkevic* (2007)

Durée <5 millisecondes → zone émettrice <1500km

Objets compacts: étoile à neutrons, trou noir

Forte DM (300-1000) → extra-galactiques

Aujourd'hui > 700 FRB connus, 24 répéteurs
19 galaxies hôtes

Traceurs du milieu intra-galaxies

Détection d'un FRB dans la magnétar
Galactique **SGR 1935+2154**, $D=7\text{kpc}$
SNR, + GRB Swift-BAT CHIME 2020

Bleu X-ray

Rouge= VLA-1.4GHz



Zhou et al 2020

Un FRB qui se répète

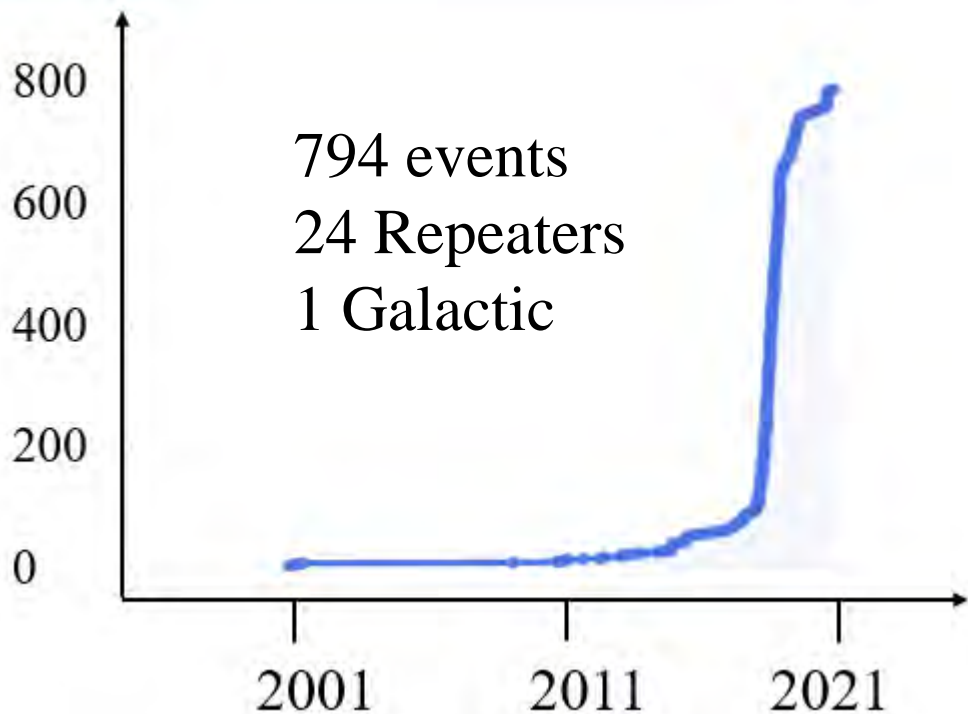


Cycle de 160 jours
90 jours actif (20 FRB)
70 jours silencieux



Event Count

<https://www.herta-experiment.org/frbstats/>

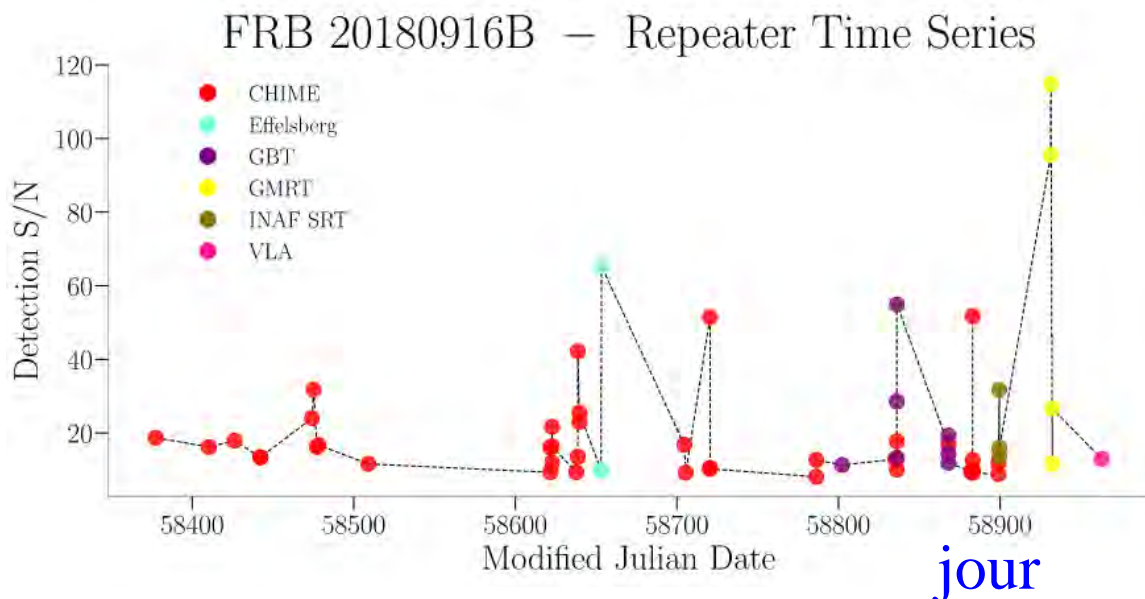


Statistiques FRB

19 Galaxies hôtes
Identifiées
<http://frbhosts.org>

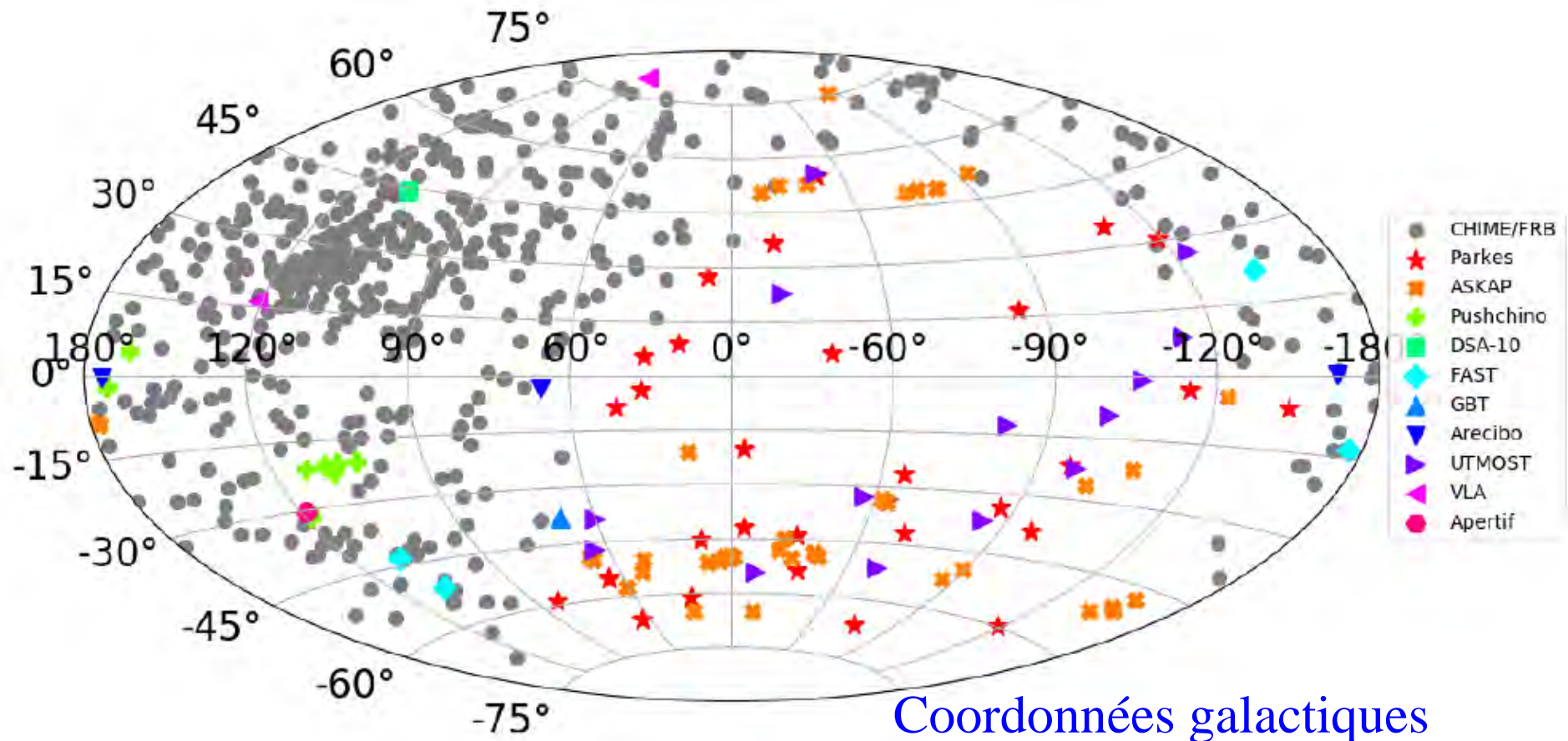
CHIME, ASKAP
GBT, GMRT, VLA
Parkes, Effelsberg..

S/N



Distribution spatiale

CHIME a récemment dominé les découvertes, hémisphère Nord 500 la première année!

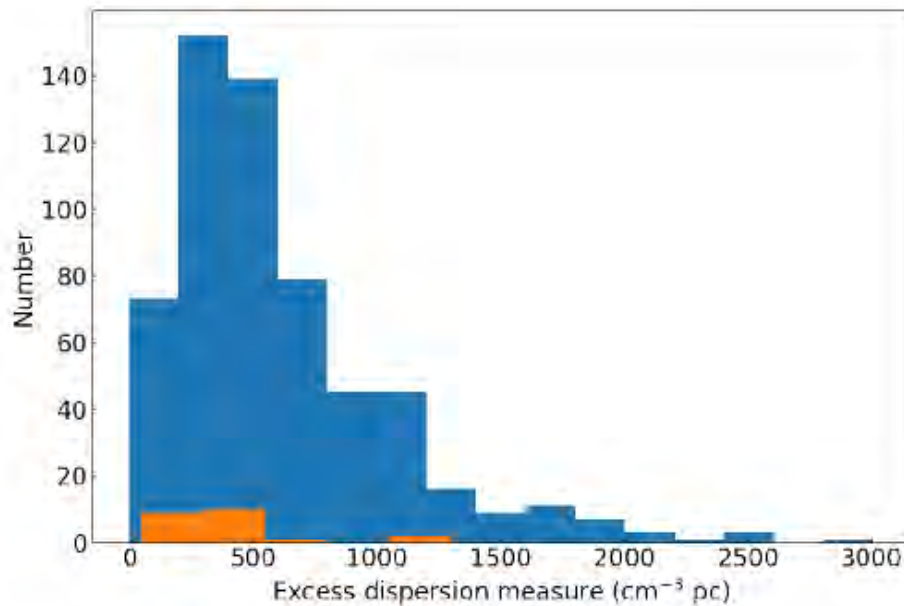


Distances (DM) et durées

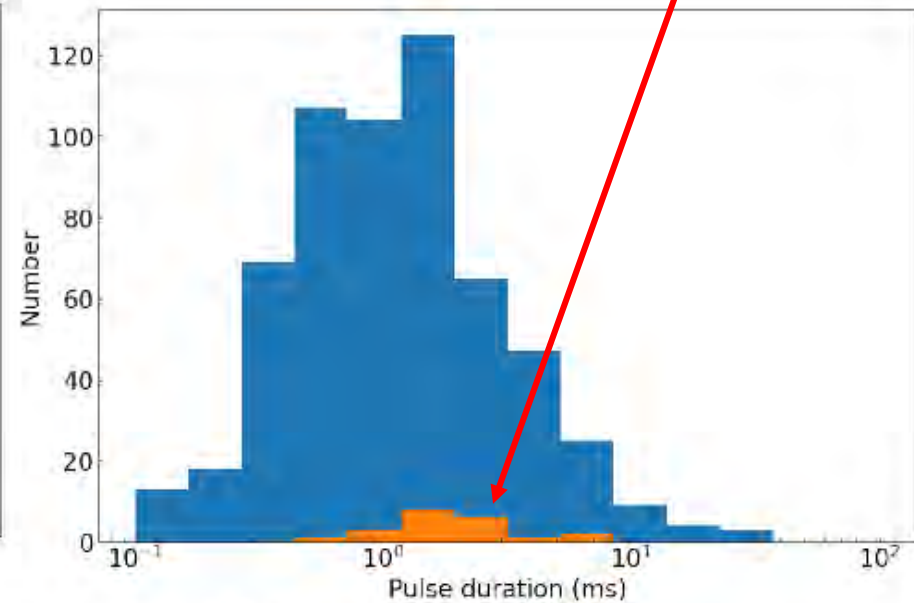
DM ~ 500 , jusqu'à 3000 pc / cm^3

Durées $\sim 1 \text{ ms}$ (de 0.1 à 10 ms)

Répéteurs



(a) DM excess histogram

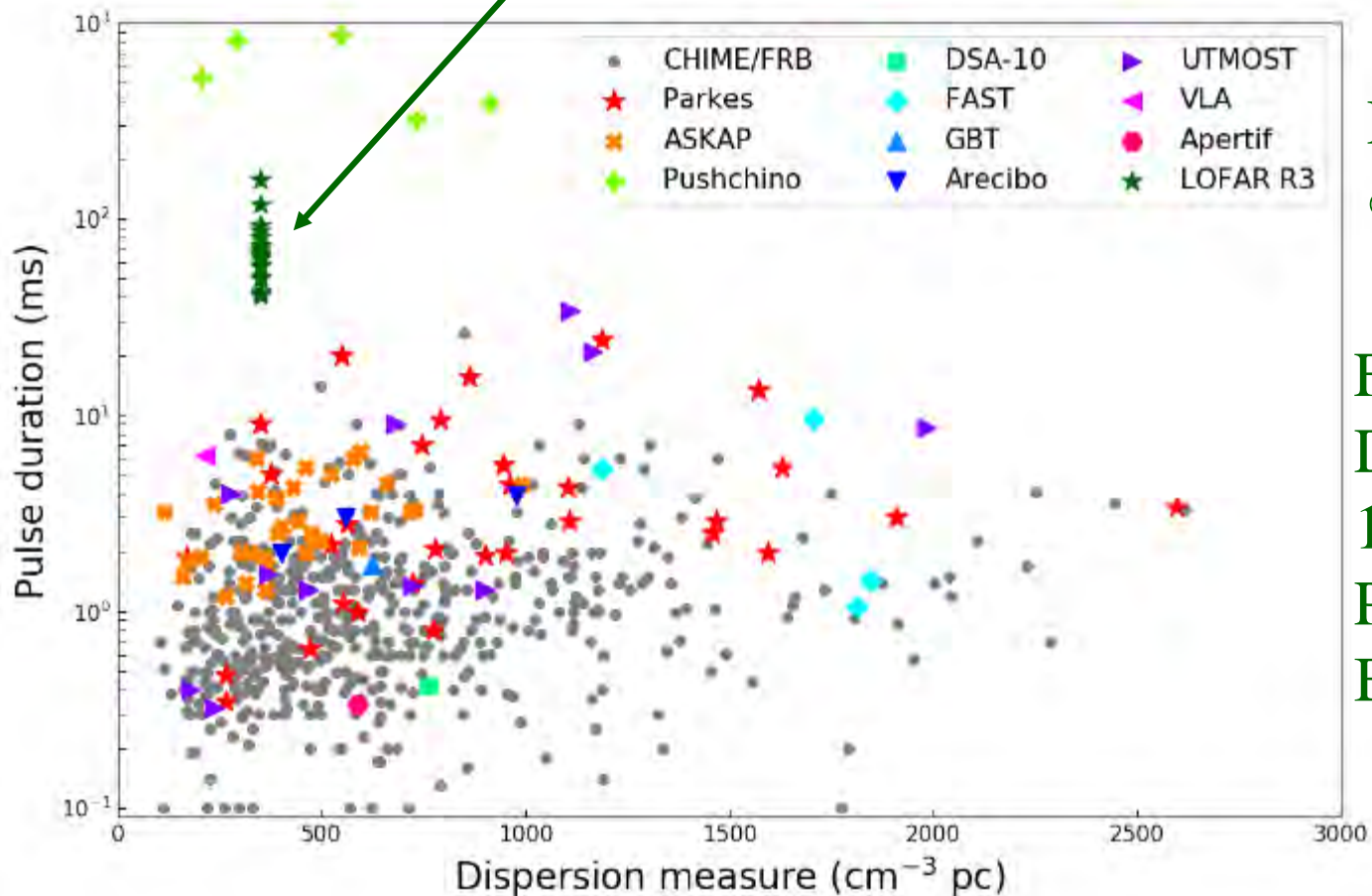


(b) Pulse duration histogram

Durée versus mesure de dispersion

Les très grandes durées sont dûes à la diffusion interstellaire à basse fréquence -- cf LOFAR *Pleunis et al 2020*

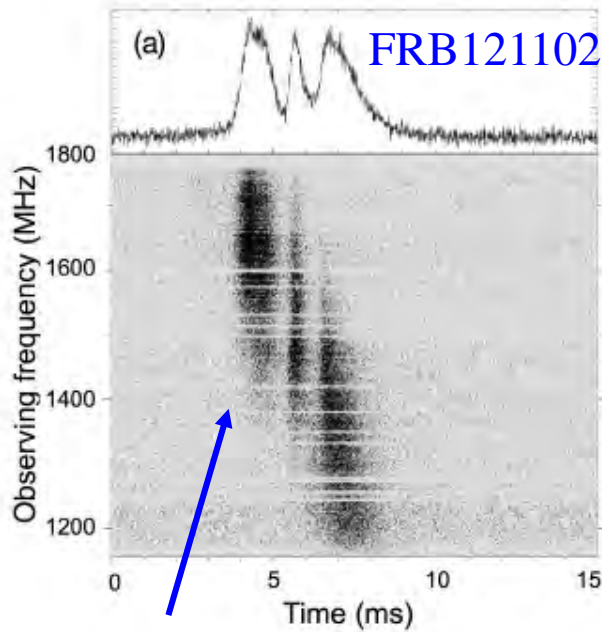
FRB 20180916B (R3)



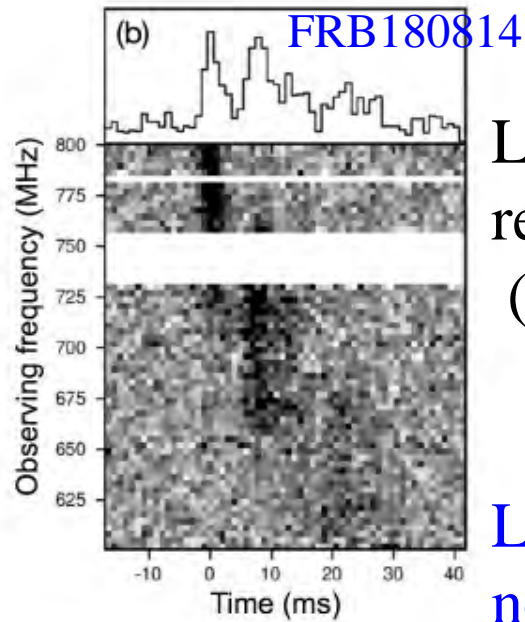
Diffusion $\lambda=2\text{m}$
 $\propto \lambda^2$

FRB 20180916
D=150Mpc
18 burst
P=16.3 j
Binaire?

Sous-structures des sursauts



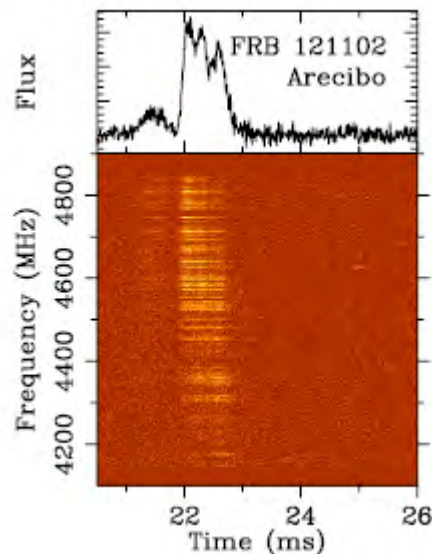
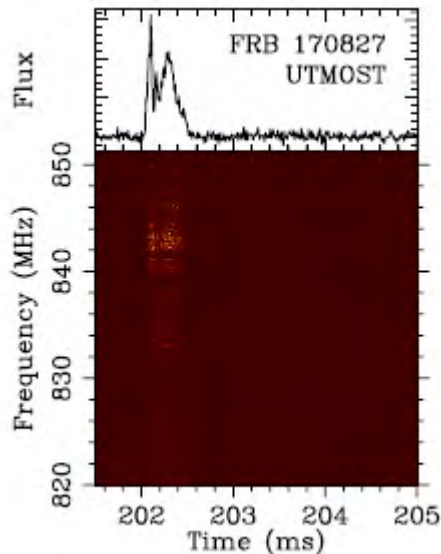
Corrigés de la dispersion



Les deux premiers répéteurs (Arecibo, CHIME)

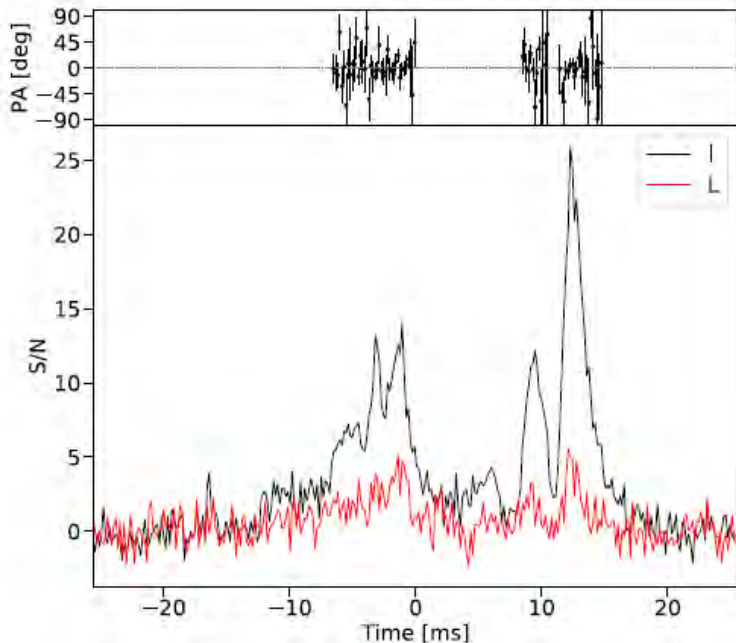
Les sous-structures ne semblent pas provenir de la ligne de visée, mais sont intrinsèques au mécanisme

Les pulses varient en largeur $30\mu\text{s}$ - 60ms



L'effet du « triste trombone »

Parmi les sous-structures multiples, on remarque **une dérive vers les fréquences basses** en fonction du temps



SOUND EFFECT

Sad Trombone

Wah Wah Wah Waaah



Les burst des répéteurs
sont plus larges

Effet d'environnement?

Ou mécanismes intrinsèques?

Recensement des baryons?

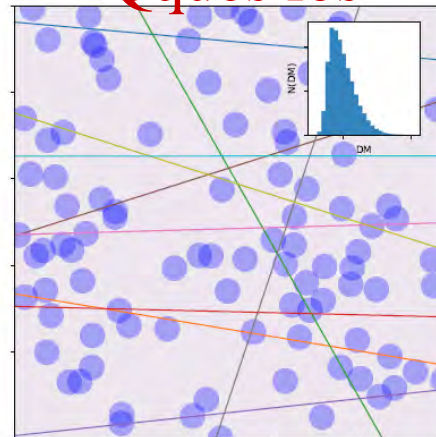
Relation de Macquart: une fois soustraite la DM de notre Galaxie et de la galaxie-hôte, on peut mesurer $DM \propto n_e L$ sur la ligne de visée

$$\langle DM_{\text{IGM}} \rangle = \Omega_b \frac{3H_0 c}{8\pi G m_p} \int_0^z \frac{(1+z') f_{\text{IGM}} \left[\frac{3}{4} X_{e,H}(z') + \frac{1}{8} X_{e,He}(z') \right]}{\left[\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda (1+z')^{3[1+w(z')]} \right]^{1/2}} dz'$$

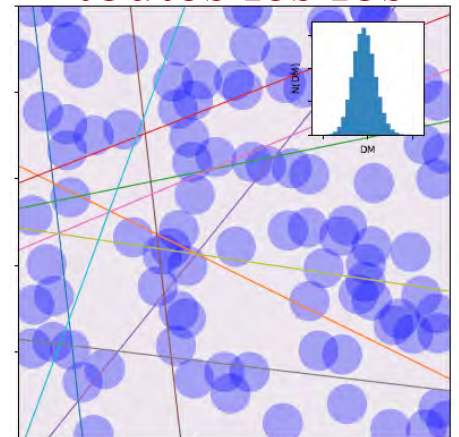
Elle dépend des paramètres cosmologiques, de f_{IGM} est la fraction des baryons restant dans IGM, et $X_{e,H}$ et $X_{e,He}$ les fractions d'ionisation de l'hydrogène et de l'hélium

DM_{IGM} dépend de la taille des halos ionisés

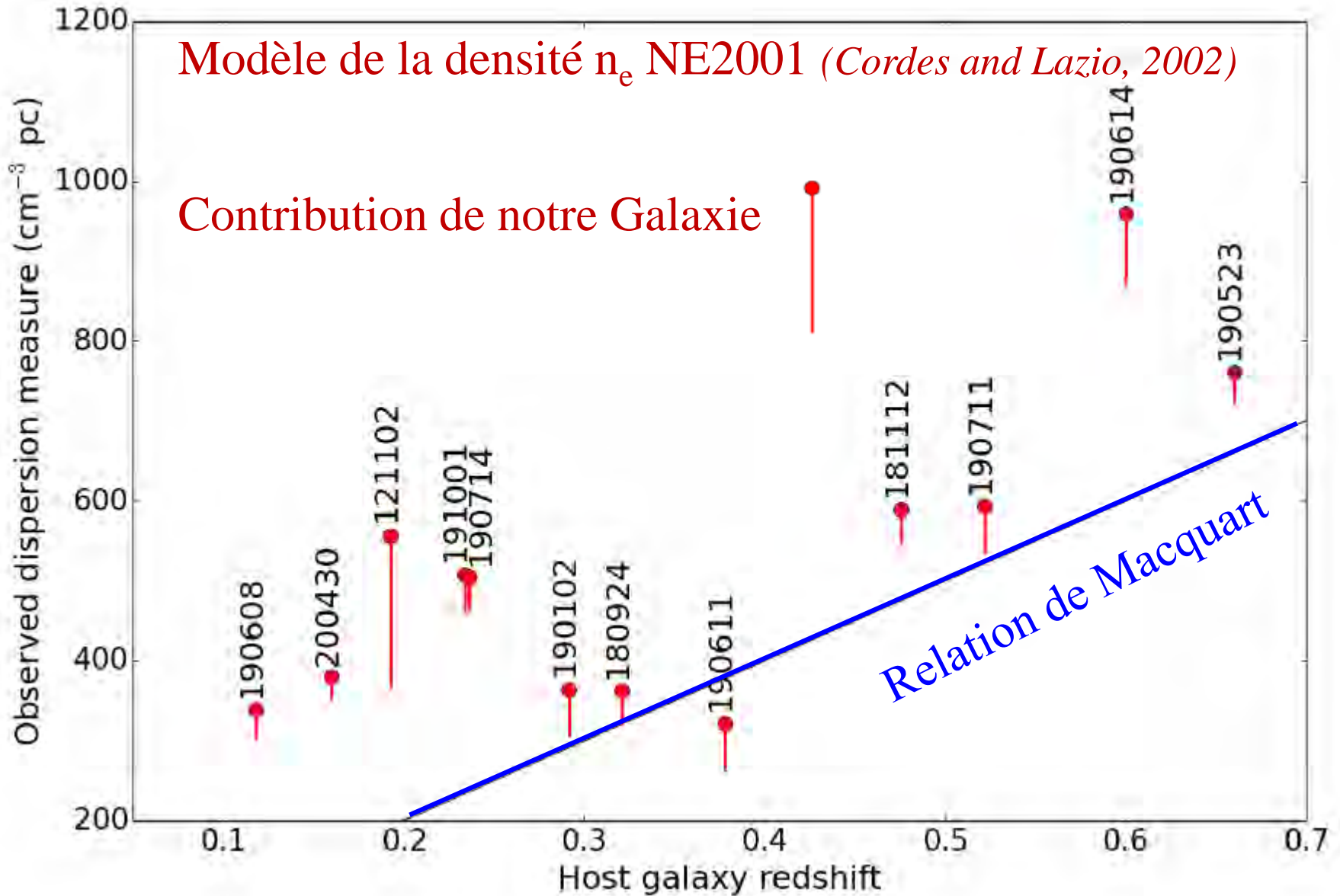
Quques los



toutes les los



$$DM_{\text{IGM}} \sim 1000z$$



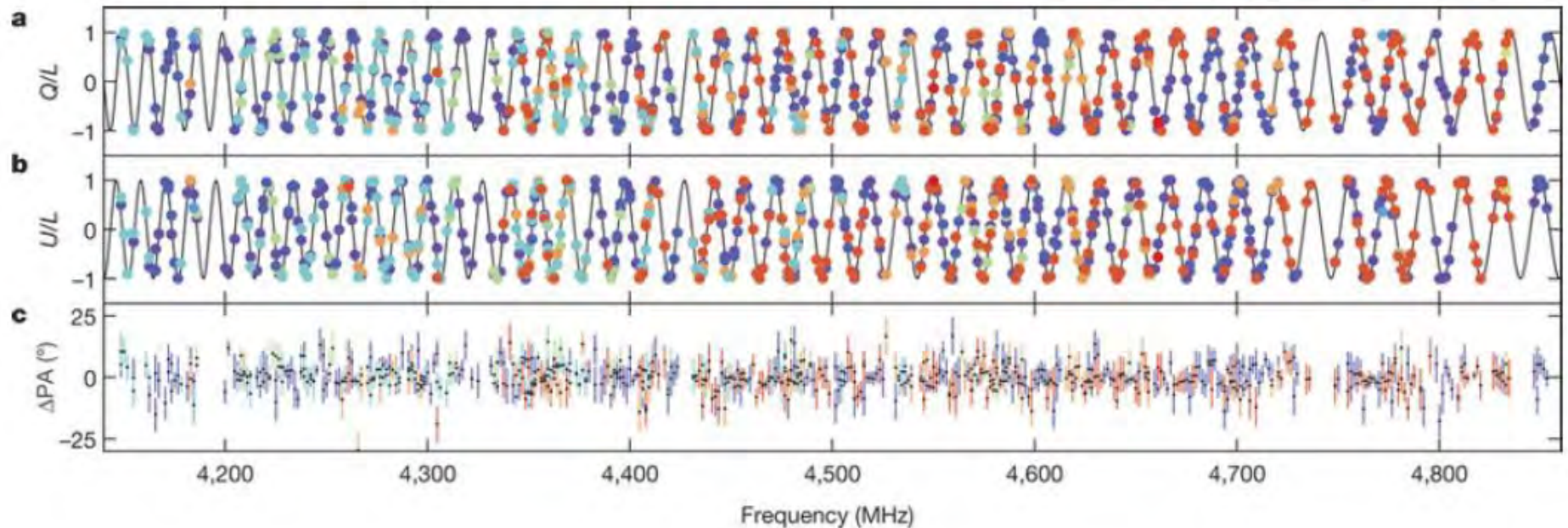
Rotation Faraday

Polarisation linéaire totale $L = (Q^2 + U^2)^{1/2}$

Rotation du plan de polarisation $\propto \lambda^2$

$\Delta PA = \theta = RM \lambda^2$

$$RM = 0.81 \int_d^0 B_{\parallel}(l) \cdot n_e(l) dl$$



FRB121102: Chaque couleur correspond à un sursaut $DM=560$
→ Champ B extrême: magnétar, vent très magnétisé trou noir..

Très basses fréquences

Les plus basses fréquences, 110 MHz, détectées par LOFAR
FRB 20180916B, très proche, $D=150\text{Mpc}$ Répéteur
Periode 16.3 jours \rightarrow binaire

VLBI 2.3mas \rightarrow galaxie hôte est
une spirale J0158+65, $z=0.0337$

Contraint l'auto-absorption (free-free)

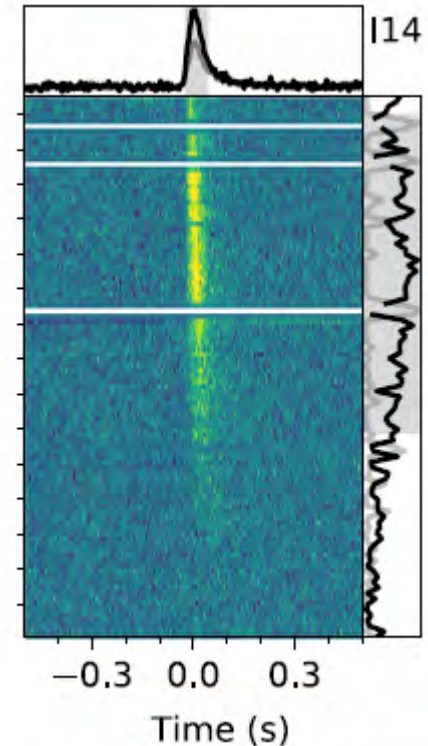
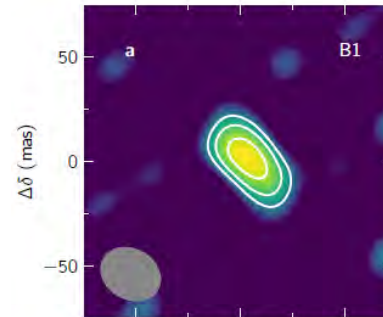
Durée plus longue 40-160ms,

Polarisation basse \rightarrow diffusion sur le chemin

LOFAR a détecté 18 sursauts de FRB 20180916B

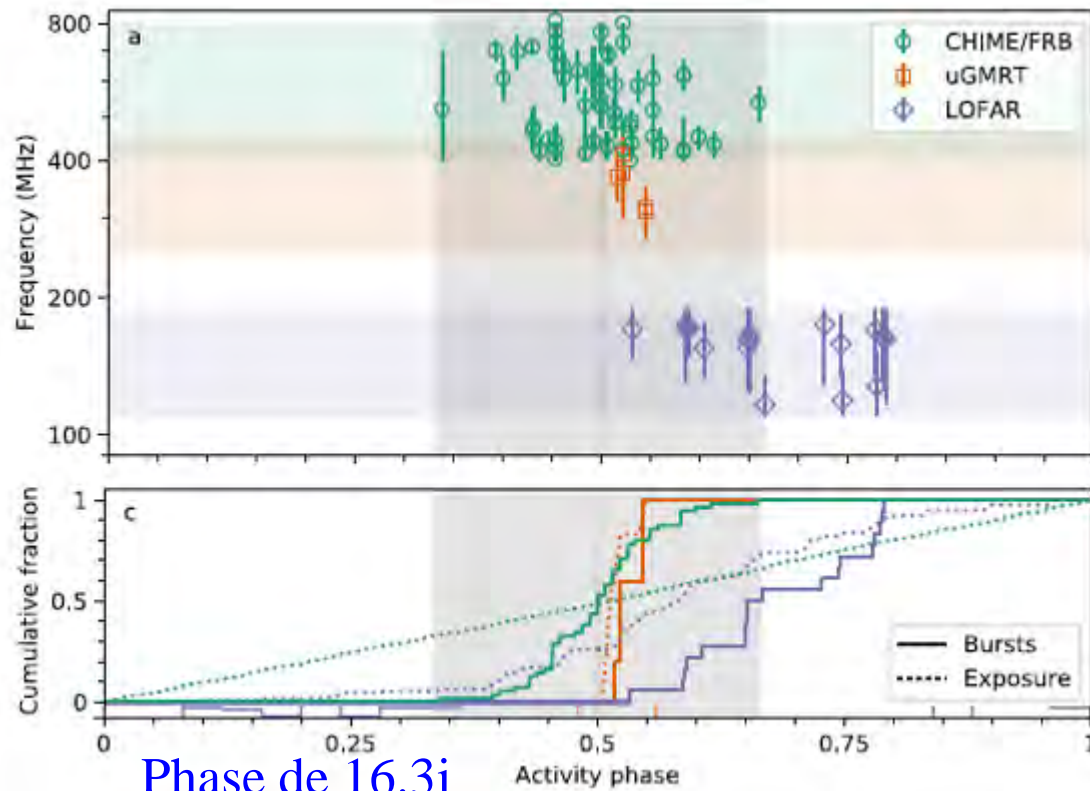
Polar faible \rightarrow Rotation Faraday de 2-3 rad /m²

Permet de déduire champ magnétique



FRB 20180916B
LOFAR

FRB20180916B



Phase de 16.3j

55 sursauts pendant 2 ans
avec CHIME

Arrivent 3j plus tard
à basse fréquence

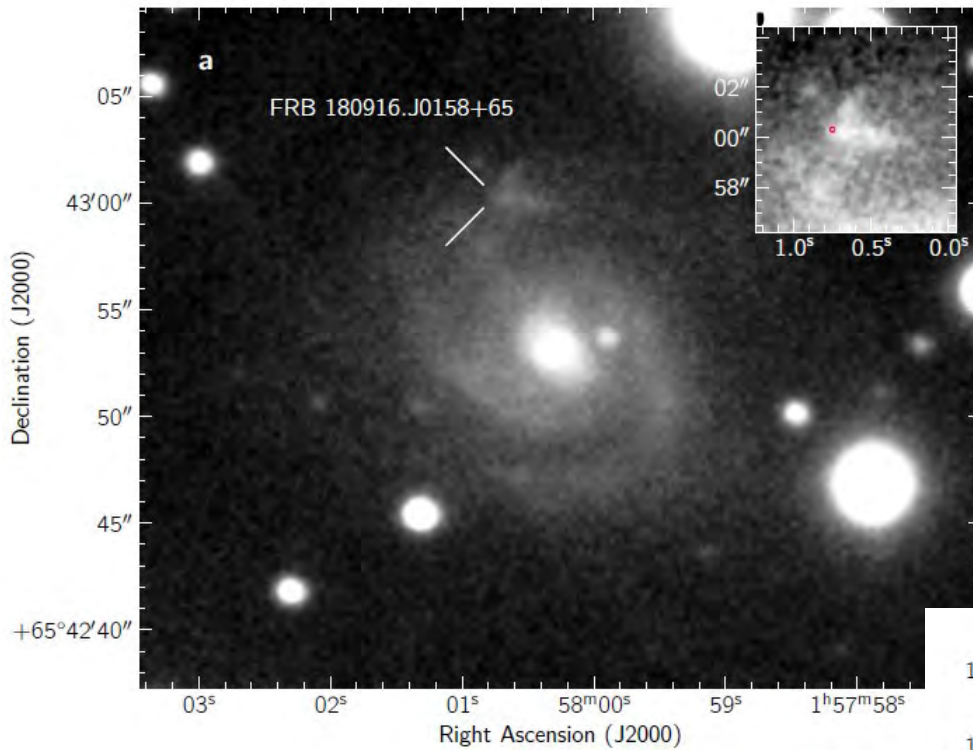
$P=16.33j$ 45 cycles
Observés

→ Etoile à neutrons
binaire HMXB

L'objet est situé dans une galaxie massive
22 cycles observés avec uGMRT à 600 MHz

3 jours de retard entre uGMRT (600Mhz) et LOFAR (150MHz)

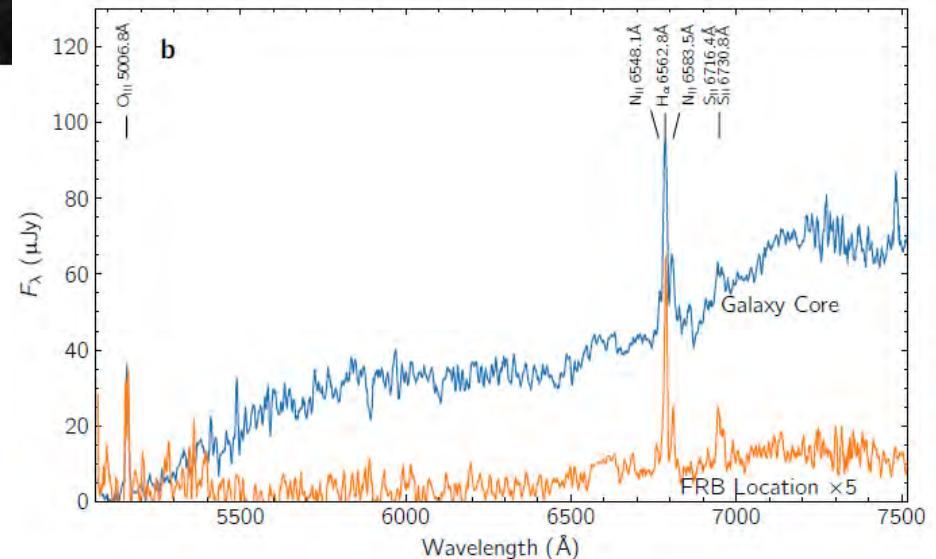
Galaxie hôte de FRB20180916B



Une galaxie de la taille
de la Voie lactée

$$M_* \sim 10^{10} M_{\odot}$$

Zone excentrée de formation
d'étoiles → Interaction?



Un FRB dans notre Galaxie

Jusqu'à présent le seul FRB dans la Voie lactée: SGR J1935+2154 coincide avec un « Short Gamma-Repeater » SGR, qui sont des magnétars, $B \sim 10^{15}$ G (1000x pulsar moyen), et aussi les AXP (Anomalous X-ray Pulsars)

Emission irrégulière, période longue (sans doute ralentie par le fort B)

Seulement 30 magnétars connus

SGR1935, découvert en 2016

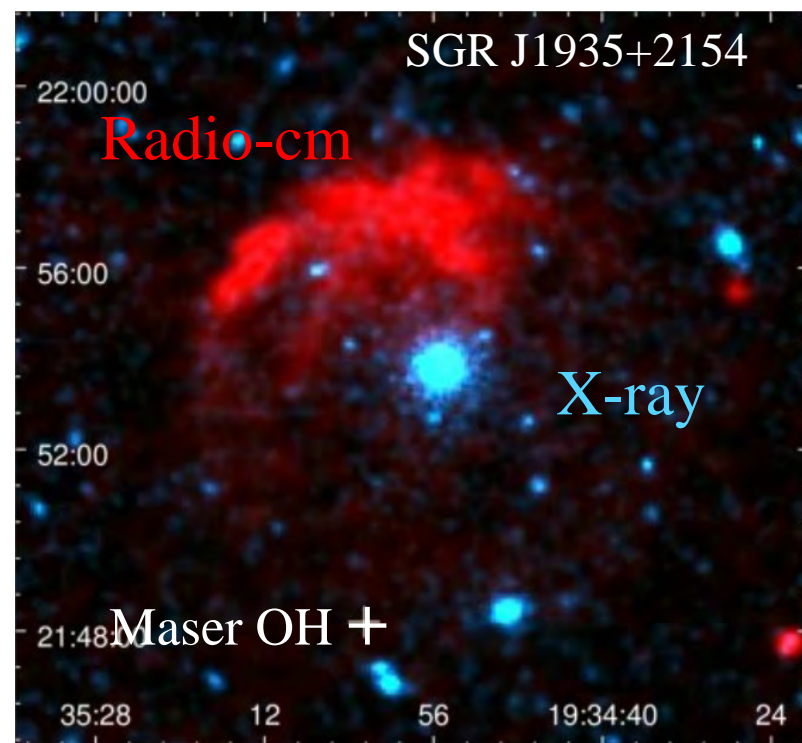
12 sursauts en X depuis

Supernovae G57.2+0.8 à 6.6kpc

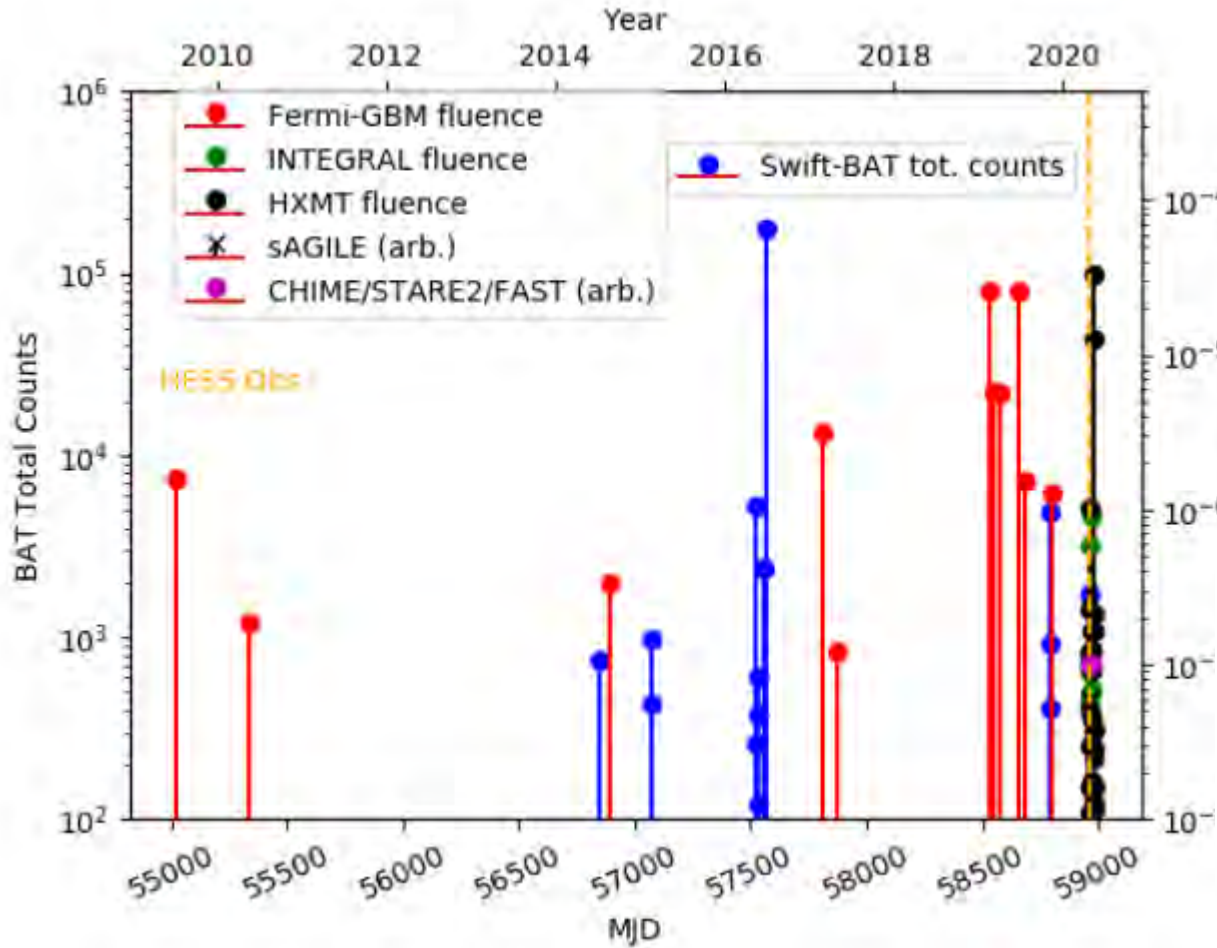
Explosant il y a 16 000 ans

Interaction de la SN avec le gaz

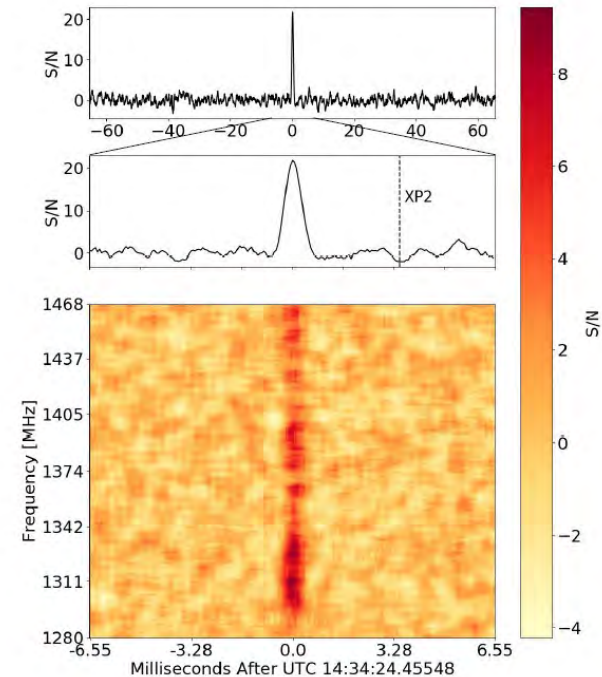
→ Maser OH



SGR1935: Historique des sursauts x et γ



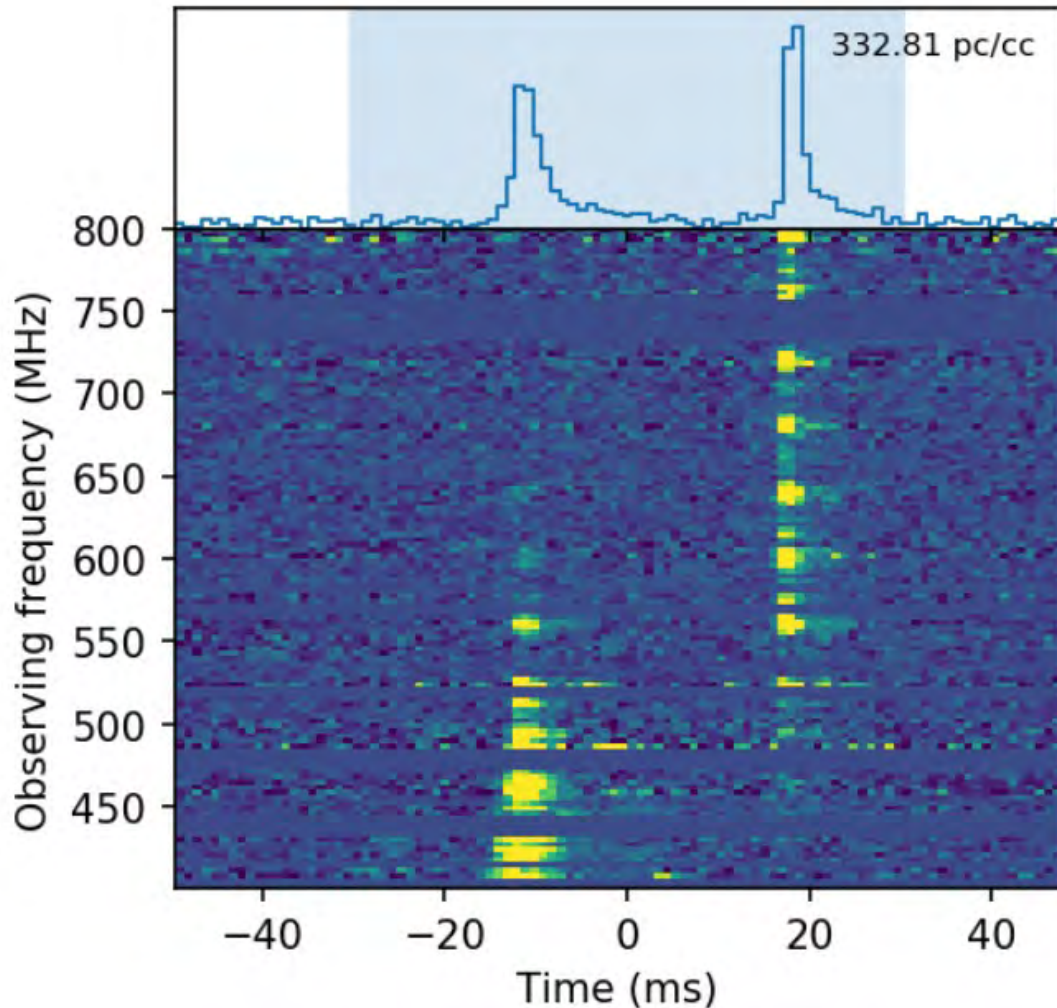
CHIME +
Sursaut FRB en 2020
Vu par **STARE2**
à 1.4 GHz
15 MJy ms (1ms)
Bochenek et al 2020



STARE2: interféromètre en Californie
(incluant OVRO)

Sursaut FRB en coïncidence avec X

CHIME de-dispersé



SGR1935

Ejection d'une partie de la magnétosphère très magnétisée?

Vitesse relativiste

→ plasmioïde

Emission dans toutes les directions au hasard?

→ Beaming

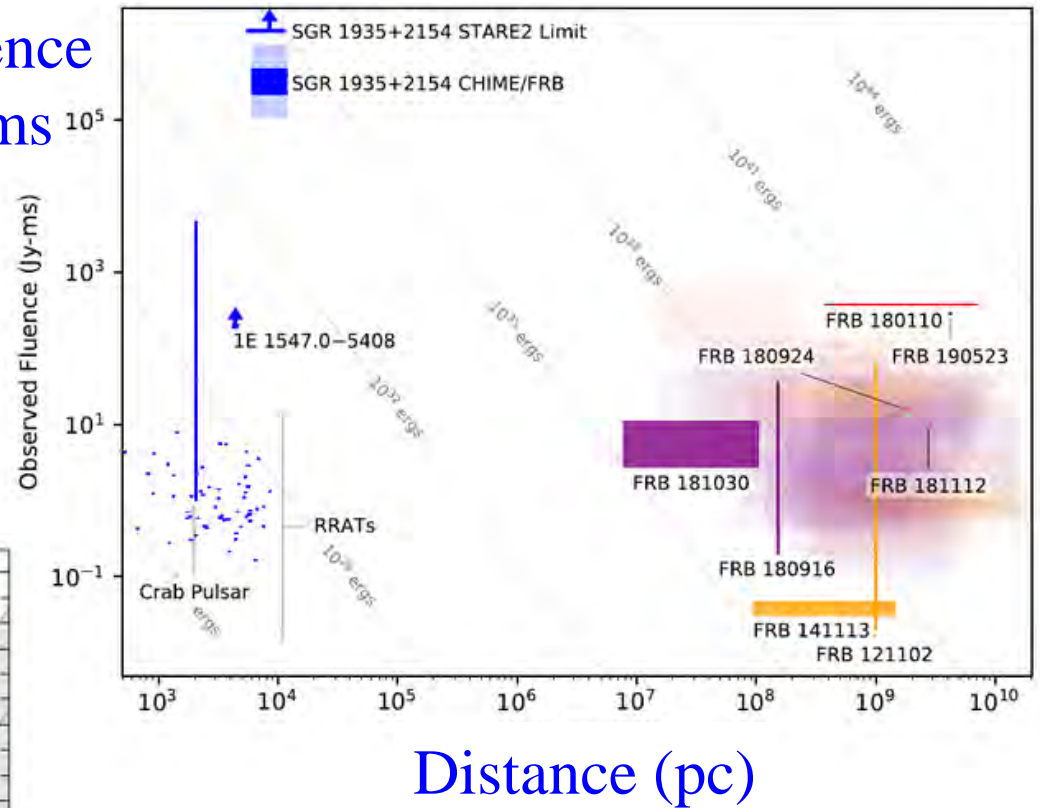
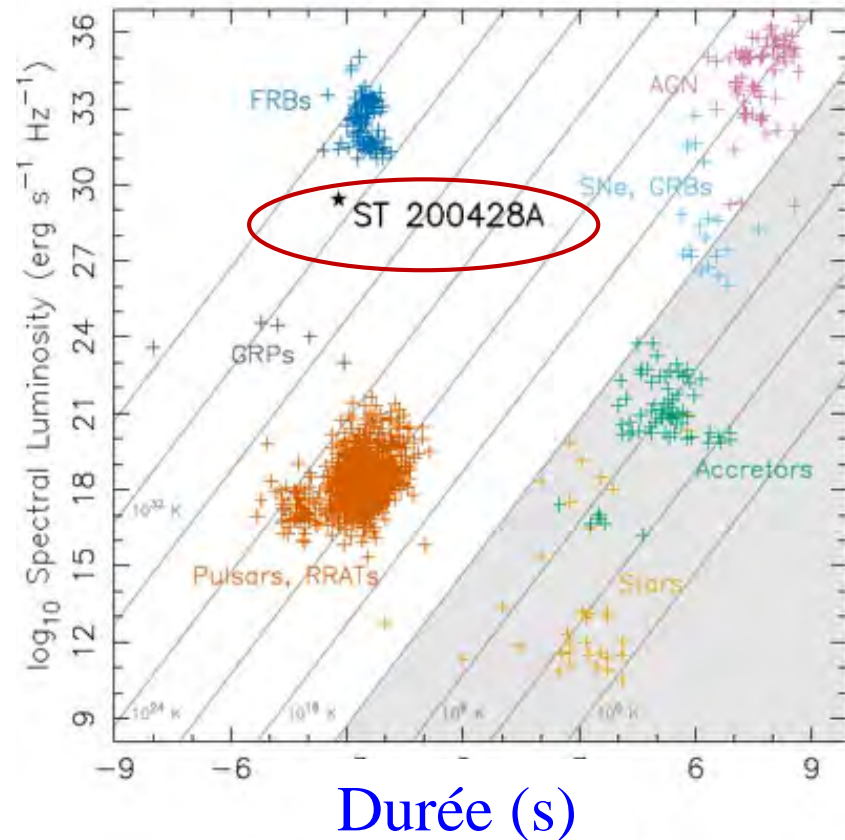
→ Événement rare dans la Galaxie ($L \times 4 \cdot 10^3$)

Bochenek et al 2020

SGR1935: un FRB un peu faible

Fluence
Jy ms

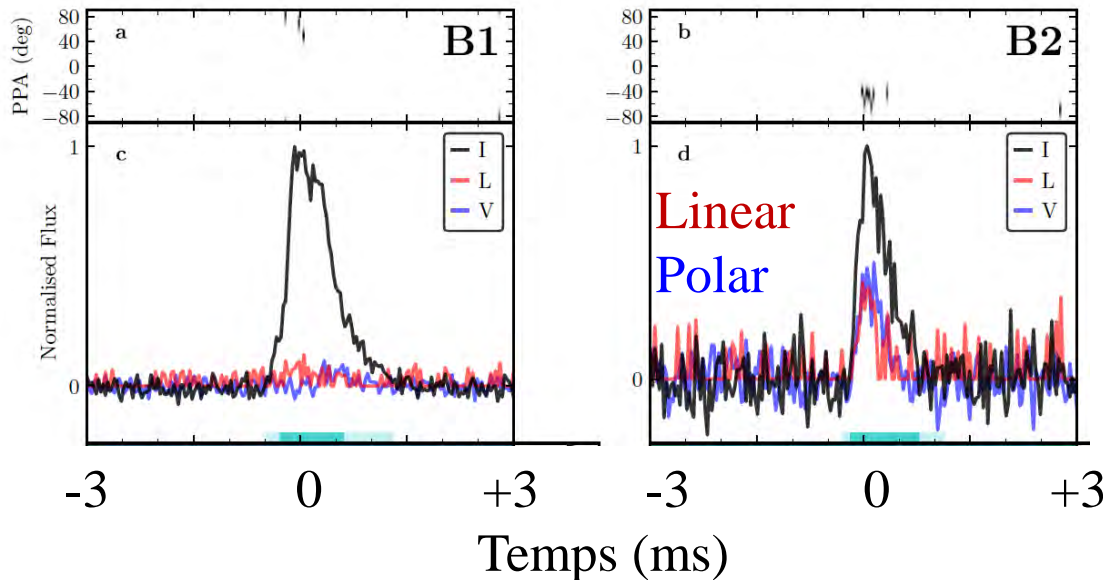
Luminosité



Campagne d'observations
simultanées avec HESS (γ)
Swift-BAT (VHE), X-rays, etc.

Grande dynamique des bursts

SGR1935: Alors que des sursauts de 15 MJy ms ont été observés, il en existe avec ~ 10 Jy ms

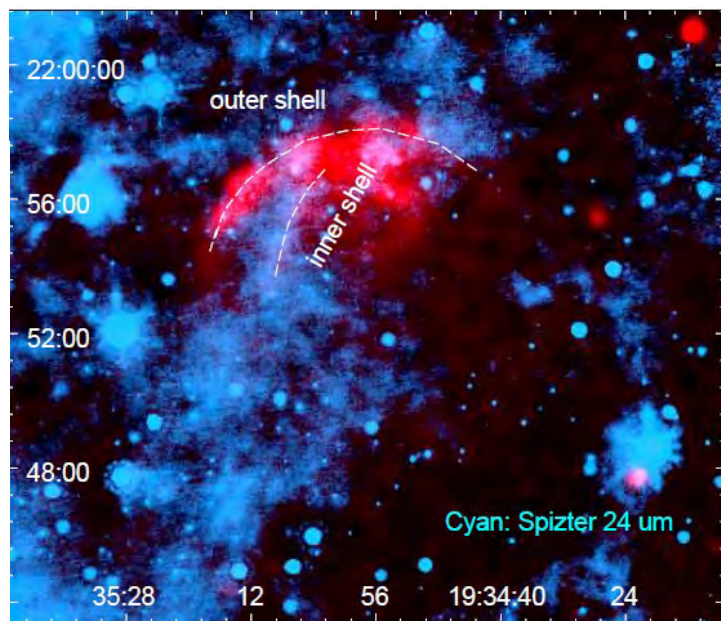
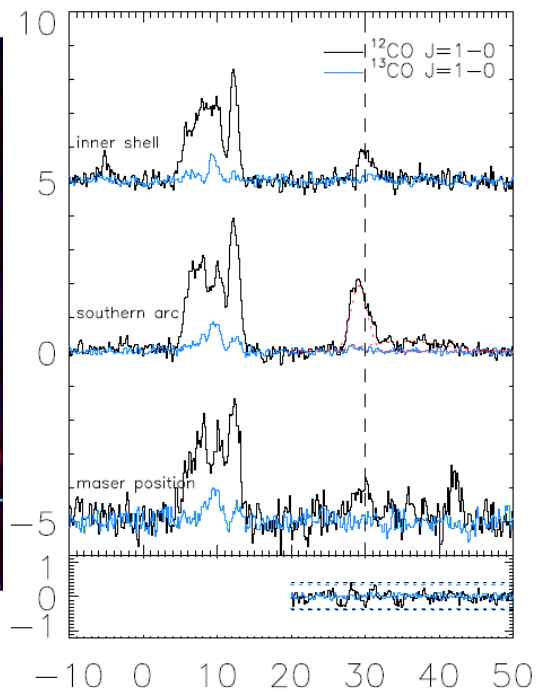
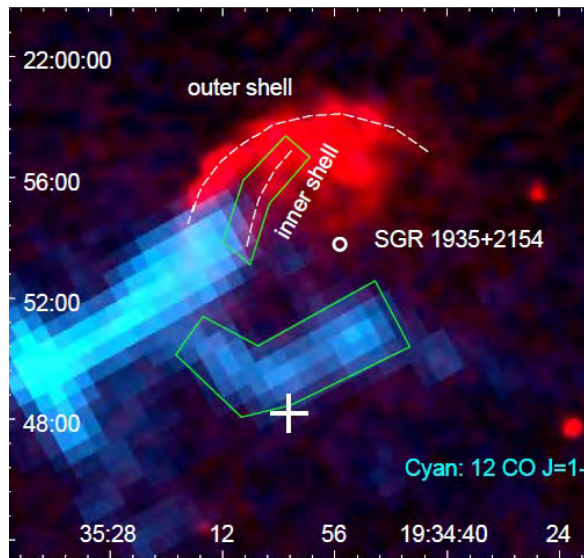


520h observation 1.4GHz
Onsala, Westerbork,
Torun-Pologne (VLBI)

B1 et B2 à 1.4s
d'intervalle
DM=333 pc /cm³

Les bursts peuvent s'étaler sur **7 ordres de grandeur de magnitude!** → mécanismes différents?

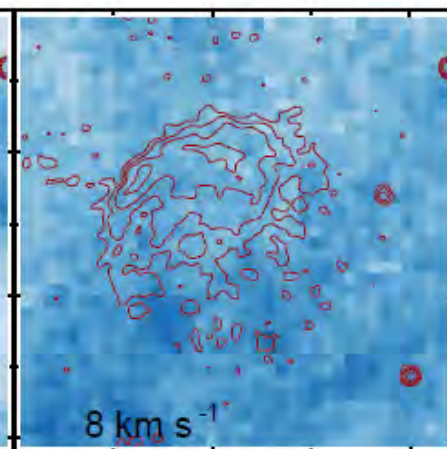
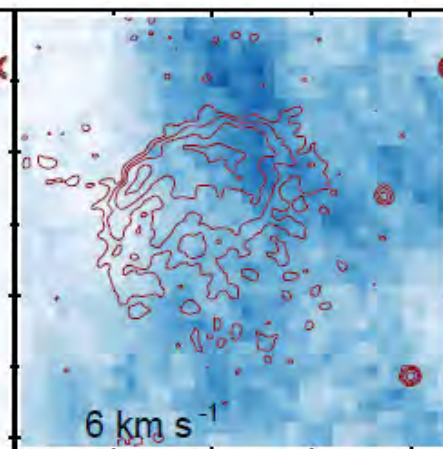
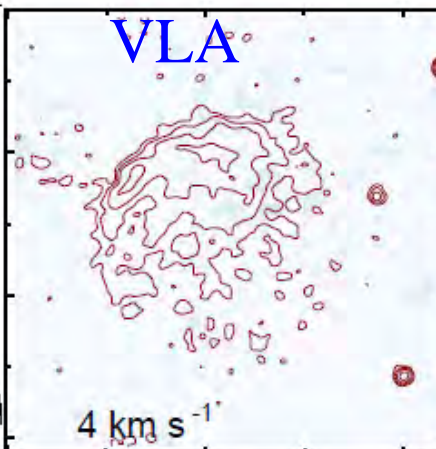
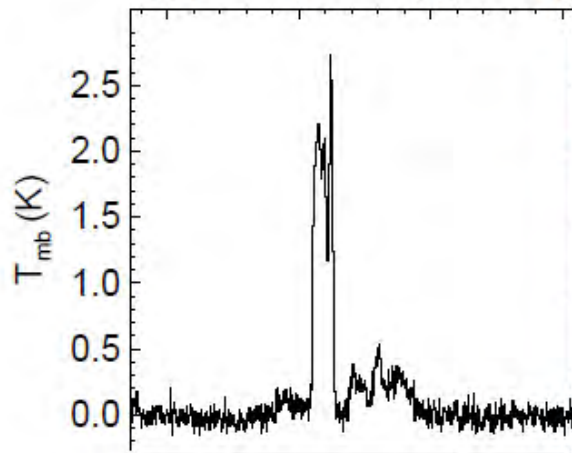
Nuage moléculaire: SGR1935



Maser OH à $V=30\text{km/s}$
Choc avec ISM

Zhou et al 2020

$V_{\text{LSR}} (\text{km s}^{-1})$



CHIME

The Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment

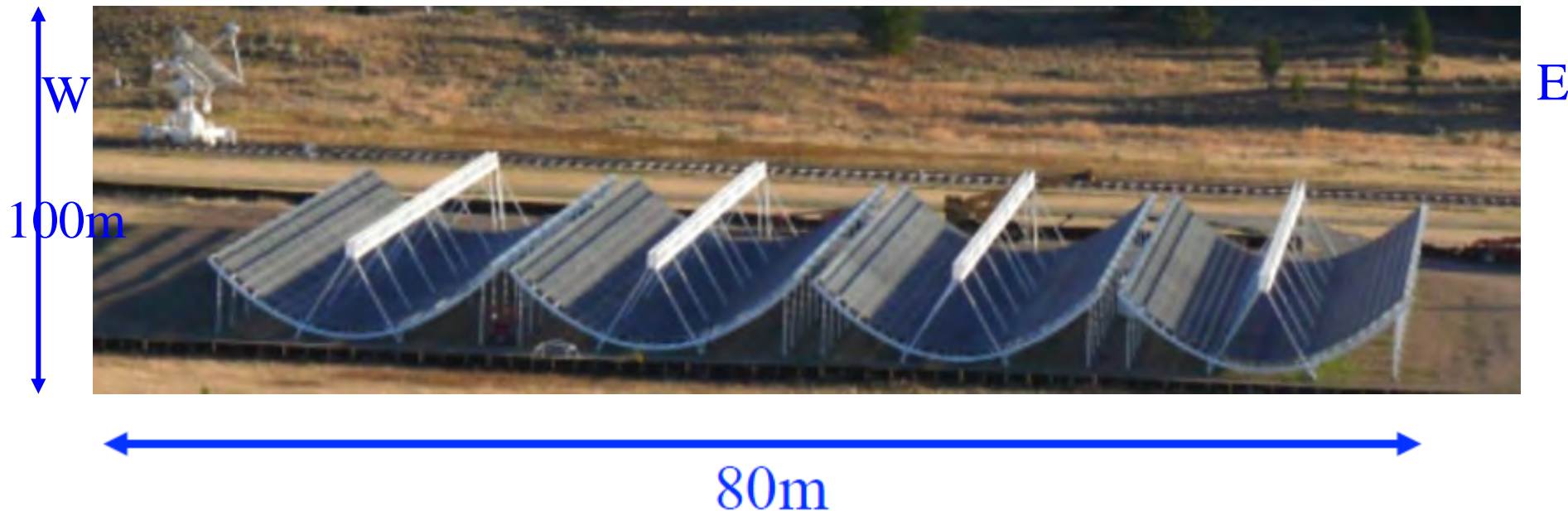
But essentiel: la cosmologie, observer HI-21cm (IM pour BAO)

Décalé vers le rouge à longueur d'onde 35-80cm, $z=0.8-2.5$

400-800 MHz

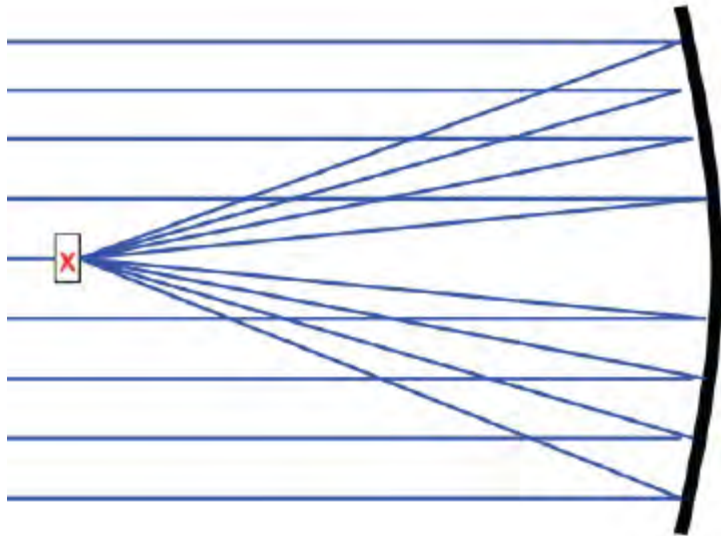
Près de Vancouver (avec DRAO)

4 cylindres fixes, $4 \times 256 = 1024$ récepteurs, Surface $\sim (80\text{m})^2$

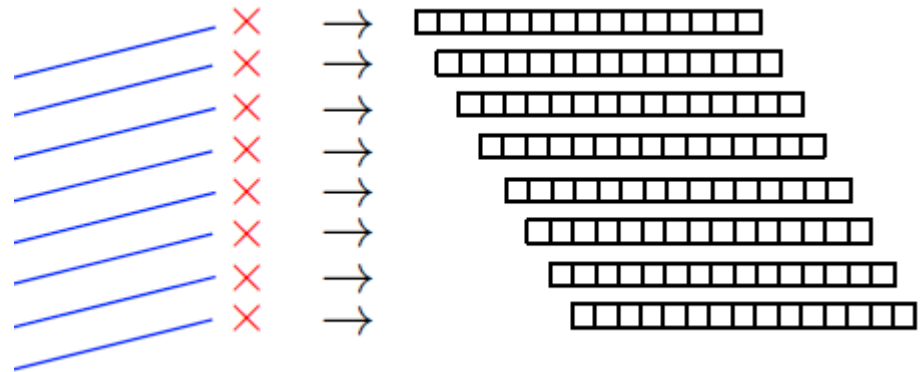


Concept de CHIME

Nouvelle génération de radio-telescopes, comme LOFAR, SKA
Avec des délais électroniques, on peut reformer les 1024 lobes



1 seul telescope/récepteur
Délais physiques

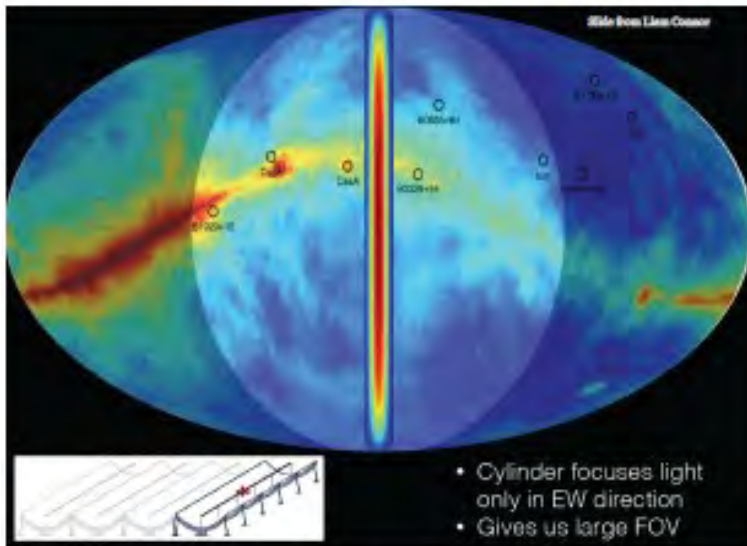


1024 récepteurs, signal digitalisé
Sommés avec les délais adéquats

➔ Reforme le lobe pour pointer dans une direction du ciel donnée
Equivalent à N télescopes pointant dans N directions

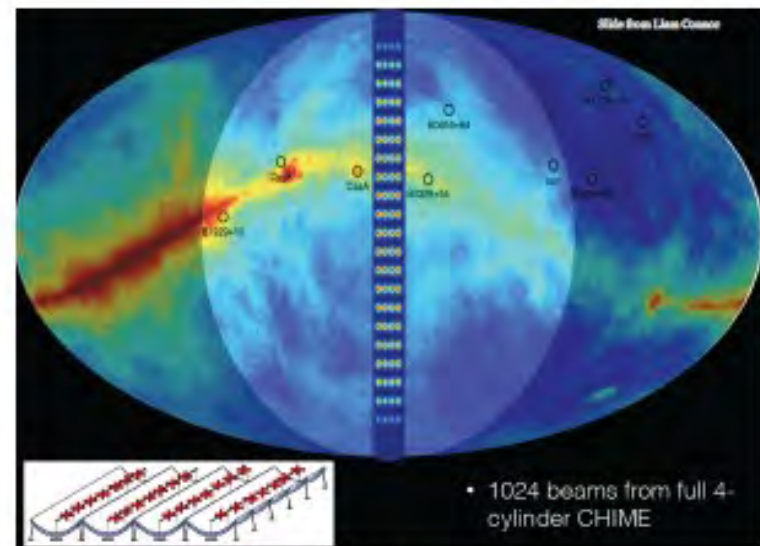
Les lobes de CHIME

Lobe primaire: une antenne cylindrique → grand champ de vue +
Interférométrie et formation de 1024 lobes de ~ 0.3 degrés



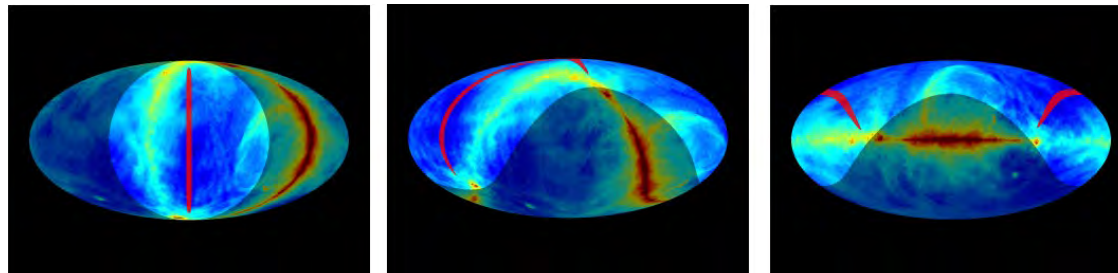
primary beam

Focalise en EW



formed beams

256 réseaux en NS



La rotation de la Terre permet de balayer tout le ciel

Extrêmement compétitif pour les FRB

La vitesse de cartographie $M \sim AN$ est immense, grâce aux 1024 lobes

	A	N_{beams}	$M/(10^5 \text{ m}^2)$
Parkes 64m	3200 m ²	13	0.41
Green Bank 100m	7850 m ²	7	0.55
Arecibo 300m	70000 m ²	7	4.9
FAST 500m	200000 m ²	19	38
CHIME	6400 m ²	1024	66

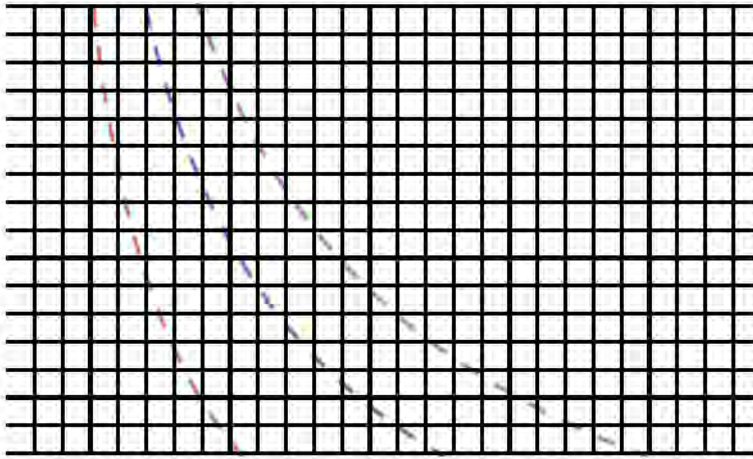
La quantité de data est énorme 800 GB/s = 70 PB/jour (5000x Rubin)

Peut se réduire pour des buts précis, cosmo, pulsars, FRB

Avec $dt=1\text{ms}$, FRB demande 1.5PB/jour

Filtre RFI en temps réel + super-software, sur un cluster 128 nodes
pour chercher dans 1.5PB/jour, sachant $t_{\text{arr}} = DM v^{-2}$

Fréquence

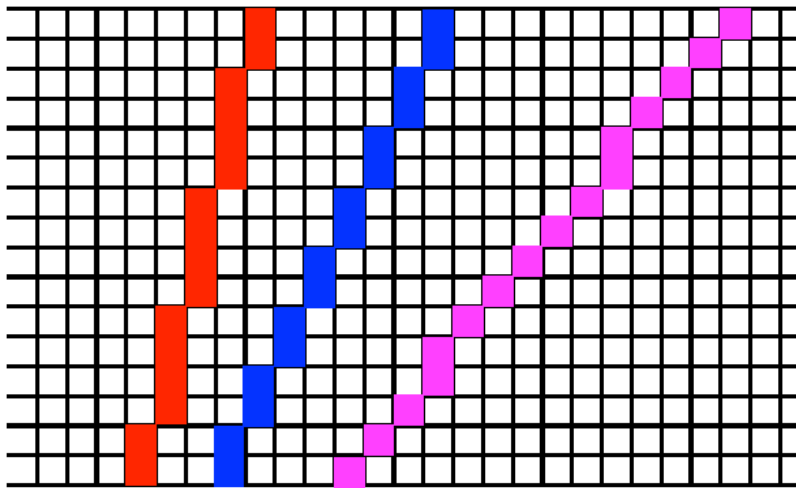


Temps

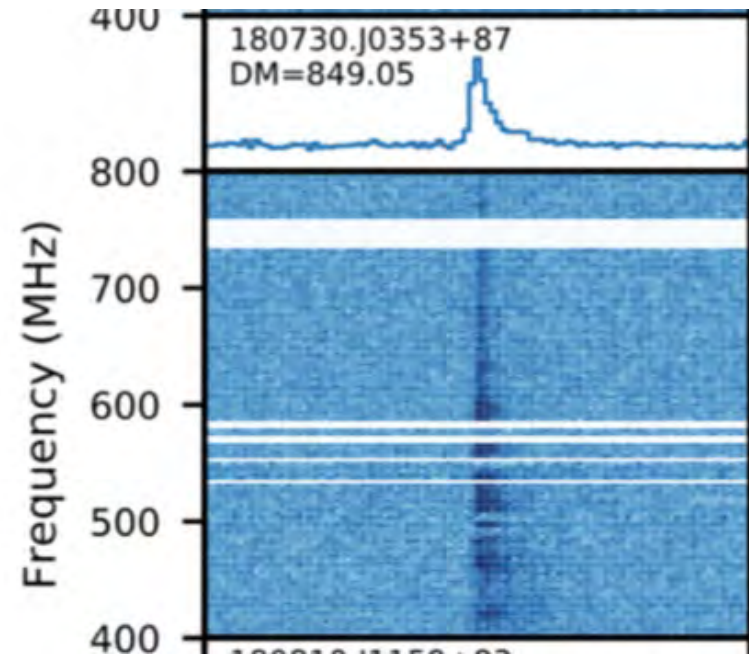
Après dé-dispersion, les FRB seront automatiquement sélectionnées dans les data

La diffusion du milieu interstellaire ou scintillation provoque la largeur $\propto \nu^{-4}$

ν^{-2}



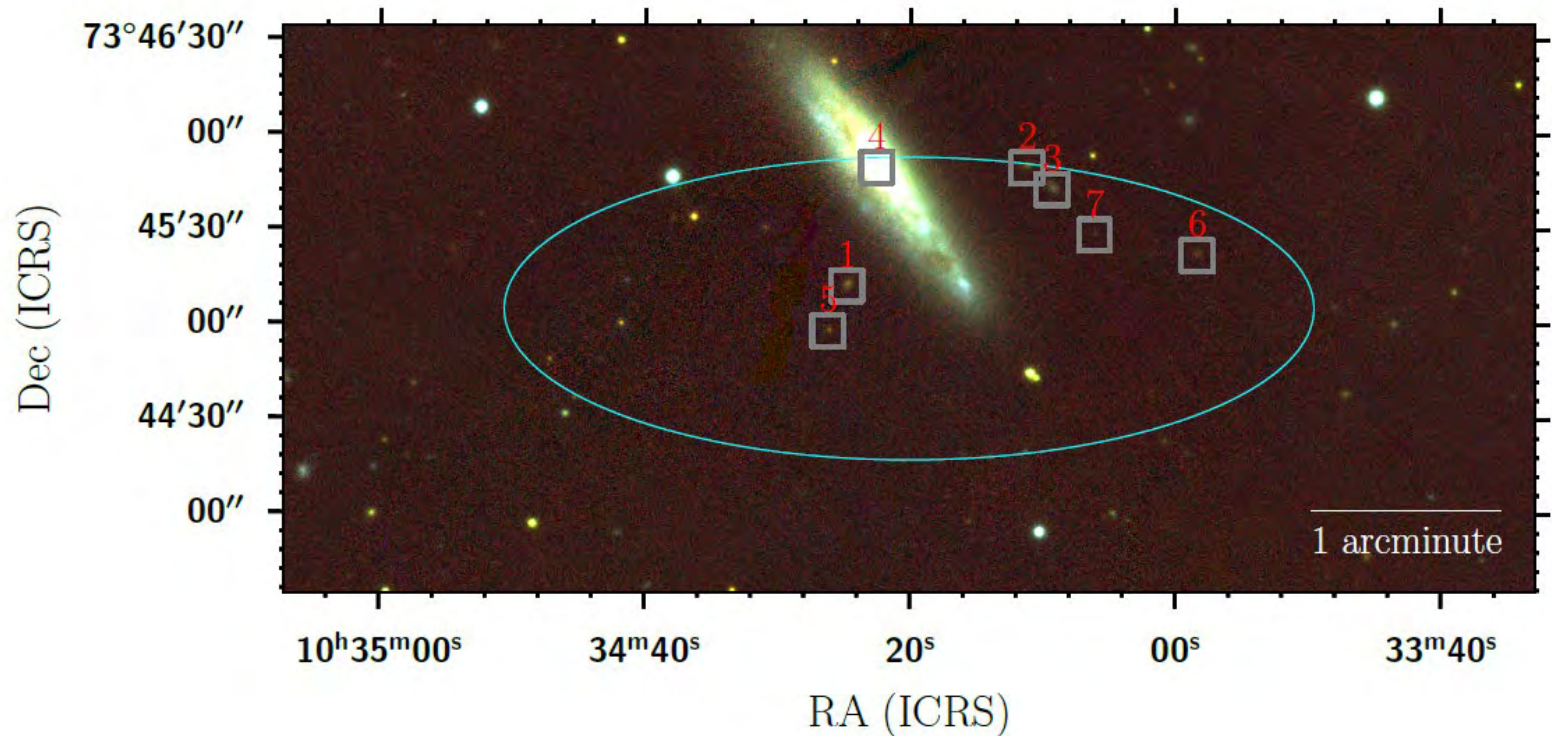
Temps



Galaxie hôte de FRB20181030A (+ 9 bursts)

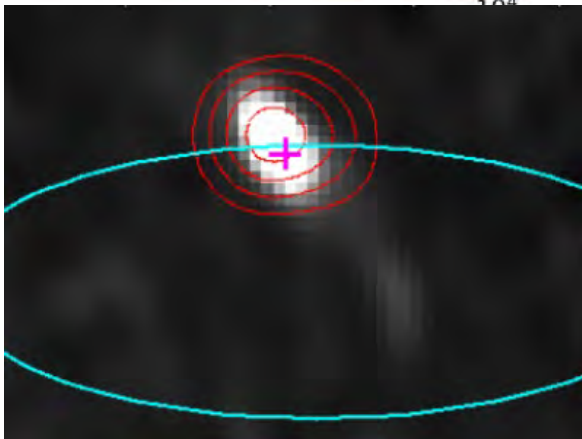
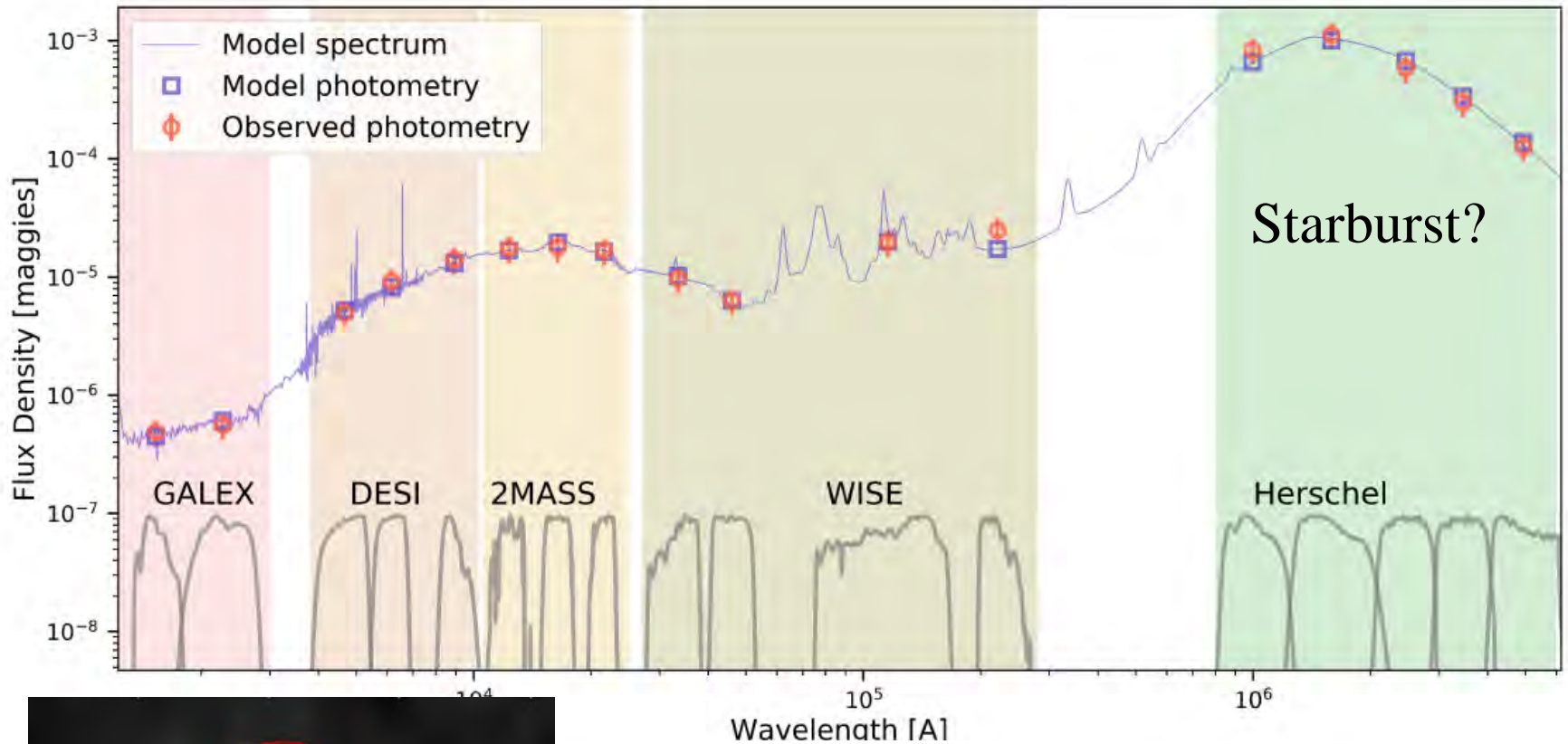
FRB 20181030A est un répéteur, dans une galaxie spirale NGC3252, $z=0.0039$, $D=20$ Mpc, un des plus proches FRB!

→ Une population de jeunes magnétars ne suffit pas à expliquer tous les FRB observés (trop rares)



7 candidats dans la boîte de localisation CHIME

Hôte de FRB20181030A



Dans N3252 radio source
permanente (VLA)

FRB HOST DATABASE

AN UP-TO-DATE COMPILATION OF ALL KNOWN FRB HOST GALAXIES



19 galaxies-hôte
identifiées

Moins que le nombre
des 24 répéteurs

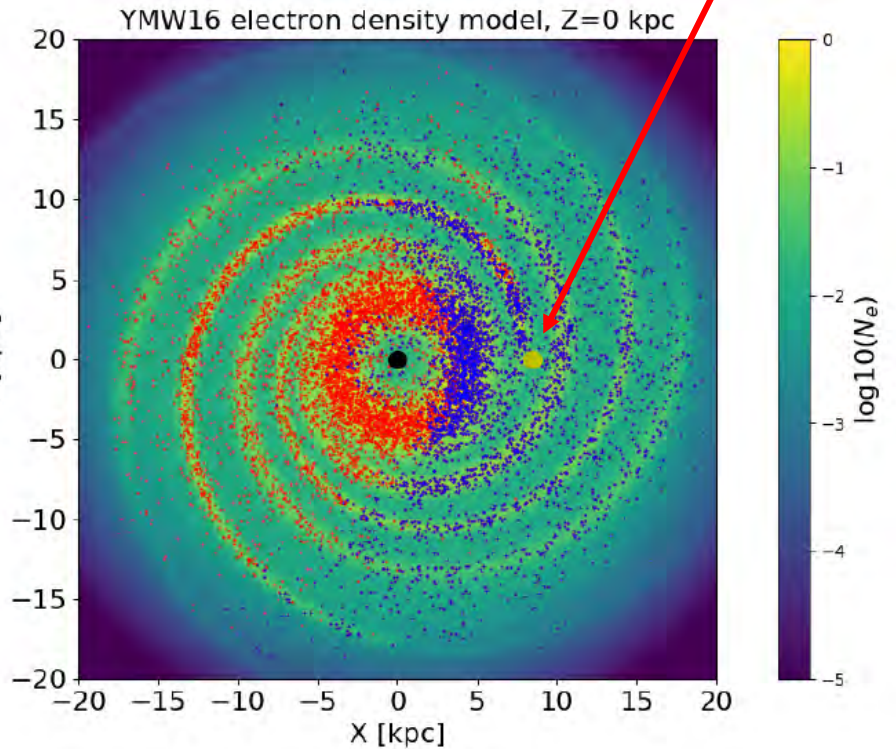
Mais 7 seulement
sont des répéteurs!

$DM=300-500 \text{ pc/cm}^3$

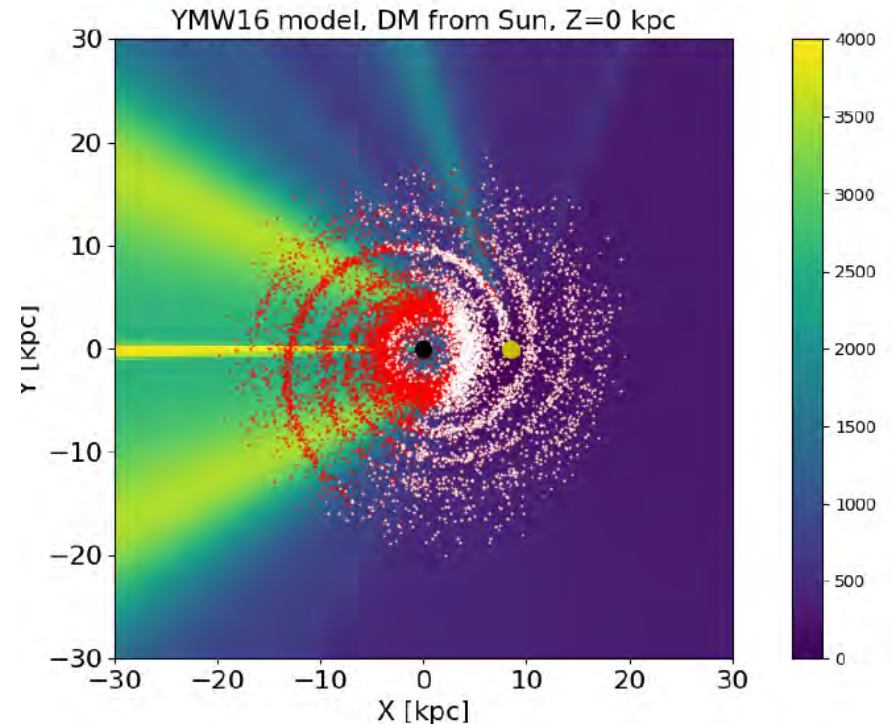
→ 17 répéteurs
non-identifiés

Pourquoi si peu dans la Voie lactée

FRB detectables

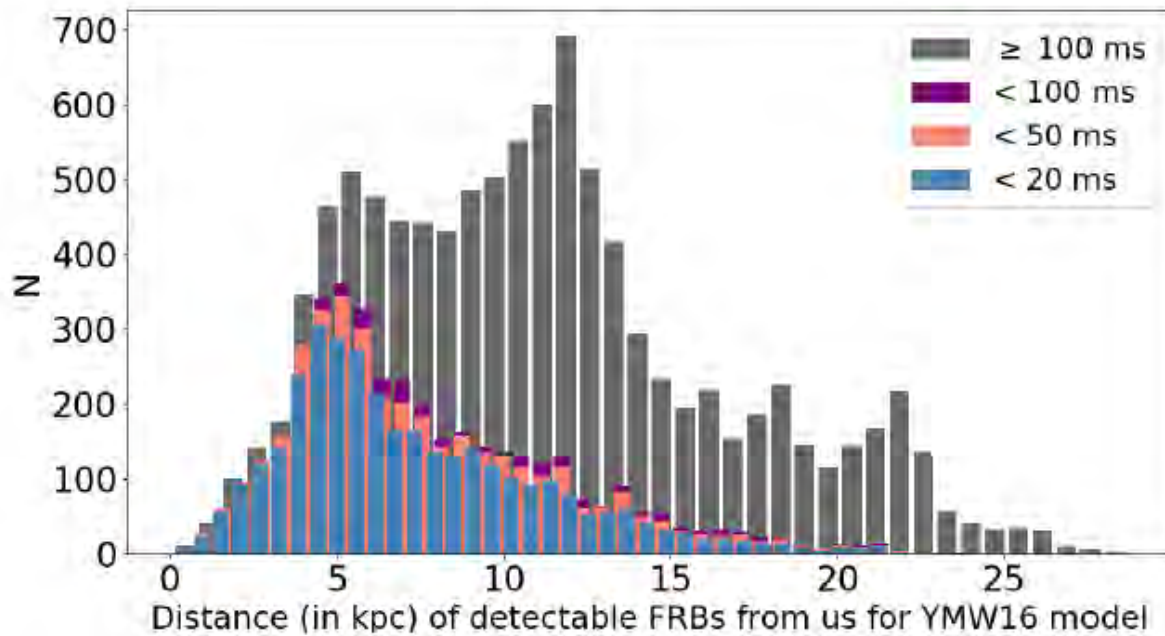


DM des FRB detectables



Les FRB sont distribués dans les bras spiraux, dans le plan
Ils subissent la turbulence du milieu interstellaire, qui élargit la durée

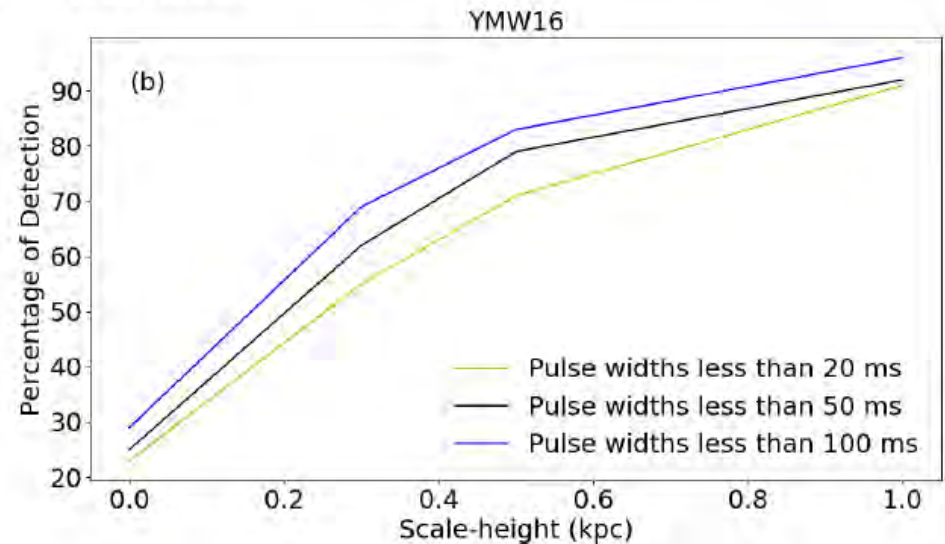
Distribution prédite dans la Galaxie



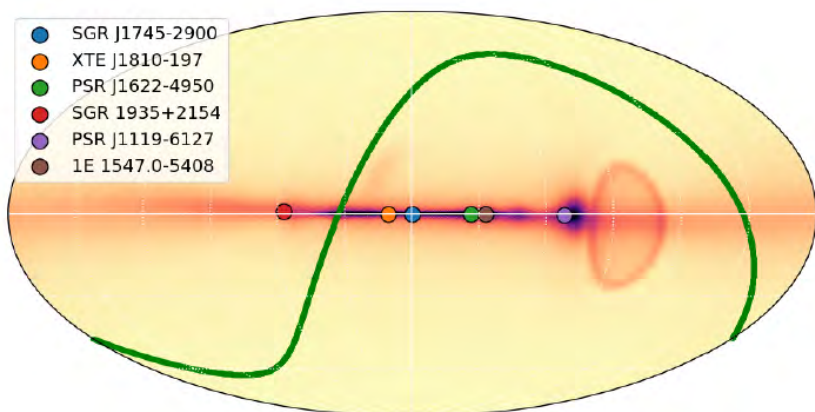
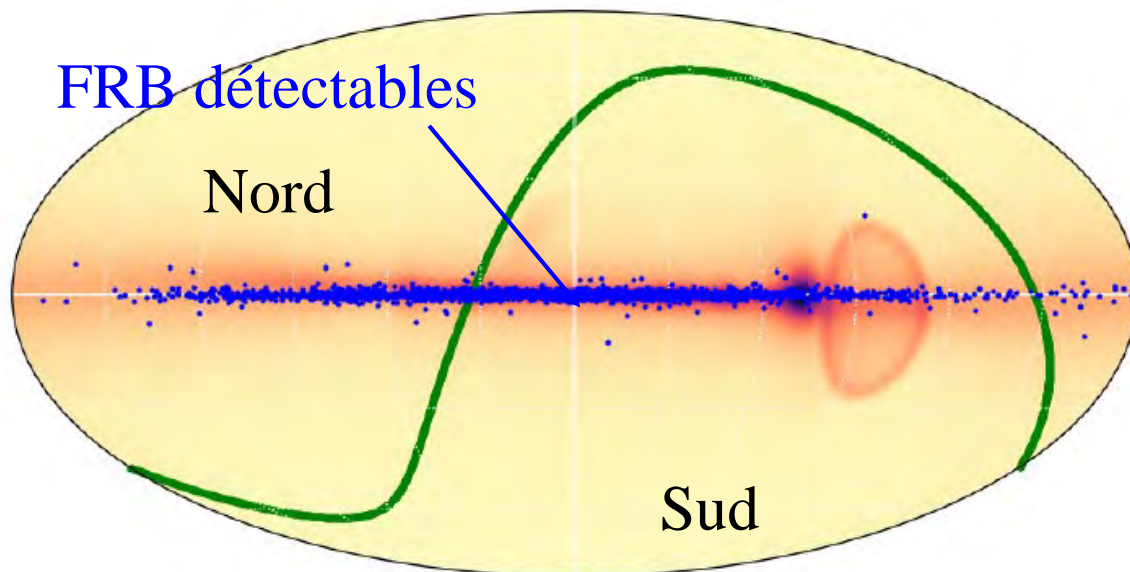
Les FRB étalés >100 ms
non observables

Entre 5-10kpc
DM= 200-1000

Si le plan de gaz interstellaire est plus épais, la détectabilité augmente



Pourquoi si peu dans la Voie lactée



2/3 sera dans
l'hémisphère Sud

GreX Galactic Radio
Explorer

verra tout le ciel
Plus rapide que
STARE2

Plus favorable à
haute fréquence
> 1.4GHz

Magnétars déjà observées en radio
+ Gum nebula, local bubble

Dans M81: un amas globulaire



FRB 20200120E répéteur détecté par CHIME

VLBI indique sa position à 2pc du centre GC de M81,
à $D = 3.5 \text{ Mpc}$

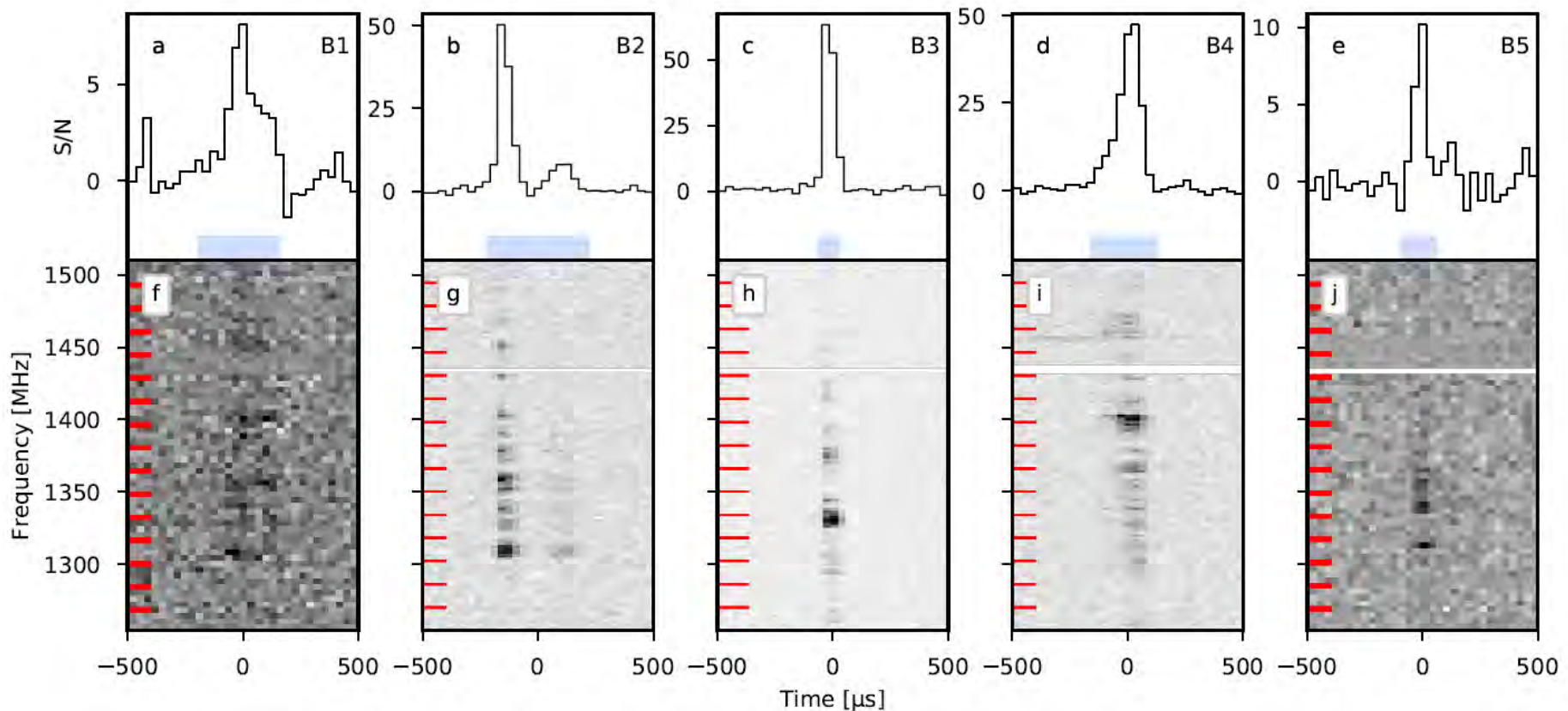
Ce ne pourrait pas être une jeune supernova, une type core-collapse comme SGR J1935+2154, mais une étoile à neutrons fortement magnétisée, soit **une SNIa** par effondrement d'une naine blanche après accrétion dans une binaire ou merger d'objets compacts dans une binaire qui se forment facilement dans les GC

Pas de source en X, γ , ou radio permanente (VLA)

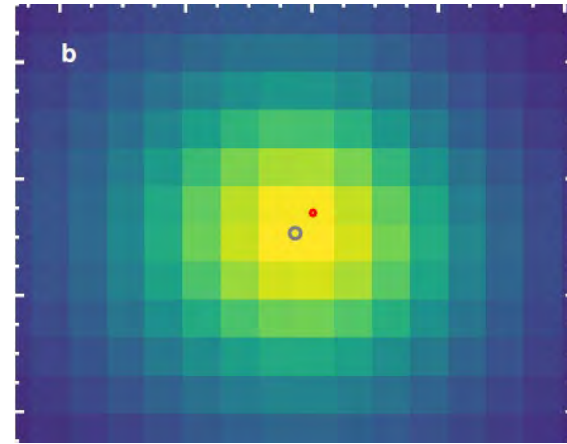
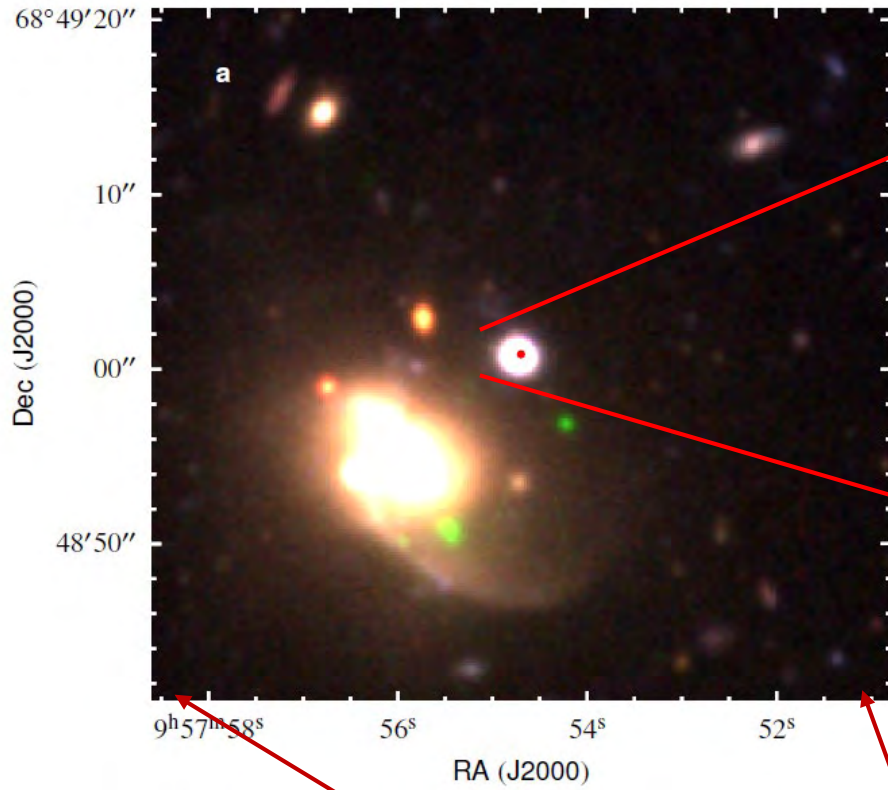


FRB dans M81

5 bursts: 2 le 20 Février 2021, 2 le 7 Mars 2021, un le 28 Avril 2021
Avec EVN: European VLBI Network



Localisation dans M81



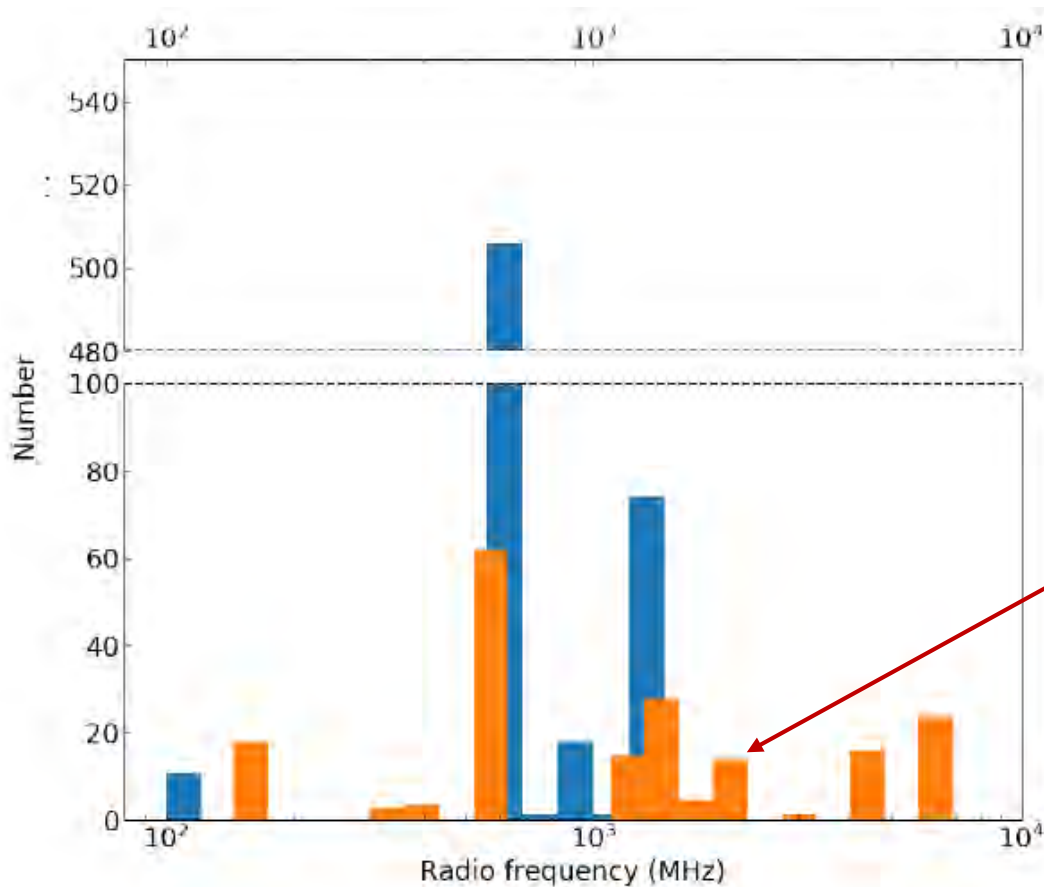
Au Sud-Est du centre de
la galaxie

FRB: Perspectives futures

Avec SKA-MID, 100 FRB/yr avec localisation précise (VLBI)

Déjà, détections par ASKAP, CHIME

→ 540 détections en 1 an (~800/jour/tout le ciel)

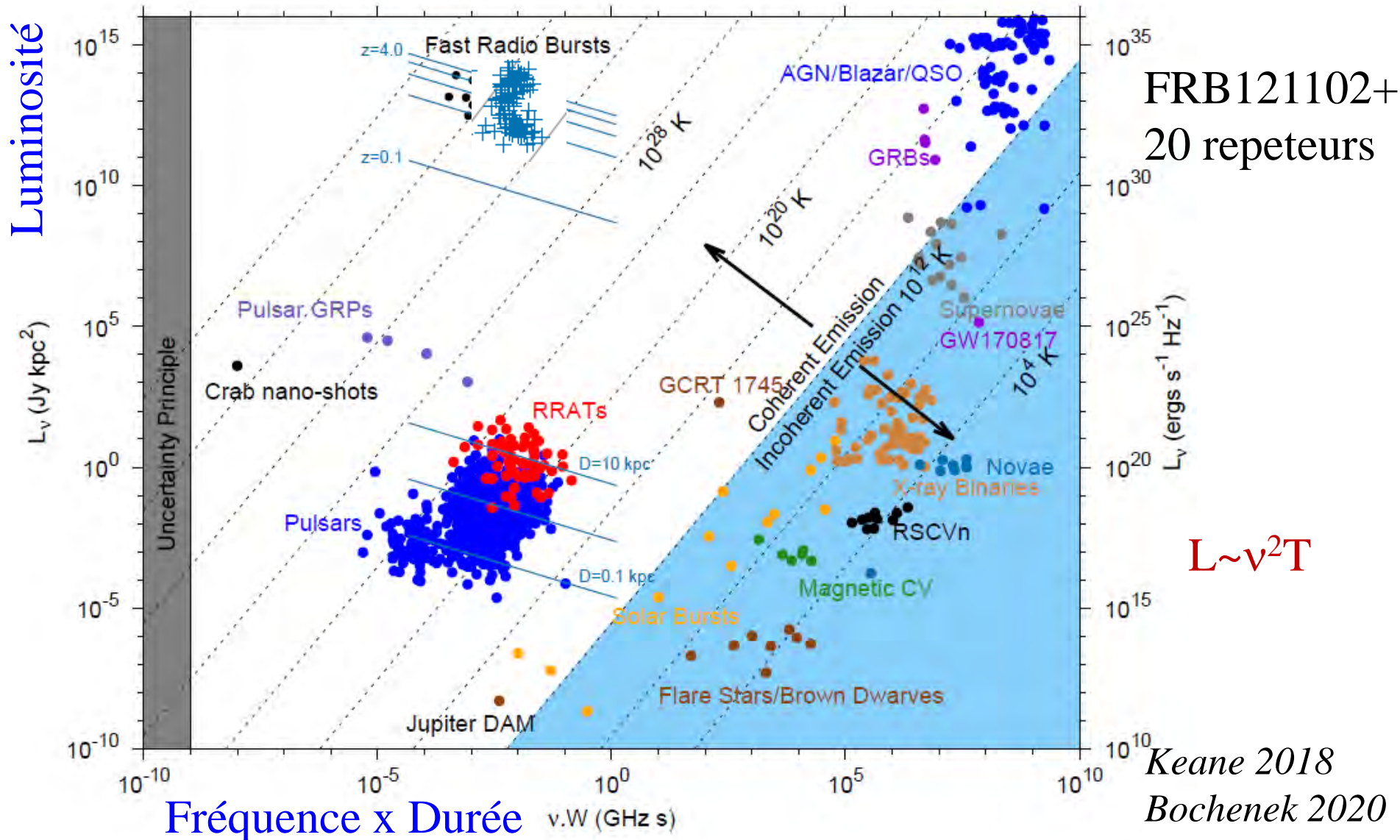


à 600MHz, CHIME
Avec 500 détections
la 1^{ère} année

Orange
répéteurs

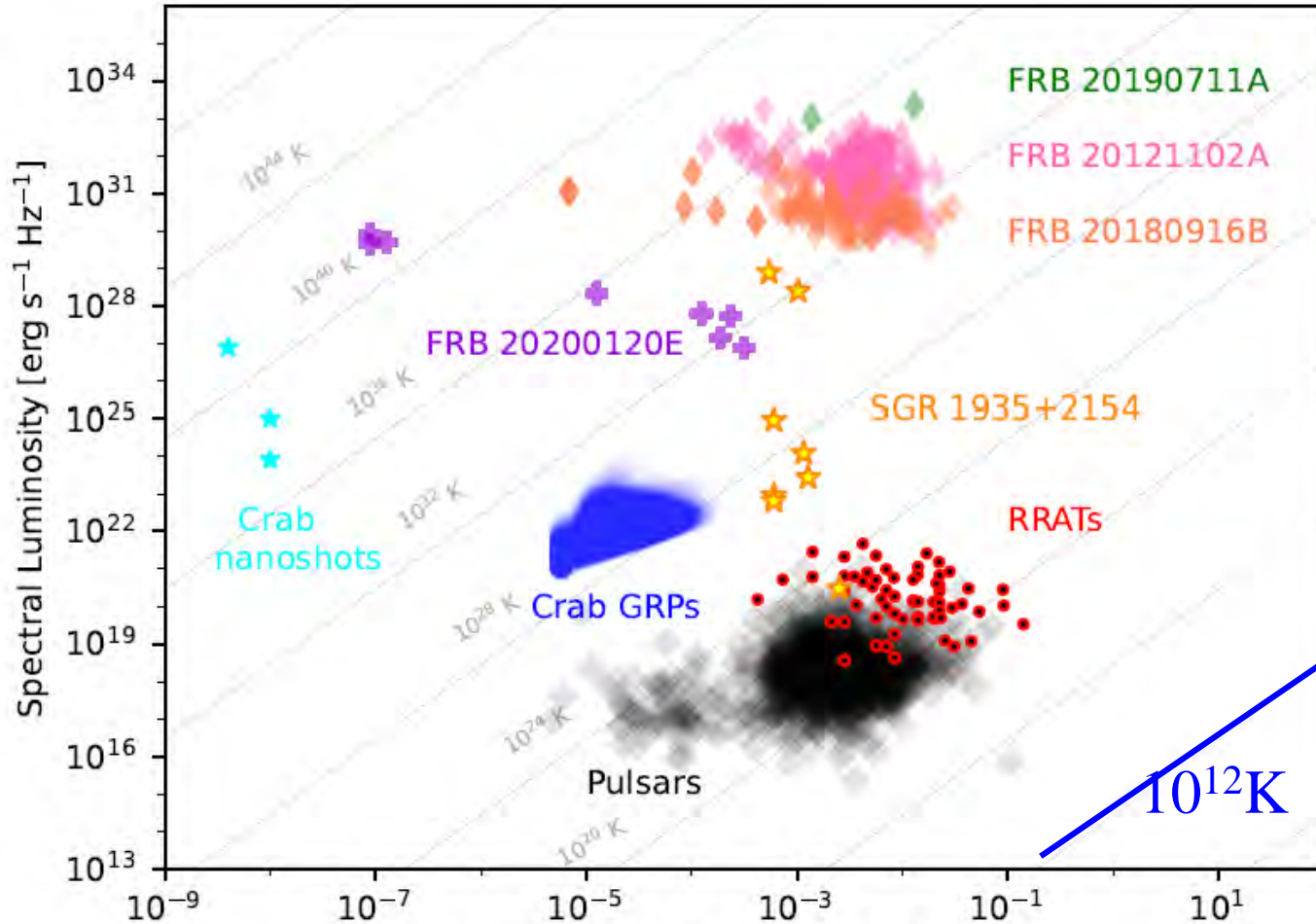
FRB dans le diagramme transients, L - $\nu\Delta t$

Seront utilisés pour tracer la nature de Univers \rightarrow tomographie



Luminosité - Durée

S'échelonne en température 10^{20}K à 10^{44}K
 FRB20200120 (M81) et SGR1935 font la transition



$$L \sim \nu^2 T$$

GRP
 Giant Radio
 Pulses

60nanosec
 10^{41}K

Fréquence x Durée Transient Duration (νW) [GHz s]

Télescopes & interféromètres

Parkes-64m



FAST-500m



GBT-100m



VLA-27x25m



CHIME- (80m)²



ASKAP-36x12m

Perspectives

**SKA éclaireurs
et précurseurs**

**LOFAR
APERTIF
CHIME
FAST**



Résumé

→ **Histoire des découvertes:
Un temps pour convaincre!**

→ Progrès exponentiel des découvertes
Surtout avec CHIME (200degrès²)
800/jour dans tout le ciel

→ Répéteurs 4%. Sans doute bien plus, après suivi des FRB uniques

→ Localisation par VLBI, prend du temps, 3% de galaxies-hôte, pas forcément les répéteurs, mais les plus proches

→ Un magnétar dans la Voie lactée: pas forcément généralisable

