



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Sursauts Radio Rapides (FRB): Théories



Françoise Combes

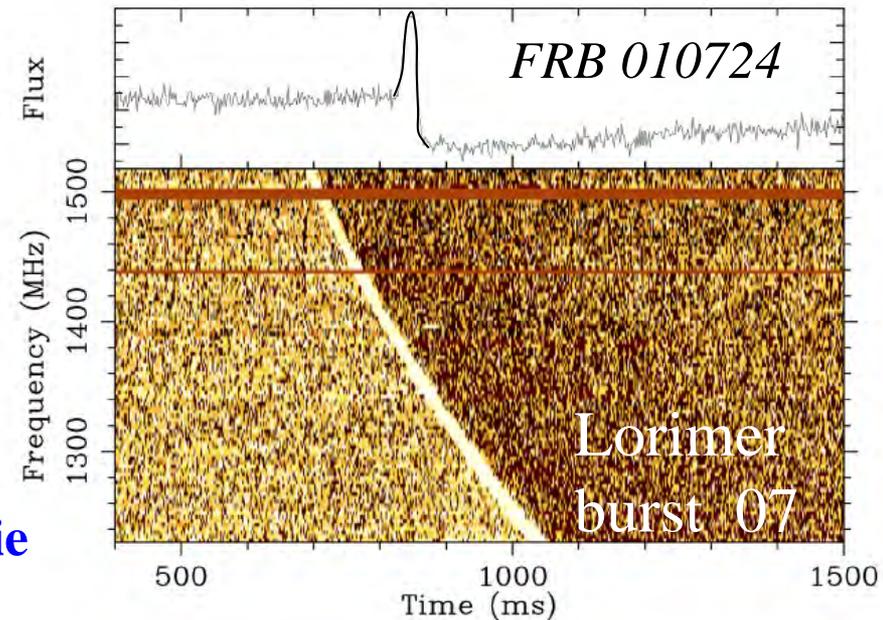
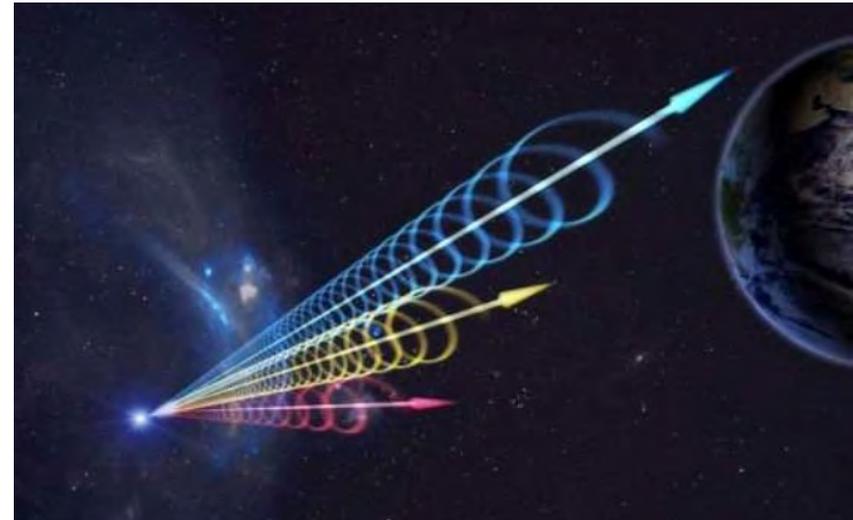


Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Contraintes dues aux observations

- Contraintes haute T_B
- Puissance: rayonnement cohérent
- Taille pour des bursts de 5ms
- Etoiles à neutrons, trous noirs
- FRB: cataclysmiques ou à répétition

~800 FRB
24 répéteurs
19 hôtes
1 dans la Galaxie



Propositions

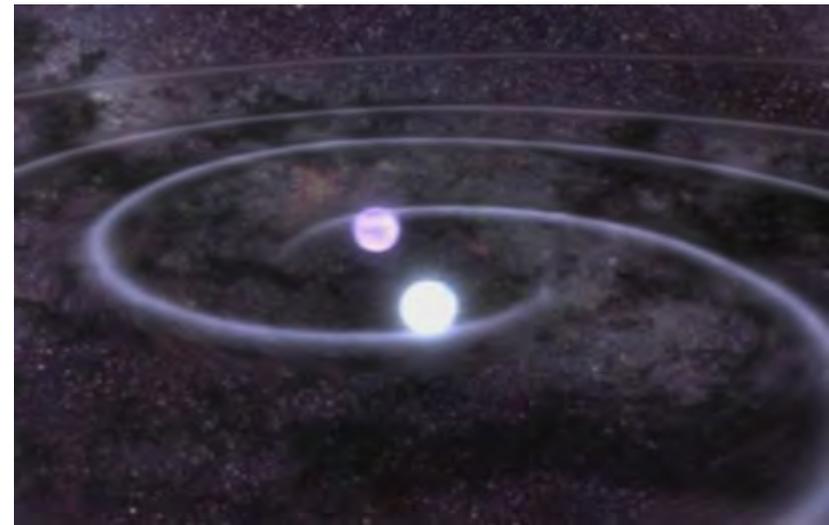
→ Signaux des Extra-terrestres, focalisés sur la Terre, possible avec des réseaux de télescopes et une modeste puissance, pour $D \sim \text{kpc}$ (Luan & Goldreich 2014)



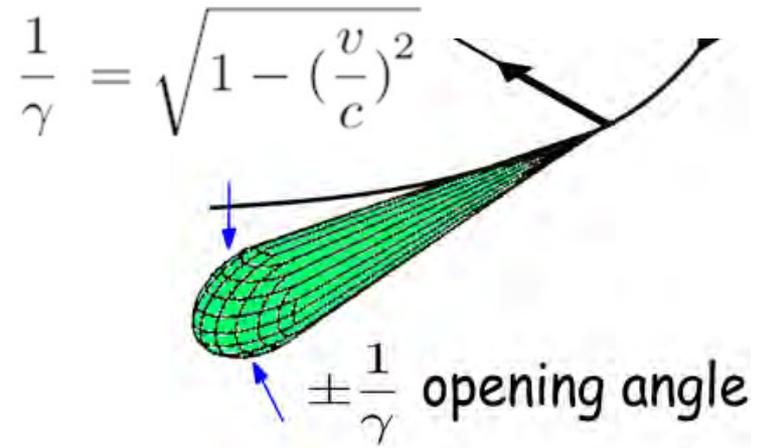
→ Etoiles à sursauts dans notre Galaxie $D \sim \text{kpc}$, mais si $DM \sim n_e L$ l'épaisseur optique $\tau \sim n_e^2 L$, et la couronne de l'étoile absorbe tout le signal (Loeb et al. 2014) (idem régions HII)

→ Extragalactiques: cataclysmiques (une seule fois) Fusion d'objets compacts (Lyutikov 2013)

→ Extragalactiques: durables Magnétars (répéteurs)



Température de brillance



Flux dans le domaine Rayleigh-Jeans

$$B \propto \nu^3 / (e^{h\nu/kT} - 1) \rightarrow S = 2 k T_B / \lambda^2 \Omega$$

Flux de l'ordre du Jy, dans un temps $dt \sim 1 \text{ ms}$

Taille de la région émettrice $R \sim c dt \gamma$ (beaming relativiste possible)

$$\Omega \sim R^2 / D^2 \rightarrow T_B \propto S D^2 / (\nu^2 dt^2 \gamma^2) = 10^{36} \text{ K} / \gamma^2$$

Pour $D \sim 1 \text{ Gpc}$ correspondant à la DM observée à $\nu \sim 1 \text{ GHz}$

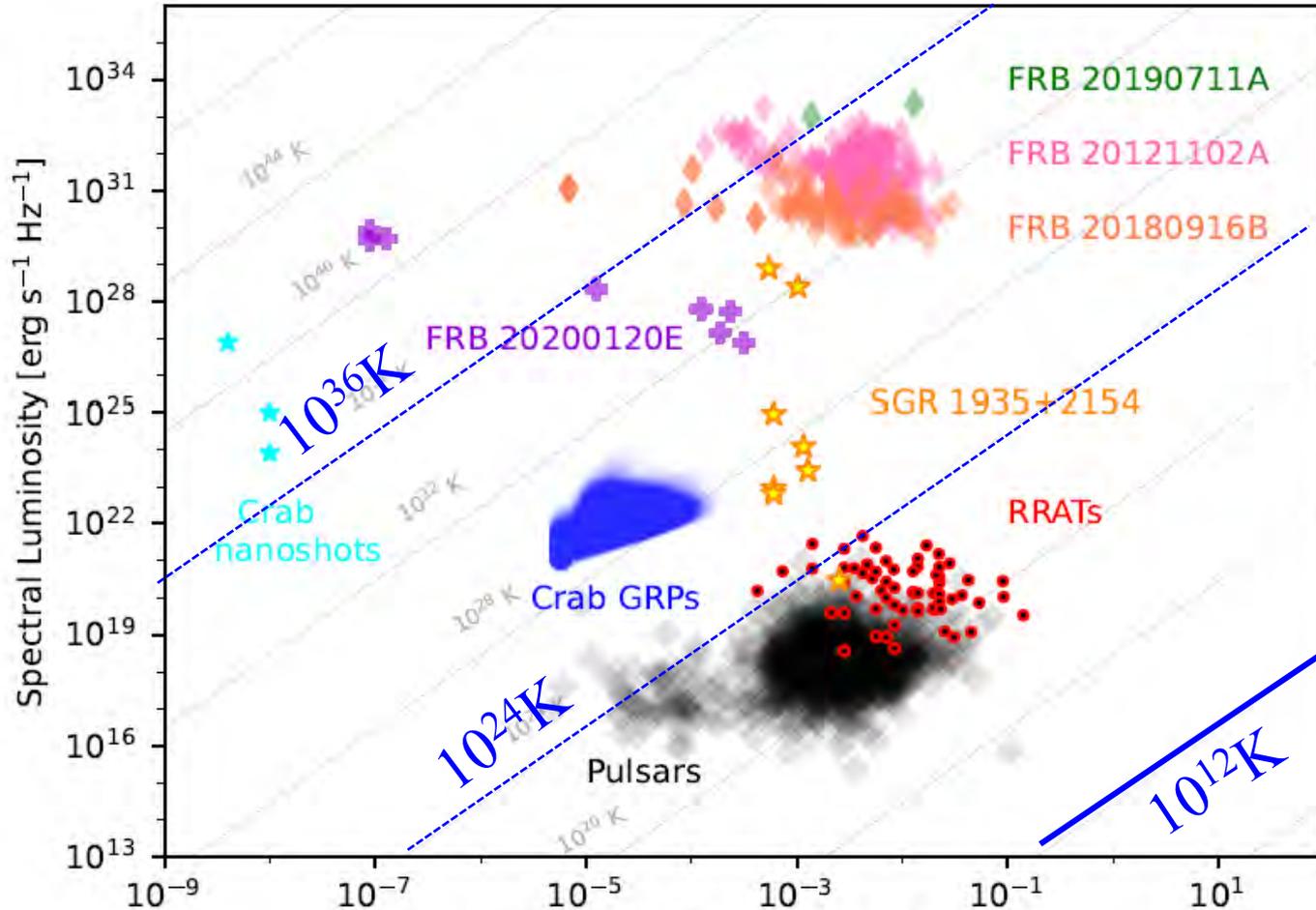
Or même une émission non-thermique comme le synchrotron ne peut dépasser $T_B \sim 10^{12} \text{ K} \rightarrow$ catastrophe Compton inverse

→ Émission cohérente



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

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

Emission cohérente

Particules en général non en phase:
champs EM s'annulent en partie
au hasard énergie rayonnée $\propto N$

Particules en phase (émission déclenchée) Energie $\propto N^2$



Particules chargées à la même vitesse, formant un **groupe/paquet**

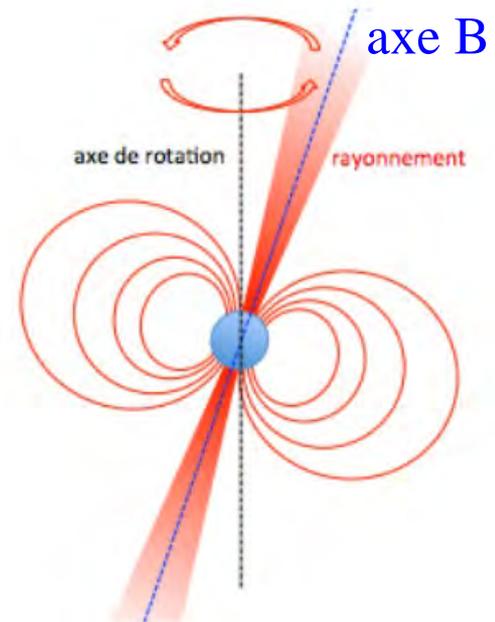
→ Courants créant un champ magnétique

Il existe $\mathbf{E} //$ au champ \mathbf{B} , qui accélère les particules
le long des lignes de champ \mathbf{B} , produisant une
émission de courbure

Région de cohérence $R_{\text{coh}} < \gamma \lambda$ (λ rayonnée)

Courbure cohérente $\delta p/p < 1/\gamma$ $B_{\text{perp}} < B/\gamma$

$B_{\text{crit}} = m_e c^3 / eh = 4 \cdot 10^{13} \text{ G} \rightarrow E_{\text{niveau Landau}} \sim m_e c^2$



Puissance cohérente

Rayonnement de courbure cohérent, dès que $B > 10^{14} \text{G}$

Longueur accélération = $\gamma m_e c^2 / qE // \sim 10^{-2} \text{ cm}$ (10^{-11} s pour $v=c$)

Rayon de gyration $\propto 1/B \ll R_{\text{coh}}$ La gyration maintient les e- cohérents

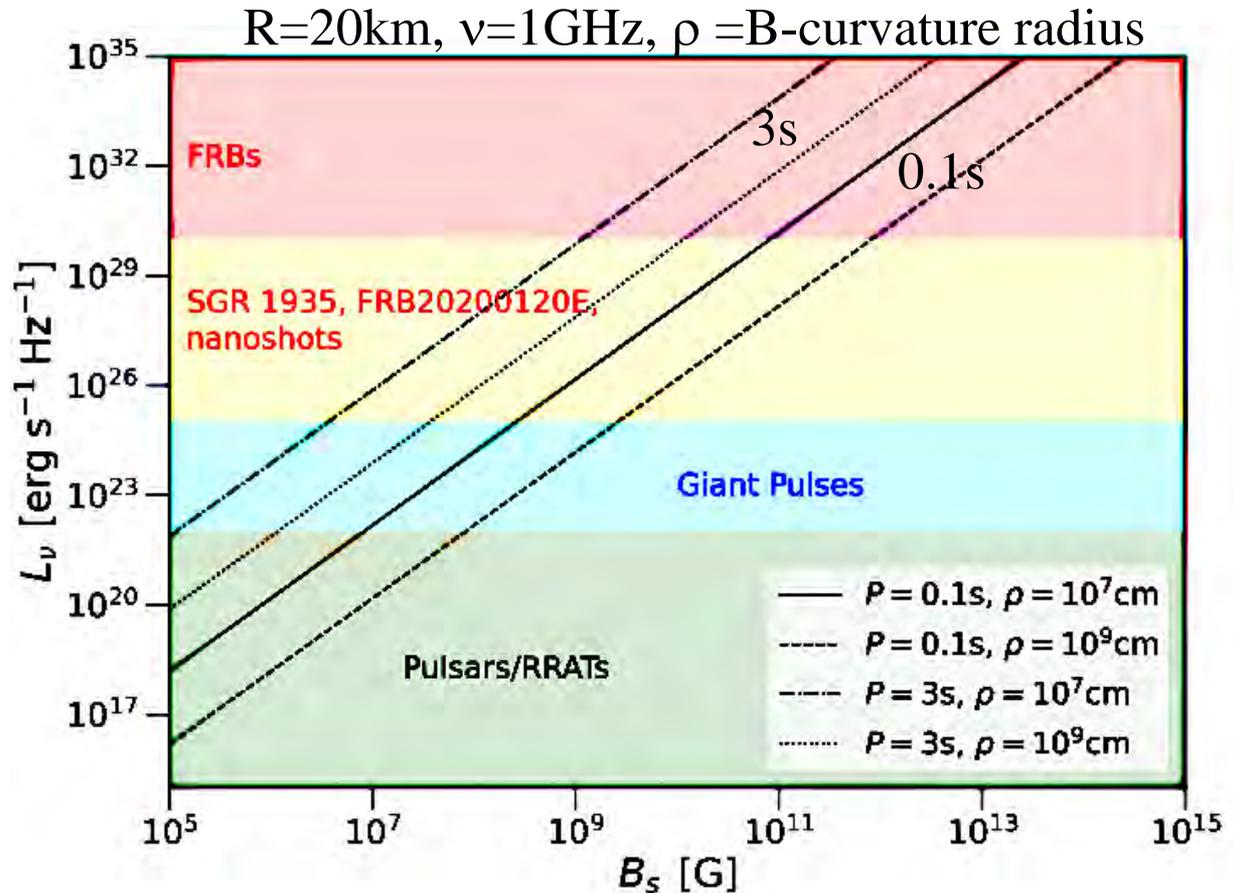
$$P_{\text{courb}} = 2(Ne)^2 c \gamma^4 / 3 \rho^2$$

Domine en radio

Près de la surface

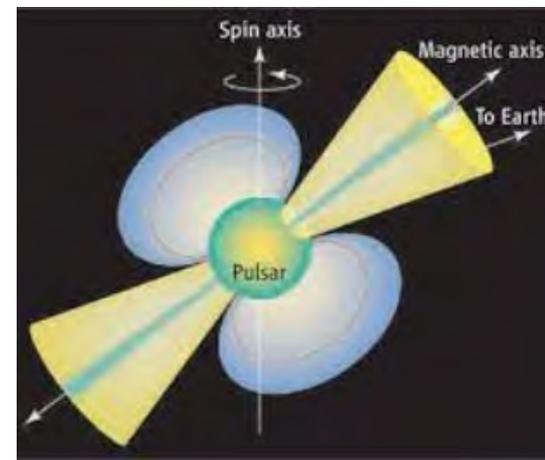
$$P_{\text{sync}} \propto N B^2 \gamma^2$$

Sub-dominant



Propositions extragalactiques

- Effondrement d'une étoile à neutrons (blitzar)
 - Fusion de deux étoiles à neutrons
 - Fusion de deux naines blanches
 - Supernovae
 - Evaporation d'un trou noir
-
- Sursauts de Magnétar
 - Giant pulses d'étoiles à neutrons
 - Collision de cordes cosmiques



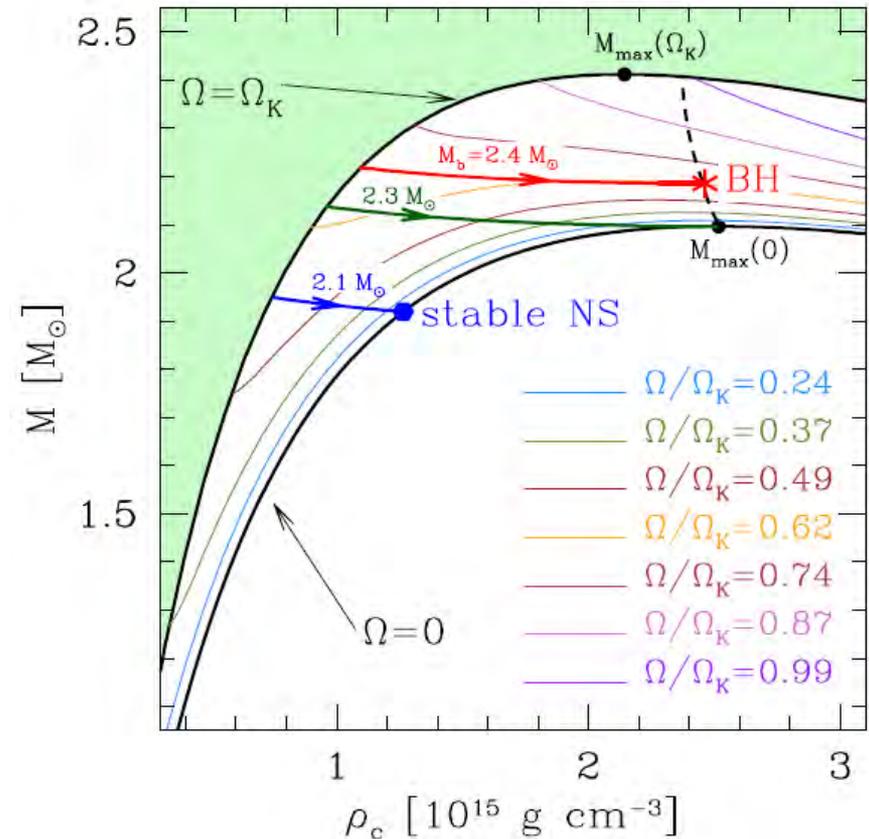
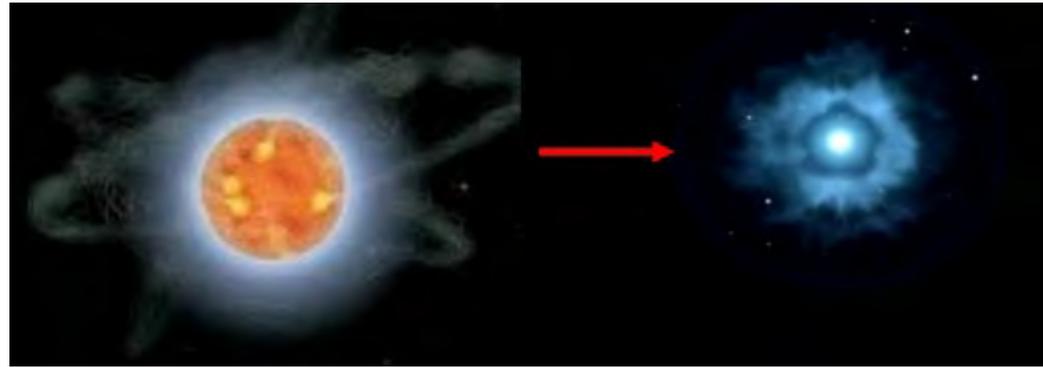
Un blitzar

Une étoile à neutrons,
tournant très vite, très
magnétisée

à la limite de la masse critique pour un trou noir

Le rayonnement dû au champ B
ralentit la rotation
Et l'étoile s'effondre en un trou noir

Seules 3% des SN devenues NS
La fréquence correspond en gros
à celle des FRB..
Ou bien les « veuves noires »?

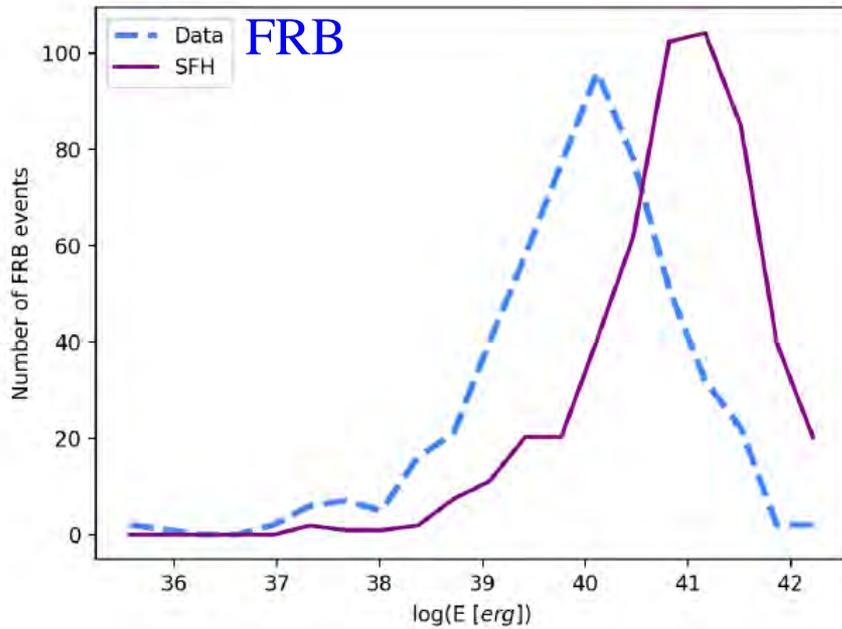


FRB ne suivent pas la formation d'étoiles

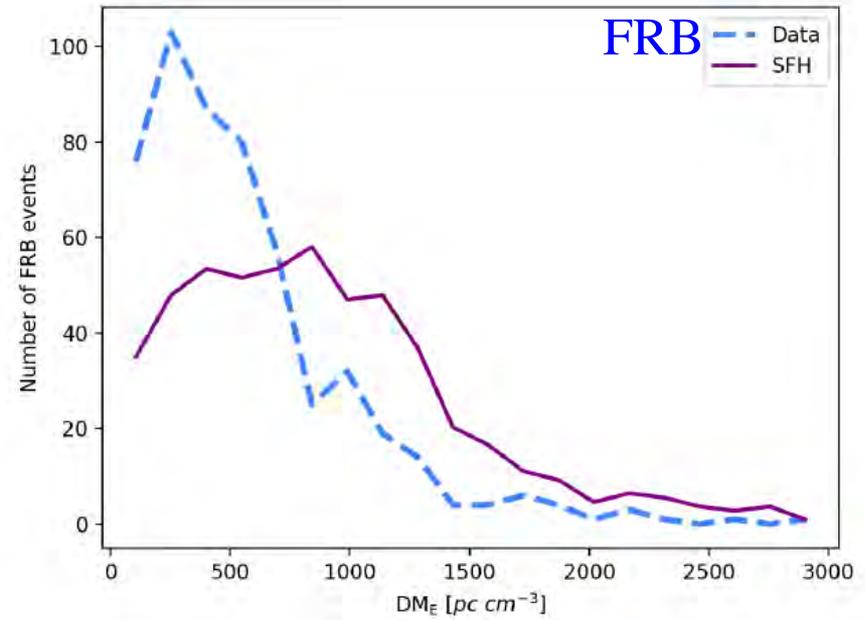
SGR 1935+2154 dans notre Galaxie est une jeune supernova

Mais dans M81, le FRB est dans un GC (vieille population)

Statistiquement, en fonction de z , FRB ne suit pas l'histoire de SF



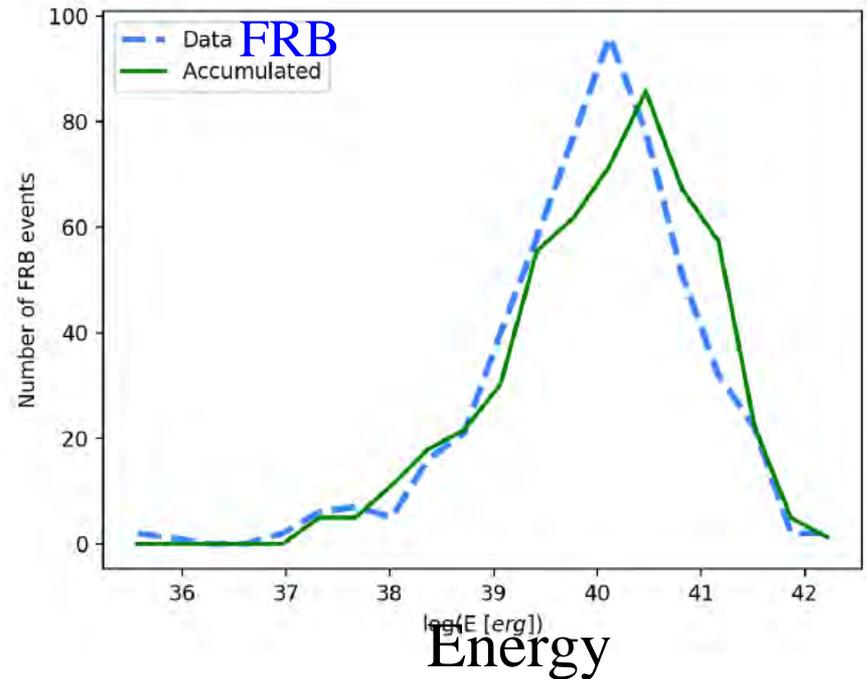
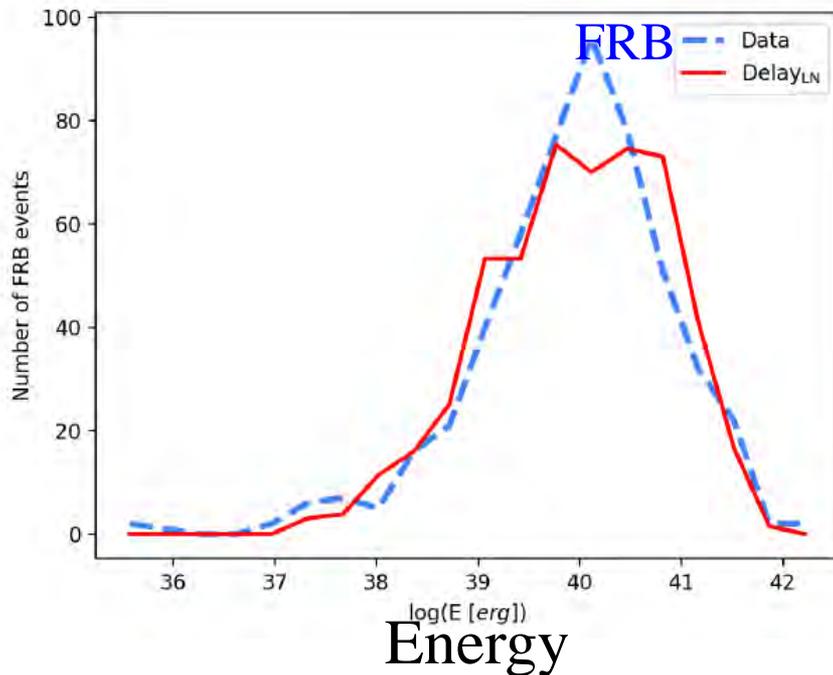
Energy



Dispersion Measure

FRB: SFR avec délai, ou toutes les étoiles

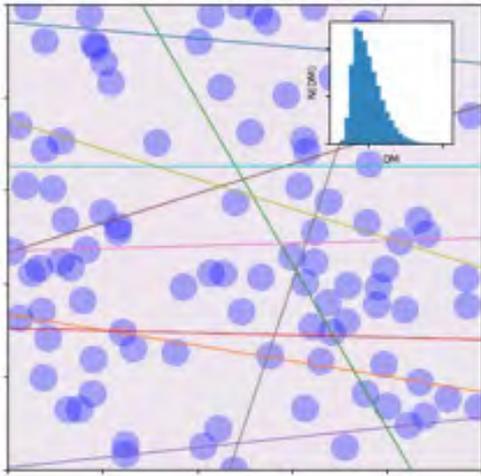
Histoire cosmique de SFR avec délai de 10 Gyr,
Ou alors suivent l'accumulation de toutes les populations d'étoiles
→ Origines variées, magnétars + fusions d'étoiles à neutrons?



Baryons manquants?

Inhomogénéités → variations entre les lignes de visée

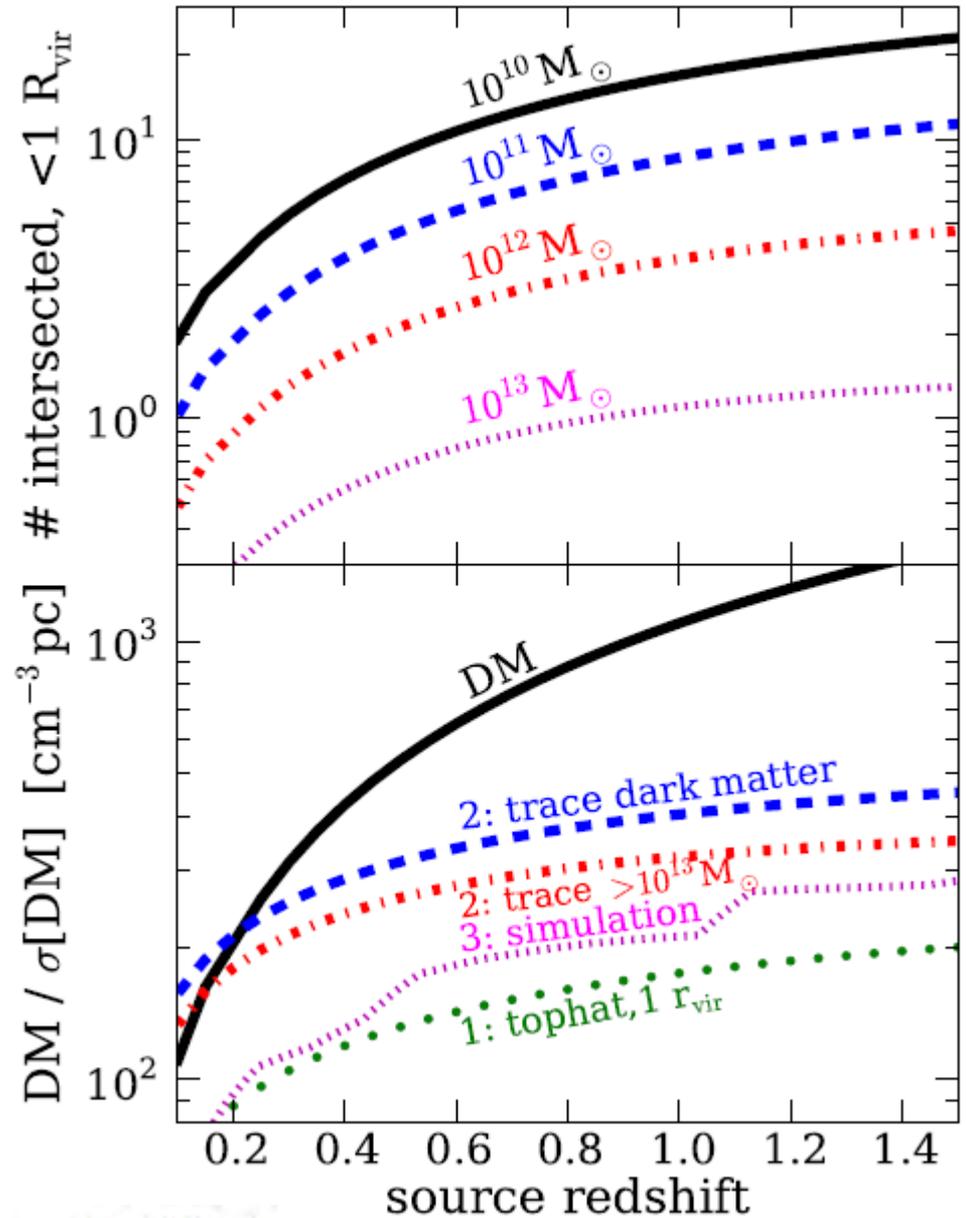
$$\Delta t = 4.2s/v_{\text{GHz}}^2 (\text{DM}/1000)$$



$$\text{DM}(z_s) = \int_0^{\chi(z_s)} d\chi \frac{\rho_e(z, \hat{n})}{(1+z)^2}$$

McQuinn 2014

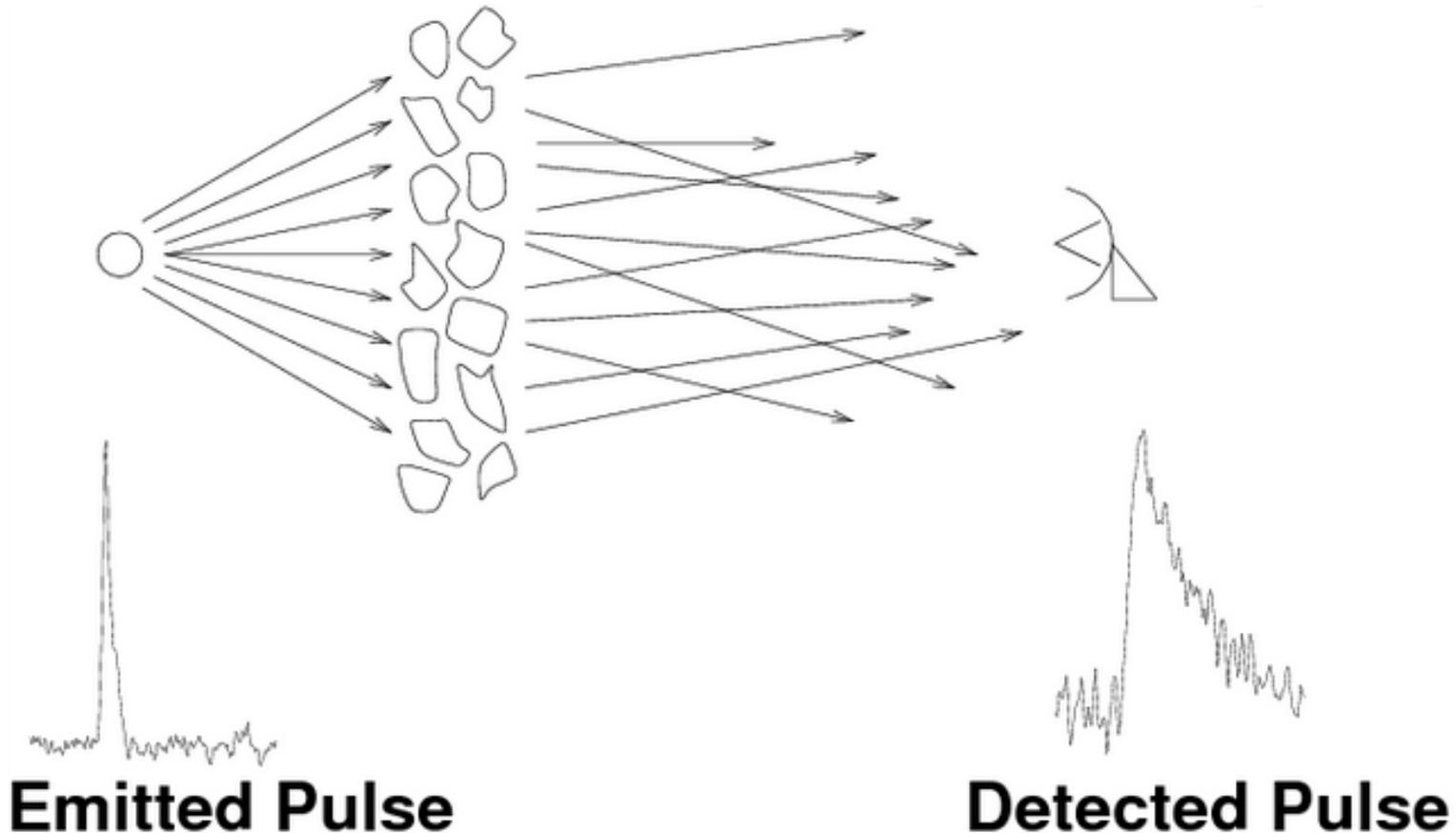
$$d\chi = c dz / H(z)$$



Turbulence du milieu IS

En plus de la dispersion, et le temps d'arrivée $\propto \nu^{-2}$

Largeur d'un pulse $\propto \nu^{-4}$



Localisation des baryons

La probabilité de DM dépend beaucoup de l'extension de gaz autour des halos

+ diffusion qui élargit les pulses (biais de sélection?)

Il existe toujours des ailes de forte DM

→ Méthode de stacking

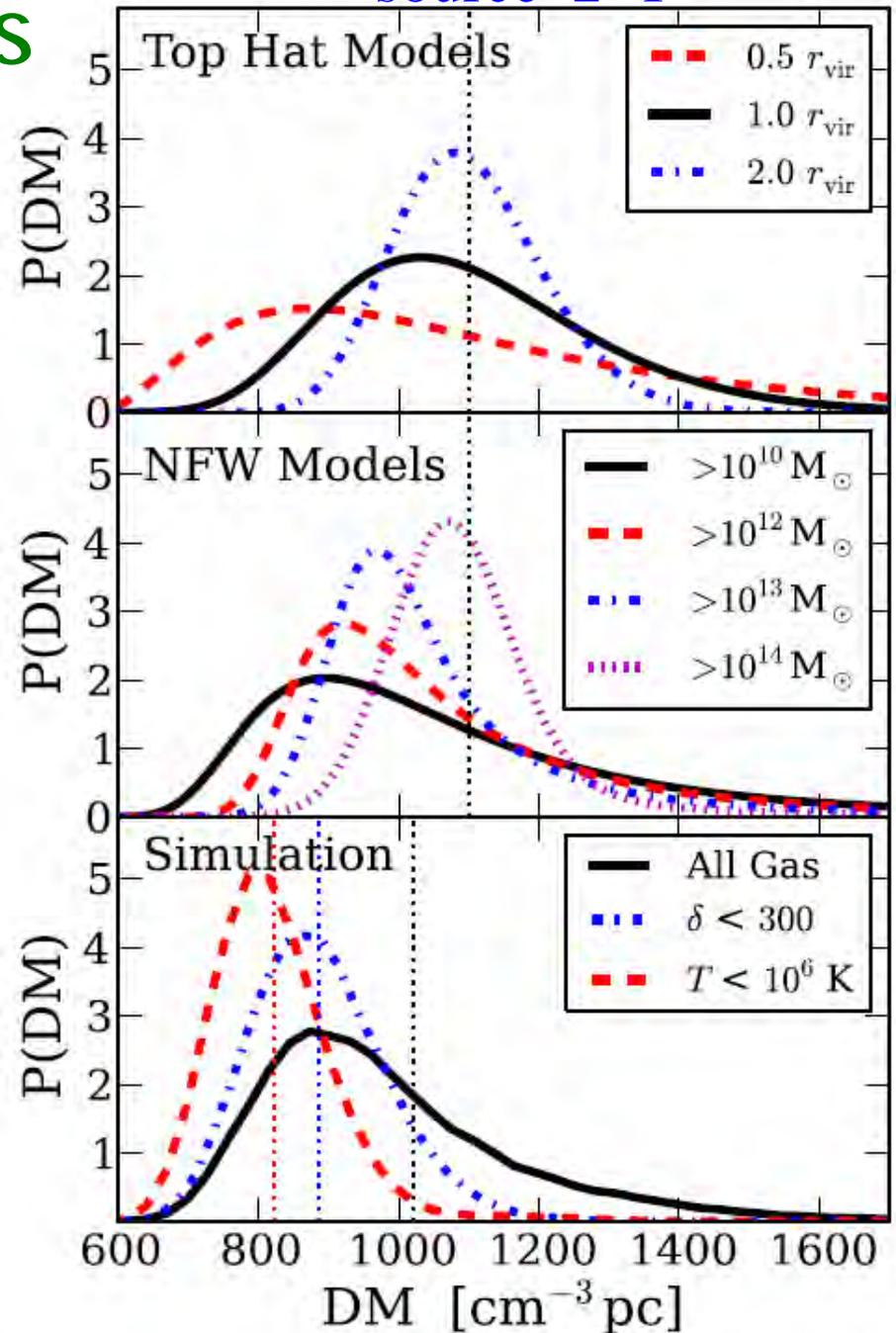
Modèles: 1-Top-Hat

2 NFW

3 Vents galactiques



source $z=1$

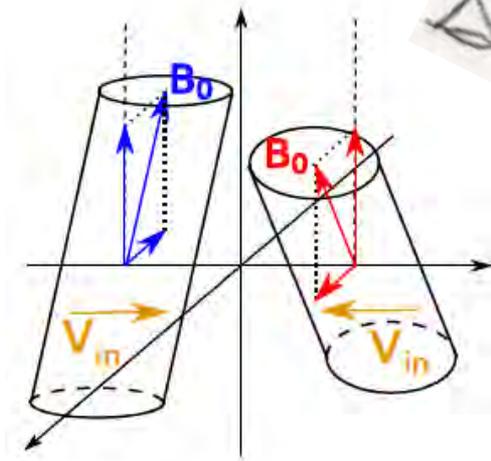


Mécanismes de rayonnement

Mécanisme cohérent (T_B jusqu'à 10^{40} K!)

Toujours proche d'un objet compact, étoile à neutron

Plus ou moins loin de la surface



→ **Rayonnement de courbure:** en champ **B** et **E**// forts

(rayon de gyration $\ll R_{\text{coh}}$) $B \sim 10^{14}$ G rend cohérent les e-

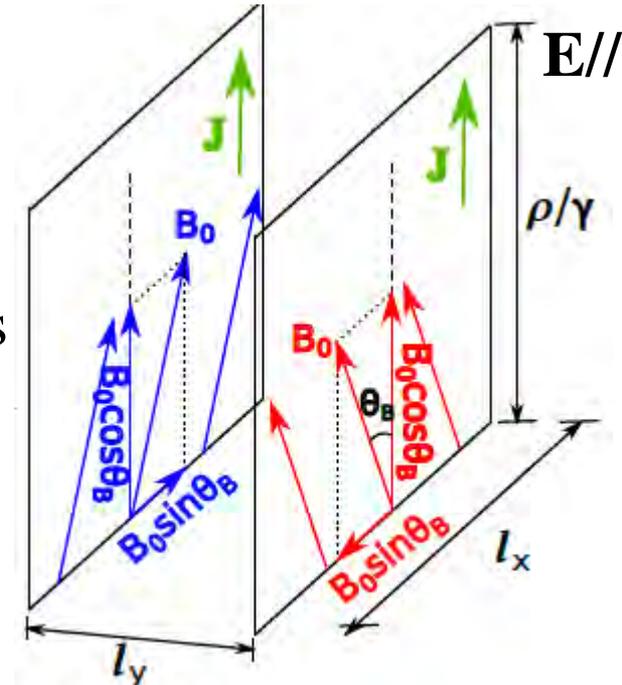
Processus pour lancer les paquets cohérents?

Reconnection magnétique?

→ **Rayonnement maser synchrotron**, dans des chocs ultra-relativistes, très magnétisés

Plus grande distance de la magnétar

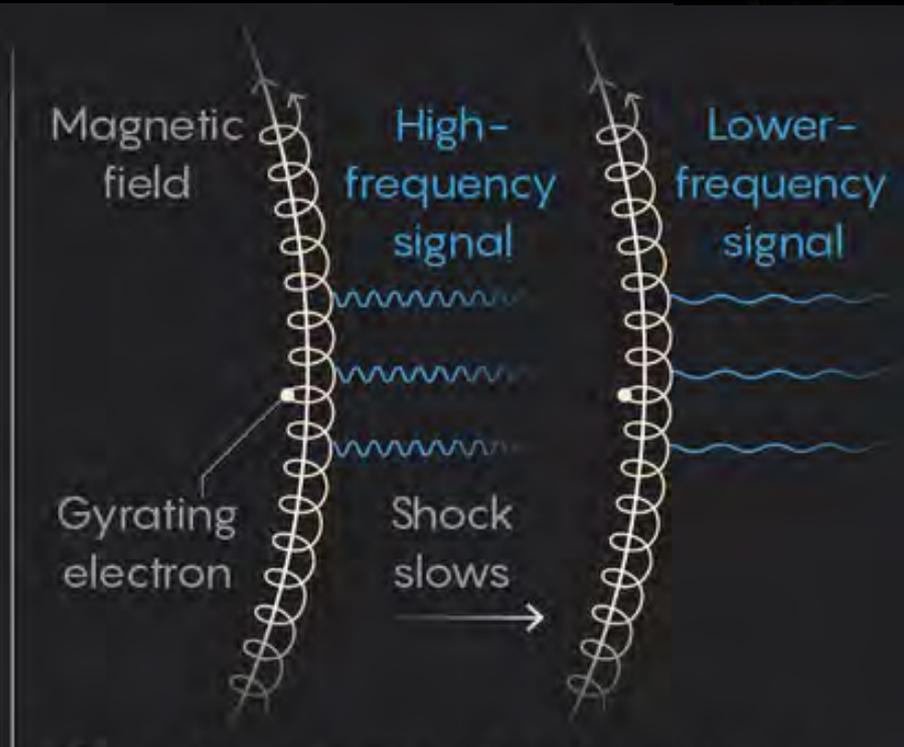
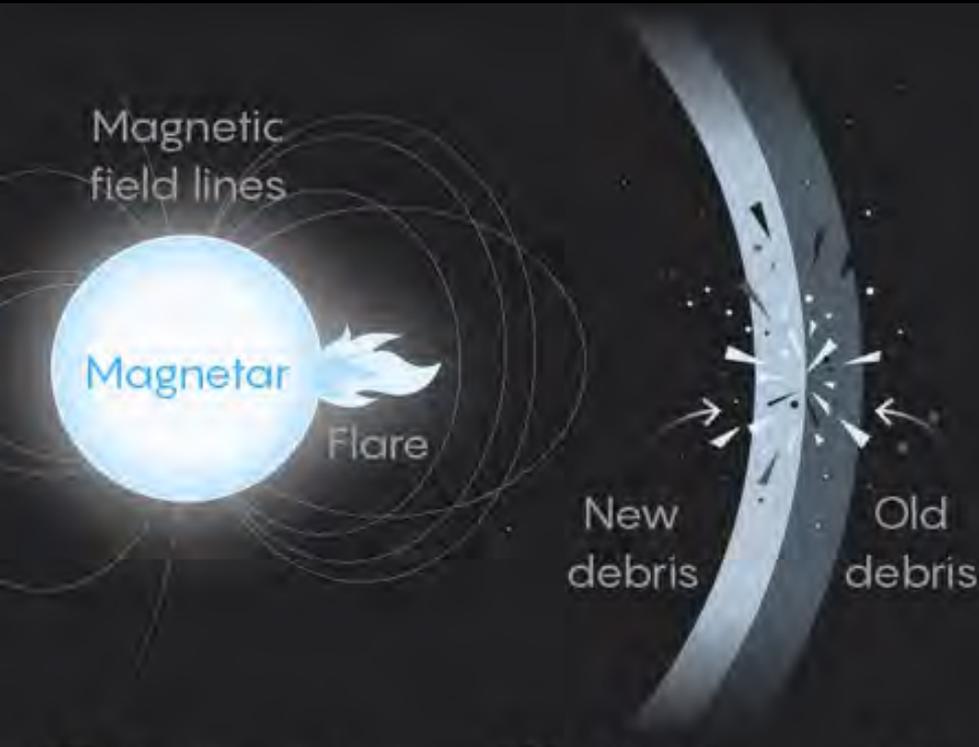
10^{10} cm (*Metzger et al 2019*)



$$l_x l_y \propto \gamma^2 \lambda^2$$

Kumar et al 2017

Modèle du maser synchrotron



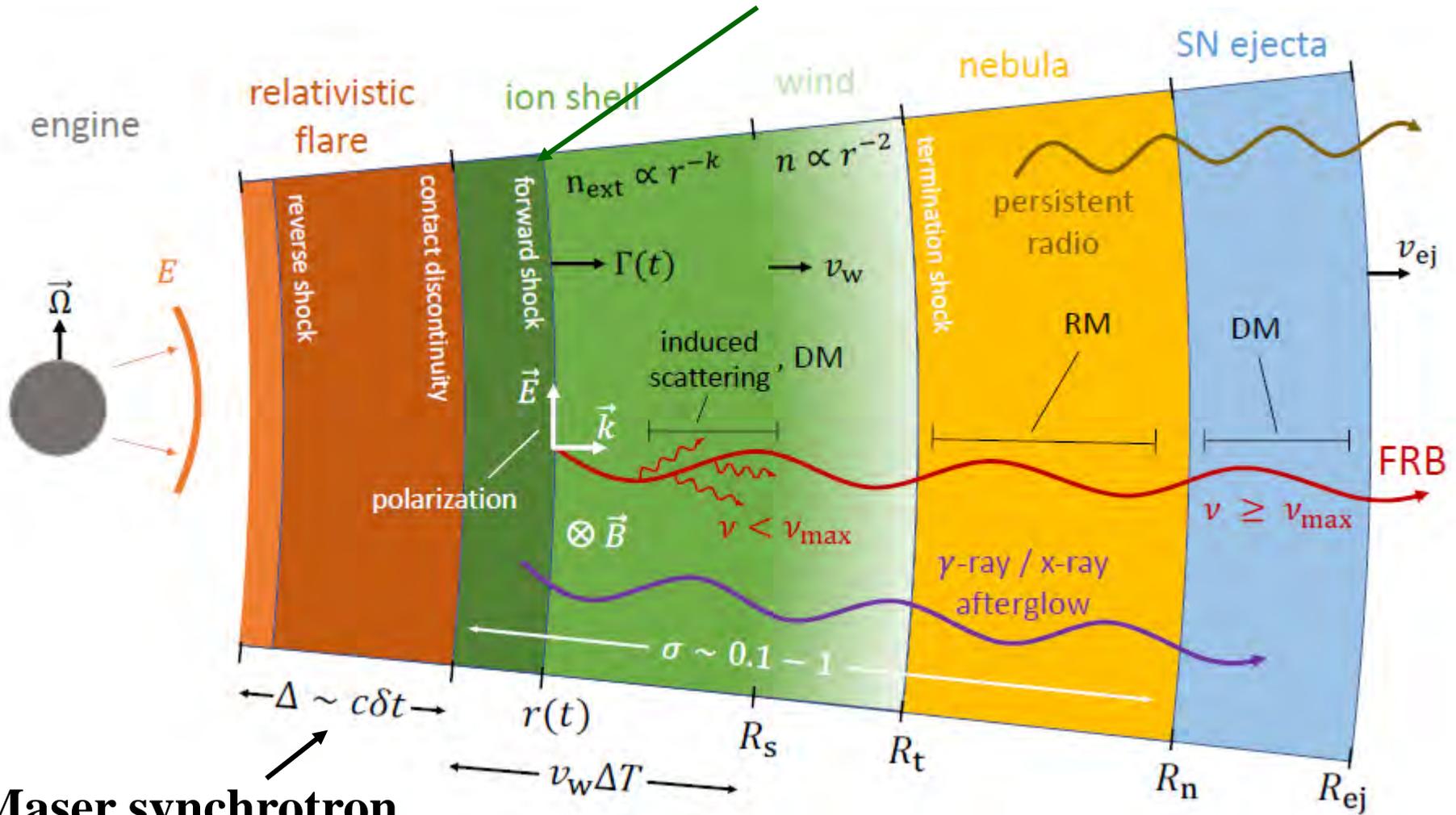
1- Un faisceau de particules chargées est émis par une magnétar

2- Le faisceau entre en collision avec le précédent
→ Fort champ B

3- Une onde de choc avec électrons cohérents
→ Maser synchrotron
Comme l'onde de choc ralentit la fréquence émise décroît

Choc à grande distance

Ejection relativiste à la surface; le choc produit l'émission cohérente



Maser synchrotron
 $\delta t = 1 \text{ms}$

synchrotron incohérent
années

Choc et maser

Les particules ultra-relativistes ($\gamma \sim 10^3$) entrant dans le choc tournent autour du champ B

Cela crée l'**inversion de population** nécessaire pour le maser (émission stimulée, particules toutes à haute énergie)

→ fonction de distribution des particules en forme d'anneau instable, qui se détend en transférant l'énergie dans une onde cohérente vers l'extérieur

$\sigma = \text{Magnetic/kinetic } E$

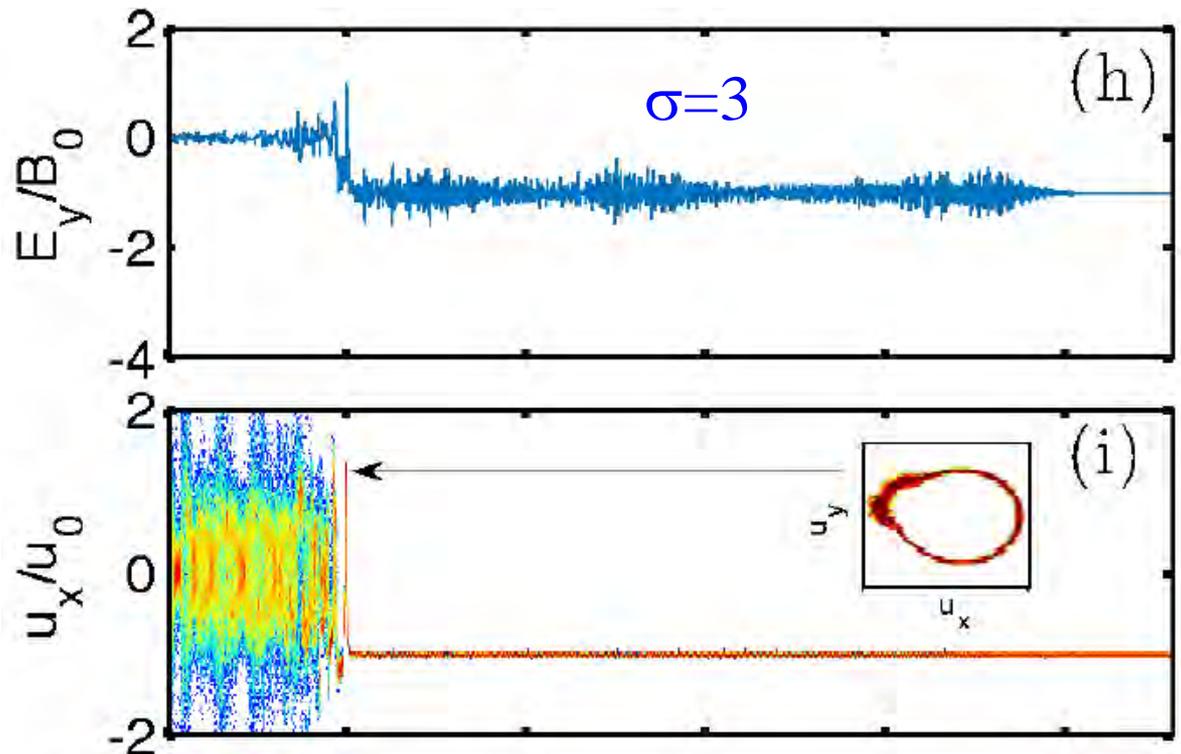
$\sigma = 3$

Simulations du choc

Plotnikov & Sironi 2019

Anneau en (u_x, u_y) à $\gamma = \text{cst}$

Les particules à plus faible γ ont disparu



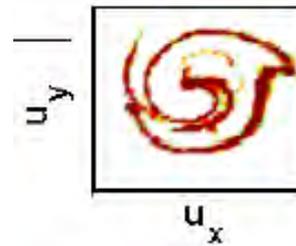
Géométrie

Anneau (γ) dépeuplé
à faible $\gamma \rightarrow$ inversion

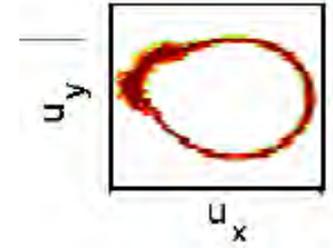
Pour le maser synchrotron
la gyration doit se faire
perpendiculaire à B_0 ,
avec un petit angle $\theta = 1/\gamma$
de manière à **rester cohérent**
E est perpendiculaire

Dans le cas du rayonnement
de courbure
E est parallèle

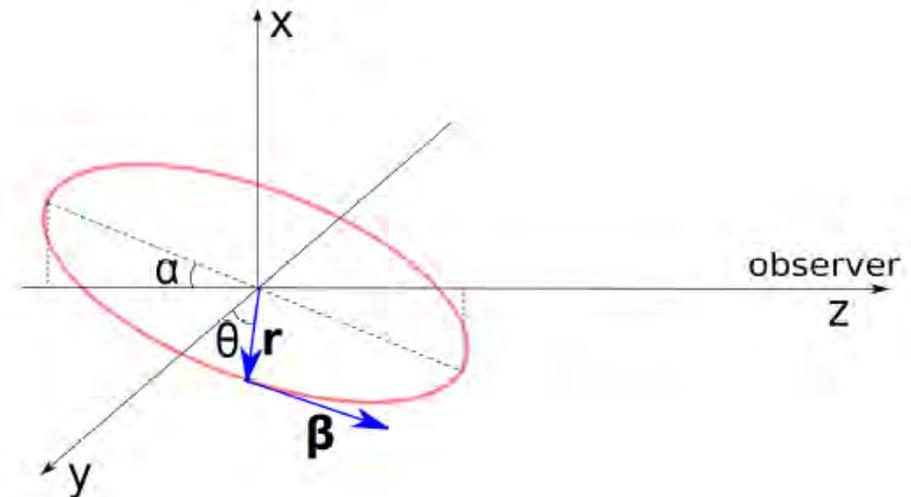
$\sigma=0.3$



$\sigma=3$

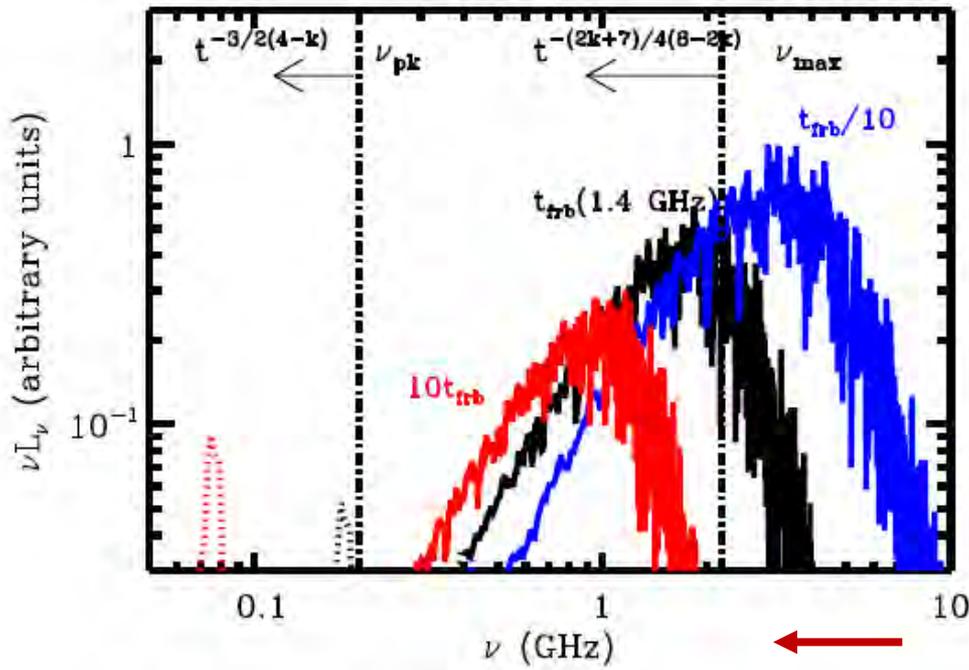


1D-PIC Plotnikov & Sironi 2019



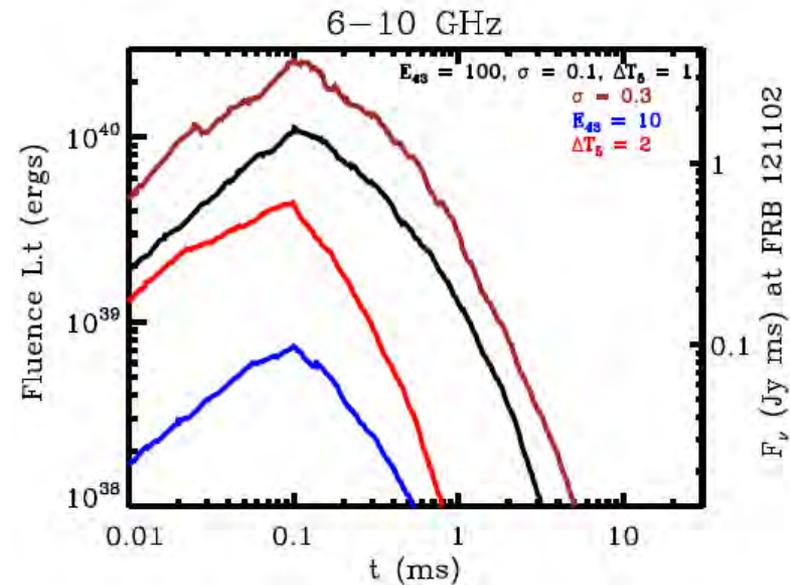
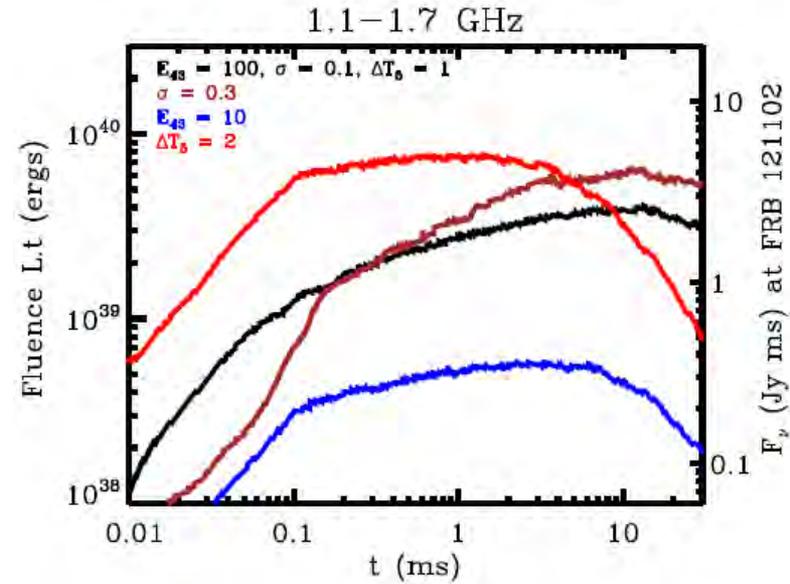
Kumar et al 2017

Conforme aux FRB

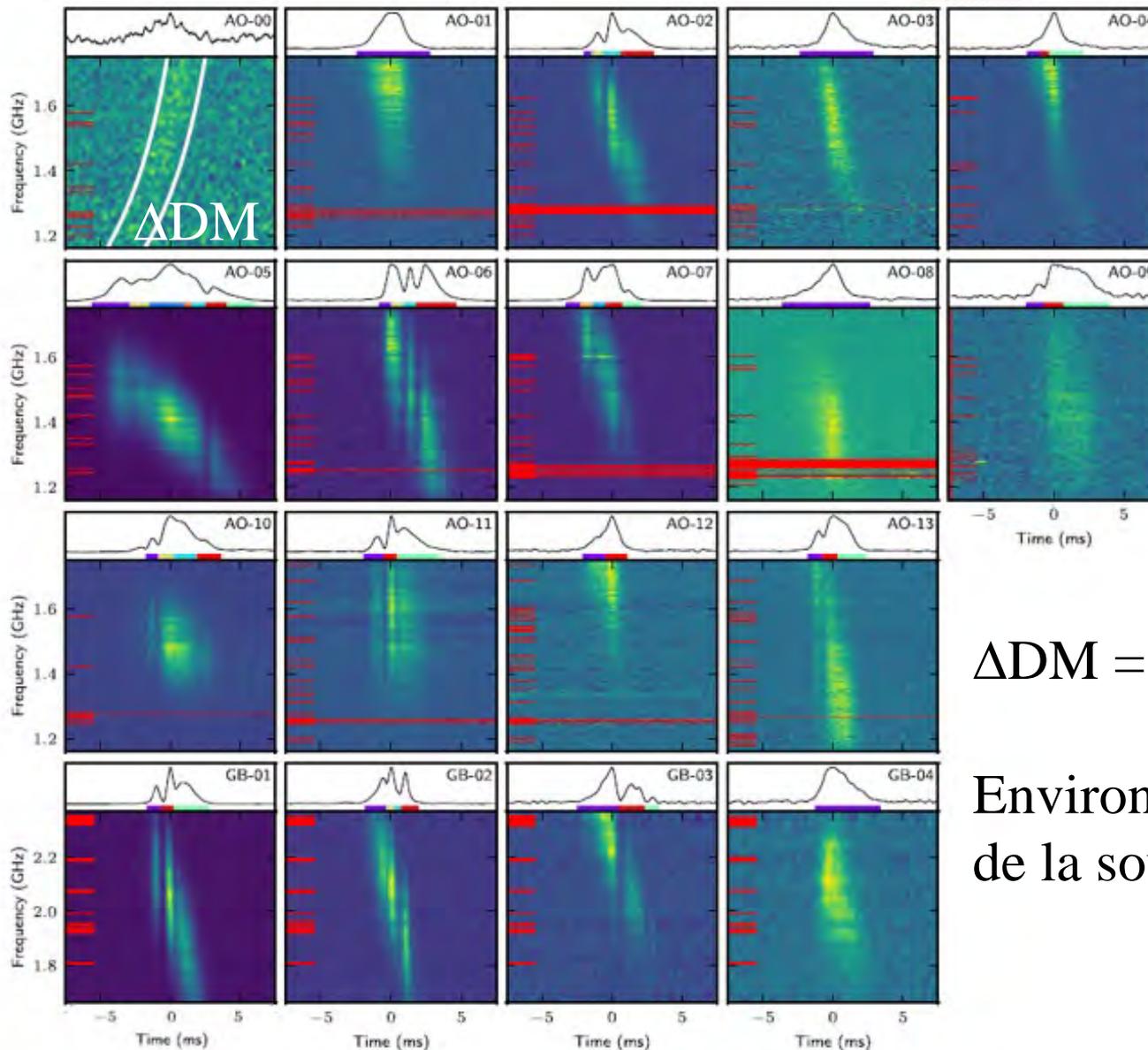


Dérive vers les basses
 $t_{\text{frb}} (1.4\text{GHz}) = 0.1\text{ms}$

SED= Bande large, sur 2 octaves



Dérive vers les basses « sad trombone »



FRB 121102

Dé-dispersé avec
 $DM=560 \text{ pc/cm}^3$

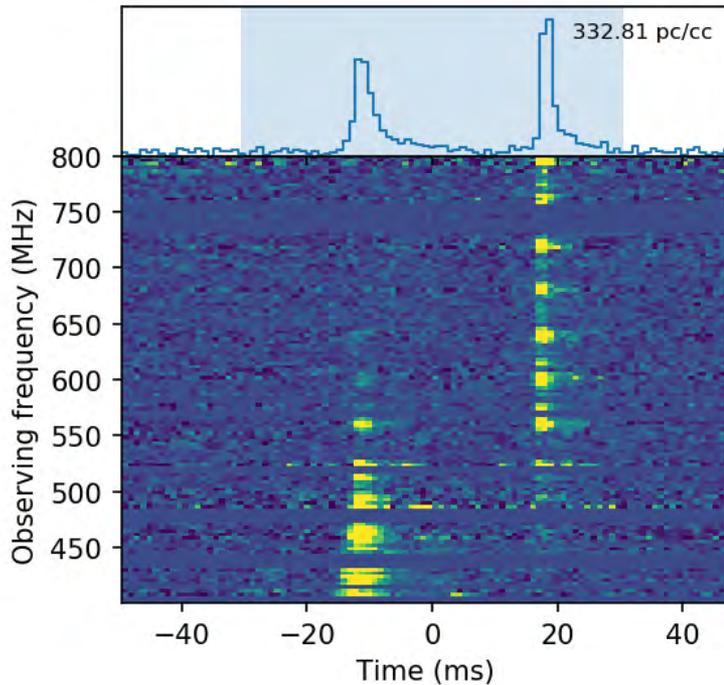
Dérive 200MHz/ms

$\Delta DM = 1-3 \text{ pc/cm}^3$ en 4 ans

Environnement variable
de la source?

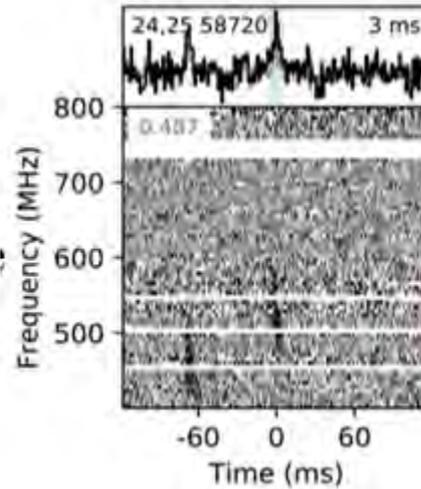
Mais il y a des exceptions

Dérive vers le haut

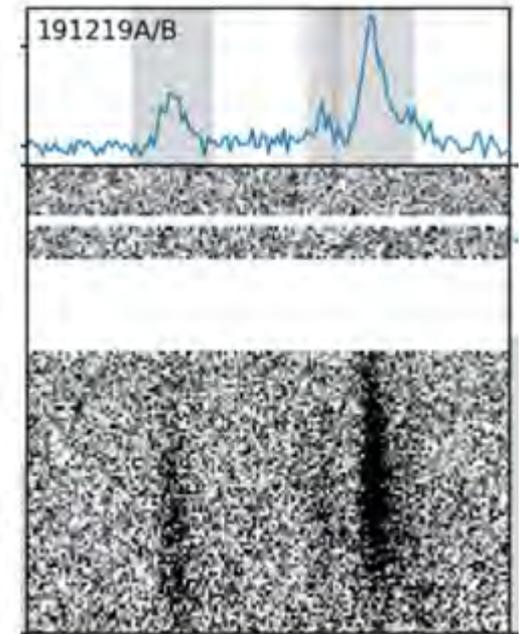


SGR 1935+2154- Voie lactée

FRB 180916



FRB 191219A/B



Plusieurs éjections, à qq ms
Puis il faut attendre quelques
jours pour avoir d'autres FRB

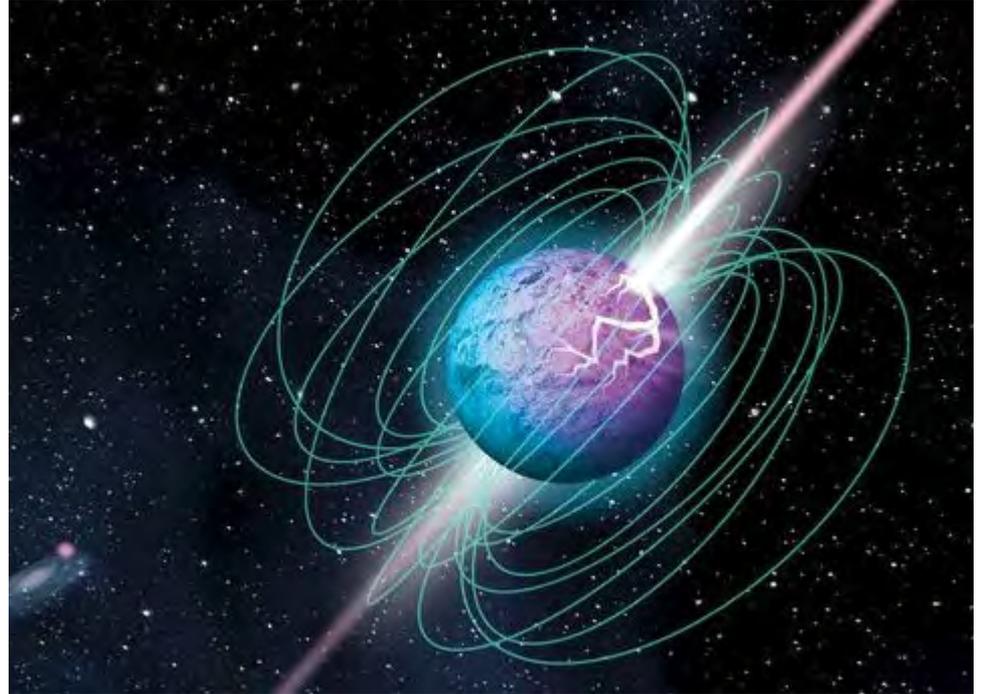
➔ Temps d'évacuation des débris

Magnéтар SGR 1935+2154

Dans ce cas, l'objet est bien identifié: **une magnéтар** isolée, provenant d'une SN Explosion il y a 16 000 ans

Emission radio: un craquement de la croute de la NS ?
(tremblement de terre)

Rayonnements radio, X et γ
(SGR Soft Gamma Repeater)



FRB rare: les 29 autres magnéтарs connus (MW, LMC) ont des sursauts X et γ , mais pas radio

Magnéтарs actives trop rares pour la fréquence des FRB

Des objets très semblables

Les **SGR (Soft Gamma Repeater)** et **AXP (Anomalous X pulsar)** ressemblent beaucoup aux **FRB**

Bursts sporadiques en X (<0.1s), et très brillants- Pas de compagnon

→ Champ magnétique $> 10^{12}$ G, et énergie provenant de son amortissement. Longue Période de spin (5-12s) et fort spin-down $dP/P \sim 10^{-11}$ → **Modèle de magnétar**

Exemple pulsar XTE J1810

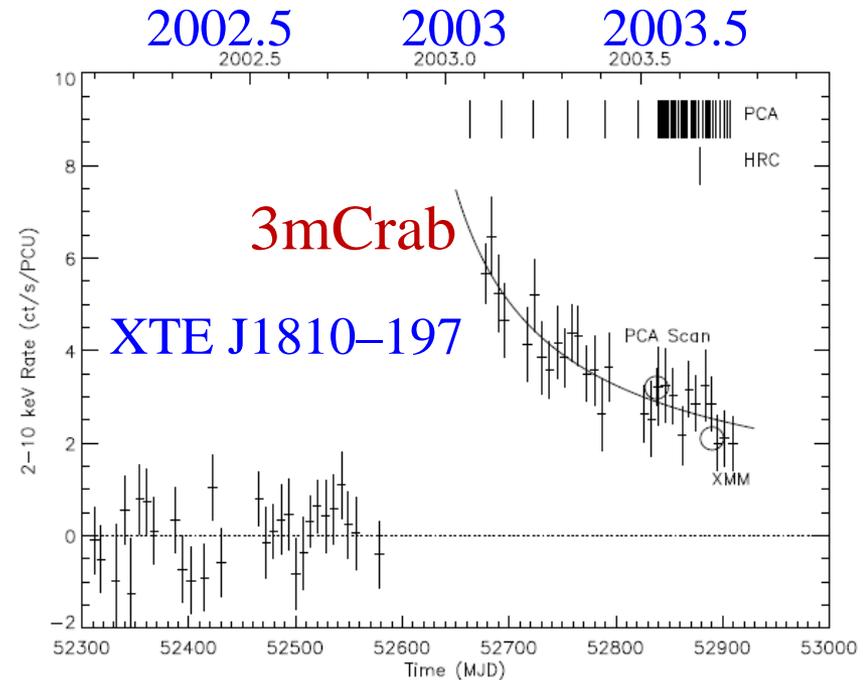
Découvert par hasard en X

$P=5.54$ s, spectre X_mou

$dP/dt = 10^{-11}$ s/s

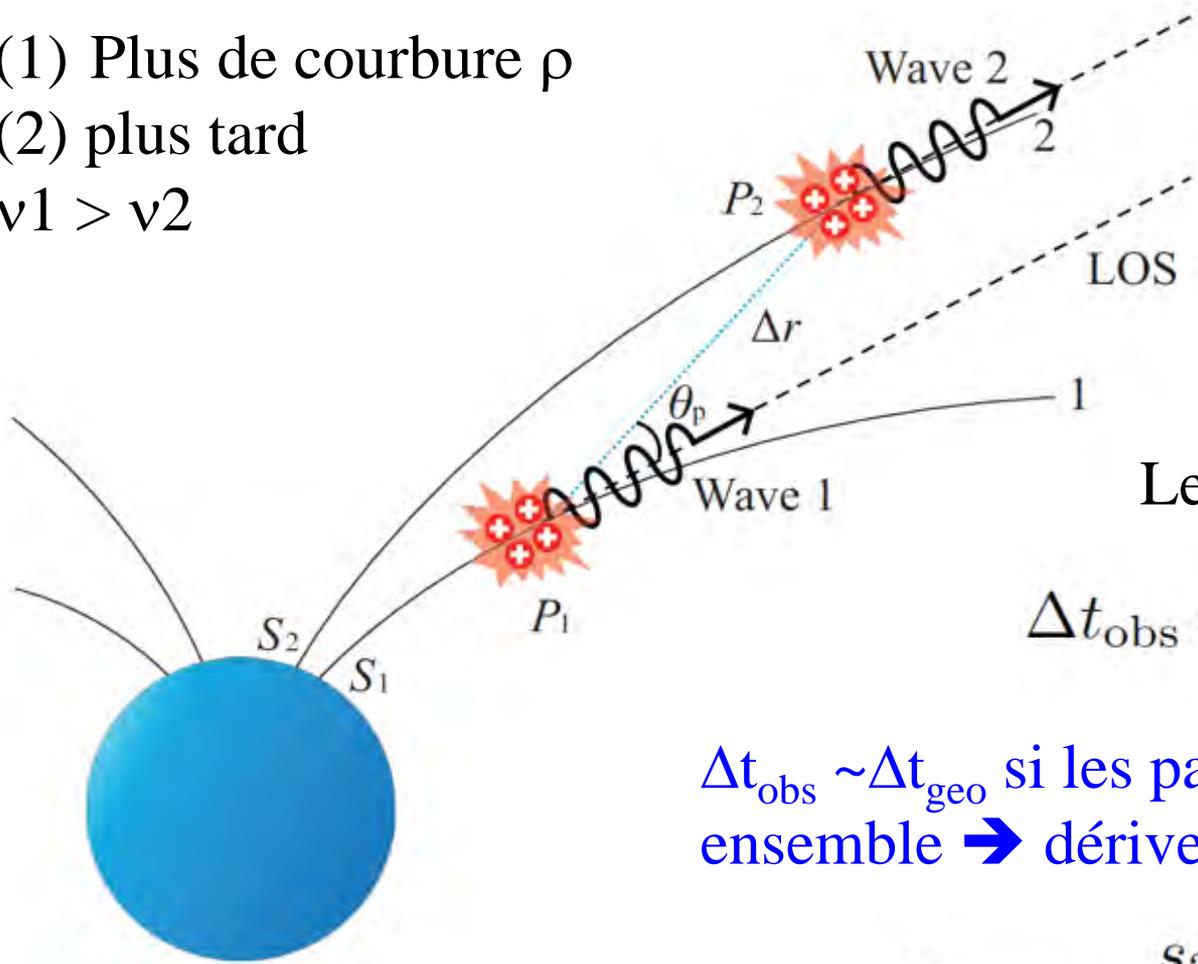
Pas de compagnon

$B > 3 \cdot 10^{14}$ G age < 7600ans



Solution: Emission de courbure cohérente?

- (1) Plus de courbure ρ
- (2) plus tard
- $v_1 > v_2$



Accélération des paquets \rightarrow fréquence
 $\nu = 3c\gamma^3/(4\pi\rho)$

Si $\gamma = \text{cst}$, $v_1 > v_2$

Le délai entre les pulses

$$\Delta t_{\text{obs}} = \frac{d_2 - d_1}{c} + \boxed{t_{P_2} - t_{P_1}}$$

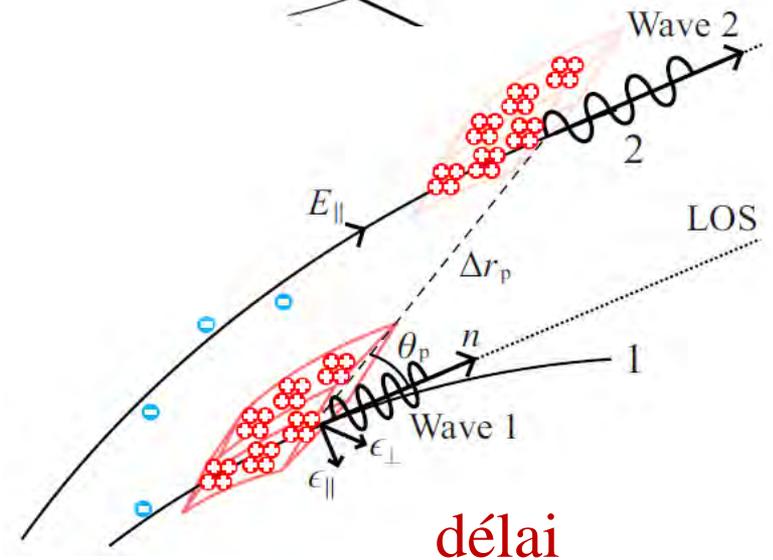
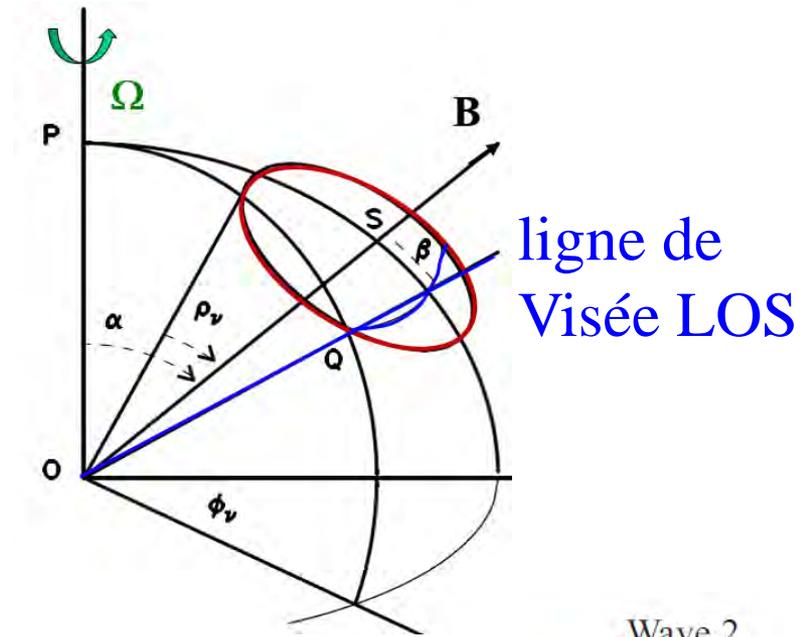
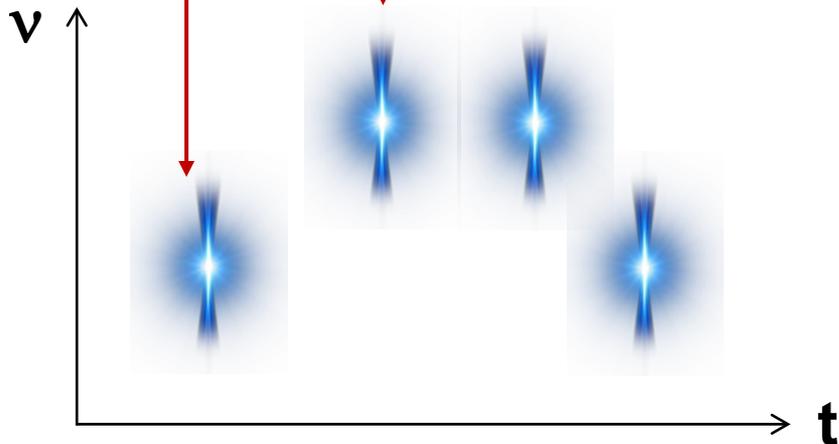
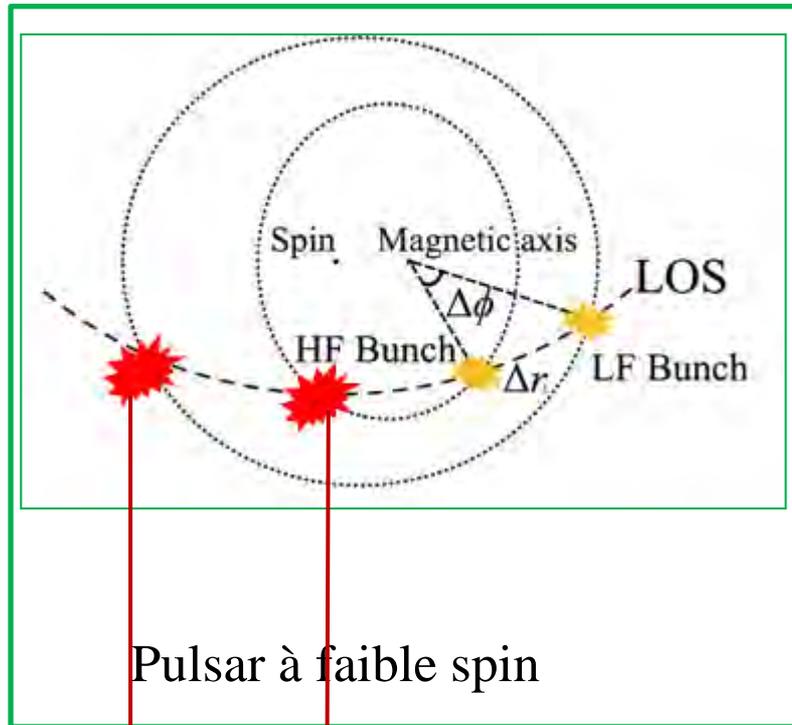
$\Delta t_{\text{obs}} \sim \Delta t_{\text{geo}}$ si les paquets sont fabriqués ensemble \rightarrow dérive vers le bas

$$\Delta t_{\text{geo}} = \frac{s_2 - s_1}{v_e} - \frac{\Delta r \cos \theta_p}{c}$$

Terme géométrique

Configuration dipolaire: $\Delta t_{\text{geo}} > 0$

Délai entre les paquets



$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t_{\text{geo}} + t_{20} - t_{10}$$

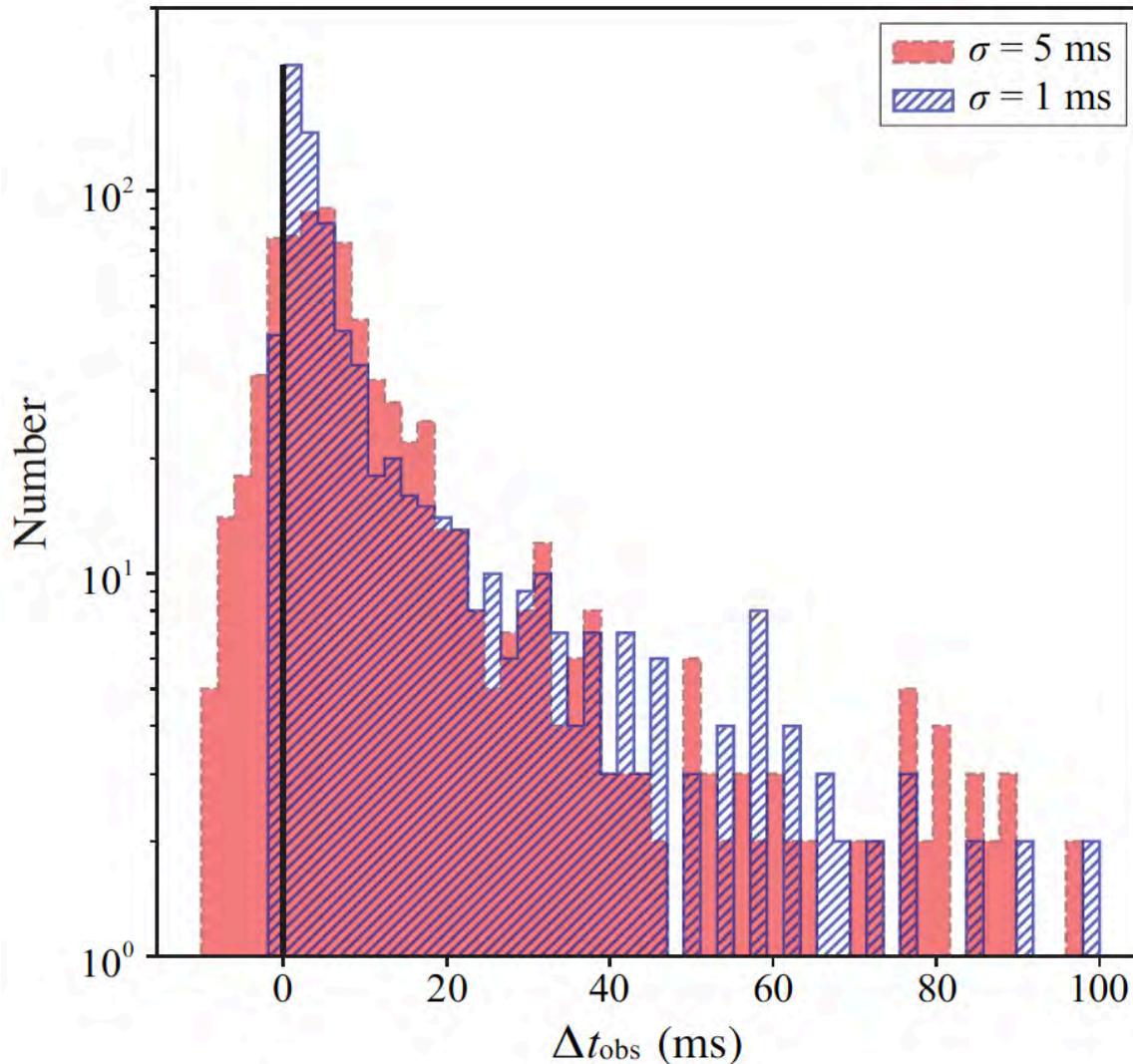
Wang et al. 2019, 2020

Dérive vers les basses ou vers les hautes ν

$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t_{\text{geo}} + t_{20} - t_{10}$$

$$\Delta t_{\text{geo}} \simeq 6.6 \times 10^{-2} \text{ ms } \theta^2 \Delta \theta_s \sin^{-3} \theta_s.$$

$t_{20} - t_{10}$ a une distribution gaussienne



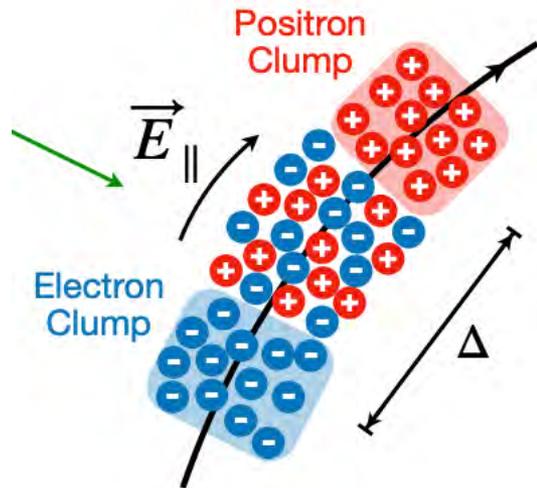
La plupart des dérives se produit vers le bas
Mais il y a des exceptions vers le haut

Les mécanismes à longue durée (5ms) ont plus de Chance d'engendrer des Dérives vers le haut

Accélération et refroidissement

Les paquets rayonnent très vite, et se refroidissent en un temps de l'ordre de la nano sec

Le FRB dure de l'ordre de la ms, il faut combiner plusieurs paquets



Le Champ E_{\parallel} est requis pour ré-accélérer les particules qui perdent de l'énergie en rayonnant

γ doit rester constant pour maintenir la cohérence

La séparation des charges conduit à un spectre étroit

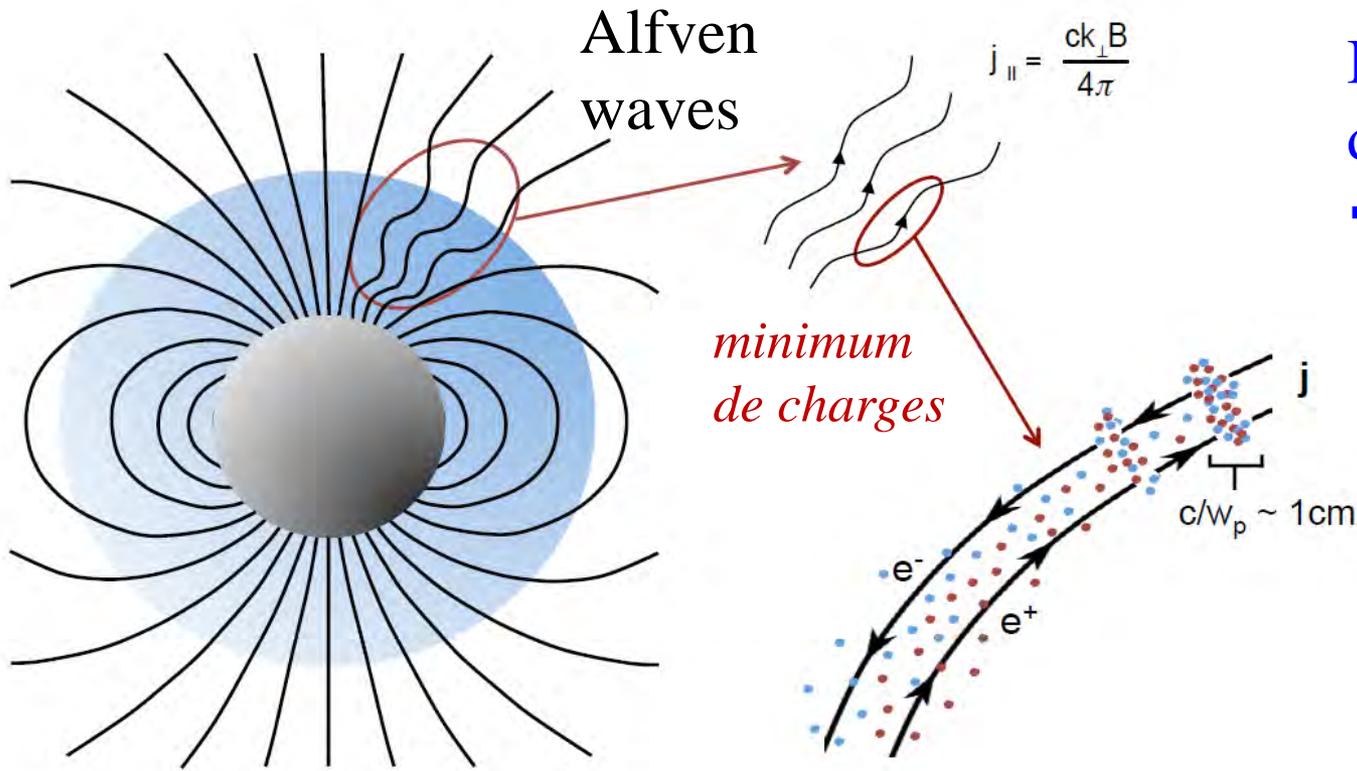
$$\frac{dI_{(N)}}{d\omega d\Omega} \propto \omega^{8/3} \quad \text{for } \omega \ll \omega_l \ll \omega_c,$$

L' accélération des paquets

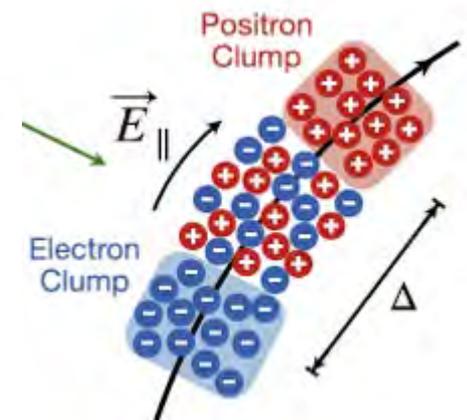
$$N_e E_{\parallel} e v_e dt - L dt = N_e m_e c^2 d\gamma = 0$$

Wang et al. 2019, Yang et al. 2020

Production des paquets à partir des ondes Alfvén

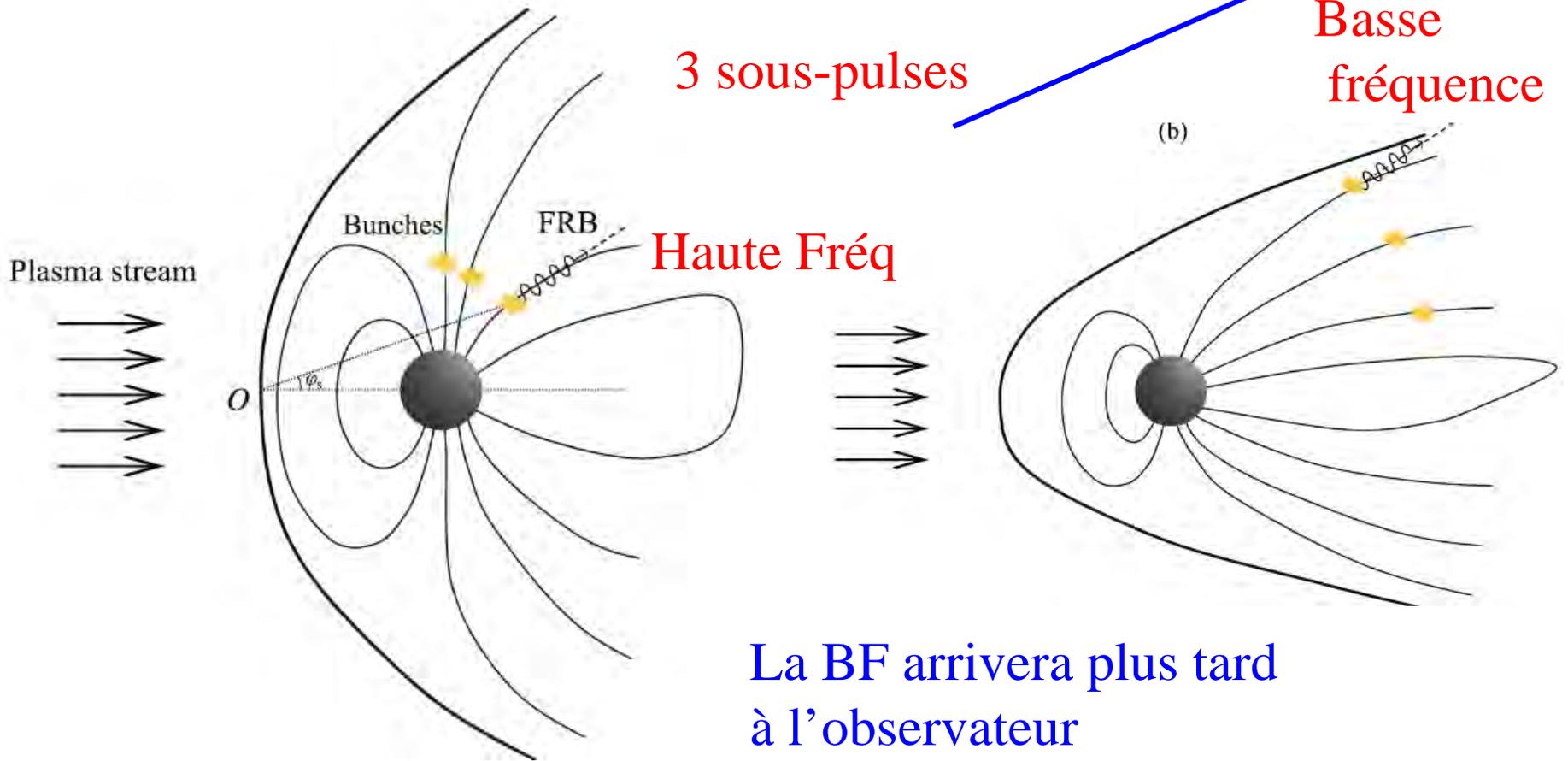


Instabilité à deux courants
→ clumps

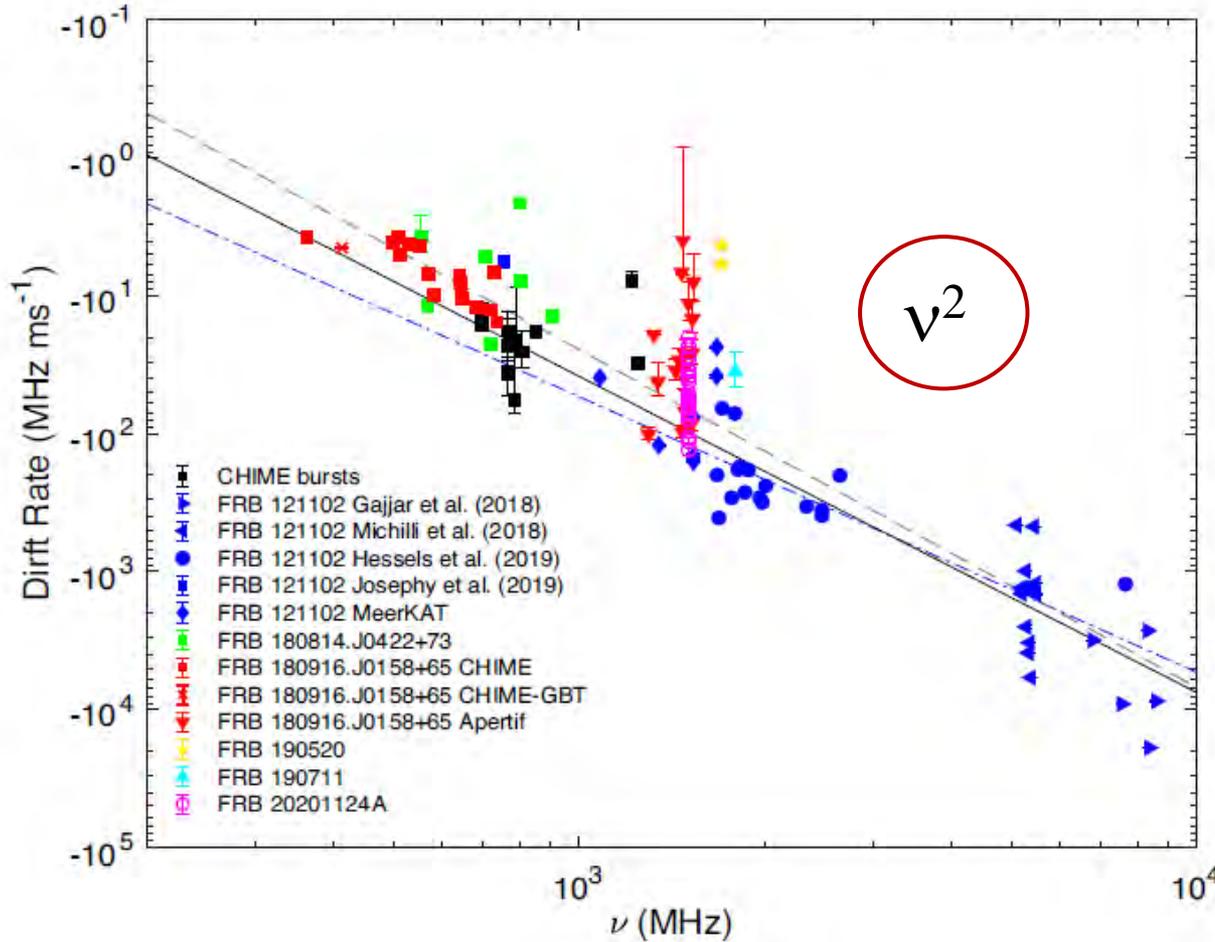


Autre scénario: le peigne

Les paquets proviennent de l'interaction d'un plasma extérieur avec la magnétosphère de l'étoile à neutrons



Taux de dérive en fréquence



Pour plusieurs répéteurs

FRB 121102

FRB 180814

FRB 180916

FRB 190711

FRB 20201124A

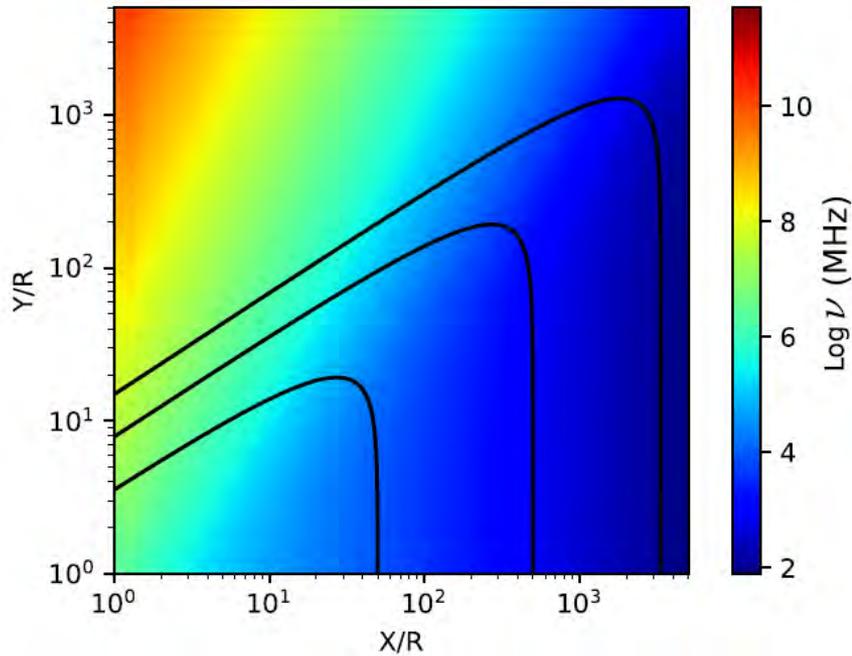
FRB 190520

CHIME

γ constant dans le dipole

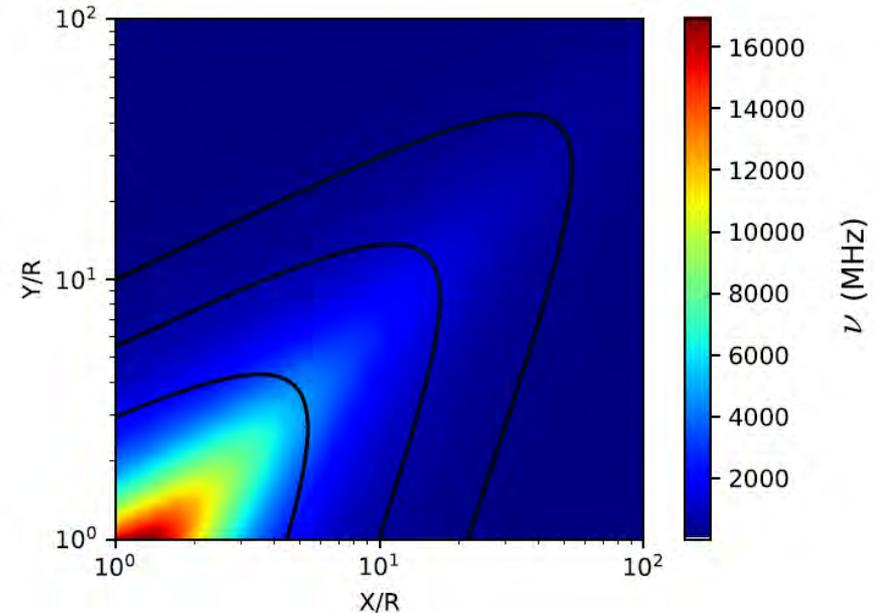
$$\dot{\nu} = -\nu^2 \frac{16\pi}{9\gamma^3(1 - \cos\theta_p + 1/2\gamma^{-2})\sin\theta}$$

Cartographie Rayon-Fréquence



Configuration du champ B
en dipole

FRB pour $r > 10R$ lignes de
champ fermées



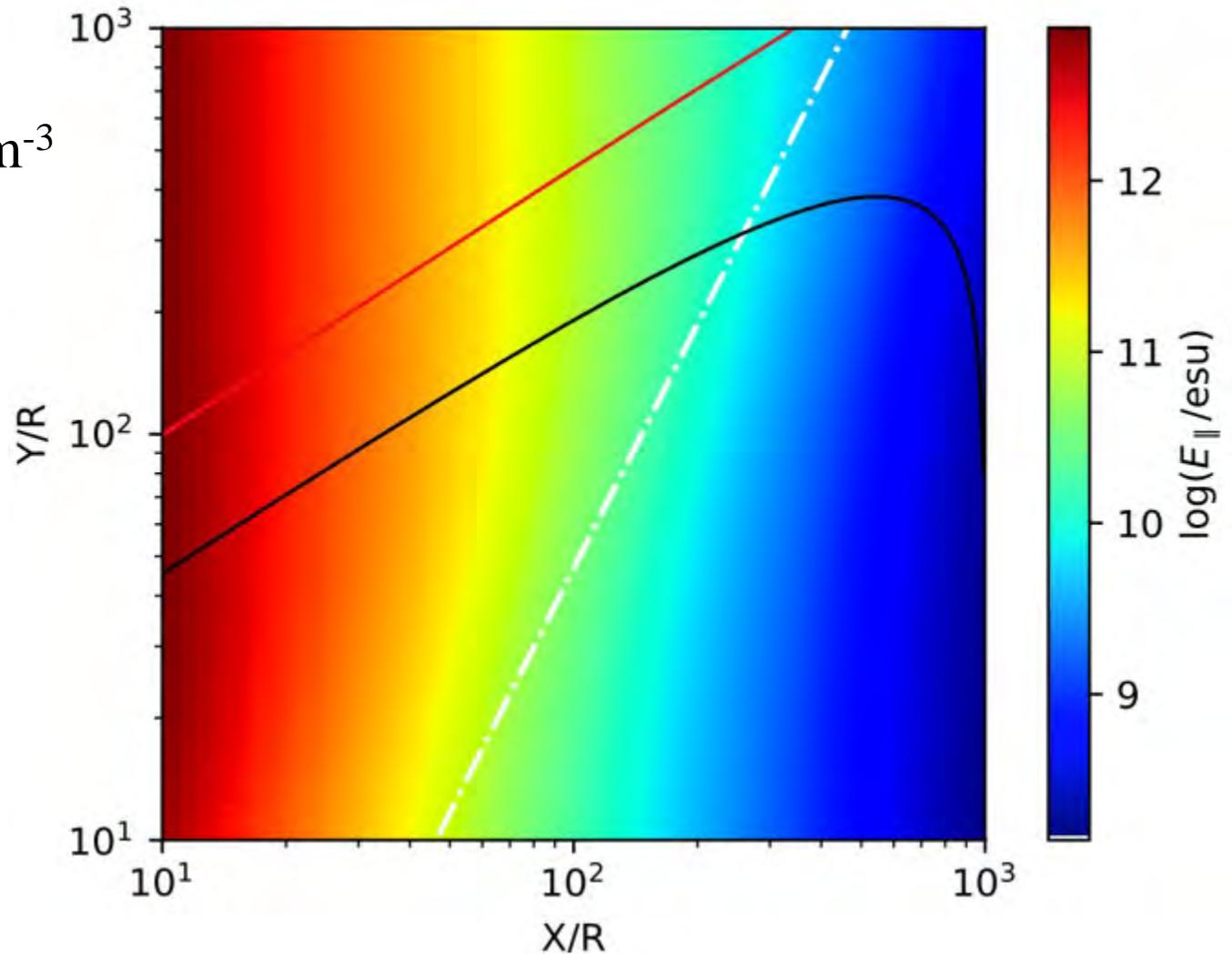
Configuration du champ B
en quadrupole

FRB pour $r > 100R$ lignes de
champ plus courbées

Cartographie E_{\parallel}

$$N_e E_{\parallel} e v_e dt - L dt = N_e m_e c^2 d\gamma = 0$$

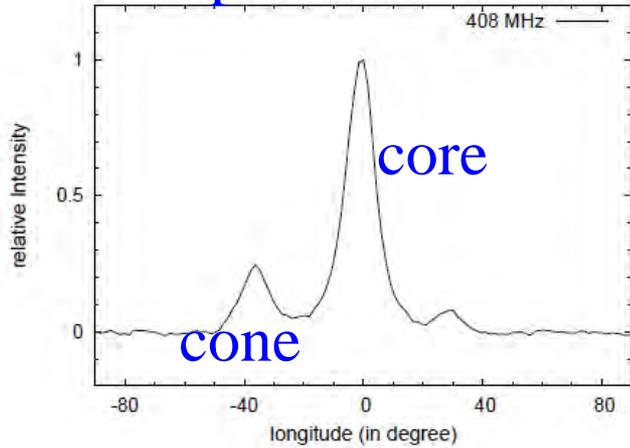
$N_e = 10^{25} \text{ cm}^{-3}$



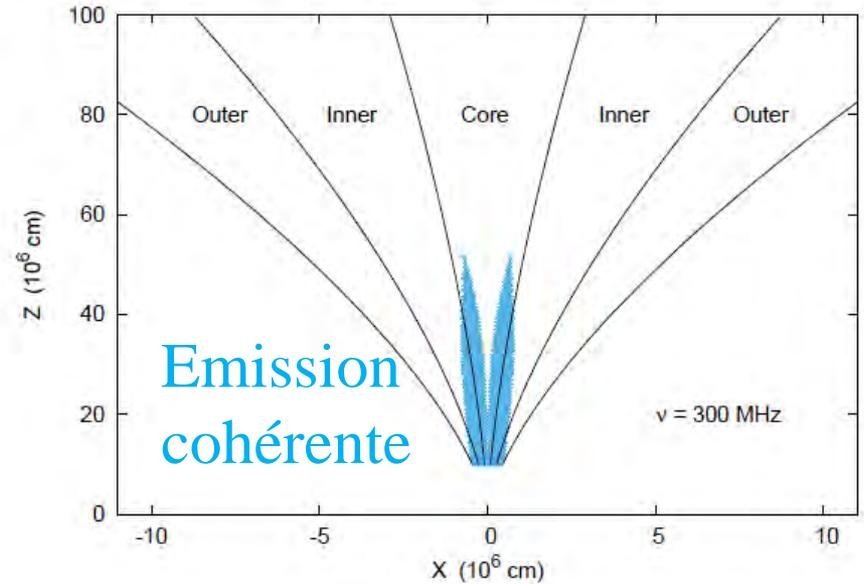
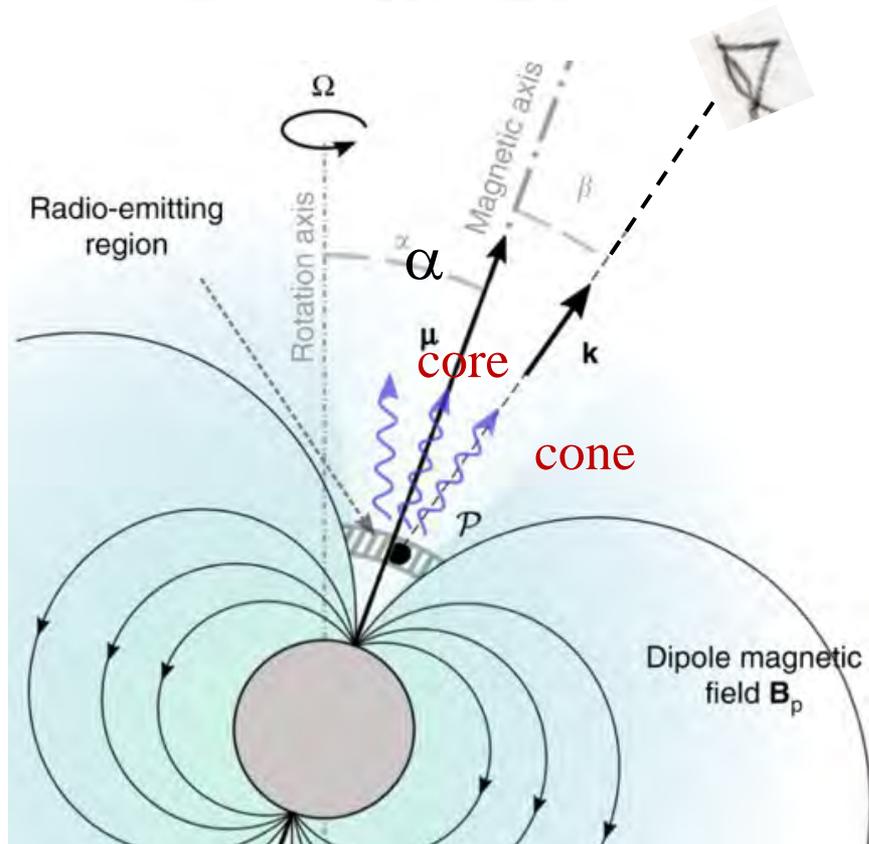
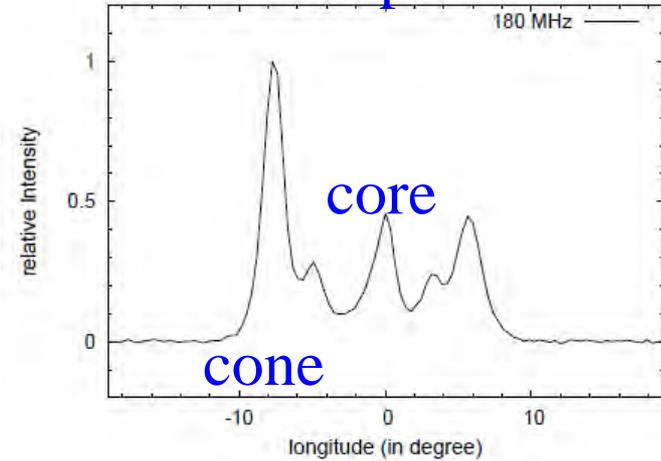
$$E_{\parallel} \propto r^{-2}$$

Emission des pulsars

Triple



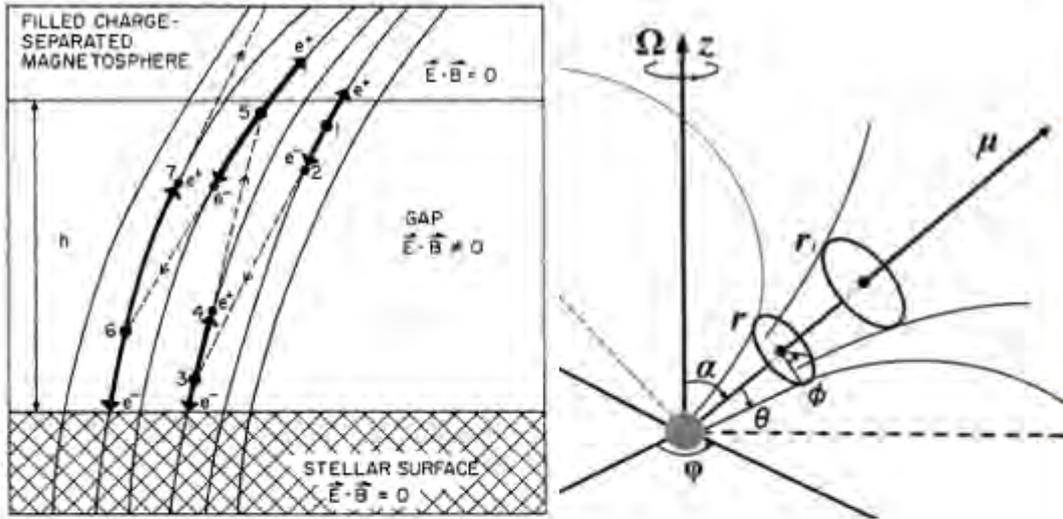
Multiple



Basu et al 2022

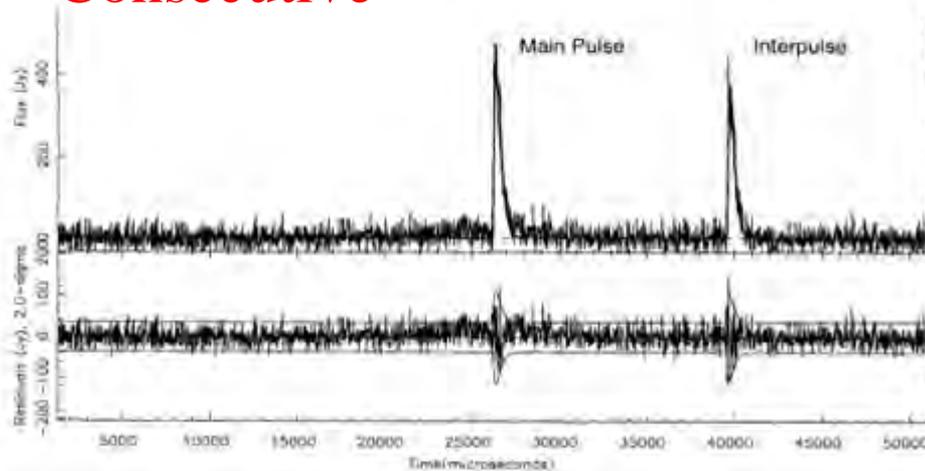
Pulsars vs FRB

Pulsar

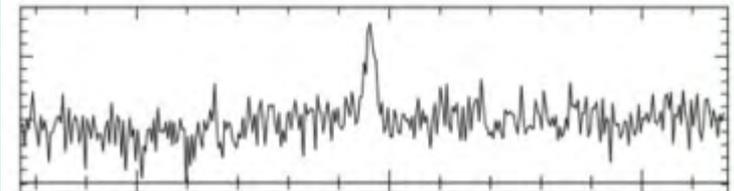
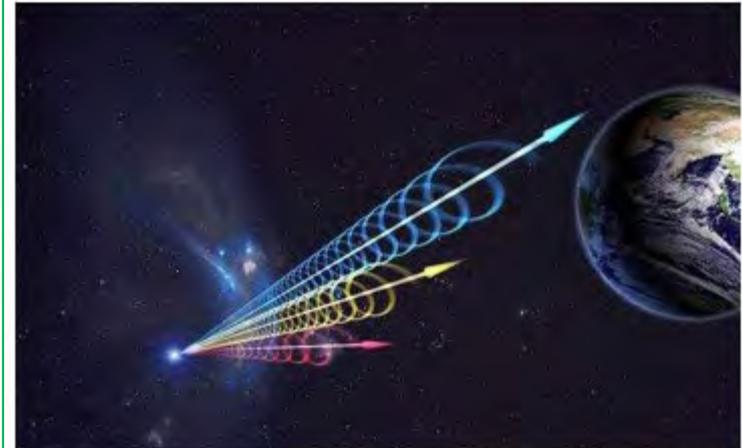


Consecutive

Conal-beam



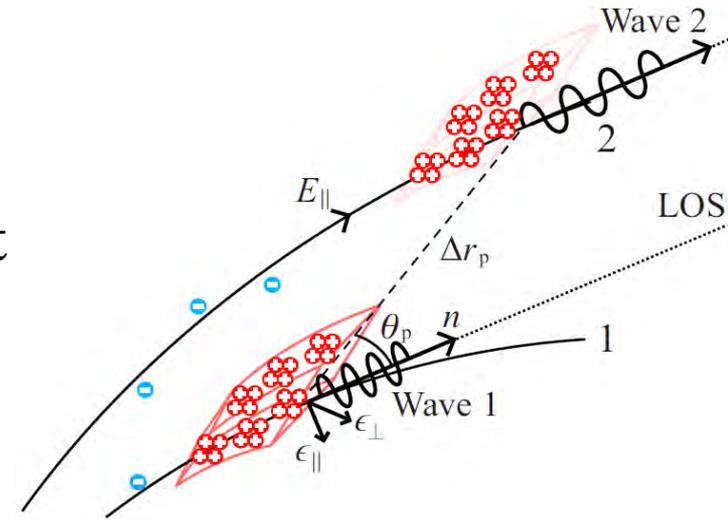
FRB



Sursaut de ms

Résumé du mécanisme

- Le **rayonnement de courbure cohérent** prédit naturellement des sursauts soudains, sporadiques et violents, avec des sous-pulses de fréquence descendante



- La plupart des FRB auraient des sous-pulses dérivant vers le bas, mais il existe également des événements de dérive vers le haut, plus fréquents dans les FRB de longue durée
- $E_{||}$ est lié au mécanisme de déclenchement des paquets, l'observation de la structure temps-fréquence devrait les révéler

Dans M81-GC

Vieille population d'étoiles, Grande variabilité (50ns)

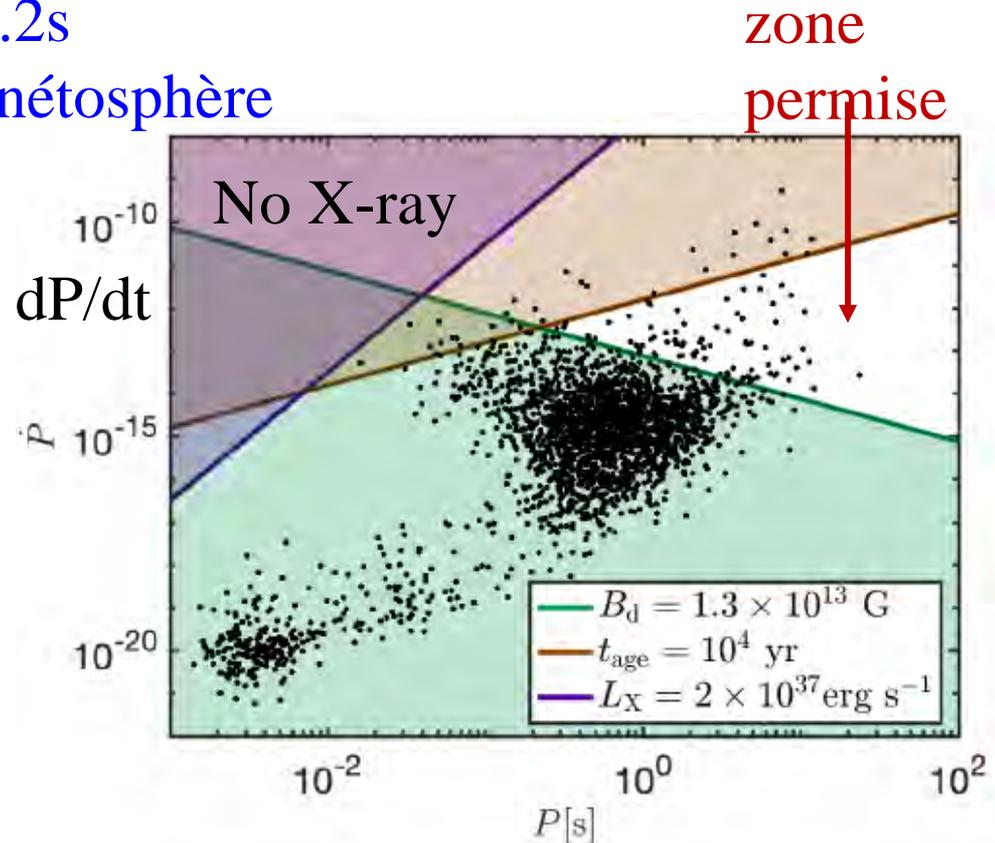
Magnétars formées par SN (jeunes) mais aussi **fusion de 2 naines blanches**

Force du signal dans M81-GC ne peut pas être le même mécanisme que les pulsars, ou SGR1935+2154

Activité 10^5 an, $B > 10^{13}$ G, $P > 0.2$ s

50ns \rightarrow à l'intérieur de la magnétosphère

Ce genre de sources, merger de naines blanches, pourraient être fréquentes dans les galaxies Elliptiques

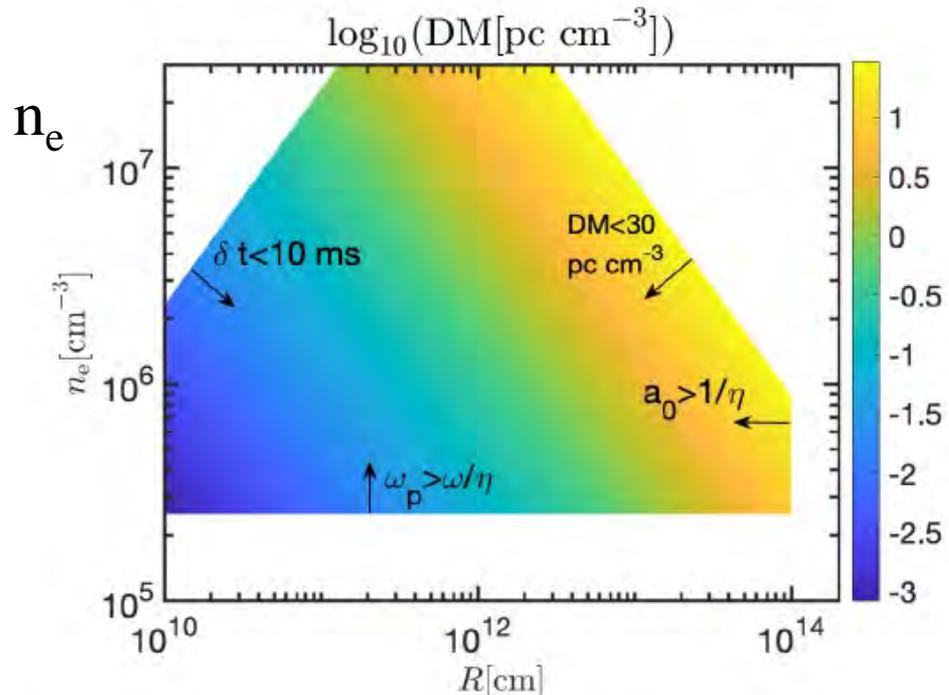
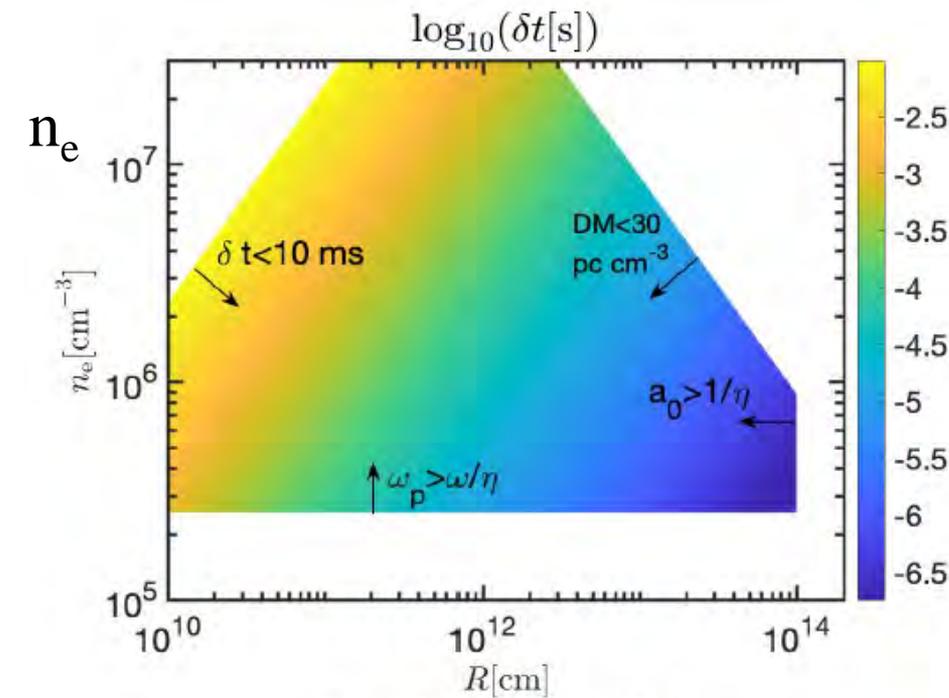


Contraintes sur DM et variabilité

Densité volumique n_e versus Rayon
La variabilité ne peut pas être due aux scintillations du plasma et les effets de lentilles

Ni être produite par des chocs à grand rayon

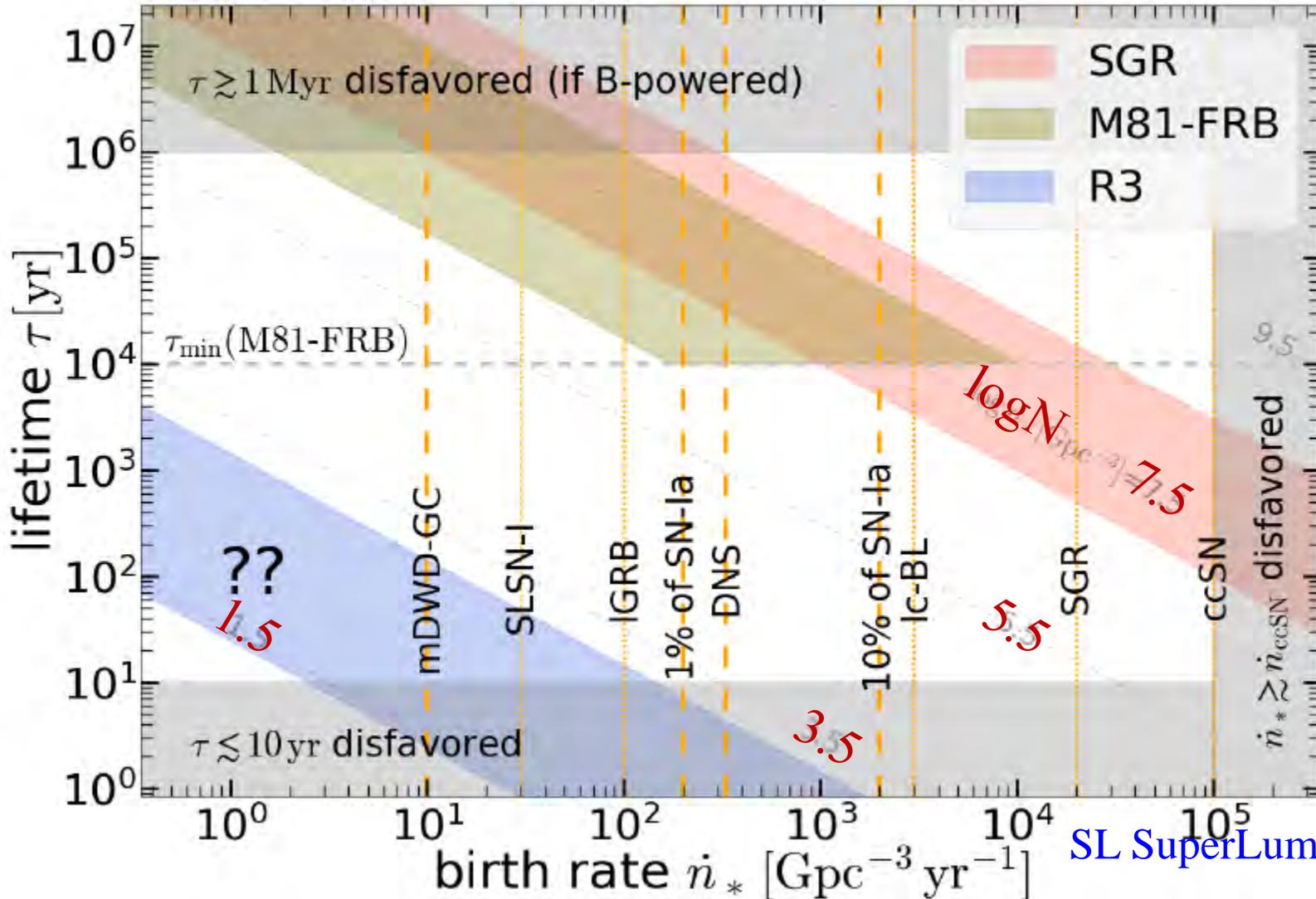
→ Doit provenir du burst intrinsèque, proche de l'étoile à neutron



Durée de vie vs taux de naissance

R3: FRB20180916B répéteur qques fois /jour

DNS= NS-merger



N par
Gpc³

SL SuperLuminous

I GRB=long-GRB

Lu, W. et al 2021

Statistique des sursauts FRB121102

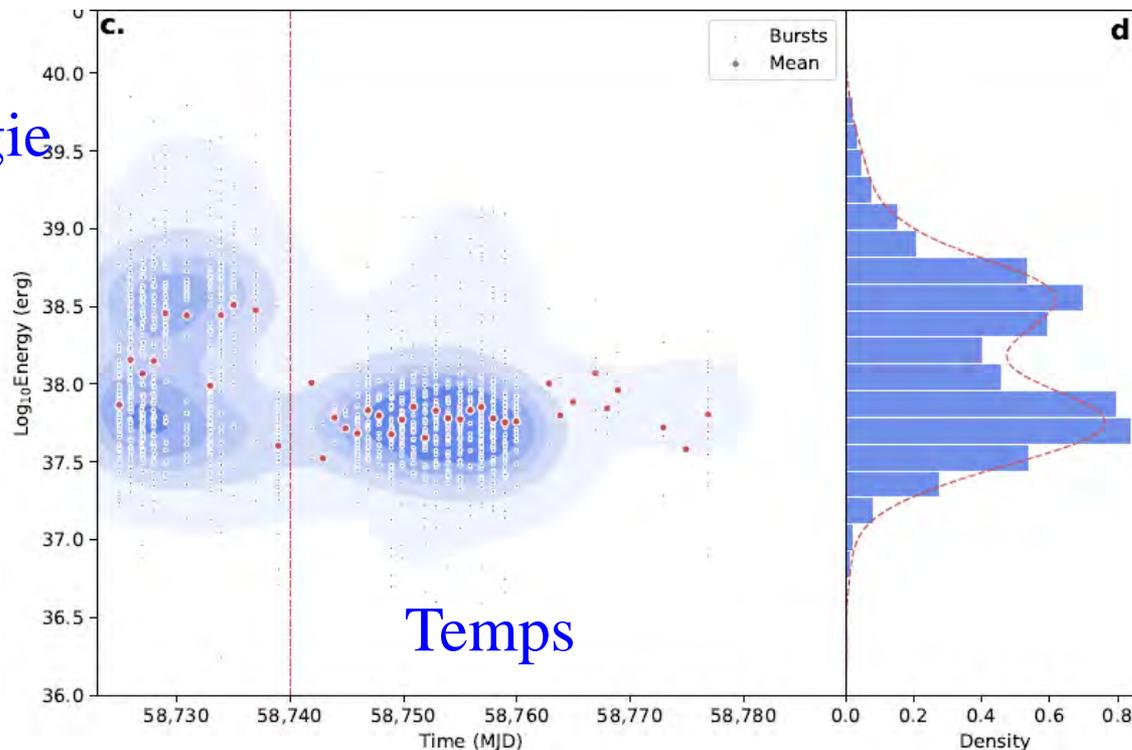
Détection de **1652 bursts** indépendants, avec un taux max de 122/heure, dans 59.5 heures, sur 47 jours

Le pic de luminosité est de $\approx 4.8 \cdot 10^{37}$ erg at 1.25 GHz

Distribution bimodale

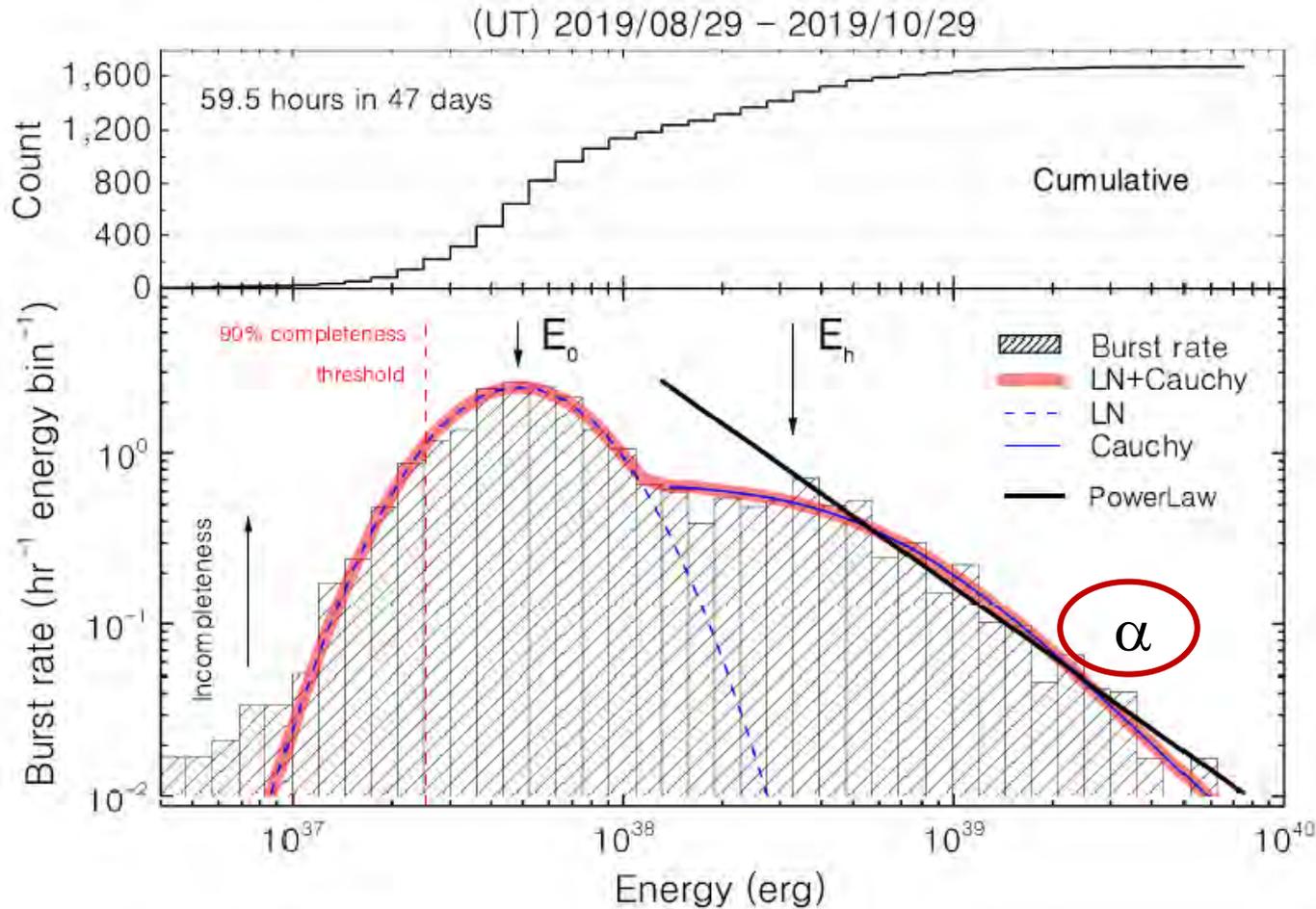
Aucune périodicité entre 1ms et 1000s

Energie



Temps

Sursauts de FRB121102



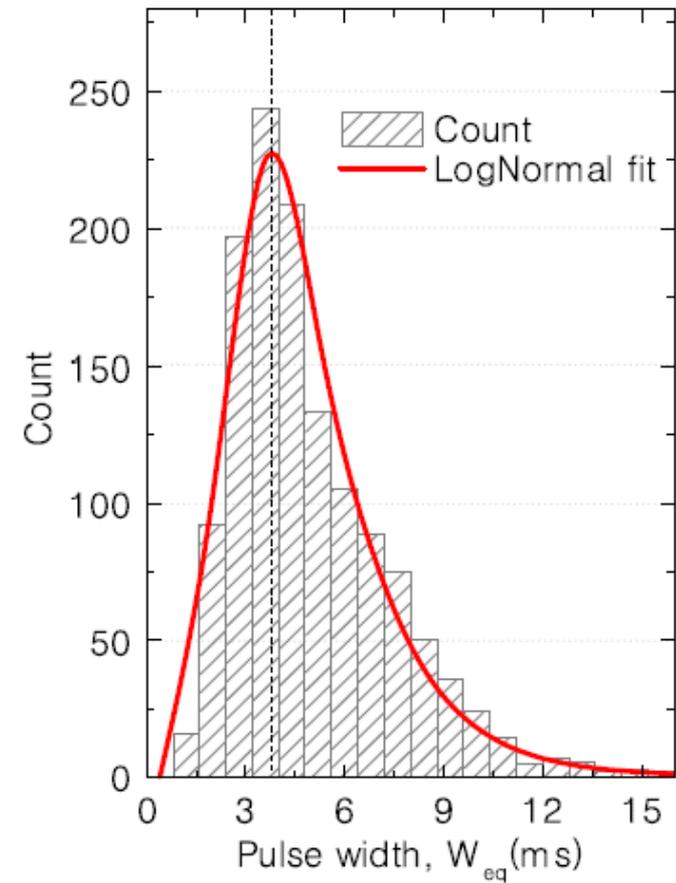
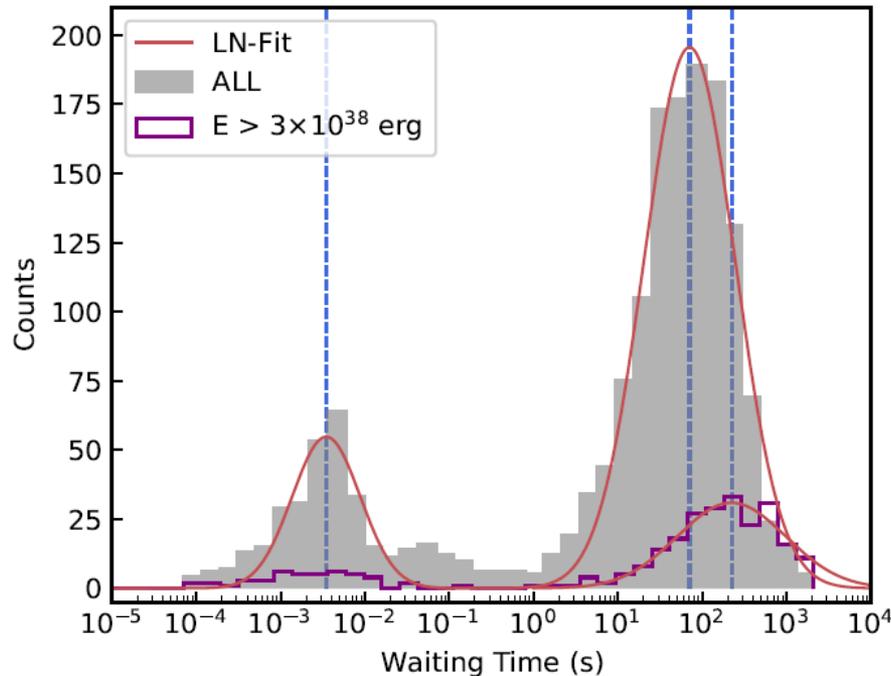
Basse E
Log-normal
→ Stochastique

→ Haute E
Cauchy, loi de
Puissance
 $\alpha=1.85$

Y aurait-il 2 mécanismes à l'oeuvre?

$z=0.193$, $DL=949$ Mpc

Sursauts de FRB121102



Burst de la même session
(même jour)

Log-normal distribution

Centrée en 70s

Haute E \rightarrow 220s

\rightarrow Stochastique

DM = 565 pc /cm³

Varie un peu avec le temps

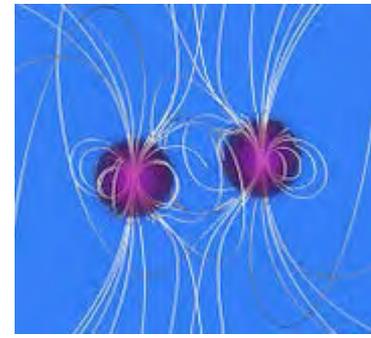
\rightarrow Défi pour les modèles
de maser synchrotron
Plutôt radiation de courbure

Autres modèles

Site listant le catalogue des modèles (*Platts et al 2019*)

https://frbtheorycat.org/index.php/Main_Page

Contenant 52 modèles!



Suivant plusieurs catégories: Répéteur ou non,
Étoiles à neutrons isolées ou binaires, effondrement en trou noir

Mécanismes de rayonnement: maser synchrotron,
ou rayonnement de courbure

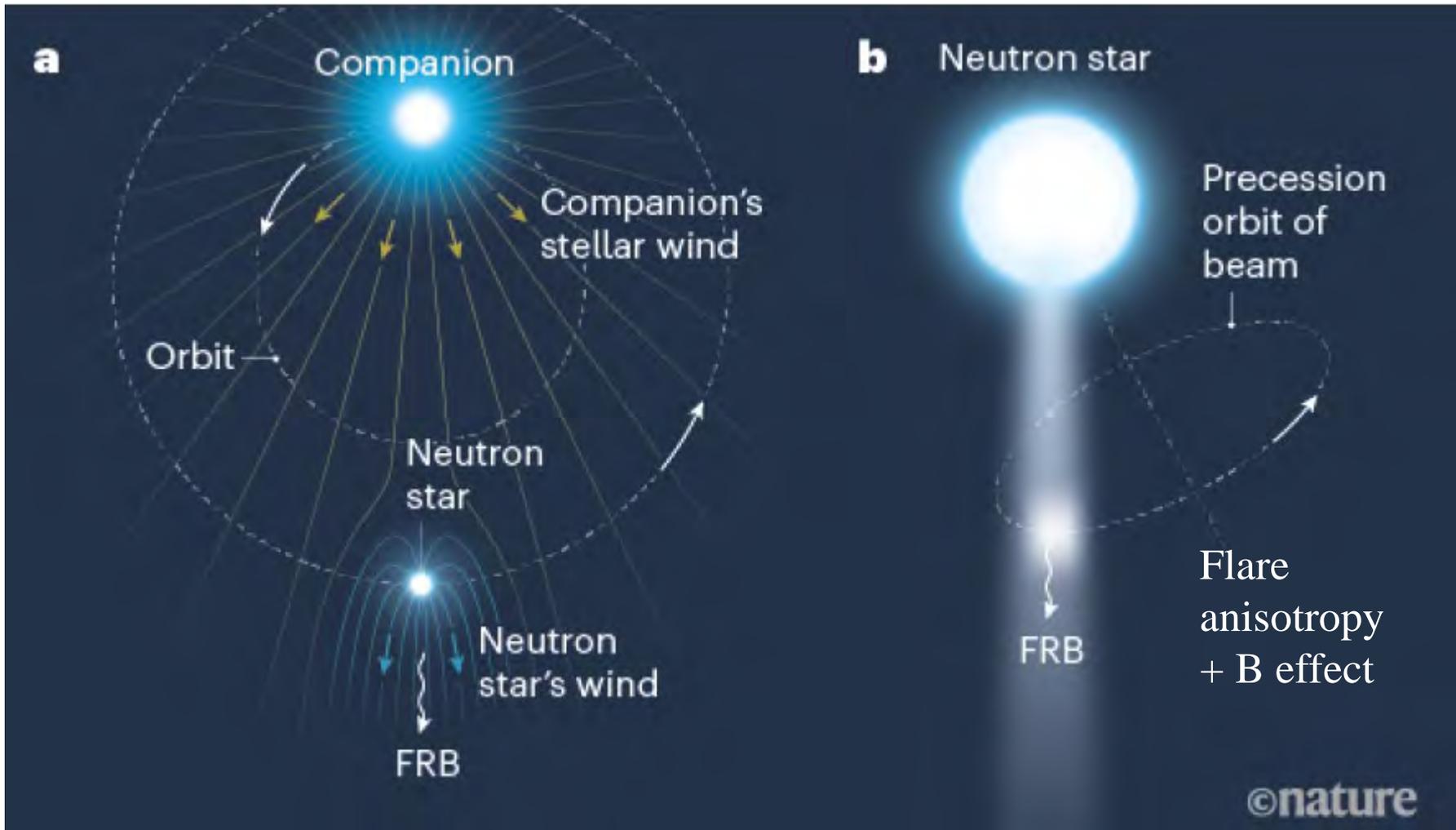


Les sursauts avec X, Gamma, comme GRB long (SN) ou court (fusion)
Et même des afterglows, comme le mécanisme synchrotron

Accrétion, trou noir, ou bien astéroïdes et comètes. Collisions (GC)

Binaire ou précession: FRB 180916

Systemes pouvant expliquer une périodicité de 16 jours



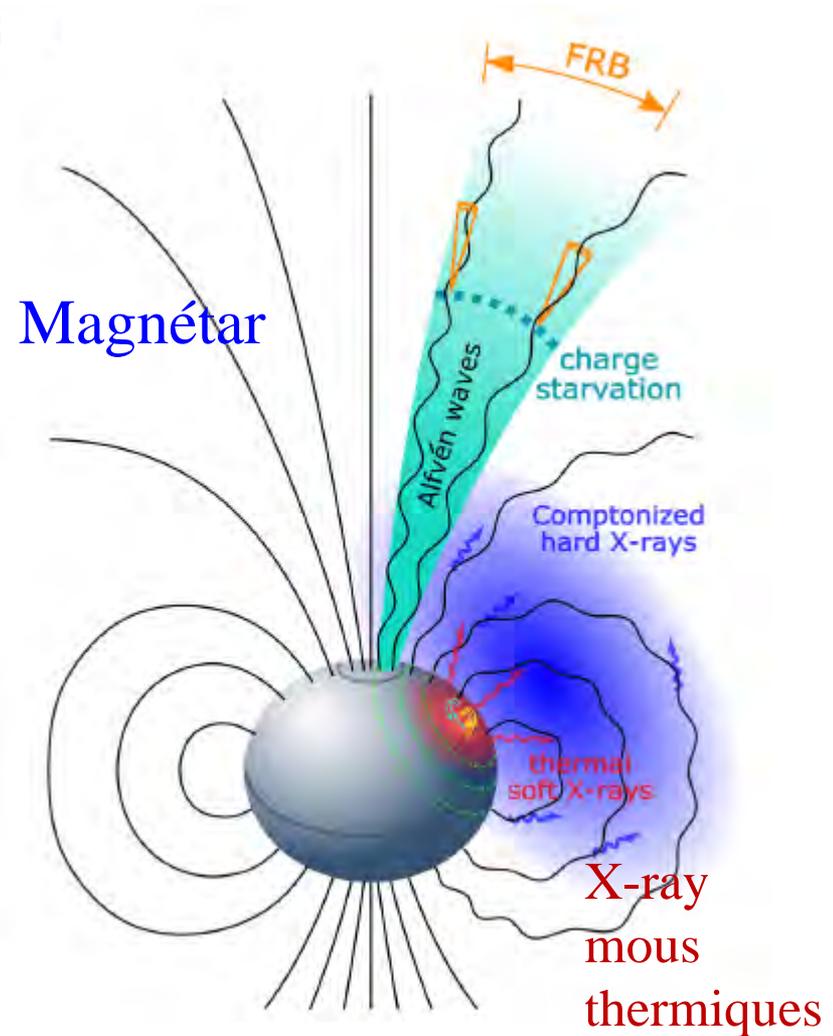
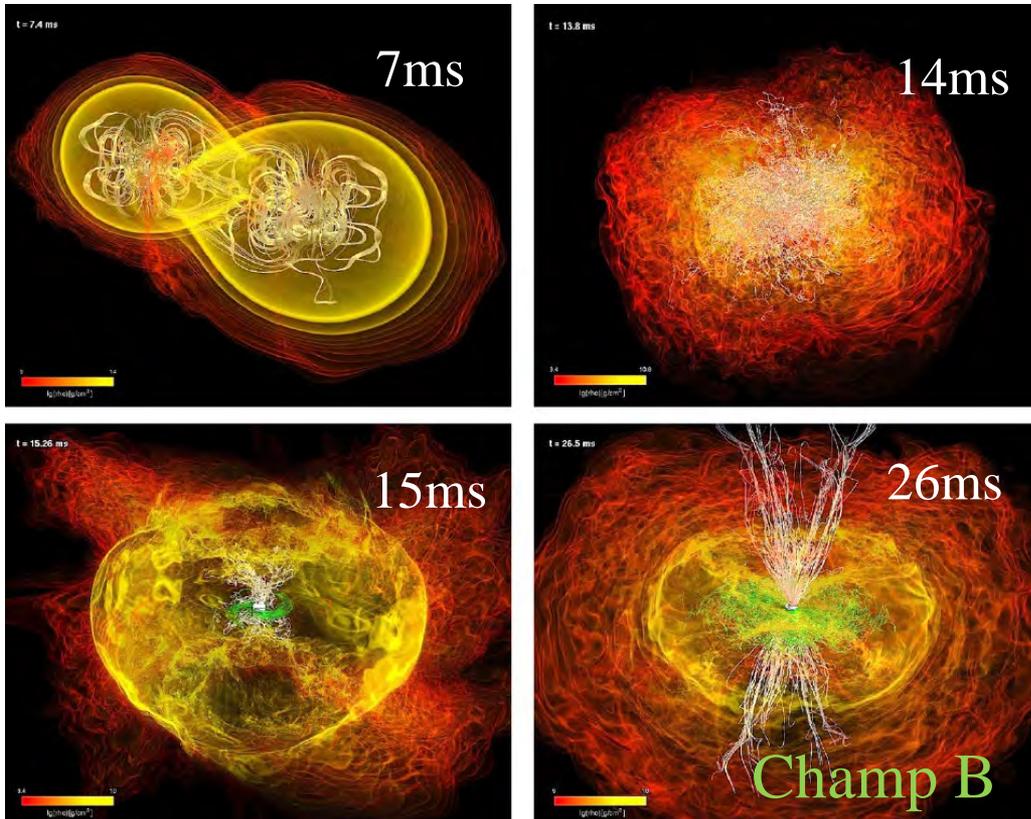
Zhang 2020

Levin et al 2020

Modèles « pulsars » ou GRB?

Simulation fusion ; d'étoiles à neutrons

NS-NS *Rezzolla et al 2011*

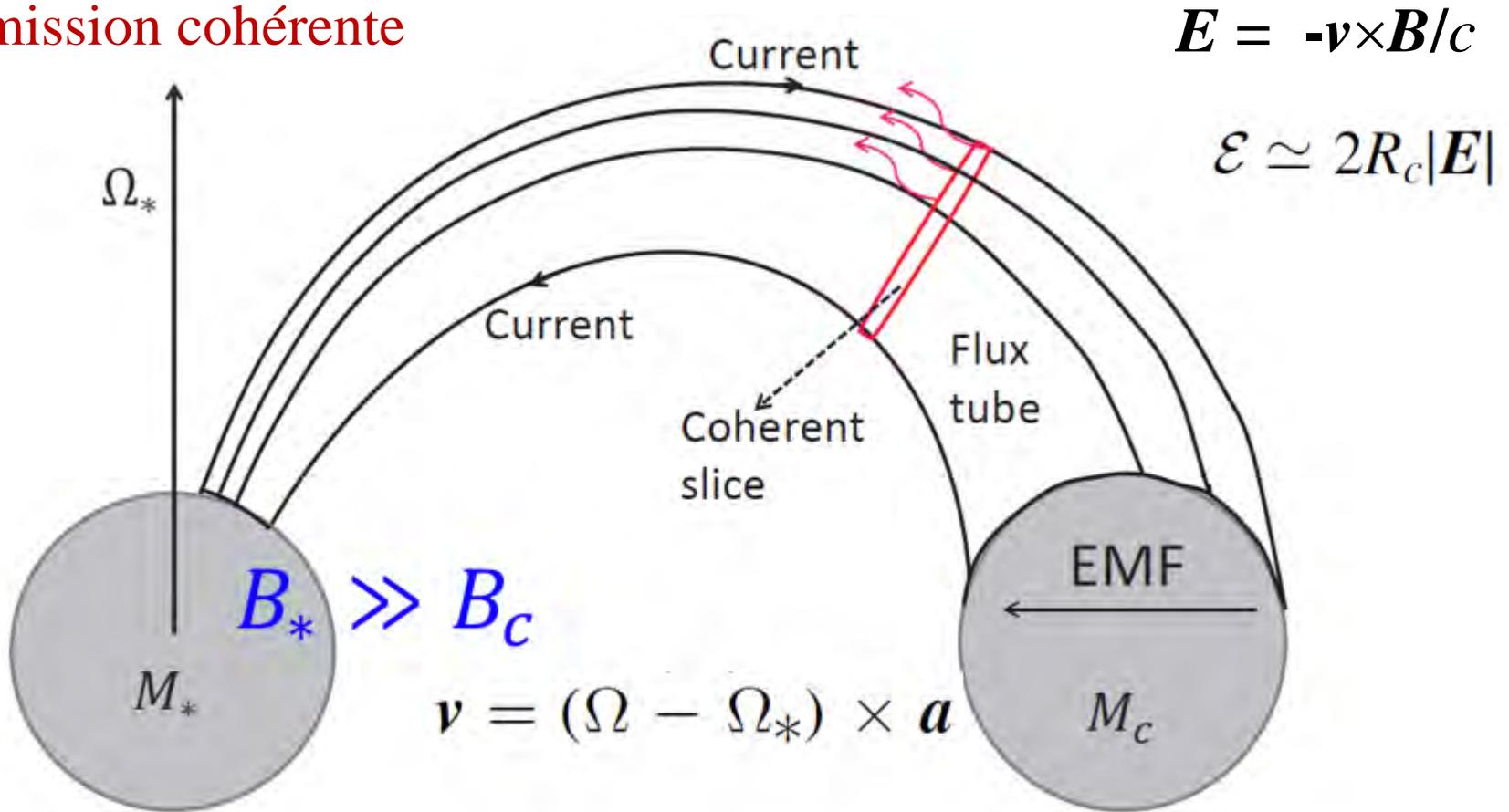


Peut expliquer FRB et GRB courts

Inspiral final de deux étoiles à neutrons

Particules accélérées relativistes en 1ms

Émission cohérente



Modèle à induction unipolaire

Wang, J., Yang et al 2016

Fréquence comparée des FRB

Taux des FRBs observés $\sim 2.8 / \text{Mpc}^3/\text{Myr} \sim 3000 / \text{Gpc}^3/\text{yr}$

Prévus 1000/jour/ciel-- **Bien supérieurs aux mergers**

NS-BH merger rate = $0.2 \text{ Mpc}^3/\text{Myr}$

BH-BH merger rate = $0.5 \text{ Mpc}^3/\text{Myr}$

Vitale 2021

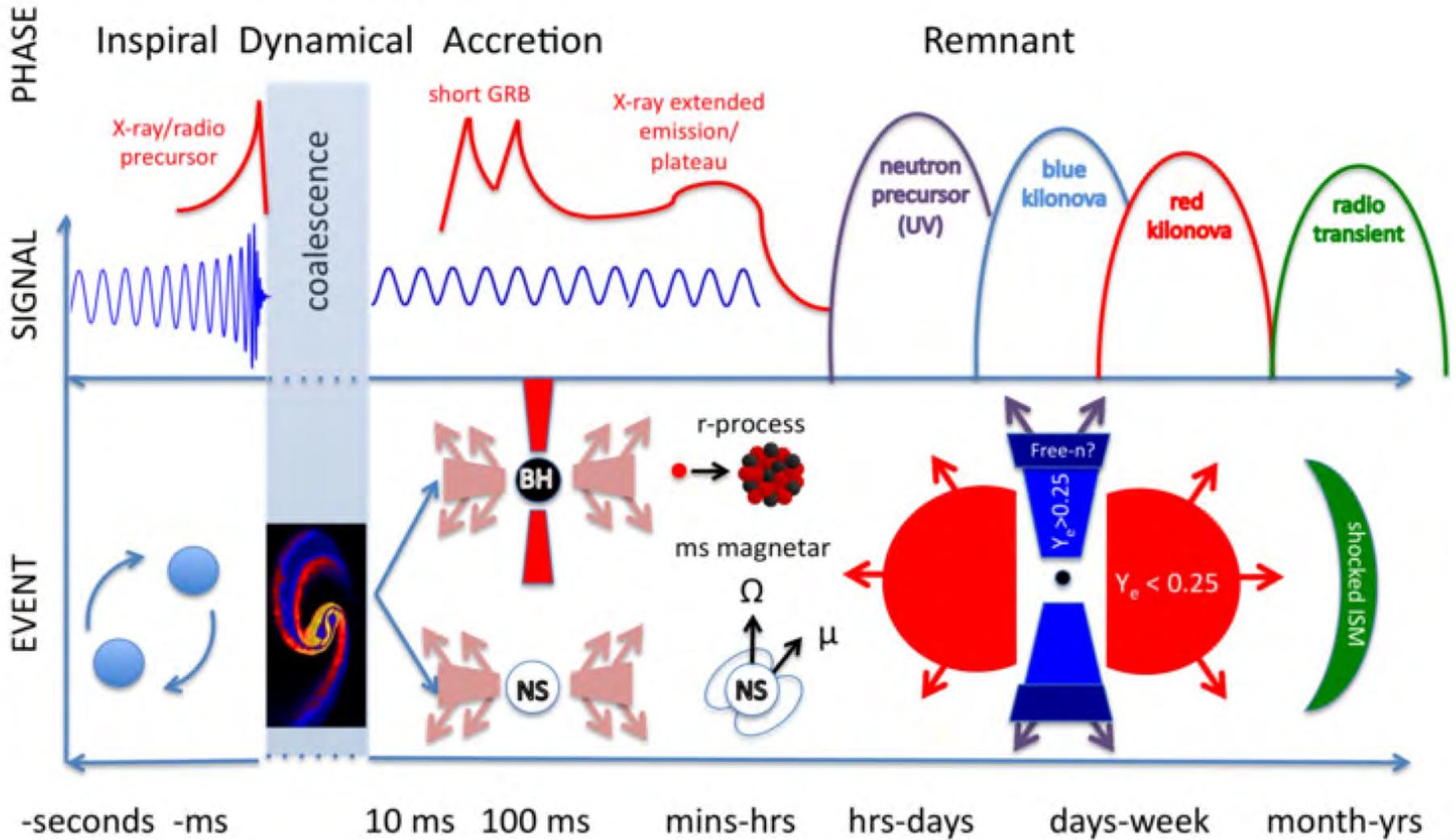
TABLE IV: Compact binary coalescence rates per Mpc^3 per Myr.^a

Source	R_{low}	R_{re}	R_{high}	R_{max}
NS-NS ($\text{Mpc}^{-3} \text{ Myr}^{-1}$)	0.01 [1]	1 [1]	10 [1]	50 [16]
NS-BH ($\text{Mpc}^{-3} \text{ Myr}^{-1}$)	6×10^{-4} [18]	0.03 [18]	1 [18]	
BH-BH ($\text{Mpc}^{-3} \text{ Myr}^{-1}$)	1×10^{-4} [14]	0.005 [14]	0.3 [14]	

Recherche de radio transients associés aux mergers GW

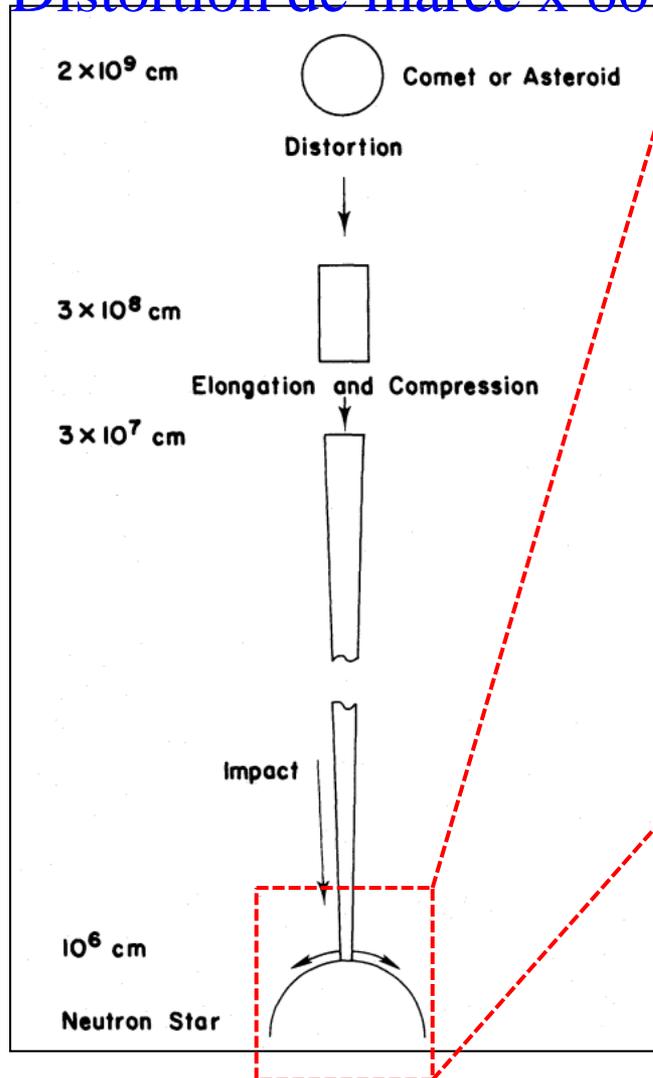
Dobie et al 2021 (ASKAP) Gourdji et al 2022 (LOFAR)

Multi-messenger: GWBs, FRBs & SGRBs

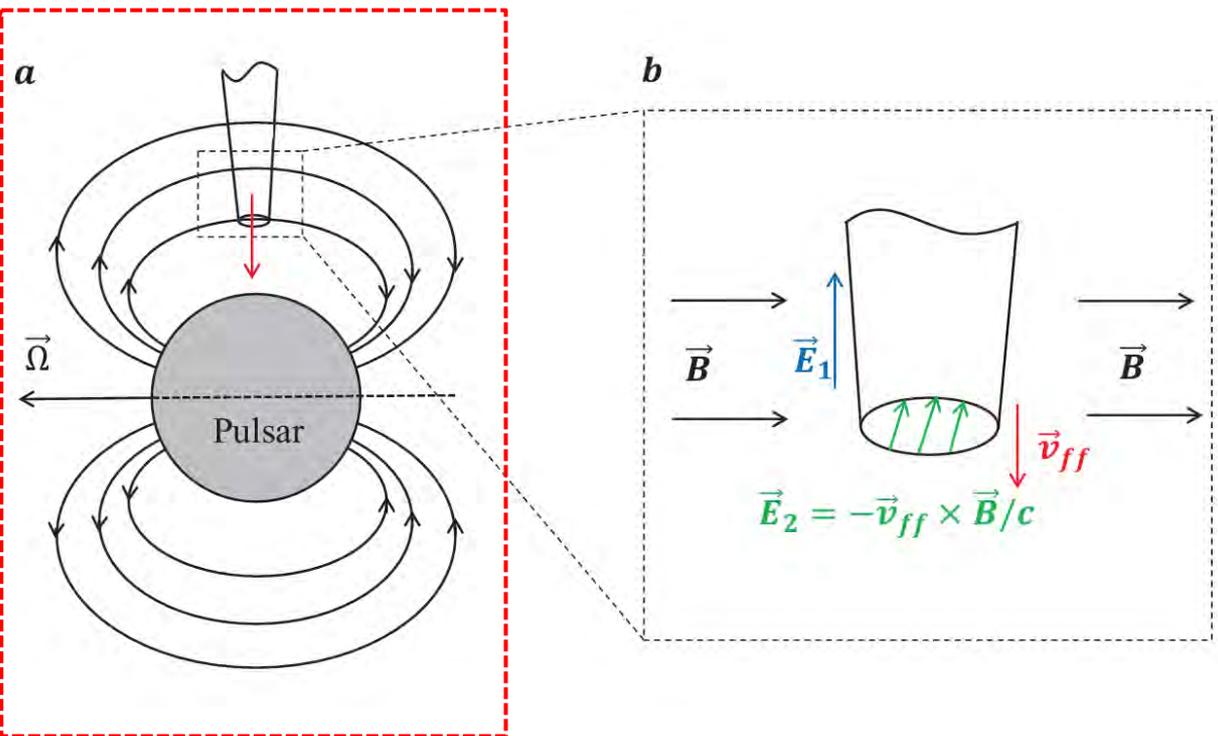


Collisions pulsars et astéroïdes

Distorsion de marée x 60



électrons de l'astéroïde accélérés en 1ms
 Rayonnement de courbure cohérent



Pour les répéteurs: rencontre entre un pulsar et la ceinture d'astéroïdes d'une autre étoile ($N_a \sim 5 \cdot 10^{10}$)

Impact pour un GRB

Colgate & Petschek 1981

Dai et al 2016

Ailes d'Alfven

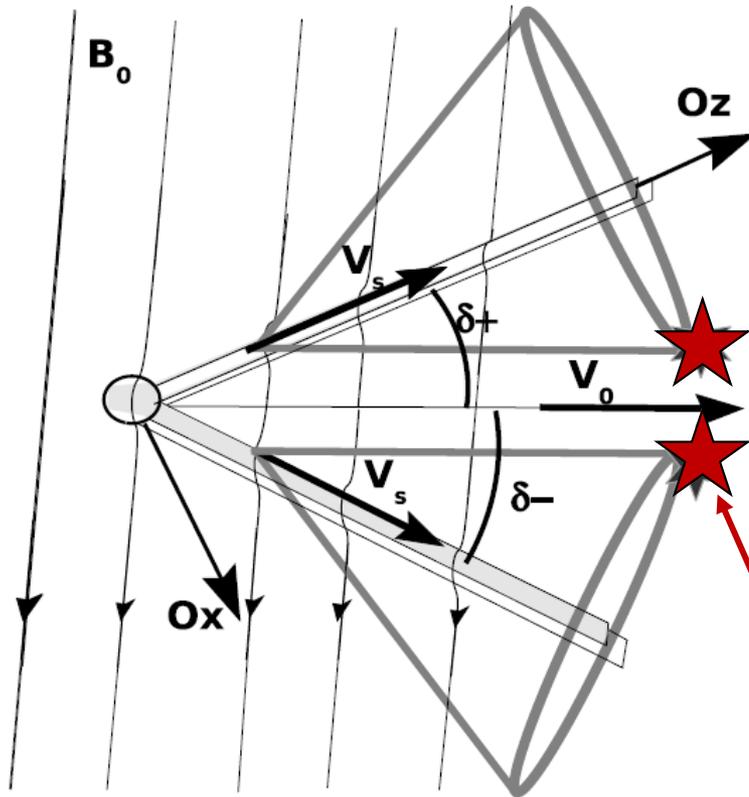
Un compagnon autour d'un pulsar
Planète, astéroïde, ou comète

Dans le vent relativiste du pulsar
Pas vraiment de choc, car $V_{\text{vent}} < V_a \sim c$

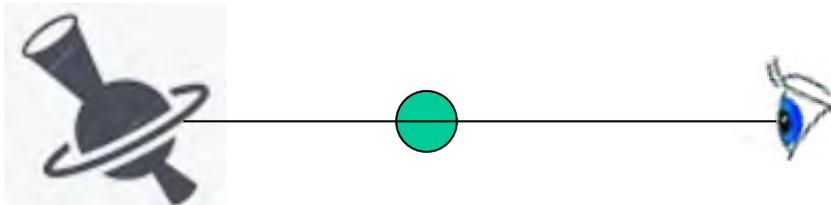
Ondes magnéto-soniques encore
plus rapides, pas de choc MHD

Courants électriques produits
Dans 2 ailes d'Alfven

Emission radio concentrées



Réception lorsque l'observateur est aligné

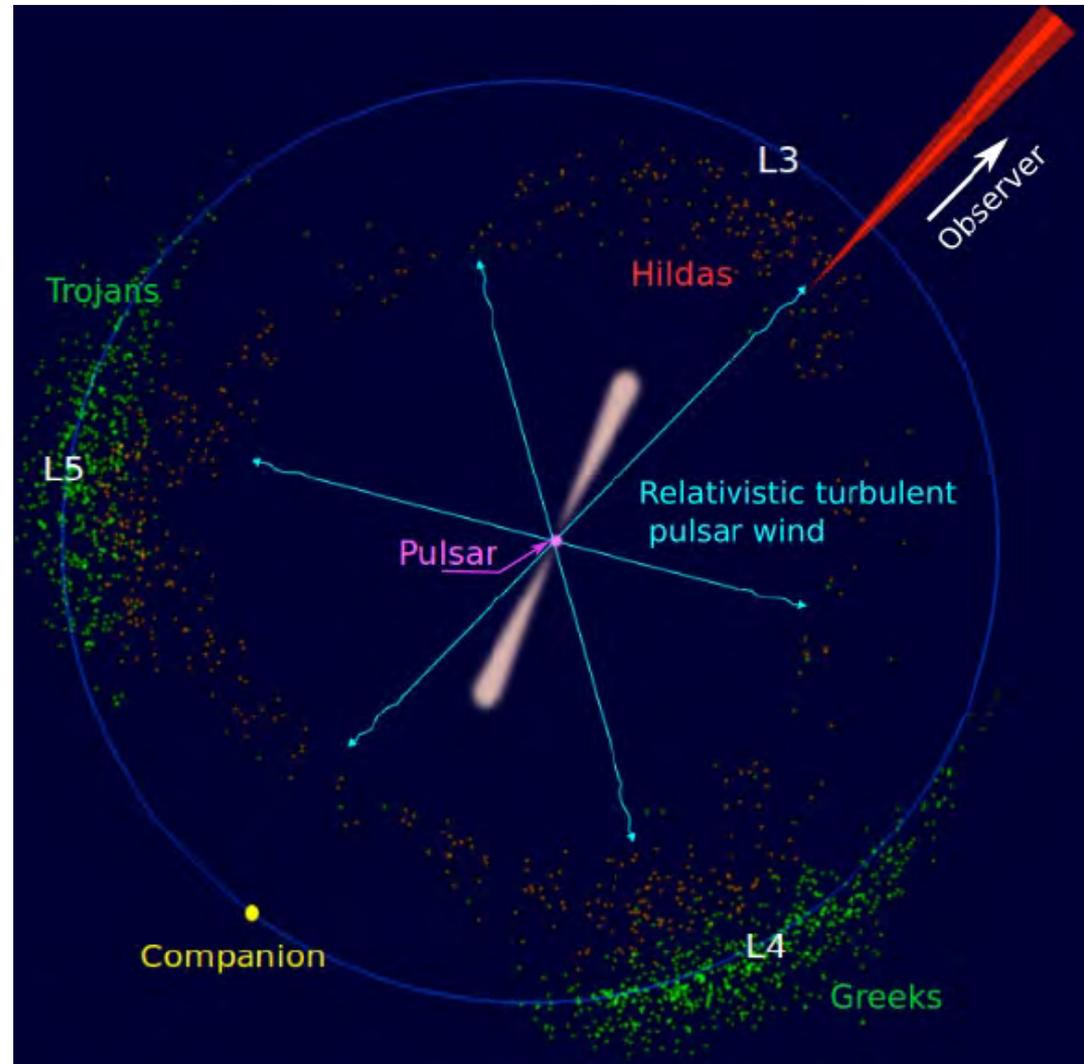


Ailes d'Alfven et instabilité maser cyclotron

Pour expliquer les FRB périodiques, tel **FRB 180916**, $P=16.35j$

Ceinture d'astéroïdes,
plongée dans le vent du
pulsar très magnétisé

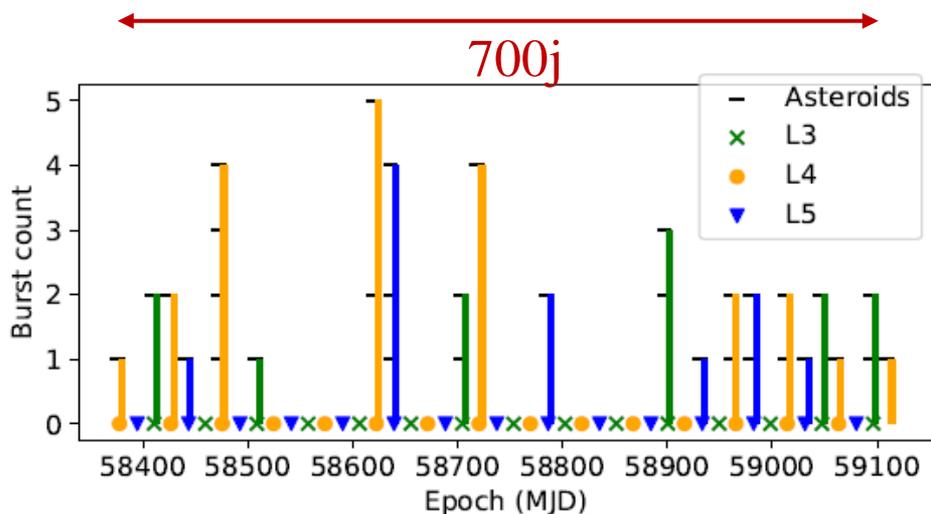
Un compagnon orbite avec
 $P= 3 \times 16.35 = 49j$, mais il y
a résonance avec les
astéroïdes aux points de
Lagrange stables
L3, L4 et L5
→ Quelques milliers
d'astéroïdes de taille 20km



FRB produits

Galaxie-hôte
D=0.15 Gpc

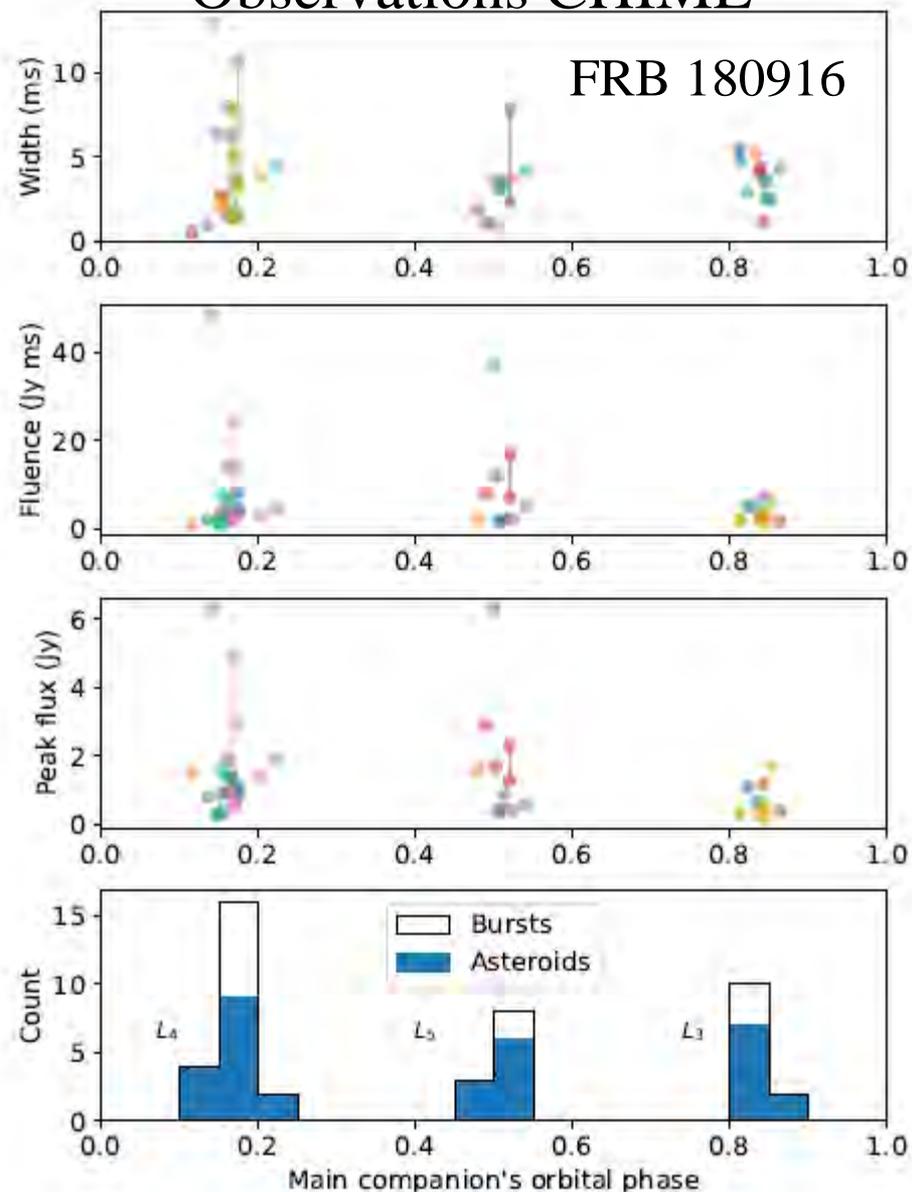
Structure en 3 sous-pulses,
étalés sur ~ 1 s, chaque pulse \sim ms



Chaque fenêtre dure 5j
Observations 1h15/fenêtre,
15min/jour, Total 13h15m

Voisin et al 2021

Observations CHIME



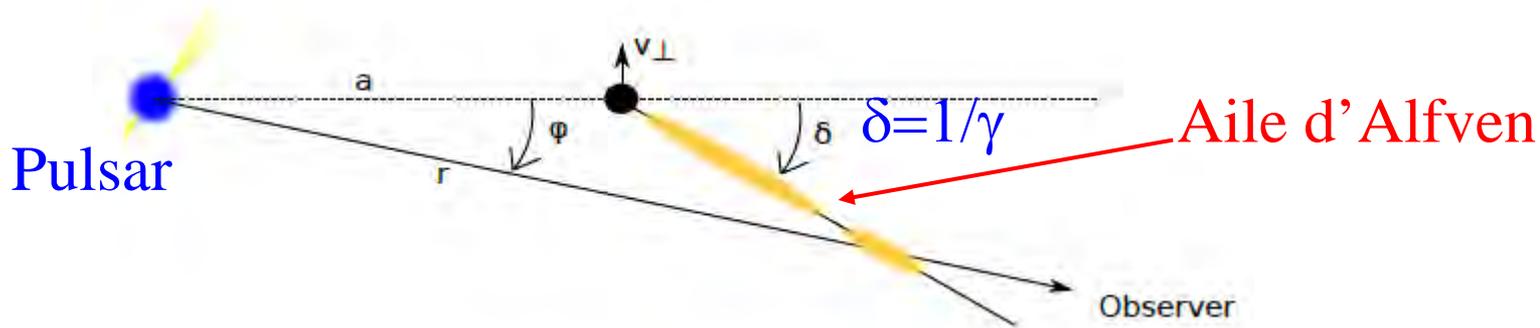
Phase sur 49j

Ailes d'Alfven des astéroïdes

Balayage de la ligne de visée

$V_{app} \sim 15\,000c$

$$\frac{\Delta r}{a} \sim \gamma \dot{\phi} \tau = 0.5 \left(\frac{\gamma}{10^6} \right) \left(\frac{\dot{\phi}}{10^{-4}} \right) \left(\frac{\tau}{5\text{ms}} \right)$$



Compagnon $7 \cdot 10^{-4} < M/M_{\odot} < 4 \cdot 10^{-3}$ (naine brune?)

La turbulence autour des astéroïdes, et la distribution rayon-fréquence explique naturellement la dérive des sous-pulses vers les basses ν , $\nu \propto \mathbf{B}^{\alpha} \propto \mathbf{r}^{-\alpha}$, et la bande totale en fréquence

Prédictions: jeune pulsar (qqes 10^3 ans). Les répéteurs devraient devenir silencieux après qqes dizaines d'années.

Ne peut pas expliquer le délai avec LOFAR (*Pleunis et al 2021*)

Durée de vie des astéroïdes

L'astéroïde (distance r) pourra subsister s'il peut rayonner toute l'énergie apportée par le vent du pulsar, avant de fondre, à $T_{\max} = 1400\text{K}$

$$L \frac{\pi R_a^2}{4\pi r^2} < 4\pi R_a^2 \sigma T_{\max}^4$$

Les Hildas ont $r=0.3$ AU, et leurs distribution va être tronquée (à grande excentricité) par évaporation

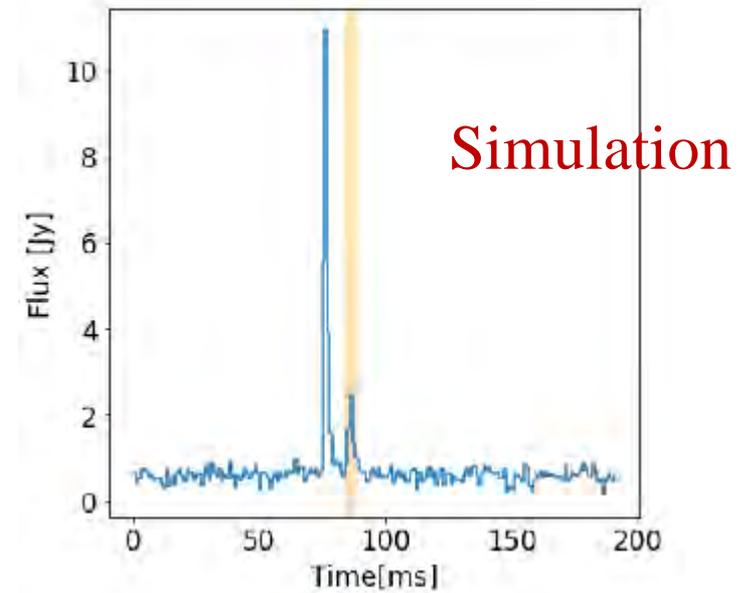
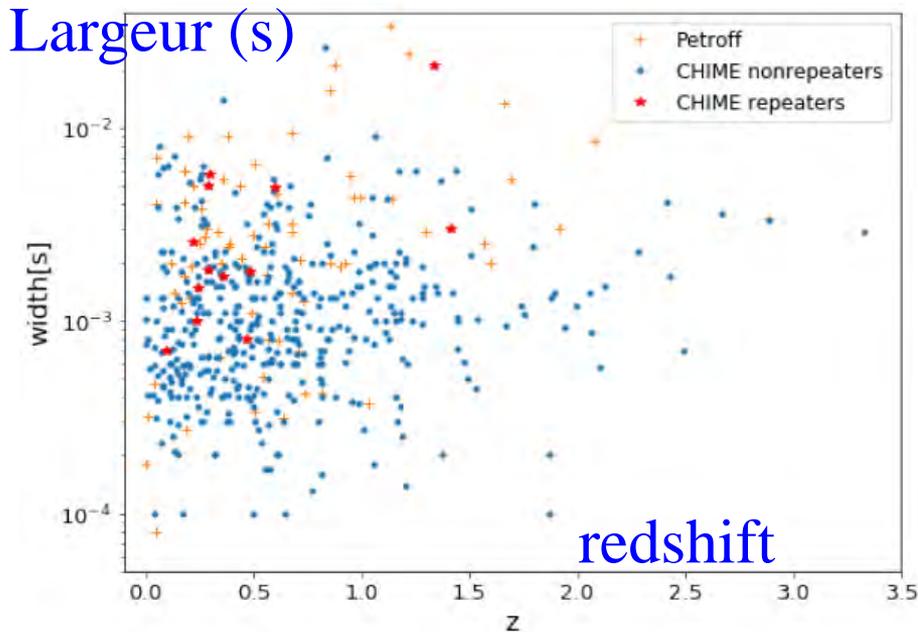


Contrainte sur les trous noirs primordiaux

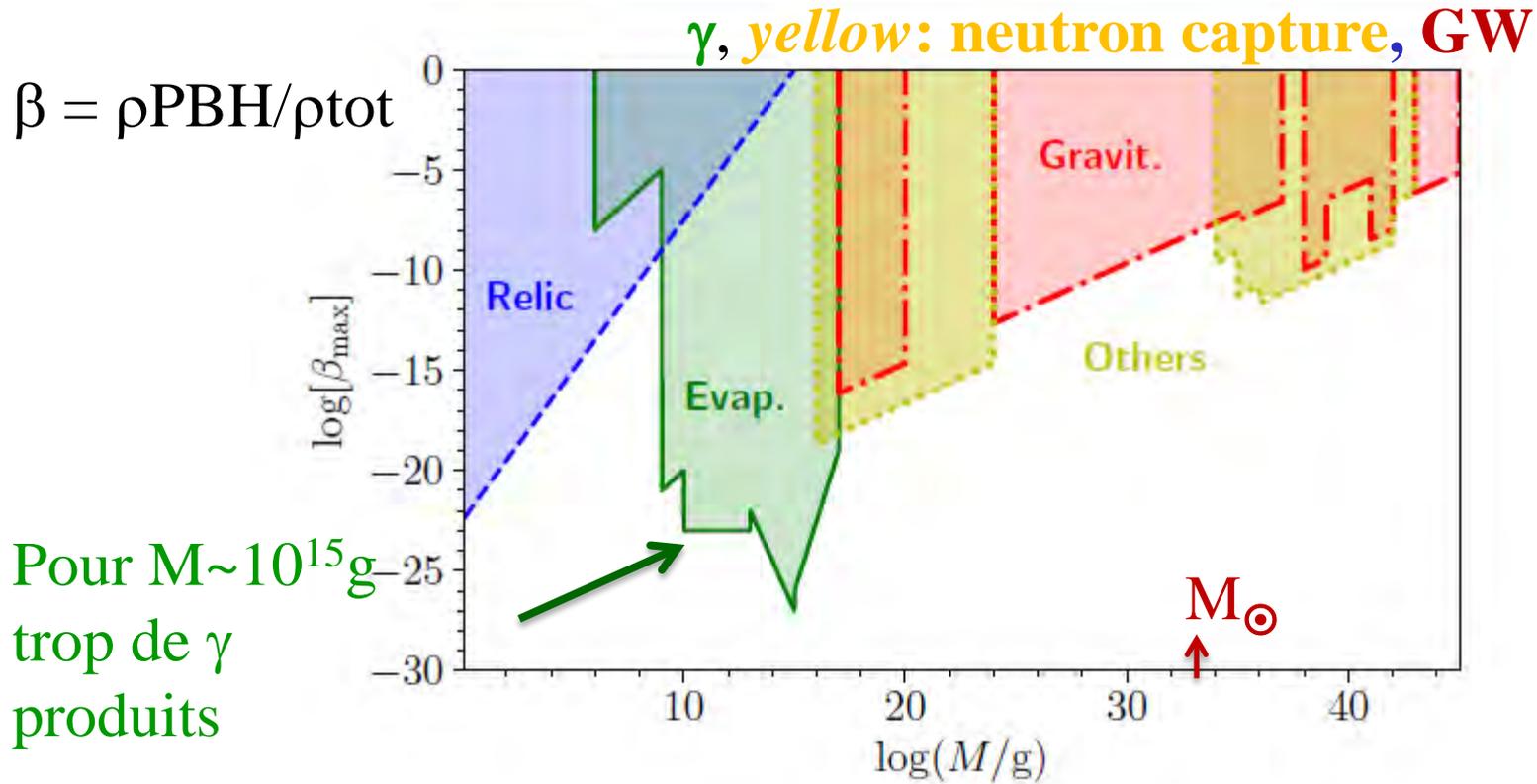
Les trous noirs primordiaux (PBH) ont été proposés pour constituer la matière noire, mais il existe déjà beaucoup de contraintes, de part les micro-lentilles gravitationnelles (LMC, bulbe..)

Les FRB très nombreux pourraient apporter de nouvelles contraintes pour les masses 10-100 M_{\odot} -- Dans le futur, avec plus de sensibilité

→ Recherche de FRB avec 2 images (écho)



Contraintes PBH de toute masse



Les PBH se forment à l'ère radiative, et peuvent être considérés comme non-baryoniques, équivalent à CDM

Mais leur masse est limitée par les expériences MACHOS, EROS

Les petites masses s'évaporent

Résumé

→ Le grand nombre de sursauts observés contraignent les modèles

→ Il doit exister plusieurs mécanismes
Soit effondrement (cataclysmique, blitzar)

→ Soit répéteurs (de plus en plus nombreux), magnétars

→ Mécanismes de rayonnement cohérent: **maser synchrotron**
dans les chocs, loin de l'étoile à neutron, soit **radiation de courbure**

→ Un magnétar dans la Voie lactée: utile, mais pas général

→ les plus nombreux, de population vieille (M81-GC)

