

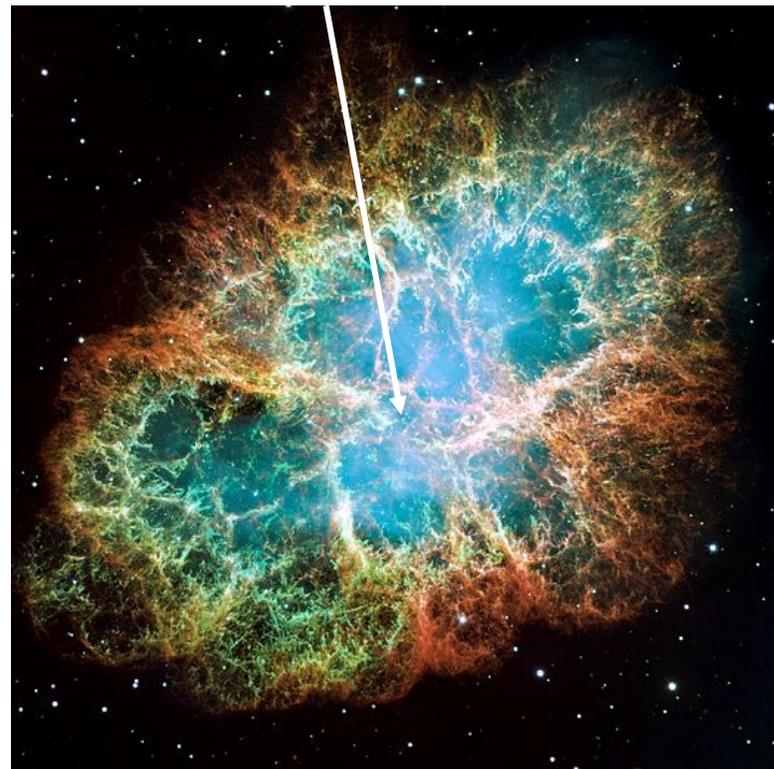


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

ETOILES et TROUS NOIRS

Pulsar du Crabe



Etoiles à neutrons et pulsars

Françoise Combes



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

Plan de l'exposé

1- Les étoiles à neutrons

Distribution des masses, rayons

Physique de l'intérieur

2- Les pulsars

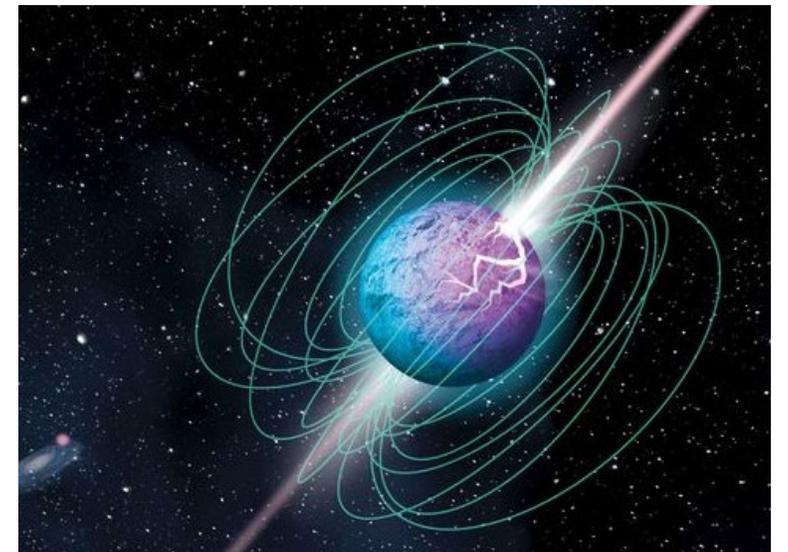
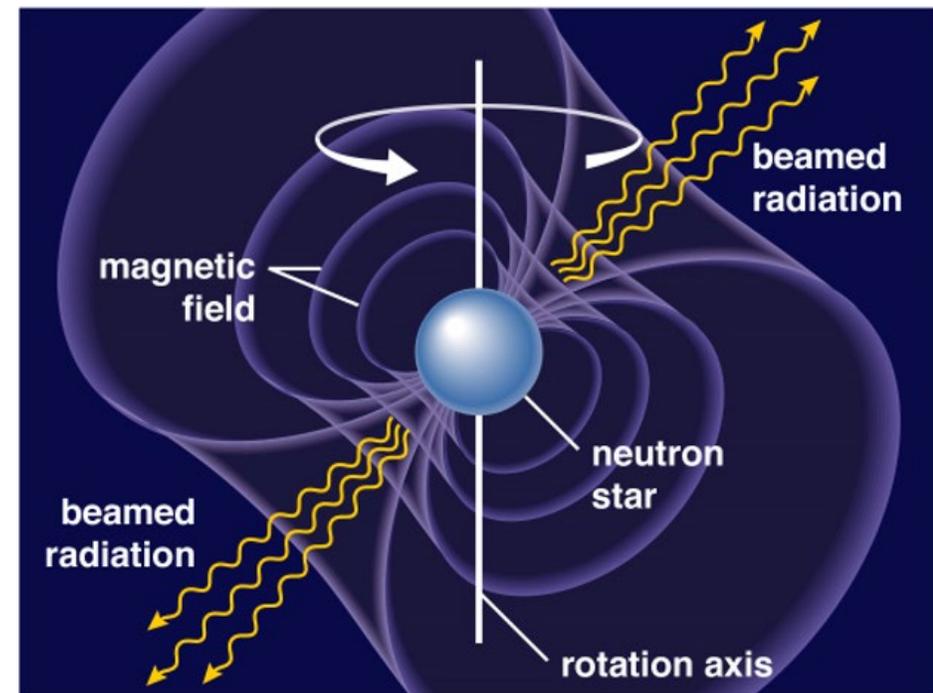
Distribution des périodes

Evolution, Binaires X

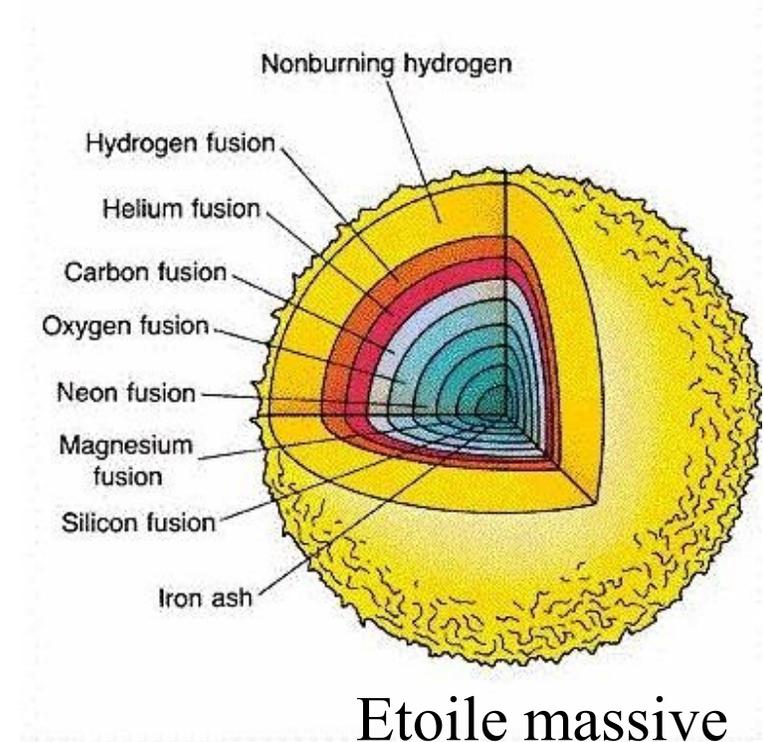
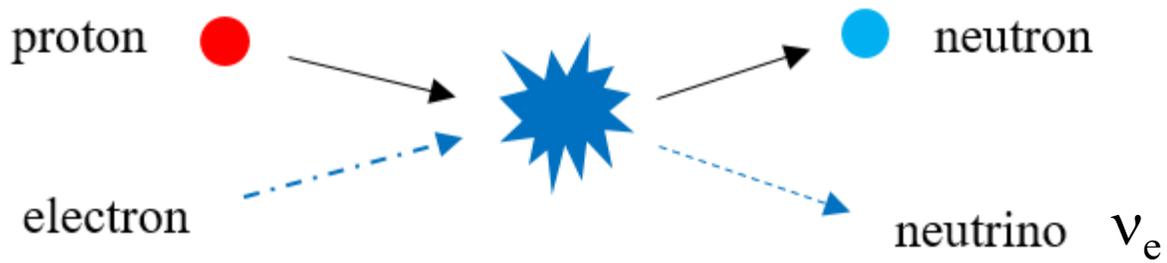
3- Magnétars, FRB, sGRB

Etoiles à fort champ B

Sursauts X, γ , radio



Formation d'une étoile à neutron



Etoile massive
 $M > 8 M_{\odot}$

Quand la masse du coeur de fer excède la limite de $1.4 M_{\odot}$ il s'effondre. Energie gravitationnelle \rightarrow énergie thermique
La matière s'écrase jusqu'à des densités nucléaires, protons et electrons se combinent pour former des neutrons

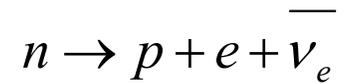
Le résultat est une étoile à neutrons: entre 1.4 et $3 M_{\odot}$, mais dans 10 km de rayon $\rightarrow 10^{15} \text{g/cm}^3$ 10^9 tonnes / cm^3
L'énergie libérée souffle le reste de l'étoile en une explosion de supernova de type-II



Neutrons: stables ou non?

James Chadwick découvre le neutron en 1932

Dans le vide du laboratoire, durée de vie des neutrons ~ 15 min:



Matière très dense, neutrons stables, car les protons & électrons de basse énergie ont leurs niveaux tous occupés

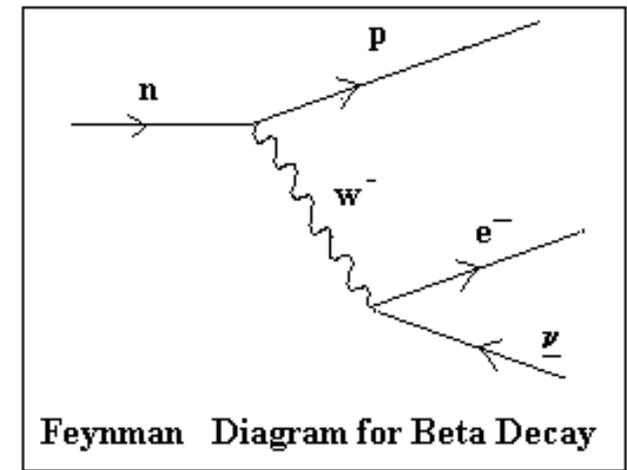
Equilibre chimique interaction faible:

$$n \leftrightarrow p + e$$

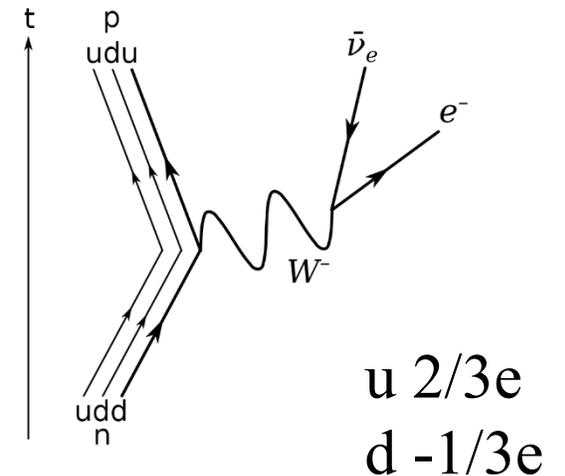
$$\Rightarrow \mu_n = \mu_p + \mu_e$$

A la densité nucléaire, les neutrons coexistent avec un plus petit nombre ($\sim 1\%$) de protons & électrons

Etoiles denses: la gravité maintient les neutrons compressés

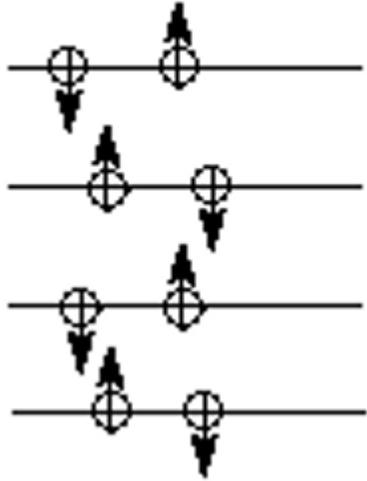


Taille des nucléons
 ~ 1 fermi 10^{-15} m
→ Interaction forte



Les niveaux d'énergie des neutrons

Spin 1/2

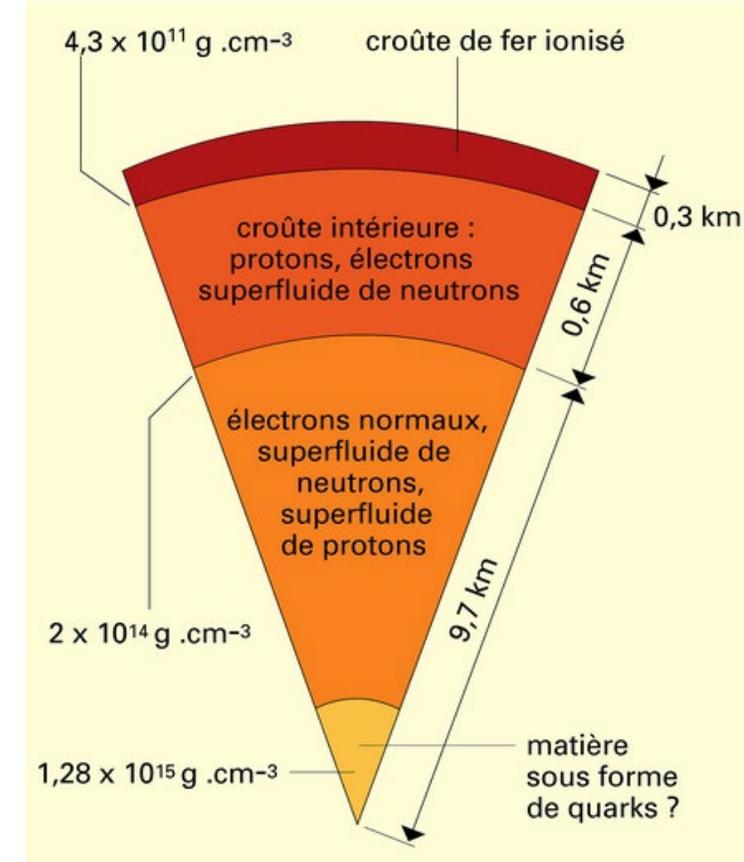
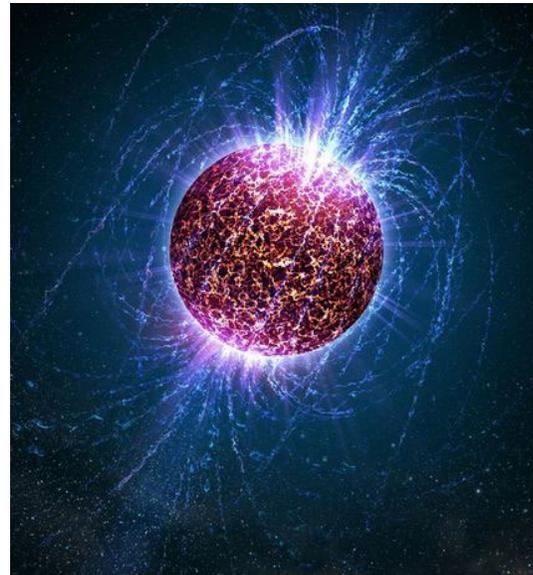


Chaque niveau ne peut être occupé que par 2 particules de spin opposé

Les neutrons ont donc une énergie, indépendante de la température

→ La pression de Pauli compense la gravité

Gaz de neutrons
dégénéré: tous les niveaux les plus bas sont occupés
La position des neutrons est figée

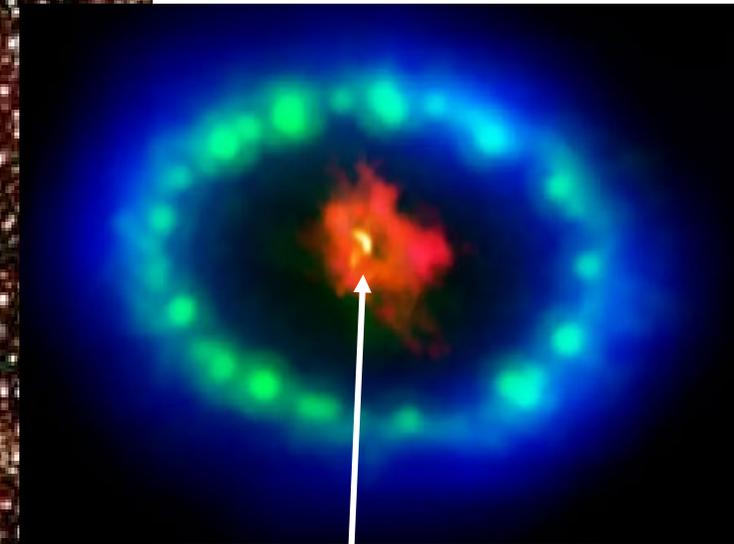


Selon la distance au centre: **purée de quarks (u, d, s?)**, fluide de neutrons, puis neutrons, protons électrons
Ions + électrons dégénérés
Liquide en surface de ~ 300m

Limite de Chandrasekhar en 1931, après la statistique de Fermi-Dirac des années 1920
Baade & Zwicky en 1934 → l'explosion des SN II vont se terminer en étoiles à neutrons



Indebetouw et al 2014



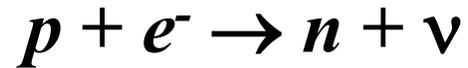
Etoile à neutrons
découverte enfin!
avec ALMA

Supernova 1987A (23 Février 1987) dans le Grand Nuage de Magellan
avant et après

Effondrement

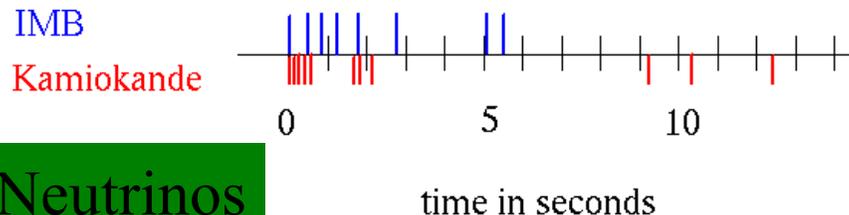
Effondrement du coeur de l'étoile

→ densité énorme



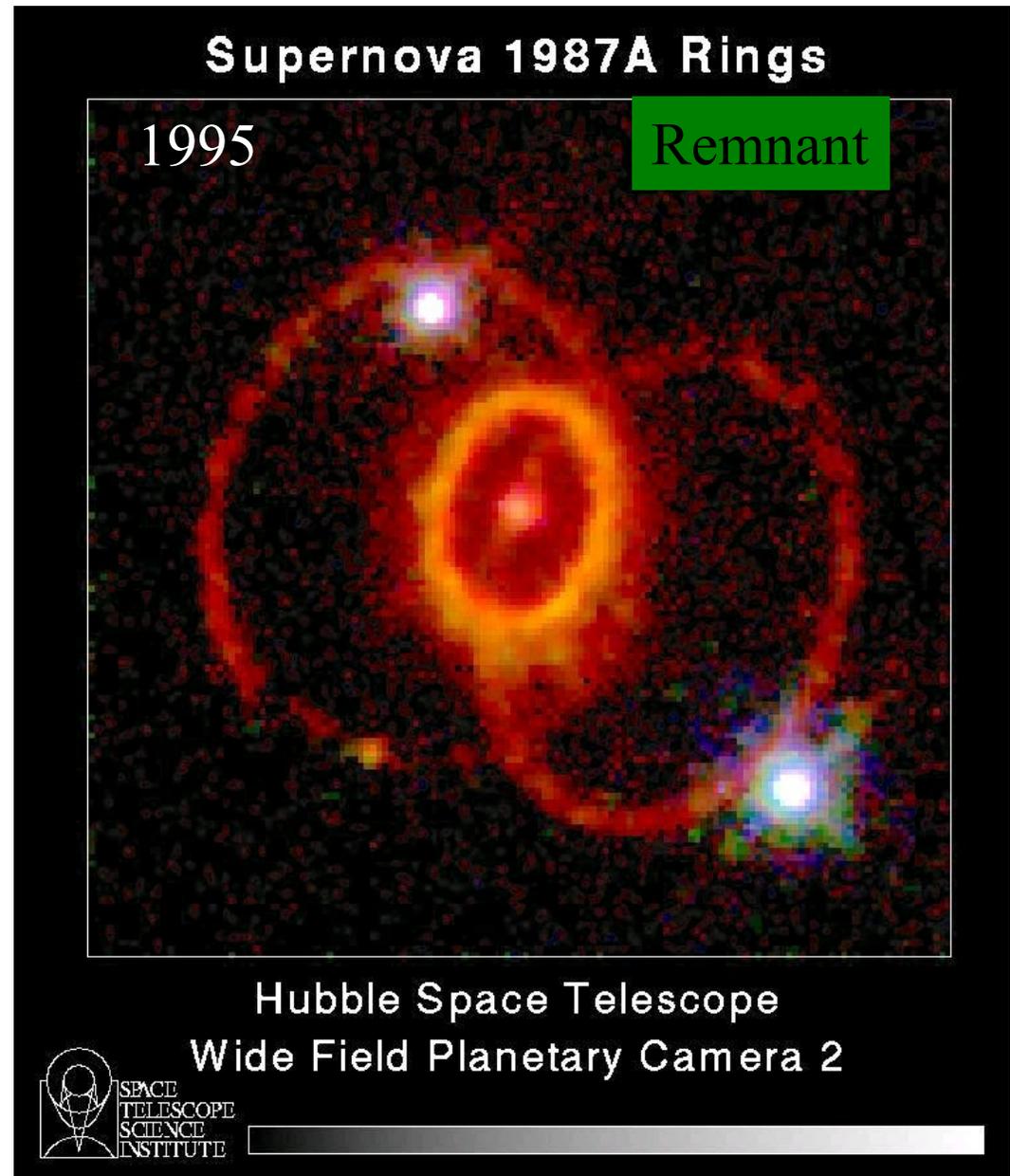
Les neutrinos (ν) ont été détectés 2h
avant la lumière de SN 1987A

Dans le Grand Nuage de Magellan



Neutrinos

Mais: pas d'étoile à neutrons?



Neutrinos lors de SN 1987a

Kamiokande en 1987

Précurseur de super-Kamiokande

Détecte 25 neutrinos venant du LMC

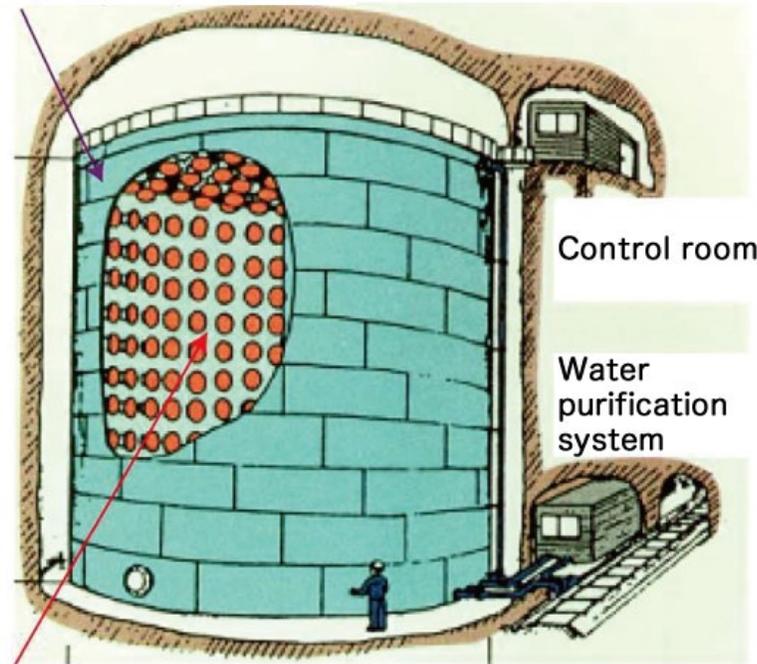
SN1978A

Était visible à l'œil nu

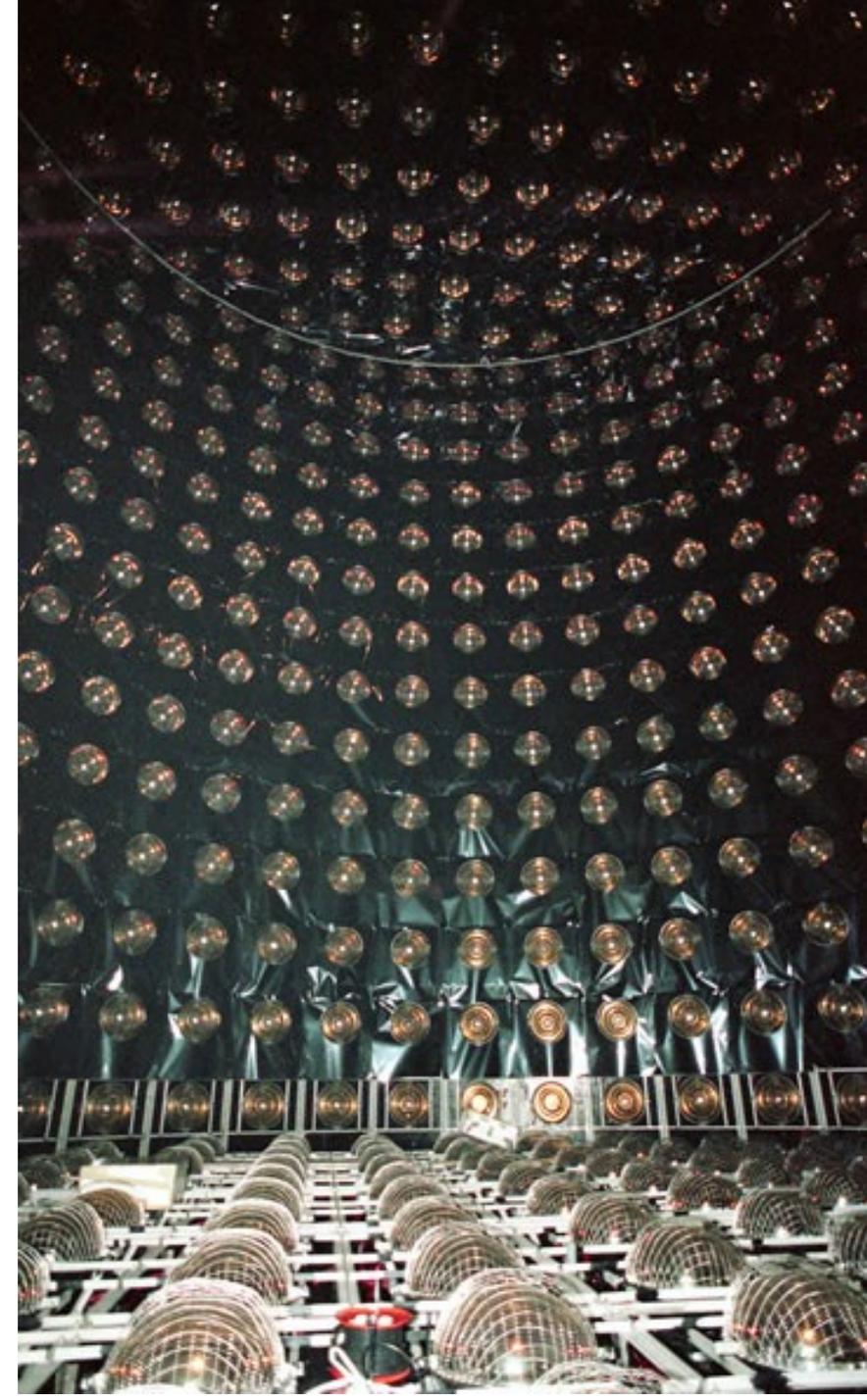
$L = 10^8 L_{\odot}$

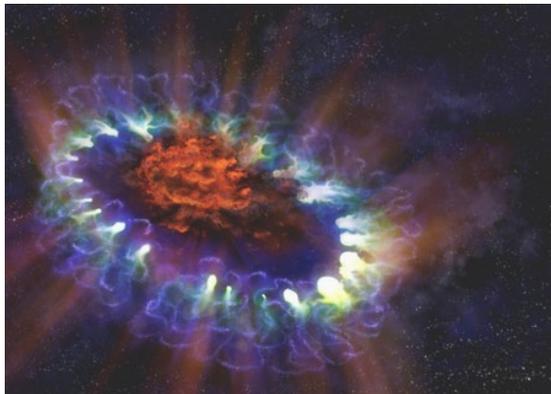
La première après celle
de Kepler en 1604

Water tank
Diameter 16 m
Height 16 m

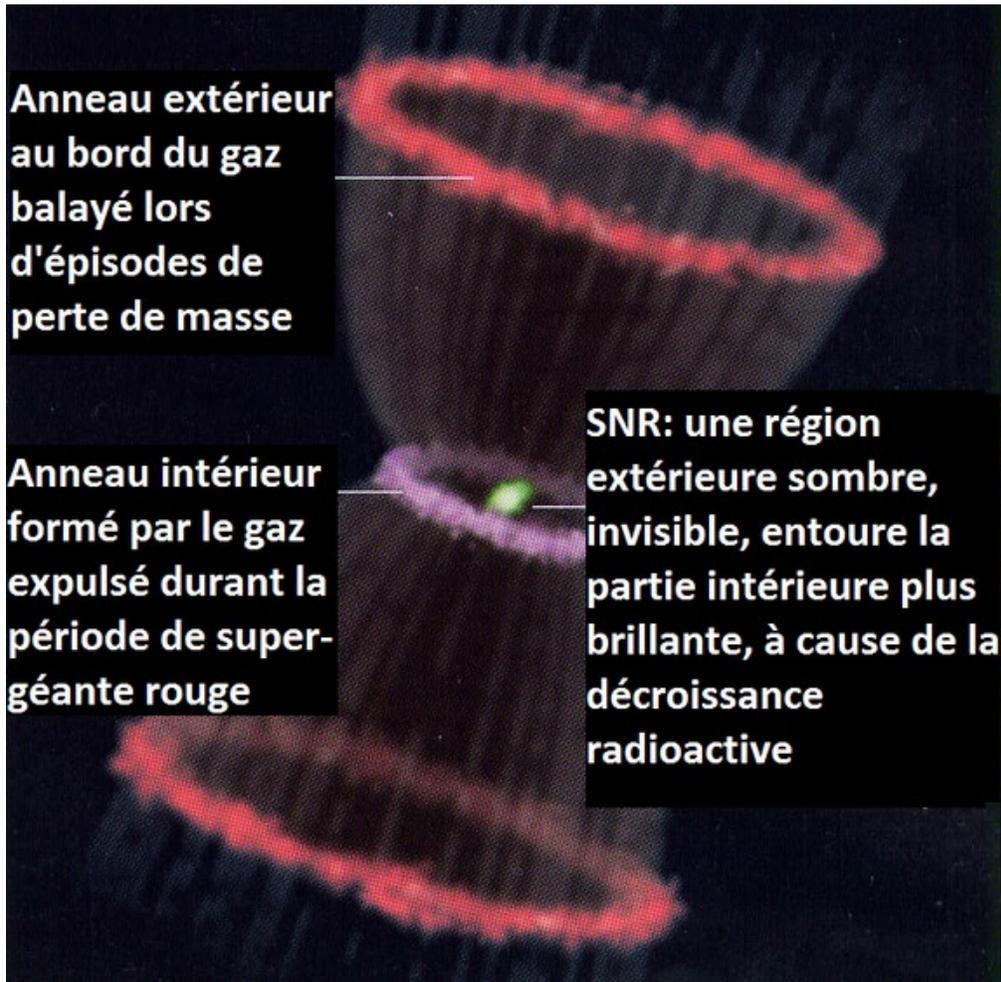


1000 20 inch
Photomultiplier Tubes





Vue d'artiste

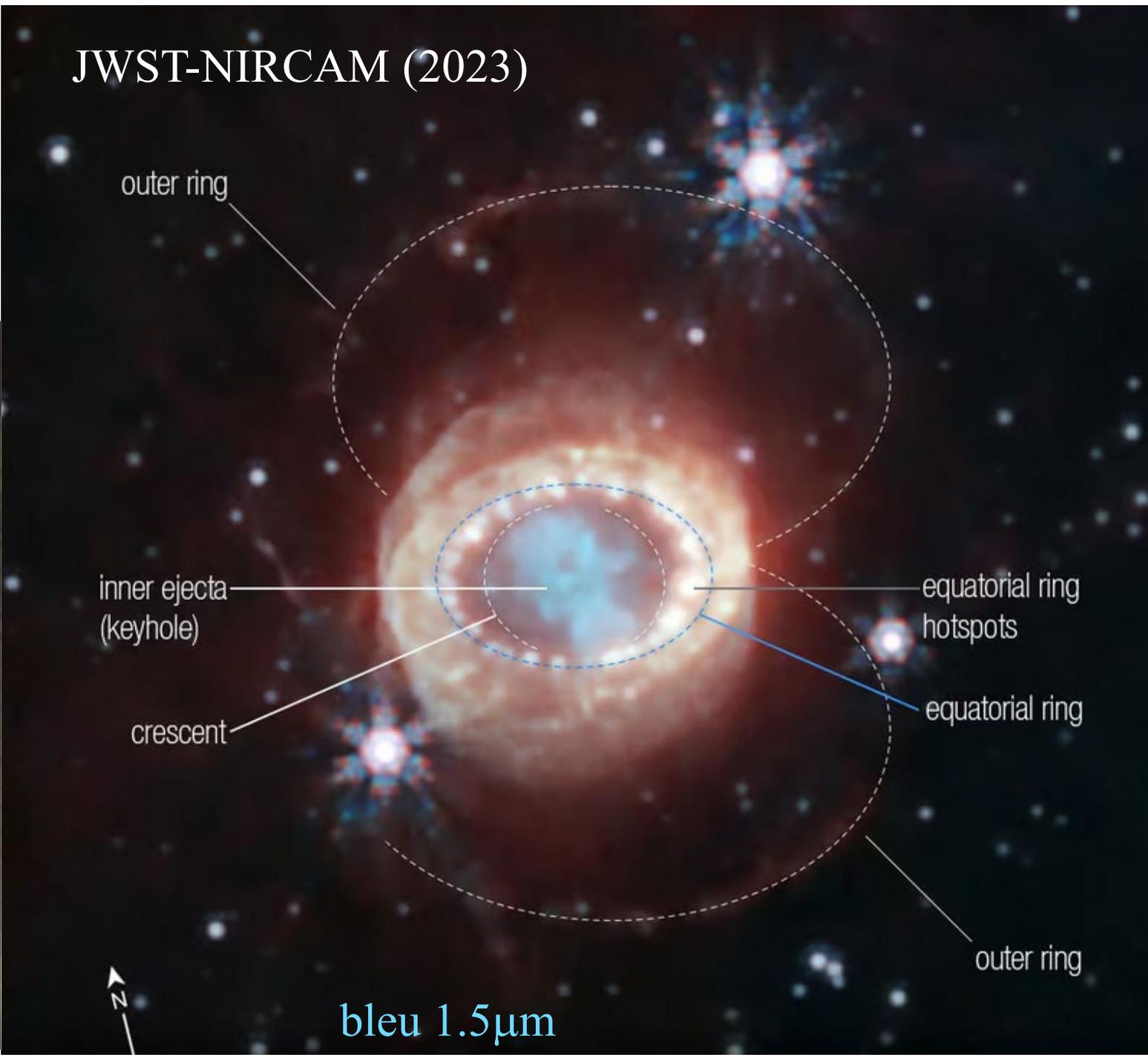


Anneau extérieur
au bord du gaz
balayé lors
d'épisodes de
perte de masse

Anneau intérieur
formé par le gaz
expulsé durant la
période de super-
géante rouge

SNR: une région
extérieure sombre,
invisible, entoure la
partie intérieure plus
brillante, à cause de la
décroissance
radioactive

JWST-NIRCAM (2023)



outer ring

inner ejecta
(keyhole)

crescent

equatorial ring
hotspots

equatorial ring

outer ring

bleu 1.5 μ m

La découverte des pulsars (1967)



Des km de papier pour enregistrer le signal !



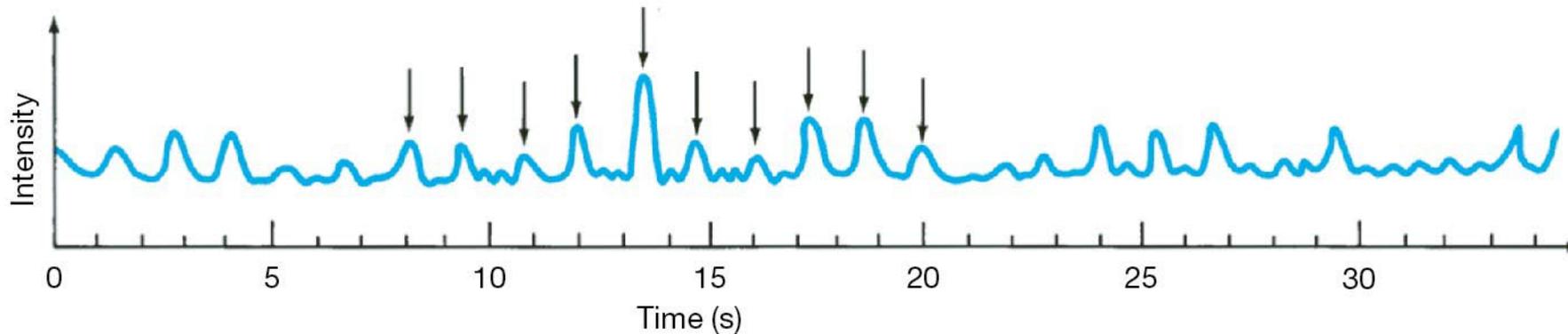
Réseau antennes radio,
Cambridge, UK

3.7m, 81MHz

2048 dipoles

130x130m

Nobel 1974: Antony Hewish



Jocelyn Bell



Caractéristiques des pulsars

Pulsars = étoiles à neutrons,

Rayon $\sim 10\text{km}$, Masse $\sim 1-2 M_{\odot}$,

Densité centrale $>$ noyaux (10^{15}g/cm^3)

Gravité de surface 10^{11} g ,

Champ magnétique $B=10^{12}\text{ G}$

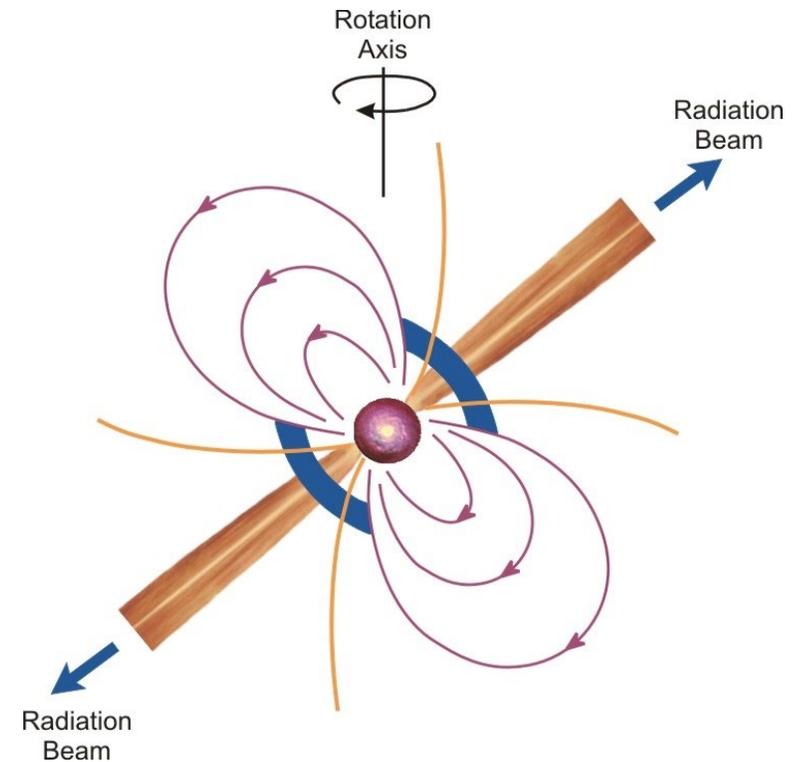
3000 pulsars « normaux » connus

Periodes 1sec (pulsar du Crabe 0.03), après explosion SN

puis descend à **milli-seconde (MSP)**, ré-accélération dans les binaires X

Seul, le pulsar vit 100Myr, avec $B=10^{12}\text{ G}$ Dipole rayonnant \rightarrow freinage $dP/dt < 10^{-15}$

Système Binaire: le compagnon peut transférer masse et moment angulaire, accélérant le pulsar. B est tombé à 10^8G , et la durée de vie est maintenant plusieurs Gyrs.

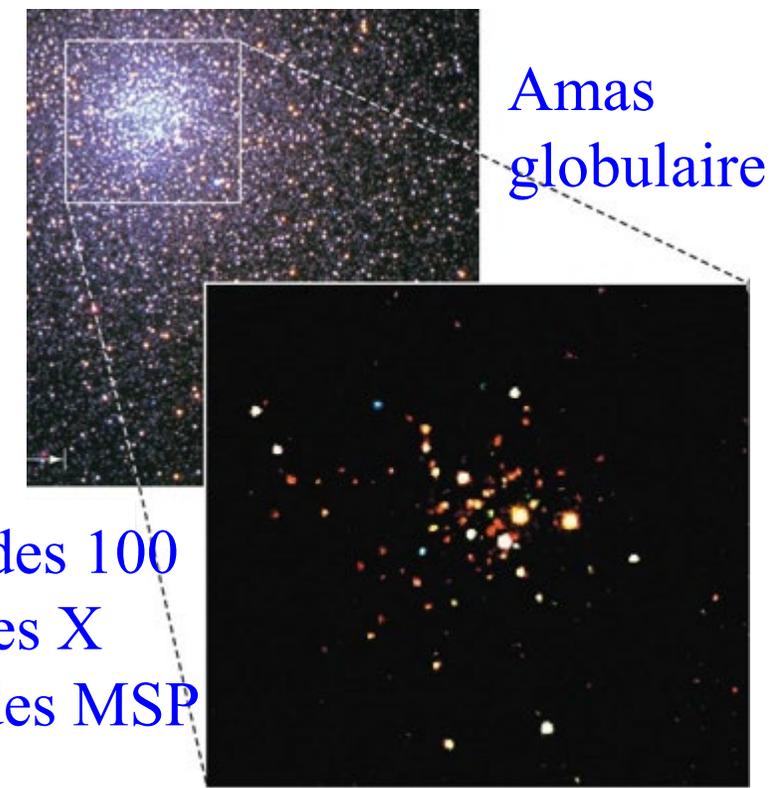


Pulsars milli-seconde et binaires

La plupart des pulsars ont des périodes entre 0.03 et 0.3 s

Au début **des années 1980, pulsars MSP**

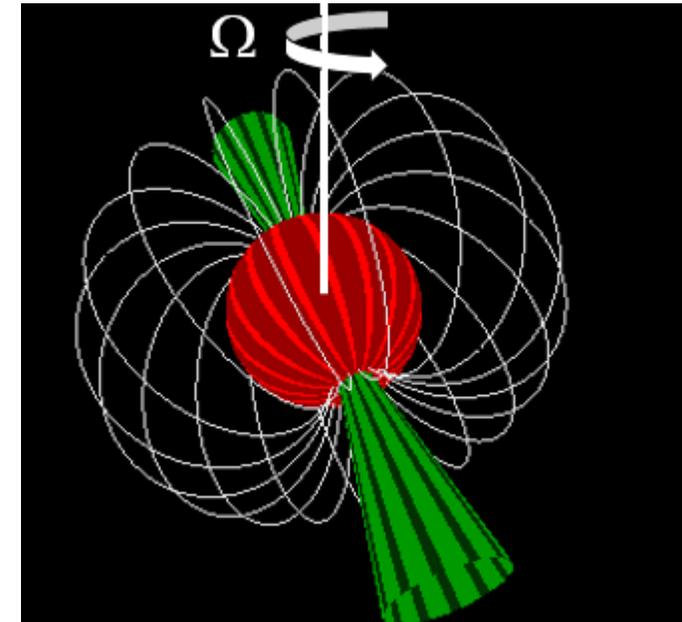
→ pulsar milliseconde, accéléré par le gaz accrété



Le gaz de l'étoile compagne tombe en spiralant

La matière arrive parallèle à la surface

Etoile à neutrons



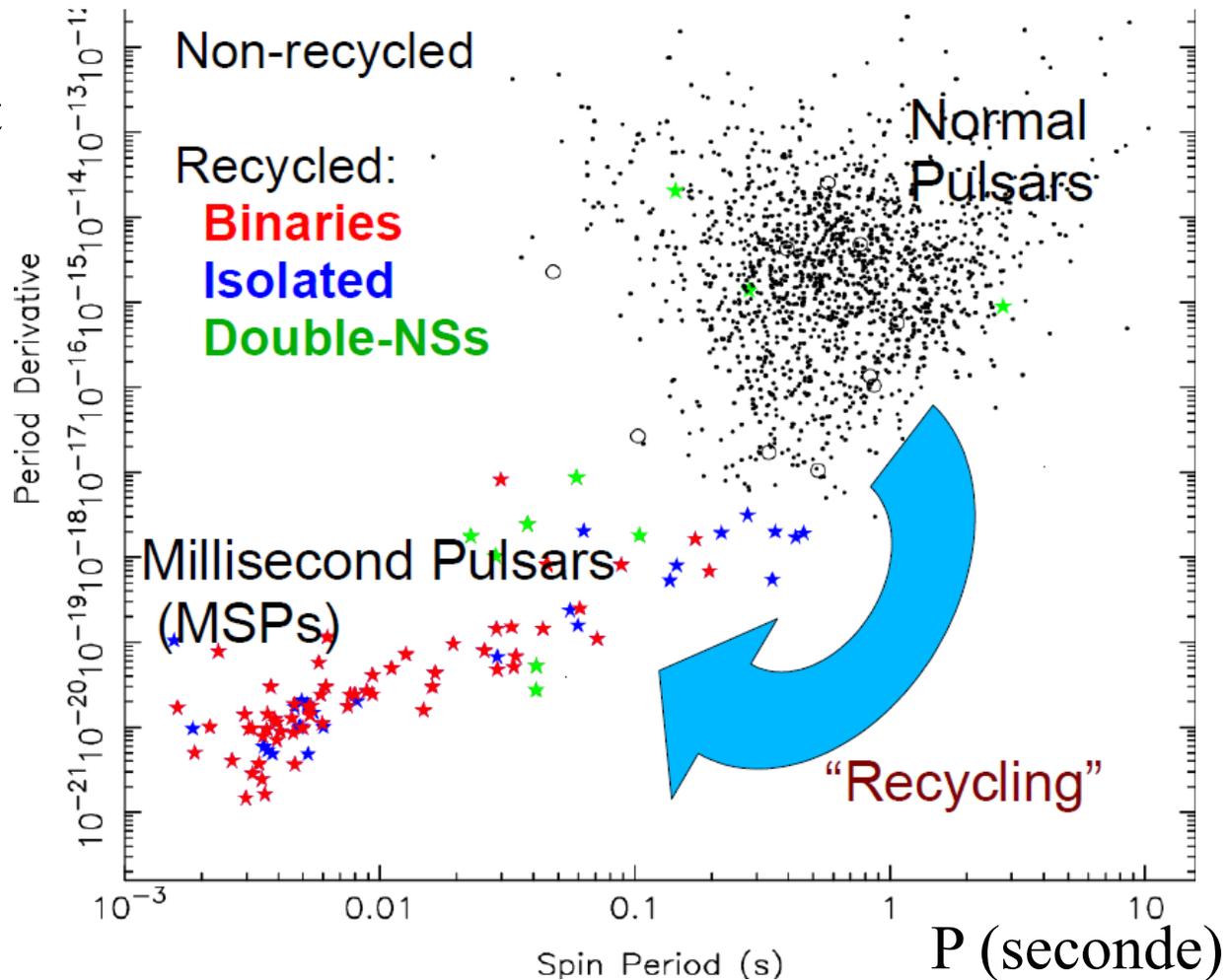
Extrême précision des pulsars

MSPs, J0437–4715, l'un des plus souvent mesurés

$P = 5.7574518589879 \text{ ms} \pm 1$ sur le dernier chiffre (13^{e})

Ce chiffre croît de 1 chaque 1/2h

DP/dt



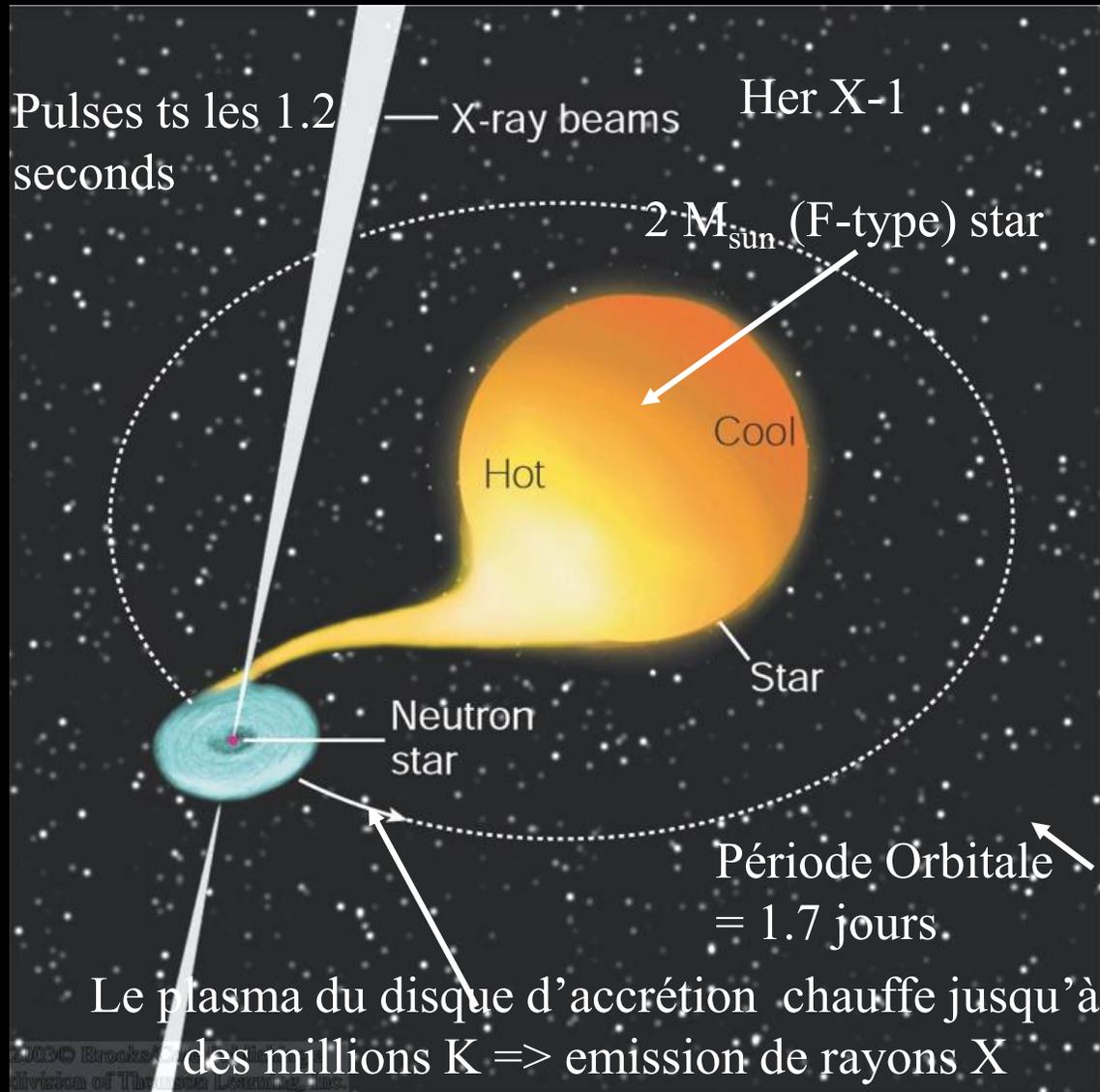
Perte par rayonnement
et vent relativiste

Les premiers 6 chiffres restent
les mêmes pendant 10^3 ans

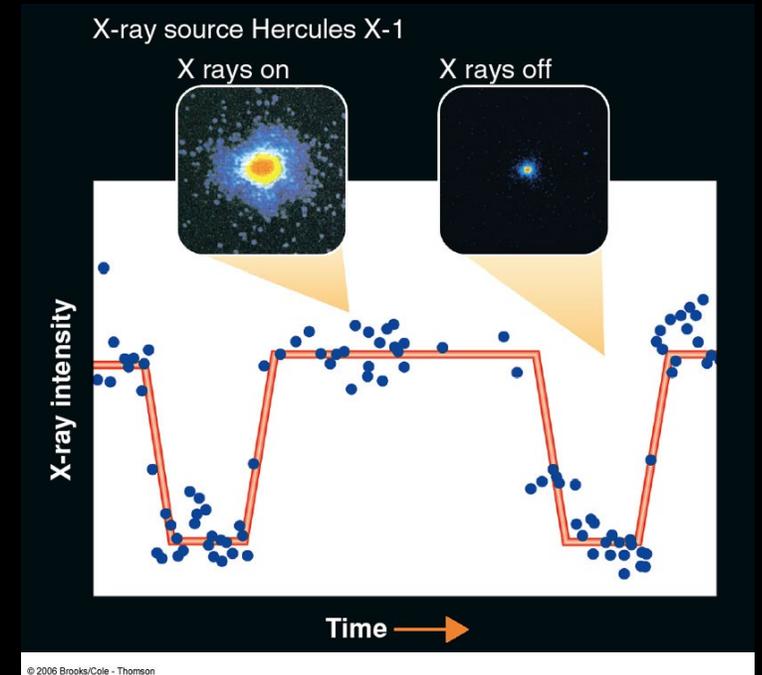
Le temps d'arrivée des pulses
mesuré (μs) pendant plusieurs années

→ 14 chiffres

Etoile à neutrons en système binaire: Her X-1

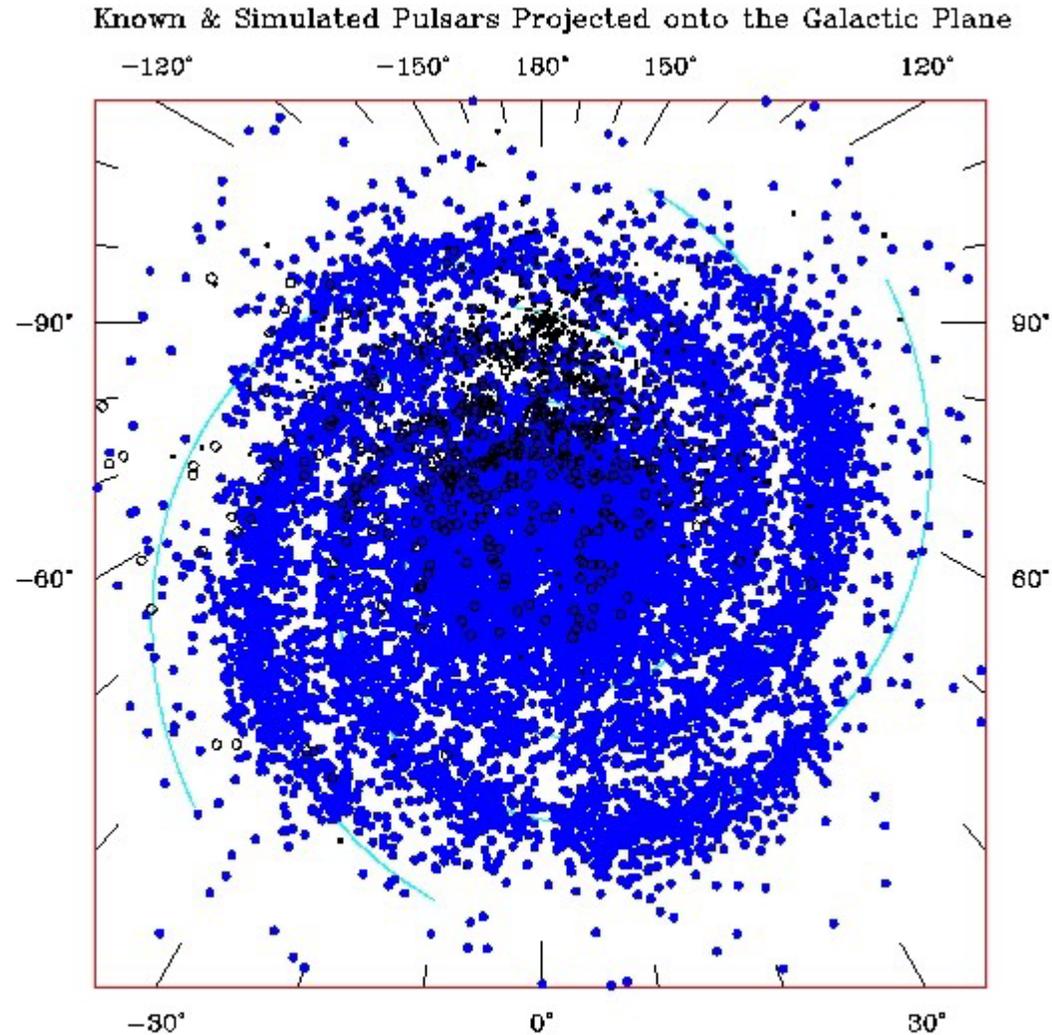


L'étoile éclipse le pulsar et son disque d'accrétion tous les 1.7 jours cachant les pulses X pendant quelques heures



Mesure du délai Shapiro
Pulse en retard par courbure espace

3000 Pulsars connus aujourd'hui



SKA: 1.4 GHz/400 MHz/1024 T/G = 0.25 Jy 600 s
PSR: $(\alpha, \beta, \gamma) = (-1.5, 0.5, 28.0)$ $\epsilon=0.001$ mod=2 n=2.5 $\tau_x=3$. Myr $t<50$ Myr

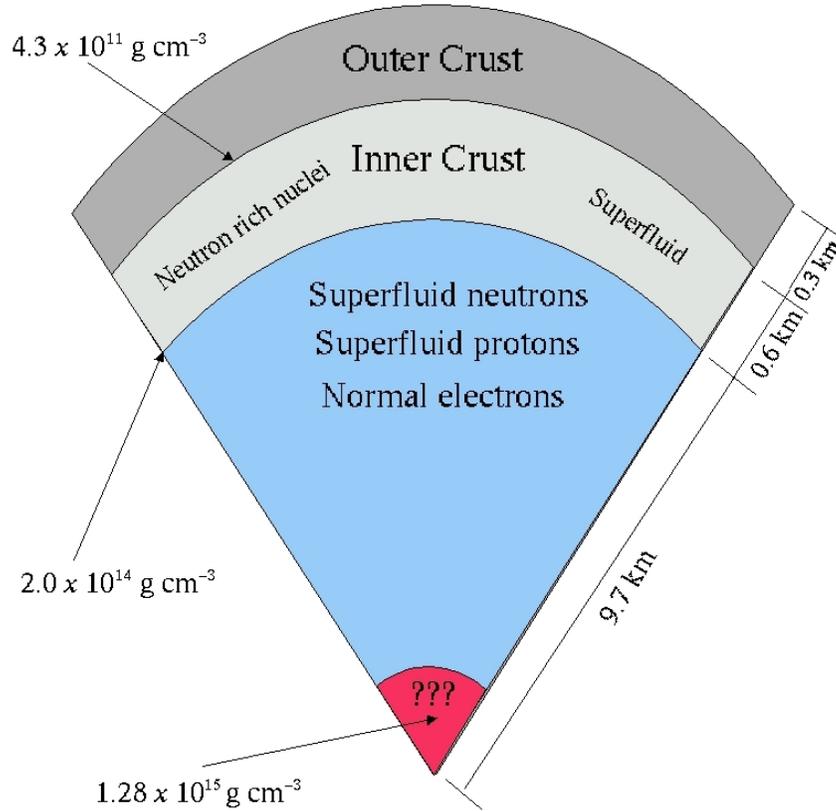
MW: 30 000 PSR, 10^4 MSP
~20,000 potentiellement visibles

Milli-secondes et aussi RRATs =
Rotating Radio Transients
(variations irrégulières, parfois arrêt), dûs à des mécanismes internes ou externes

SKA1 devrait voir la plupart de ces pulsars

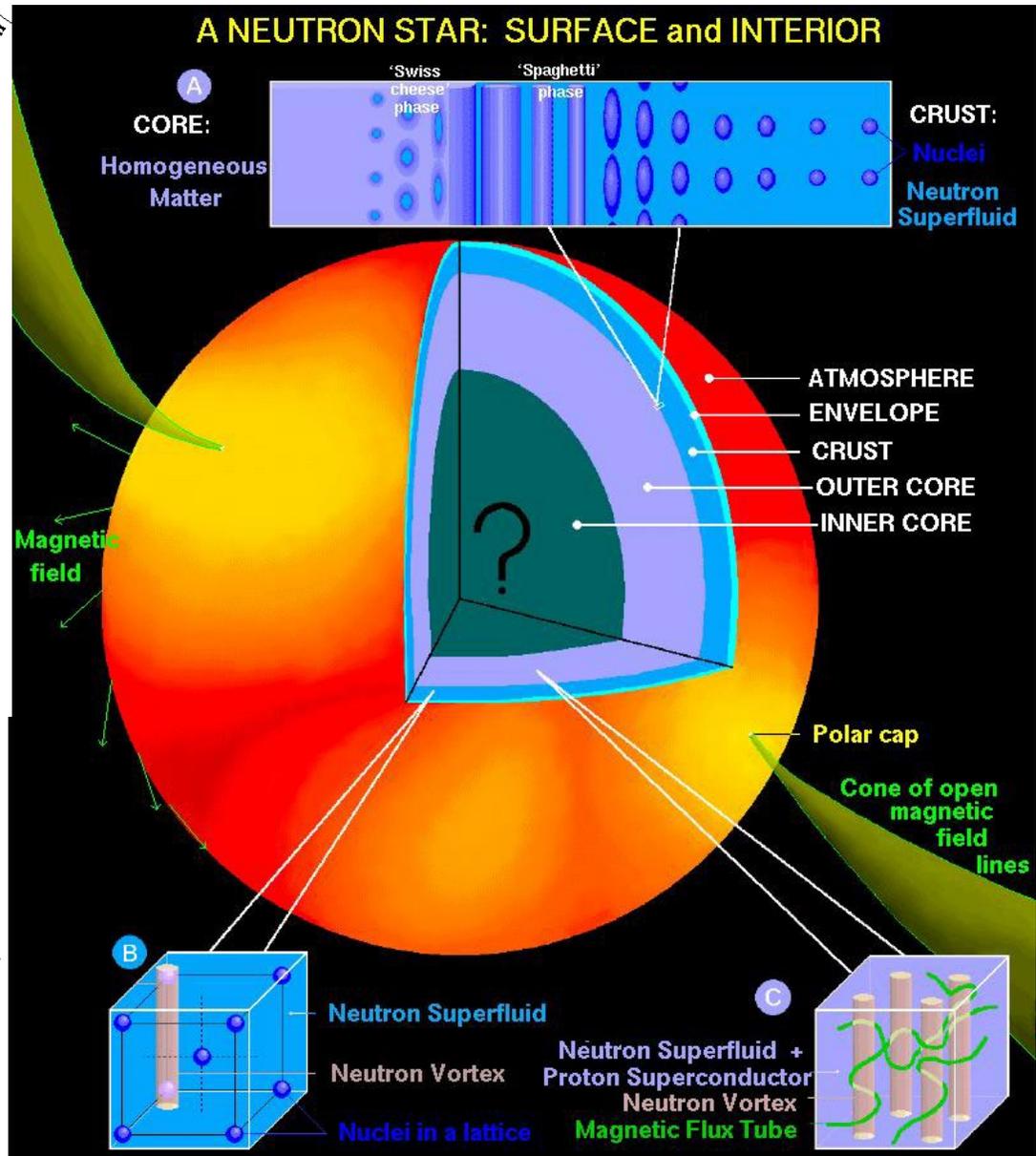
Structure interne

Glitch: brusque accélération de P: vortex de neutron?



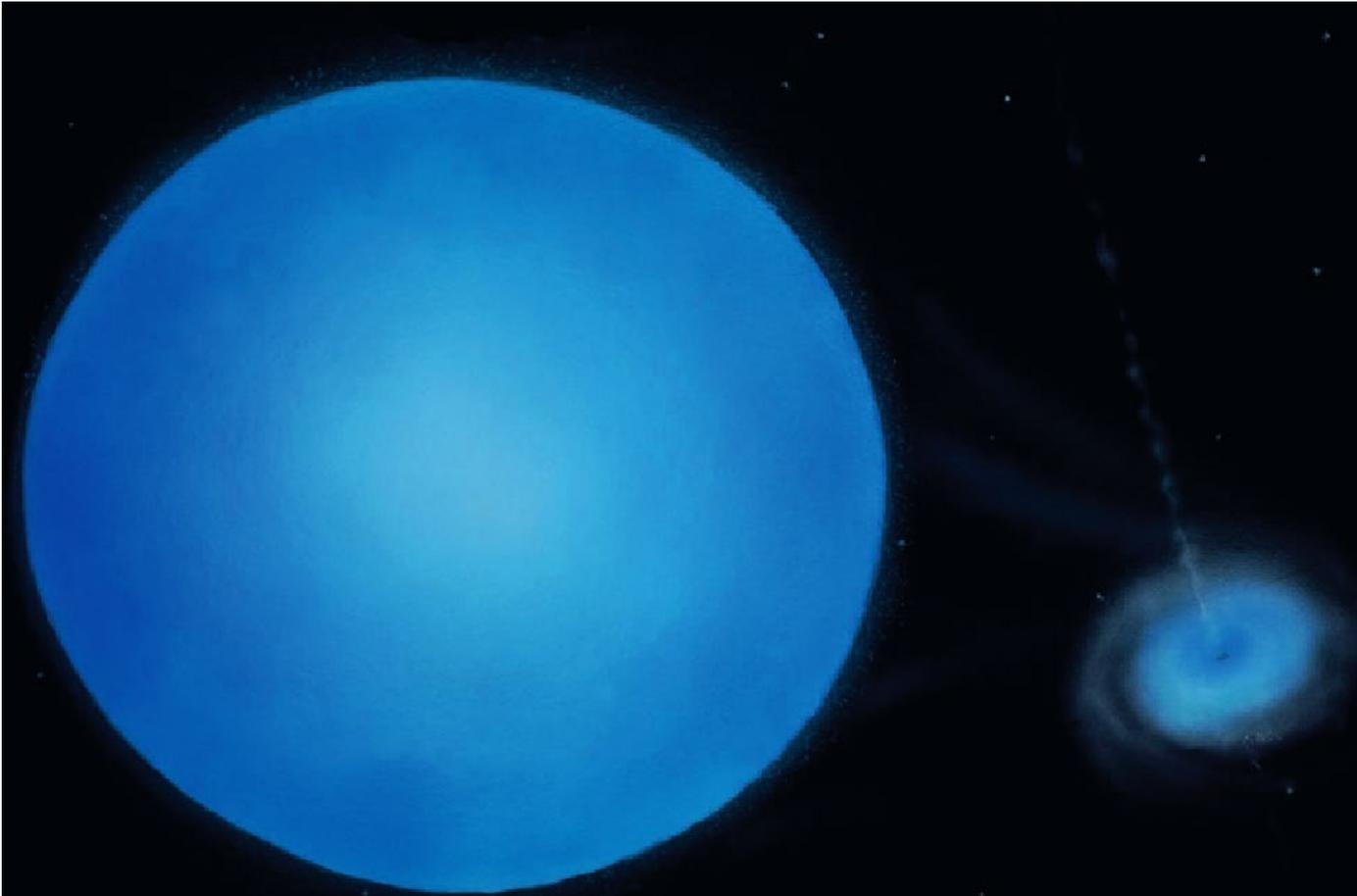
Neutron Star Pizza

Une gamme de particules comme un condensé de pions, superfluide, et/ou plasma de quark-gluon peuvent se trouver dans les parties internes de l'étoile où la température est assez élevée



Masses des étoiles à neutrons

Pulsars/ étoiles à neutrons en binaires, **seulement 10%, Précision sur les orbites, grâce à la précision sur P (DNS, ou NS-WD)**



Jusqu'à récemment, $M = 1.4 M_{\odot}$

Mais la mesure directe, à partir de binaires, montre $M = 1-2.5 M_{\odot}$

Le coeur peut-être 5-10 fois supérieur en densité aux noyaux

Binaires X et effet Shapiro $\rightarrow M$

Equation d'état de la matière EOS inconnue \rightarrow modèles

Avec des bosons, EOS adoucie $M \searrow$

Avec des masses élevées—EOS raide

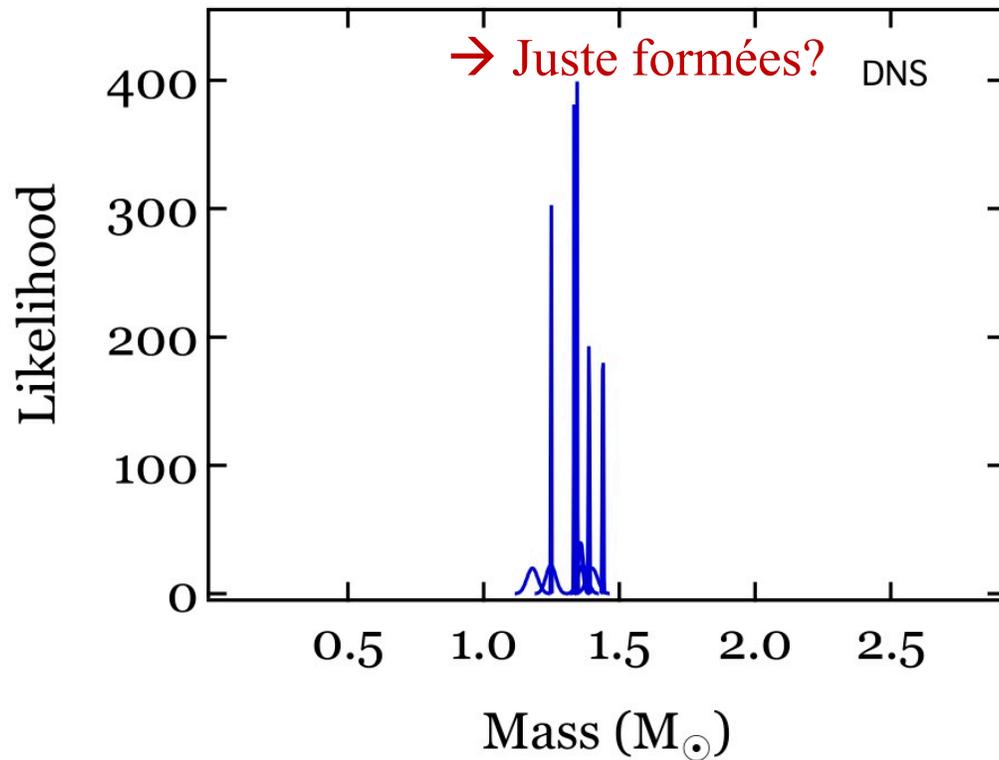
$$f = \frac{(M_c \sin i)^3}{M_T^2} = \left(\frac{2\pi}{P_b} \right)^2 \frac{(a \sin i)^3}{G}$$

Pb: période de la binaire, ω périastre, e excentricité

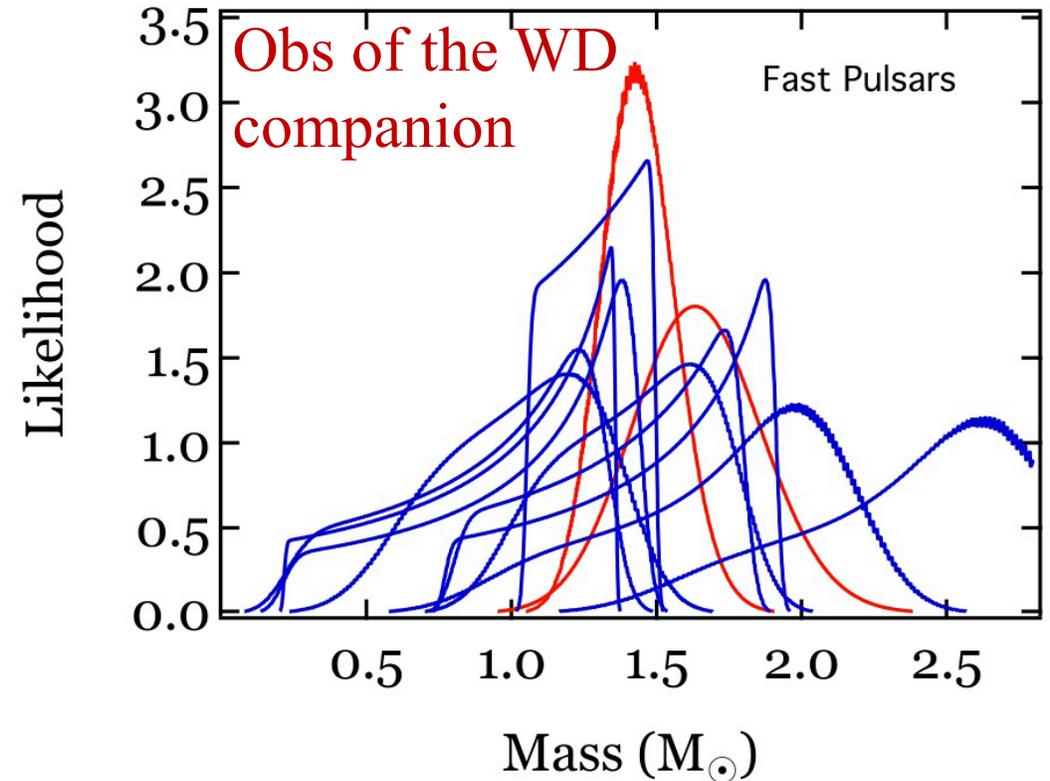
Mesures de la masse

$$\dot{\omega} = 3 \left(\frac{P_b}{2\pi} \right)^{-5/3} \left(\frac{GM_T}{c^3} \right)^{2/3} (1 - e^2)^{-1}$$

12 doubles étoiles à neutrons



Pulsars ré-accélérés + **accrétion**

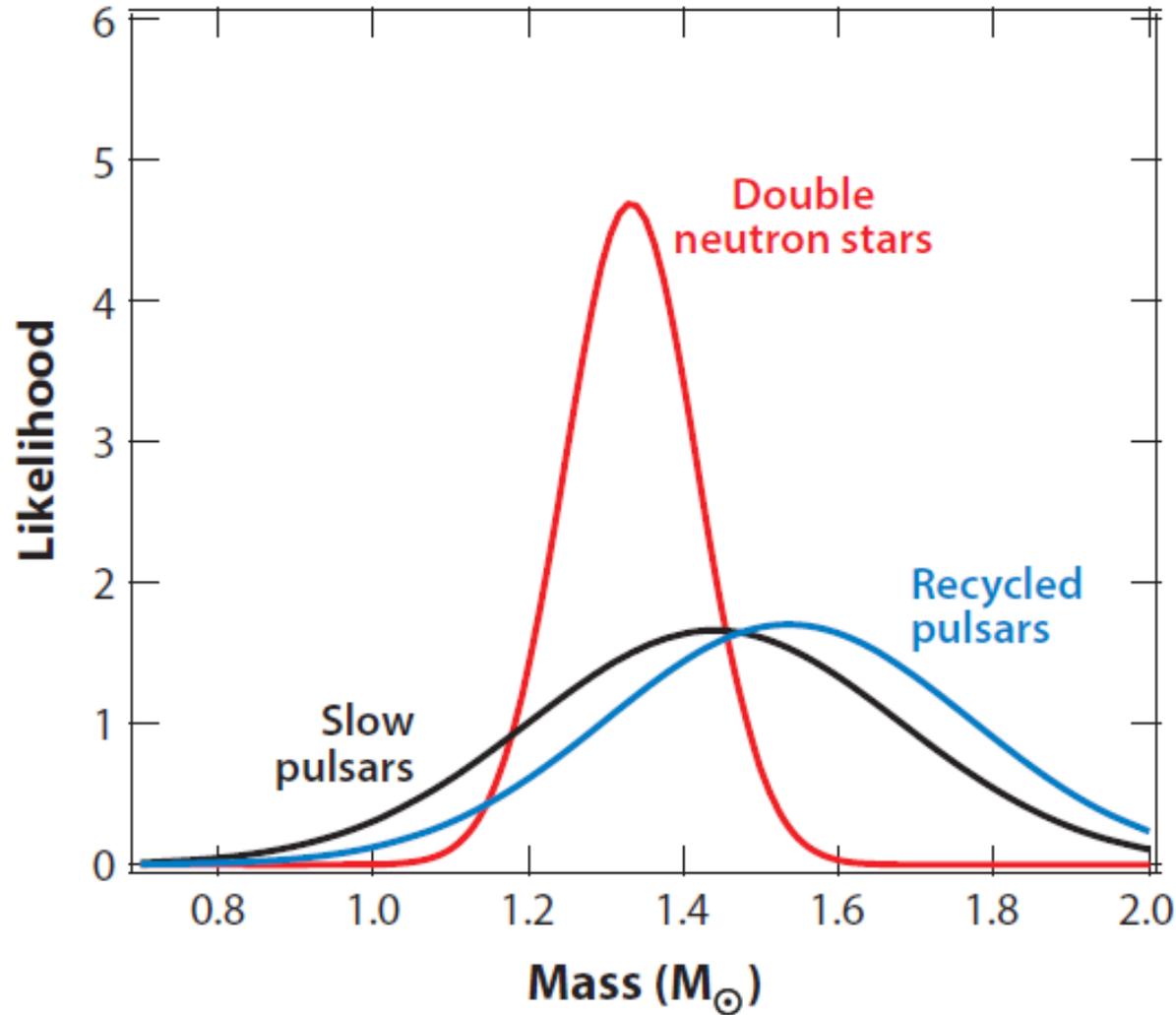


Quelques Records: $M = 1.97 \pm 0.04 M_\odot$ *Demorest et al. 2010*;

$M = 2.1 \pm 0.2 M_\odot$ *Nice et al. 2005*, $M = 2.01 \pm 0.04 M_\odot$ *Antoniadis et al. 2013*

Ozel et al 2012

Distribution des masses

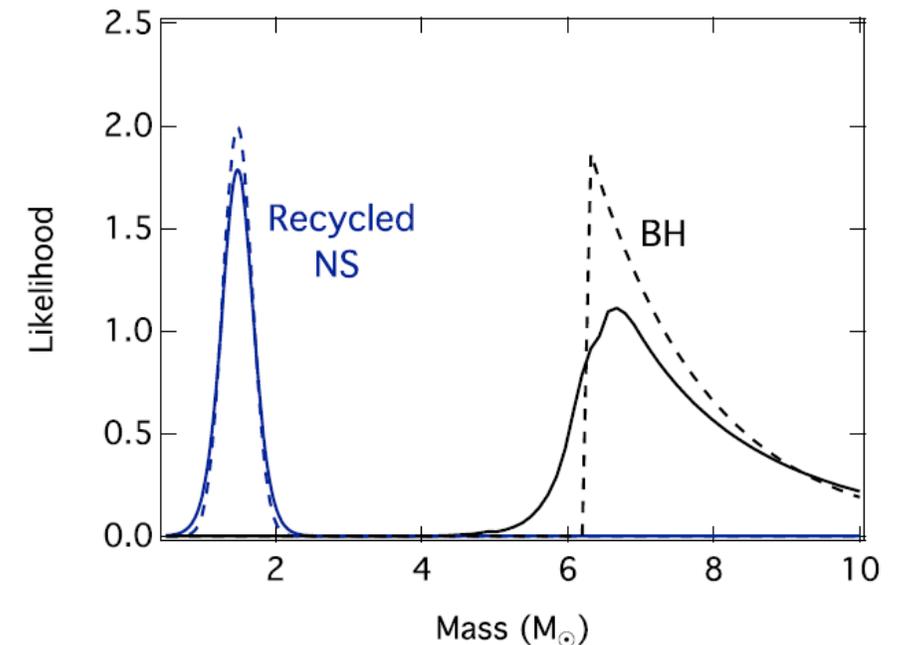


Özel & Freire. 2016

I. Le recyclage décale la masse moyenne de $0.2 M_{\odot}$

II. Pas d'évidence de masse maximale dans la distribution

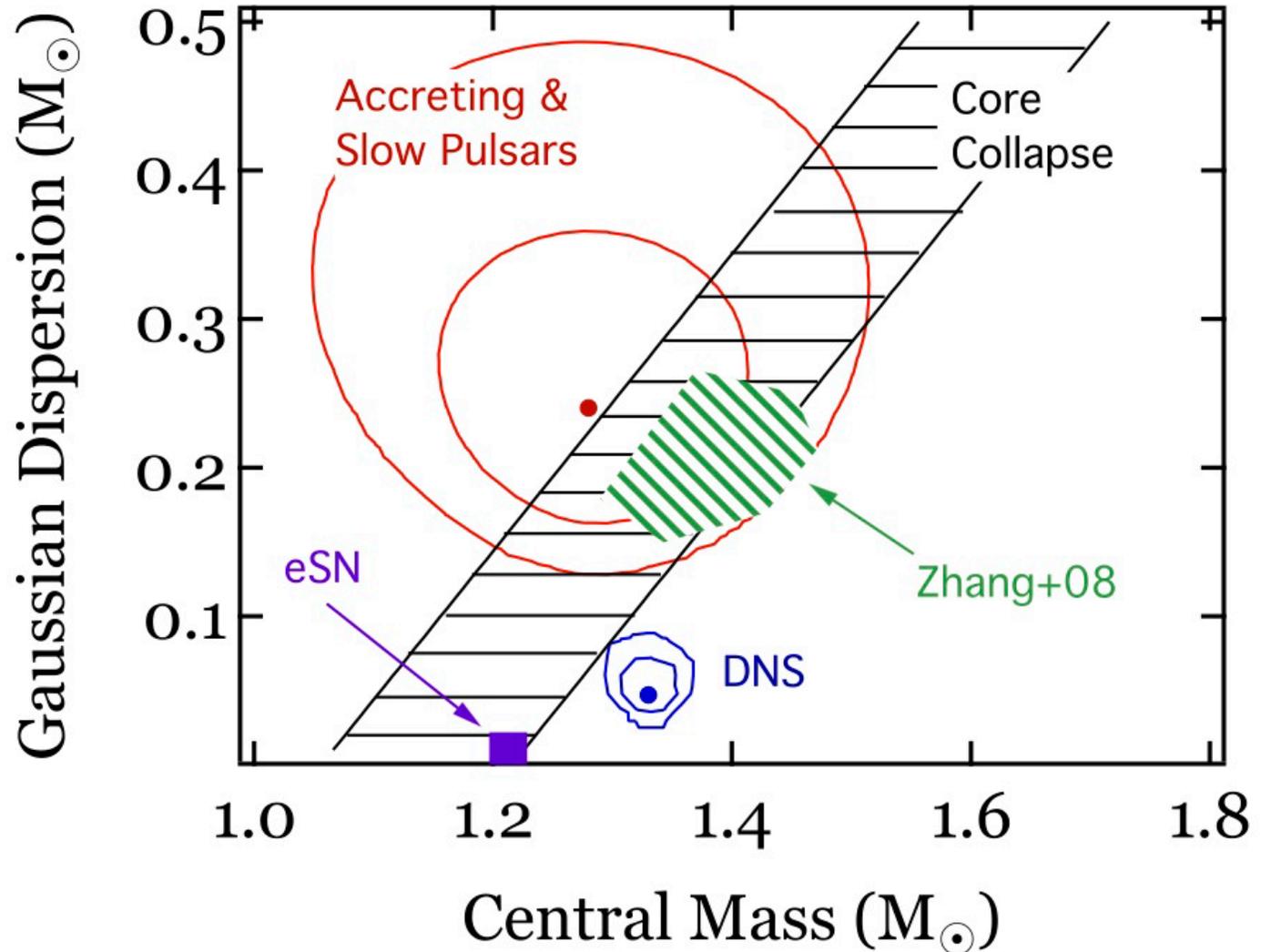
III. La distribution de masse des doubles étoiles à neutrons est particulièrement étroite



Pourquoi la distribution des NS binaires est si étroite ?

eSN: Supernovae à capture d'e-
Entre 8 et 10 M_{\odot}
Coeur de O+Ne+Mg
Capture les électrons
Identifiées en 2021
(*Hiramatsu et al*)

Les “core-collapse” sont des SN
d'étoiles plus massives, à coeur
de fer (dispersion liée à
l'incertitude de la masse qui
retombe)



Rayons des étoiles à neutrons: étranges ou pas?

Coeur de neutrons ou de quarks déconfinés?

Neutron formés de quarks (d) et (u)

Si déconfinés: la majorité est quark (s)
Rayon plus petit

Un composé formé de mésons,
(kaons, pions..)

Ce sont des bosons, qui n'ont pas la
contrainte de Pauli,

→ condensats, liés par les gluons
(et non par la gravité)

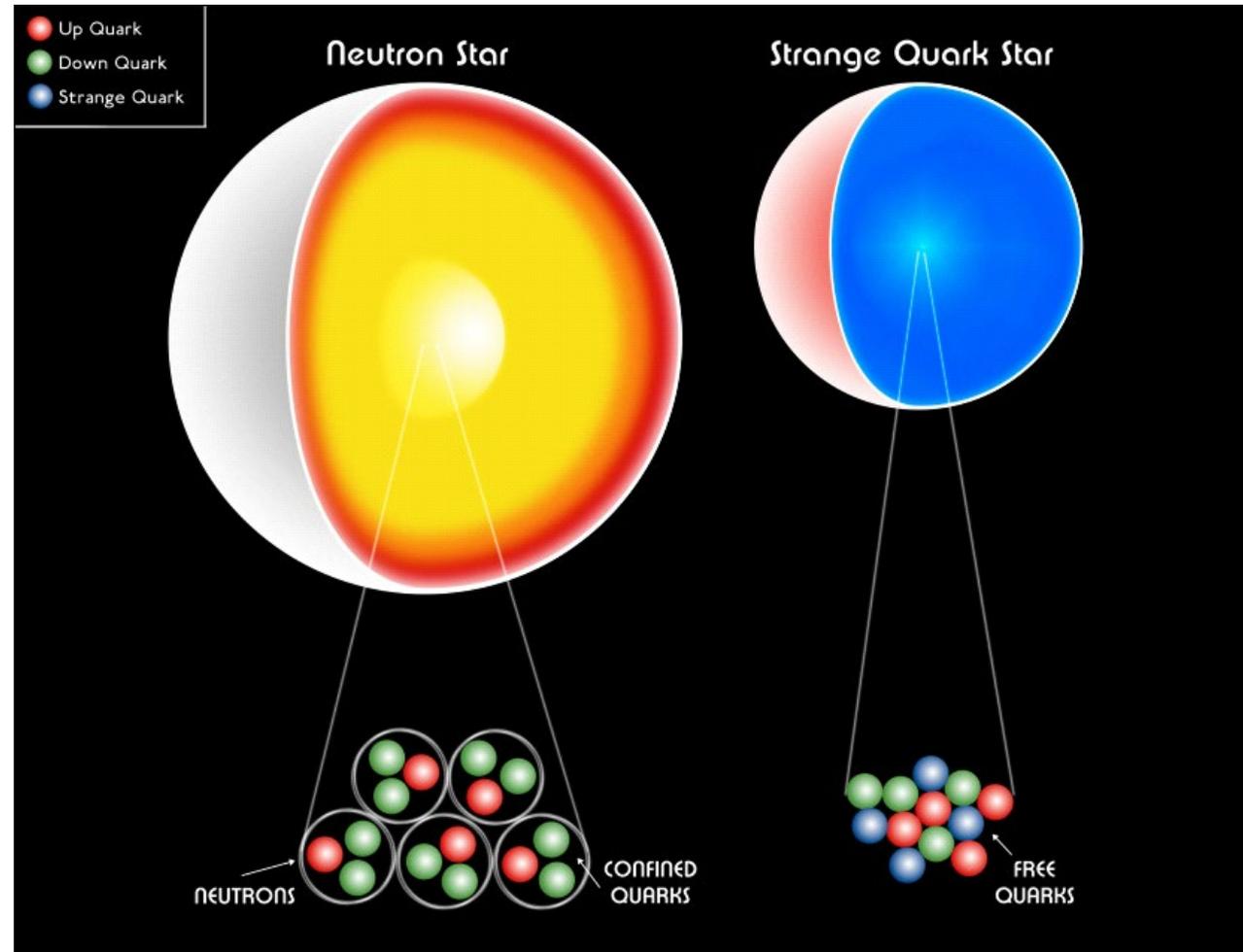


Image credit:
Chandra X-ray Observatory

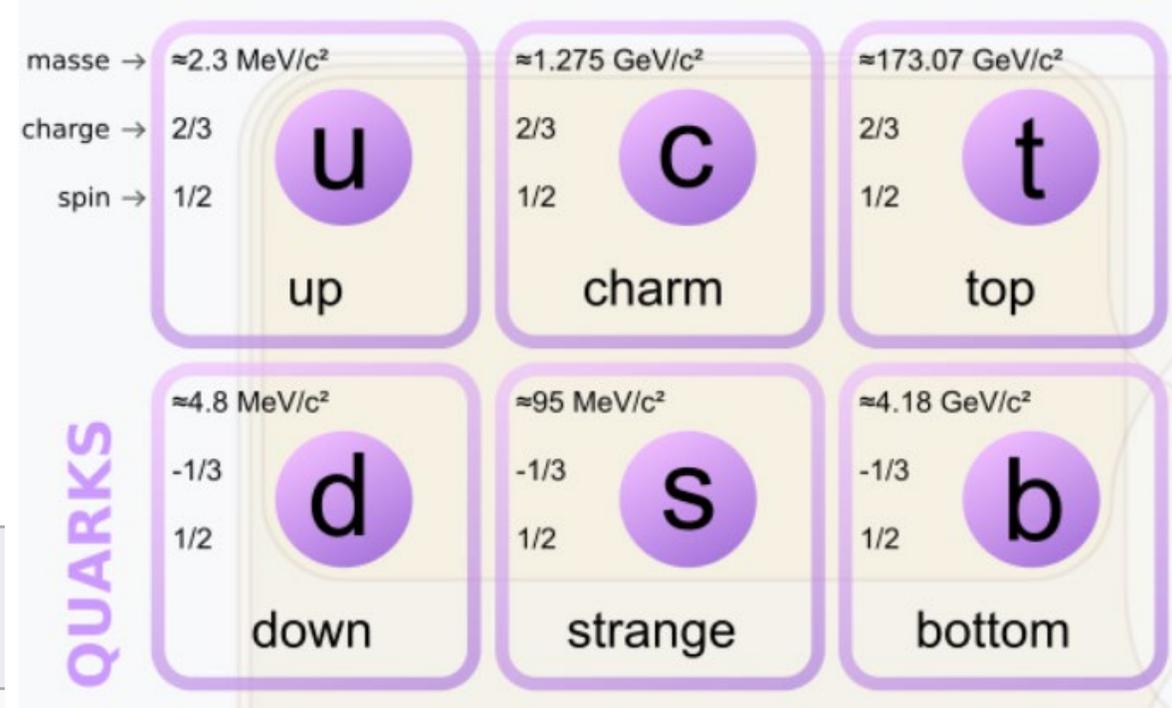
Les mésons

Composés de 2 quarks → spin entier (0 ou 1)

→ Bosons

Instables, durée de vie 10^{-8} à 10^{-23} s

Les durées de vie les plus longues sont les pions et les kaons



Ce sont aussi les moins massifs
 Pions $\sim 140 \text{ MeV}$, Kaons 500 MeV
 Masses $\gg m_e$
 Charges = $\pm e$

Famille	Symbole	Antiparticule	Quarks
Pion	π^+	π^-	$u\bar{d}$
	π^-	π^+	$\bar{u}d$
	π^0	Lui-même	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}^a$
Kaon	K^+	K^-	$u\bar{s}$
	K^-	K^+	$\bar{u}s$
	K^0	\bar{K}^0	$d\bar{s}$
	K_S^0	K_S^0	$(d\bar{s} - s\bar{d})/\sqrt{2}^a$
	K_L^0	K_L^0	$(d\bar{s} + s\bar{d})/\sqrt{2}^a$

Masse maximum

Comme pour les naines blanches, $R^3 \propto 1/M$ $\rho \propto M^2$

(1) Principe de **causalité**: vitesse du son $< c$

Equation d'état (EOS) $P = \rho c_s^2$ $dP/d\rho < c^2$

(2) Vitesse du son réelle $dP/d\rho > 0$

→ Masse maximum $3 M_\odot$ (*Rhoades & Ruffini 1974*)

La forte gravité → lentille $R_{\text{obs}} = \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1/2} R$

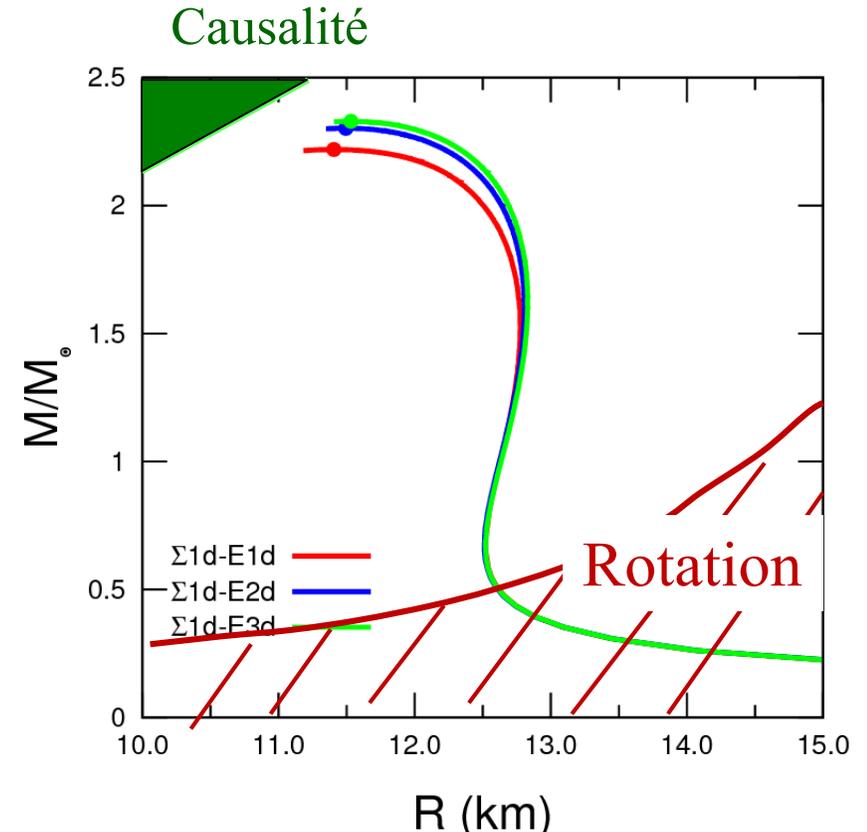
Il existe aussi une **période minimum**, ou un spin maximum de

$$P_{\text{min}} \simeq 0.83 \left(\frac{M_\odot}{M_{\text{sph}}^{\text{max}}}\right)^{1/2} \left(\frac{R_{\text{sph}}^{\text{max}}}{10 \text{ km}}\right)^{3/2} \text{ ms}$$

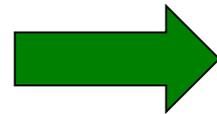
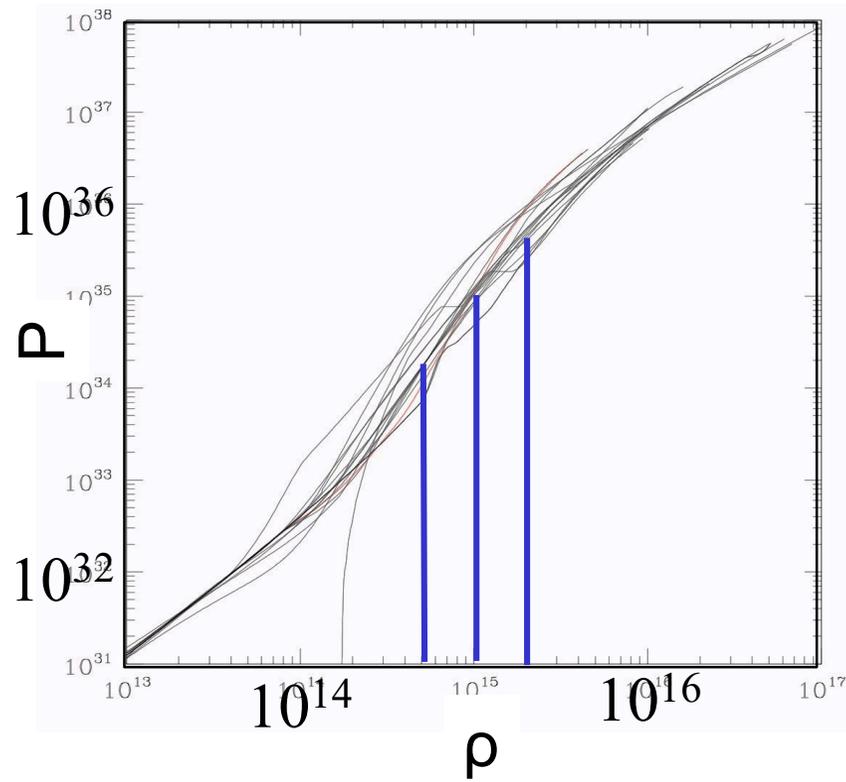
Equilibre hydrostatique en GR

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gm}{r^2} \rho \left(1 + \frac{p}{\rho c^2} + \frac{4\pi r^3 p}{mc^2} + \frac{2Gm}{rc^2}\right)$$

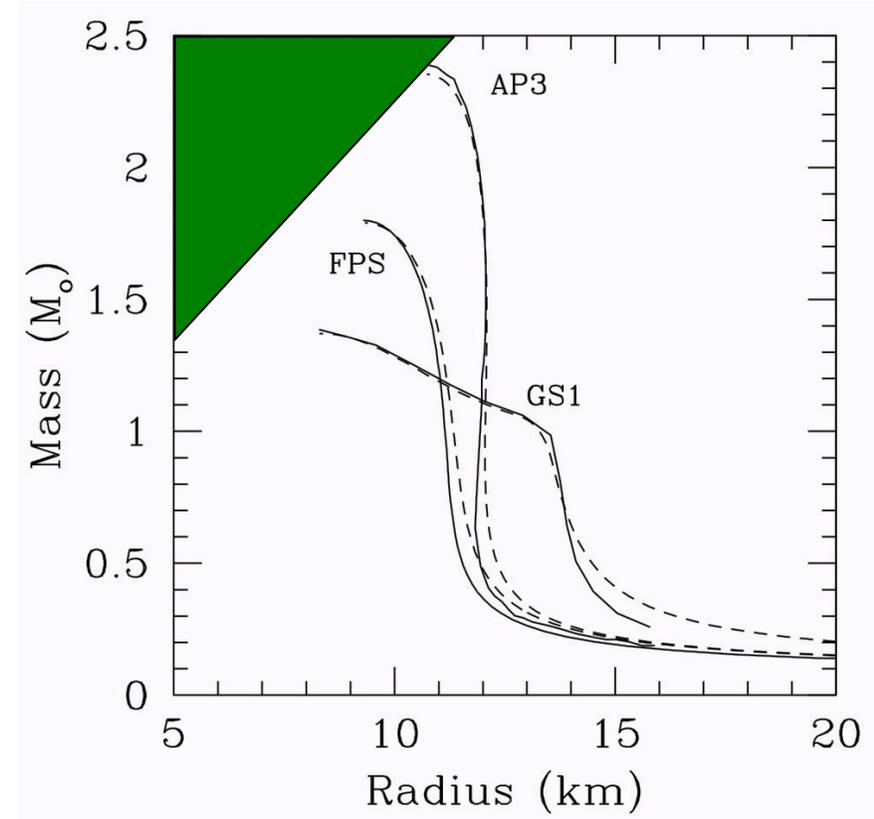
Post-newtonien



Equation d'état et Relation M-R



Trou noir Causalité

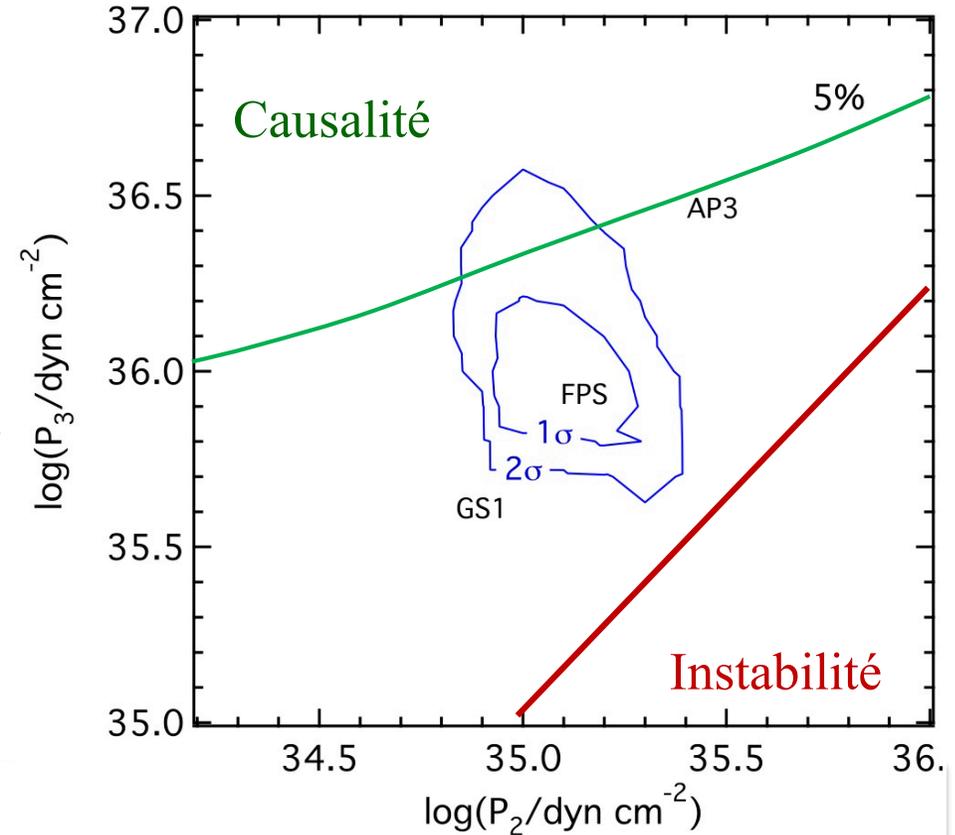
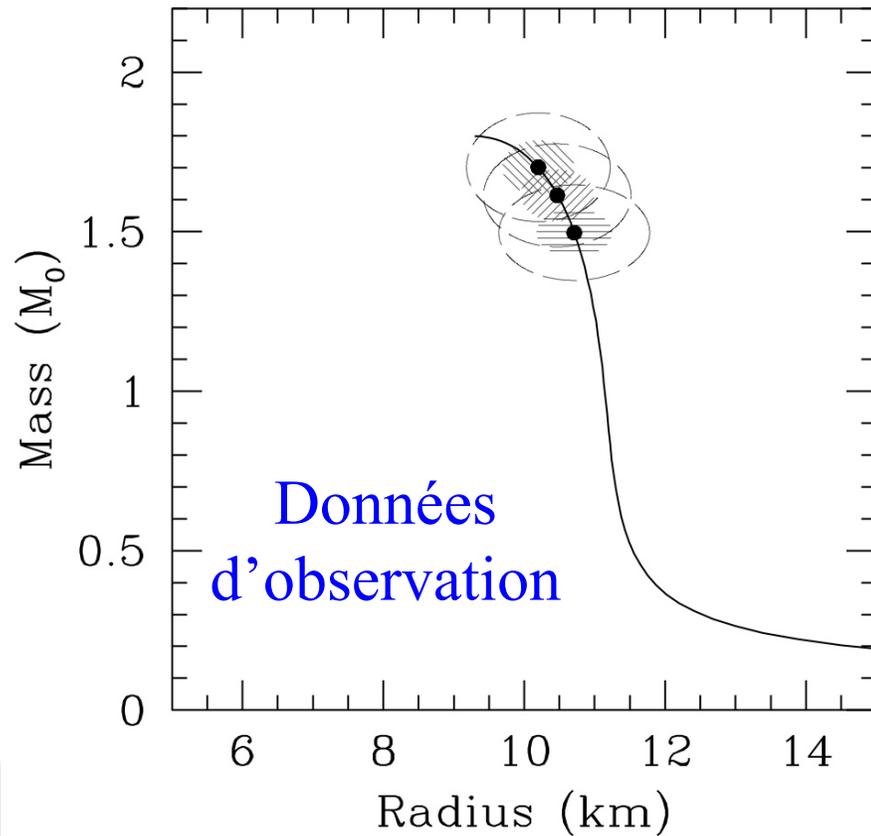


La pression pour trois densités caractéristiques
des equations d'état possibles
Permet de réduire le nombre de paramètres libres

Özel & Psaltis 2009, Read et al. 2009

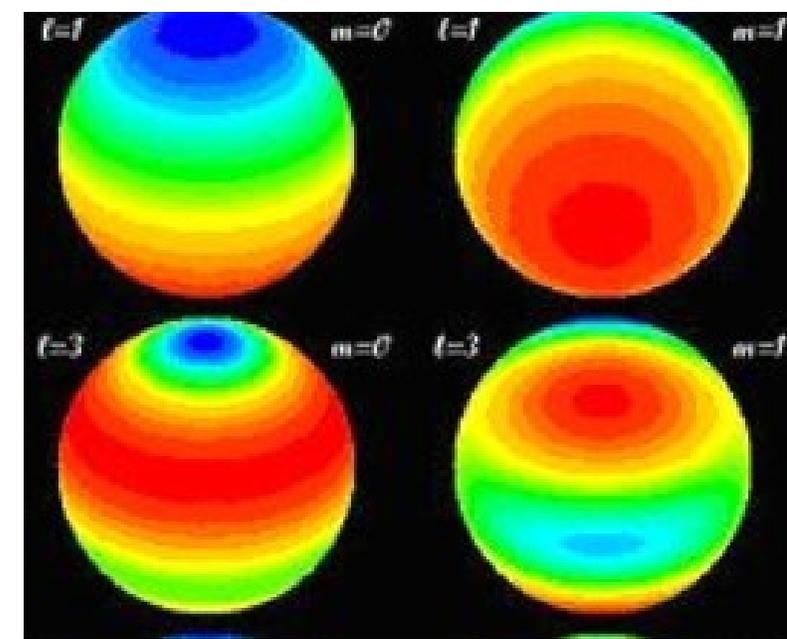
Relation Masse-Rayon: inversion

Obtenir l'équation d'état à partir des données d'observation M-R



Au moins trois rayons sont nécessaires pour l'inversion

Mesure des rayons des étoiles à neutrons



Problèmes: Mesures indirectes et
Mesures des masses et rayons couplées

Relation empirique $R \propto p_*^{1/4}$ p_* pression centrale, au
Voisinage de la densité nucléaire $2.7 \cdot 10^{14} \text{g/cm}^3$

“Glitches”, Sursauts, Oscillations quasi-périodiques (QPO) 10-1200Hz

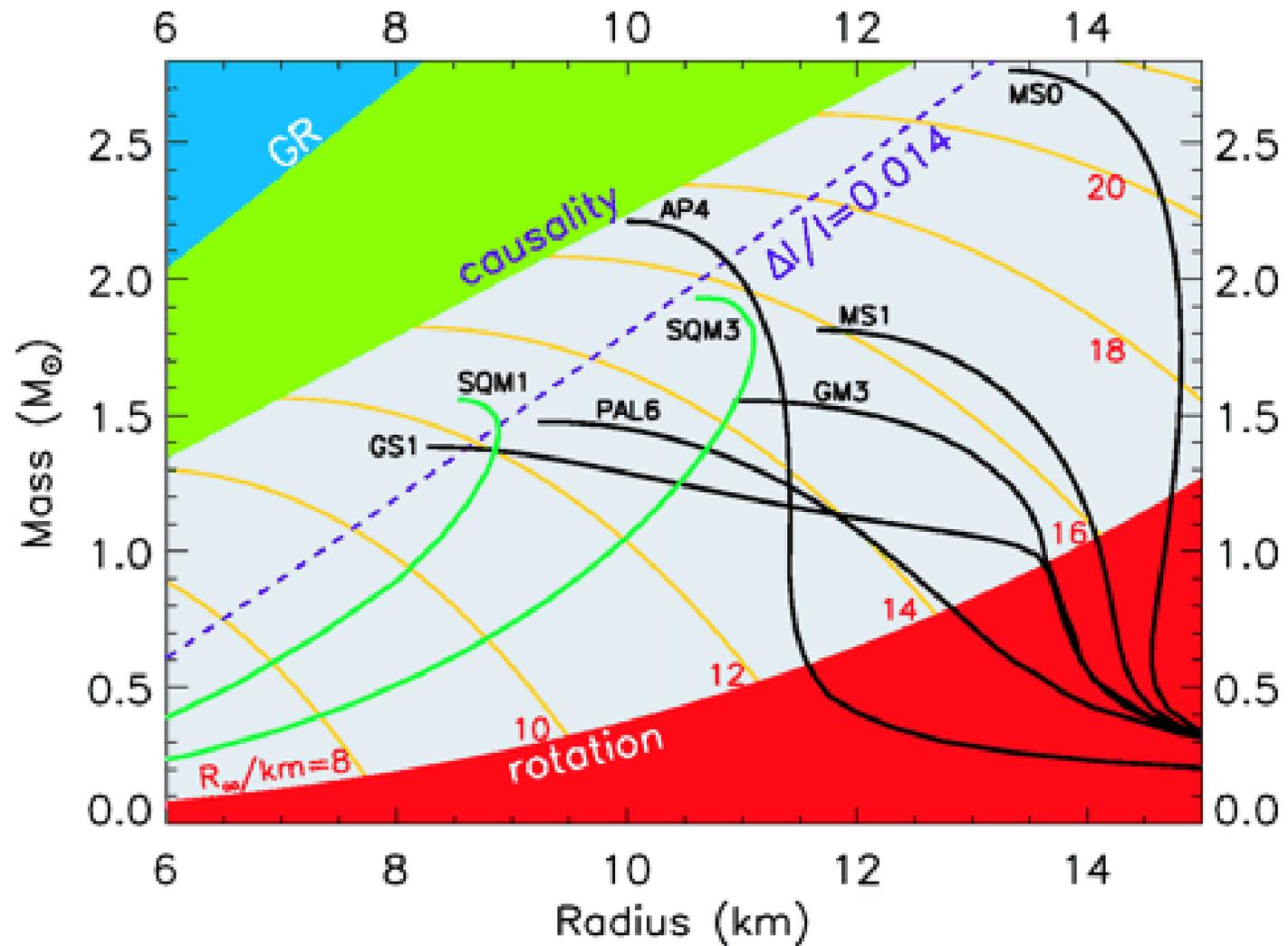
Oscillations dues aux modes de **vibration de la croûte**

Si l'épaisseur \ll Rayon mode fondamental varie comme $1/R_{\text{obs}}$

Rayon de radiation $R_{\text{obs}} = R / \sqrt{1 - 2GM/Rc^2}$.

(si radiation thermique (T), prise en compte du rougissement gravitationnel)

Relation masse-rayon pour les étoiles à neutrons



Courbes noires: matière standard, Courbes vertes: quark.

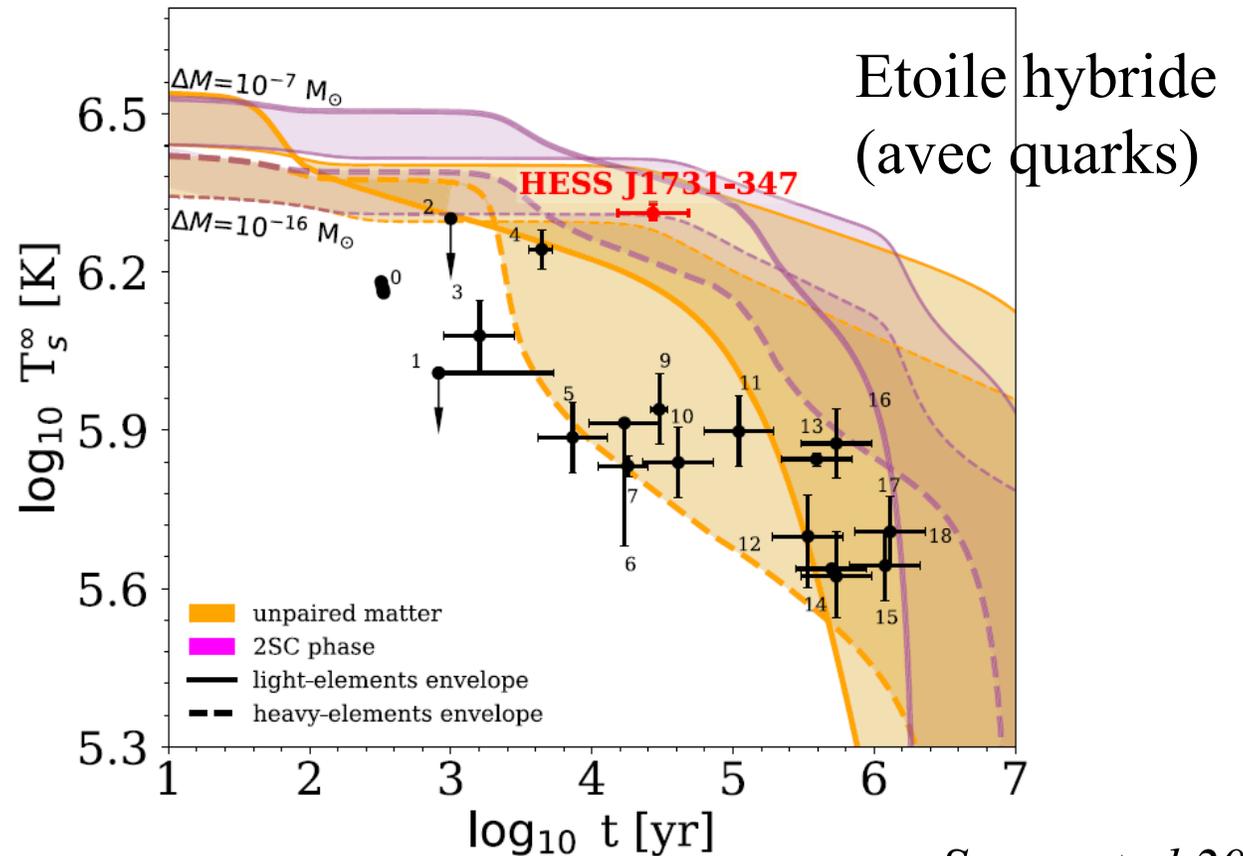
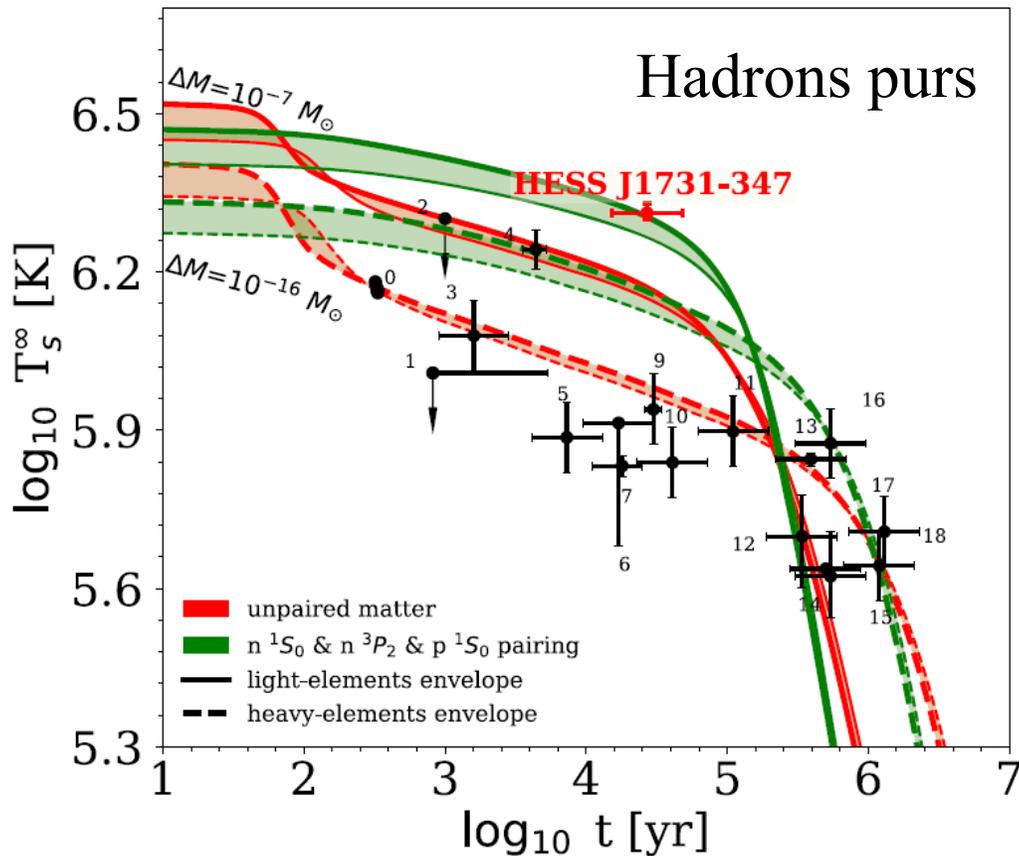
Régions exclues par la relativité générale (GR), causalité, et rotation

Courbes oranges: rayon de radiation $R_{\infty} = R/\sqrt{1 - 2GM/Rc^2}$.

Pointillés $\Delta I/I = 0.014$: limite des glitches du pulsar Vela *Lattimer & Prakash 2004*

Taux de refroidissement

Lors de la formation, $T \sim 10^{11} \text{K} \rightarrow$ Émission rapide de neutrinos, jusqu'à $T = 10^6 \text{K}$
 $T_{\text{surface}} = 10^5 - 10^6 \text{K}$ perte d'énergie par rayonnement, champ magnétique, et rotation
 Très vite, un jeune pulsar va ralentir, son champ B diminue \rightarrow invisible en $\sim 100 \text{Myr}$
 Temps de refroidissement dépend de la structure interne

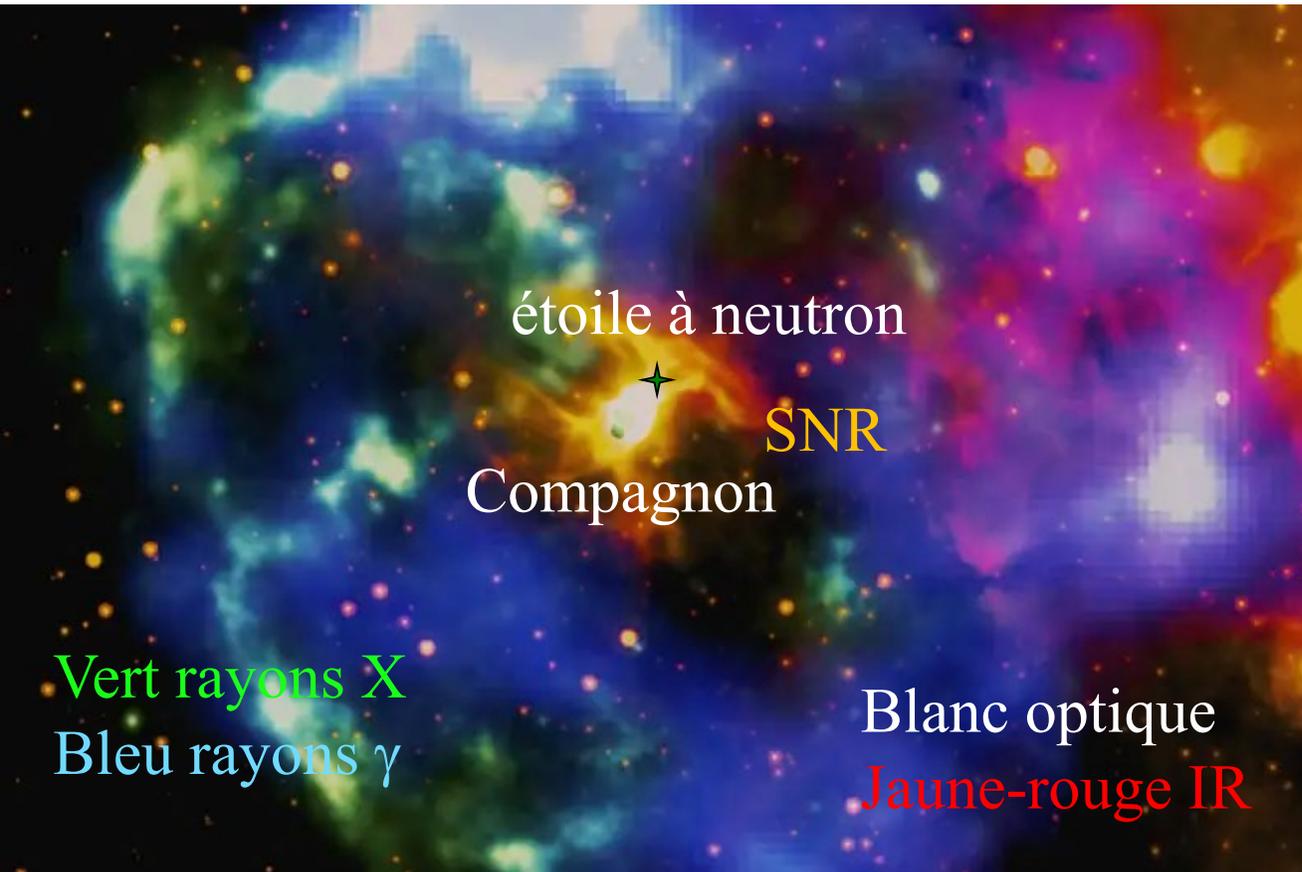


La plus petite masse pour une étoile à neutrons

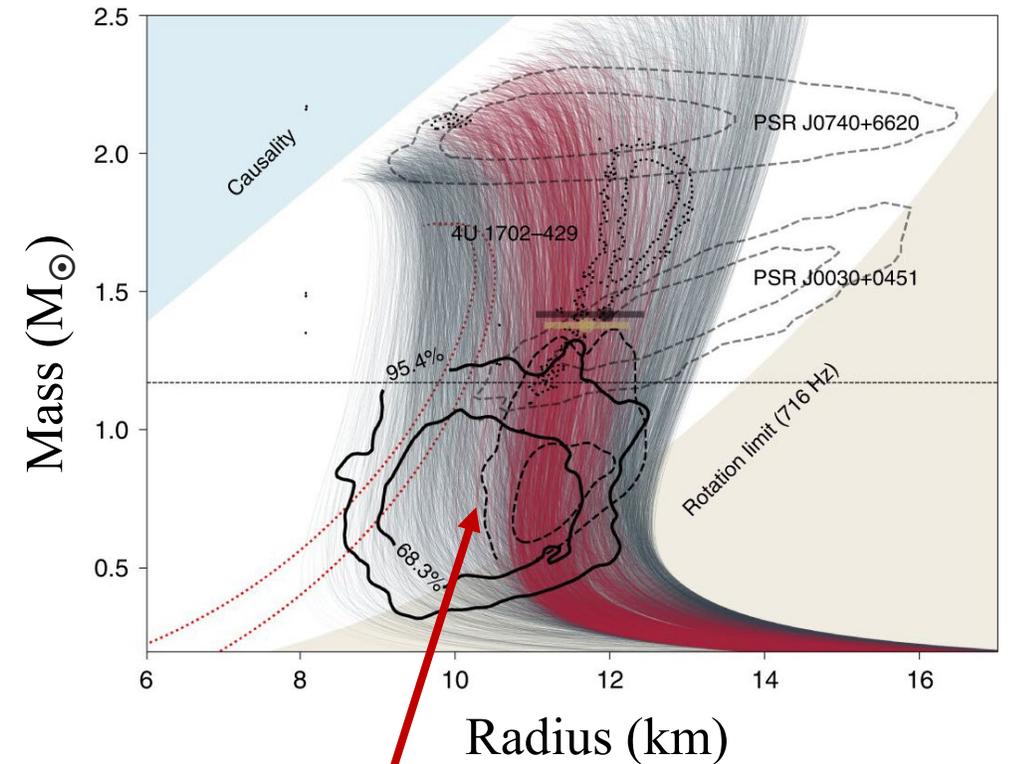
HESS J1731-347 $M = 0.77 M_{\odot}$, $R = 10.4 \text{ km}$ $T = 2 \cdot 10^6 \text{ K}$

Résultat d'une supernova, Age 27 000 ans

Compagnon étoile géante



Equation d'Etat, Relation M-R



HESS J1731-347

Doroshenko et al 2022

Evidence d'une phase quark-gluon?

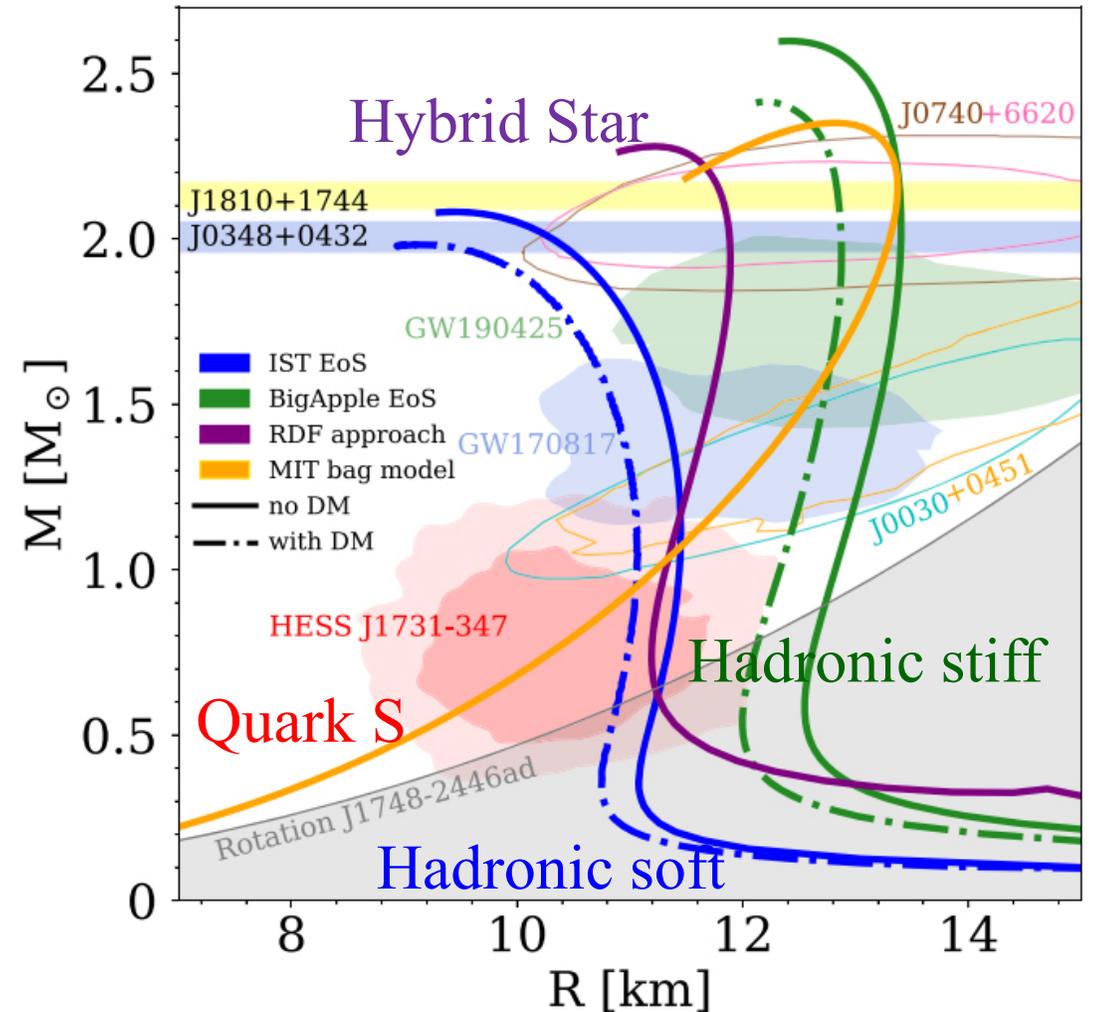
Une étoile pure hadronique a une masse minimum $1.17 M_{\odot}$.

→ Quarks étranges? (plus petit rayon)

Mais si non-appariés, la température de surface descend plus vite

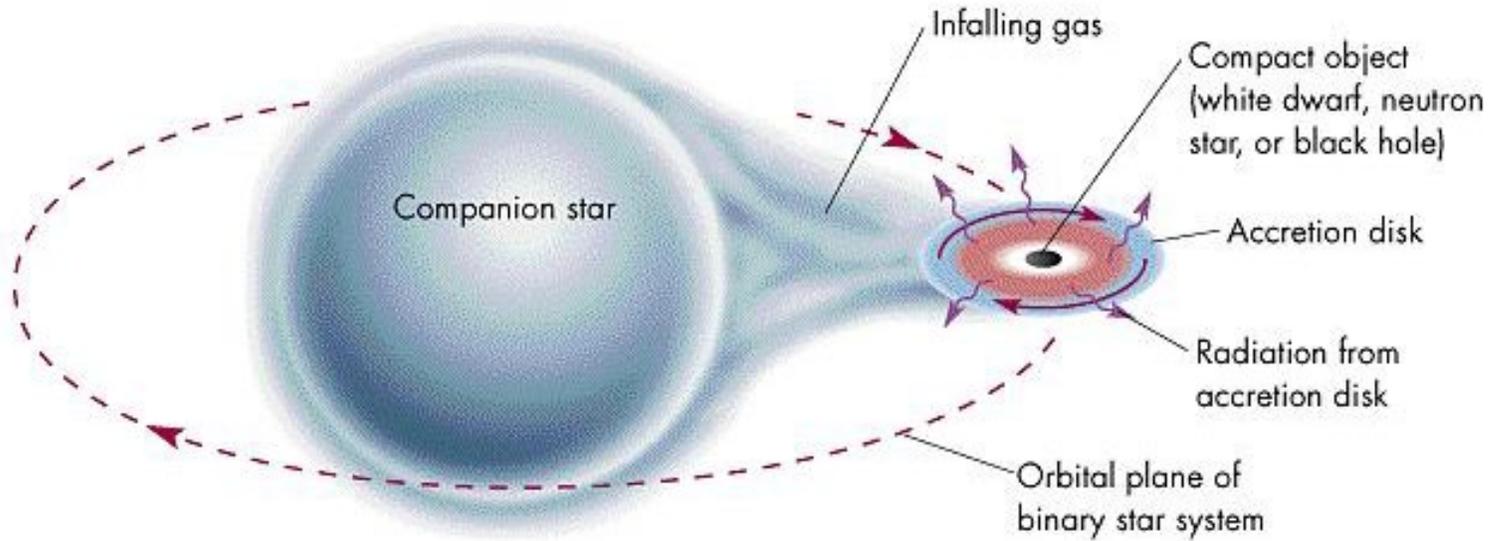
Le neutron se désintègre en quark s et d en émettant bcp de neutrinos → T plus faible

Solution: les QS seraient déconfinés très tôt
→ Quarks en paires, protons superconducteurs et neutrons superfluides → pas de neutrinos
Ou alors DM??

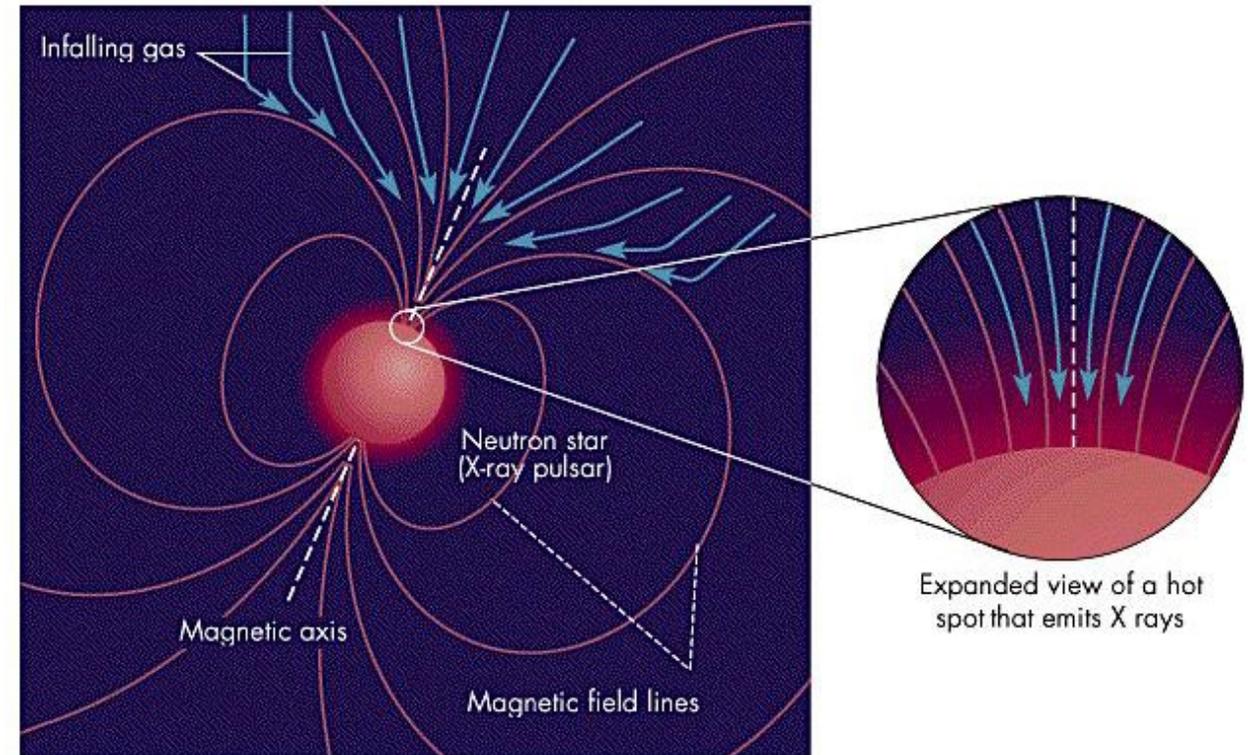


Pulsars et rayons X

Etoile à neutron en binaire
avec une étoile normale



Il peut exister des **sursauts X de qqes sec**
(si champ B fort), suivis d'oscillations
quasi périodiques dans le disque
La source d'énergie est l'énergie
gravitationnelle de la matière accrétée



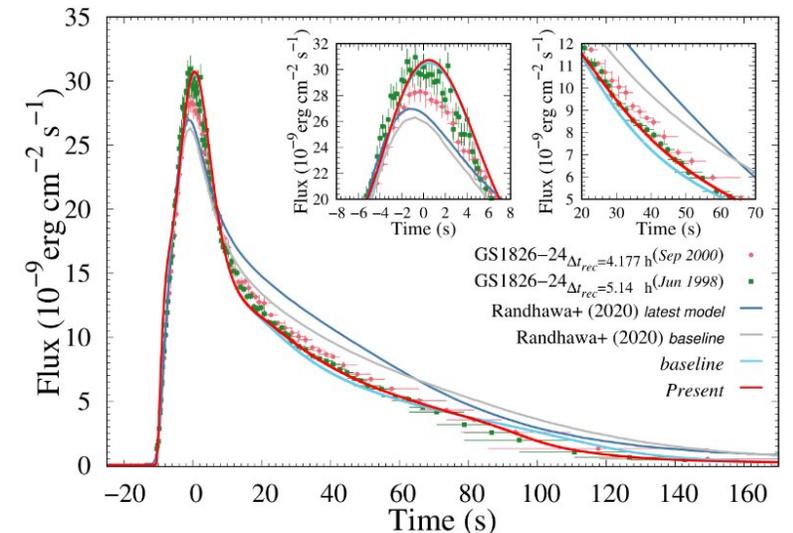
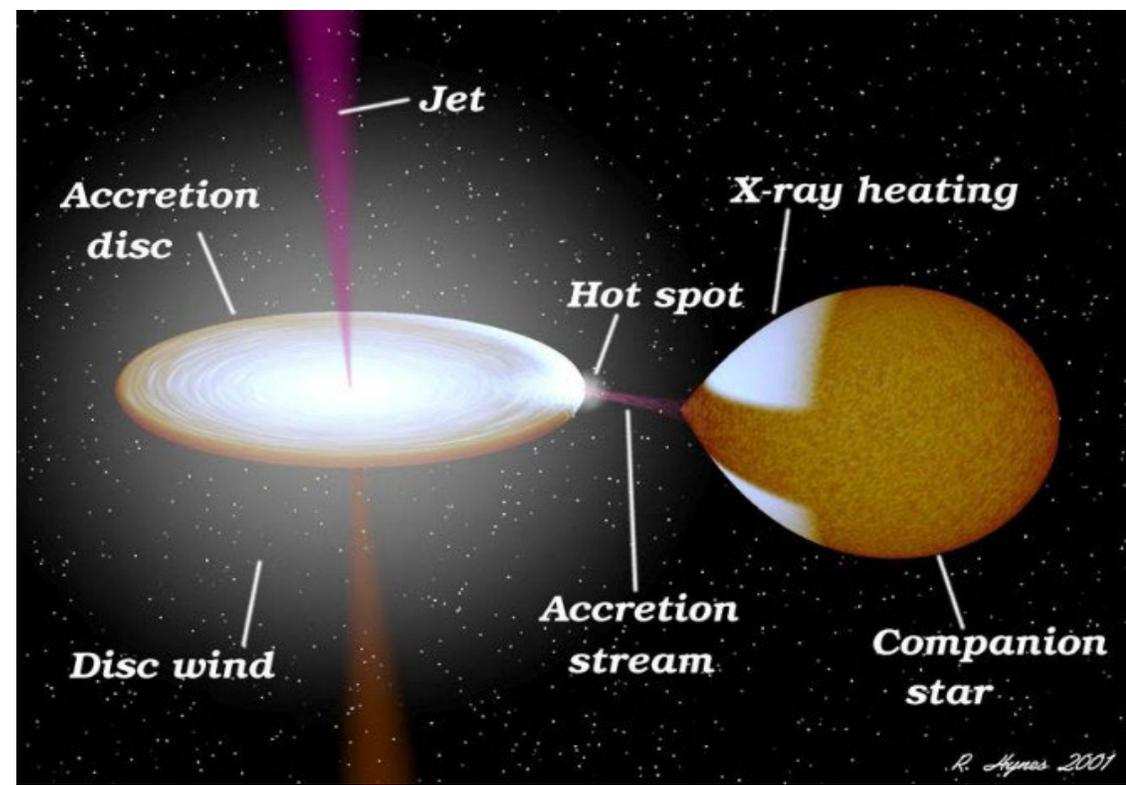
Les Bursts de rayons X

Les bursts/sursauts de rayons X font partie des événements les plus énergétiques du cosmos

Ce sont des explosions thermonucléaires près de la surface des étoiles à neutrons

La matière accumulée par l'étoile compagne est canalisée vers la surface des étoiles à neutrons

Extrêmes densité et température de la surface
→ propices à la combustion explosive de l'hydrogène et de l'hélium → Burst durant une minute

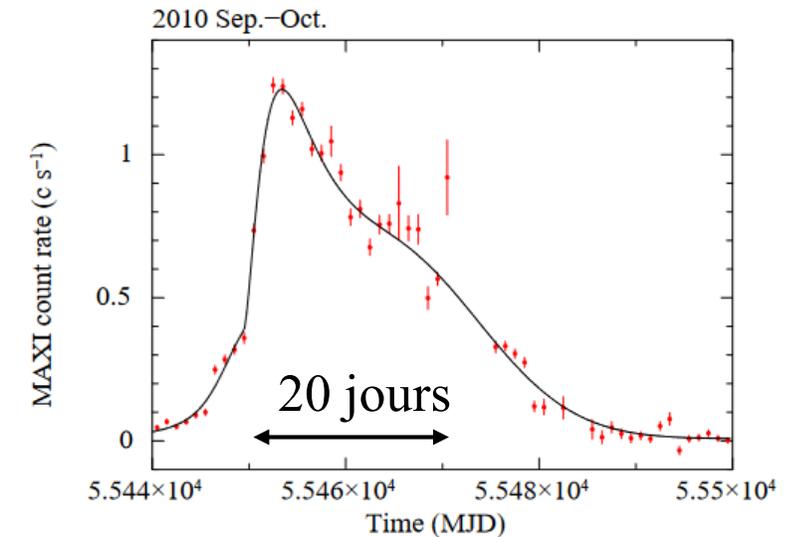
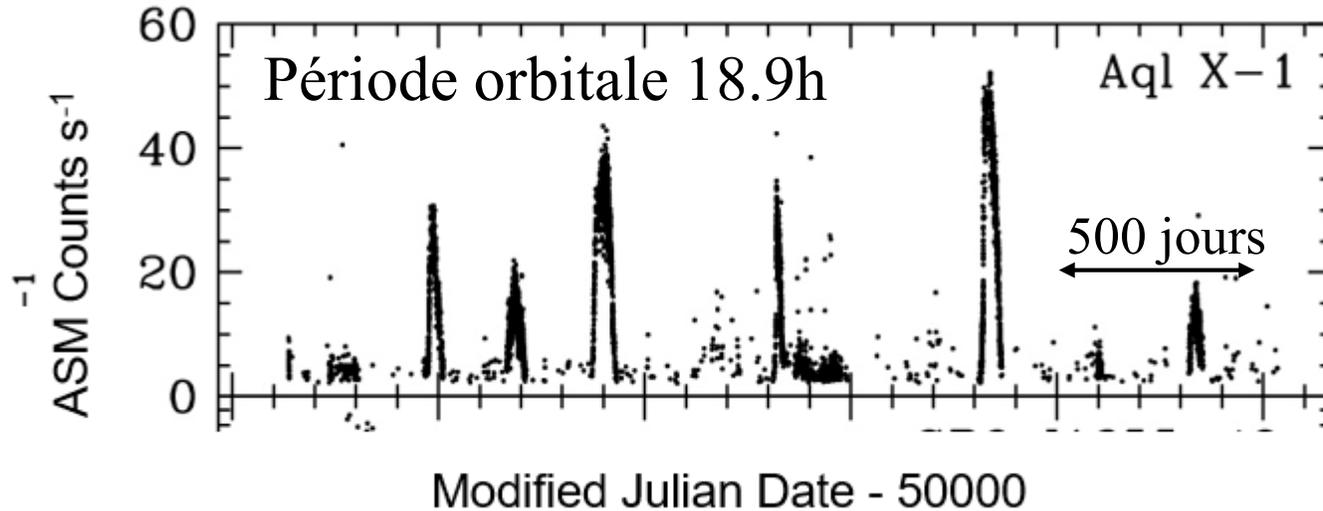


Binaires X de faible masse: sursauts longs de rayons X

On peut atteindre la surface de l'étoile à neutrons
entre deux sursauts de rayons X (LMXB)

20 bursts en 16 ans

Luminosité pic 10^{37} erg/s
Pas de corrélation entre périodes,
énergies, durées



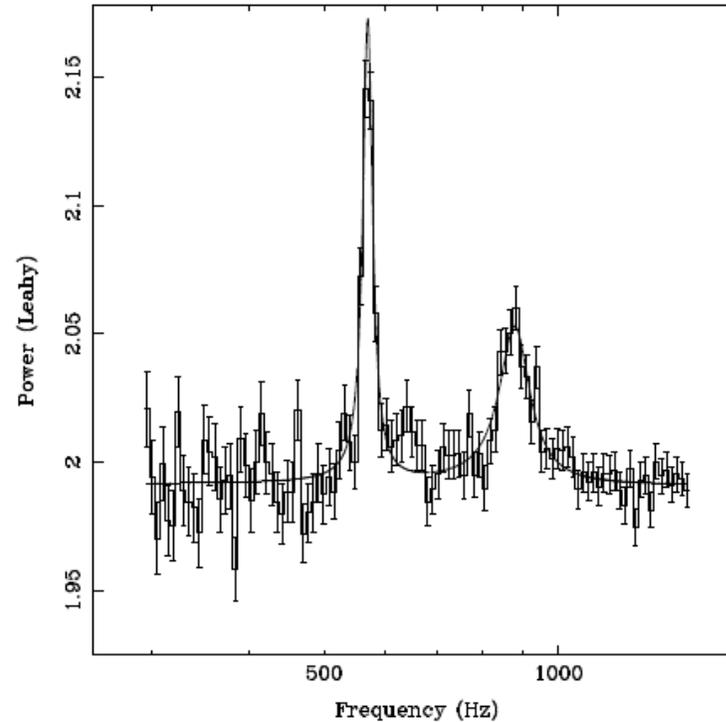
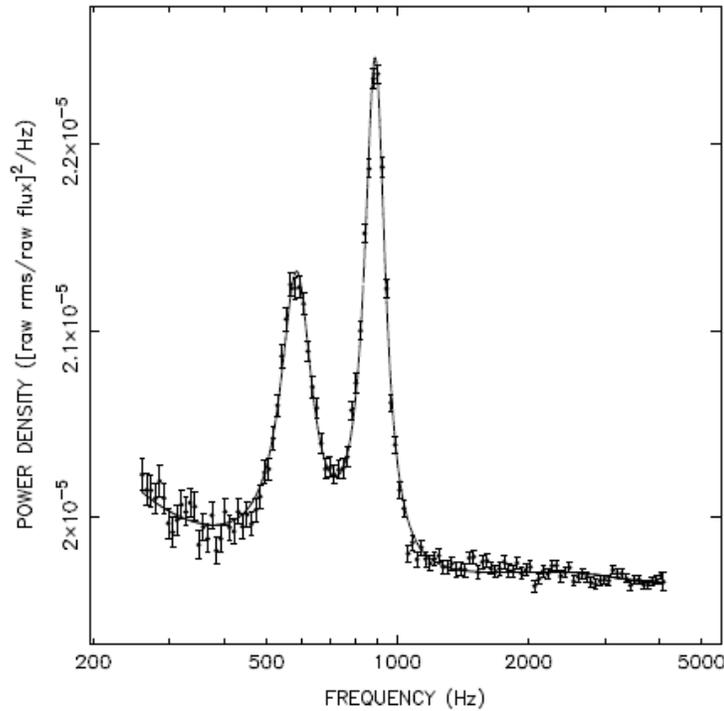
Champ magnétique faible ($B < 10^9$ G)
On suppose émission de surface uniforme

→ La forme du sursaut renseigne
sur le rayon externe de l'étoile

$$L_t = R_{\text{disc}} (L_t)^2 / \tilde{\Phi}$$

Oscillations Quasi-périodiques (QPO)

L'analyse en fréquence (TF) montre deux pics, qui ressemblent à un battement, mais il ne s'agit pas du battement avec la fréquence de spin (ms, ou kHz)
La fréquence basse serait liée aux sursauts X. Relation avec la chute sur la surface?

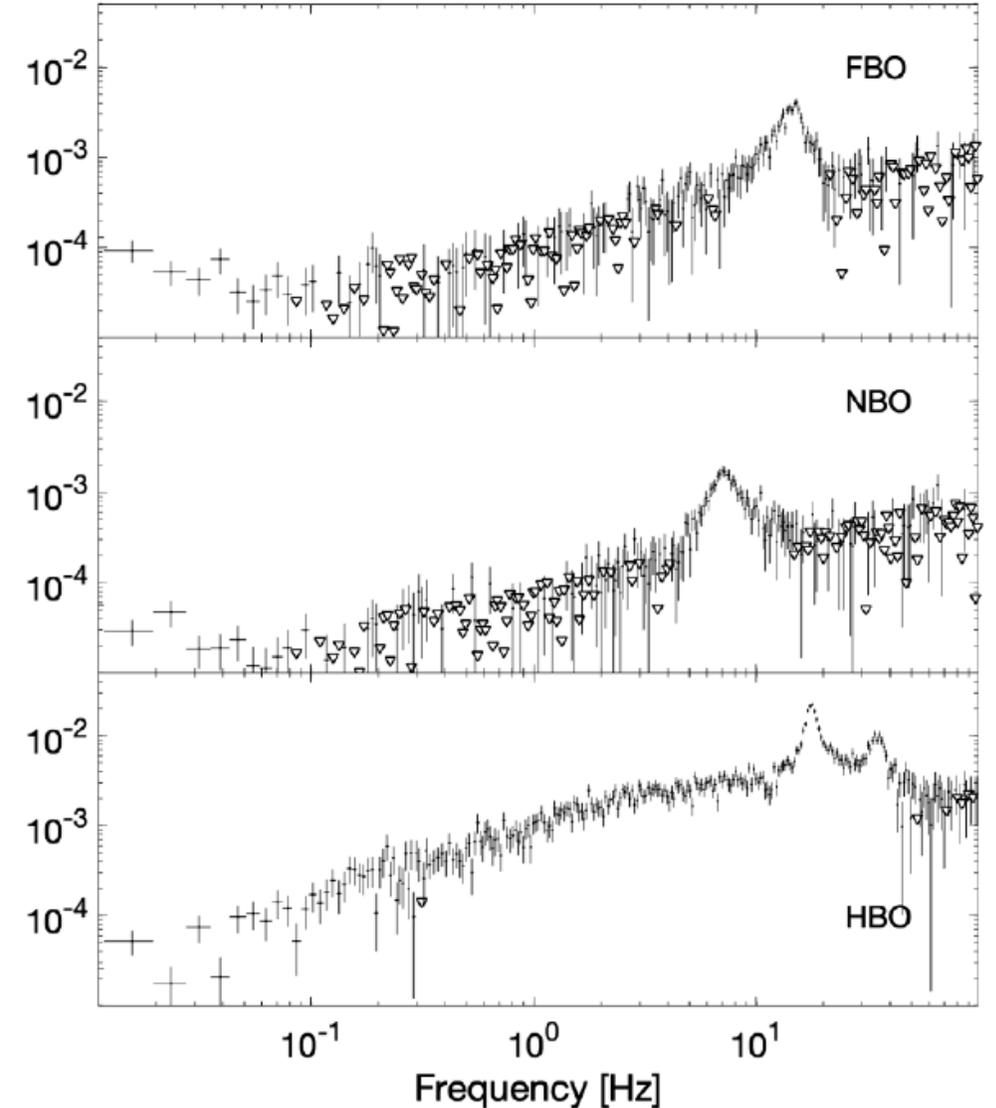
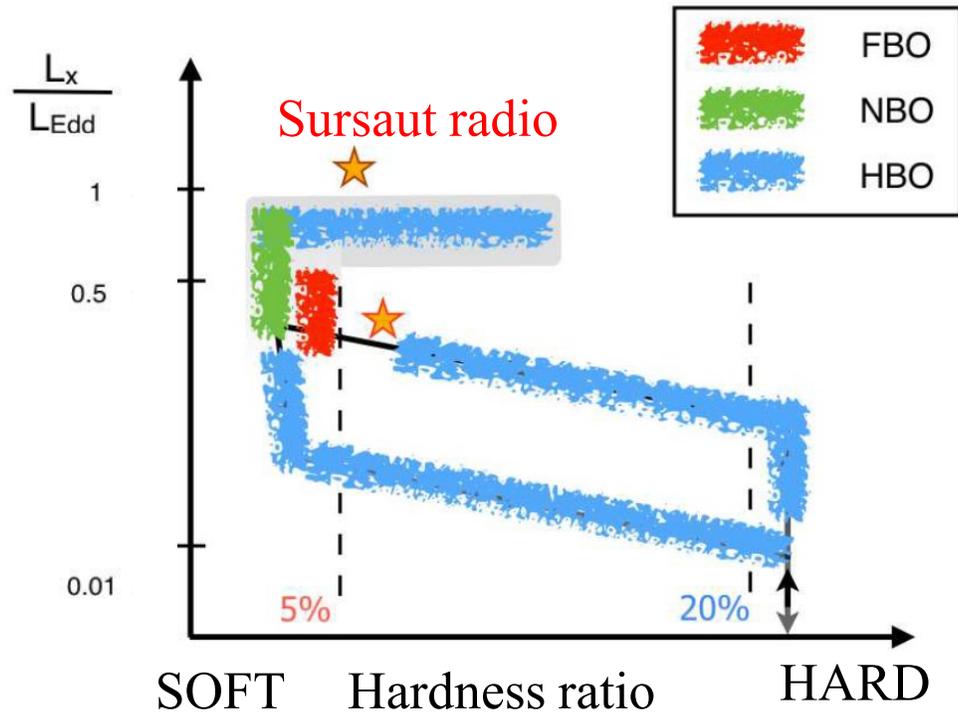


Mais pas la fréquence haute
autre mécanisme?

Semblable à ceux des binaires
à trou noir, précession relativiste
du gaz en orbite du disque
d'accrétion

Binaires X de faible masse: QPO

Classifications des oscillations quasi périodiques
Les fréquences principales sont parfois analogues
avec celles des binaires à trou noir
Flaring branch oscillations (FBOs),
Normal (NBOs) Horizontal (HBOs),



Modèle de la précession relativiste

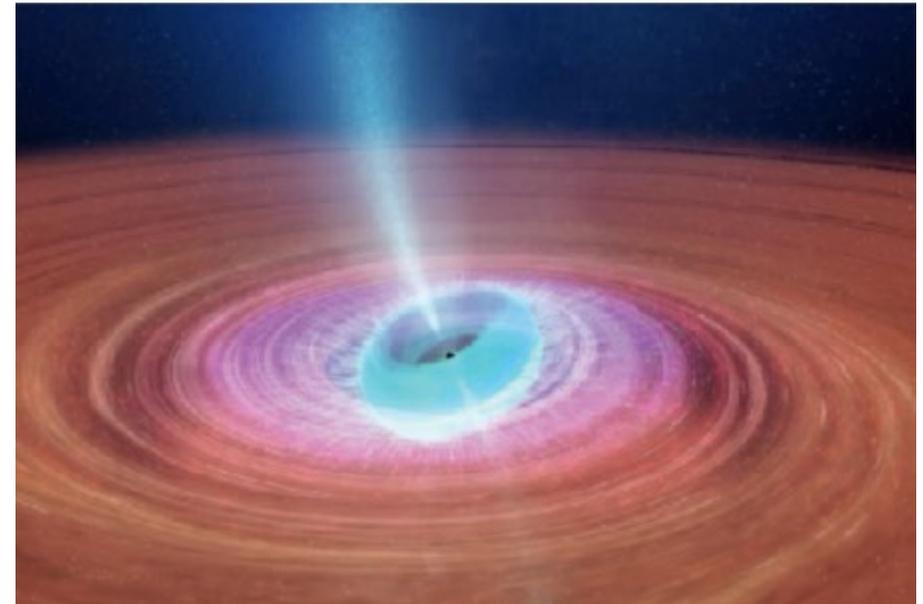
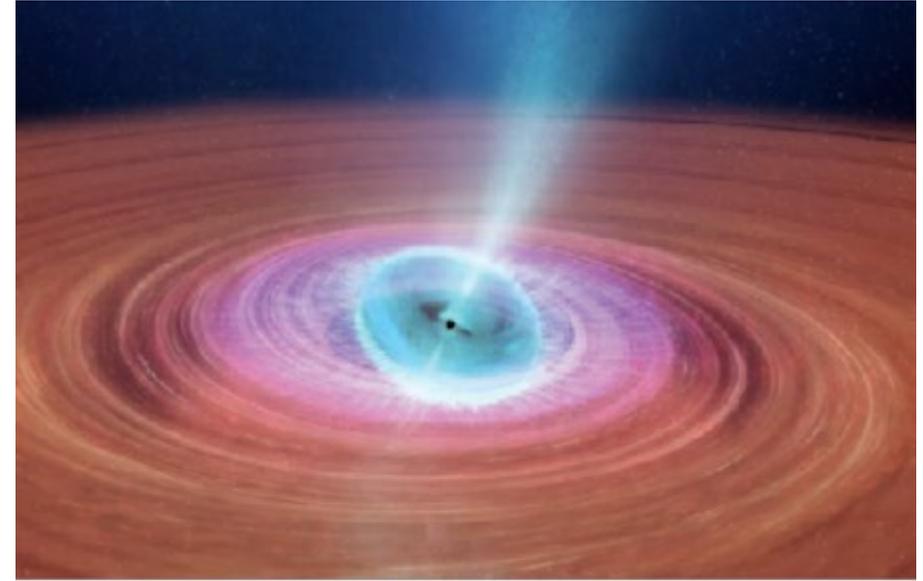
Pour un objet compact, la gravité est si forte que l'espace est entraîné dans la rotation

→ Effet Lense-Thirring

La fréquence basse = harmonique 2 de la fréquence de précession

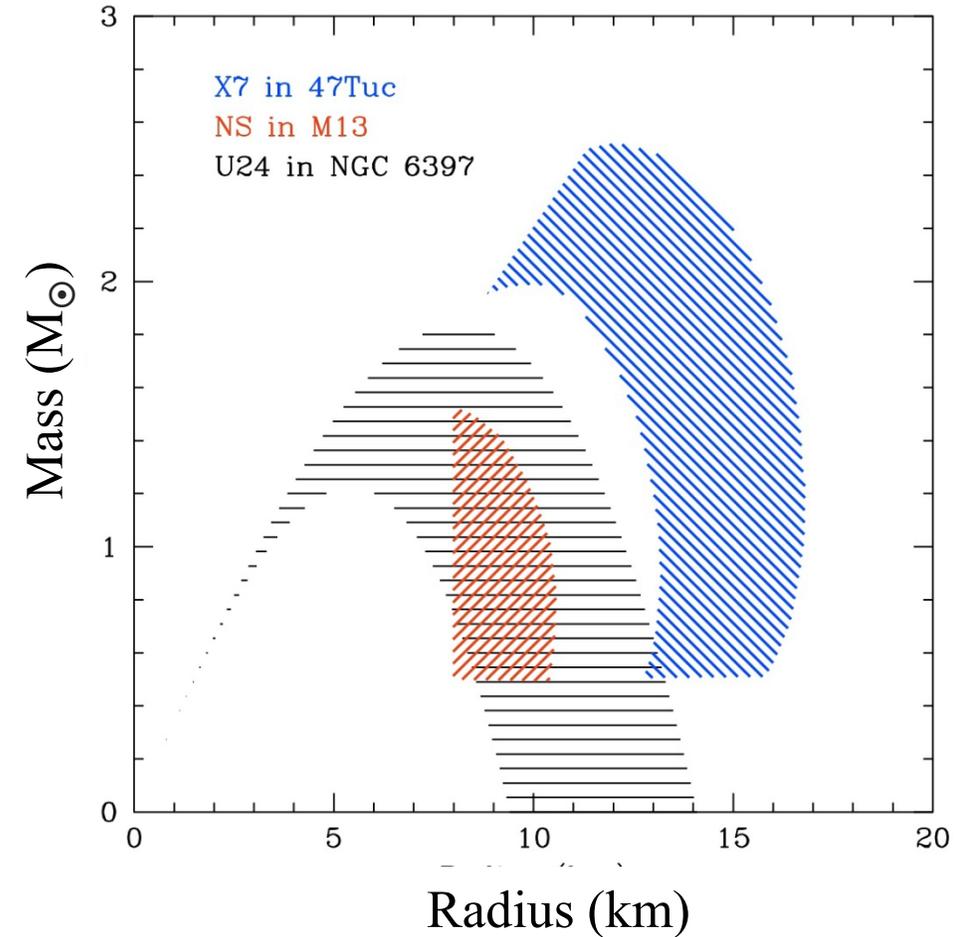
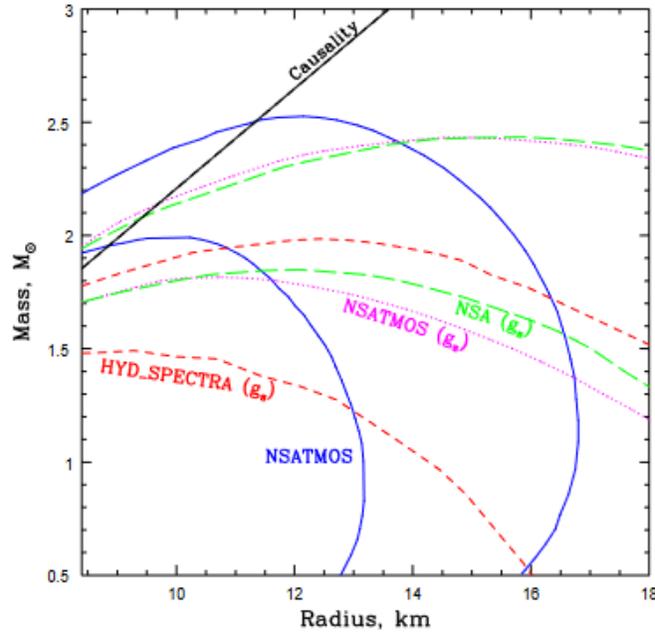
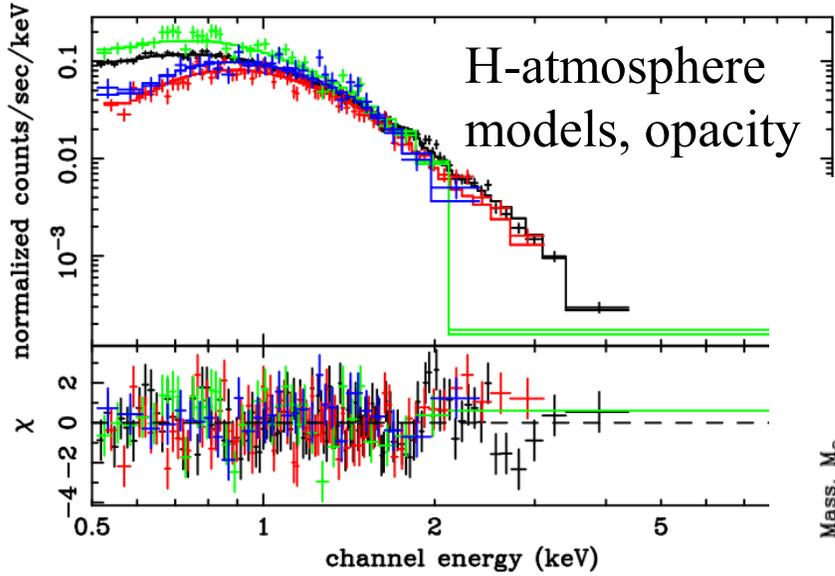
On connaît le spin du pulsar

→ Fréquence de précession, à un rayon donné



Rayon des binaires X dans les amas globulaires

Binaires sans oscillations ni sursauts
 Rayons X de la surface: $\rightarrow M(R)$



5 observations Chandra de U24
 dans NGC 6397, X7 / 47Tuc, NS / M13

Fusion d'étoiles à neutrons: Transition de phase Neutron-Quark?

Evénement GW en 2017

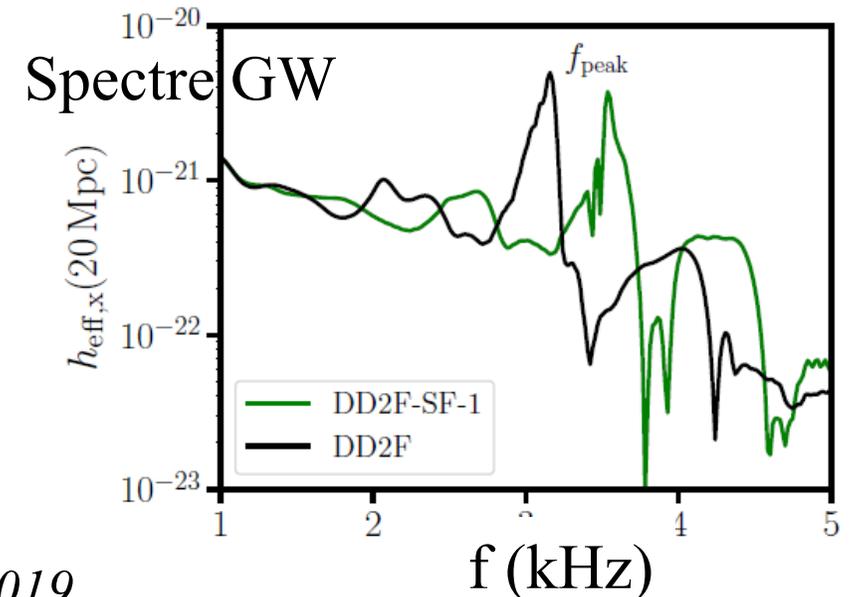
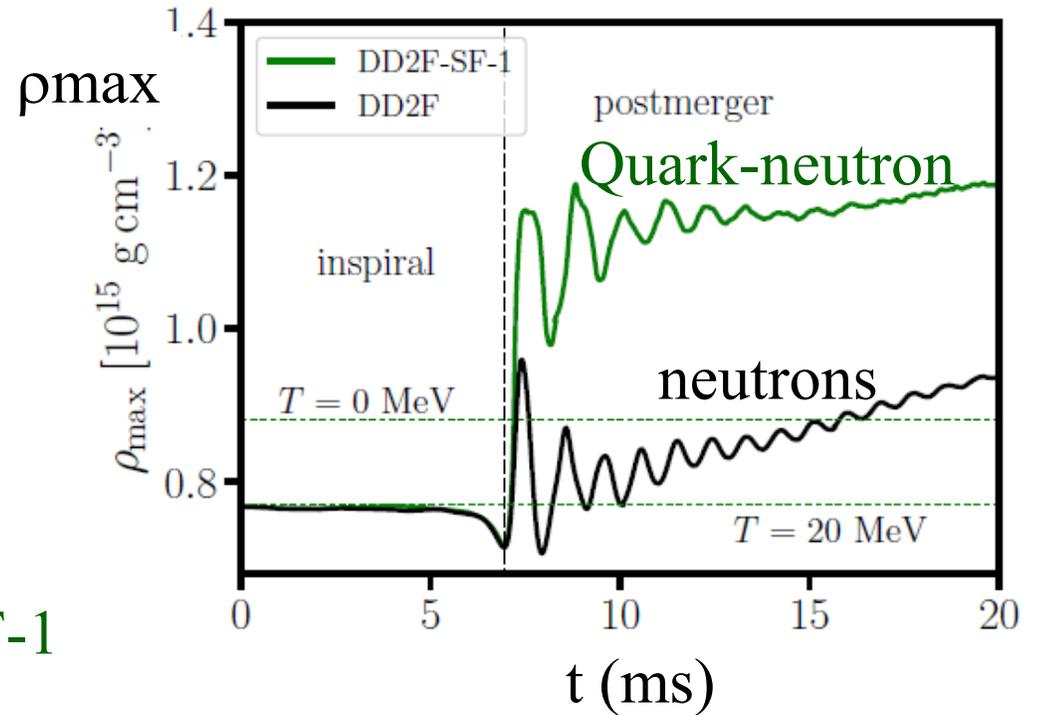
Simulation de $1.35-1.35 M_{\odot} \rightarrow 2.7 M_{\odot}$

7ms après la phase d'inspiral, les 2 étoiles fusionnent et 30% de la masse est en phase quark avec l'EOS SF-1
→ Coeur plus dense

Difficile à détecter

Pourrait être vu dans le spectre de polarization croisée après 1.7 kHz

Pour cela il faut bien connaître les masses et les déformations de marée, pas pour GW170817

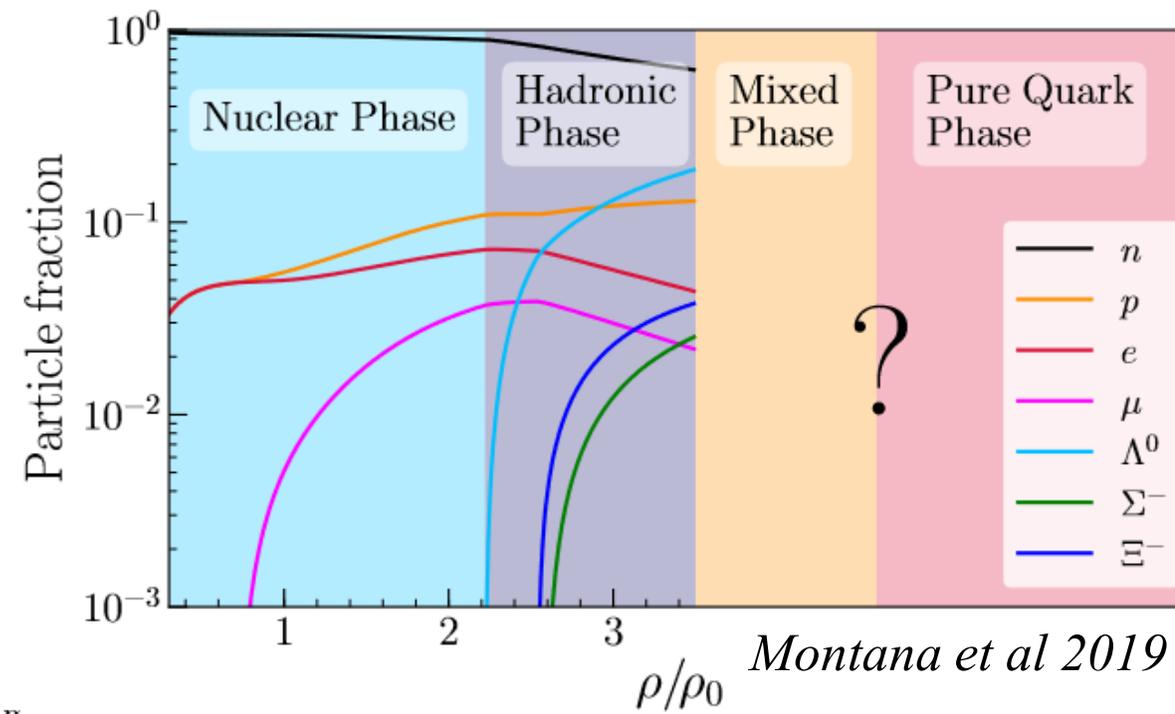
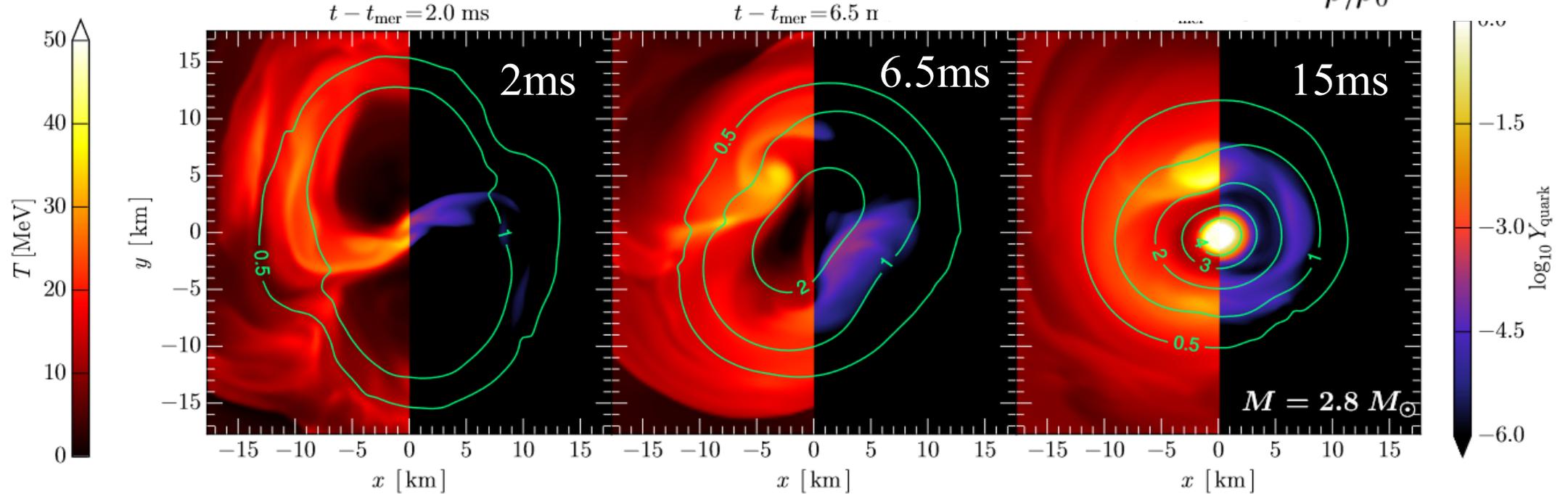


Brièvement avant le trou noir

Prédictions pour une fusion

Température (à gauche) et fraction de quark (droite), des 15ms de fusion

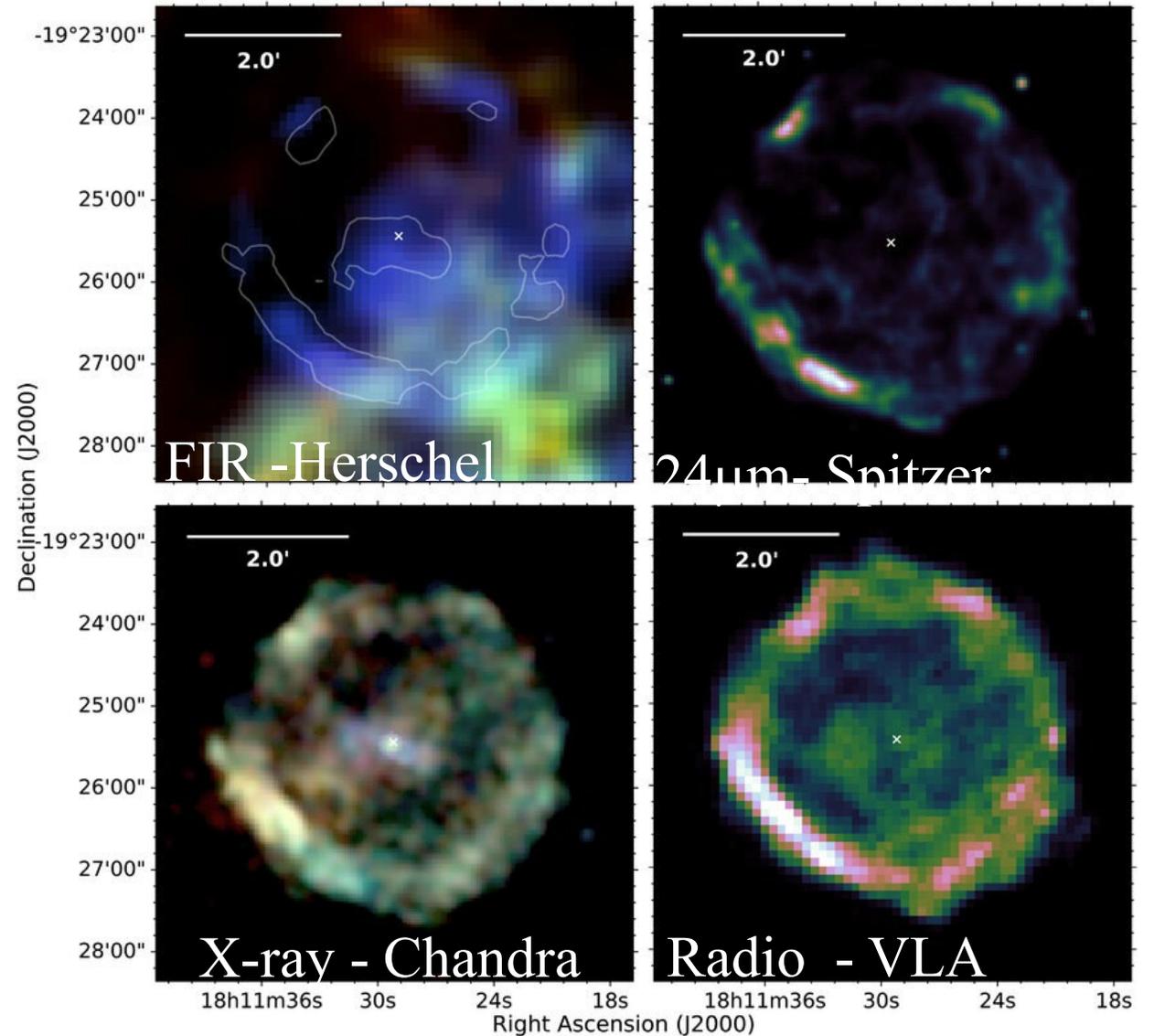
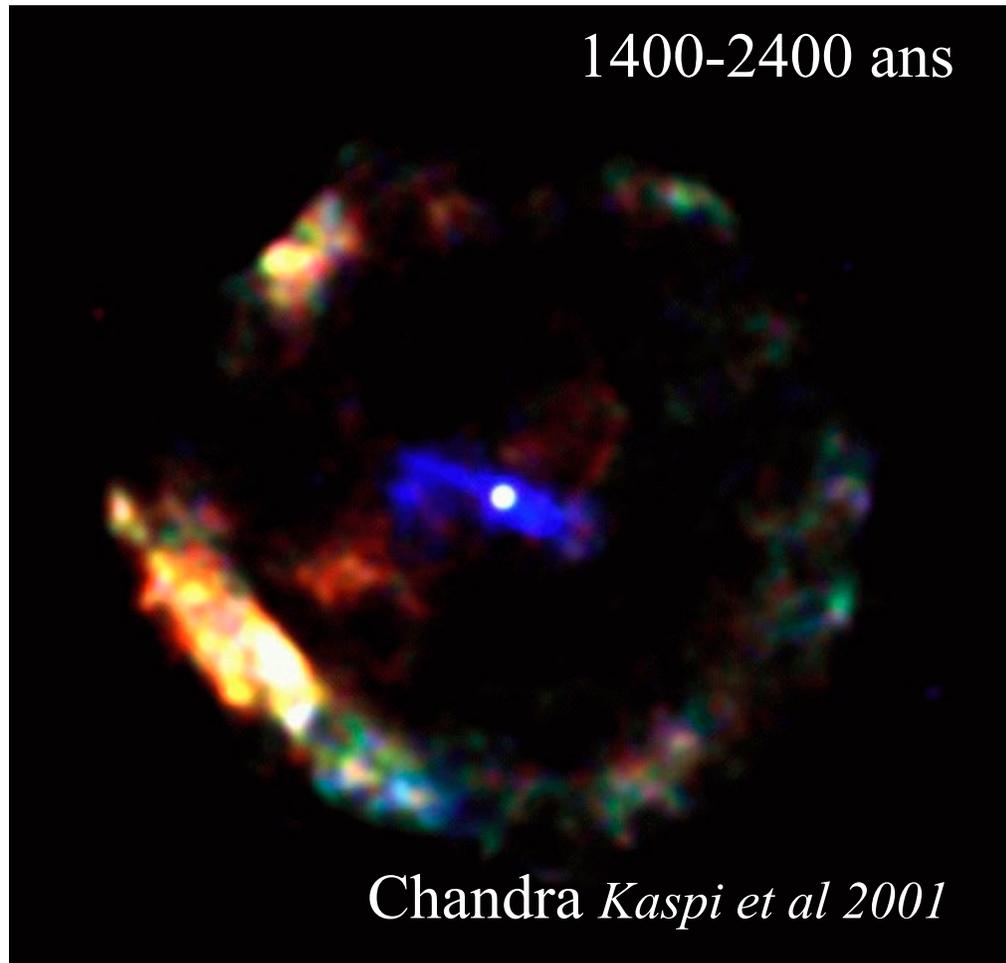
Most et al 2019



Montana et al 2019

Vents de pulsars: jeune pulsar 65ms G11.2-0.3

Age ~ 2000 ans, $0.34 M_{\odot}$ de **poussière**
éjectée, froide dans la PWNe
chaude dans l'anneau SN



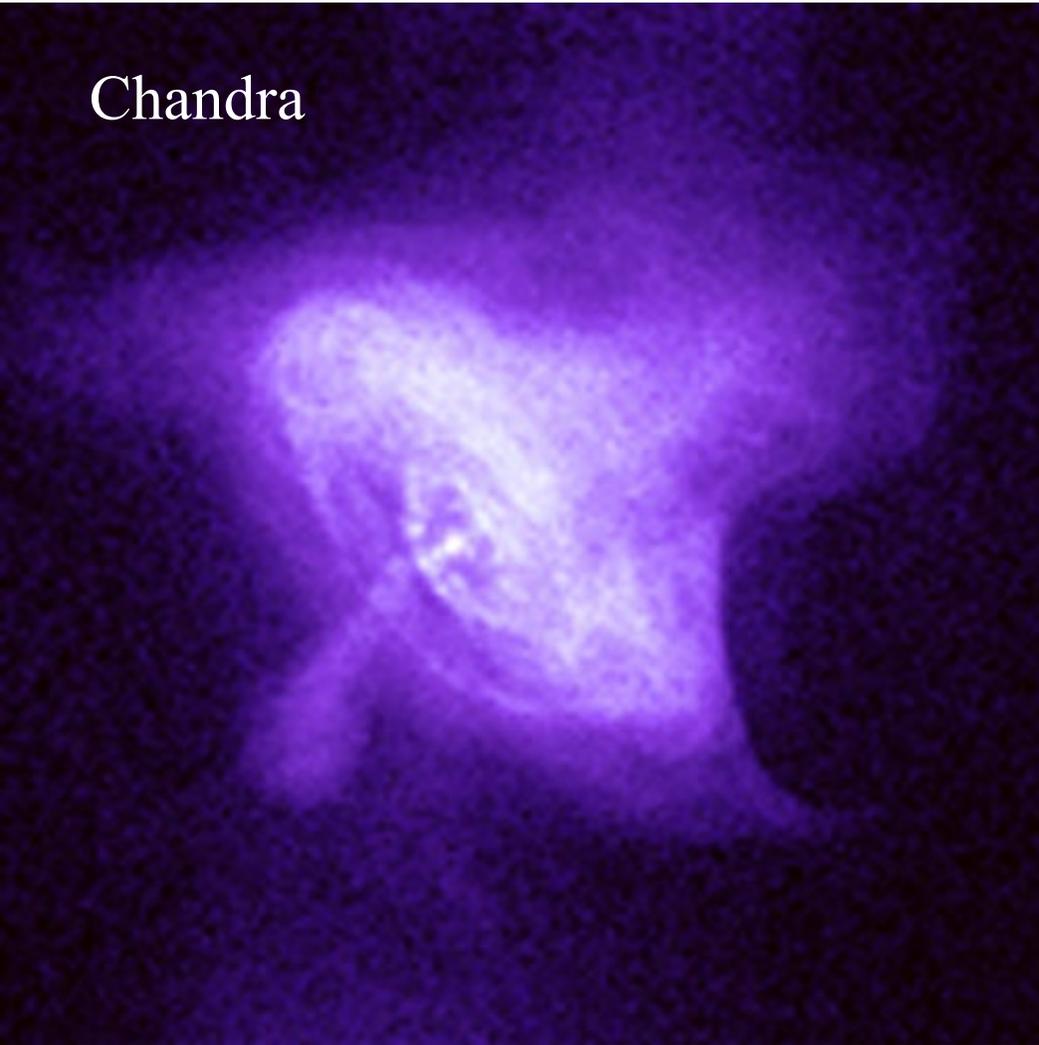
Plérion

Chawner et al 2019

Pulsar du Crabe, coquille et Plérion

Jet de particules relativistes, + vent dans le plan équatorial

Chandra

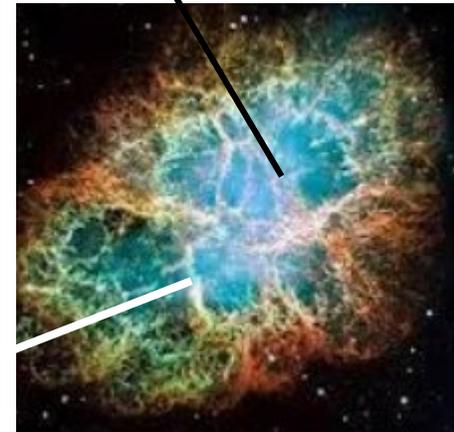


Plérion: nébuleuse de vent de pulsar
Polarisation des rayons X
Par IXPE (lancé en 2021)



Anneau= choc
Vent-ISM
Grumeaux
Instables

Plusieurs
éjections



Magnétars: $B > 10^{15}$ G

Jeunes étoiles à neutrons

Durée de vie courte, $P=2-3s$

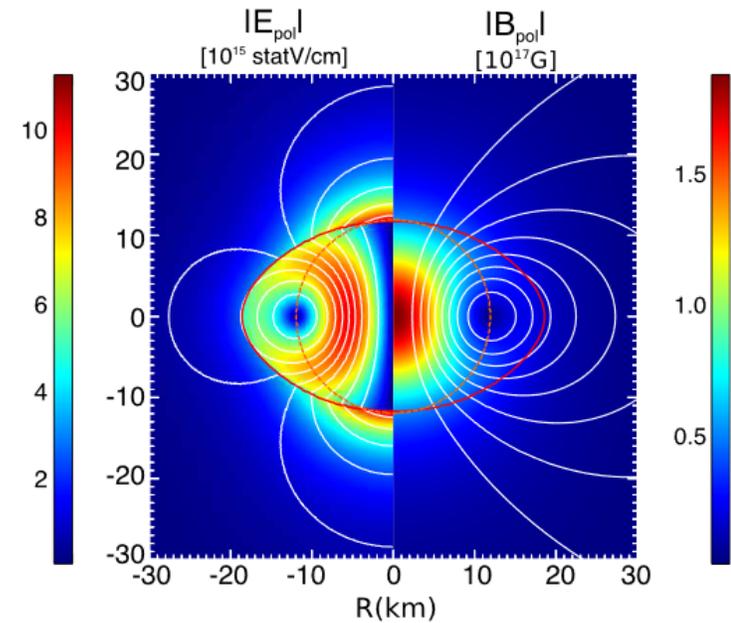
$Pdt/dP = \text{qq } 10^3 \text{ ans}$

Champs magnétiques si puissants qu'ils produisent des tremblements à la surface des étoiles à neutrons

Ces tremblements d'étoile produisent d'énormes éclairs de **rayons X et gamma**

La source d'énergie est le champ magnétique

Proviennent des étoiles massives $20-45M_{\odot}$



Del Zanna et al 2018

Gamma-ray Burst
+ Particules de
 $10^{16}eV$ à $10^{20}eV$
« Soft » répéteurs

Bhattacharya et al 2022

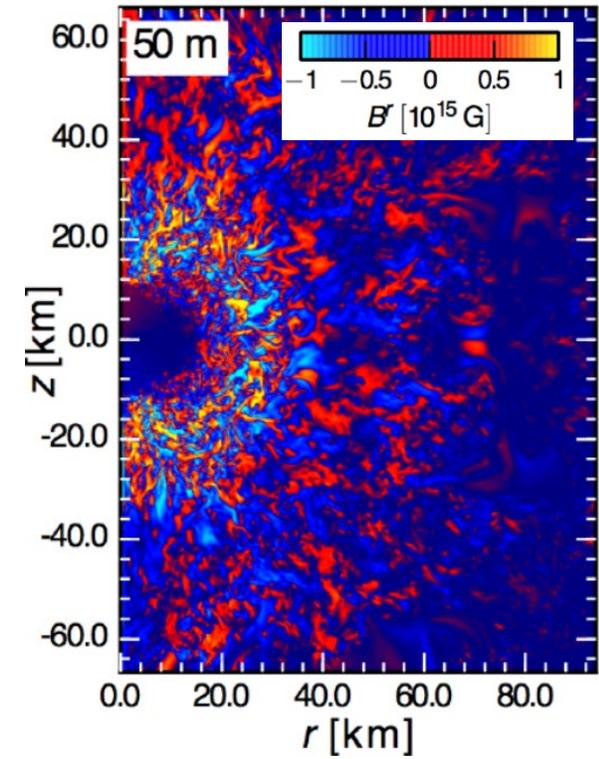
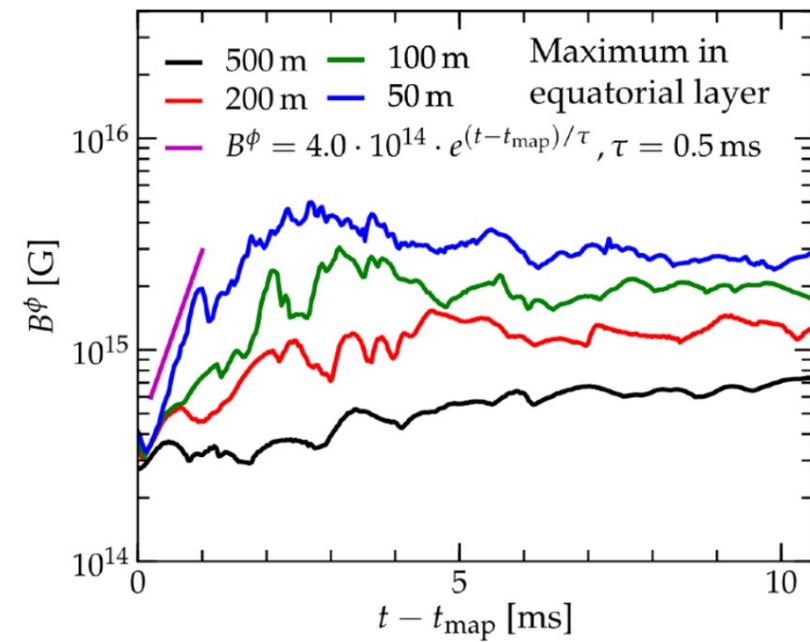
Formation des magnétars

Après une explosion de supernova → étoile à neutrons,
avec champ B amplifié par la compactification

Conservation du flux BS, facteur de surface $\sim 10^{10}$ - 10^{16}
1kG dans T-Tauri, 1G dans Betelgeuse

De plus, la convection durant la formation de l'étoile à neutrons
augmente B par un **mécanisme dynamo** (*Duncan et Thompson 1992*)
Selon des valeurs adéquates du spin, chaleur et énergie de rotation
se transforment en énergie magnétique → **$B > 10^{15}$ G**

Environ **10%** des étoiles à neutron sont des magnétars



Sursauts Radio (FRB)

Découverte *Lorimer, Bailes, McLaughlin & Narkevic (2007)*

Durée <5 millisecondes → zone émettrice <1500km

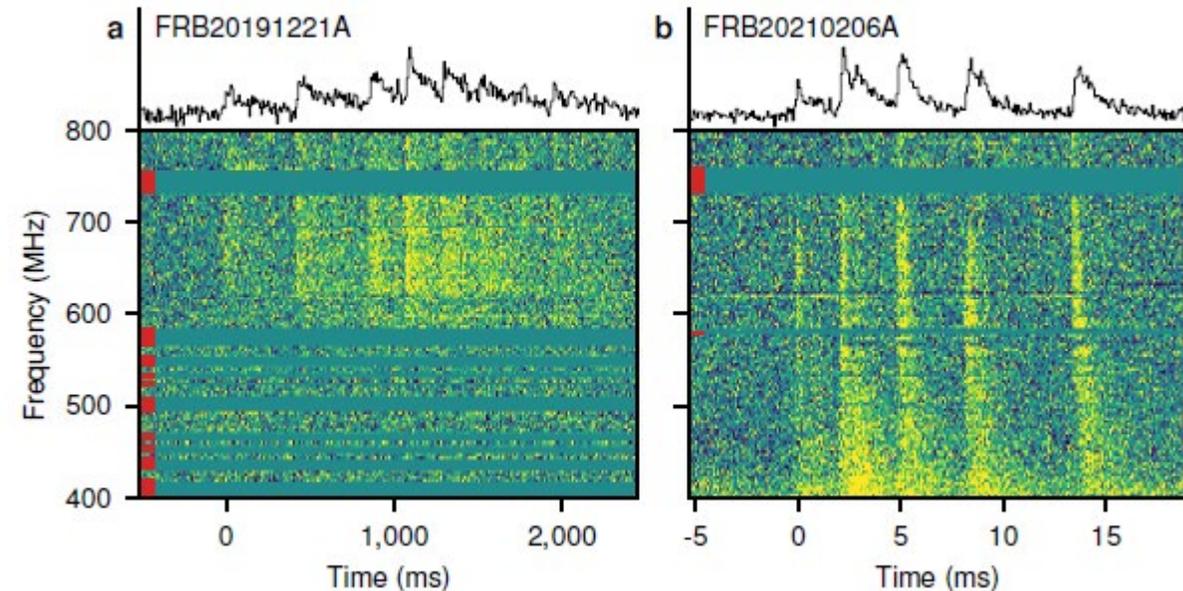
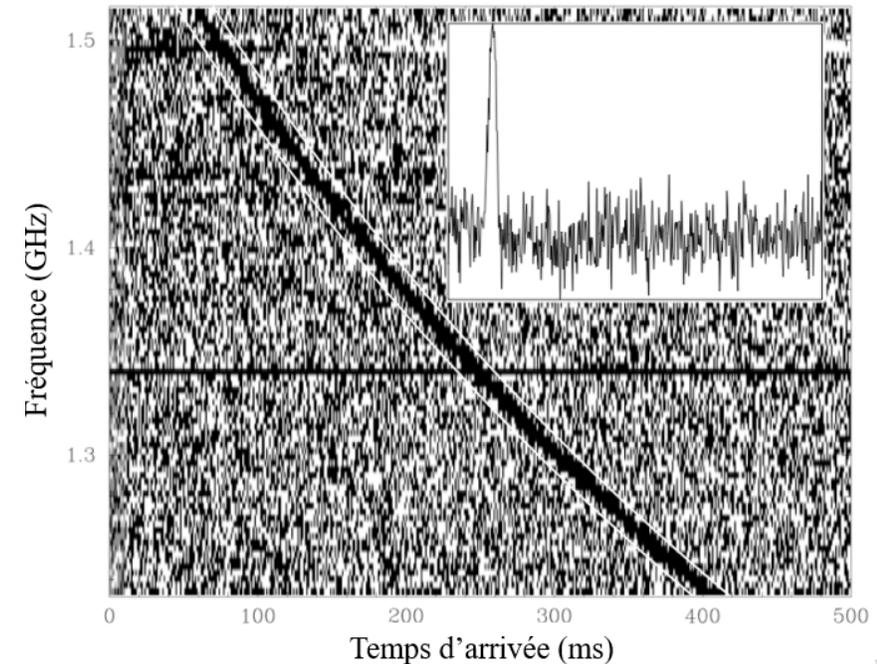
Objets compacts: étoile à neutrons, trou noir

Forte DM (300-1000) → extra-galactiques

Aujourd'hui > **830 FRB connus**, 26 répéteurs
25 galaxies hôtes

Traceurs du milieu intra-galaxies

Détection d'un grand nombre de répétitions
avec CHIME/FRB



SGR J1935+2154: FRB dans notre Galaxie

Jusqu'à présent le seul FRB dans la Voie lactée
coincide avec un « Short Gamma-Repeater » SGR: ce sont
des magnétars, $B \sim 10^{15}$ G (1000x pulsar moyen), et aussi les AXP, historiquement
(Anomalous X-ray Pulsars), **period 3.2 sec**
Emission irrégulière, période longue (sans doute ralentie par le fort champ B)
Seulement 30 magnétars connus

SGR1935, découvert en 2016

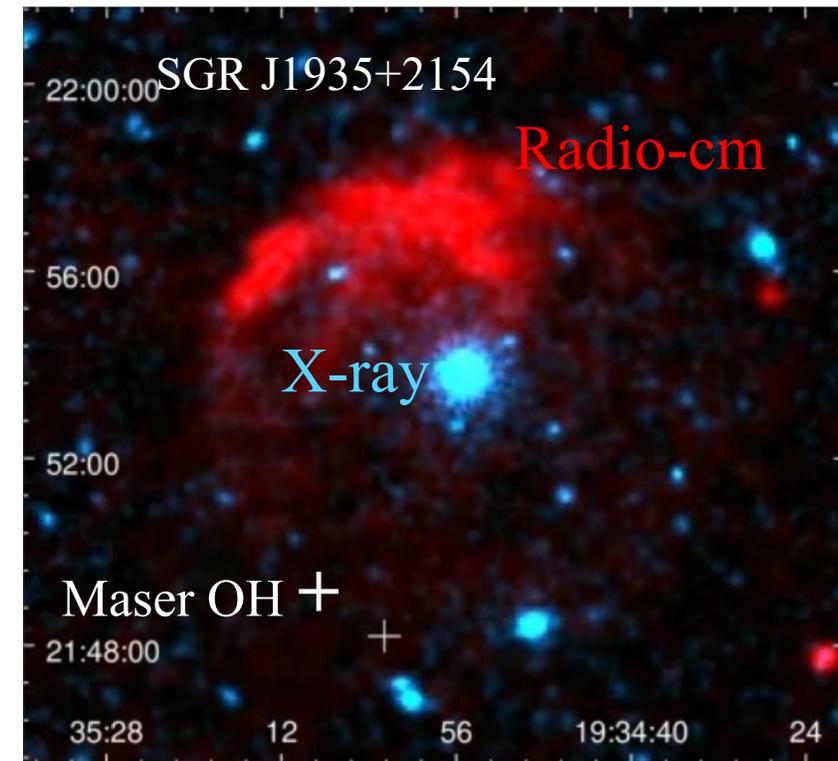
12 sursauts en X depuis

Supernovae G57.2+0.8 à 6.6kpc

Explosant il y a 16 000 ans

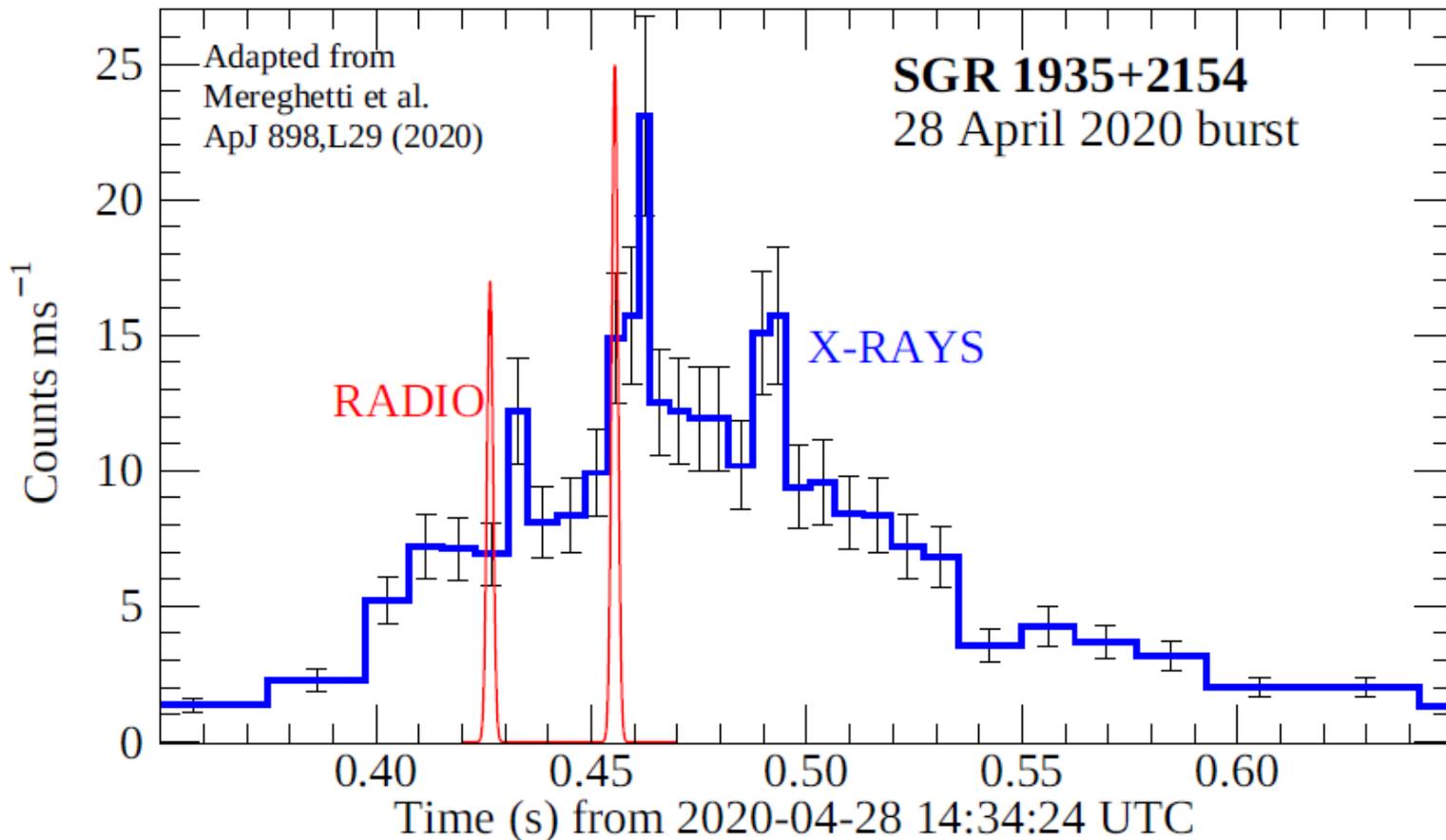
Interaction de la SN avec le gaz

→ Maser OH



Bursts X et radio: décalage de qq ms

Sursauts X durs (Integral), et Radio (Chime/FRB),
pas forcément associés → Proviennent de régions différentes?



--Les répéteurs ont des pulses plus longs

--Certains répéteurs ont des sources radio pérennes
PRS (permanent radio source)

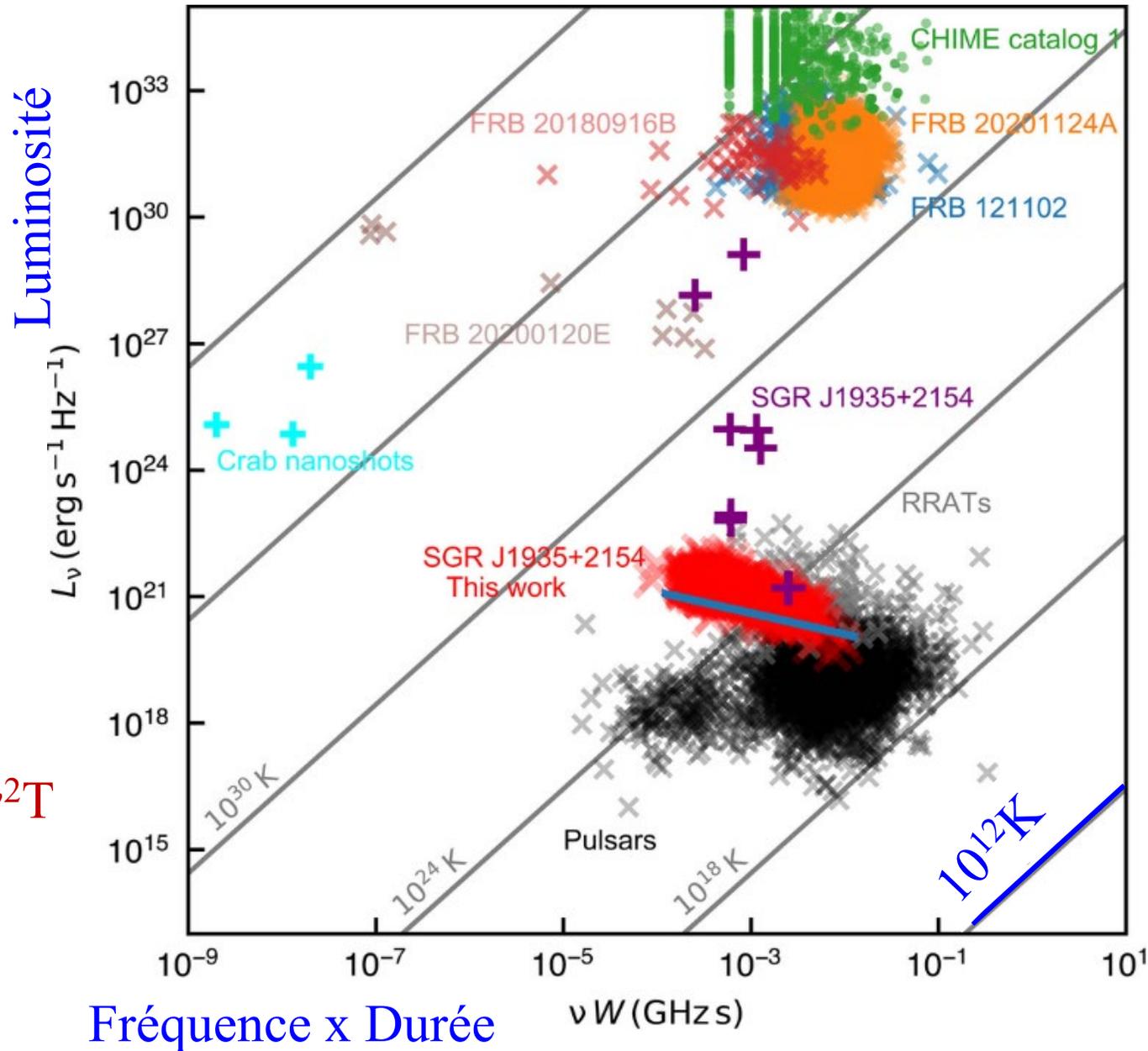
--pas forcément des SNII
SNIa dans un GC de M81

--durée ms, et aussi 60ns
(sous-régions de la surface?)

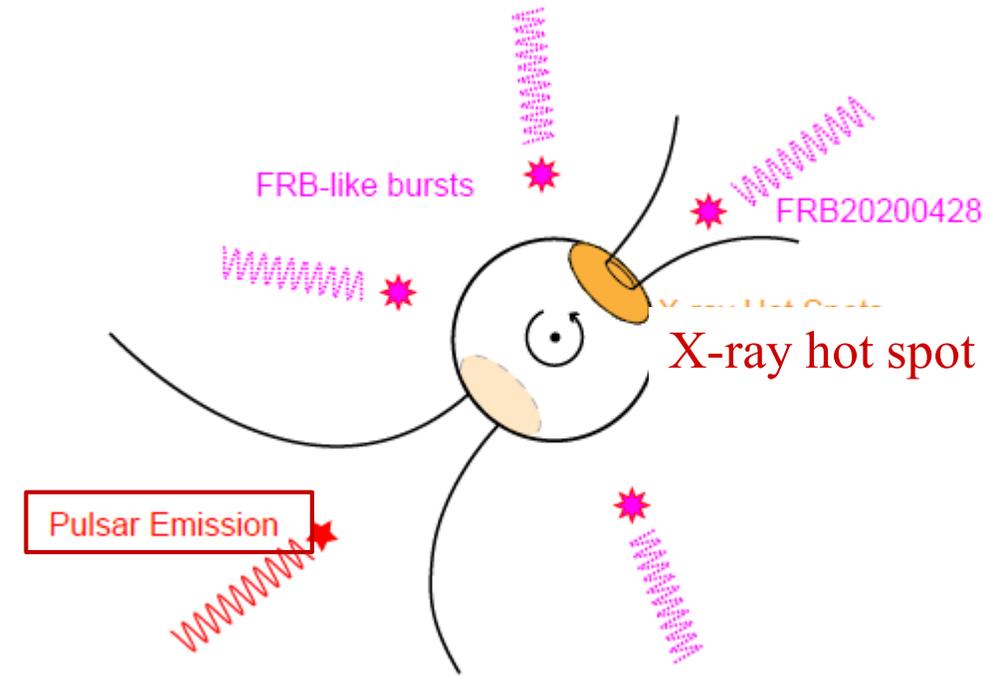
-- dans le temps, le signal descend en fréquence
(sad trombone) → atmosphere

-- angle polarisation PA varie

Pulses et sursauts de SGR 1935



Télescope FAST: 795 pulses radio



$\approx 180^\circ$ difference de phase entre le pic de rayons X et les **pulses radio**

Zhu et al 2023

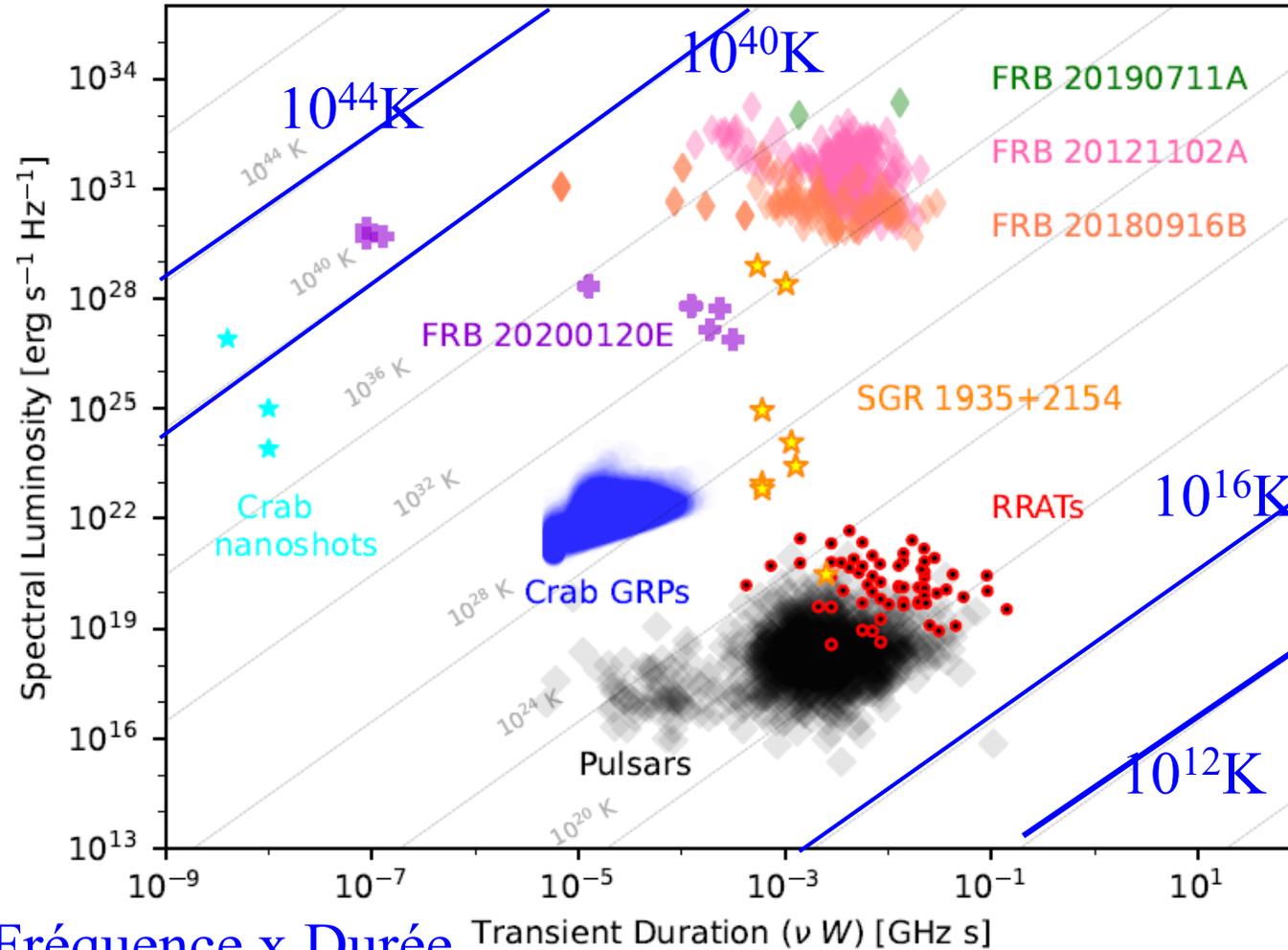
$L \sim \nu^2 T$

FRB: Luminosité - Durée

S'échelonne en température 10^{20}K à 10^{44}K

FRB20200120 (M81) et SGR1935 font la transition

→ Emission cohérente
Emission de courbure



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

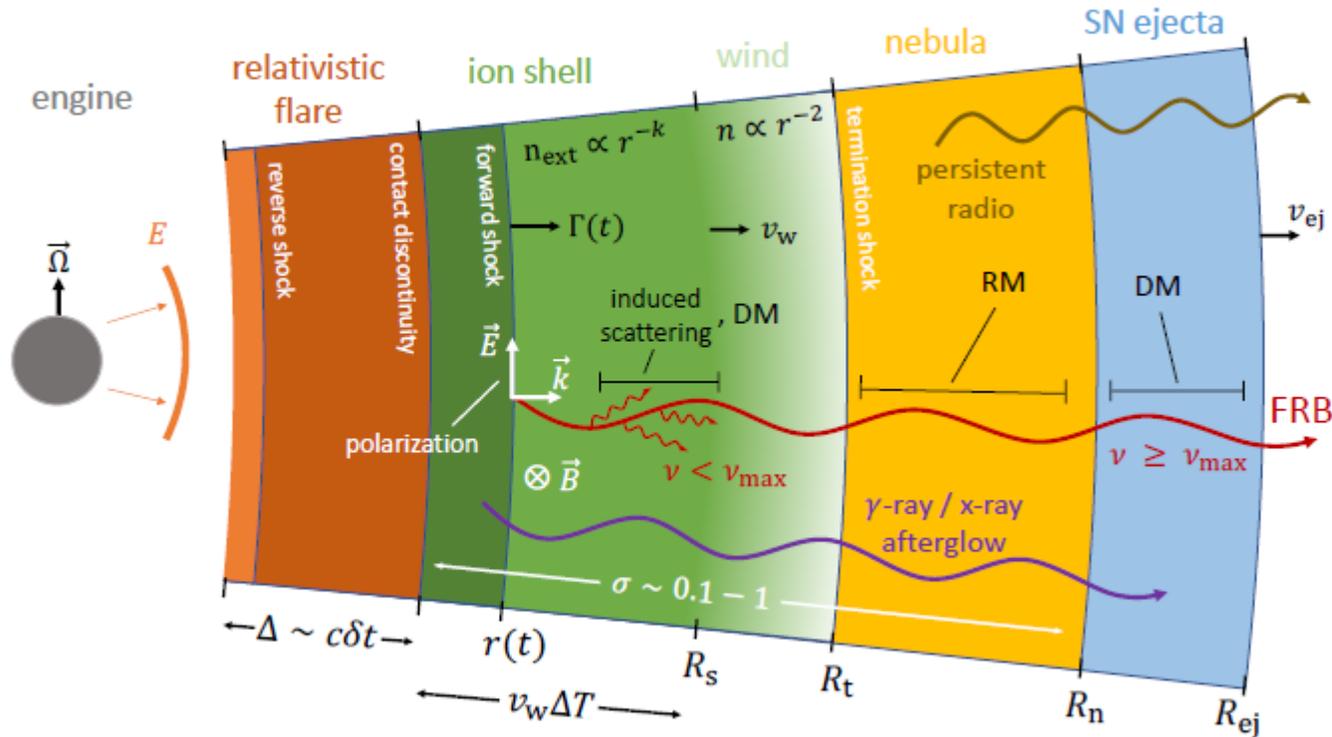
GRP
Giant Radio
Pulses

60nanosec
 10^{41}K

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

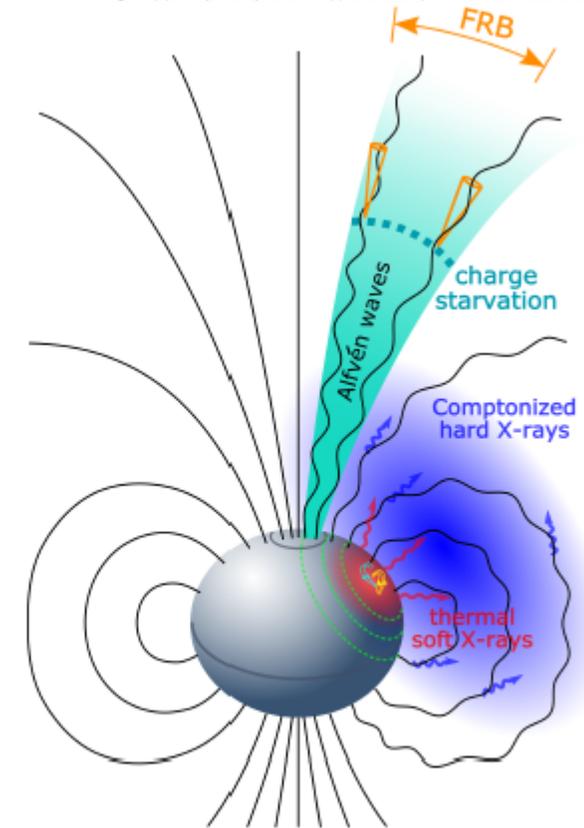
Mécanismes d'émission des FRB

Chocs à grande distance 10^5 km ?



(a) Shock models

Ou bien dans l'atmosphère ?



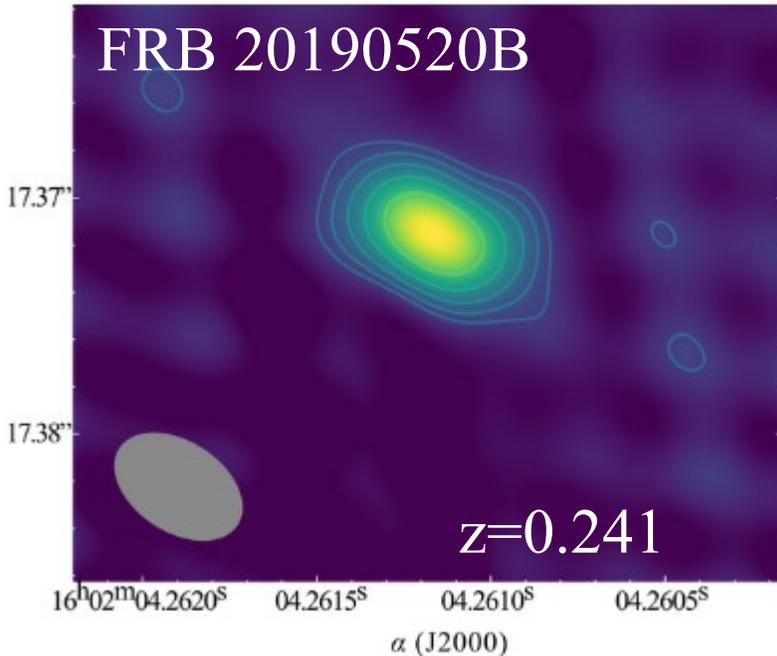
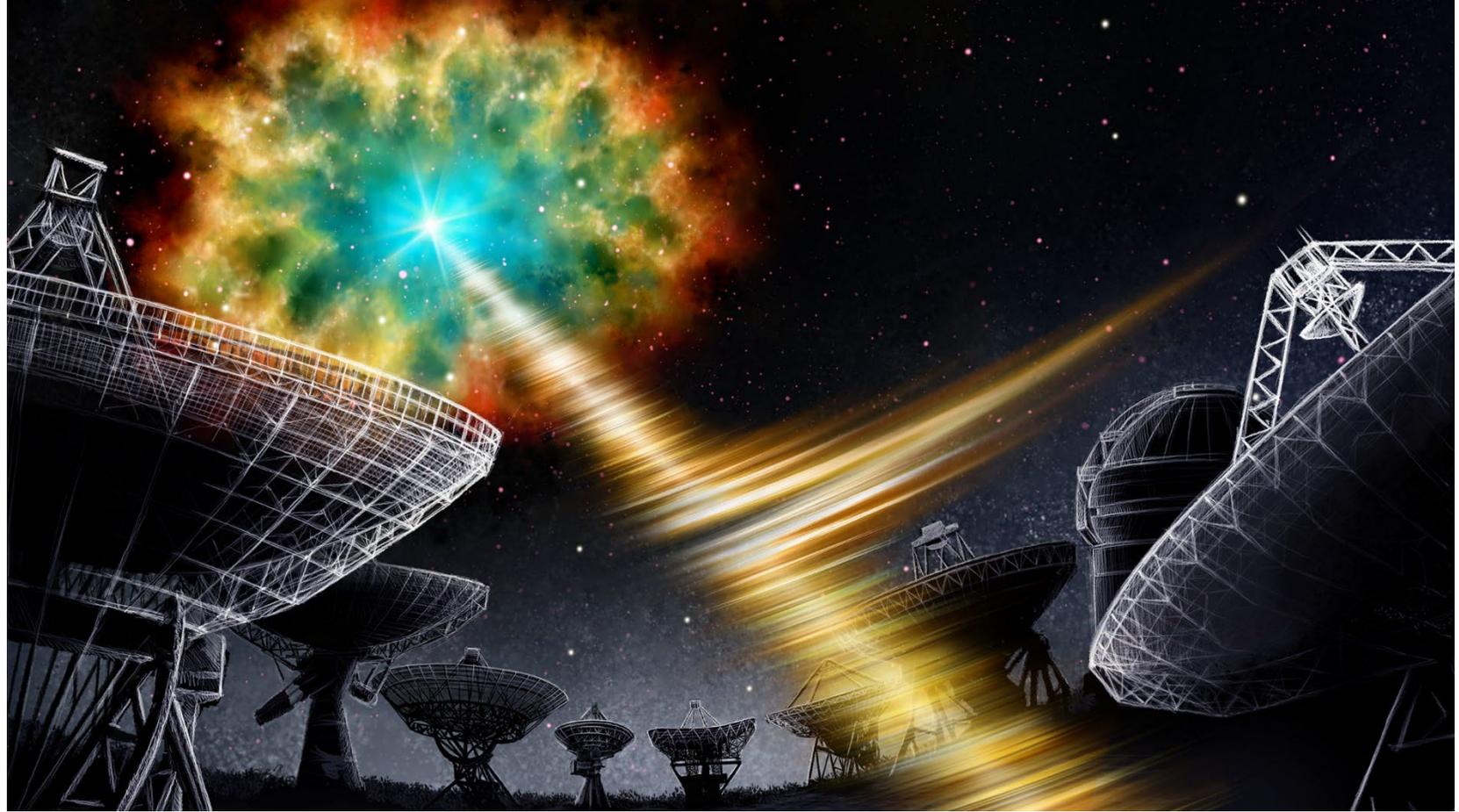
(b) Magnetospheric models

Angle de polarisation ne varie pas

Détection de nébuleuses associées aux FRB

Au moins 2 qui se répètent
Taille < 2.3 mas avec VLBI
 < 9 pc DA= 810 Mpc

Hôte: galaxie naine

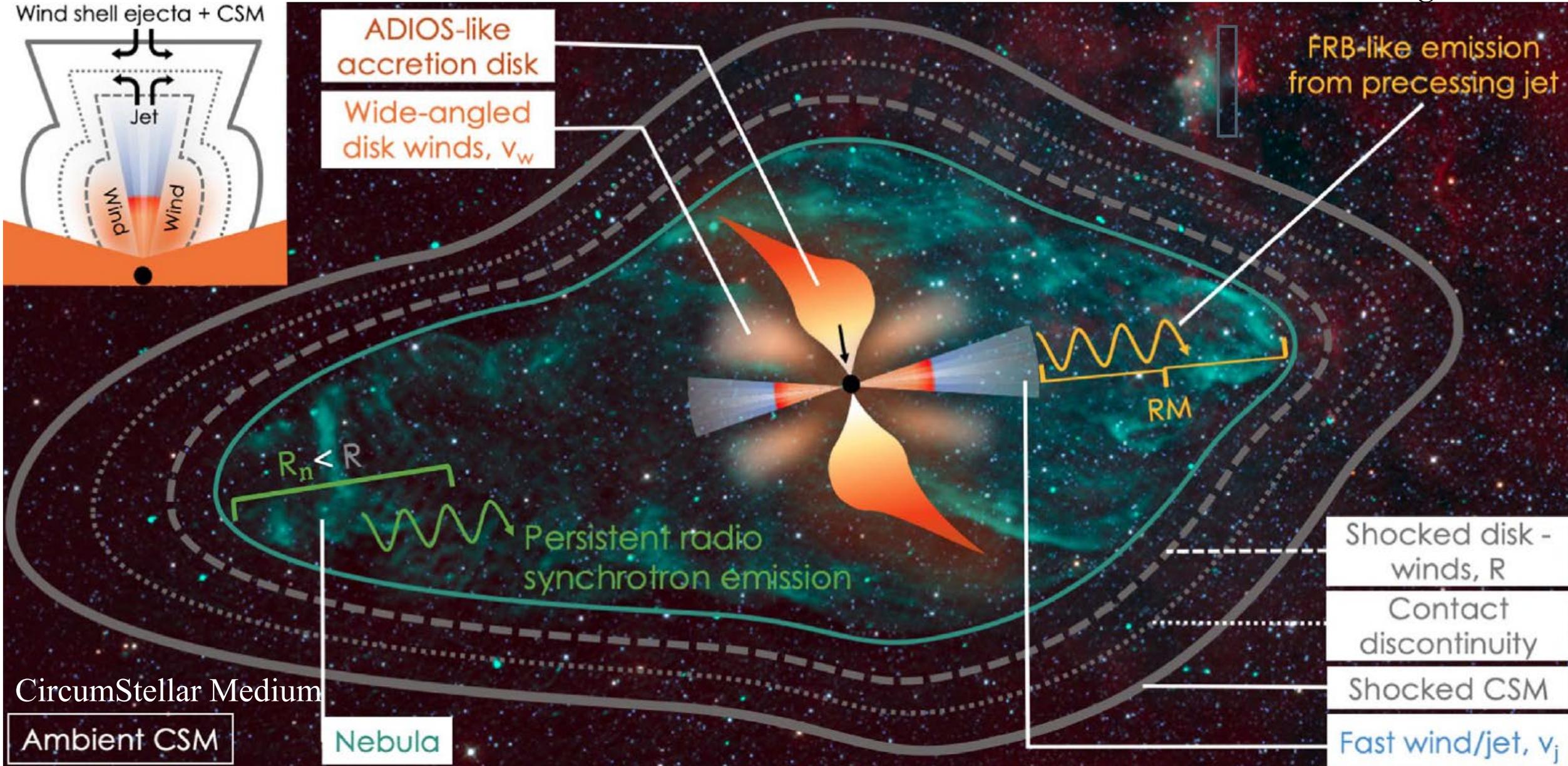
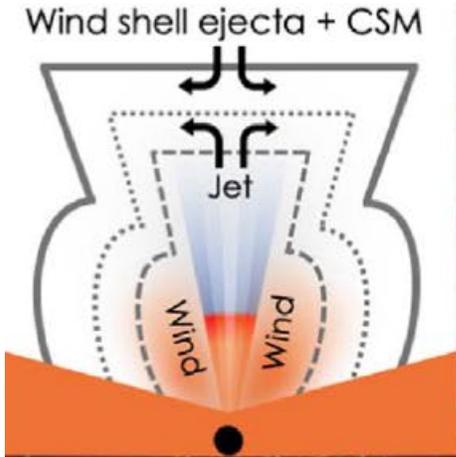


Compatible avec le modèle d'hyper nébuleuse

Vent du disque d'accrétion + jet radio dans une binaire magnétar/étoile compagnon

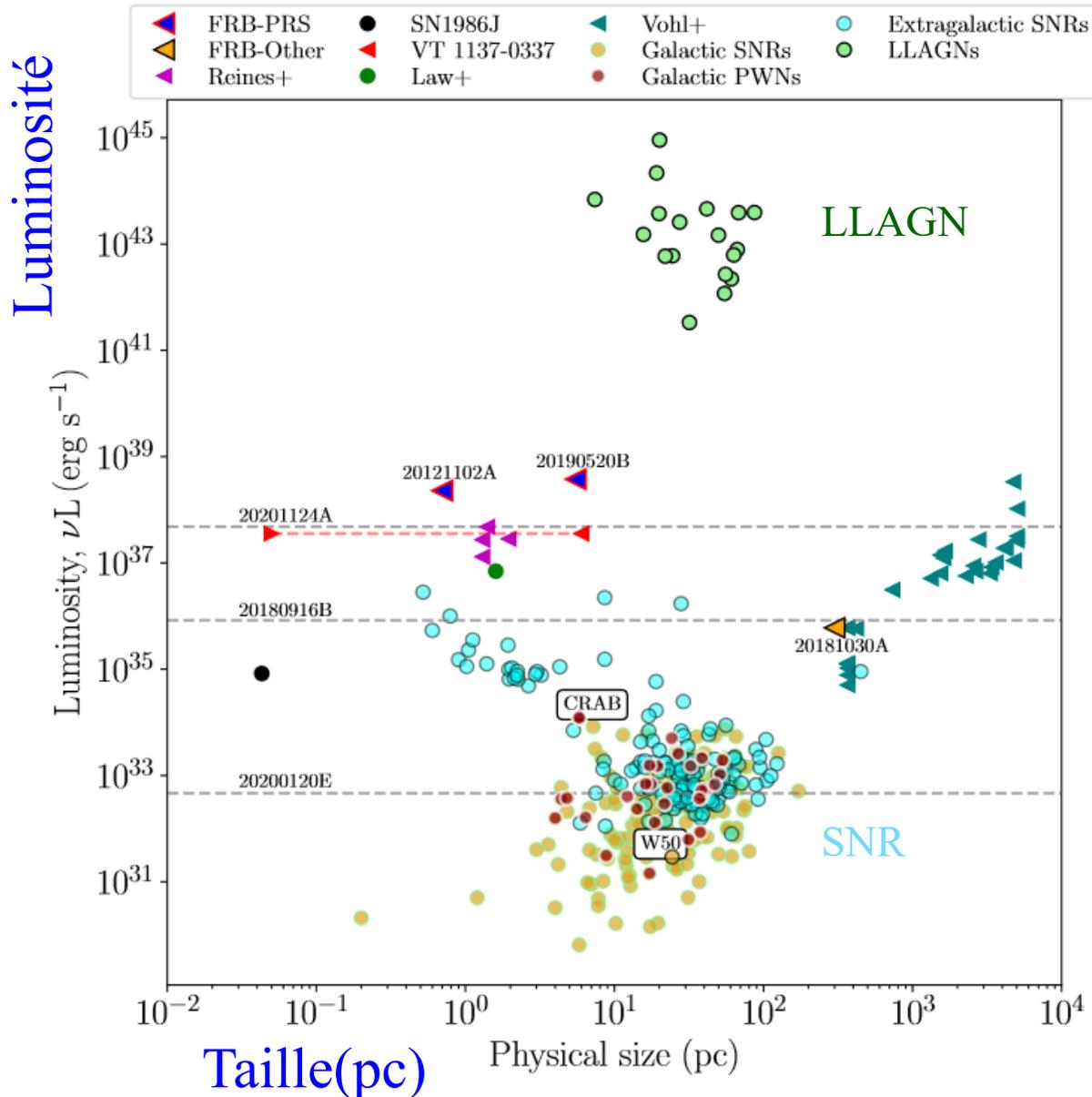
Super-Eddington accretion from companion

Sridhar & Metzger 2022



PWN: Pulsar Wind Nebula

Hyper nébuleuses



Lorsque l'étoile à neutron magnétisée (magnétar) vit en couple

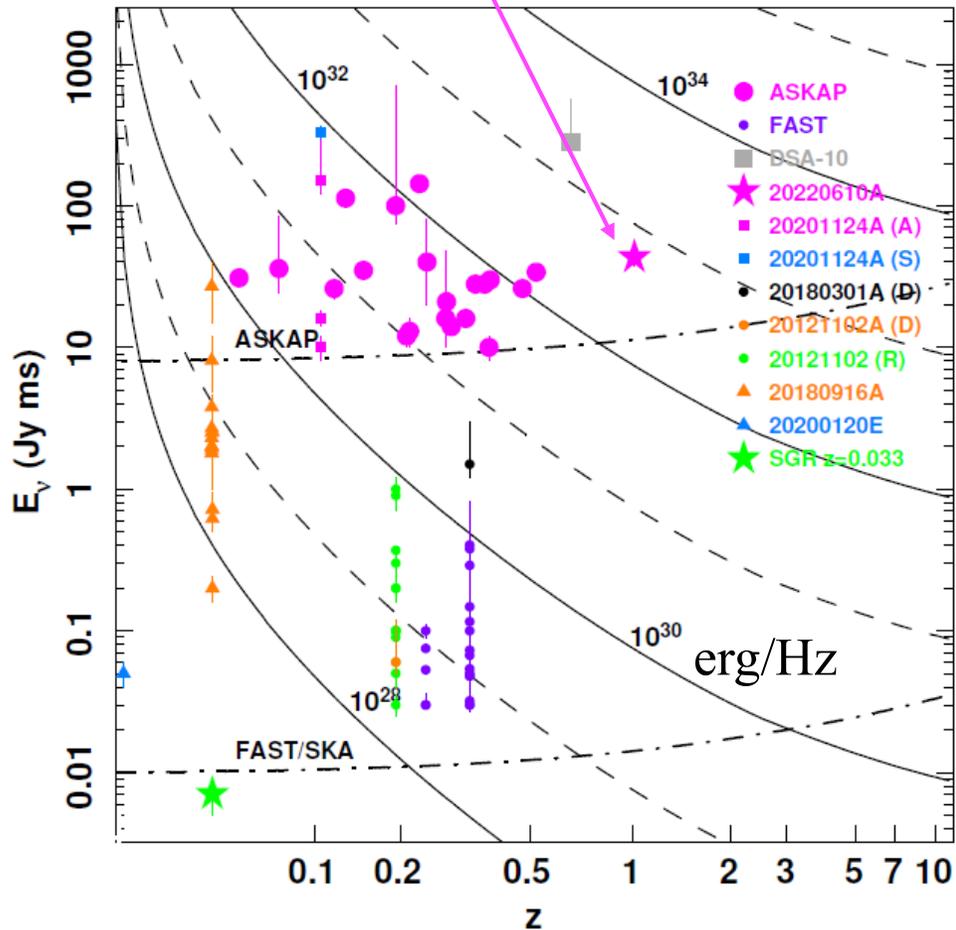
Du gaz peut tomber de l'enveloppe de l'étoile compagnon

→ Production d'un sursaut d'énergie
Et aussi une bulle faite du gaz en partie éjecté

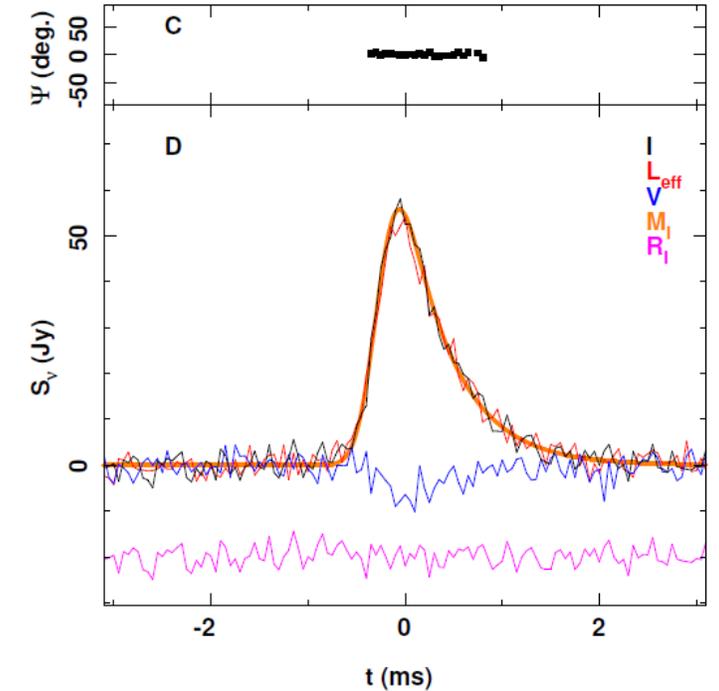
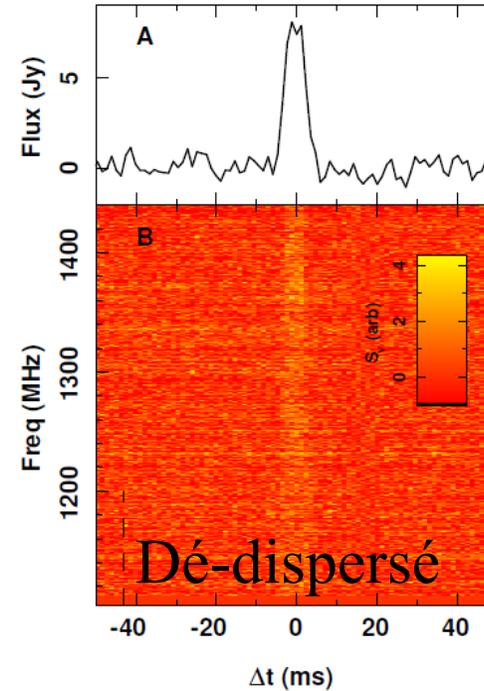
Accrétion super-Eddington durant
~100 ans

FRB (Fast Radio Burst) le plus lointain

FRB 20220610A à $z=1.016$,
 le plus énergétique 2×10^{42} erg durant 1ms
Ryder et al 2023



Polarisation linéaire
 à 100%



DSA-10 interferomètre, $z=0.66$ (*Ravi et al 2019*)

Résumé

1- Les étoiles à neutrons

Rayons $\sim 10\text{km}$, masses $0.8\text{-}2.5 M_{\odot}$

Structure interne, encore peu connue: mésons, bosons? Quark étranges?

2- Les pulsars

Jeunes isolés, $0.1\text{-}1\text{sec}$

Evolution, Binaires X, milli-sec

3- Magnétars et FRB

$B > 10^{15}\text{ G}$, particules $10^{16\text{-}20}\text{ eV}$

Sursauts X et radio, jusqu'à $z=1$

