

Les magnétars

Des étoiles à neutrons ultra-magnétisées?

Jérôme Pétri

Université de Strasbourg – Observatoire astronomique

31 janvier 2022



- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

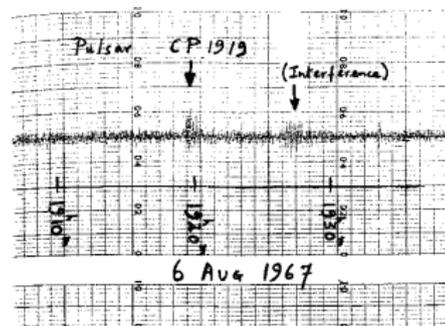
- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

La découverte des pulsars : une révolution en astrophysique

Un **signal radio périodique** $P = 1.337$ s provenant du ciel fut détecté fortuitement par une équipe de Cambridge en Angleterre en observant la scintillation.



Jocelyn Bell Burnell devant le radio-télescope de Cambridge (1967).



le premier signal historique observé après analyse de kilomètres d'enregistrement

D'abord on songea à une **origine extra-terrestre** (LGM, petits hommes verts !) mais le signal fut très rapidement interprété comme provenant d'une **étoile en rotation** sur elle-même.

Mais quelle est cette étoile si étrange ?

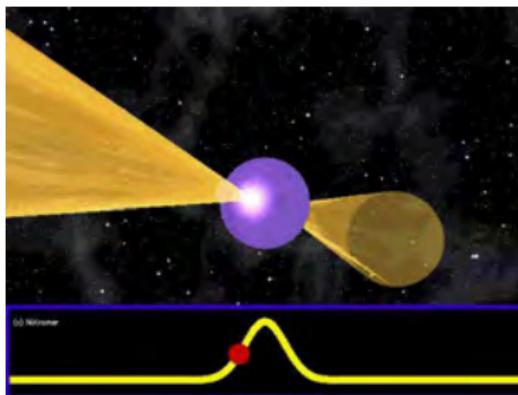
- 1931 : une naine blanche ne peut survivre avec une masse excédant à peu près $M_{\text{ch}} \approx 1,44 M_{\odot}$, la fameuse masse de Chandrasekhar (1931).
- 1932 : découverte du neutron par Chadwick (1932b,a).
- 1932 : «la densité de matière devient si grande que les noyaux atomiques se retrouvent en contact très rapproché, formant un gigantesque noyau» (Landau, 1932).
- 1934 : les étoiles à neutrons sont le produit de l'explosion d'une supernova (Baade & Zwicky, 1934).
- 1967 : Pacini (1967) postula l'existence d'étoiles à neutrons en rotation sur elles-mêmes et sources d'ondes électromagnétiques responsables de l'émission observée notamment dans la nébuleuse du Crabe.

... à la recherche d'une étoile à neutrons

- **années 1960+** : La découverte de la première source X dénommée Sco-X1 par **Giacconi et al. (1962)** fut interprétée par **Shklovsky (1967)** comme étant **une étoile à neutrons accrétante**.
- **1965** : **Kardashev (1965)** évoqua déjà l'idée qu'un **collapsar, un objet compact magnétisé et en rotation**, pouvait être responsable de la formation d'une nébuleuse.
- **1965** : le signal radio du Crabe fut déjà observé quelques années auparavant par **Hewish & Okoye (1965)** sans vraiment mesurer l'importance de cette découverte.
- **1968** : confirmation éclatante de l'existence des étoiles à neutrons bien que déjà détectées des années auparavant mais non reconnues comme tel (**Hewish et al., 1968**) ⇒ prix Nobel de physique en 1974.

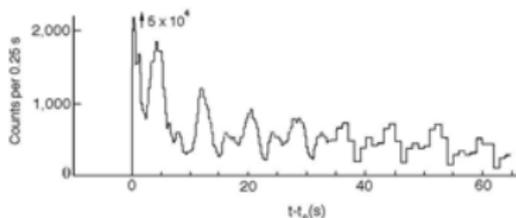
Les pulsars : des phares dans le ciel

- On appelle ces étoiles des **pulsars** («pulsating source of radio» ou «pulsating stars»).
 - Leur nom est trompeur car ces étoiles ne pulsent pas mais elles **tournent sur elles-mêmes**.
 - Les pulsars les plus rapides sont les plus **stables**
- ⇒ **très bonnes horloges célestes.**



Les magnétars : premiers indices en tant que sursauts γ ...

- **1973** : découverte de sursauts γ d'origine extra-terrestre provenant de toutes les directions du ciel (pas d'explosion nucléaire atmosphérique).
- **7 janvier 1979** : premier sursaut γ répétitif (SGR 1806-20) dans la constellation du Sagittaire.
- **5 mars 1979** : nouvelle source transitoire émettant une bouffée géante de rayonnement γ (SGR 0506-66), $E \approx 5 \cdot 10^{37}$ J et $L \approx 4 \cdot 10^{37}$ W.

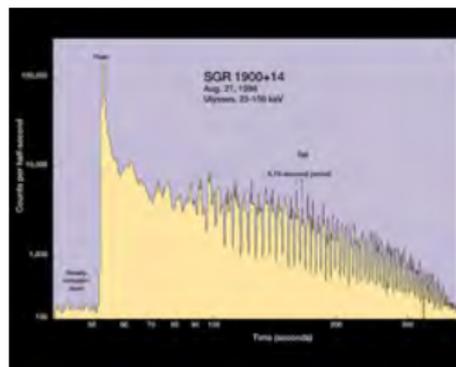


Première détection d'un sursaut γ répétitif (Mazets et al., 1979).

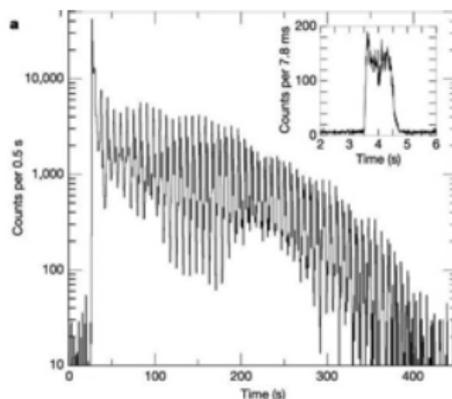
- **mars 1979** : un autre SGR découvert grâce à plusieurs sursauts.
- **années 1980** : les SGR ne sont pas des sursauts γ «classiques» (GRB) car ils se répètent.

Les magnétars : premiers indices en tant que sursauts γ ...

- 27 août 1998 : SGR 1900+14 produit une éruption géante, la 2ème
 $E \approx 3 \cdot 10^{37}$ J et $L \approx 8 \cdot 10^{37}$ W.
- 27 décembre 2004 : SGR 1806-20 aussi, la 3ème à ce jour
 $E \approx 2 \cdot 10^{39}$ J et $L \approx 2 \cdot 10^{40}$ W.



Éruption géante de SGR 1900+14
(Kouveliotou et al., 1999).



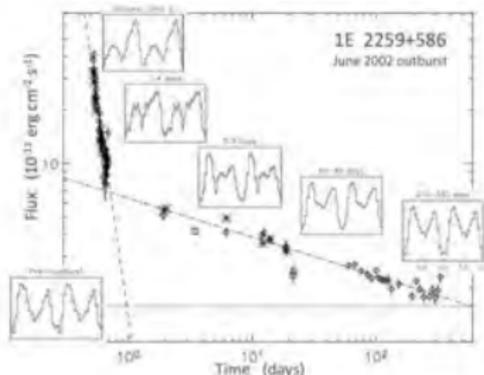
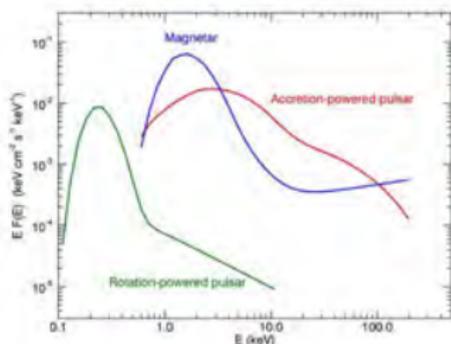
Éruption géante de SGR 1806-20 (Hurley et al., 2005).

... ou en tant que pulsars X «anormaux» (AXP)

- 1981 : découverte de 1E 2259+586 maintenant PSR J2301+5852
- émet un rayonnement X différent des pulsars X «normaux» (Fahlman & Gregory, 1981).

Il fait partie des pulsars X dit anormaux car

- 1 il n'appartient pas à une binaire.
- 2 la source d'énergie n'est pas l'accrétion.



Éruptions du pulsar X «anormal»
(Woods & Thompson, 2004).

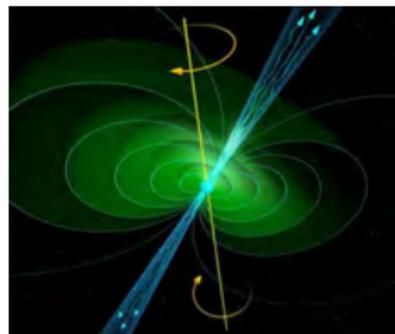
Spectres d'un pulsar, d'un pulsar accrétant et d'un magnétar
(Mereghetti et al., 2015).

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'existence des étoiles à neutrons.



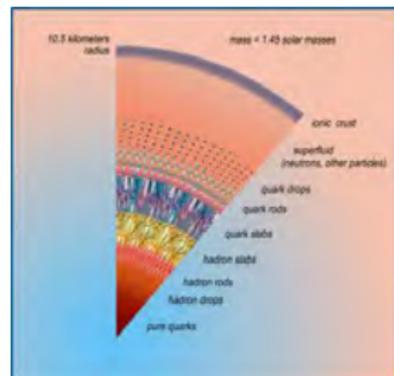
Structure simplifiée à l'extrême d'une étoile à neutrons.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'existence des étoiles à neutrons.
- indices sur la structure interne de ces étoiles.



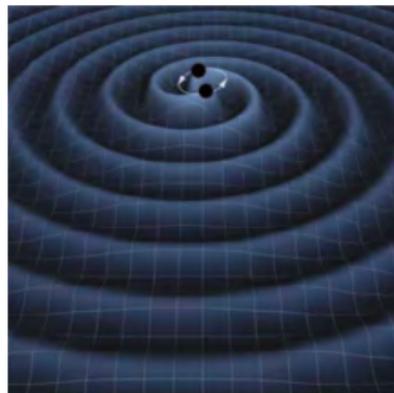
Intérieur d'une étoile à neutrons.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- **détection indirecte des ondes gravitationnelles**.



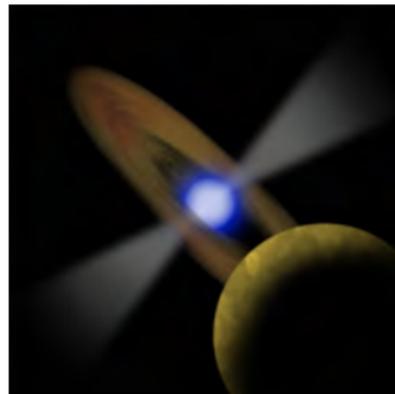
Étoiles à neutrons doubles.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- détection indirecte des **ondes gravitationnelles**.
- **détection d'autres systèmes planétaires**.



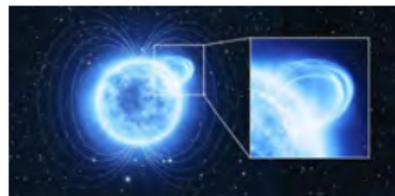
Planète autour de pulsars.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- détection indirecte des **ondes gravitationnelles**.
- détection d'autres **systèmes planétaires**.
- **étude des processus quantiques dans un champ magnétique fort.**



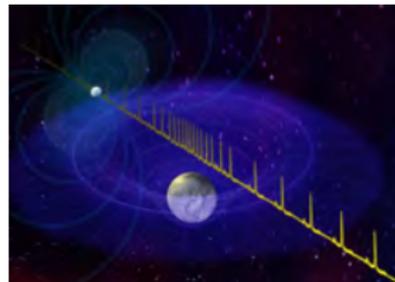
Reconnexion magnétique dans un magnétar.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- détection indirecte des **ondes gravitationnelles**.
- détection d'autres **systèmes planétaires**.
- étude des **processus quantiques** dans un champ magnétique fort.
- **mouvements de la matière et des photons en champ gravitationnel fort**.



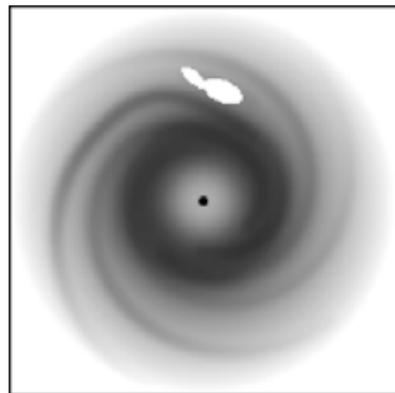
Effets de relativité générale (délai Shapiro).

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- détection indirecte des **ondes gravitationnelles**.
- détection d'autres **systèmes planétaires**.
- étude des **processus quantiques** dans un champ magnétique fort.
- mouvements de la matière et des photons en **champ gravitationnel fort**.
- **sondage du milieu interstellaire de la Voie Lactée**.



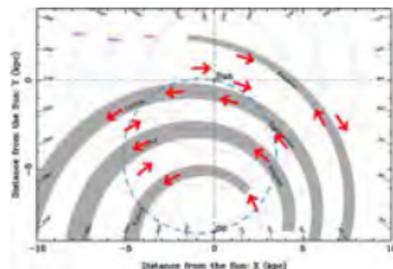
Cartographie de la densité électronique dans la Voie Lactée.

Pourquoi étudier les étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars fut une révolution en astrophysique et a ravivé l'étude théorique des étoiles à neutrons.

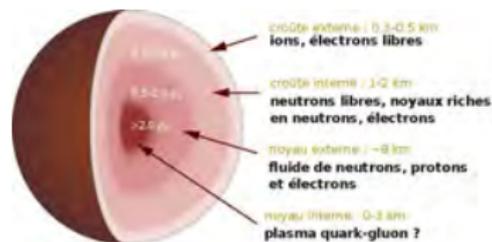
De nombreux progrès en (astro)physique

- confirmation de l'**existence des étoiles à neutrons**.
- indices sur la **structure interne** de ces étoiles.
- détection indirecte des **ondes gravitationnelles**.
- détection d'autres **systèmes planétaires**.
- étude des **processus quantiques** dans un champ magnétique fort.
- mouvements de la matière et des photons en **champ gravitationnel fort**.
- sondage du **milieu interstellaire** de la Voie Lactée.
- **sondage du champ magnétique galactique dans la Voie Lactée.**



Cartographie du champ magnétique dans la Voie Lactée.

Les propriétés extrêmes d'une étoile à neutrons



Masse $M \approx 1.4 M_{\odot}$ (M_{\odot} masse du Soleil).

Rayon $R \approx 12$ km comparable à la taille du Grand Canyon (Crédit : CXCM-Berry).

- d'où une densité centrale colossale de $\rho_c \approx 10^{17}$ kg/m³.
- une étoile à neutrons est plus dense qu'un noyau atomique !
- la force de la gravité est contrôlée par la **compacité** (ne pas confondre compacité M/R et densité M/R^3)

$$X \equiv \frac{R_s}{R} = \frac{2GM}{Rc^2} \leq 1$$

R_s **rayon de Schwarzschild** = taille maximale pour qu'une étoile de masse M devienne un trou noir (sans rotation).

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité**
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

- étoile à neutrons

objet compact de compacité $\frac{R_s}{R} \approx 0.4$.

⇒ effets de champ gravitationnel fort.

Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R} \approx 0.4$.
⇒ effets de champ gravitationnel fort.
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas, effets d'EDQ.
(création de paires e^\pm , raies cyclotron).

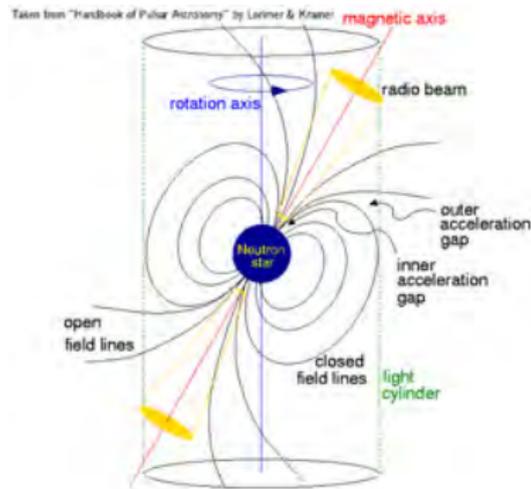
Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R} \approx 0.4$.
⇒ effets de champ gravitationnel fort.
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas, effets d'EDQ.
(création de paires e^\pm , raies cyclotron).
- 3 **en rotation**
⇒ intense champ électrique induit.
⇒ accélération violente de particules.

Généralités

Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R} \approx 0.4$.
⇒ effets de champ gravitationnel fort.
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas, effets d'EDQ.
(création de paires e^\pm , raies cyclotron).
- 3 **en rotation**
⇒ intense champ électrique induit.
⇒ accélération violente de particules.

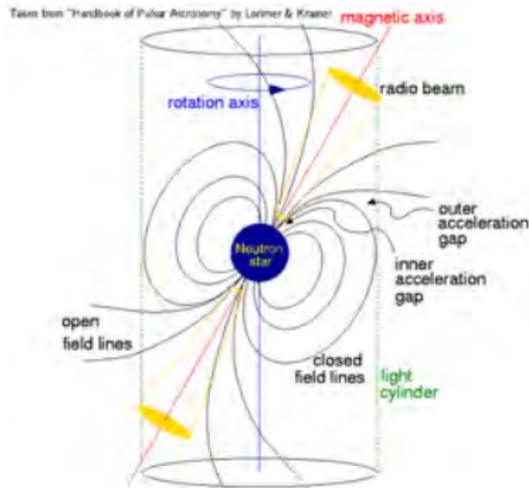


Un pulsar. (Lorimer & Kramer 2005)

Généralités

Qu'est-ce qu'un pulsar ou un magnétar ?

- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R} \approx 0.4$.
⇒ effets de champ gravitationnel fort.
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas, effets d'EDQ.
(création de paires e^\pm , raies cyclotron).
- 3 **en rotation**
⇒ intense champ électrique induit.
⇒ accélération violente de particules.



Un pulsar. (Lorimer & Kramer 2005)

Quelques définitions utiles

- **obliquité** χ : angle entre moment magnétique $\vec{\mu}$ et axe de rotation $\vec{\Omega}$.
- rayon du **cylindre lumière**
⇒ transition entre un régime quasi-statique et la zone d'onde.

Le diagramme de Hertzsprung-Russel des pulsars

Des observations incontestables

- période de rotation $P \in [1.5 \text{ ms}, 10 \text{ s}]$.
- dérivée de la période $\dot{P} \in [10^{-18}, 10^{-15}]$.
- perte par freinage rotationnel contraint par

$$L_{\text{rot}} = 4 \pi^2 I \dot{P} P^{-3} \approx 10^{24-31} \text{ W}$$

I : moment d'inertie.

Une interprétation douteuse

- champ magnétique estimé par rayonnement dipolaire magnétique

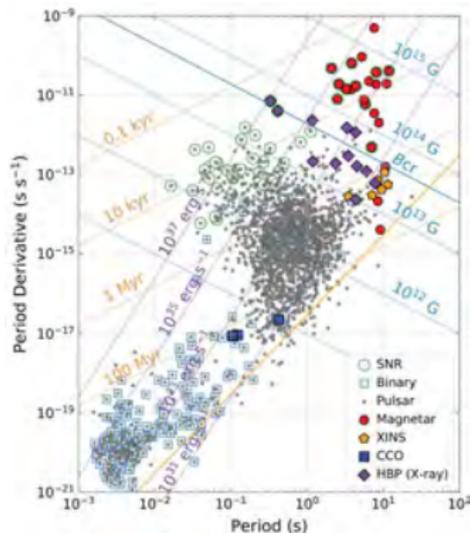


Diagramme $P - \dot{P}$ (Enoto et al., 2019).

$$B_{\perp}^{\text{vide}} = B^{\text{vide}} \sin \chi = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ T} \sqrt{P \dot{P}} = \begin{cases} 10^{5-8} \text{ T} & \text{pulsar} \\ 10^{10-11} \text{ T} & \text{magnétar} \end{cases}$$

⇒ ne contraint que B_{\perp}^{vide} dans le vide (Pétri, 2019).

⇒ mais B total si la magnétosphère est remplie par du plasma.

Ordres de grandeur

Champ électromagnétique

- champ électrique induit au niveau de la croûte stellaire

$$E = \Omega B R = 10^{13} \text{ V/m}$$

⇒ accélération “instantanée” ($\tau_{\text{acc}} < 10^{-20}$ s) à des vitesses ultra-relativistes.

⇒ facteur de Lorentz $\gamma \gg 1$.

Champ gravitationnel

- force d'attraction gravitationnelle négligeable!
Pour un proton de masse m_p

$$\frac{F_{\text{grav}}}{F_{\text{em}}} \approx \frac{G M m_p / R^2}{e \Omega B R} \approx 10^{-12} \ll 1$$

et un facteur $m_e/m_p \approx 1/2000$ plus faible pour les électrons.

dynamique de la magnétosphère dominée par le champ électromagnétique.

Champs magnétiques produits et observés

Intensité des champs magnétiques naturels sur une large gamme de valeurs

Objet	Intensité en T
Voie Lactée	10^{-2}
Planètes	10^{-4} - 10^{-1}
Soleil	10^{-3} - 10^{-1}
Imagerie RMN	1
Pulsar	10^5 - 10^8
Magnétar	10^{10} - 10^{11}

Valeurs typiques de certains champs magnétiques.

Existe-t-il une limite au champ B d'une étoile ?

- oui, elle doit rester stable.
- donc en équilibre entre pression (éclatement) et gravitation (cohésion).
- pression magnétique dominante si le champ devient supérieur à (estimation)

$$B_{\max} \approx \sqrt{\mu_0 G} \frac{M}{R^2} \approx 1,8 \cdot 10^{14} \text{T}$$

⇒ explosion de l'étoile.

Champs magnétiques intenses et ultra-intenses

Quand parle-t-on de champ B ultra-intense ?

- ⇒ lorsque les **phénomènes quantiques** se manifestent dans le vide.
- ⇒ énergie cyclotron des électrons de l'ordre de leur énergie de masse au repos $\hbar\omega_B = m_e c^2$ (ω_B fréquence de Larmor) qui donne un champ critique

$$B_{\text{edq}} = \frac{m_e^2 c^2}{e \hbar} \approx 4,4 \cdot 10^9 \text{ T.}$$

Quand parle-t-on de champ B intense ?

- ⇒ lorsque la matière ordinaire ne se comporte plus de manière ordinaire.
- ⇒ constriction des atomes et des molécules lorsque les orbitales électroniques sont significativement déformées.
- ⇒ énergie cyclotron de l'ordre de l'énergie des niveaux atomiques, pour un champ

$$B_{\text{mat}} \gtrsim \alpha_{\text{sf}}^2 B_{\text{edq}} \approx 2.3 \times 10^5 \text{ T}$$

α_{sf} constante de structure fine.

Conséquences d'un champ magnétique (ultra) intense - I

- discrétisation des niveaux d'énergie des particules (niveaux de Landau n , similaire aux orbitales atomiques)

$$E_n = (n + 1/2) \hbar \omega_B$$

(oscillateur harmonique non relativiste).

- création de paires par désintégration photonique selon la réaction



avec une énergie minimale $E_\gamma = 2 m_e c^2$.

- formation d'une cascade de paires e^\pm par la réaction :



- dédoublement des photons dans un champ trop fort $B > B_{edq}$ selon

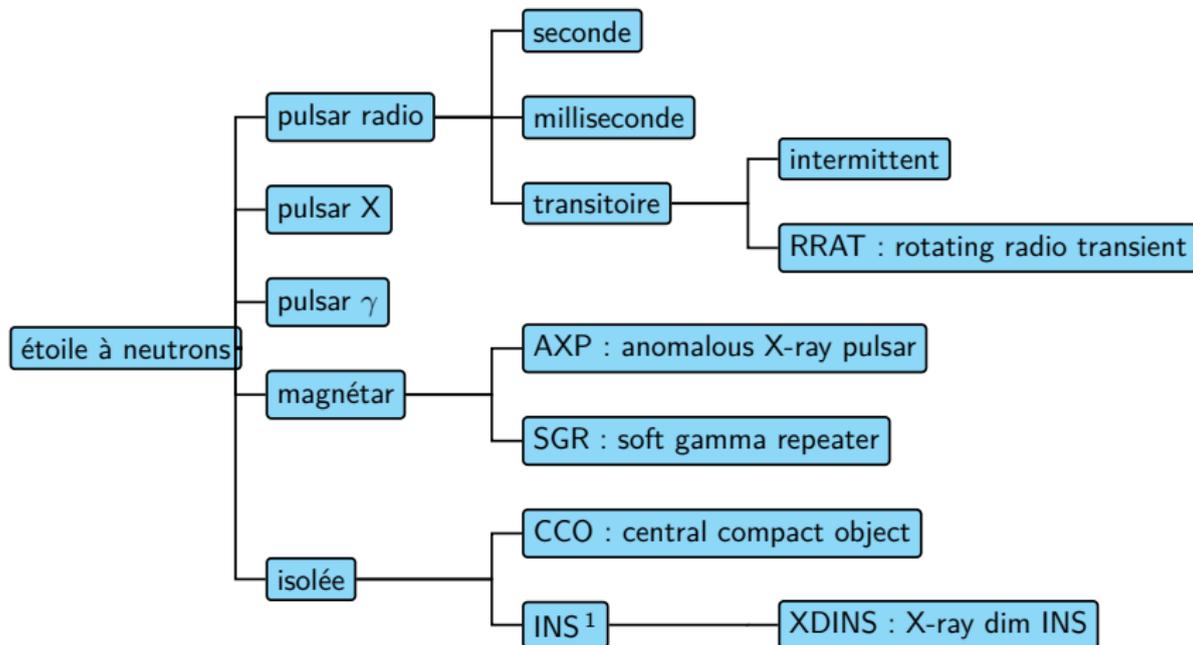


⇒ l'énergie des photons diminue d'où suppression de la cascade e^\pm .

Conséquences d'un champ magnétique (ultra) intense - II

- **polarisation du vide** : modification des équations de Maxwell car le vide devient un milieu diélectrique et magnétique.
 - **biréfringence du vide** : une onde électromagnétique se déplace dans le vide à une vitesse dépendant de la polarisation.
 - **suppression de la diffusion** : les électrons sont contraints de se déplacer uniquement le long des lignes champ \vec{B} .
- ⇒ milieu transparent pour les ondes polarisées perpendiculairement au champ \vec{B} .
- ⇒ le **degré de polarisation** de l'émission augmente.
- explique peut-être la polarisation optique d'une étoile à neutrons isolée (INS), RX J1856.5-3754 (Mignani et al., 2017).

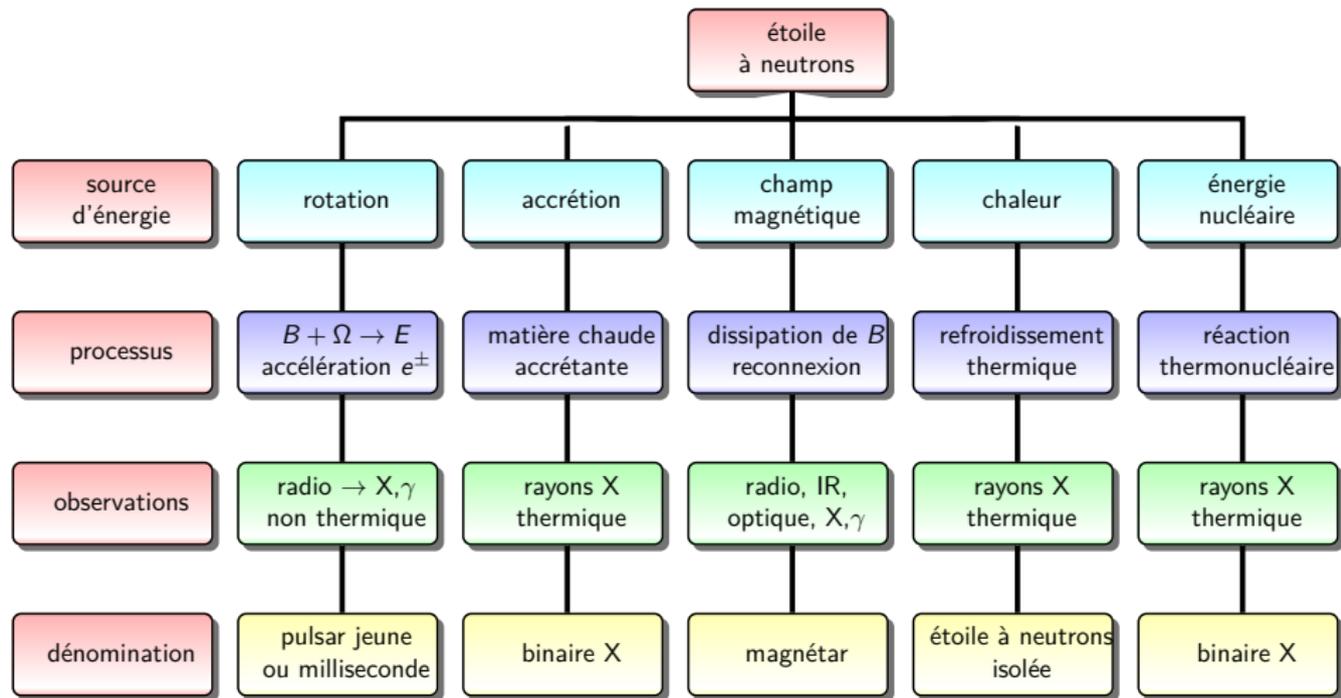
Terminologie des étoiles à neutrons



Une terminologie évolutive des pulsars.

1. isolated neutron star

La face cachée d'une étoile à neutrons



Les différentes classes de pulsars dont la distinction se fait par la **source d'énergie à l'origine de l'activité principale** de l'étoile à neutrons.

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars**
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

Bilan énergétique : les luminosités

Comparons les pertes d'énergie cinétique de rotation avec les pertes par rayonnement dans différentes gammes de fréquence

- **luminosité rotationnelle**

L_{rot} = énergie rayonnée par ralentissement rotationnel exprimé par

$$\dot{\Omega} = \frac{d\Omega}{dt} = -K \Omega^n$$

n indice de freinage dont la valeur dépend de l'interprétation

- si perte par **freinage dipolaire magnétique** $\Rightarrow n = 3$.
- si perte par **émission d'ondes gravitationnelles** $\Rightarrow n = 5$.

- **luminosité radio**, L_R habituellement = flux à 400 MHz
ne représente qu'une infime partie de l'énergie disponible $L_R \leq 10^{-3} L_{\text{rot}}$.

- **luminosité X**, L_X entre 1 keV et 10 keV (à titre indicatif).

- **luminosité γ** , L_γ entre 100 MeV et 100 GeV, (à titre indicatif).

- pour les pulsars γ vus par Fermi, $L_\gamma \lesssim L_{\text{rot}}$

\Rightarrow conversion extrêmement efficace de L_{rot} en L_γ .

Âge caractéristique

L'évolution de la période de rotation P d'un pulsar ainsi que son mouvement au sein de la galaxie permettent d'estimer son âge sous certaines hypothèses

- **âge caractéristique** à partir du freinage rotationnel

$$\tau_c = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]$$

avec P_0 la période initiale de l'étoile.

- pour un champ dipolaire ($n = 3$) et une faible période initiale $P_0 \ll P$

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

- mais cet âge caractéristique est trompeur pour les pulsars millisecondes car ils subissent une phase d'accélération par accrétion.

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde**
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

Les pulses radio

Difficile de résumer toutes les observations et les comportements

Observations

- observation individuelle des pulses impossible (sauf rares exceptions)
- **très forte variabilité** des pulses individuels
- mais **profil intégré/moyen** remarquablement stable

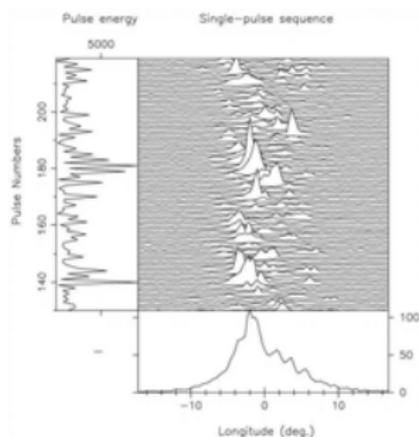
⇒ moyenne sur plusieurs centaines de périodes

⇒ signature propre à chaque pulsar (son empreinte digitale)

- température de brillance élevée
 $T_b \gtrsim 10^{25} \text{ K} \gg 10^{12} \text{ K}$ (catastrophe IC)

⇒ mécanisme cohérent.

- polarisation radio = bon indicateur de la géométrie de B.

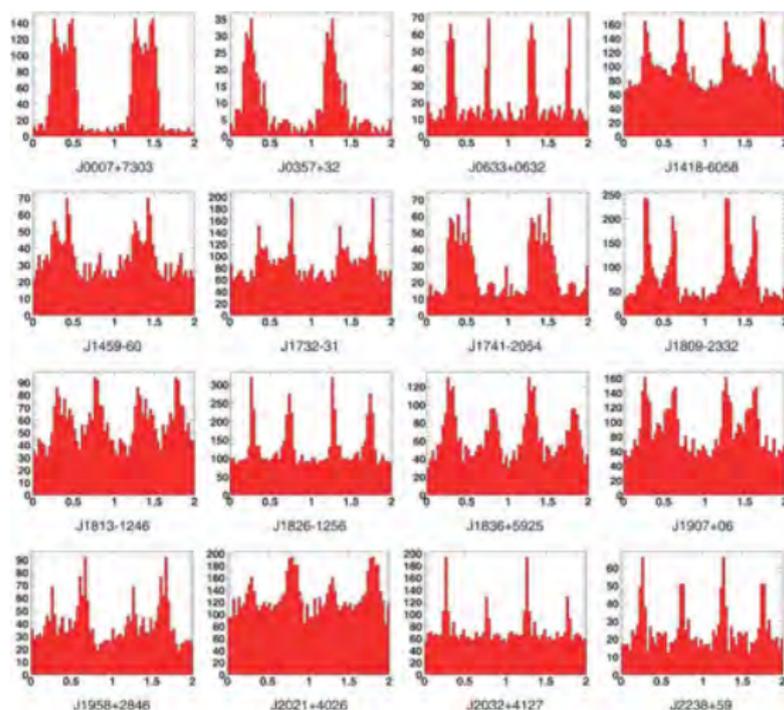


Profil moyen et pulses individuels de PSR B0943+10
(Deshpande & Rankin, 1999).

De manière imagée,

- profil moyen = climat.
- un pulse = météo.

Courbes de lumières en γ



Courbes de lumières de quelques pulsars γ (Abdo et al., 2009).

Spectre en γ

Près de 300 pulsars γ

- (a) jeunes et énergétiques visibles dans tout le spectre (Crabe).
- (b) jeunes et n'émettant pas en radio (Geminga).
- (c) millisecondes.

Caractéristiques essentielles

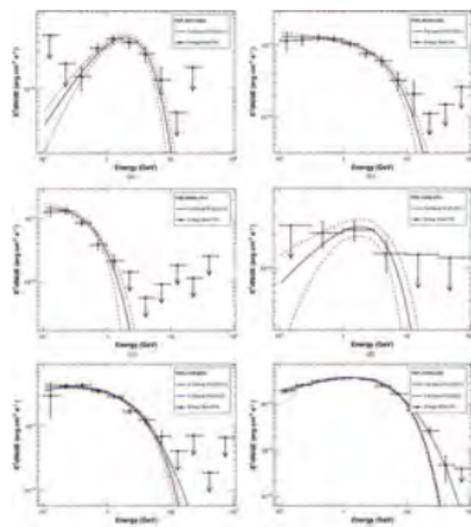
- courbe de lumière en double pic pour 75%, séparées de 0.3 en phase.
- spectre moyen (intégré sur la période) en loi de puissance + coupure sous-exponentielle

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\Gamma} e^{-(E/E_{\text{cut}})^b}$$

$\Gamma \approx 1 - 2$ avec coupure $E_{\text{cut}} \approx 1 - 5$ GeV et $b \leq 1$.

- coupure informe sur les sites de production du rayonnement.

⇒ magnétosphère lointaine ou vent ?



Exemples de spectres (Abdo et al., 2013).

Le pulsar du Crabe : un archétype à large bande d'émission

L'émission pulsée est visible en

- radio.
 - IR/optique/UV.
 - rayons X.
 - rayons γ .
 - même au-delà du TeV.
 - pulsation en phase!
- ⇒ un seul site d'émission ?

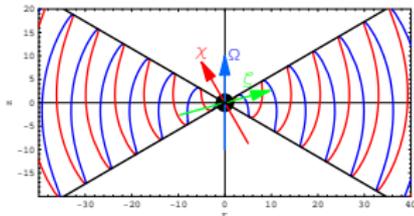


Courbes de lumière multi- λ du Crabe
(Hankins & Eilek, 2007).

Sommaire

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère**
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives

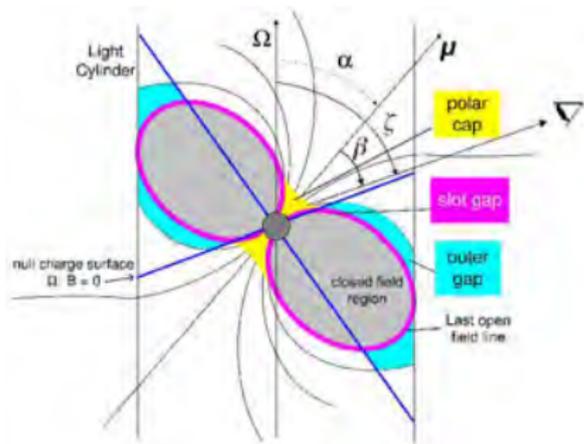
Les sites d'émission pulsée



Coupe méridionale du vent strié
(Pétri & Kirk, 2006).

Quatre sites essentiels

- **calotte polaire** : à la surface R .
- **cavité externe** : proche de r_L .
- **cavité allongée** : de R à r_L .
- **vent strié** : en dehors de r_L .
- dynamique propre à chaque cavité (paires, cascade).



(Credit : Breed et al)

La localisation des cavités nous renseigne sur l'origine de l'émission
Besoin de connaître l'électrodynamique de la magnétosphère

Le “modèle standard” d’un pulsar

Hypothèses sous-jacentes de base

magnétosphère libre de force (force-free magnetosphere) FFE

⇒ la densité de force de Lorentz s’annule

$$\rho_e \vec{E} + \vec{j} \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

densité d’énergie magnétique $\frac{B^2}{2\mu_0} \gg$ toute autre densité d’énergie

- inertie des particules négligée : limite de masse nulle $m \rightarrow 0$.
- pas de pression : plasma froid $T = 0$.
- pas de dissipation : MHD idéale $\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{0}$.

Deux interprétations

- plasma **séparé de charge** ⇒ faible densité de particules (Pétri et al., 2002).
- modèle **MHD** ⇒ plasma quasi-neutre, forte densité de particules Pétri (2012).

Structure exacte contrôlée par le taux d’injection de particules.

Les équations de Maxwell en champ fort

Une **analyse quantitative et précise** des phénomènes autour des étoiles à neutrons doit prendre en compte

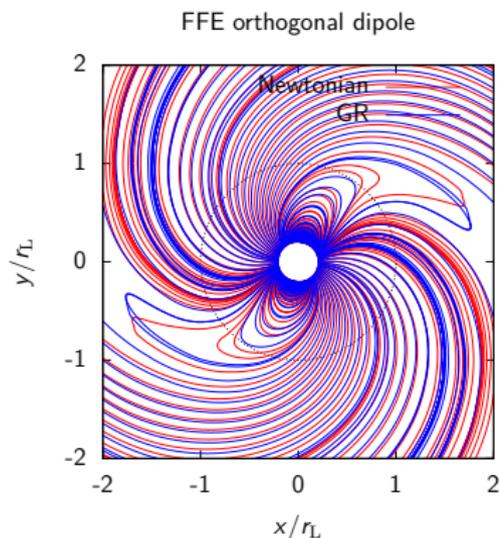
- une importante **courbure de l'espace-temps** (Pétri, 2017, 2015a).
- un **champ magnétique** d'intensité au-delà du champ critique B_{edq} (Pétri, 2016a,b).
- un **plasma relativiste de paires** e^{\pm} (classique/quantique ?).
- les mécanismes de rayonnement haute énergie (courbure, synchrotron, inverse Compton).

Elle **requiert** donc

- **EQD** : création de paires, rayonnement quantique.
- **relativité générale** : entraînement des référentiels inertiels, décalage gravitationnel, courbure de la trajectoire des photons.

Magnétosphères libres de force

Approche la plus simple de électrodynamique des pulsars
MHD idéale négligeant la masse des particules et le rayonnement.



Pétri (2015b)

Reste de supernova et nébuleuse

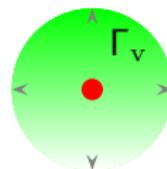
- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.



Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.

Reste de supernova et nébuleuse

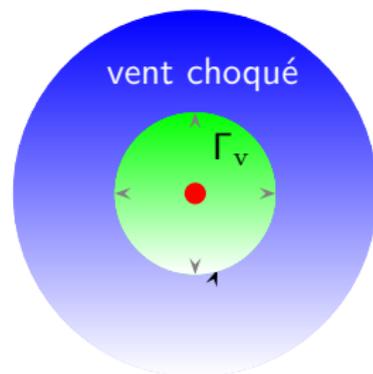
- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.
- le **vent froid ultra-relativiste** s'écoulant vers la nébuleuse.



Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.

Reste de supernova et nébuleuse

- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.
- le **vent froid ultra-relativiste** s'écoulant vers la nébuleuse.
- le **vent choqué** composé de particules chauffées après la traversée du *choc MHD*
⇒ **source principale de rayonnement** observé en radio, optique, rayons X et gamma.

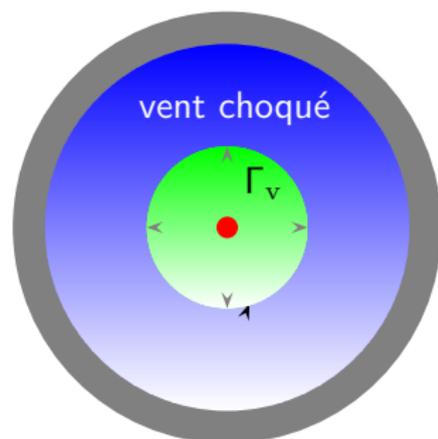


choc terminal

Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.

Reste de supernova et nébuleuse

- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.
- le **vent froid ultra-relativiste** s'écoulant vers la nébuleuse.
- le **vent choqué** composé de particules chauffées après la traversée du *choc MHD*
⇒ **source principale de rayonnement** observé en radio, optique, rayons X et gamma.
- le reste de la supernova.

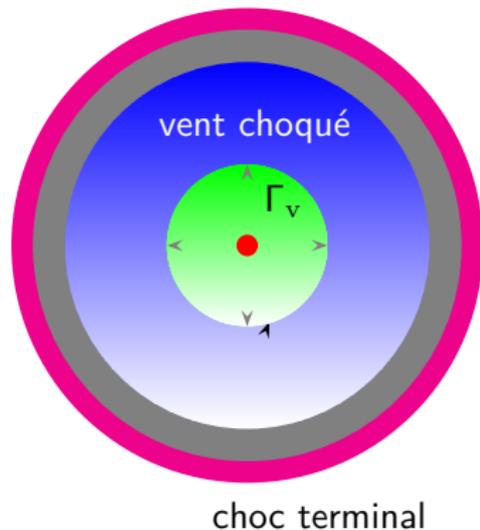


choc terminal

Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.

Reste de supernova et nébuleuse

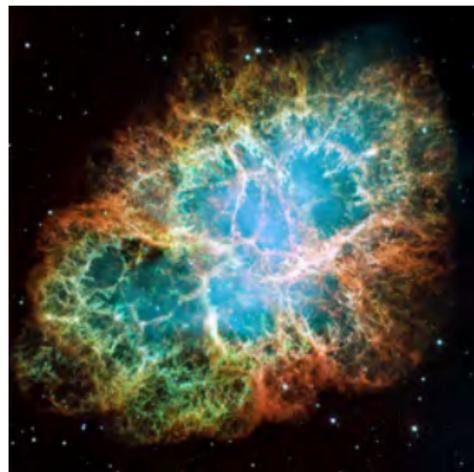
- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.
- le **vent froid ultra-relativiste** s'écoulant vers la nébuleuse.
- le **vent choqué** composé de particules chauffées après la traversée du *choc MHD*
⇒ *source principale de rayonnement* observé en radio, optique, rayons X et gamma.
- le reste de la supernova.
- le **milieu interstellaire**.



Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.

Reste de supernova et nébuleuse

- le **pulsar et sa magnétosphère**, source de *paires e^\pm relativistes*.
- le **vent froid ultra-relativiste** s'écoulant vers la nébuleuse.
- le **vent choqué** composé de particules chauffées après la traversée du *choc MHD* \Rightarrow **source principale de rayonnement** observé en radio, optique, rayons X et gamma.
- le reste de la supernova.
- le **milieu interstellaire**.



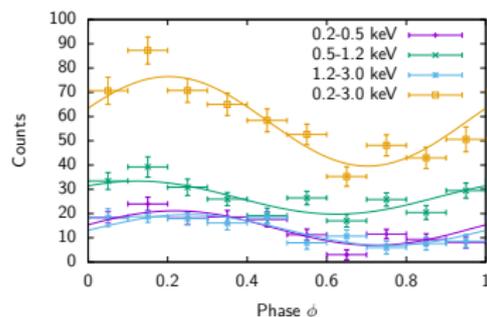
L'exemple de la nébuleuse du Crabe.

Contraintes sur la géométrie des régions d'émission

La géométrie joue un rôle fondamental dans la prédiction de l'émission pulsée

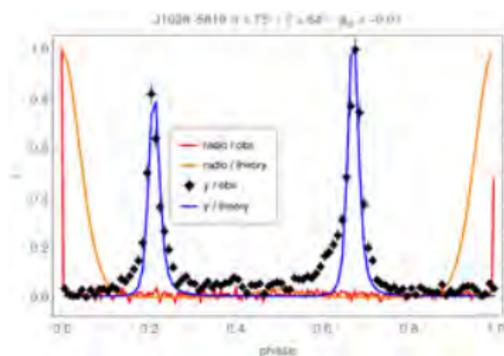
- champ dipolaire/multipolaire.
- inclinaison de la ligne de visée ζ .
- inclinaison de l'axe magnétique α .

L'observation **simultanée** des courbes de lumière en radio, X et γ fournit des indications précieuses de cette géométrie et de la localisation des sites d'émission.



PSR J1136+1551 modélisé en radio et en X thermique des calottes polaires.

(Pétri & Mitra, 2020)



PSR J1028-5819 modélisé en radio et en γ .

(Pétri & Mitra, 2021)

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars**
- 7 Conclusions & perspectives

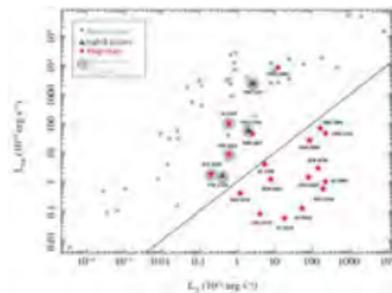
Les magnétars

Un magnétar est une étoile à neutrons en rotation sur elle-même

- longue période $P > 2 - 12$ s (les plus lentes).
- fort champ magnétique $B > 10^{10}$ T.
- source persistante et transitoire de rayons X.
- éruption sporadique avec sursauts en rayons X dur/ γ mous.
- une trentaine de magnétars sont connus à ce jour.
- seulement 3 montrant des éruptions géantes.
- résident dans notre galaxie, la Voie Lactée, exceptés deux d'entre eux.
- ne font pas partie d'un système binaire.
- émettent dans tout le spectre électromagnétique radio, IR, optique, rayons X/ γ .
- des étoiles jeunes d'âge $\tau_c = P/2\dot{P} \approx 100 - 100.000$ ans.

Le bilan énergétique des magnétars

- si la source principale d'énergie provient de la rotation alors $L_{\text{rot}} > L_R + L_X + L_\gamma$.
- mais pour les magnétars $L_{\text{rot}} \ll L_X$.
- d'où provient alors cette luminosité X ?
- de l'accrétion d'un compagnon ?
- non, car il n'y a ni effet Doppler ni retard dans le temps d'arrivée des photons.
- dissipation d'un intense champ magnétique = source principale (Thompson & Duncan, 1993; Duncan & Thompson, 1992).



L_{rot} versus L_X des pulsars et magnétars (Rea, 2012).

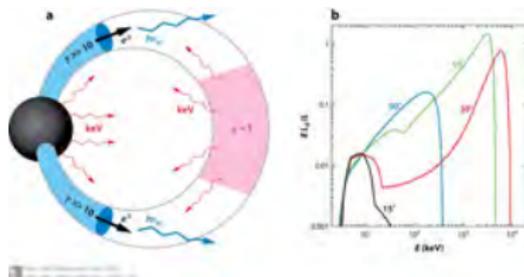
Modèle d'émission d'un magnétar

Invoque généralement une reconfiguration du champ magnétique, son évolution produisant des contraintes au niveau de la croûte stellaire.

- restructuration magnétique accélère les particules.
- qui émettent du rayonnement de courbure.
- création de paires e^\pm suivie de cascades.
- plasma confiné pour un champ B suffisamment intense.
- une boule de feu opaque est créée et se relaxe.



Craquement d'une étoile à neutrons (Crédit : NASA's Goddard Space Flight Center/S. Wiessinger).



Un modèle d'émission des magnétars (Beloborodov, 2012).

Raie d'absorption cyclotron dans SGR 0418+5729

- SGR 0418+5729 montre une faible raie d'absorption en rayons X.
- variable en énergie en fonction de la phase.

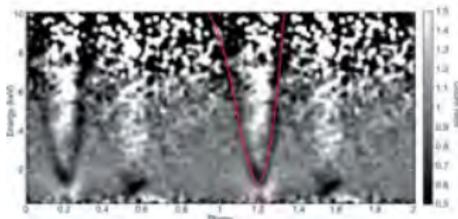
Absorption cyclotronique résonnante des électrons ou des protons

$$E_{\text{cyc}} = n \hbar \omega_B \sqrt{1 - \frac{R_s}{R}}$$

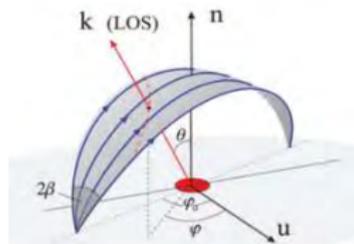
Si absorption par les protons : $B \approx 2 \cdot 10^{10} - 10^{11}$ T.

- ⇒ **Mesure directe du champ magnétique local.**
- ⇒ incompatible avec un champ dipolaire car trop faible $B_{\text{dip}} \approx 6 \cdot 10^8$ T (estimé par $P - \dot{P}$).
- ⇒ preuve indirecte de la présence d'un champ multipolaire intense.
- champ interne $B > 10^{11}$ T.

Champ multipolaire important $B_{\text{mul}} \gg B_{\text{dip}}$.



Raie cyclotron (Tiengo et al., 2013).



Modèle de boucle magnétique formant une raie cyclotron.

Génération du champ magnétique

À partir d'un champ fossile

- par conservation du flux magnétique

$$B R^2 = B_0 R_0^2$$

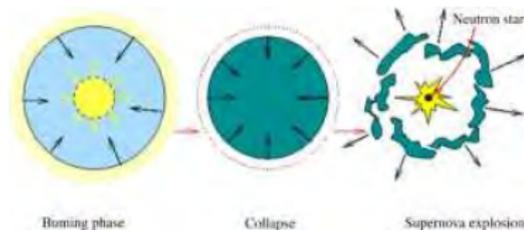
- amplification d'un facteur

$$\frac{B}{B_0} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \approx 10^{10}$$

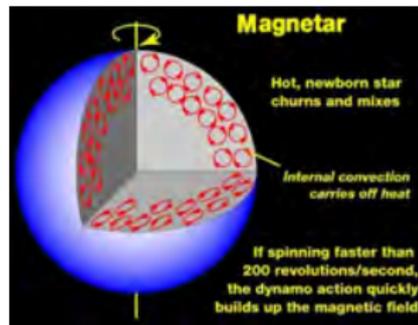
- mais peu probable car
 - seul le cœur de l'étoile s'effondre en proto-étoile à neutrons.
 - nombre d'étoiles progénitrices avec $B > 1$ T trop faible.

Par effet dynamo

- rotation différentielle.
- convection turbulente.



Effondrement d'une étoile avec son champ magnétique (Tedila, 2021).



Convection et rotation différentielle pour l'effet dynamo.

- 1 Genèse et découverte des étoiles à neutrons
- 2 Les étoiles à neutrons en toute généralité
- 3 Les pulsars
- 4 L'émission multi-longueurs d'onde
- 5 L'électrodynamique de la magnétosphère
- 6 Les magnétars
- 7 Conclusions & perspectives**

Conclusions & perspectives

D'immenses progrès dans notre compréhension des étoiles à neutrons

D'un point de vue observationnel

- détection multi-longueurs d'onde.
- polarisation en radio, en optique et bientôt en rayons X (IXPE).
- classification historique désuète et ne reflète pas la physique sous-jacente.

D'un point de vue théorique

- simulations numériques : modèle fluide (MHD) et cinétique (PIC).
- électrodynamique de la magnétosphère.
- rôle fondamental du champ magnétique **multipolaire**.
- sites d'émission de plus en plus contraints.
- mécanisme radio encore mystérieux 55 ans après la découverte du 1er pulsar.

Représentent un outil formidable d'étude de la physique fondamentale

- champ magnétique intense.
- gravitationnel intense.
- densité nucléaire et au-delà.
- futures instruments : IXPE (en cours), ATHENA, SKA.

Merci
de votre
attention