

Les pulsars: observations, théorie et modélisation

Jérôme Pétri

Observatoire Astronomique de Strasbourg
Université de Strasbourg

École de Physique des Astroparticules, 23-28/5/2011



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie

- 2 Approche phénoménologique

- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central

- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD

- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63

- 6 Conclusions & Perspectives



Qu'est-ce qu'un pulsar?

1 étoile à neutrons

objet compact de compacité $\frac{R_s}{R_*} \approx 0.4$

⇒ effets de champ gravitationnel fort

2 fortement magnétisée

⇒ plasmas quantiques, effets d'EDQ
(création de paires e^\pm , raies cyclotron)

3 en rotation plus ou moins rapide

⇒ intense champ électrique induit

⇒ accélération violente de particules



Qu'est-ce qu'un pulsar?

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



Qu'est-ce qu'un pulsar?

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



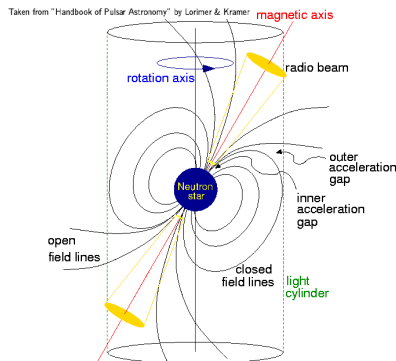
Qu'est-ce qu'un pulsar?

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



Qu'est-ce qu'un pulsar?

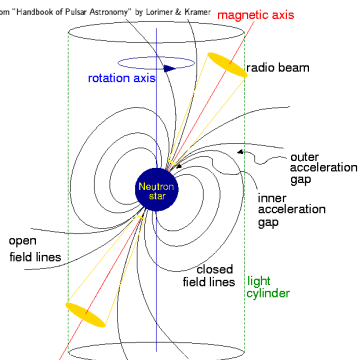
- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R_*} \approx 0.4$
⇒ effets de champ gravitationnel fort
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas quantiques, effets d'EDQ
(création de paires e^\pm , raies cyclotron)
- 3 **en rotation** plus ou moins rapide
⇒ intense champ électrique induit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



(Lorimer & Kramer, Handbook of pulsar astronomy)



Taken from "Handbook of Pulsar Astronomy" by Lorimer & Kramer



(Lorimer & Kramer, Handbook of pulsar astronomy)

Qu'est-ce qu'un pulsar?

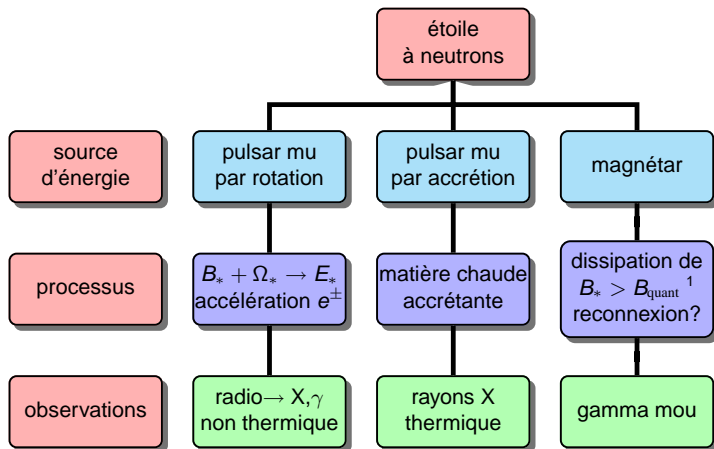
- 1 **étoile à neutrons**
objet compact de compacité $\frac{R_s}{R_*} \approx 0.4$
⇒ effets de champ gravitationnel fort
- 2 **fortement magnétisée**
⇒ plasmas quantiques, effets d'EDQ (création de paires e^\pm , raies cyclotron)
- 3 **en rotation** plus ou moins rapide
⇒ intense champ électrique induit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

Quelques définitions utiles

- **obliquité χ** : angle entre moment magnétique $\vec{\mu}_*$ et axe de rotation $\vec{\Omega}_*$
- rotateur **aligné / perpendiculaire / oblique**: $\chi = 0 / 90^\circ /$ quelconque
- rayon du **cylindre lumière**: surface sur laquelle une particule en corotation avec l'étoile atteint la vitesse de la lumière $r_L = c/\Omega_*$
⇒ transition entre un régime quasi-statique et la zone d'onde



Les grandes classes de pulsars



⇒ distinction par la **source d'énergie** à l'origine de l'activité de l'étoile à neutrons

¹champ magnétique quantique $B_{\text{quant}} = 4.4 \times 10^9$ T pour lequel $\hbar \omega_{B_{\text{quant}}} = m_e c^2$



Magnétosphère des pulsars: ordres de grandeur

Des observations

- 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

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

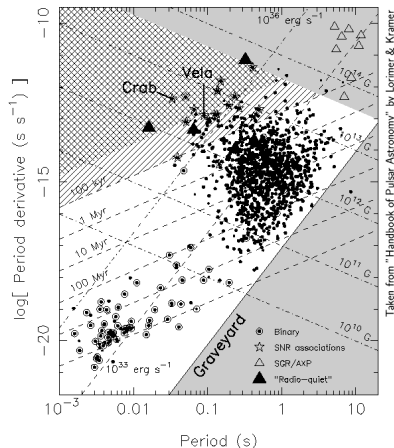
très différent des trous noirs ou des étoiles à neutrons accrétantes (taux d'accrétion \dot{M} inconnu)

- champ magnétique estimé par rayonnement dipolaire magnétique

$$B_* \sin \chi = 3.2 \times 10^{15} \text{ T} \sqrt{P \dot{P}} = 10^{5-8} \text{ T}$$

\Rightarrow ne contraint que B_{\perp}

\Rightarrow valeur cohérente avec la conservation du flux magnétique lors de l'effondrement du progéniteur



(Lorimer & Kramer)



- champ électrique induit au niveau de la croûte stellaire

$$E_* = \Omega_* B_* R_* = 10^{13} \text{ V/m}$$

⇒ accélération “instantanée” à des vitesses ultra-relativistes, facteur de Lorentz $\gamma \gg 1$ ($\tau_{\text{acc}} < 10^{-20} \text{ s}$)

- force d'attraction gravitationnelle négligeable !!

$$\frac{F_{\text{grav}}}{F_{\text{em}}} \approx \frac{G M_* m_p / R_*^2}{e \Omega_* B_* R_*} \approx 10^{-12} \ll 1 \quad (1)$$

⇒ **dynamique de la magnétosphère dominée par le champ électromagnétique**

Sur les caractéristiques de l'étoile à neutrons

- masse de $M_* \approx 1.4 M_{\odot}$
- rayon de $R_* \approx 10 \text{ km}$
- densité centrale de $\rho_c \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$



- ≈ 2000 pulsars catalogués
- objets galactiques concentrés dans le plan de la Voie Lactée
- distance de l'ordre du kpc (obtenue principalement par mesure de dispersion)
- vitesse propre élevée, 300 km/s \Rightarrow dispersion verticale importante

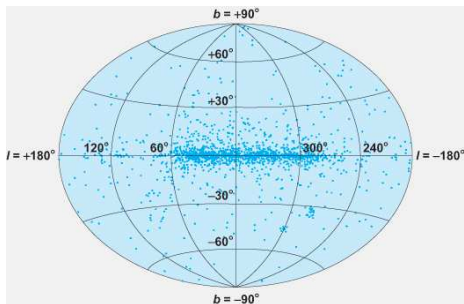


Figure: Distribution galactique des pulsars (crédit, The McGraw-Hill Companies)



Bilan énergétique

Comparaison des pertes d'énergie cinétique avec la luminosité observée dans différentes gammes de fréquence

- **luminosité rotationnelle**, L_{rot}
= énergie rayonnée par ralentissement rotationnel exprimé par

$$\dot{\Omega} = -K \Omega^n \quad (2)$$

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 gammas vus par Fermi, $L_\gamma \lesssim L_{\text{rot}}$



L'évolution de la période de rotation du 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

$$\tau_c = \frac{P}{(n-1)\dot{P}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right] \quad (3)$$

$$= \frac{P}{2\dot{P}} \text{ pour un champ dipolaire et } P_0 \ll P \quad (4)$$

âge trompeur pour les pulsars millisecondes (phase d'accélération par accrétion)

- **âge dynamique** à partir du mouvement propre de l'étoile

$$\tau_d = \frac{D}{v_t} \quad (5)$$



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)

De manière imagée,

- profil moyen = climat
- un pulse = météo

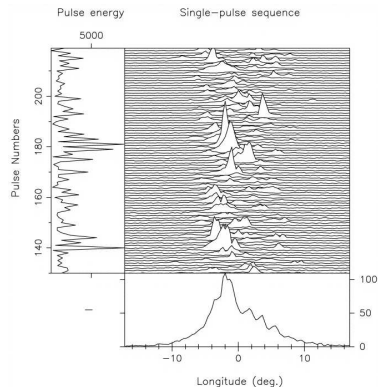


Figure: Profil moyen et pulses individuels de PSR B0943+10 (Deshpande ApJ, 1999)



- rapport cyclique à peu près constant de quelques %
- légère variation avec la période
- phénoménologie plus compliquée pour les millisecondes

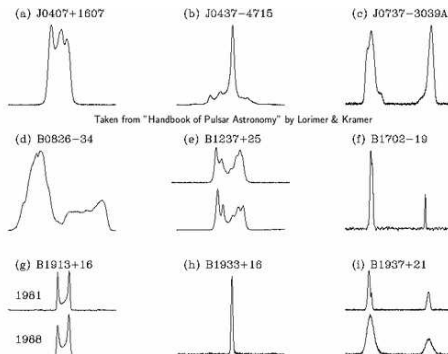


Figure: Exemples de profils moyens (Lorimer & Kramer)



L'observation détaillée des pulses a permis de relever certaines propriétés et phénomènes

- **interpulses** = parfois structure en double pulse apparaissant à intervalle de $\approx 180^\circ$
=> le plus intense = pulse principal
=> le plus faible = interpulse
- sous-pulses = brique élémentaire de l'émission radio
- micropulses = très brève impulsion dans le sous-pulse ($1 - 100\mu\text{s}$)
- **pulses géants** = pulses exceptionnels d'intensité supérieure à quelques milliers de fois l'intensité nominale d'un pulse
- forme du profil moyen dépend de la fréquence
=> **cartographie rayon-fréquence**, variation de l'émission en fonction de l'altitude



La régularité légendaire des pulsars est épisodiquement mise en défaut par des phénomènes plus ou moins rares

- basculement de mode entre différents profils moyens
- disparition des pulses
- variation irrégulière de la période
⇒ **glitches** = tremblement d'étoile à neutrons?

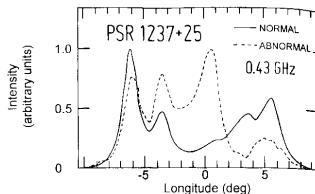


Figure: Basculement de mode de PSR 1237+25 ()

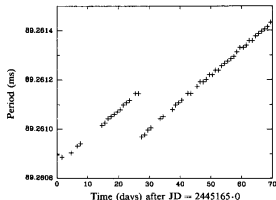


Figure: Un glitch de Vela

- dérive lente des sous-pulses à l'intérieur du profil moyen
- plusieurs phénomènes périodiques
 - P_1 : période du pulsar
 - P_2 : période entre les sous-pulses dans la fenêtre du profil moyen
 - P_3 : intervalle de temps entre bandes successives
- disparition soudaine des pulses
- réapparition avec la **même phase** après plusieurs périodes de révolution de l'étoile
- modèle du carrousel = rouleaux cylindriques en lente dérive électrique dans les structures cônes

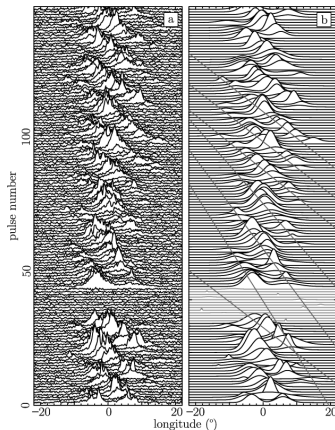


Figure: Dérive des pulses (van Leeuwen et al. A&A 2003)



- composante linéaire et circulaire
 - **forte polarisation linéaire** proche de 100%
 - évolution de la polarisation avec la phase et la fréquence renseigne sur la géométrie, le champ magnétique et l'altitude des régions d'émission
 - variation régulière de l'angle de polarisation en forme de S indépendante de la fréquence
- => vecteur polarisation suit la géométrie des lignes de champ
- => favorise le **modèle du vecteur tournant** (avec quelques exceptions)

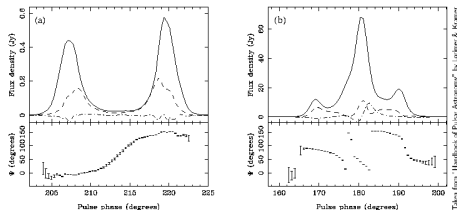


Figure: Exemples de polarisation de profils moyens (Lorimer & Kramer)



- plus d'une soixantaine de pulsars gammas connus à ce jour (en constante augmentation)
 - (a) jeunes et énergétiques visibles dans tout le spectre (Crabe)
 - (b) jeunes et n'émettant pas en radio (Geminga)
 - (c) millisecondes
- courbe de lumière en double pic pour 75%, séparées de 0.2 en phase
- flux au-delà de 100 MeV $dN/dE \approx 10^{-8}$ ph/cm²/s
- spectre moyen (intégré sur la période) en loi de puissance + coupure exponentielle

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\Gamma} e^{-E/E_c} \quad (6)$$

$\Gamma \approx 1 - 2$ tandis que la coupure $E_{\text{cut}} \approx 1 - 5$ GeV

- luminosité rotationnelle $L_{\text{rot}} \approx 10^{26} - 10^{31}$ W
- luminosité gamma L_γ entre 0.1% et presque 100% de L_{rot}
- coupure informe sur les sites de production du rayonnement

(Abdo et al, ApJS, 2009)



Pulsars gammas: exemples

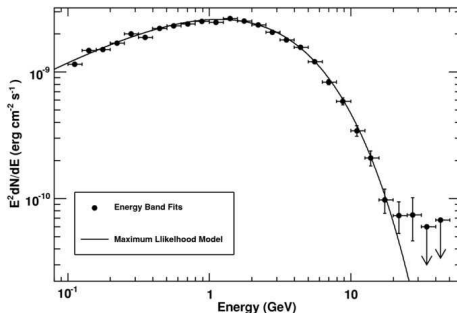
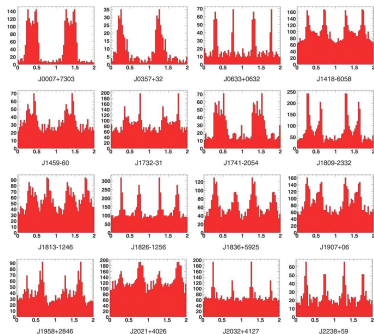


Figure: Courbe de lumière de quelques pulsars gammas, à gauche, (Abdo et al, Science 2009) et spectre moyen de Vela, à droite (Abdo et al, 2010).



- détection de l'émission pulsée du Crabe à 200-400 GeV par VERITAS
 - compatible avec le spectre dans la bande Fermi
 - spectre en double loi de puissance plutôt que coupure exponentielle
 - spectre brisé avec fréquence de **cassure** et non de coupure
- => remet en cause les modèles d'émission magnétosphérique
- presque tous les modèles actuels défunts !



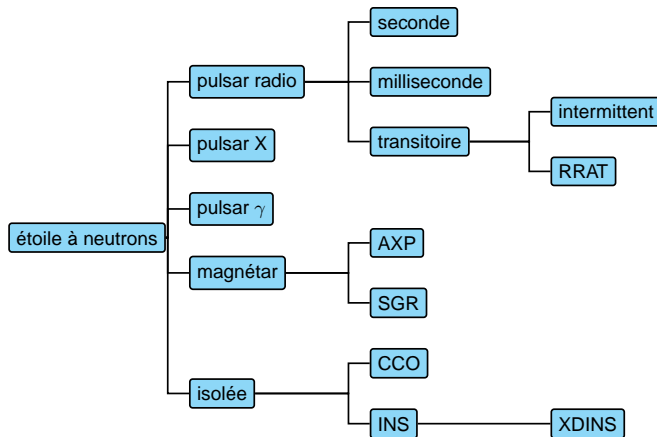


Figure: Une terminologie (évoluant) des pulsars.



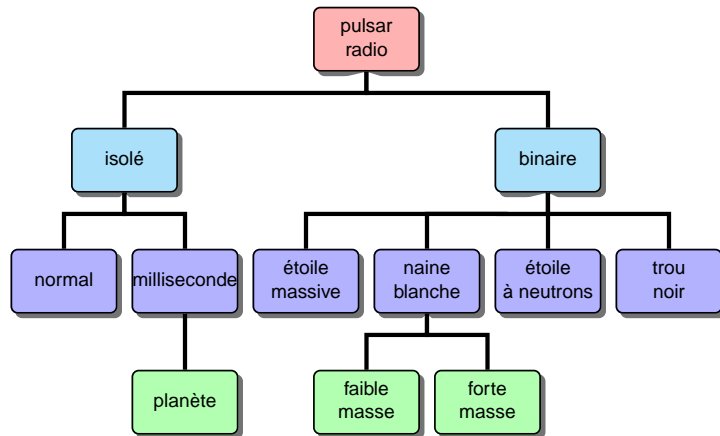


Figure: Les pulsars radios classés par catégories.



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



Modèle phénoménologique pour l'émission radio

Interprétation des pulses radio: plusieurs composantes émettantes

- un cœur central
- un ou plusieurs cônes coaxiaux avec le cœur

=> classification de Rankin des pulses

Le **modèle du vecteur tournant** rend compte dans le domaine radio

- de l'évolution de la polarisation en fonction de la phase
- de la forme des pulses: simple, double, multiple

(Radhakrishnan & Cooke, ApL, 1969)

Hypothèses

- champ magnétique dipolaire
- **rayonnement de courbure** le long des lignes de champ polaires
- polarisation dans le plan de courbure, défini par l'axe de rotation et la ligne de champ
- angle de polarisation varie en forme de S comme observé

Modèle récemment mis en défaut pour une vingtaine de pulsars (Yan et al. MNRAS, 2011)



Modèle phénoménologique pour l'émission radio

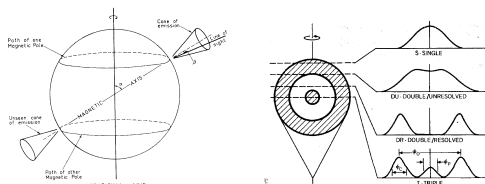


Figure: Schéma du modèle du cône creux (Radhakrishnan & Cooke, ApL, 1969).

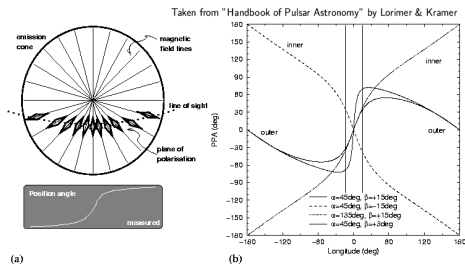


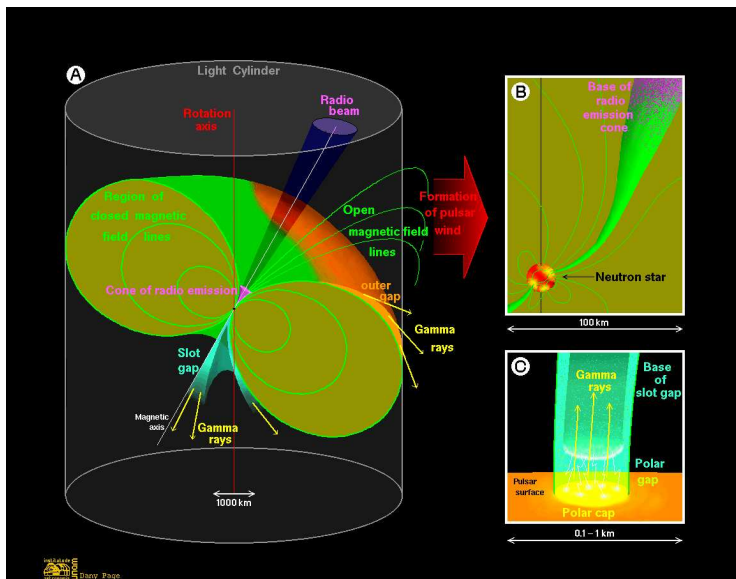
Figure: Modèle du vecteur tournant (Lorimer & Kramer).



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 **Magnétosphère d'un pulsar**
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



Le “modèle standard” d'un pulsar



- image “standard”: magnétosphère presque pleine
 - les **calottes polaires** (Sturrock 1971, Ruderman & Sutherland 1975)
accélération des particules et **rayonnement proche** de la surface de l'étoile à neutrons (aux pôles magnétiques).
 - les **gaps externes** (Cheng et al. 1986)
accélération des particules et **rayonnement** au voisinage mais **à l'intérieur** du cylindre lumière.
 - les **caustiques à deux pôles** (Dyks & Rudak 2003)
accélération des particules et **rayonnement** de la surface de l'étoile à neutrons jusqu'au cylindre lumière.
- les “alternatives”: magnétosphère presque vide ou vent
 - l'**électrosphère** (Krause-Polstorff & Michel 1985, Pétri et al. 2002)
la magnétosphère est presque entièrement **vide**!
électrosphère \equiv région de la magnétosphère remplie par du plasma **non-neutre**
 \Rightarrow physique de l'électrosphère **beaucoup plus compliquée** que les modèles ci-dessus
instabilités diocotron et magnétron
(Pétri et al. 2002b, 2003, Pétri, 2007a,b, 2008, 2009)
 - le **vent strié** (Coroniti 1990, Michel 1994)
rayonnement **en dehors** du cylindre lumière.
(Pétri & Kirk 2005, Pétri, 2009, 2010)



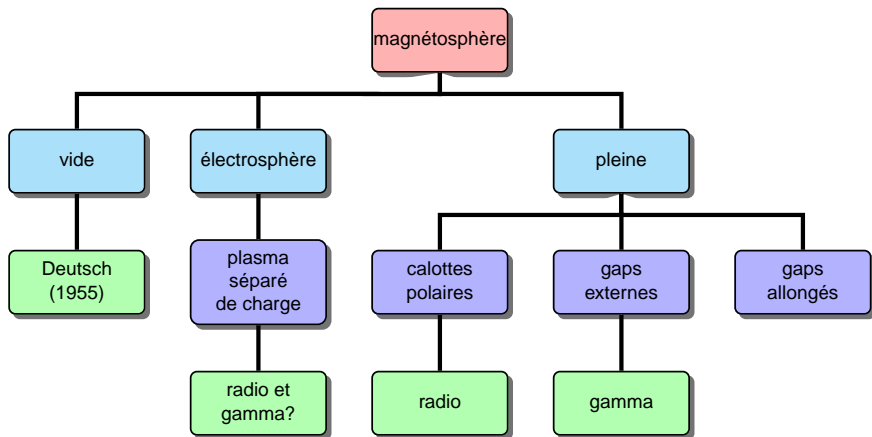


Figure: Vue synthétique des modèles de magnétosphère de pulsar.



Le “modèle standard” d'un pulsar

Hypothèses sous-jacentes de base

magnétosphère libre de force (force-free magnetosphere) FFE

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

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
- pas de dissipation: MHD idéale

$$\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} = \vec{0}$$

Deux interprétations

- plasma **séparé de charge** \Rightarrow faible densité de particules
- modèle **MHD** \Rightarrow plasma quasi-neutre, forte densité de particules

Qui a raison?

Les nébuleuses de vent de pulsars apportent une réponse

Un problème

- \Rightarrow la **charge totale du système n'est pas conservée**
- \Rightarrow le courant électrique total ne s'annule pas!

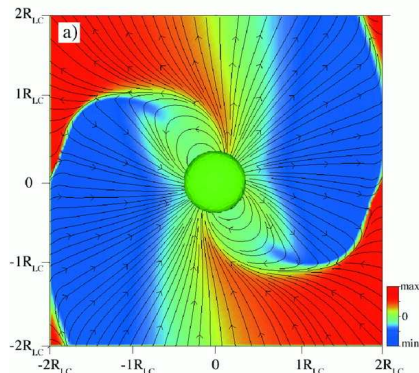


Simulation FFE (ou presque)

- champ magnétique libre de force
- évolution temporelle des équations de Maxwell
- formation d'une couche de courant
- début du vent strié?

Limitations

- réflexion des ondes aux bords
- géométrie cartésienne même pour la surface de l'étoile!
- non stationnaire (seulement asymptotiquement)
- rapport $R_*/r_L = 0.2$ trop grand
 $\Rightarrow P = 1$ ms
- domaine restreint $r < 2r_L$



(Spitkovsky, ApJL, 2006)



La **courbure de l'espace-temps** et l'entraînement des référentiels inertiels modifie la structure du champ électromagnétique proche de la surface de l'étoile

- amplification de l'intensité du champ électrique au voisinage de la surface stellaire à cause de la partie statique du champ gravitationnel (trou noir de Schwarzschild, métrique diagonale)
- apparition d'un champ électrique longitudinal (le long de \vec{B}) par effet Lense-Thirring (trou noir en rotation, de Kerr, éléments non diagonaux de la métrique)

(Muslimov & Tsygan, 1992)

Conséquences

modification de

- la géométrie des calottes polaires, angle d'ouverture
- la forme des pulses radio
- la modulation des courbes de lumière X pour les pulsars accrétants



- **rayonnement de courbure**: une charge accélérée le long d'une trajectoire curviligne rayonne (ici elle suit les lignes de champ B)
- **émission cyclotron**: une charge non relativiste évoluant dans un champ magnétique (cas particulier du rayonnement de courbure pour une trajectoire circulaire)
- **émission synchrotron**: lorsque la charge se déplace à des vitesses relativistes, focalisation vers l'avant => transition de cyclotron vers synchrotron
- **émission inverse Compton (IC)**: leptons relativistes diffusant des photons
 - photons thermiques de la surface (rayons X)
 - photons de la nébuleuse environnante
 - photons de l'étoile compagnon (si binaire)
 - fond diffus cosmologique
- **émission synchrotron-sef Compton (SSC)**: IC sur les photons synchrotrons créés par les leptons eux-mêmes

Mais n'explique pas la radio qui est particulière car cette émission est cohérente



rayonnement en phase et dans la même direction des charges du faisceau plasma

Les candidats

- **antenne**: faisceau de particules avec dispersion de vitesse négligeable et rayonnant en phase
rayonnement de courbure par un faisceau cohérent par ex
=> difficile à réaliser car faisceau très mince et cohérence détruite rapidement
- **instabilité du plasma**: faible dispersion de vitesse, particules en phase avec la perturbation croissante, double faisceau par exemple
- **effet maser** avec absorption négative: inversion de population dans les niveaux de Landau

Pas de consensus sur les processus vraiment à l'œuvre dans la magnétosphère



Principaux ingrédients

- dimension d'une calotte polaire

$$R_{pc} \approx R_* \sqrt{\frac{R_*}{r_L}} \approx 145 \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-1/2} \text{ m}$$

- différence de potentiel entre le centre et le bord de cette calotte

$$\Delta\phi = \frac{\Omega_*^2 B_* R_*^3}{c} \approx 1.3 \times 10^{13} \text{ V} \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-2} \left(\frac{B_*}{10^8 \text{ T}} \right) \left(\frac{R_*}{10 \text{ km}} \right)^3 \quad (\text{Lorimer \& Kramer})$$

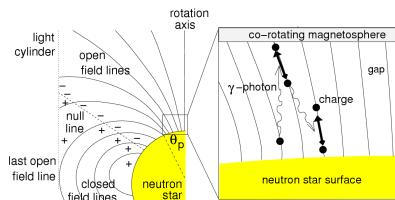
- flux sortant de particules d'une calotte
(il y en a deux, nord/sud)

$$\dot{N}_{pc} = 2\pi \frac{\varepsilon_0 \Omega_*^2 B_* R_*^3}{e} \approx 1.37 \times 10^{30} \text{ s}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-2} \left(\frac{B_*}{10^8 \text{ T}} \right) \left(\frac{R_*}{10 \text{ km}} \right)^3$$

Inconvénients

- opacité gamma élevée à cause du champ magnétique intense

Sturrock (1971), Ruderman & Sutherland (1975)



Principaux ingrédients

- dimension d'une calotte polaire

$$R_{pc} \approx R_* \sqrt{\frac{R_*}{r_L}} \approx 145 \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-1/2} \text{ m}$$

- différence de potentiel entre le centre et le bord de cette calotte

$$\Delta\phi = \frac{\Omega_*^2 B_* R_*^3}{c} \approx 1.3 \times 10^{13} \text{ V} \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-2} \left(\frac{B_*}{10^8 \text{ T}} \right) \left(\frac{R_*}{10 \text{ km}} \right)^3 \quad (\text{Lorimer \& Kramer})$$

- flux sortant de particules d'une calotte
(il y en a deux, nord/sud)

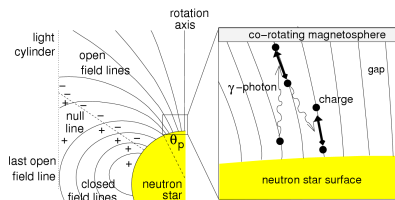
$$\dot{N}_{pc} = 2\pi \frac{\varepsilon_0 \Omega_*^2 B_* R_*^3}{e} \approx 1.37 \times 10^{30} \text{ s}^{-1} \left(\frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-2} \left(\frac{B_*}{10^8 \text{ T}} \right) \left(\frac{R_*}{10 \text{ km}} \right)^3$$

Inconvénients

- opacité gamma élevée à cause du champ magnétique intense

Sturrock (1971), Ruderman & Sutherland (1975)

⇒ flux de particules formant un vent dominé par le flux de Poynting



Une autre recette

- des régions vides autour de la surface nulle (là où la densité de charge s'annule $\rho_{GJ} \propto \vec{\Omega} \cdot \vec{B} = 0$)
- les particules s'échappent en traversant le cylindre-lumière
- pas de compensation de la part des calottes polaires car charge de signe opposé
- une région de déplétion se forme et un champ électrique accélérateur apparaît $E_{\parallel} \neq 0$
- accélération des particules jusqu'à des facteurs de Lorentz élevés mais limités par la réaction de rayonnement de courbure

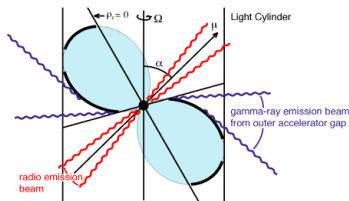
Cheng, Ho & Ruderman (1986)

Avantages

- émission gamma piquée le long de la séparatrice
- géométrie bien contrainte

Inconvénients

- garder $\rho_e \neq \rho_{GJ}$
- e^{\pm} paires retournent vers les calottes polaires
⇒ pas intéressant pour alimenter le vent
⇒ chauffage significatif de ces calottes, émission thermique associée trop élevée



Crédit: R.W. Romani



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



Figure: Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.



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

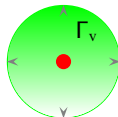
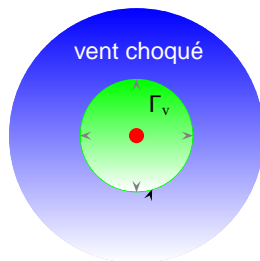


Figure: Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.



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



choc terminal (MHD)

Figure: Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.



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

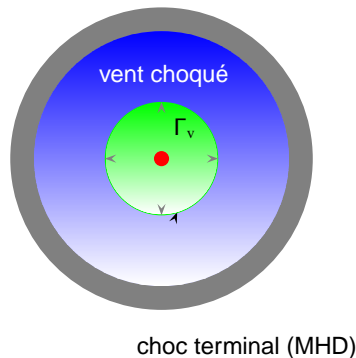


Figure: Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.



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

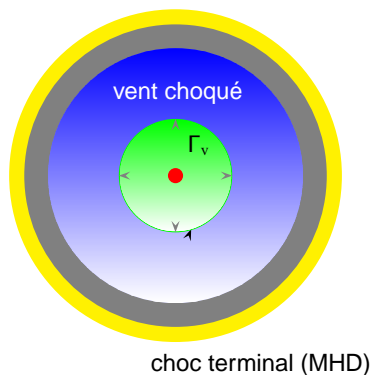


Figure: Lien entre le pulsar et sa nébuleuse avoisinante.



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 **Le vent des pulsars**
 - **structure**
 - **choc terminal**
 - **simulations RMHD**
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



Composition

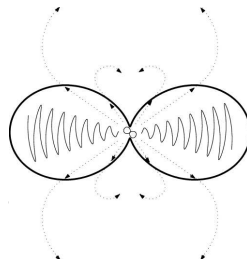
- accélération de particules dans la magnétosphère en rotation
- formé de paires e^{\pm} , peut être des ions?

Dynamique

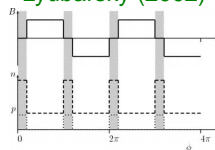
- encore dominé par le flux de Poynting
paramètre de magnétisation

$$\sigma = \frac{\text{flux de Poynting}}{\text{flux d'enthalpie des particules}} = \frac{B^2}{\mu_0 \Gamma_v n m c^2} \gg 1$$

- facteur de Lorentz Γ_v augmente jusqu'au point **magnéto-sonique rapide**
- **expansion ballistique** avec $\Gamma_v \gg 1$, facteur de Lorentz élevé $\Gamma_v \approx 10^{2-6}$
- rotateur oblique entraîne **vent strié et magnétisé**
- champ magnétique toroïdal dominant
⇒ changement de polarité de B_ϕ
⇒ **couche de courant, vent anisotrope**



Lyubarsky (2002)



Lyubarsky & Kirk (2001)



Deux régions distinctes

- **vent** = écoulement supermagnétosonique ultra-relativiste
- **nébuleuse** = plasma en expansion lente, de $v \approx c/\sqrt{3}$ à quelques 1000 km/s

⇒ transition par l'intermédiaire d'un **choc terminal** confinant le vent du pulsar

Localisation de ce choc terminal

équilibre entre **pression cinétique du vent** et **pression dans la nébuleuse**

$$R_{\text{TS}} = \sqrt{\frac{L_{\text{sd}}}{4 \pi c P_{\text{neb}}}}$$

Le choc terminal représente une frontière entre

- vent non choqué: plasma amont **magnétisé et froid**
⇒ très sombre, difficilement détectable
- vent choqué: plasma aval **chaud et démagnétisé**
⇒ émission synchrotron intense
- quelques **variabilités** sur une échelle de temps de plusieurs mois (wisps)



Vent non choqué

- photons gammas par émission inverse Compton
 - photons du fond diffus cosmologique
 - mécanisme synchrotron self-Compton
 - photons thermiques de la surface stellaire (rayons X, 100 eV)
 - optique-UV du compagnon (qq eV) (dans les binaires)
- pulses dans les MeV/GeV détectable en dehors mais proche du cylindre lumière

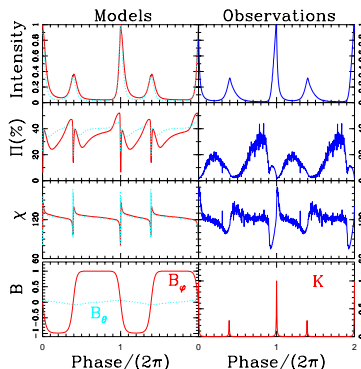
$$r \lesssim \Gamma_v^2 r_L$$

Kirk et al (2002), Pétri (2009,2010)

- en optique, polarisation synchrotron

Vent choqué

- émission au TeV
- ⇒ pas de pulses à ces énergies (PSR B1259-63), Kirk et al. (1999)



Pétri & Kirk (2005)



Description du système

au voisinage du pulsar $r \approx r_L$ théorie des pulsars et du vent	dans la nébuleuse, $r \approx R_{TS}$ théorie des nébuleuses et observations
$\sigma \approx 10^4$ and $\Gamma_v \approx 10^2$ un champ magnétique intense faible énergie cinétique des particules	$\sigma \ll 1$ and $\Gamma_v \approx 10^{3-6}$ un champ magnétique faible particules ultra-relativistes (rayonnement synchrotron)
\Rightarrow dynamique dominée par	
le champ électromagnétique	les particules

Un problème fondamental

Comment convertir l'énergie électromagnétique en énergie cinétique pour les particules ? (transition entre étoile à neutrons, $\sigma \gg 1$, et nébuleuse, $\sigma \ll 1$?)

Idée

dissipation/annihilation/reconnexion du champ magnétique au choc terminal d'un vent strié.

Lyubarsky & Kirk (2002), Pétri & Lyubarsky (2007)



- mécanisme d'émission
= rayonnement synchrotron
- particules relativistes
- champ magnétique ordonné
⇒ degré de polarisation élevé
- faible magnétisation équatoriale
- choc terminal pour

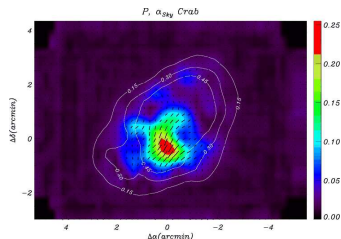
$$R_{\text{TS}} = 10^8 r_L \approx 0.1 \text{ pc}$$

$$B \approx 10^{-8} \text{ T}$$

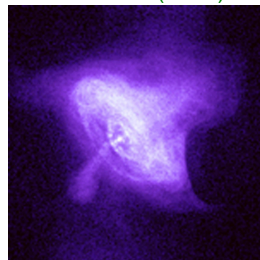
- **taux d'injection de particules**

$$\dot{N}_{\text{pc}} \approx 10^{40} \text{ s}^{-1}$$

multiplicité de paires $\kappa \approx 10^4 \gg 1$
 \Rightarrow en faveur d'un modèle MHD contre un
 modèle séparé de charge



Aumont et al. (2010)



Simulations RMHD 2D axisymétriques

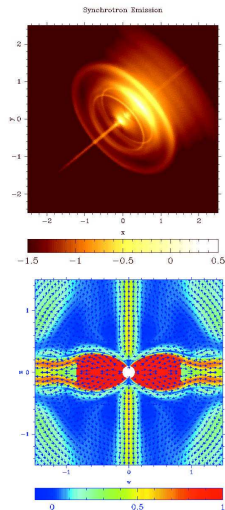
- vent MHD relativiste
- flux de Poynting anisotrope (maximum à l'équateur)

$$L(\vartheta) = L_0 (1 + \alpha \sin^2 \vartheta) \quad (7)$$

- faible magnétisation à l'équateur (dissipation dans les stries)

Conséquences

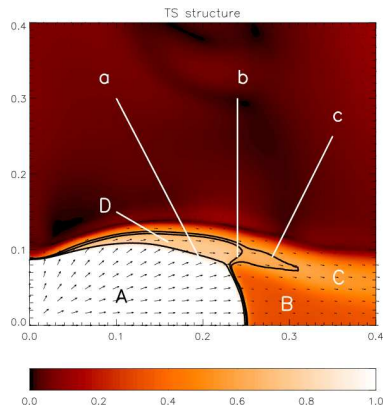
- à haute latitude B encore significatif \Rightarrow collimation du jet
- choc terminal plus proche de l'étoile à neutrons aux pôles qu'à l'équateur



Komissarov & Lyubarsky (2003)



- A: vent ultrarelativiste
- B: écoulement subsonique
- C: écoulement supersonique
- D: plasma choqué mais surmagnétosonique rapide
- a: surface du choc terminal



Del Zanna et al (2004)

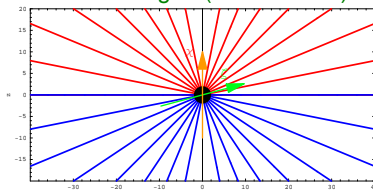


- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



Le double monopôle magnétique

Rotateur aligné (Michel 1973)



Définition

- 2 demi **monopôles magnétiques**
- d'intensité égale mais de **signe opposé**
- chacun situé dans un demi-espace (symbolisés en **rouge** et **bleu**).

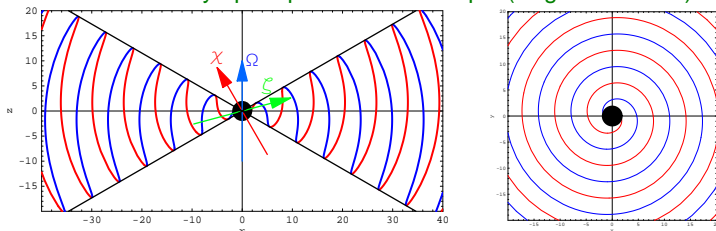
Propriétés

- une **solution analytique exacte** existe
- structure en forme de **spirale**, l'intensité du champ B_ϕ **décroît en $1/r$**
- changement de **polarité magnétique** dans le plan équatorial.

=> couche de courant **infiniment mince**.



Solution MHD asymptotique: rotateur oblique (Bogovalov 1999)



- Ω : axe de rotation
- χ : inclinaison de l'axe magnétique par rapport à $\vec{\Omega}_*$
- ζ : inclinaison de la ligne de visée par rapport à $\vec{\Omega}_*$

Propriétés

- une seule composante (toroïdale) B_φ décroissant en $1/r$
- une expression analytique exacte pour B_φ est connue
- indépendante de la structure magnétosphérique à l'intérieur du cylindre lumière
- polarité magnétique discontinue



Propriétés géométriques

- **obliquité** (χ) du pulsar
- **inclinaison** (ζ) de la ligne de visée

Configuration du champ magnétique

- **pas de composante radiale**, $B_r = 0$
- **composantes azimuthale et colatitudinale** suivent la loi de décroissance du double monopôle, $(B_\theta, B_\varphi) \propto 1/r$

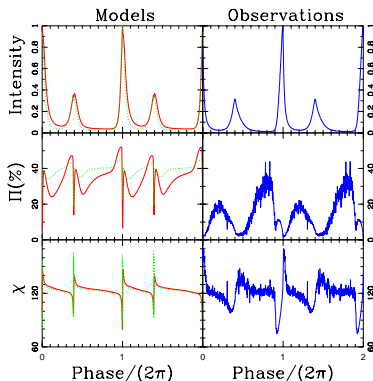
Propriétés dynamiques (particules émettrices)

- le **facteur de Lorentz** (Γ_v) du vent
- la **loi de puissance du spectre** (p) de la distribution de particules
- la **densité d' e^\pm** , $K_e(\vec{r}, t)$:

$$N(E, \vec{p}, \vec{r}, t) = K_e(\vec{r}, t) E^{-p}$$



Propriétés de la polarisation de l'émission synchrotron en optique

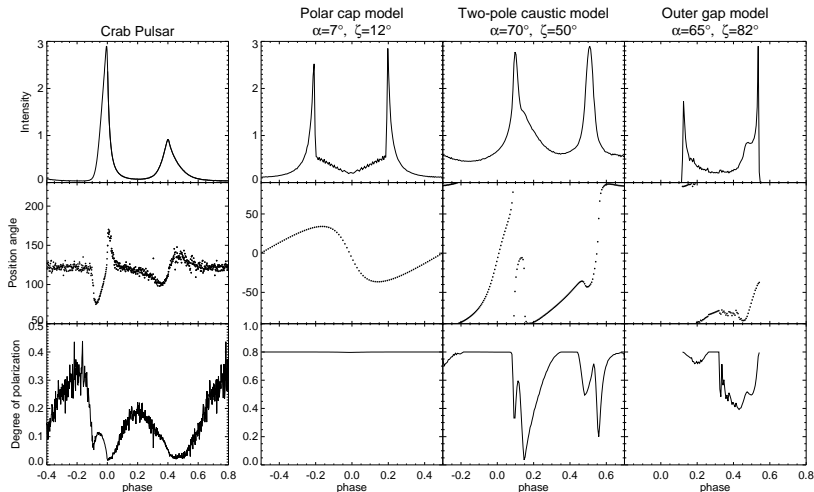


(Pétri & Kirk, ApJ Letters, 2005) (Données fournies par Kanbach)

- **émission pulsée provenant du vent**
- indépendant de la structure de la magnétosphère



Comparaison avec les calottes polaires, gaps externes et caustique



(Dyks et al. 2004)



Objectif

Expliquer l'**émission pulsée haute énergie (>10 MeV)** et la variabilité spectrale de certains **pulsars gammas**

Champs de photons possibles

- rayonnement du fond diffus cosmologique
- photons synchrotron de la nébuleuse
- émission thermique de la surface de l'étoile à neutrons

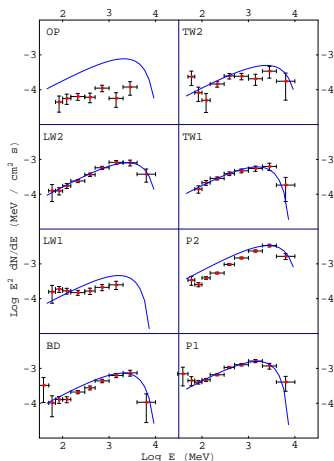
Comment

Émission **Inverse Compton** du vent strié: les leptons ultra-relativistes dans les couches de courant diffusent le fond diffus cosmologique

- énergie typique: $\varepsilon_{\text{CMB}} = 2.36 \times 10^{-4} \text{ eV}$
- densité d'énergie: $U_{\text{CMB}} = 2.65 \times 10^5 \text{ eV/m}^3$



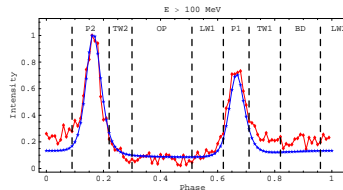
Spectre résolu en phase



(Pétri, A&A, 2009)

Données de (Fierro et al., ApJ, 1998)

Courbe de lumière $E_\gamma > 100$ MeV



(Pétri, A&A, 2009)

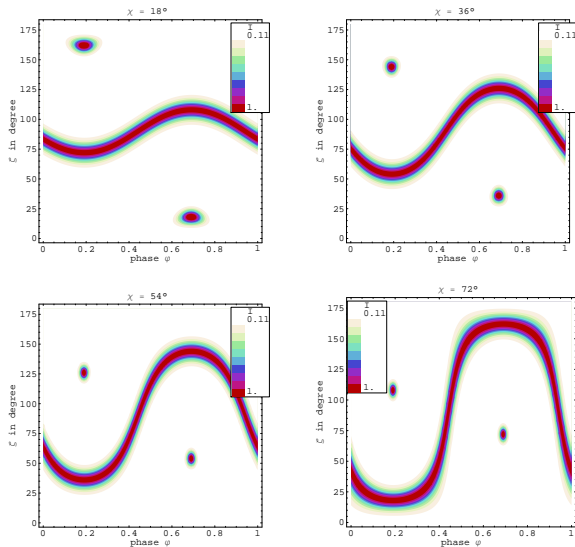
- observations
- modèle

Observations récentes et futures

- Fermi: rayons gammas < 300 GeV
- PoGOLite): polarisation gamma mou (100 keV) (Kamae)



Relation entre pulses radio et gamma

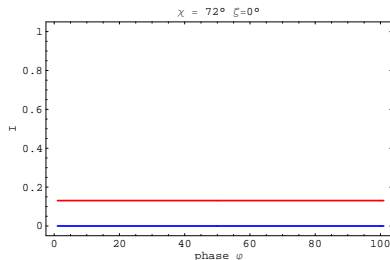


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

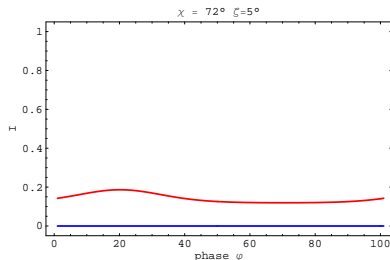


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

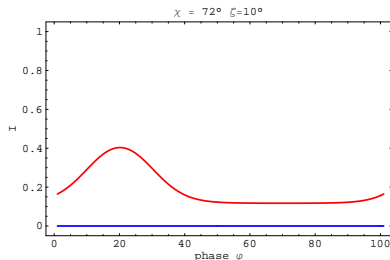


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

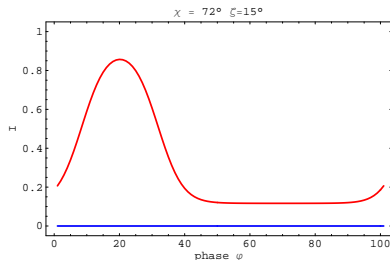


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

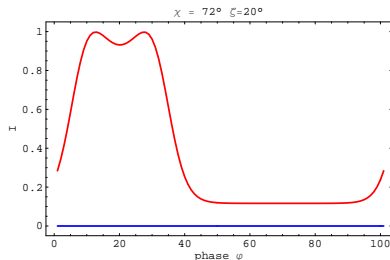


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

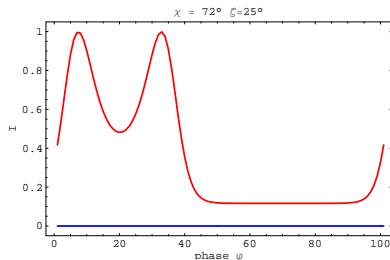


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

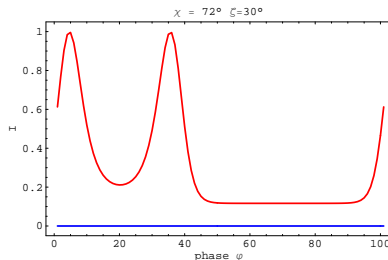


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

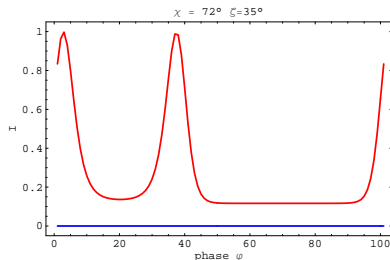


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

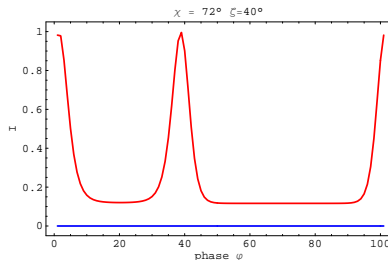


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

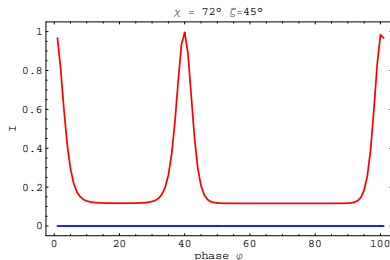


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

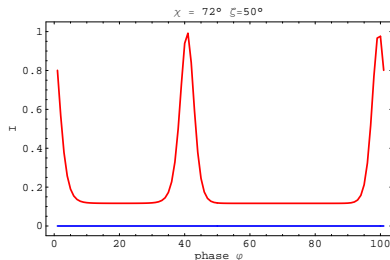


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

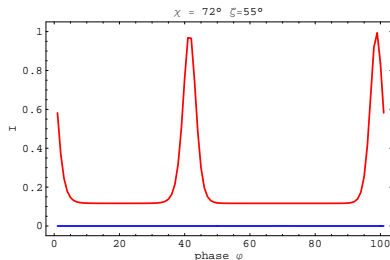


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

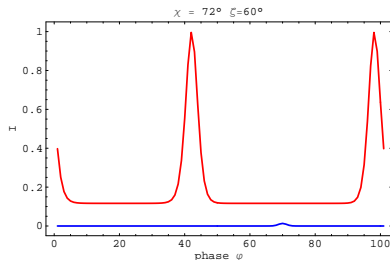


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

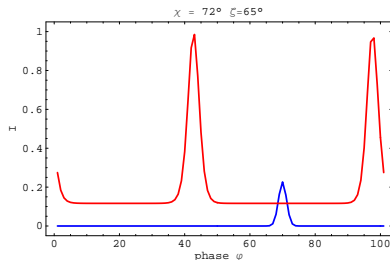


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

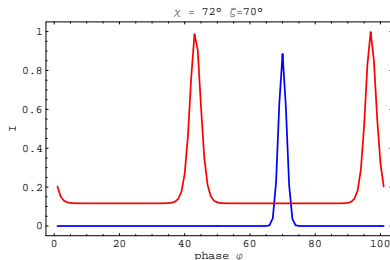


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

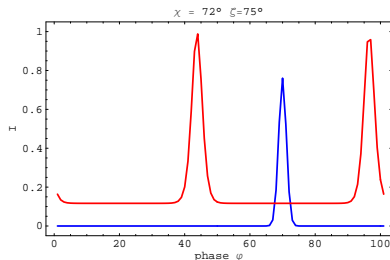


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

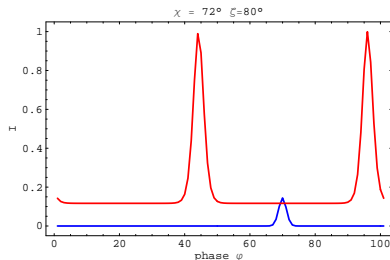


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

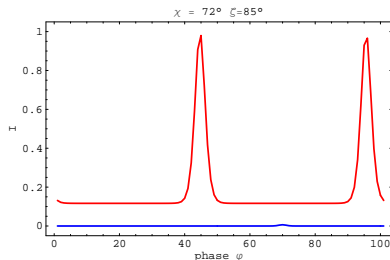


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

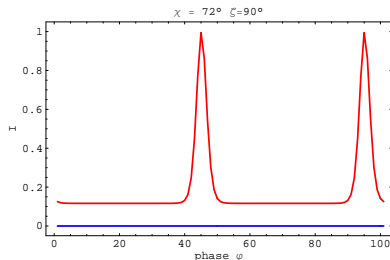


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

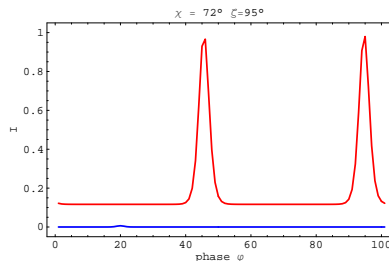


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

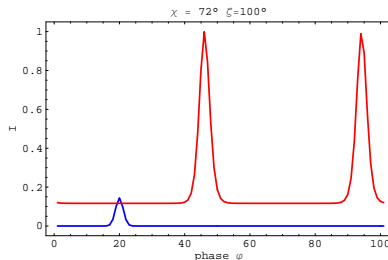


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

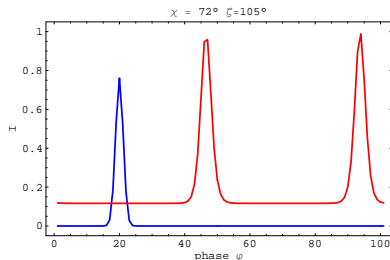


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

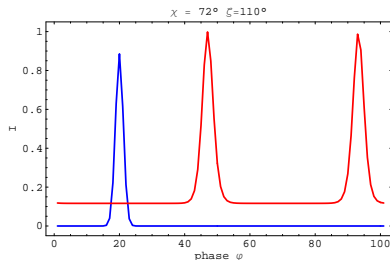


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

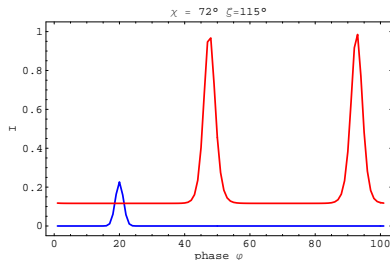


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

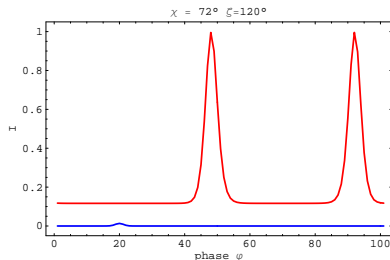


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

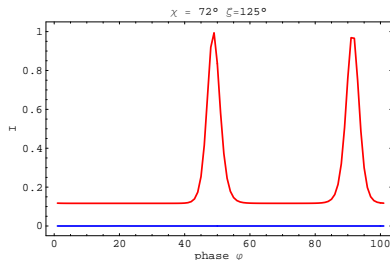


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

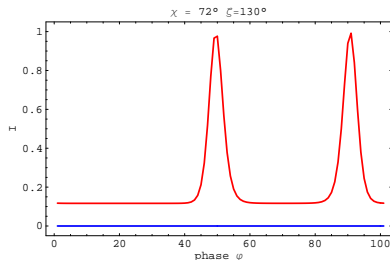


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

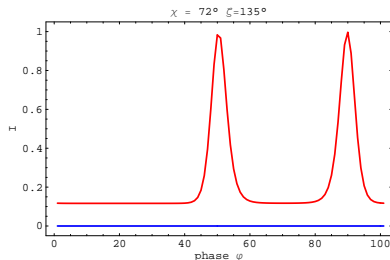


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

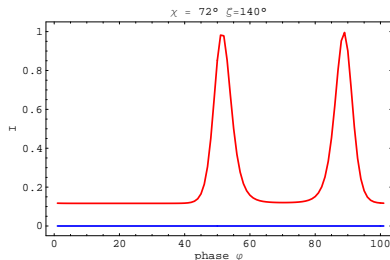


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

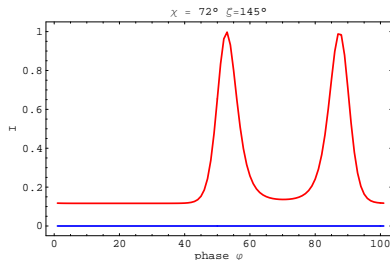


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

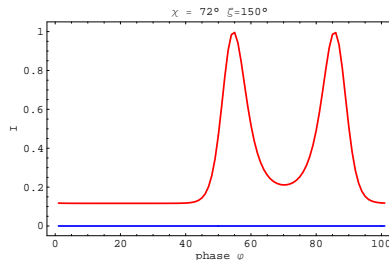


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

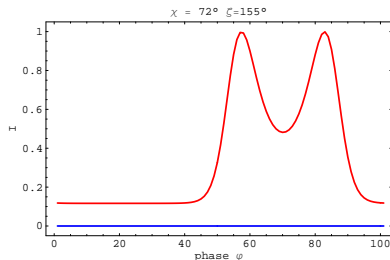


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

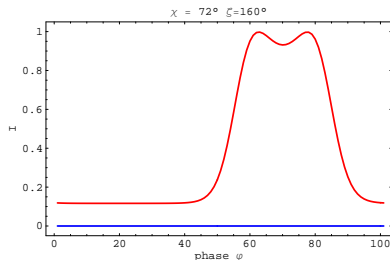


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

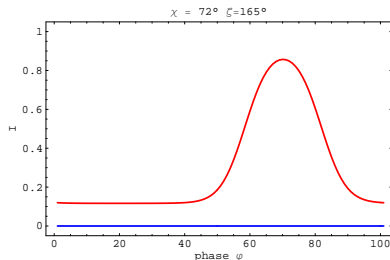


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

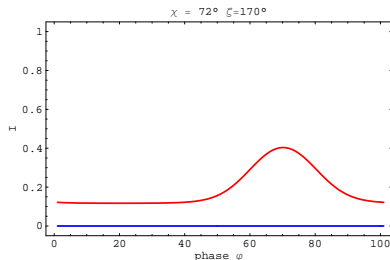


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

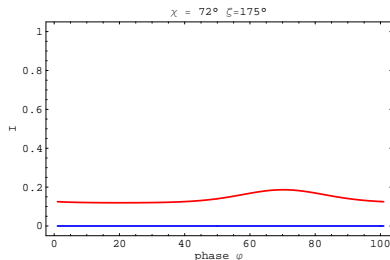


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$

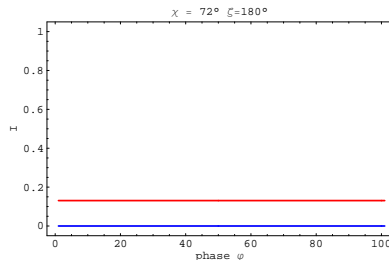


(Pétri, MNRAS, 2011)



Principaux résultats

- **forme en S** reflète l'émission de la couche de courant
- **deux points** correspondent à l'émission des calottes polaires (nord & sud séparées par une demi-période)
- plusieurs courbes de lumières possibles en fonction de la **géométrie χ, ζ**
 - pas de pulse !
 - pulse radio uniquement
 - pulse gamma uniquement
 - un pulse radio + un/deux pulses gamma
 - deux pulses radio
=> rotateur perpendiculaire,
 $\zeta \approx \chi \approx 90^\circ$



(Pétri, MNRAS, 2011)



Ce qui change

- localisation du choc terminal
- champ de photons externe intense provenant du compagnon
- variation avec la phase orbitale

Le cas de PSR B1259-63

Paramètres du pulsar

- période $P = 47.7$ ms
- $L_{sd} = 8.3 \times 10^{28}$ W

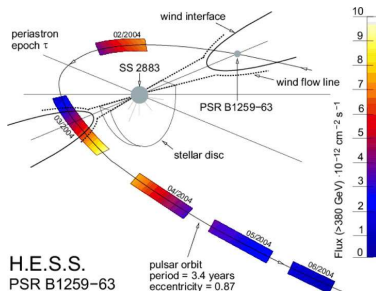
Caractéristiques du compagnon Be connues

- $L_* = 3.3 \times 10^{30}$ W
- $\dot{M} = 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
- $v_{\text{wind}} = 1000$ km/s
- séparation de $d = 9.6 \times 10^{10}$ m à 1.2×10^{12} m

Choc terminal

équilibre des pression implique

$$\frac{R_{\text{TS}}}{R_w} = \sqrt{\frac{L_{sd}}{\dot{M} v_w c}} \approx 0.7$$



Aharonian et al (2005)

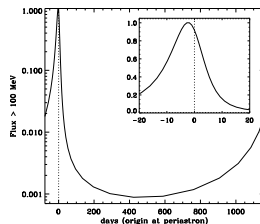


Courbe de lumière au-delà de 100 MeV

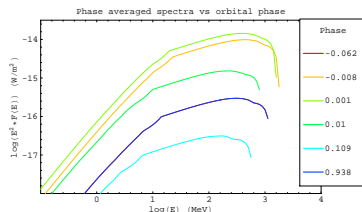
Variabilité orbitale

- courbe de lumière dépend de la phase orbitale
- maximale au périastre
- variabilité spectrale avec la phase orbitale
 - pente spectrale, transition Thomson/Klein-Nishina
 - coupure et cassure en énergie

=> propriétés particulières aux pulsars dans les binaires



Spectre moyen



(Pétri & Dubus, MNRAS, 2011 soumis)



- 1 Vous avez dit pulsar?
 - remarques générales
 - population
 - émission radio
 - émission haute énergie
- 2 Approche phénoménologique
- 3 Magnétosphère d'un pulsar
 - une vision artistique
 - modèles phénoménologiques
 - nébuleuse: lien avec le pulsar central
- 4 Le vent des pulsars
 - structure
 - choc terminal
 - simulations RMHD
- 5 Vent strié
 - émission pulsée
 - la binaire gamma PSR B1259-63
- 6 Conclusions & Perspectives



Magnétosphère

- étoile à neutrons fortement magnétisée et en rotation
- pas de contrainte observationnelle sur la géométrie et les distributions de particules
- calottes polaires/gaps externes difficiles à reconcilier avec les observations radio/gamma
- manque d'auto-cohérence pour la solution du rotateur oblique

Vent

- facteur de Lorentz élevé $\Gamma_v = 10^{2-6}$
- expansion radiale avec accélération jusqu'au point MSR
- géométrie anisotrope
- particules accélérées au choc terminal
- paradoxe σ non résolu
- composition du vent, électrons/positrons et ions(?)

Lien entre magnétosphère externe et la base du vent ?
crucial parce que site probable des rayons gammas



Émission pulsée

- l'émission pulsée haute énergie des pulsars provient des régions situées en dehors du cylindre lumière
- le vecteur champ électrique de l'émission hors-pulse est alignée avec la projection de l'axe de rotation du pulsar sur le plan du ciel
- résultats en accord avec les observations du pulsar du Crabe
- le scénario du vent strié inclue naturellement les caractéristiques de la dépendance en phase de l'angle de polarisation, du degré de polarisation et de l'intensité

Dissipation magnétique

- dissipation magnétique importante à la traversée du choc terminal
 - critère analytique simple
 - confirmé par simulations PIC



Le vent

- émission **inverse Compton**, spectre TeV
- la manière dont **l'énergie magnétique est libérée** en énergie pour les particules dans la couche de courant reste mal comprise
- le lien entre le **champ magnétique asymptotique** et la magnétosphère est mal décrit

Dissipation magnétique

- influence du **précurseur électromagnétique** sur l'écoulement amont
- simulations PIC **bi- ou tri-dimensionnelles**

Récentes observations

L'instrument Fermi/LAT a déjà détecté de nombreux nouveaux pulsars gammas et révélé plus de détails sur

- la forme des spectres, leur variabilité et leur coupure haute énergie
- les mécanismes d'émission
- les régions d'émission

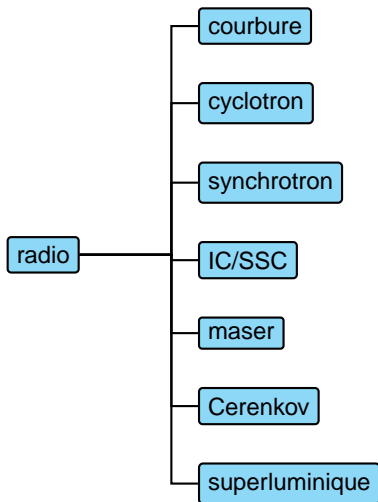


COMPLÉMENTS



- mesure de dispersion
- parallaxe annuelle
- absorption de l'hydrogène neutre
- identification optique
- variation de la période orbitale





Objectif

Étudier la **dissipation magnétique** dans le **choc terminal** du vent strié.

2 études complémentaires

- **approche MHD** simplifiée
- **description cinétique** du phénomène de dissipation
⇒ plus satisfaisante que la version MHD (**aucune connaissance a priori** de la résistivité n'est nécessaire).

Méthode: simulations PIC (Particle In Cell)

On résout les **équations de Maxwell-Vlasov relativistes** en calculant de manière auto-cohérente la **trajectoire et le champ électromagnétique** engendré par un **ensemble de particules représentatives** du plasma
⇒ échantillonnage en rapport avec la fonction de distribution initiale



Le principe

La structure du vent strié est conservée lors de la traversée du choc.

⇒ **relation de Rankine-Hugoniot** pour le saut des **valeurs moyennes spatiales** des quantités magnétohydrodynamiques

⇒ **conservation** du nombre de particules, de l'énergie-impulsion et du flux magnétique en moyenne (sur une période du vent)

Les propriétés

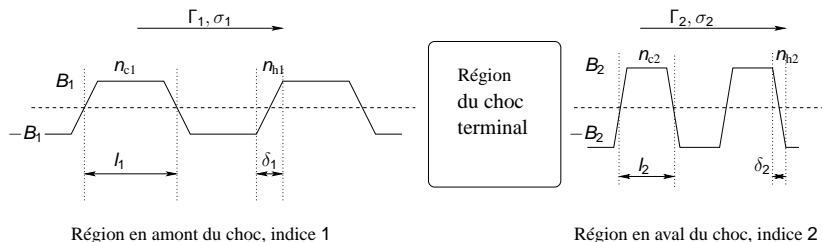
- la **distance** entre 2 couches de courant l
- l'**épaisseur** de la couche δ
- la **magnétisation** σ
- le **rayon de Larmor** r_B : rayon de giration des particules autour de \vec{B}
- le **facteur de Lorentz** Γ_v du vent
- les **densités de particules** "froides et chaudes" n_c, n_h



Principe

- **conservation** de la structure en vent strié;
- la région du choc **n'est pas décrite** physiquement.

Schéma



Un seul paramètre libre ξ

Reliant l'épaisseur de la couche en aval au rayon de Larmor aval (indice 2) par

$$\delta_2 = \xi r_{B2}$$

Limite ultra-relativiste

Dans la limite $\Gamma_1, \sigma_1 \gg 1$

$$\delta_2 + \frac{1}{4\sigma_1} = \frac{1}{4\Gamma_2^2}$$

- dissipation **totale**, $\delta_2 \approx 1$ pour $\sigma_1 \gg \frac{5h_1}{\xi r_{B1}}$, $\Gamma_2 \approx 1$
- dissipation **négligeable**, $\delta_2 \ll 1$ pour $\sigma_1 \ll \left(\frac{5h_1}{4\xi r_{B1}}\right)^{2/3}$, $\Gamma_2 \approx \sqrt{\sigma_1}$ comme en MHD idéale



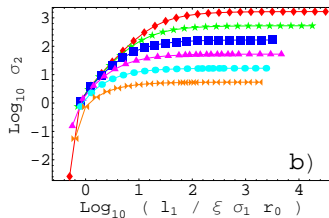
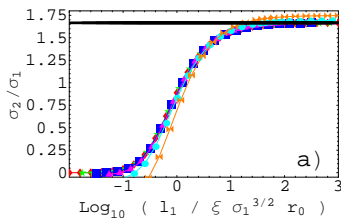
Résolution numérique

Recherche numérique de la condition de saut MHD dans le cas plus général où la magnétisation amont σ_1 est quelconque.

Recherche des racines d'un système d'équations non linéaires

⇒ nécessite une première estimation de la solution suffisamment bonne (d'où l'étude analytique précédente)

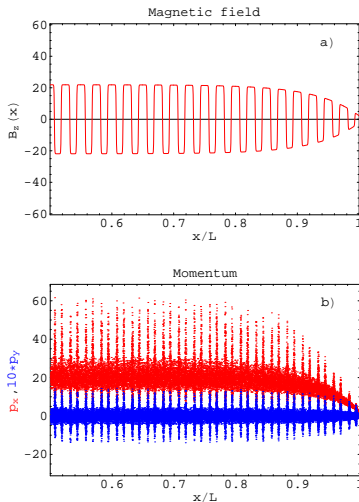
La magnétisation σ_2/σ_1



- $\sigma_2/\sigma_1 \ll 1$, dissipation quasi-totale
- $\sigma_2/\sigma_1 \approx 2$, dissipation négligeable



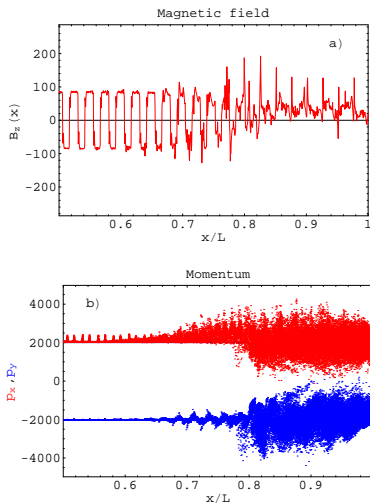
Exemple avec $\sigma_1 = 3$, $\Gamma_1 = 20$



(Pétri & Lyubarsky, A&A, 2007)



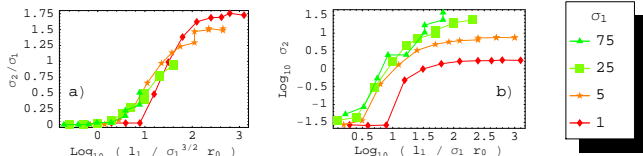
Exemple avec $\sigma_1 = 45$, $\Gamma_1 = 20$



(Pétri & Lyubarsky, A&A, 2007)



Diagramme de synthèse des simulations



A partir des simulations PIC, déduction du paramètre ξ : $\xi \approx 10$

Application aux pulsars binaires

Le critère de dissipation magnétique fournit des contraintes sur la multiplicité de paires κ (mesure de l'efficacité de la création de e^\pm dans la magnétosphère)

Pour une dissipation totale \Rightarrow limite supérieure:

- PSR 1957+20: $\kappa \leq 10^4$
- PSR 1259-63: $\kappa \leq 8 \times 10^4$

Pour une dissipation négligeable \Rightarrow limite inférieure

- pulsar binaire PSR 0737-3039: $\kappa \geq 310$.



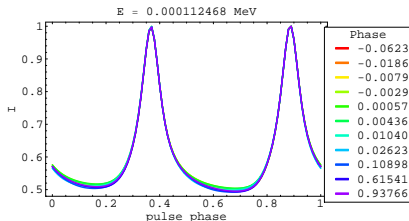
Forme des pulses

- pas de dépendance significative en phase orbitale
- mais forte dépendance en énergie => focalisation relativiste, pente spectrale (α) dépendance ($D^{2+\alpha}$)
- reflète les propriétés de la couche de courant (épaisseur, distribution des particules)

=> caractéristiques intrinsèque de l'émission du vent strié

=> indépendante de la nature pulsar isolé/binaire

Profil des pulses vs phase orbitale



Profil des pulses vs énergie

