

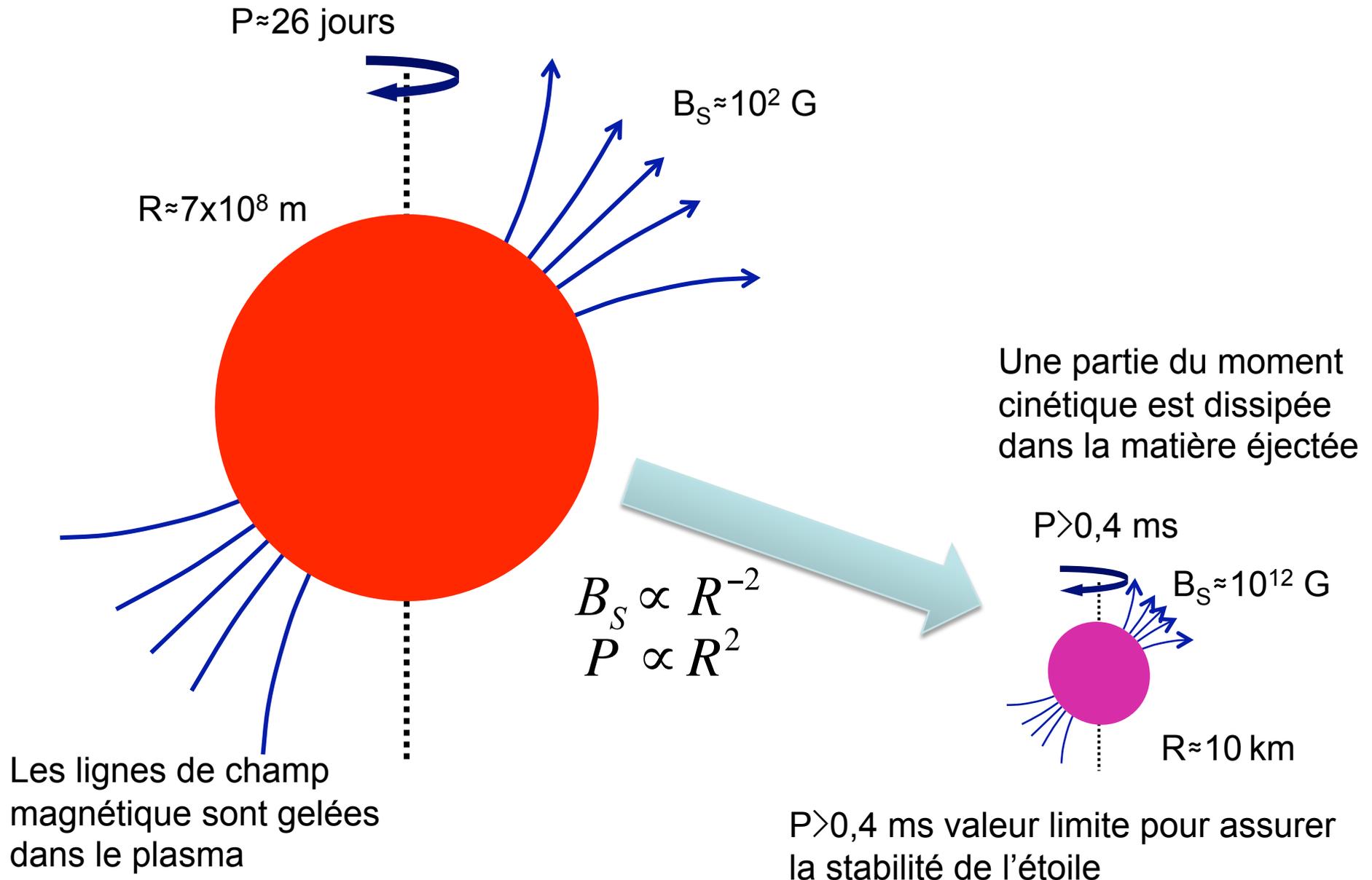
Les Pulsars de Fermi

Denis Dumora, CENBG
dumora@cenbg.in2p3.fr

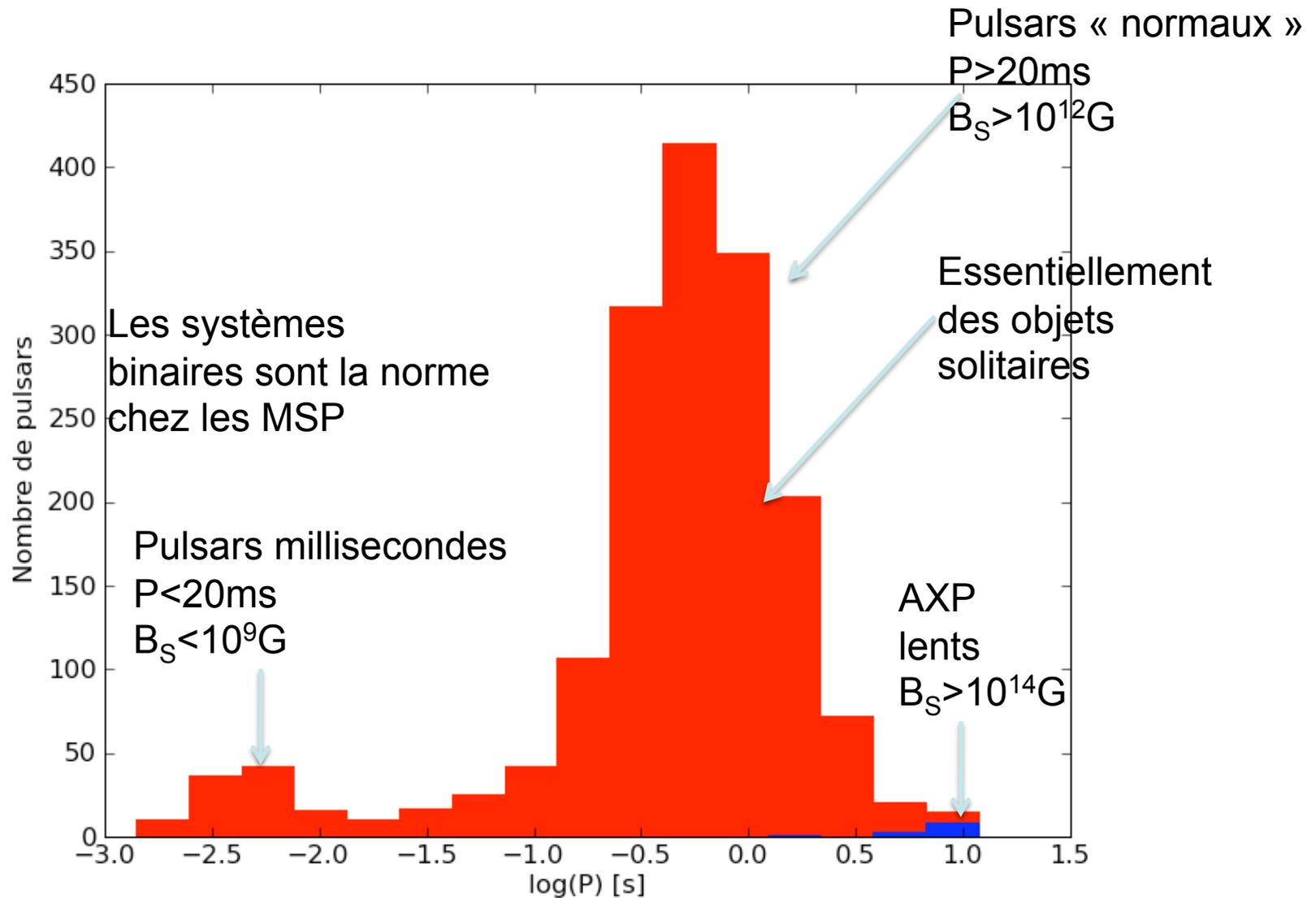
Ecole de Physique des Astroparticules

(OHP 12 Septembre 2009)

Pulsars



2 populations principales



Les pulsars freinent

- Perte d'énergie par
 - Rayonnement du dipôle
 - Fuite des particules chargées
- Freinage

$$E = \frac{1}{2} I \Omega^2$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{P}$$

$$\dot{E} = -I \Omega \dot{\Omega}$$

$$\dot{P} = -2\pi \frac{\dot{\Omega}}{\Omega^2}$$

$$\dot{E} = 4\pi^2 I \frac{\dot{P}}{P^3} \approx 3,95 \times 10^{31} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-15}} \right) \left(\frac{P}{1s} \right)^{-3} \text{ erg s}^{-1}$$

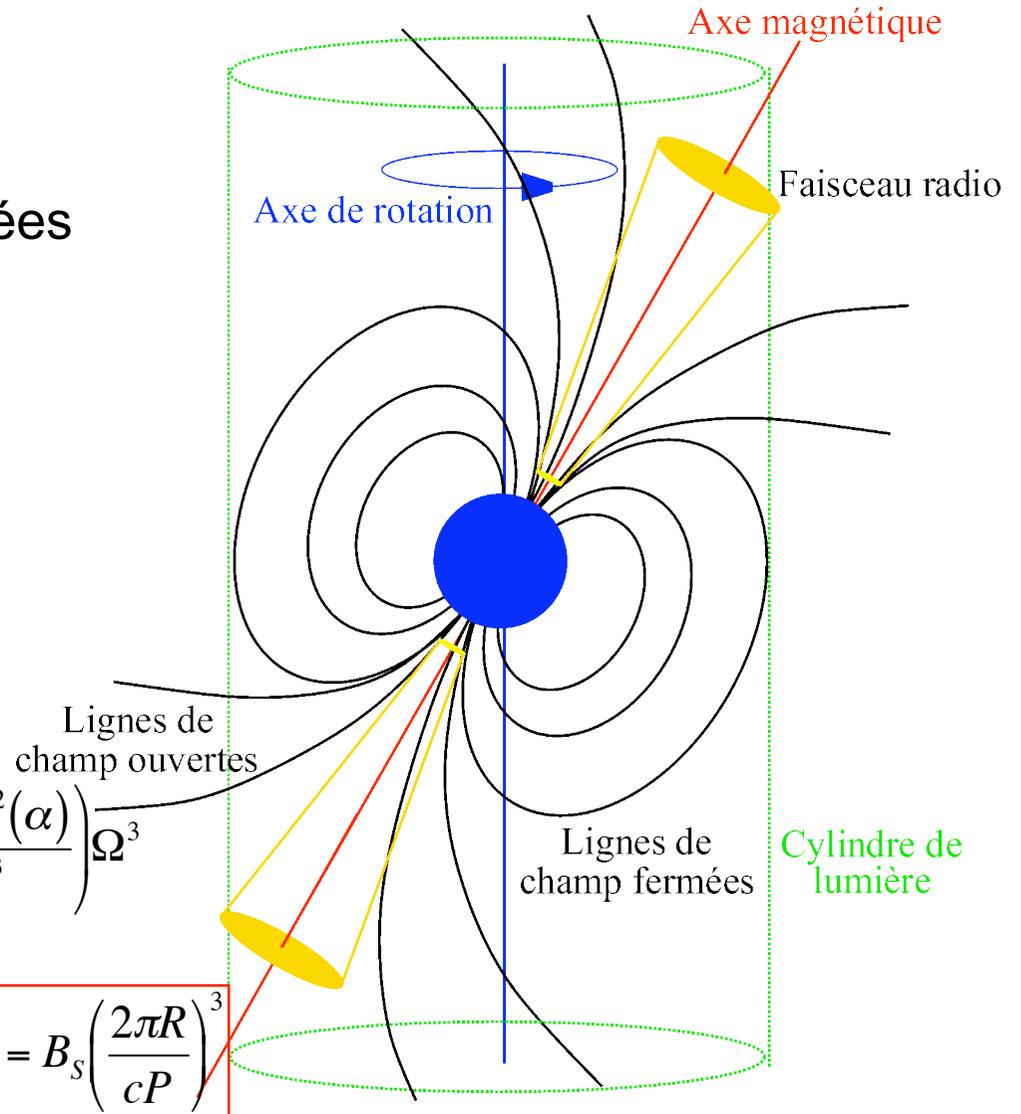
$$\dot{E} = -I \Omega \dot{\Omega} = \frac{2}{3c^3} \bar{\mu}^2 \Omega^4 \sin^2(\alpha)$$

$$\dot{\Omega} = - \left(\frac{2\bar{\mu}^2 \sin^2(\alpha)}{3Ic^3} \right) \Omega^3$$

$$B(r) = \frac{1}{r^3} \sqrt{\frac{3Ic^3}{8\pi^2 \sin^2(\alpha)}} P \dot{P}$$

$$B_s = B(R) \approx 3,2 \times 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ G}$$

$$B_{LC} = B_s \left(\frac{2\pi R}{cP} \right)^3$$



P et dP/dt semblent des variables pertinentes...

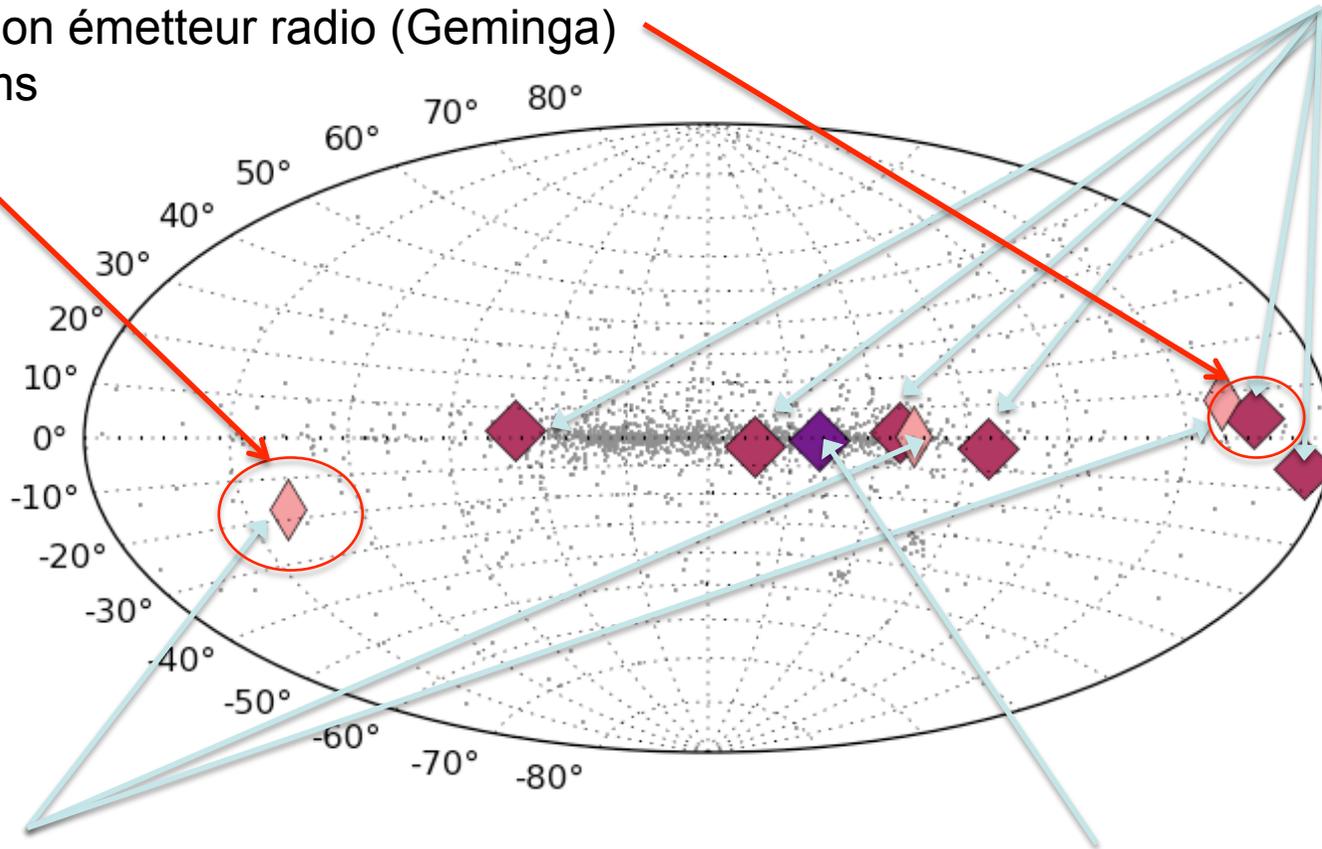
Où trouve-t-on les pulsars?

- Dans la base de données de l'ATNF
 - <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>
 - 1827 pulsars (mercredi dernier)
 - Essentiellement détectés en radio
 - 6 connus en optique
 - Quelques dizaines en X
 - 6+1 détections fermes en gamma + 3 marginales

Où trouve-t-on les pulsars ?

8 pulsars normaux connus en radio
1 pulsar non émetteur radio (Geminga)
1 pulsar ms

6 détections fermes EGRET

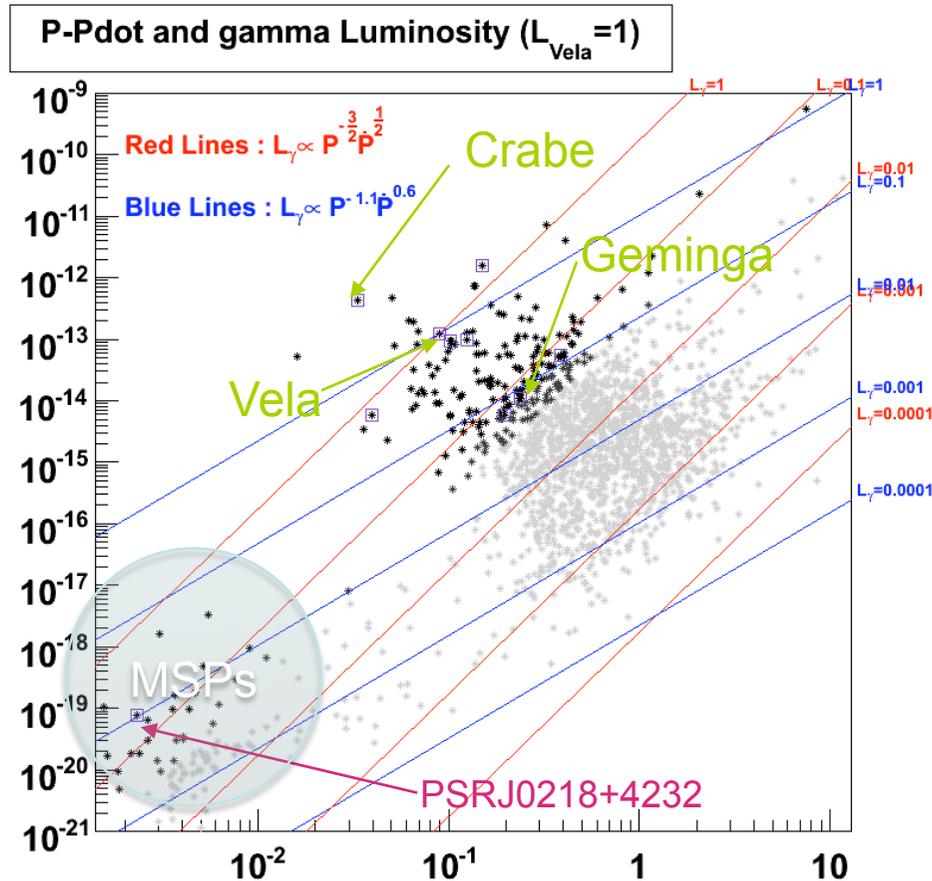


3 détections marginales EGRET

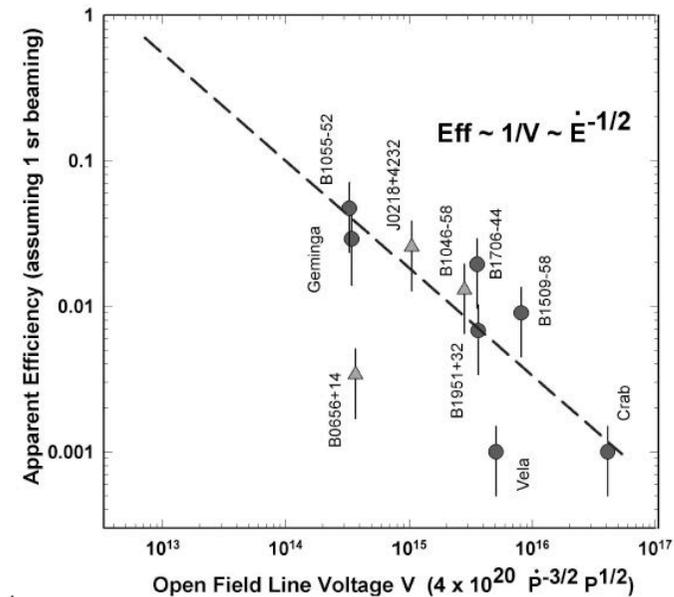
1 détection basse énergie COMPTEL

Diagramme P-PDot

- On a vu que P et sa dérivée semblent être des paramètres pertinent pour les pulsars...

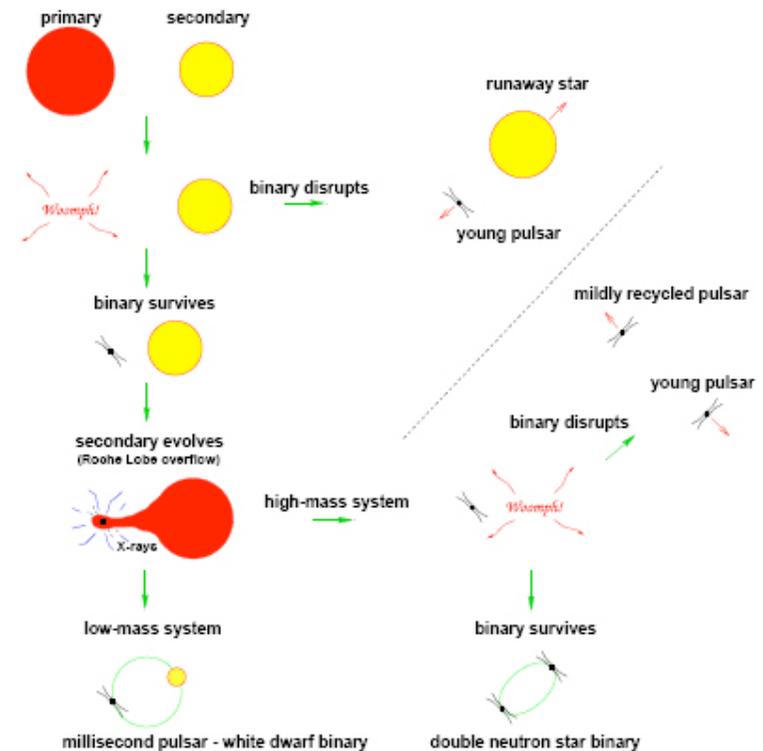


$$\Phi_\gamma \propto \frac{\sqrt{\dot{E}}}{d^2} \propto P^{-\frac{3}{2}} \dot{P}^{\frac{1}{2}}$$



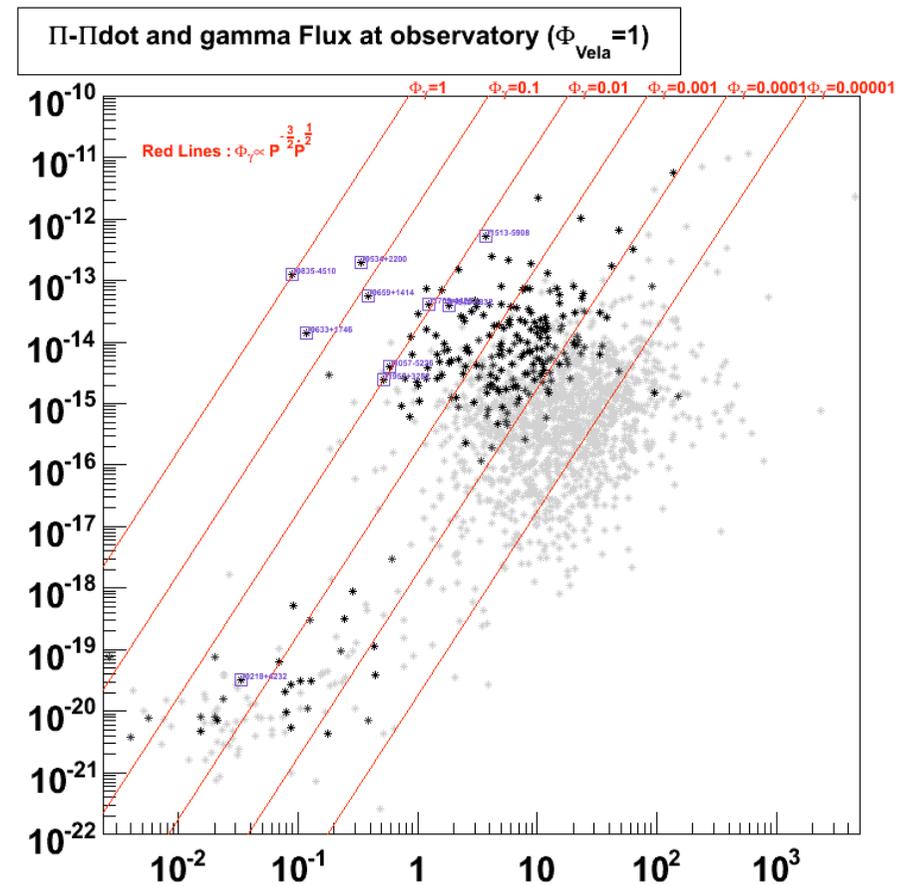
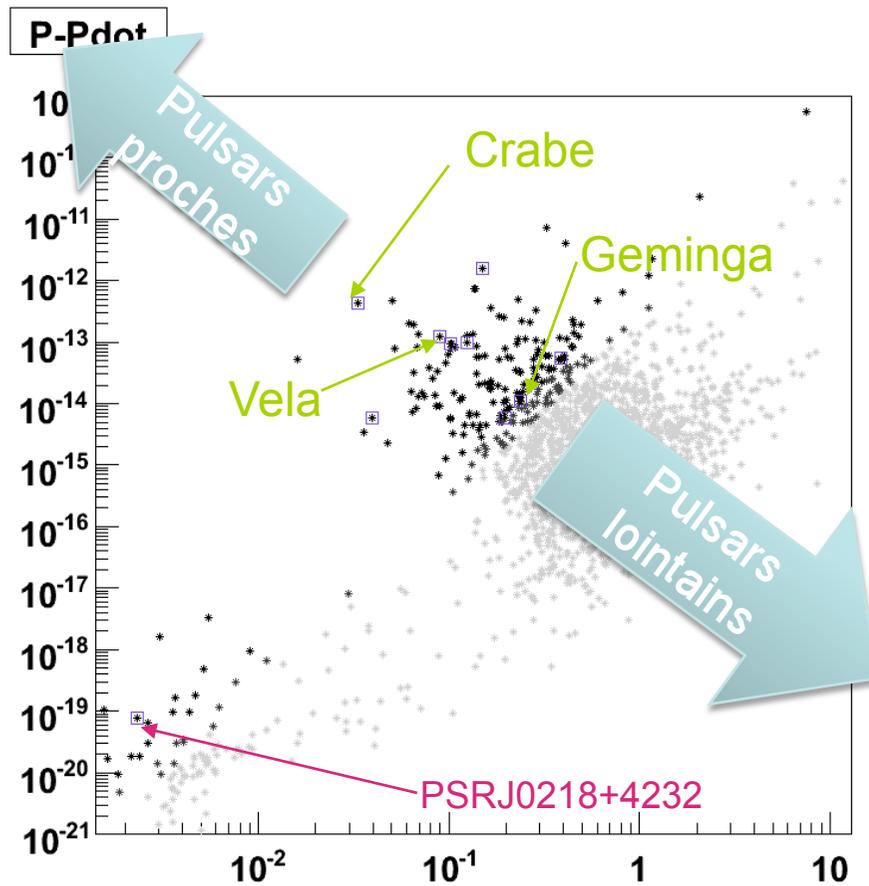
Les MSPs

- MSP vieux pulsars
- Régénérés par accrétion de matière d'une étoile compagnon
- Cela explique la surreprésentation des systèmes binaires.
- Le pulsar récupère du moment cinétique, sa période diminue.
 - Le recyclage est interrompu par rupture du système binaire, période intermédiaire
 - Le recyclage va jusqu'au bout, pulsar milliseconde



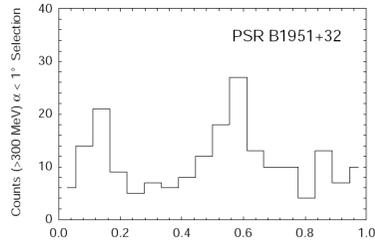
Trier en flux

- Flux => Normalisation par la distance

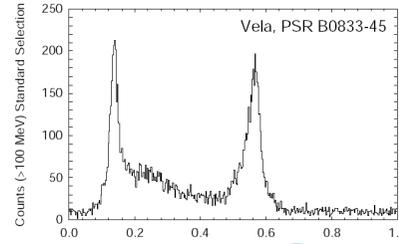


Les pulsars EGRET

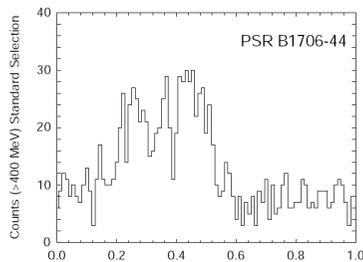
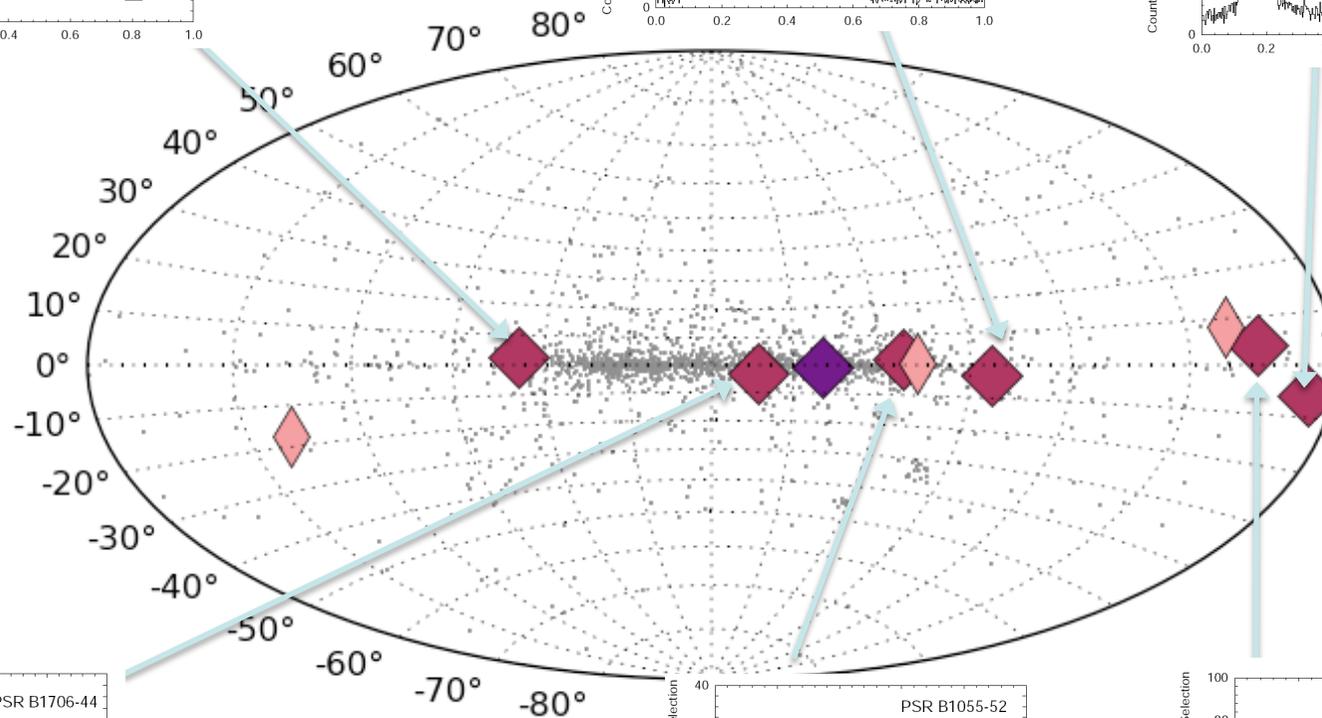
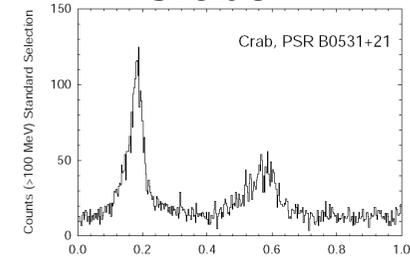
PSR B1951+32



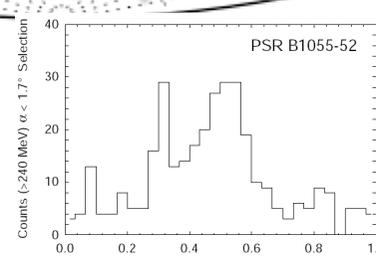
Vela



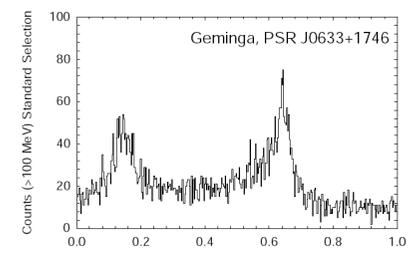
Crabe



PSR B1706-44



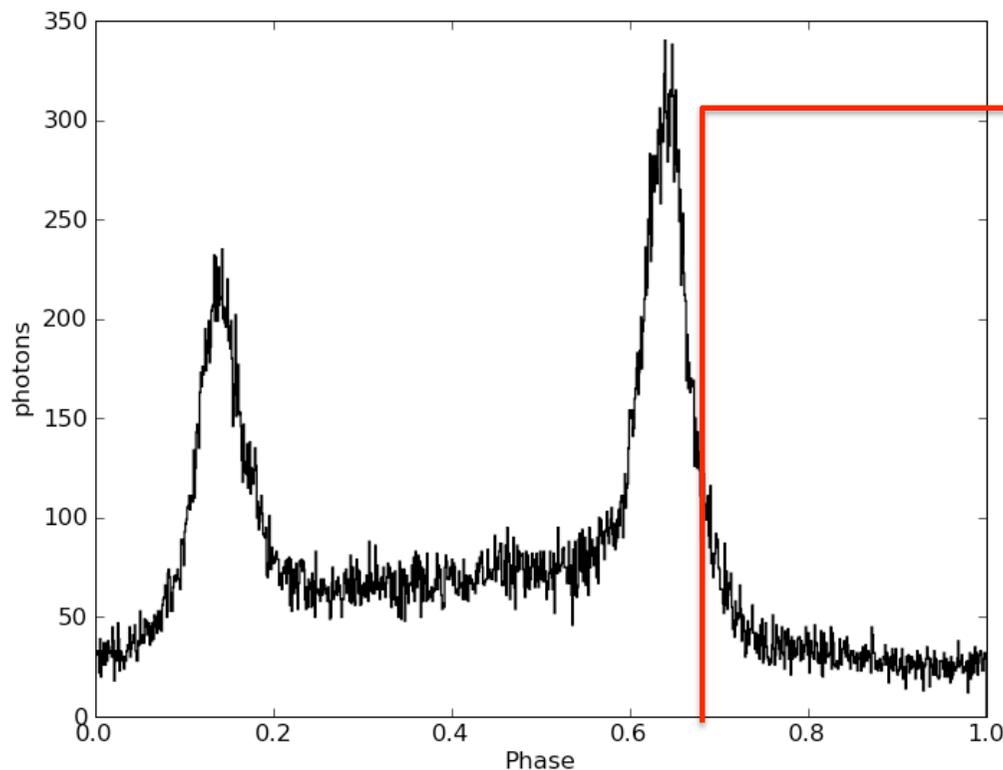
PSR B1055-52



Geminga

Données Observationnelles

- Courbe de lumière
 - A chaque photon, on associe la fraction de tour du pulsar dans lequel il arrive (la phase).
 - On construit l'histogramme des phases.



Date d'arrivée du photon

$$\varphi(t) = \varphi_0 + f_0(t - T_0) + \frac{f_1}{2}(t - T_0)^2 + \dots$$

Paramètres rotationnels du pulsar

Un pulsar est déclaré détecté si
Z-test et H-test dépassent 5σ

Données Observationnelles

- Courbe de lumière $\varphi(t) = \varphi_0 + f_0(t - T_0) + \frac{f_1}{2}(t - T_0)^2 + \dots$
 - Les photons γ sont rares...
 - Construire la courbe de lumière demande une longue intégration
 - Fermi détecte 1 photon/100 tours pour le pulsar de Vela, la source gamma la plus brillante du ciel.
 - Les paramètres rotationnels du pulsar doivent être déterminés avec une très grande précision.
 - Les dates d'arrivée des photons aussi.
 - Paramètres rotationnels : deux techniques pour les déterminer
 - Utiliser les données à d'autres longueurs d'ondes pour lesquelles le flux de photons est plus généreux.
 - Faire une recherche en aveugle à partir des données gamma.

➔ Production d'une éphéméride donnant les paramètres rotationnels

- Date d'arrivée du photon
 - Datation locale GPS
 - Passage dans un référentiel compatible avec l'éphéméride

➔ Barycentrisation

Données Observationnelles

- Courbe de lumière

$$\varphi(t) = \varphi_0 + f_0(t - T_0) + \frac{f_1}{2}(t - T_0)^2 + \dots$$

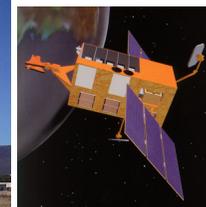
- Utilisation d'Ephémérides connus

- Déterminés en radio ou X

- Spécificité de Fermi : **survey mode**

- Tous les pulsars sont vus tout le temps
- Nécessité d'éphémérides à jour pour tous les pulsars.
- Grande campagne de datation pour produire massivement des éphémérides.
 - » Candidats sélectionnés pour leur grand indice de freinage $\dot{E} > 1 \times 10^{34} \text{ erg.s}^{-1}$
 - » 726 Ephémérides disponibles pour Fermi

PSR	B1937+21
RAJ	19:39:38.56064724
DECJ	21:34:59.1465432
PMRA	-0.4132
PMDEC	-0.5738
PX	0.2000
POSEPOCH	46024.858000
F0	641.9282681233045196
F1	-4.331423098560E-14
PEPOCH	46024.858000
START	53272.811
FINISH	54293.015
DM	71.023612
EPHEM	DE200



Données Observationnelles

- Courbe de lumière

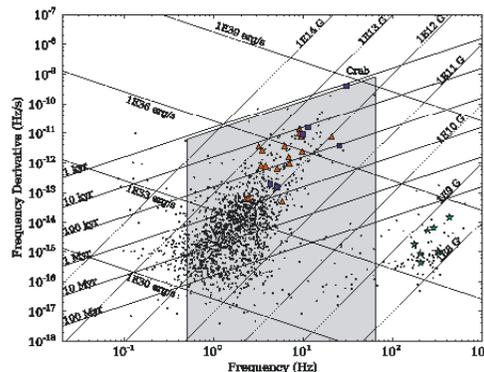
$$\varphi(t) = \varphi_0 + f_0(t - T_0) + \frac{f_1}{2}(t - T_0)^2 + \dots$$

- Recherche aveugle

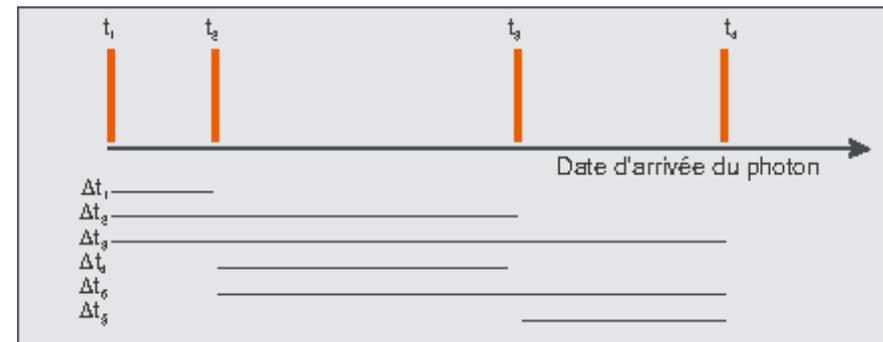
- Pulsars n'émettant pas en radio ou X
- Spécificité de Fermi : **statistique importante**
- Il est possible d'effectuer une recherche de périodicité en n'utilisant que les γ

- FFT classique, fastidieux et consommateur de CPU pour des échantillons très dispersés dans le temps.

- Approche différentielle (2006, Atwood et al., ApJ 652)



- » Bonne sensibilité
- » Temps de calcul réduit



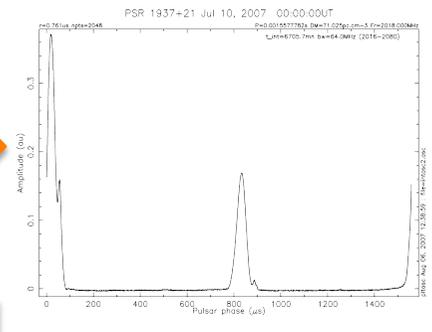
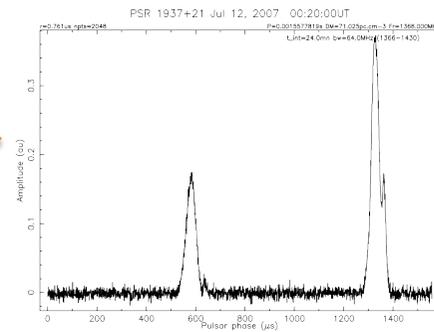
- Recherche aveugle sur une liste prédéterminée de 100 position de SNR,PWN,... + Les sources des premières versions du catalogue

LAT

Ne fonctionne pas pour les ms

Paramètres rotationnels

- Ephémérides Radio
 - Pour les pulsars radio, une éphéméride est produite en enregistrant les pulses provenant du pulsar.



TOA

- Le signal est comparé à un modèle pour déterminer un temps d'arrivée (TOA)
- L'opération est répétée au cours du temps, on a une série de TOAs

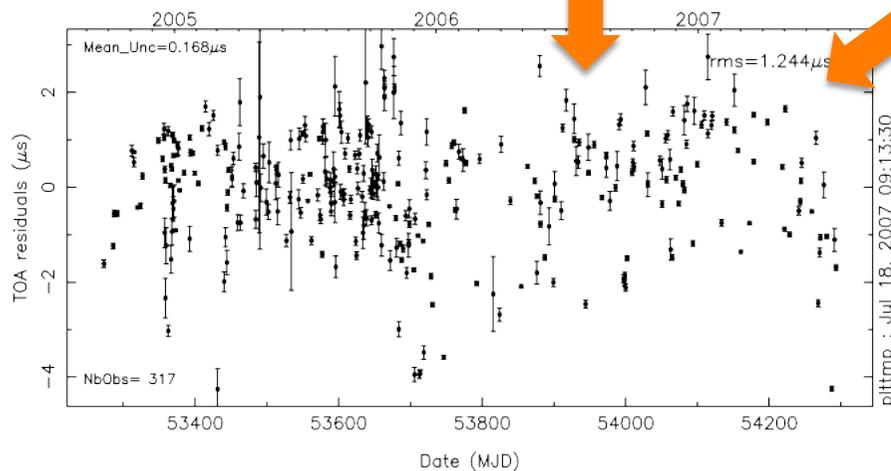
Paramètres rotationnels

TOAs même phase du pulsar

La rotation est alors modélisée
(outil : TEMPO2 par exemple)

```

glast@nrt ~/timing/1937+21 $ more 1937.nrt
f 1 1937+21 1368.000 53686.6915396007734
f 1 1937+21 1368.000 53687.6723150558720
f 1 1937+21 1368.000 53704.6184724658316
f 1 1937+21 1368.000 53710.6033220063178
f 1 1937+21 1368.000 53712.5959608939529
f 1 1937+21 1368.000 53713.5726970110348
f 1 1937+21 1368.000 53717.5812849647213
  
```



```

PSR          B1937+21
RAJ          19:39:38.56064724
DECJ         21:34:59.1465432
PMRA         -0.4132
PMDEC        -0.5738
PX           0.2000
POSEPOCH     46024.858000
FO           641.9282681233045196
F1           -4.331423098560E-14
PEPOCH       46024.858000
START        53272.811
FINISH       54293.015
DM           71.023612
EPHEM        DE200
  
```

Grappe des résidus $T_{\text{prédict}} - t - T_{\text{mesuré}}$
On cherche à minimiser les écarts

Ephéméride

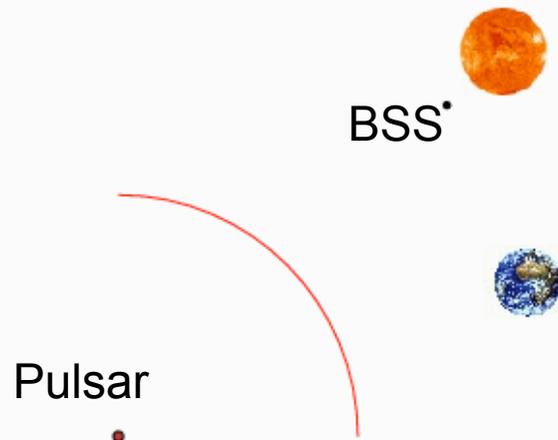
- Paramètres Astrométriques
- Paramètres rotationnels

Barycentrisation



Phase au BSS

Phase sur Terre

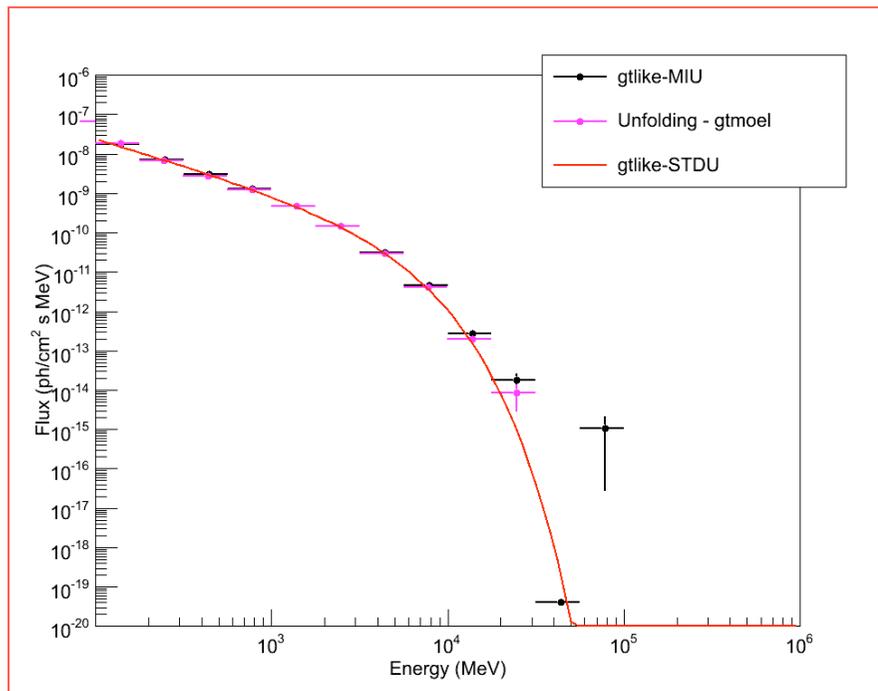


- Datation locale
 - Pas l'endroit le plus simple pour calculer les phases...
- Le barycentre du système solaire (BSS) est un meilleur endroit pour calculer les TOAs.

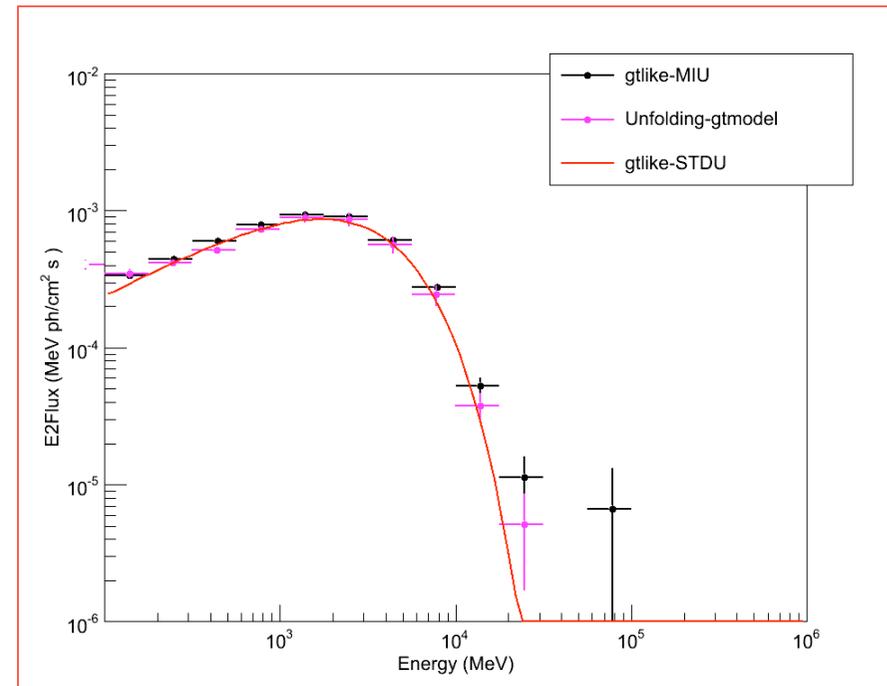
Illustration 2D, seuls les effets géométriques sont pris en compte
Les effets relativistes ne sont pas montrés.

Données Observationnelles

- Spectre
 - Moyenné en phase
 - Résolu en phase quand la statistique le permet



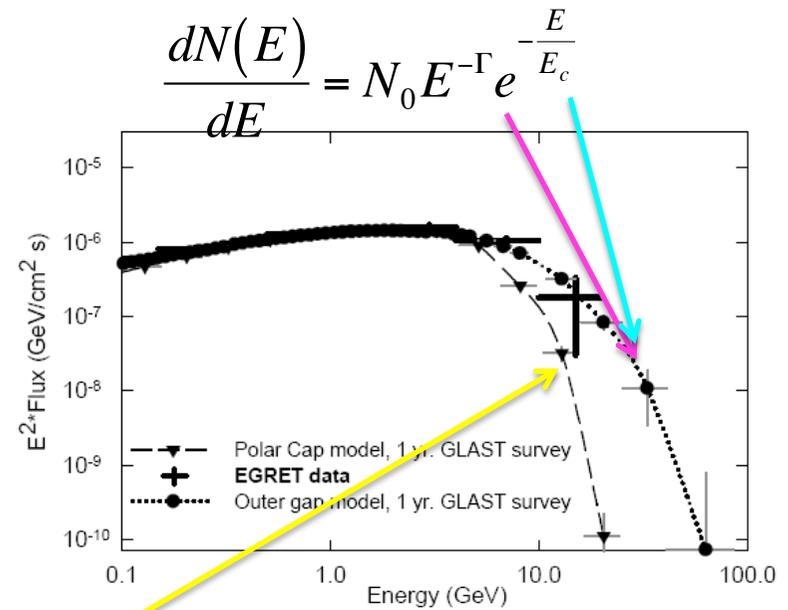
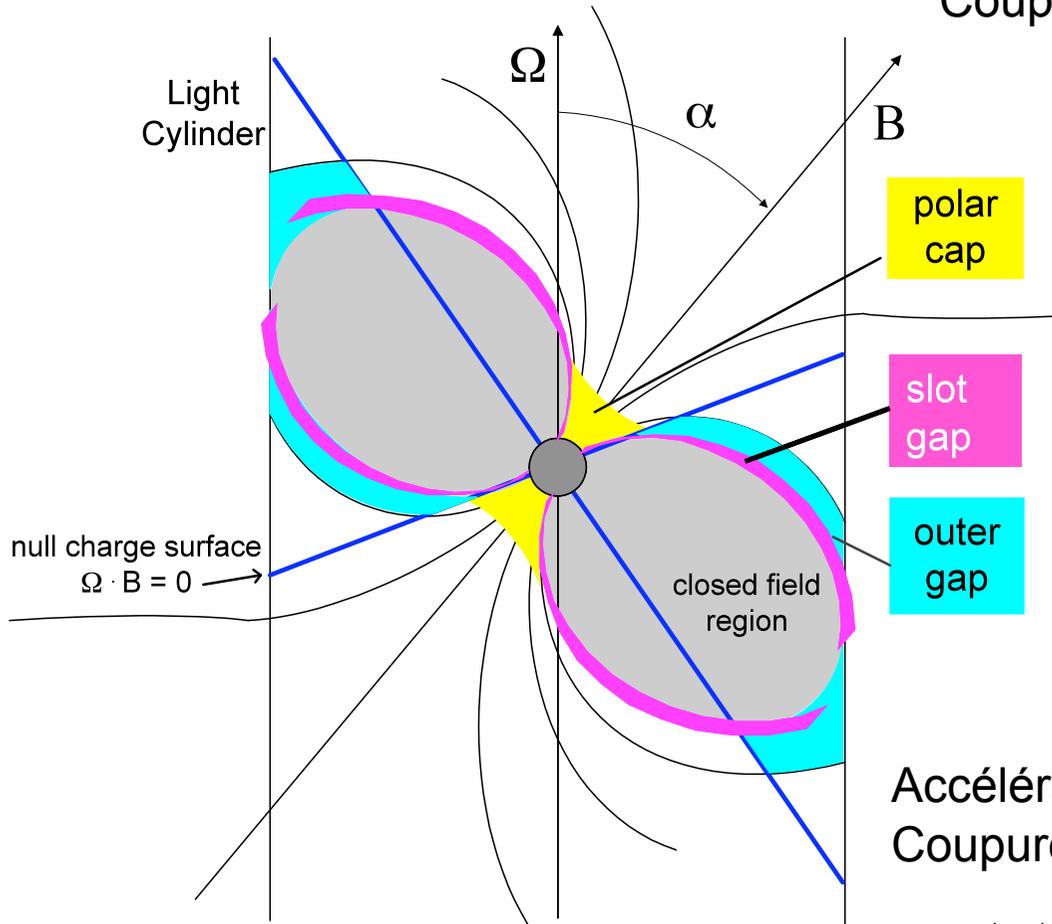
Flux en photons.cm⁻².s⁻¹.MeV⁻¹



E²xFlux en MeV.cm⁻².s⁻¹

Spectres & Modèles d'émission γ

Accélération dans la magnétosphère externe
(Outer Gap et Slot Gap)
Coupure simple exponentielle

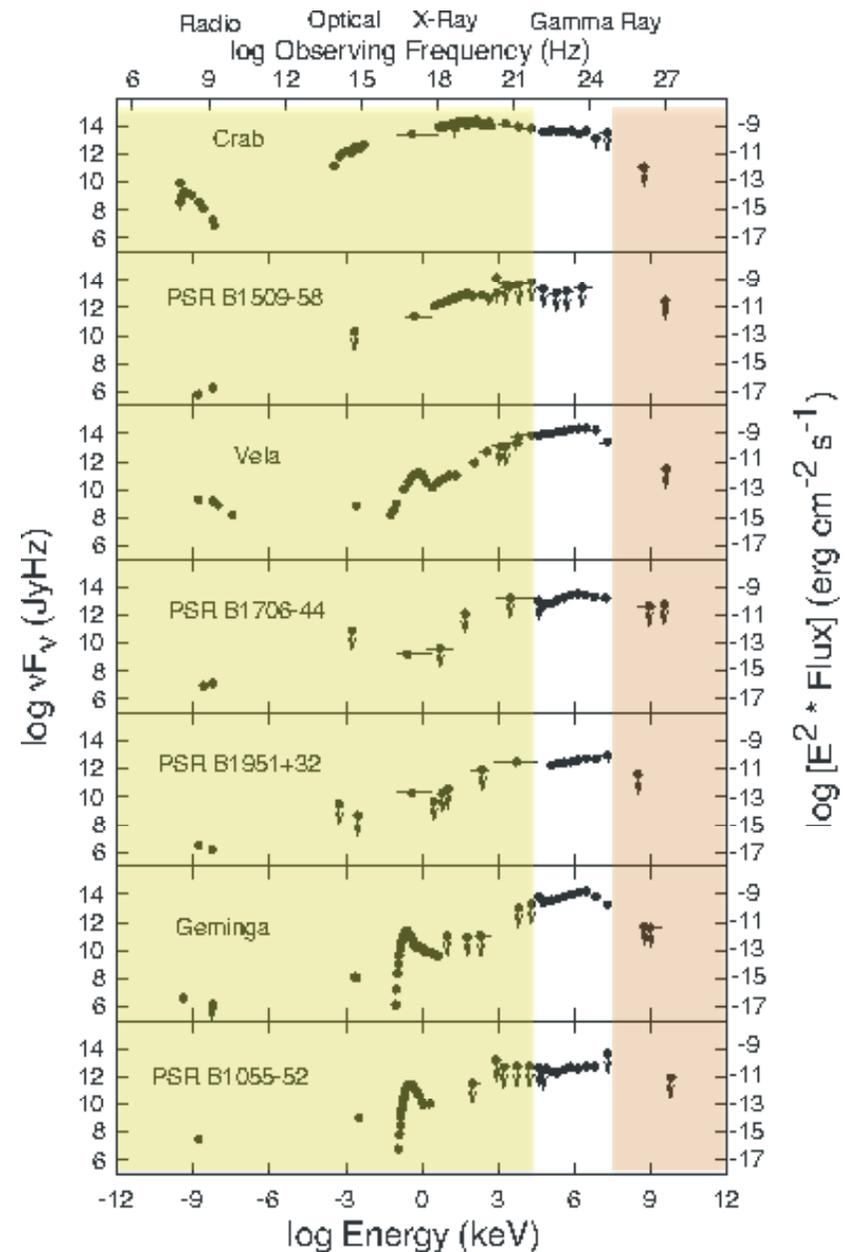


Accélération près de l'étoile (Polar Cap)
Coupure super exponentielle

$$\frac{dN(E)}{dE} = N_0 E^{-\Gamma} e^{-\left(\frac{E}{E_c}\right)^b} \quad \text{avec } b > 1$$

Spectre des pulsars d'EGRET

- L'essentiel de l'énergie est émise en X et γ
- Spectres en loi de puissance coupés
- Pas assez de stat pour conclure sur la forme de la coupure



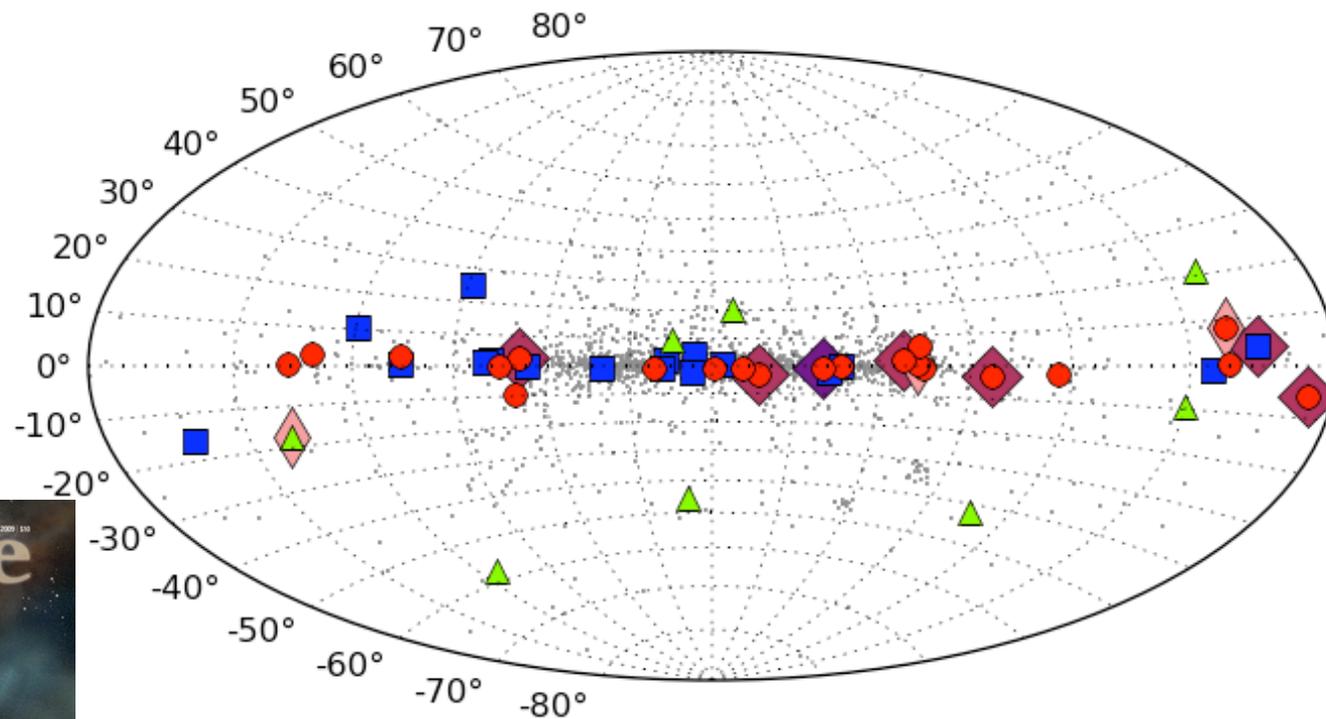
Questions ouvertes

- Après EGRET de nombreuses questions restent ouvertes:
 - Quel est le modèle d'émission gamma?
 - Polar Cap (Accélération proche de l'étoile)
 - Outer Gap (Accélération dans la magnétosphère externe)
 - Un autre modèle?
 - Existe-t-il d'autres pulsars gamma silencieux en radio?
 - Geminga est-il un objet unique?
 - Les pulsars millisecondes émettent-ils en gamma?

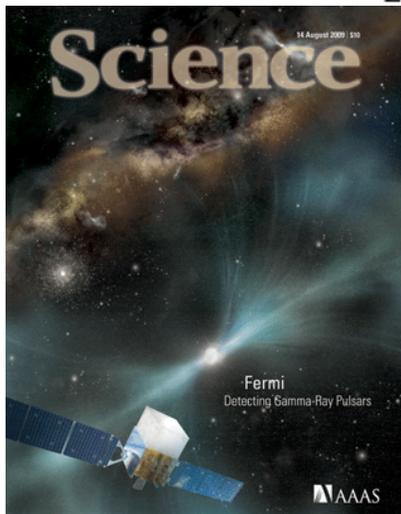
Les Pulsars de Fermi

8 pulsars milliseconde

16 pulsars gamma découverts



22 pulsars normaux connus en Radio

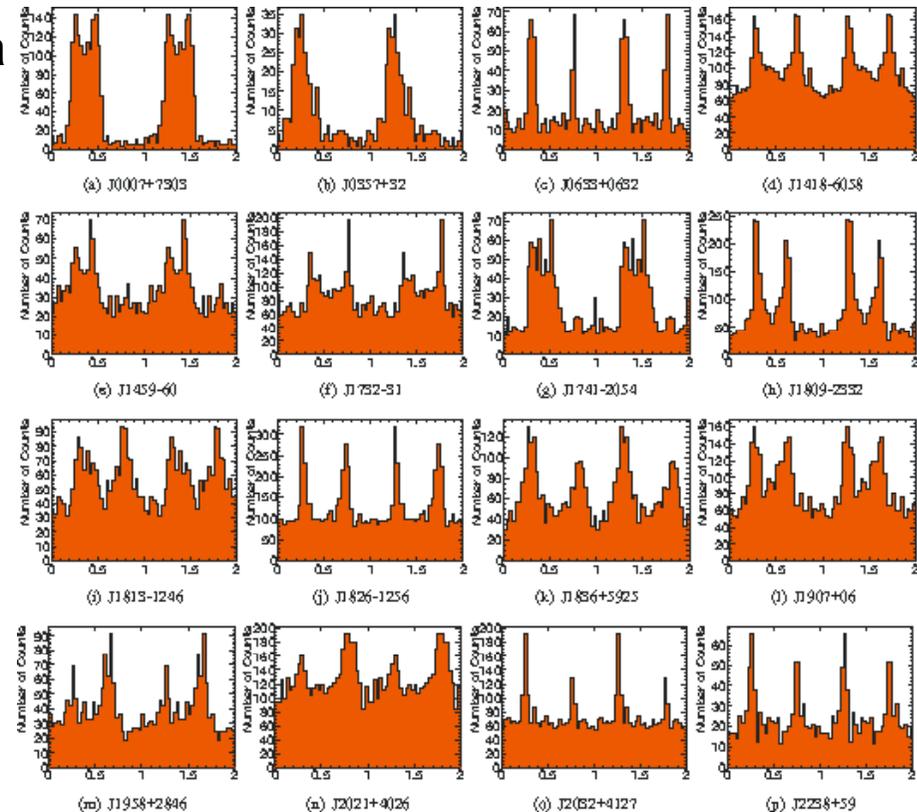


16 Nouveaux pulsars

- **6/16** trouvés dans les contreparties à d'autres longueurs d'onde, certains étaient depuis longtemps soupçonnés d'être des pulsars (CTA1, 3EG J1835-5918)
- **13/16** sont associés à des sources EGRET non identifiées.
- Fréquences de 2.25 à 20.8Hz

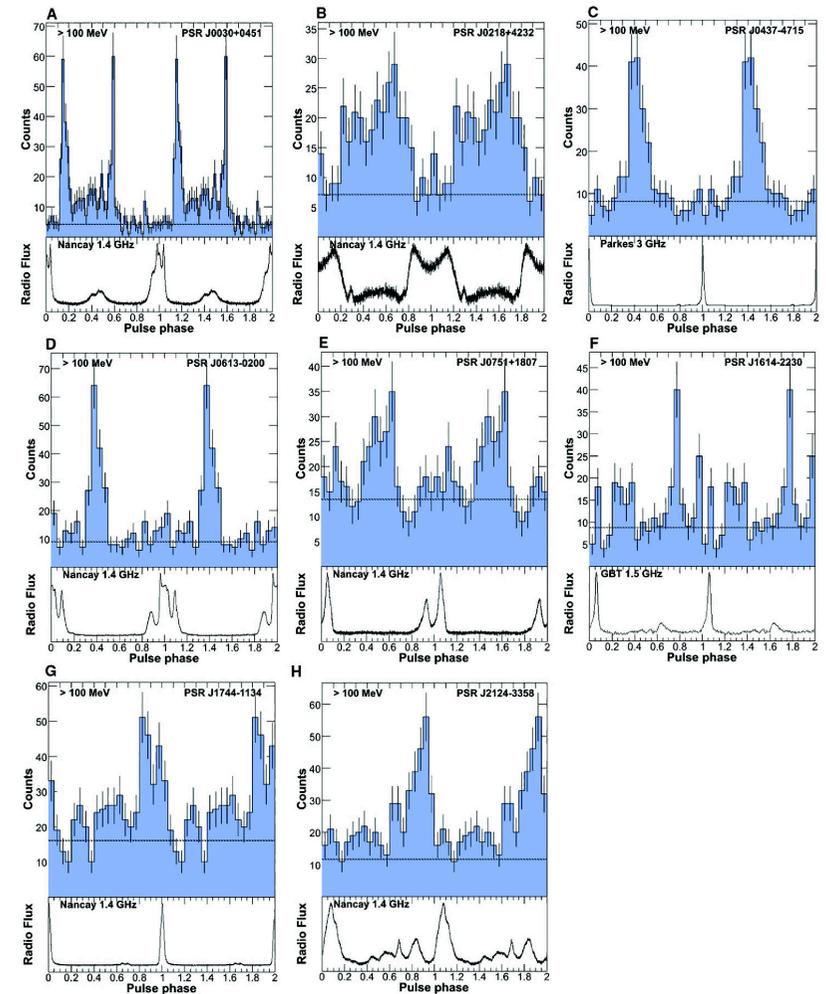
$$5 \times 10^{33} < \dot{E} < 6 \times 10^{36} \text{ erg.s}^{-1}$$

- Geminga n'est pas un objet unique !!!
- Il y a une population de pulsars cachés



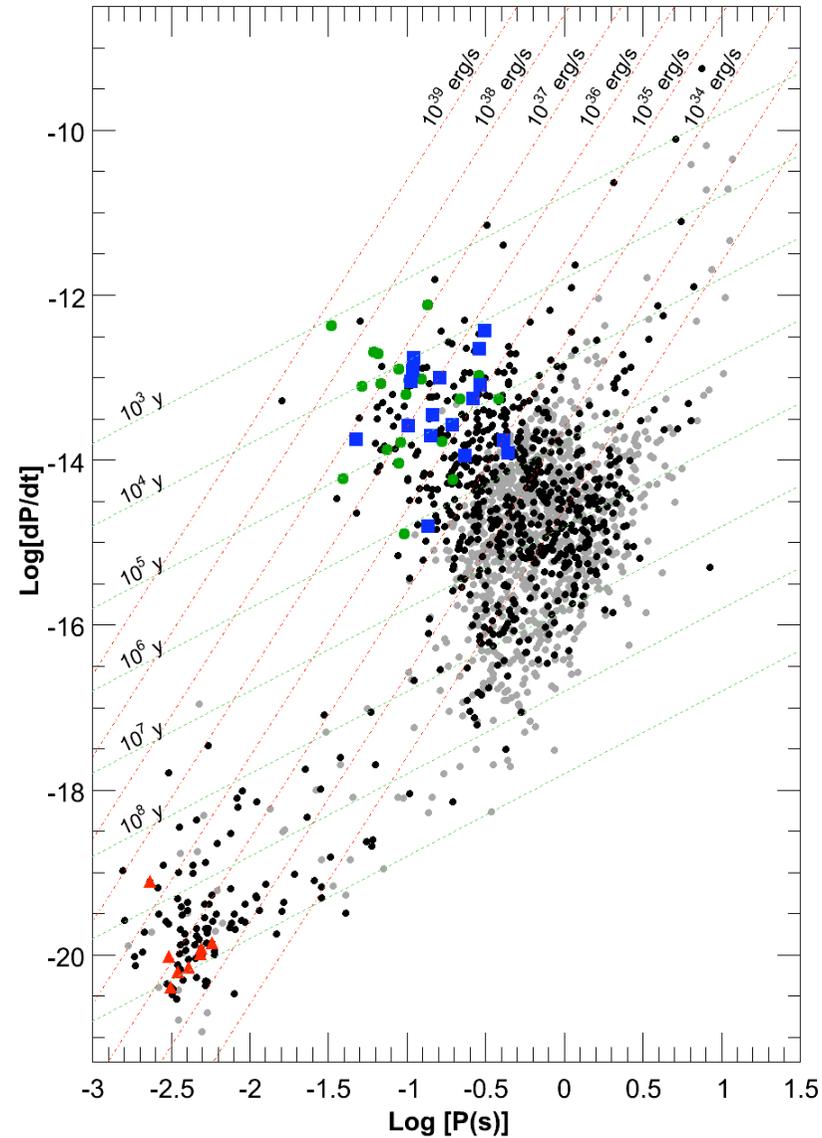
Pulsars ms

- **EGRET** Détection marginale d'un seul MSP (PSR J0218+4232)
- **Fermi** Détection de 8 pulsars milliseconde durant les 9 premiers mois de fonctionnement.
- Les profils des MSP ressemblent beaucoup à ceux des pulsars jeunes.



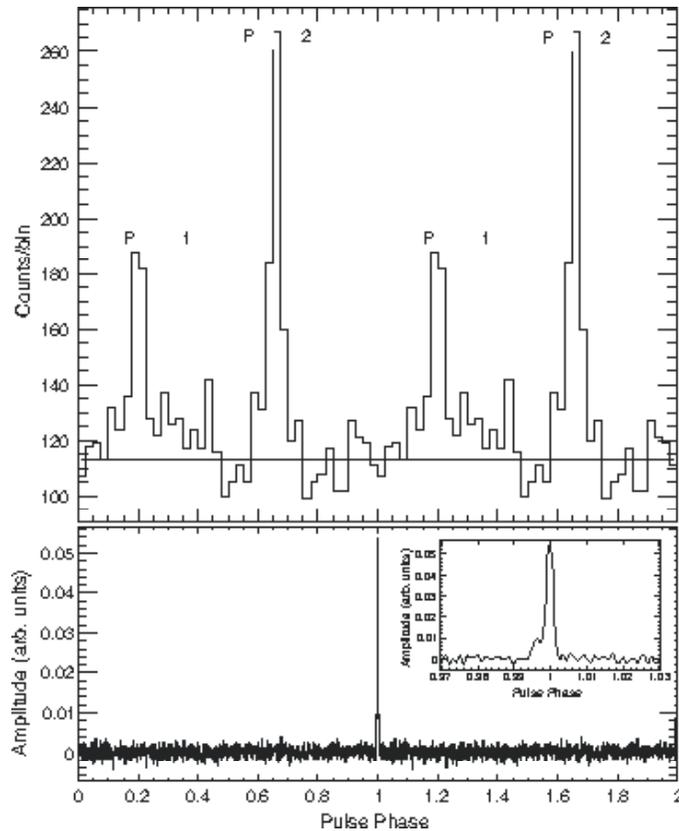
Le premier catalogue pulsar

- 46 pulsars
 - 16 découverts par Fermi
 - 6 pulsars EGRET
 - 16 autres pulsars radio
 - 8 MSP



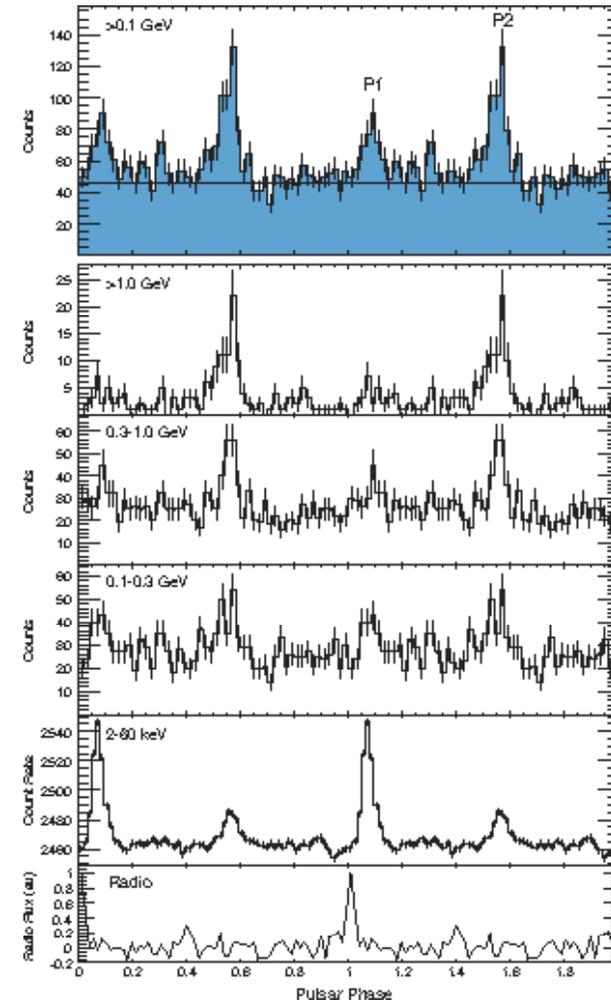
Etudes multi λ

- Des études multi longueur d'onde sont menées pour certains pulsars



Pulsar jeune PSR J1028-5918

Associé à la source EGRET 3EG J1017-5817



Pulsar jeune très faible en radio dans le SNR 3C58

Le multi λ pour quoi faire?

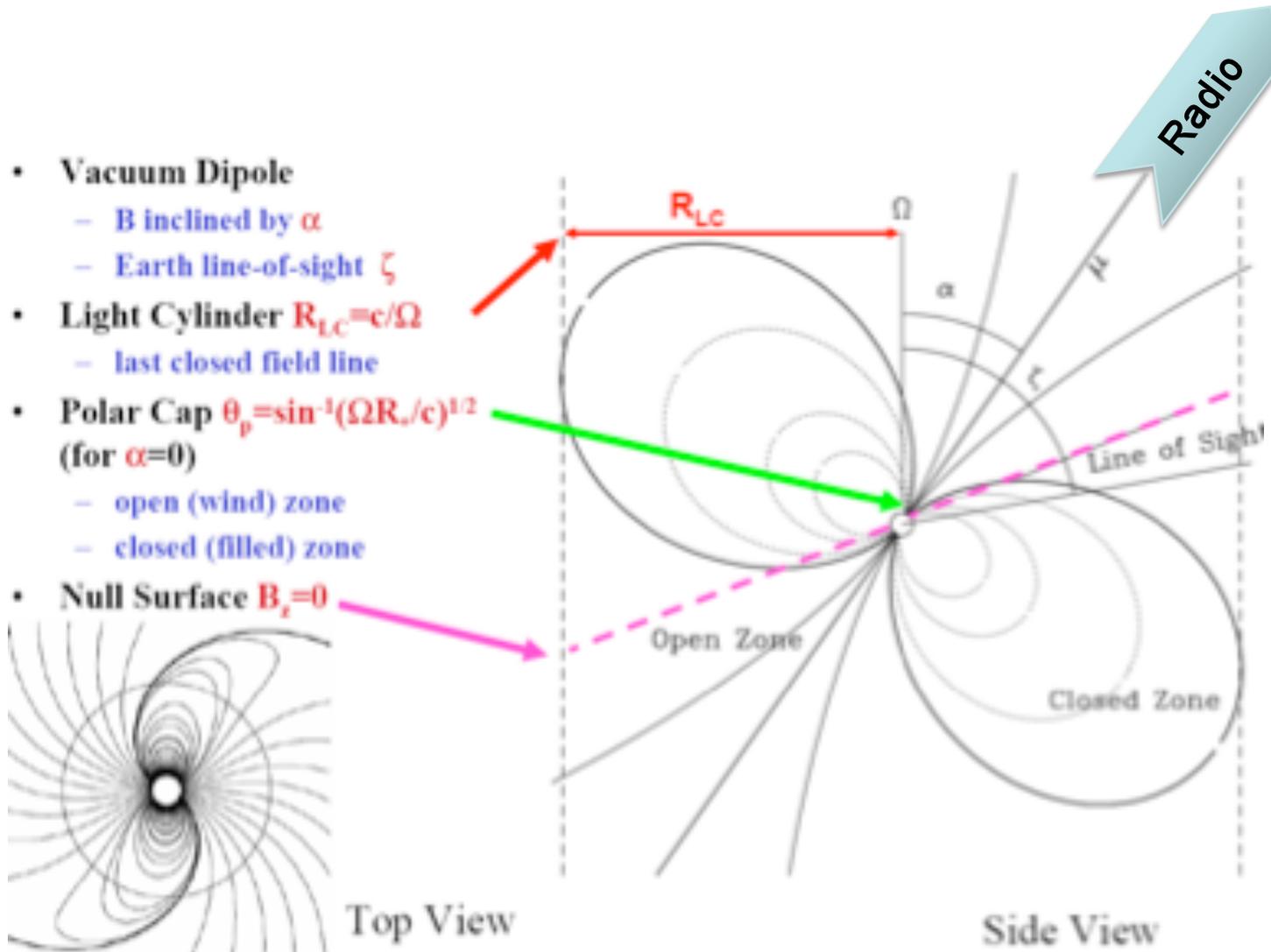
- Le paradigme des 1sr.
 - valeur canonique de la fraction de l'énergie de freinage rayonnée

$$\eta = \frac{L_\gamma}{\dot{E}}$$

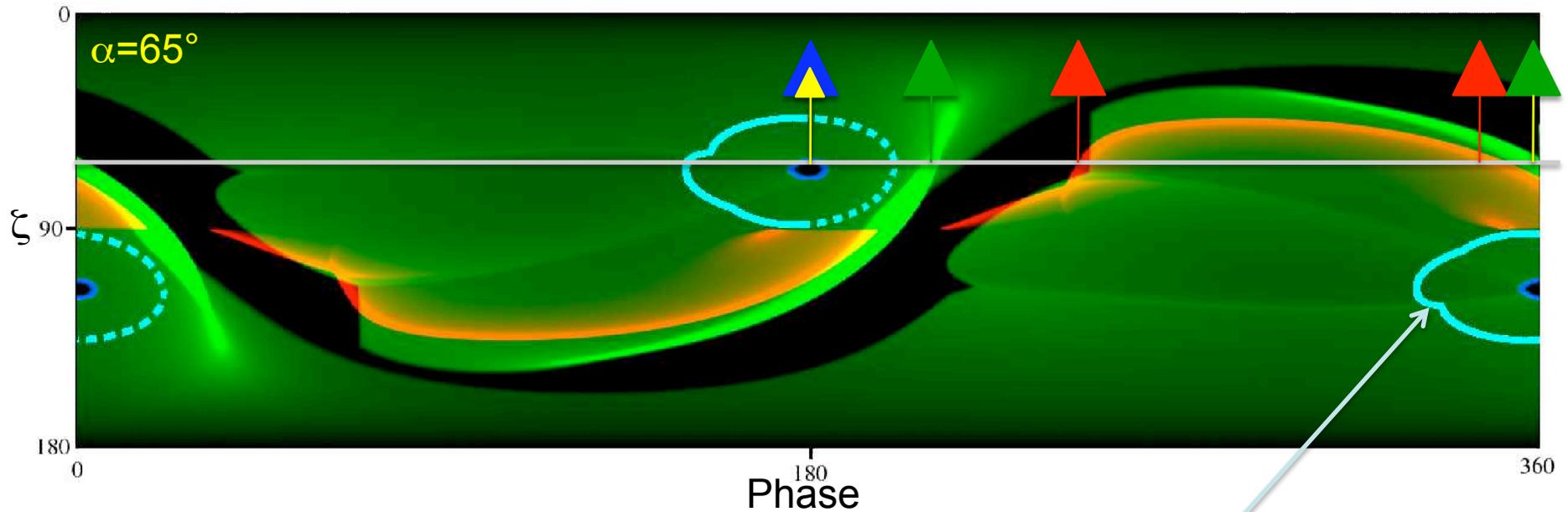
- Cette valeur est grande pour les pulsars connus (jusqu'à qqs %)
- Elle devient déraisonnable voire non physique ($\eta > 1$) dans certains cas!!! Il y a probablement quelque chose qui cloche...
- Cette valeur peut être comparée aux modèles de pulsars individuels et de populations
- D'où vient cette valeur? L_γ vient du flux intégral en énergie h en supposant une forme pour le faisceau.
 - Isotrope : $L_\gamma = 4\pi h d^2$ (d est la distance du pulsar)
 - Si on ne sait pas, on prend par tradition 1sr : $L_\gamma = h d^2$
 - 1sr correspond à un cône de demi-angle d'ouverture 32°
- Il est temps d'envisager de faire mieux...

Géométrie de la magnétosphère

- Vacuum Dipole
 - B inclined by α
 - Earth line-of-sight ζ
- Light Cylinder $R_{LC} = c/\Omega$
 - last closed field line
- Polar Cap $\theta_p = \sin^{-1}(\Omega R_e/c)^{1/2}$ (for $\alpha=0$)
 - open (wind) zone
 - closed (filled) zone
- Null Surface $B_z = 0$



Que voit-on selon le modèle?



Vert modèle TPC
Rouge Outer Gap
Bleu Polar Cap

Emission radio à haute altitude

Facteur de correction f_{Ω}

- L'observation du pulsar en multi longueur d'onde permet d'accéder aux paramètres géométriques:

- ξ à partir de l'observation des PWN associées en X
- α à partir de la polarisation ou de l'offset γ /radio
- La polarisation donne plutôt

$$\beta = \xi - \alpha$$

- On définit alors

$$L_{\gamma} = 4\pi f_{\Omega} h d^2$$

avec

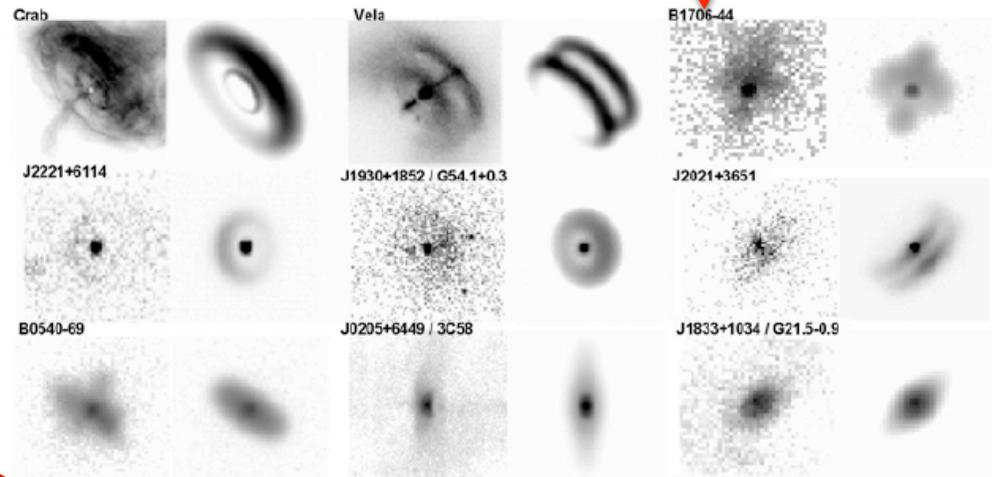
Flux d'énergie du pulsar

$$f_{\Omega}(\alpha, \xi_E) = \frac{\int H(\alpha; \xi, \phi) \sin(\xi) d\xi d\phi}{2 \int H(\alpha; \xi_E, \phi) d\phi}$$

Intégré sur tout le ciel

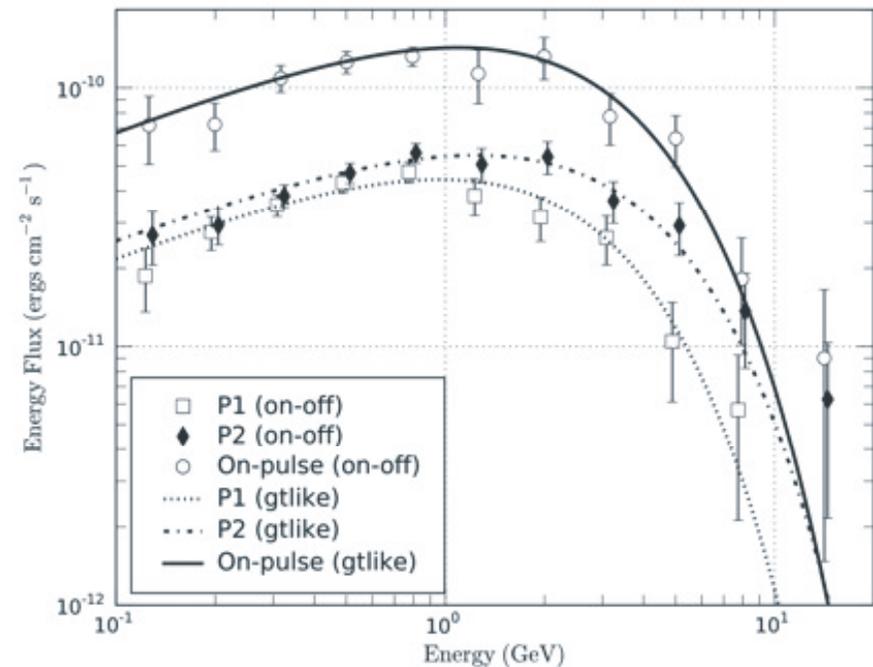
Seulement sur la valeur de ξ du pulsar

Facteur de correction du faisceau



Les pulsars de Fermi...

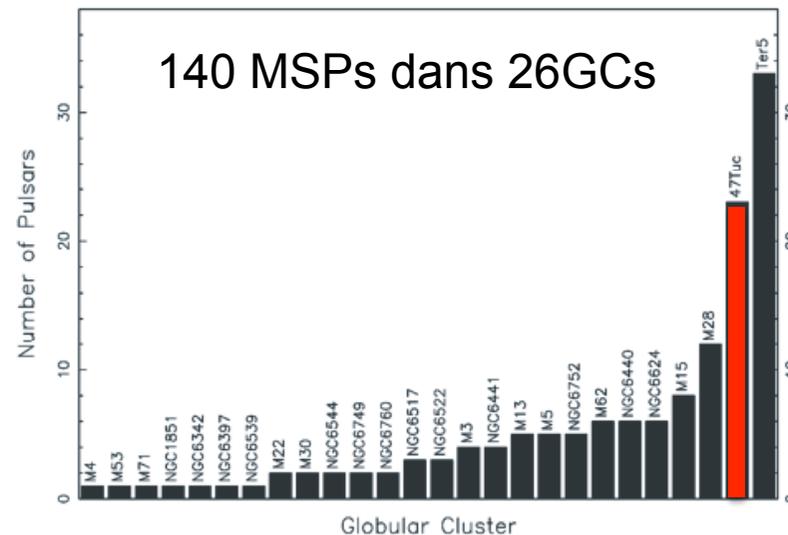
- Caractéristiques générales
 - Deux pics séparés par $\frac{1}{2}$ période
 - Mais pas toujours....
 - Le pic gamma est décalé par rapport au pic radio
 - Mais pas toujours...
 - Spectre en loi de puissance coupée par une simple exponentielle.
 - $E_{\text{cutoff}} = 1\sim 3\text{GeV}$
 - Les MSPs ressemblent aux pulsars jeunes
 - B_{LC} très similaire
 - Les modèles prédisant une accélération loin de l'étoile à neutrons semblent privilégiés (OG et SG)



Spectre de PSR J2021+3651

Des pulsars ailleurs?

- Pulsars dans les amas globulaires
 - Amas globulaire : densité élevée d'étoiles massives
 - Pépinière à pulsars
 - Les MSPs y sont surreprésentés



- 47 Tuc est détecté par Fermi comme une puissante source de γ .
- Le flux mesuré est consistant avec celui de ~ 50 MSPs.

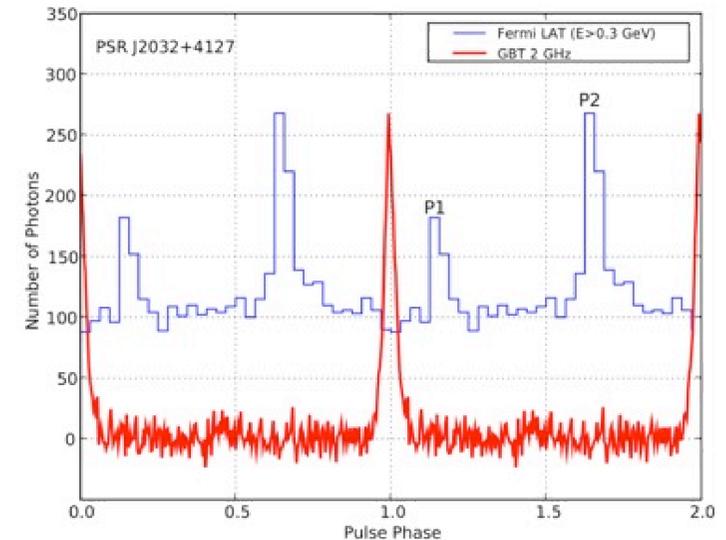
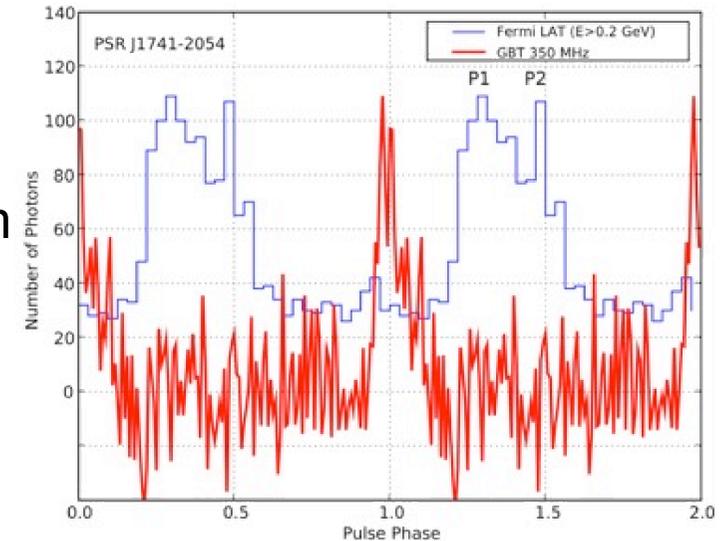
Fermi les cherche...

Pulsars γ ?

- Retour aux origines...
 - Recherche de contreparties radio des pulsars détectés en γ
 - Certain pulsars « attendus » ont été longuement étudiés en radio...
 - Limites sup très contraignantes sur CTA1, 3EG J1835+5918
 - Pour les autres, le Pulsar Search Consortium observe sur les plus grands radiotélescopes du monde
 - Que peut apporter l'observation radio?
 - Mesure de la distance à partir du DM
 - Information sur la zone d'émission
 - γ /radio offset
 - Géométrie par les études de polarisation
 - Etude de population Radio Quiet/Radio Loud pour contraindre les modèles

Pulsars γ ?

- PSR J1741-2054
 - Découverte d'une contrepartie radio dans les archives du Parkes Multibeam Survey
 - DM extrêmement faible, pulsar proche $D=400\text{pc}$
 - Peut-être le pulsar radio le moins lumineux de tous
- PSR J2032+4127
 - Pulsations découvertes avec le GBT
 - $DM=115$, soit $D=3,6\text{kpc}$...
 - Peut être la moitié? (Association avec Cyg OB2)



A suivre...

- Le PSC poursuit les recherches
 - de contreparties radio pour les pulsars γ découverts par le LAT
 - de contreparties γ pour des pulsars radio associées à des sources non identifiées du LAT.
- Les sources non identifiées ont pu être ratées à cause :
 - D'une faible fraction pulsée noyée dans le signal γ continu.
 - La source est un système binaire, les corrections appliquées ne permettent donc pas de construire correctement la courbe de lumière.
 - Le timing noise du pulsar est important ce qui rend la modélisation de la rotation du pulsar hasardeuse...
 - Le pulsar est un MSP, la recherche en aveugle est peu adaptée aux pulsars très rapides.

Venez jouer avec nous!!!

- Les données LAT sont publiques depuis le 19 Août 2009
 - Toutes les données de la première année (depuis Août 2008) sont téléchargeables sur le site du FSSC
<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc>
 - Les nouvelles données sont disponibles très peu de temps après leur acquisition.
 - Les codes d'analyse ainsi que les bases de données d'éphémérides sont aussi téléchargeables.
- Chacun est donc libre de venir jouer avec nous !!!!