



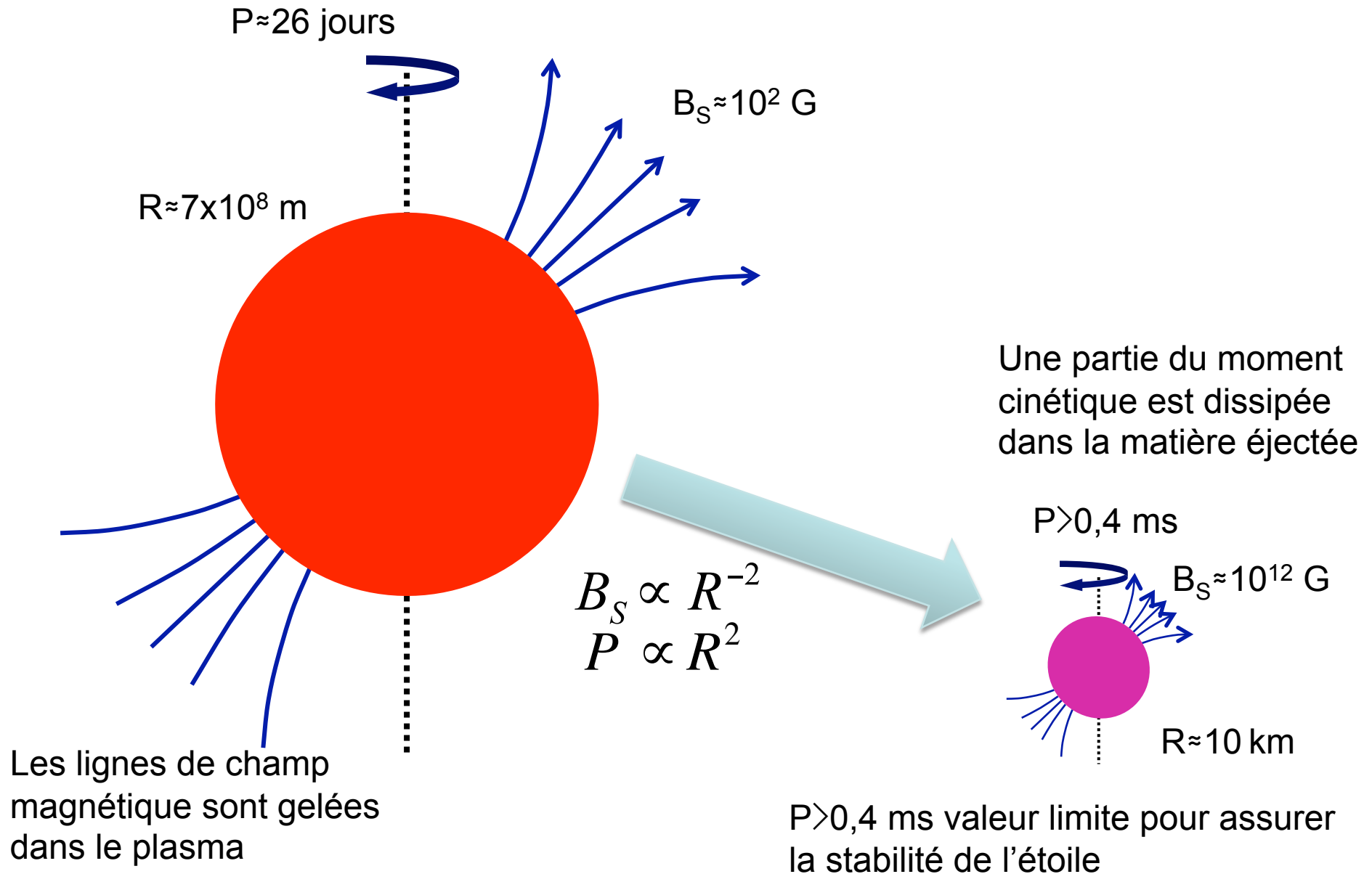
# Les Pulsars de Fermi

Denis Dumora, CENBG  
[dumora@cenbg.in2p3.fr](mailto:dumora@cenbg.in2p3.fr)

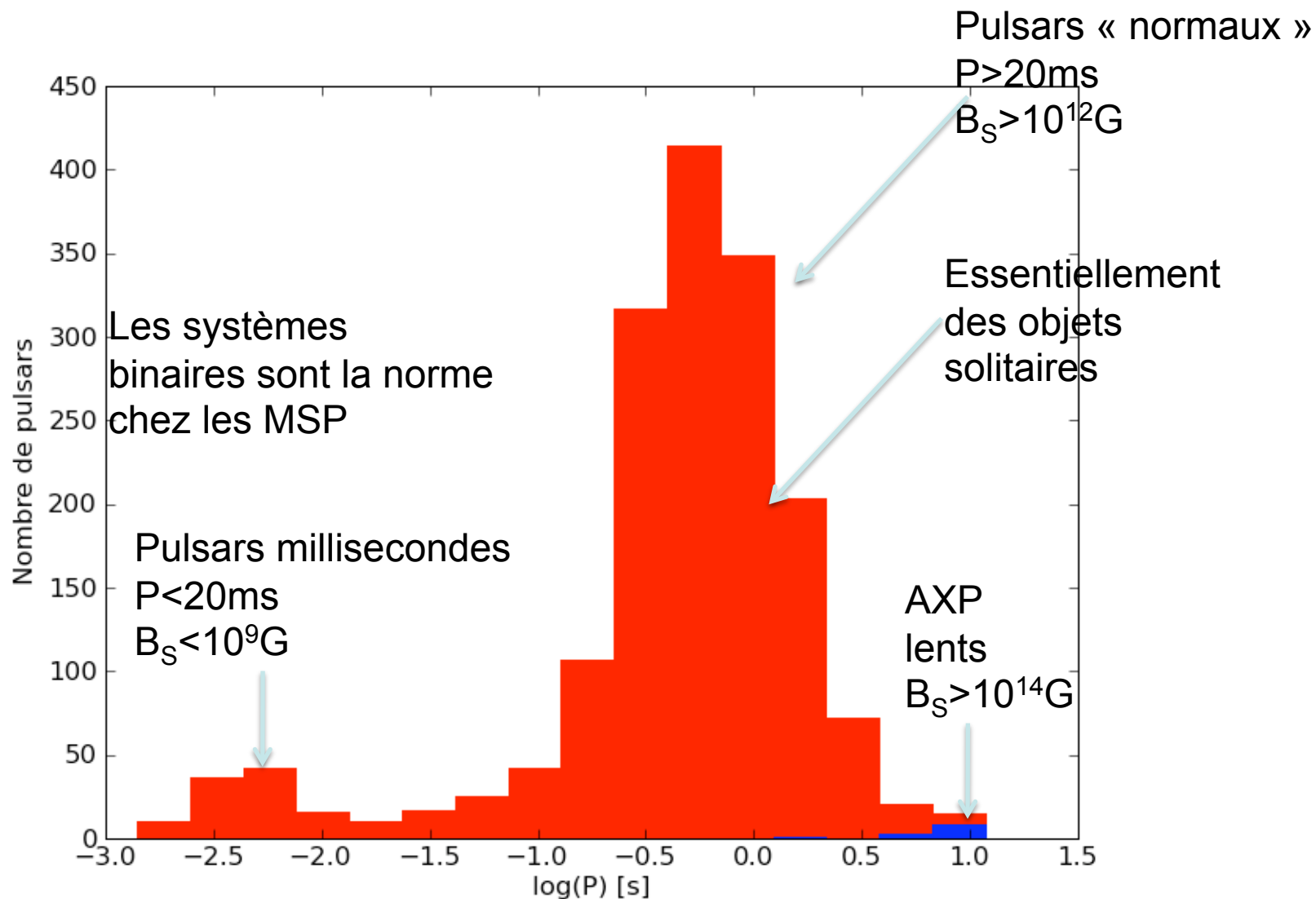
*Ecole de Physique des Astroparticules*

*(OHP 12 Septembre 2009)*

# Pulsars



## 2 populations principales



# Les pulsars freinent

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

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

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

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

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

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

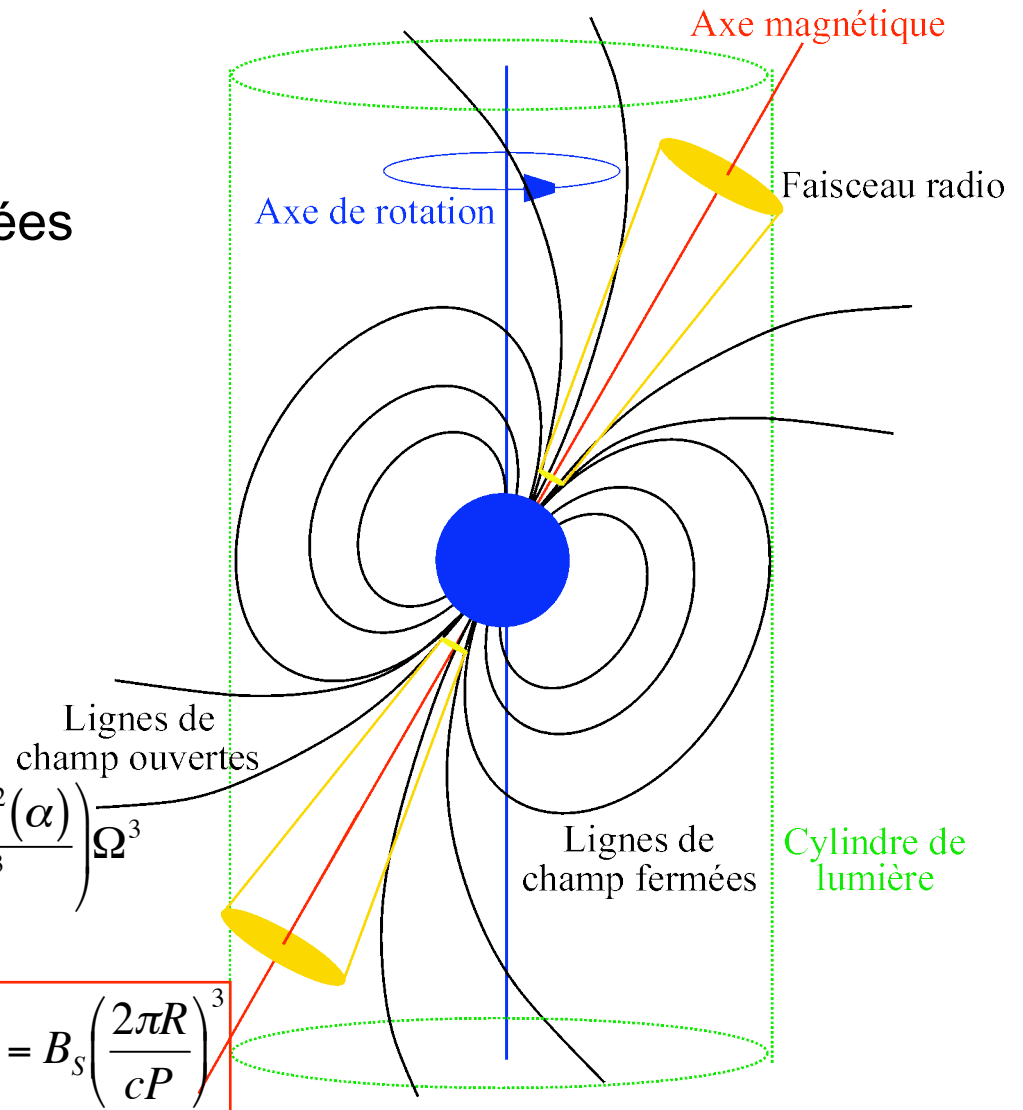
$$\dot{E} = -I \Omega \dot{\Omega} = \frac{2}{3c^3} \bar{\mu}^2 \Omega^4 \sin^2(\alpha)$$

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

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

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

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



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



# Où trouve-t-on les pulsars?

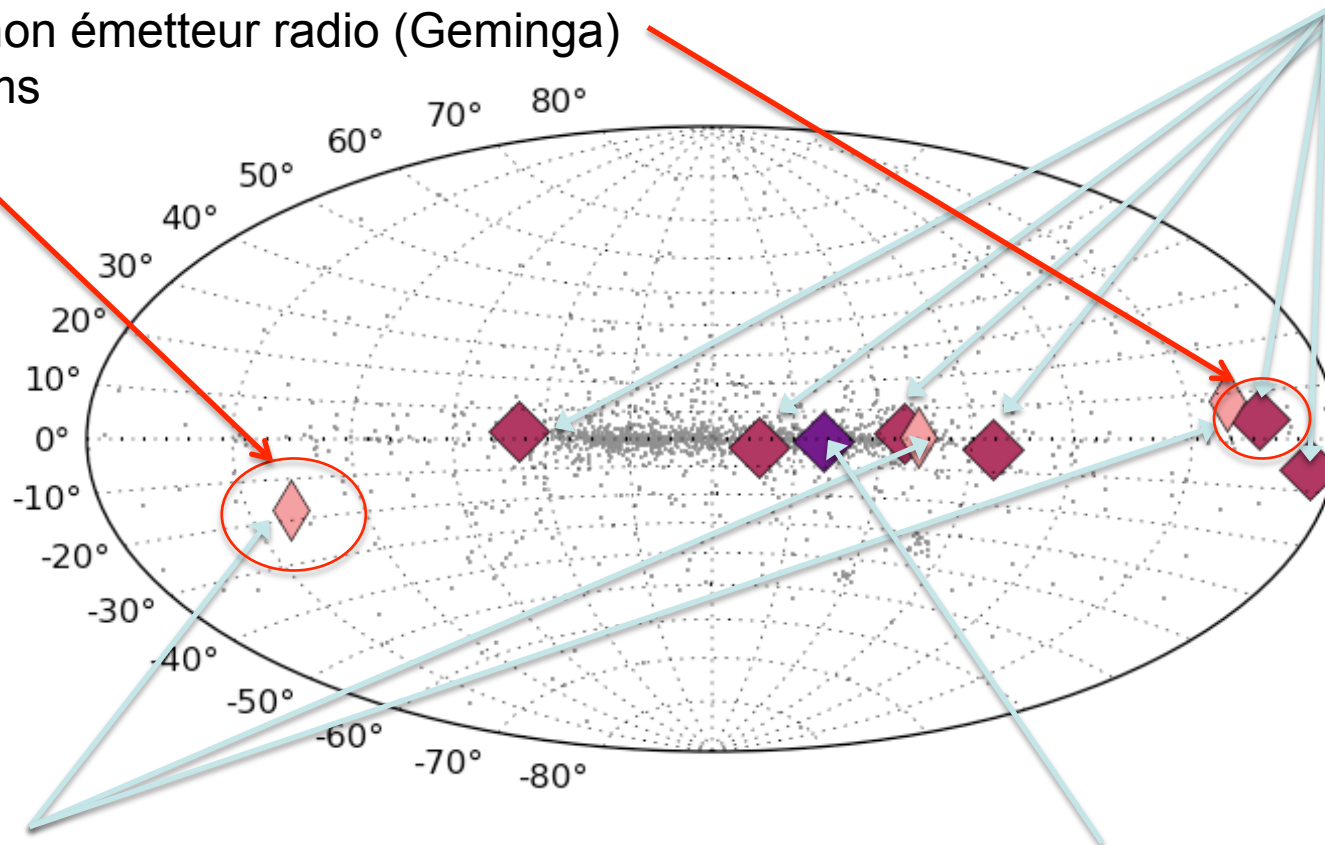
---

- 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

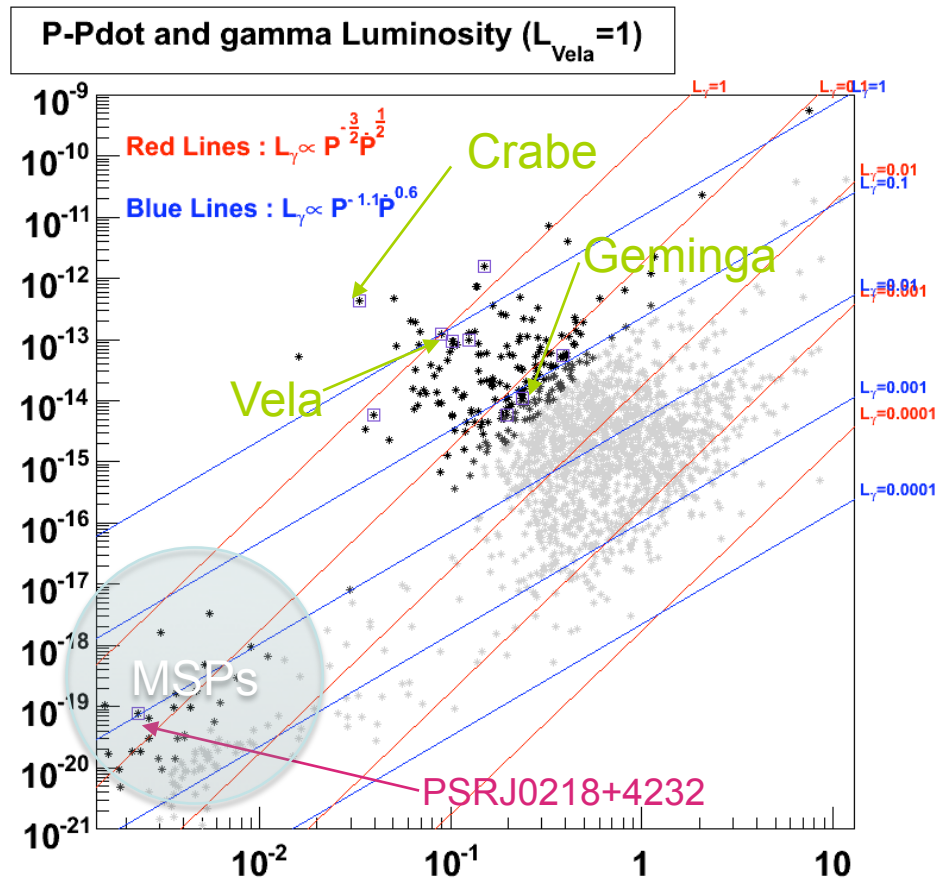


3 détections marginales EGRET

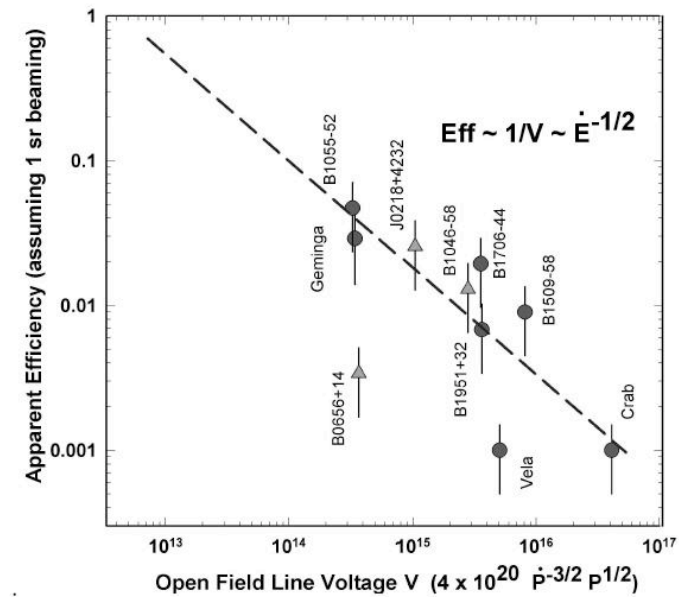
1 détection basse énergie COMPTEL

# Diagramme P-PDot

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

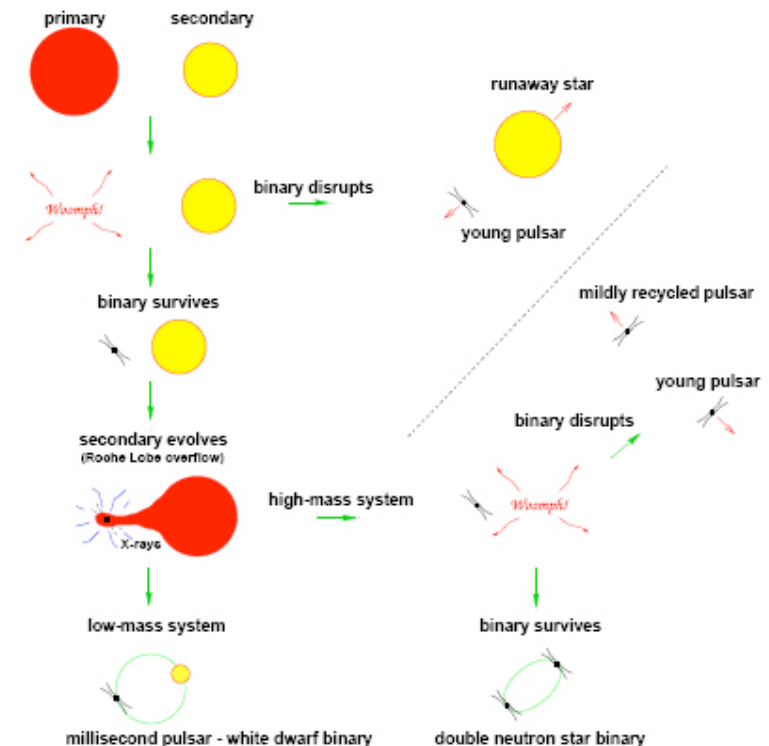
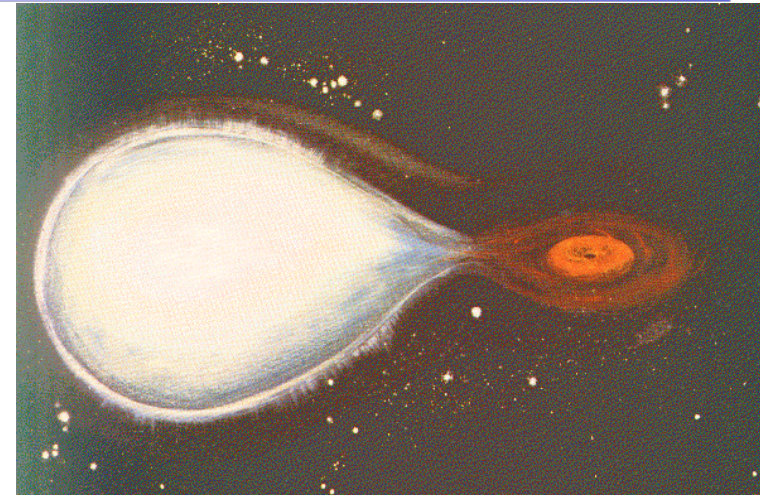


$$\Phi_\gamma \propto \frac{\sqrt{\dot{E}}}{d^2} \propto P^{-\frac{3}{2}} \dot{P}^{\frac{1}{2}}$$



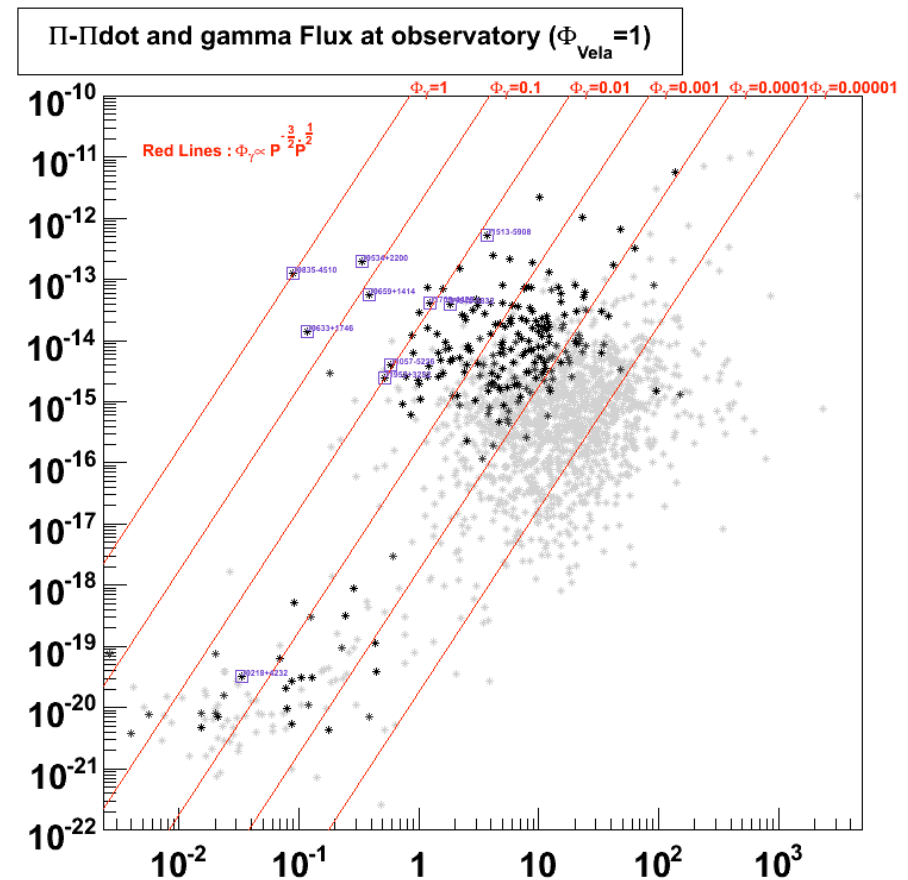
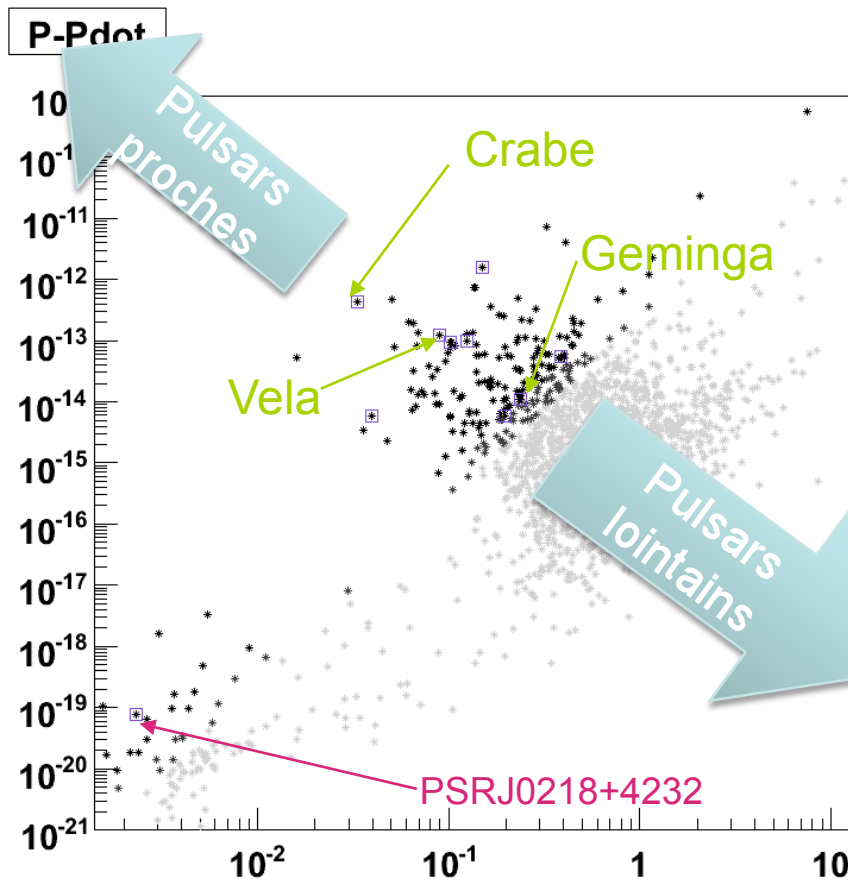
# Les MSPs

- 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



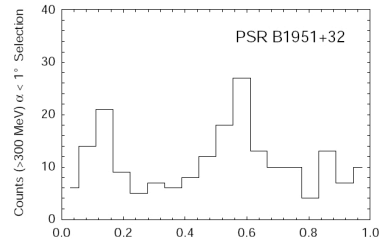
# Trier en flux

- Flux => Normalisation par la distance

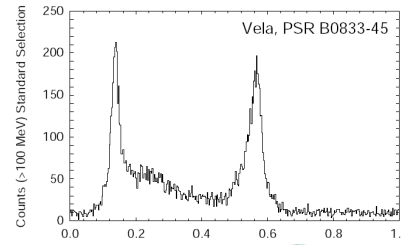


# Les pulsars EGRET

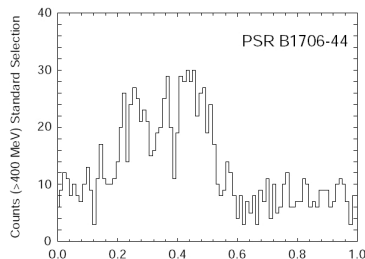
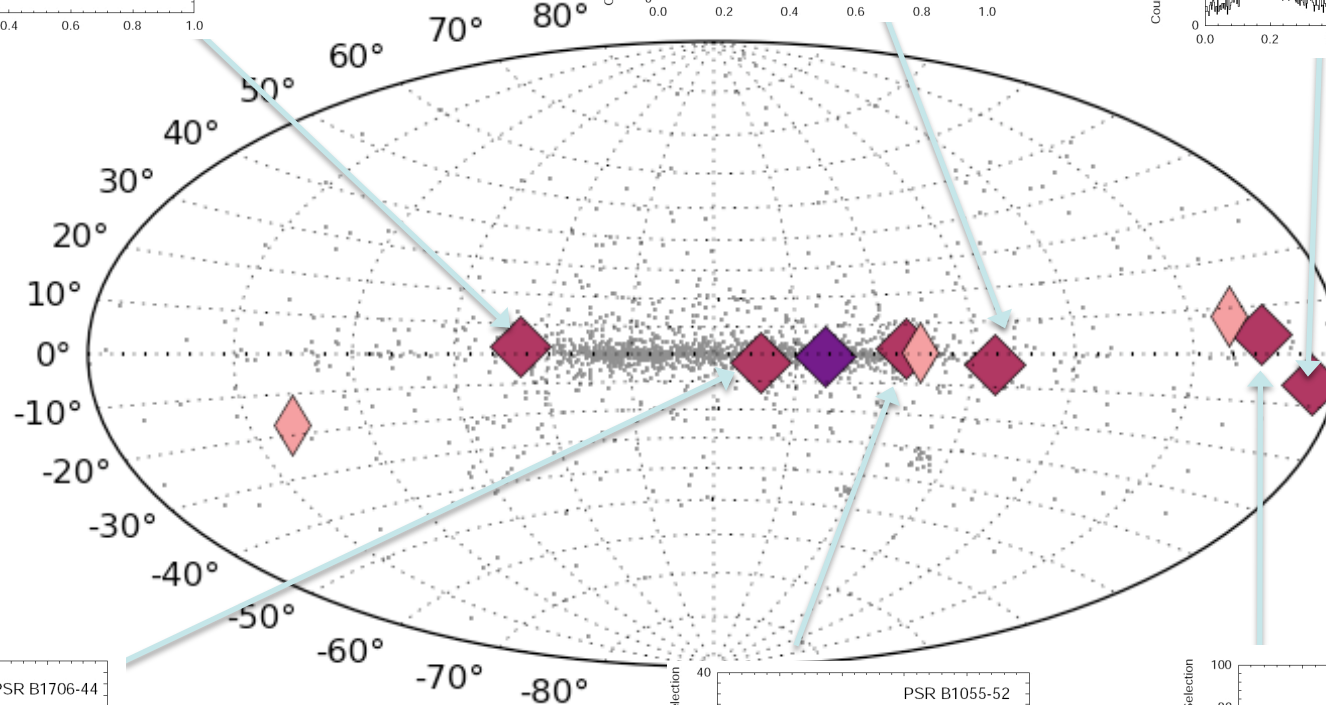
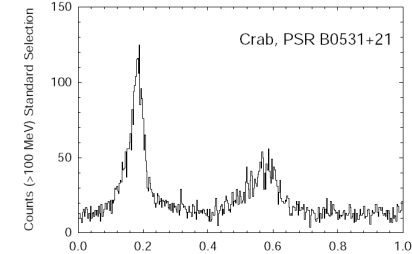
PSR B1951+32



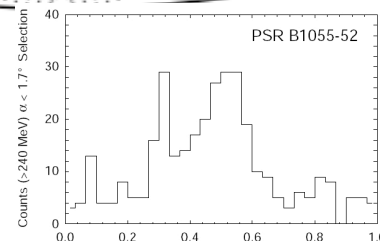
Vela



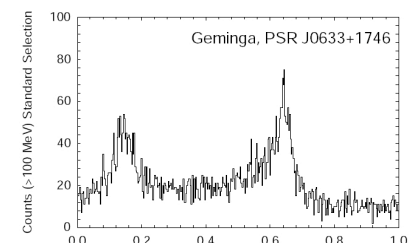
Crabe



PSR B1706-44



PSR B1055-52

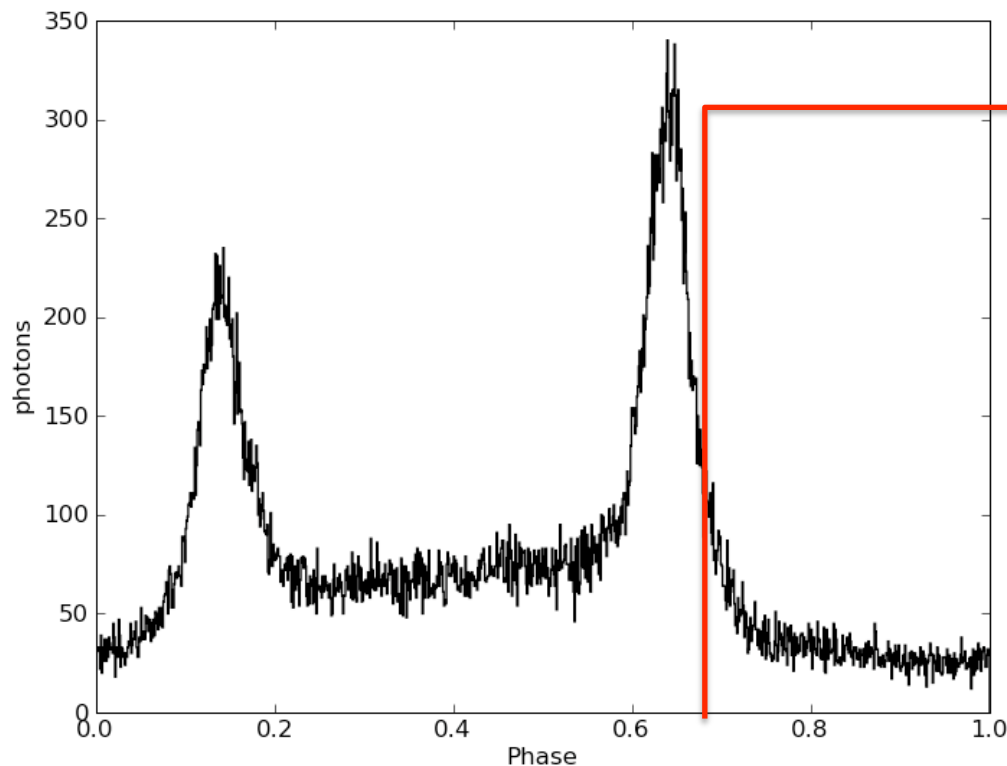


Geminga



# 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  $5\sigma$



# 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  $\gamma$  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

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

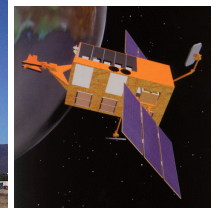
- Utilisation d'Ephémérides connus

- 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

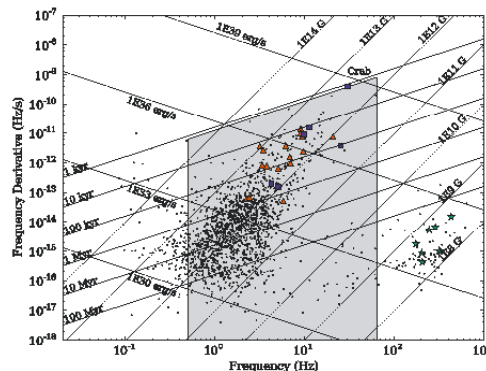
- Courbe de lumière

- Recherche aveugle

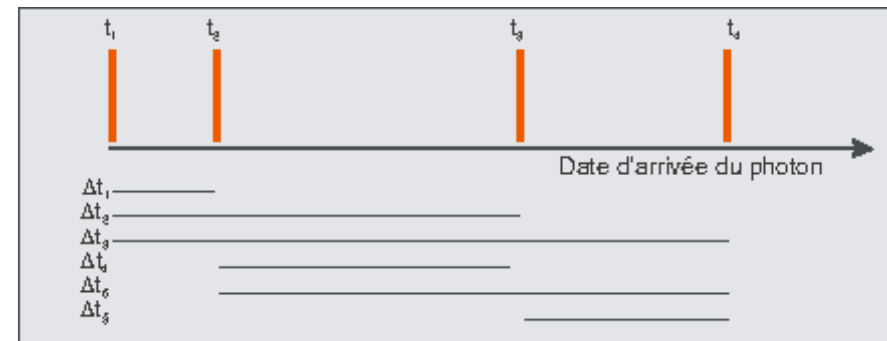
- Pulsars n'émettant pas en radio ou X
- Spécificité de Fermi : **statistique importante**
- Il est possible d'effectuer une recherche de périodicité en n'utilisant que les  $\gamma$

- 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

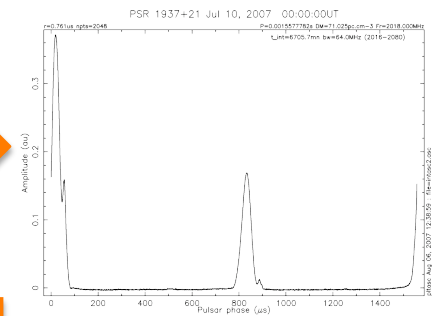
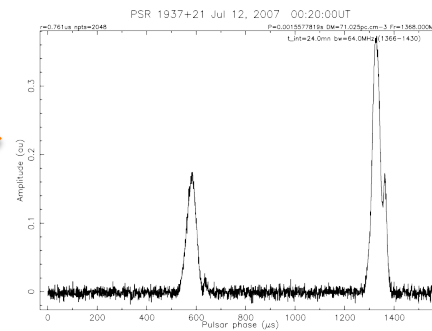


- Recherche aveugle sur une liste prédéterminée de 100 position de SNR, PWN, ... + Les sources des premières versions du catalogue LAT

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

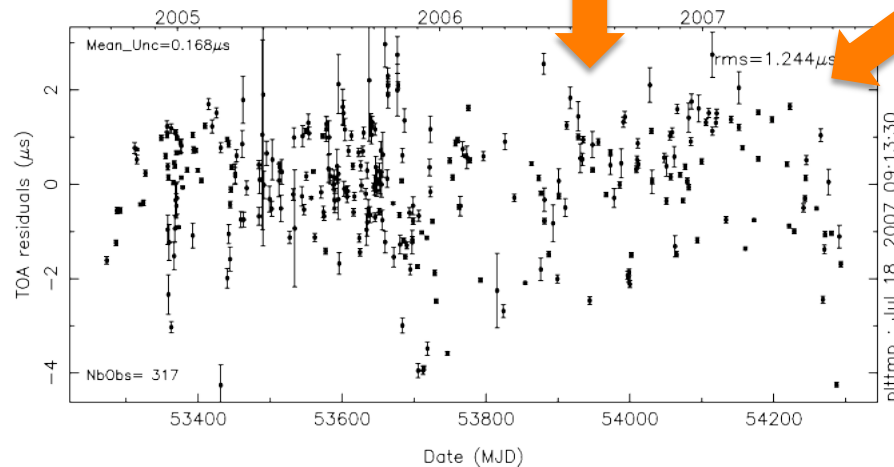
# Paramètres rotationnels

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
  
```

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

Ephéméride

- Paramètres Astrométriques
- Paramètres rotationnels

# Barycentrisation



Phase au BSS

Phase sur Terre



BSS\*



Pulsar

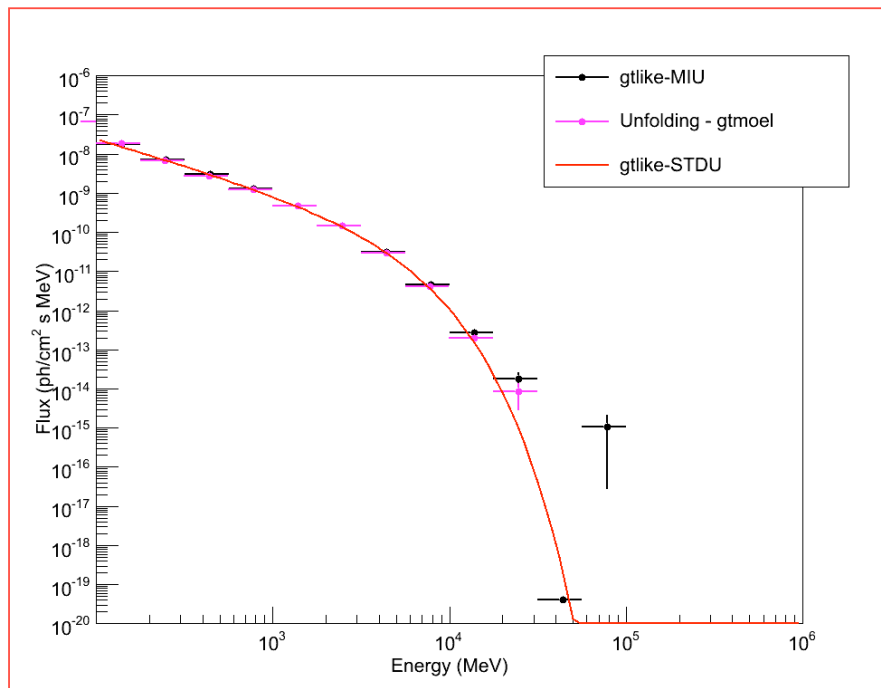


- Datation locale
  - Pas l'endroit le plus simple pour calculer les phases...
- Le barycentre du système solaire (BSS) est un meilleur endroit pour calculer les TOAs.

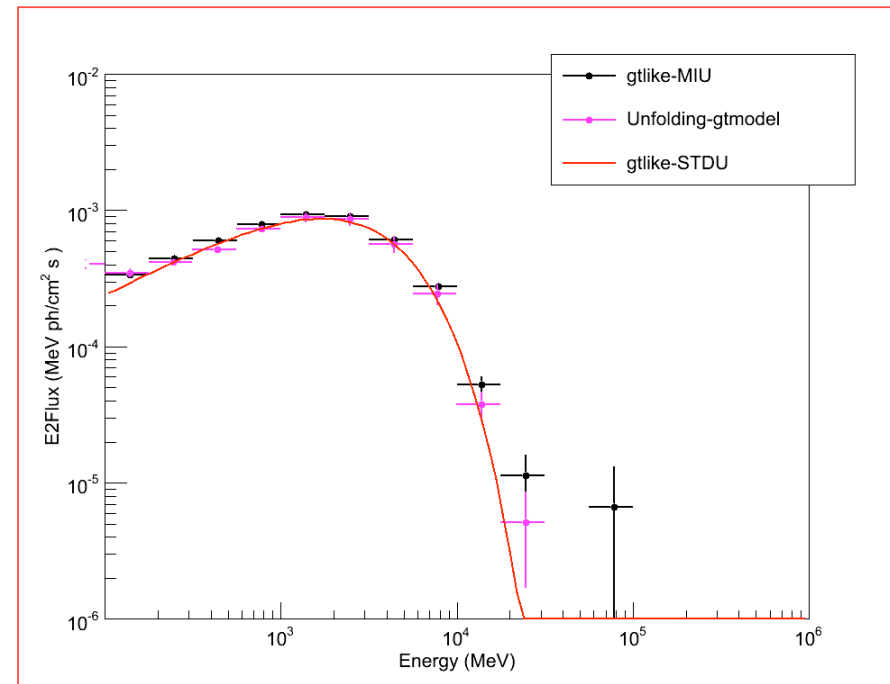
Illustration 2D, seuls les effets géométriques sont pris en compte  
Les effets relativistes ne sont pas montrés.

# Données Observationnelles

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



Flux en photons.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.MeV<sup>-1</sup>

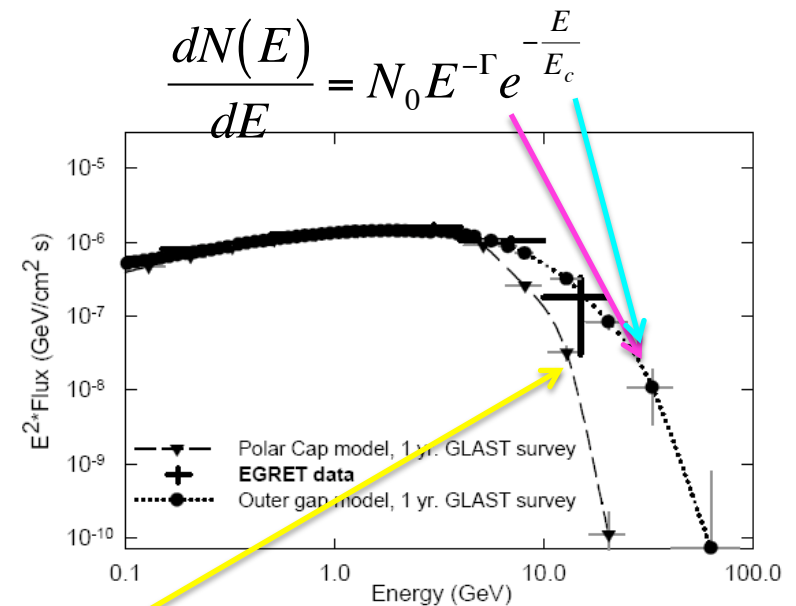
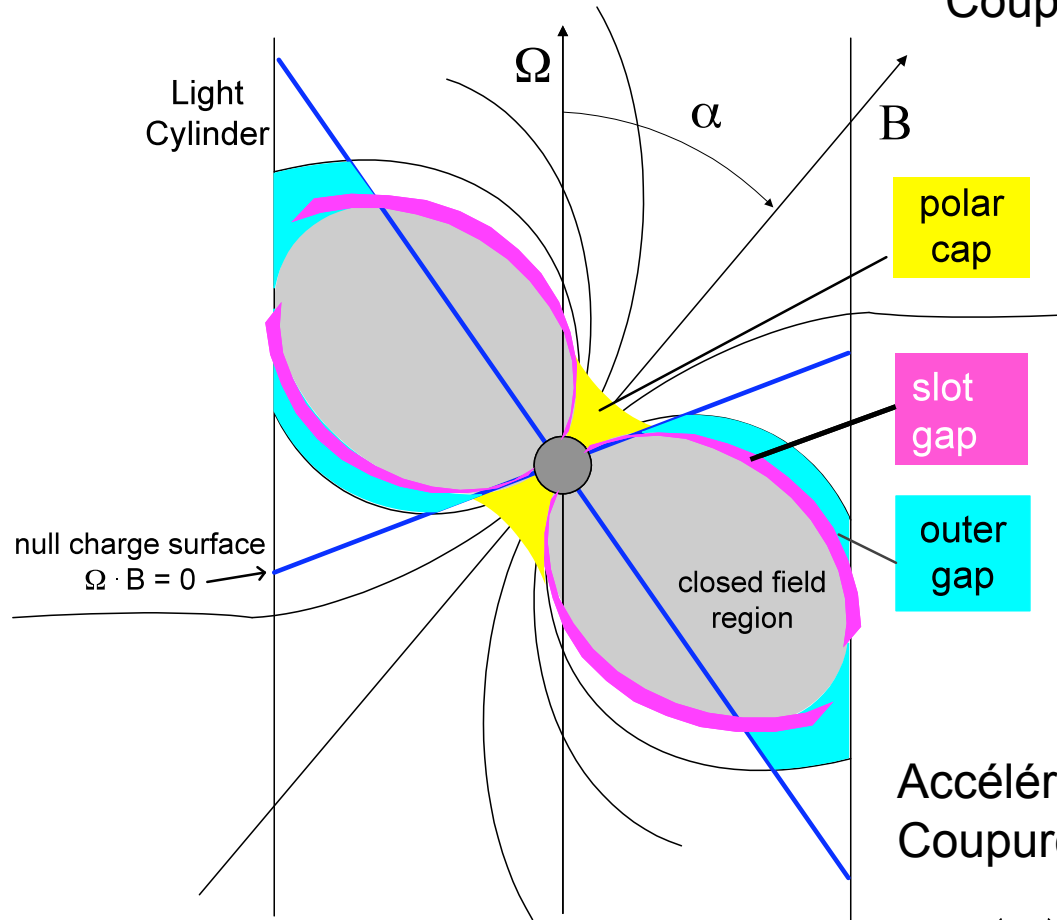


E<sup>2</sup>xFlux en MeV.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>



# Spectres & Modèles d'émission $\gamma$

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

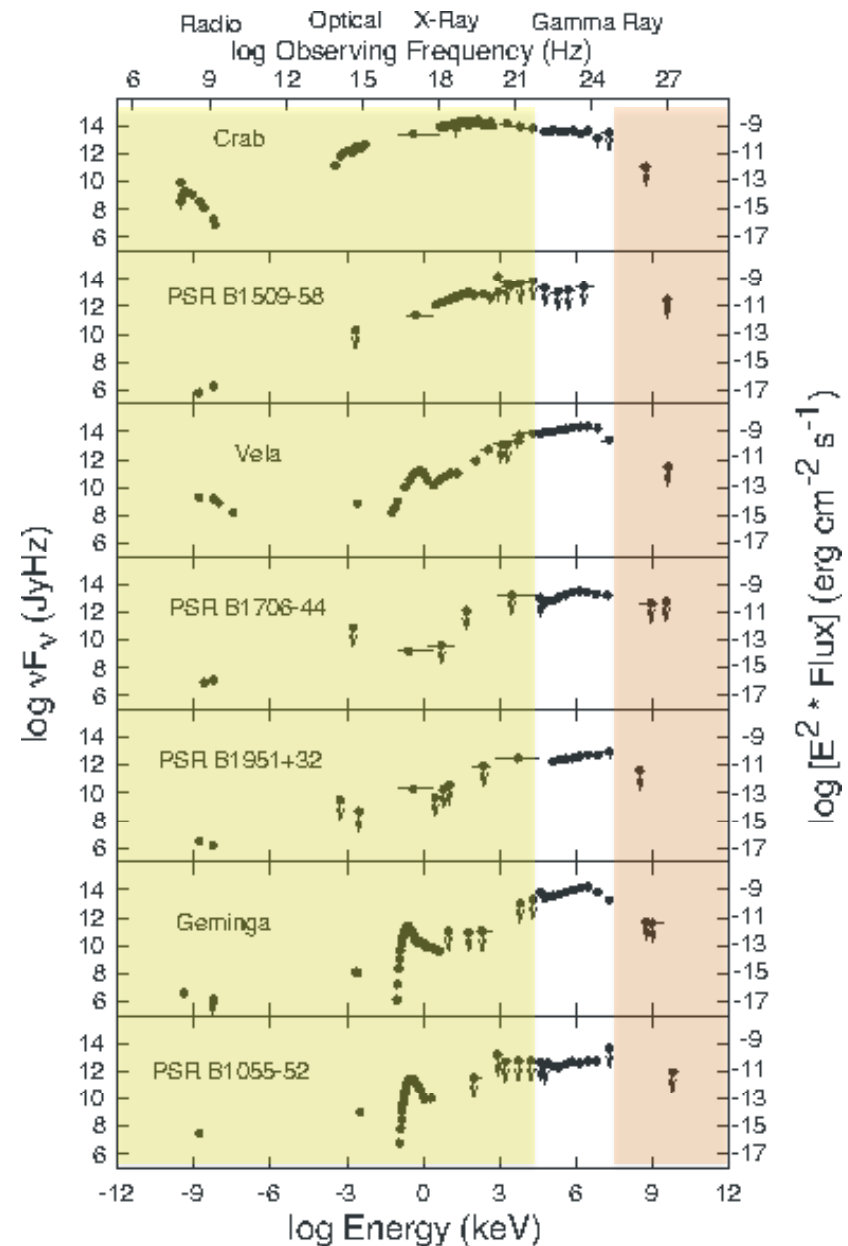


Accélération près de l'étoile (Polar Cap)  
 Coupure super exponentielle

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

# Spectre des pulsars d'EGRET

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



# Questions ouvertes

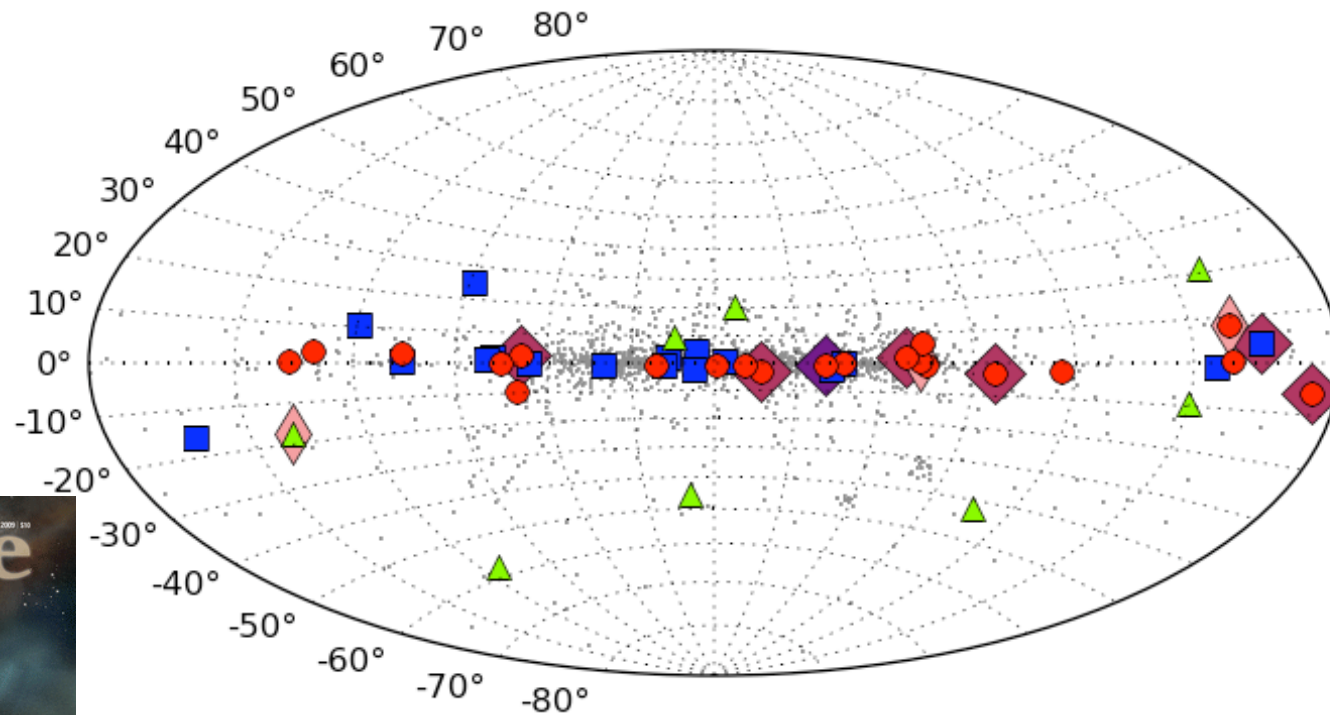
---

- 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?

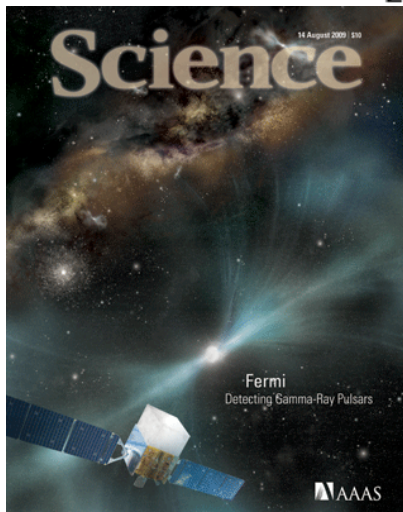
# Les Pulsars de Fermi

8 pulsars milliseconde

16 pulsars gamma découverts



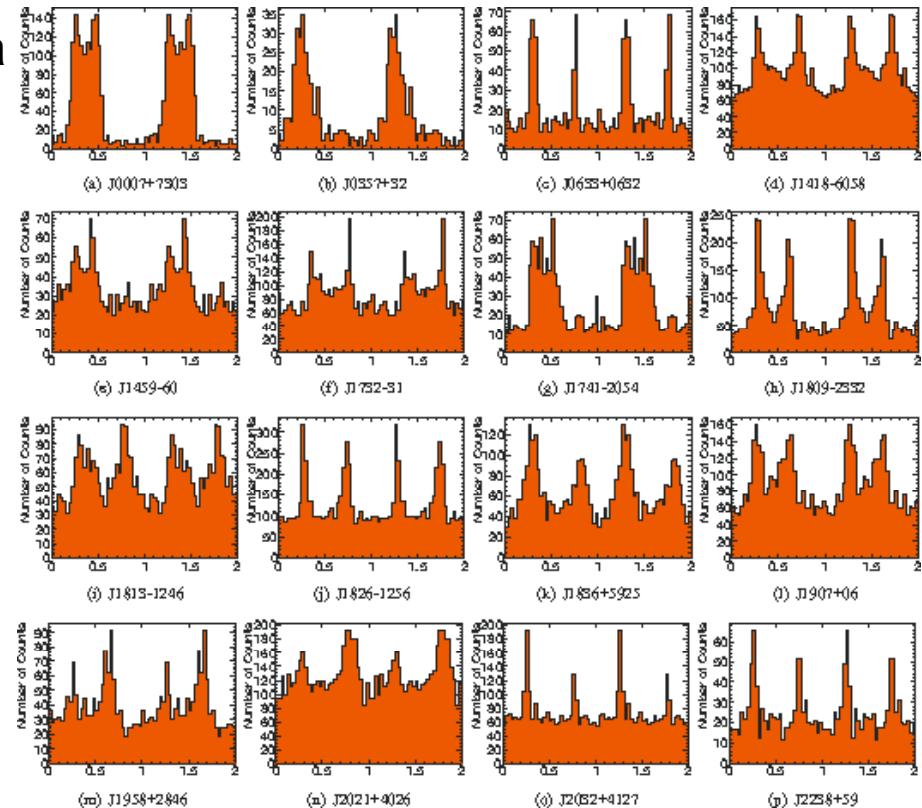
22 pulsars normaux connus en Radio



# 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

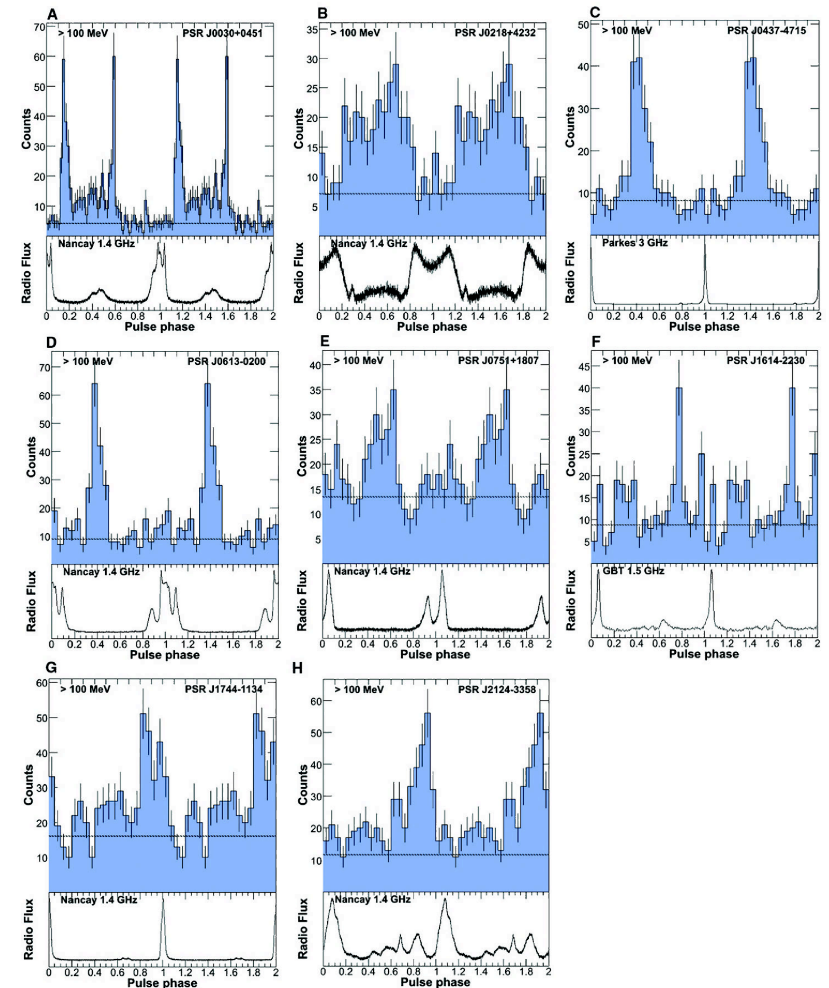
$$5 \times 10^{33} < \dot{E} < 6 \times 10^{36} \text{ erg.s}^{-1}$$



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

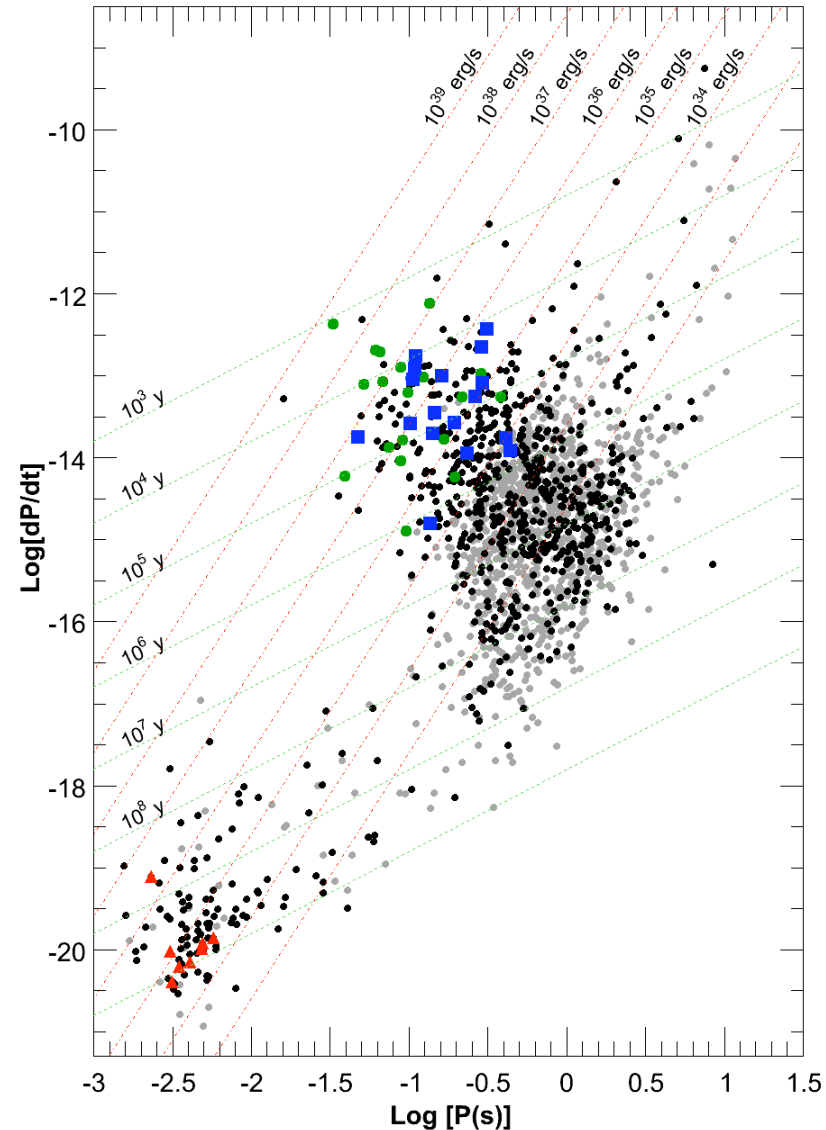
# Pulsars ms

- **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

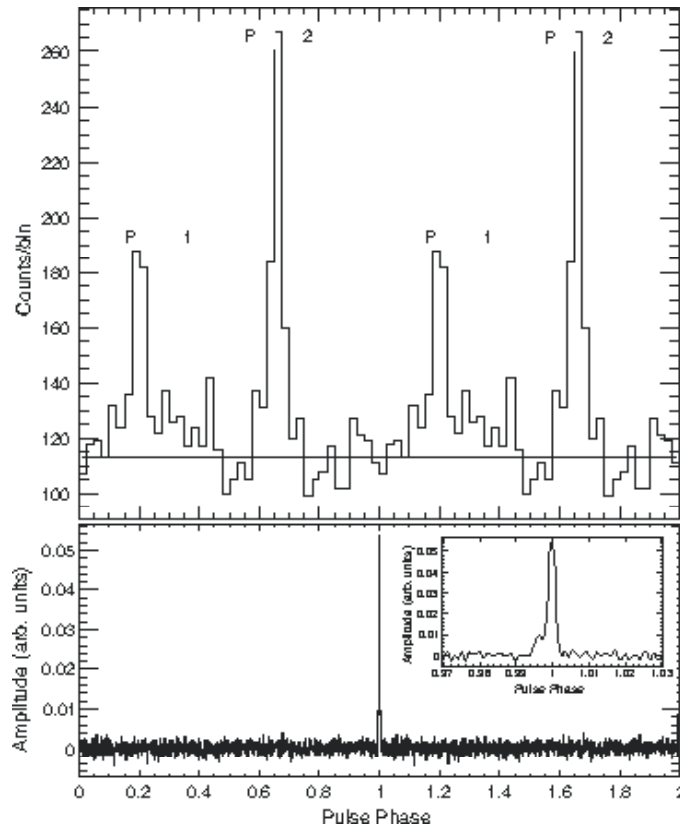
- 46 pulsars
  - 16 découverts par Fermi
  - 6 pulsars EGRET
  - 16 autres pulsars radio
  - 8 MSP





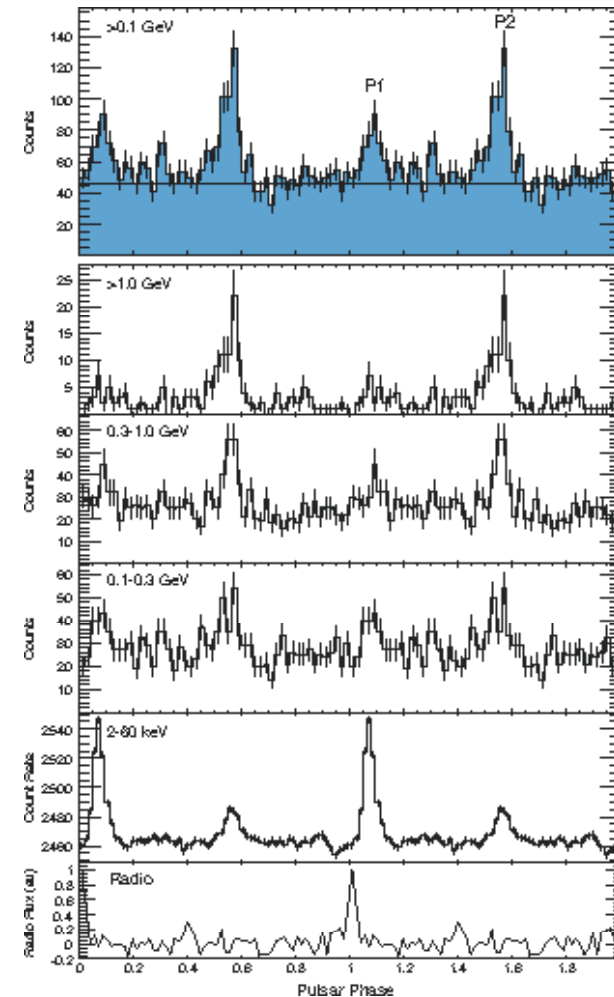
# Etudes multi $\lambda$

- 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 $\lambda$ pour quoi faire?

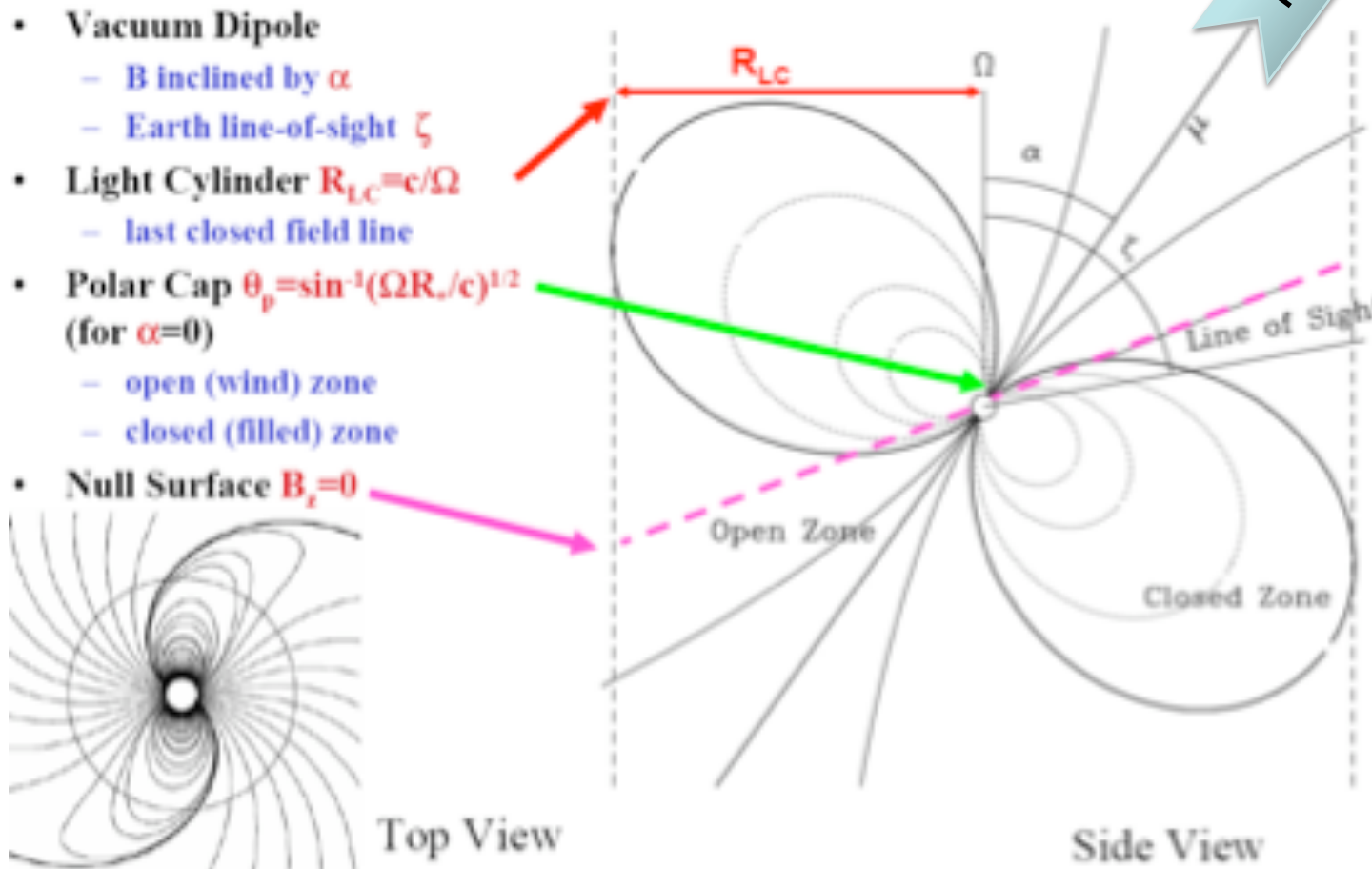
- Le paradigme des 1sr.

- valeur canonique de la fraction de l'énergie de freinage rayonnée

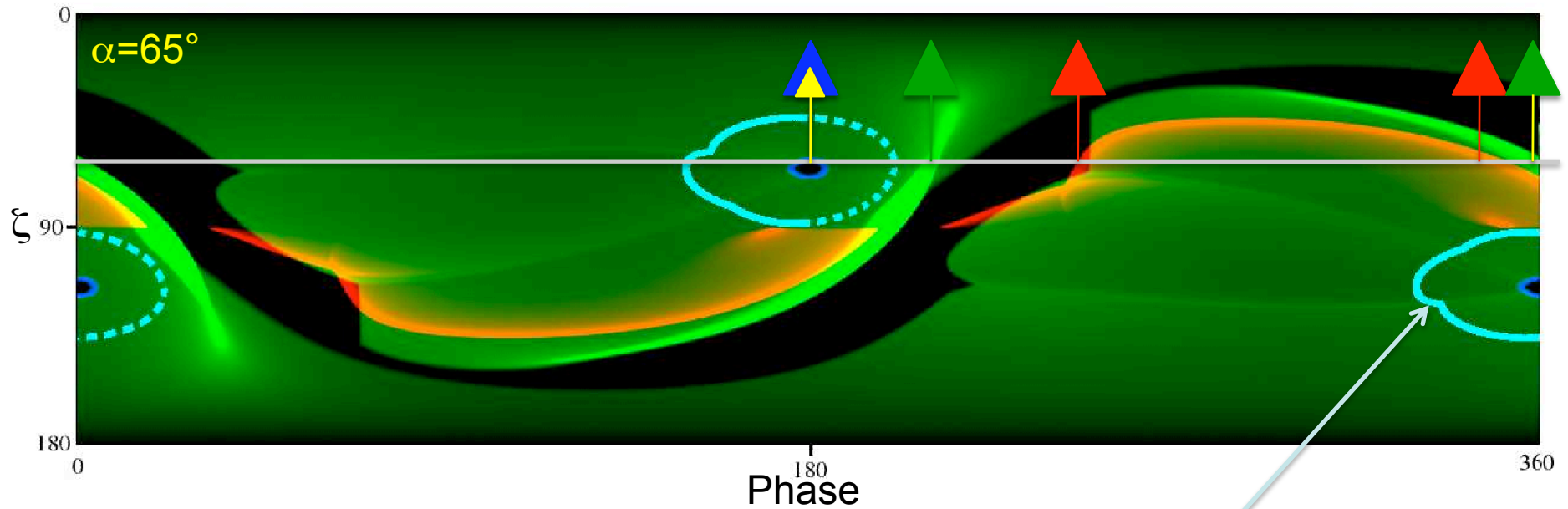
$$\eta = \frac{L_\gamma}{\dot{E}}$$

- 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?  $L_\gamma$  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  $32^\circ$
- Il est temps d'envisager de faire mieux...

# Géométrie de la magnétosphère



# Que voit-on selon le modèle?



Vert modèle TPC  
Rouge Outer Gap  
Bleu Polar Cap

Emission radio à haute altitude

# Facteur de correction $f_{\Omega}$

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

- $\xi$  à partir de l'observation des PWN associées en X
- $\alpha$  à partir de la polarisation ou de l'offset  $\gamma$ /radio
- La polarisation donne plutôt

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

- On définit alors

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

avec

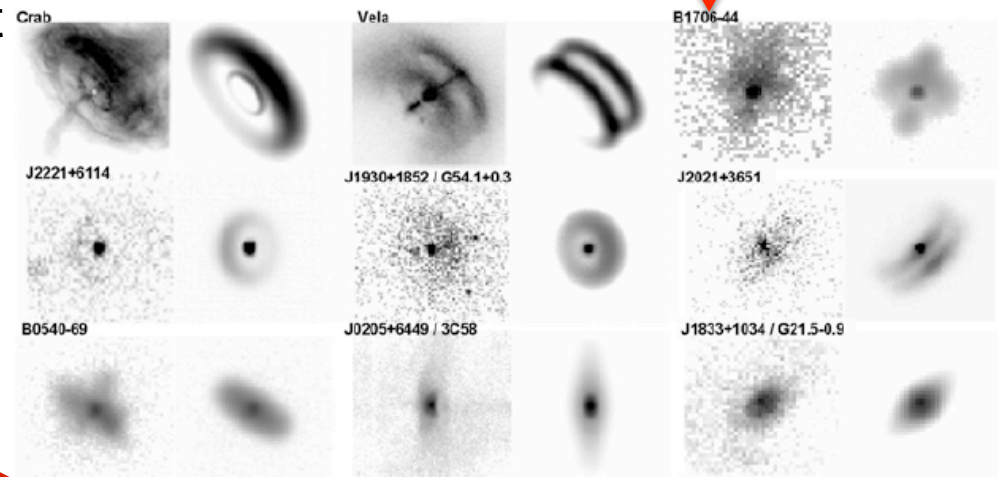
Flux d'énergie du pulsar

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

Intégré sur tout le ciel

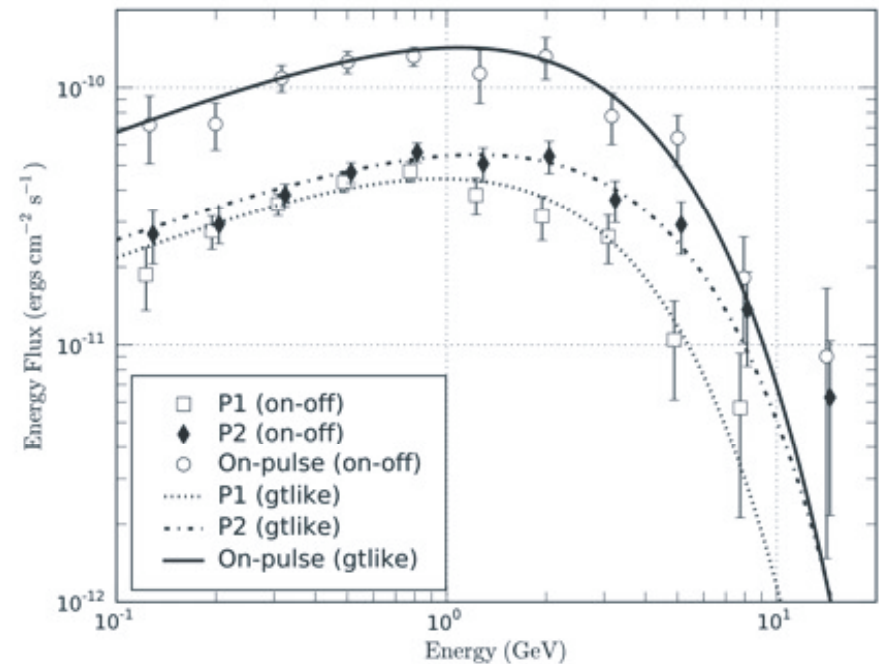
Seulement sur la valeur de  $\xi$  du pulsar

Facteur de correction du faisceau



# Les pulsars de Fermi...

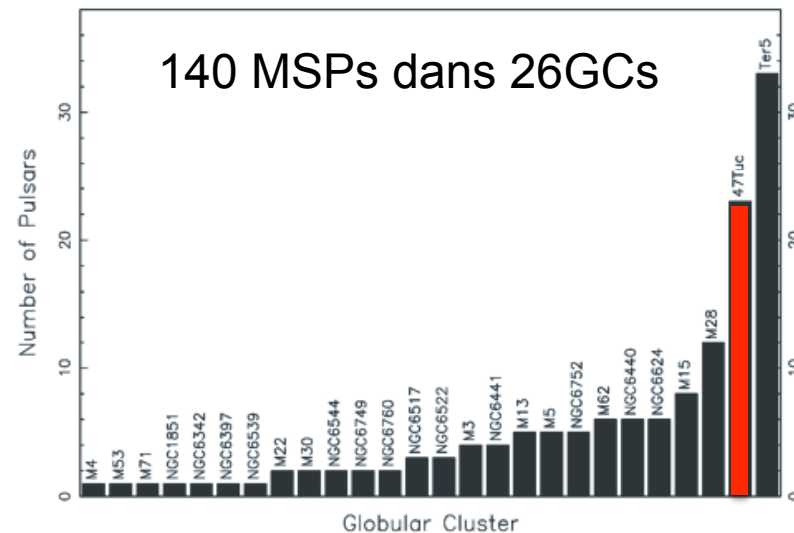
- Caractéristiques générales
  - Deux pics séparés par  $\frac{1}{2}$  période
    - Mais pas toujours....
  - Le pic gamma est décalé par rapport au pic radio
    - Mais pas toujours...
  - Spectre en loi de puissance coupée par une simple exponentielle.
 
$$E_{\text{cutoff}} = 1\sim 3\text{GeV}$$
  - Les MSPs ressemblent aux pulsars jeunes
    - $B_{\text{LC}}$  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 surreprésentées



- 47 Tuc est détecté par Fermi comme une puissante source de  $\gamma$ .
- Le flux mesuré est consistant avec celui de  $\sim 50$  MSPs.

Fermi les cherche...

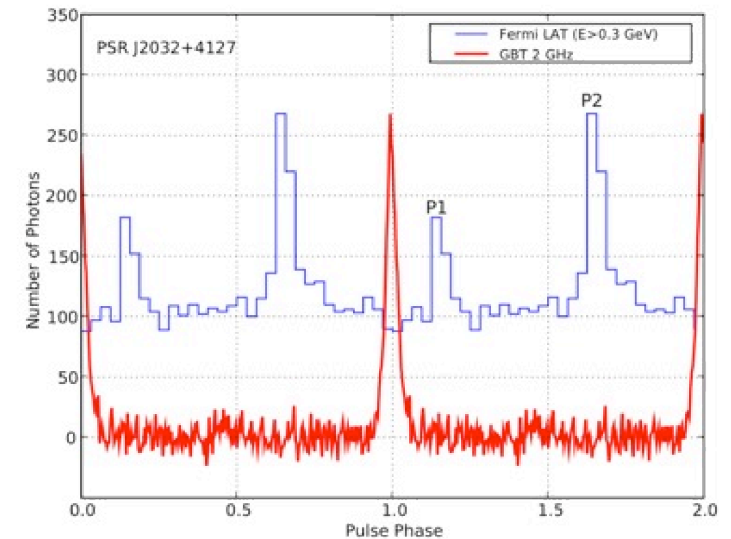
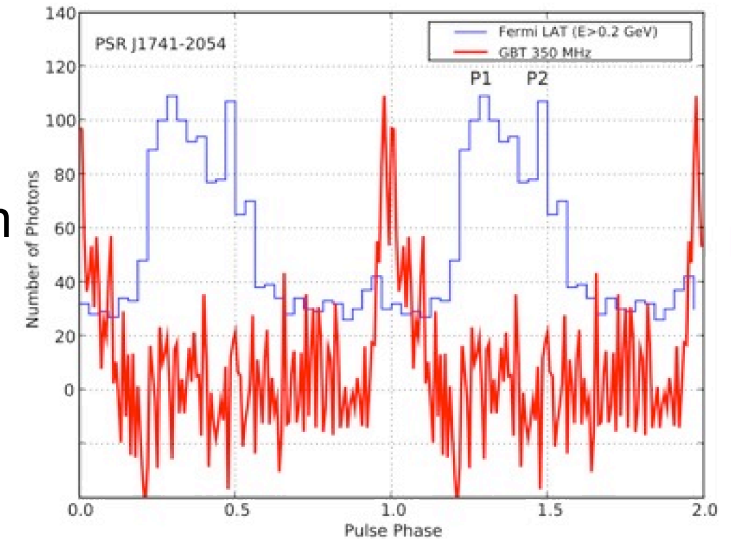


# Pulsars $\gamma$ ?

- Retour aux origines...
  - Recherche de contreparties radio des pulsars détectés en  $\gamma$  ....
  - 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  
 $\gamma$ /radio offset
    - Géométrie par les études de polarisation
    - Etude de population Radio Quiet/Radio Loud pour contraindre les modèles

# Pulsars $\gamma$ ?

- 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  $\gamma$  découverts par le LAT
  - de contreparties  $\gamma$  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  $\gamma$  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 !!!!