

Accélération de particules auprès d'étoiles à neutrons et premières observations avec le satellite *Fermi*

Marie-Hélène Grondin

Doctorante en 3^{ème} année

sous la direction de

M. Lemoine-Goumard et D. Smith

CENBG

Plan

- Les pulsars et leurs nébuleuses
- Le satellite *Fermi*
- Mon travail de thèse : étude des nébuleuses de pulsars avec *Fermi*
 - Etude de la nébuleuse du Crabe
 - Caractérisation de l'extension de sources
 - Catalogues de nébuleuses
- Conclusions et perspectives

Qu'est-ce qu'un pulsar?

Les pulsars sont des « **étoiles à neutrons, hautement magnétisées, en rotation rapide** ».

- Etoile à neutrons et vestige de supernova sont les résidus de l'explosion en supernova gravitationnelle

- Objet très dense :

- $M \sim 1.4 M_{\text{sol}}$

- $R \sim 10 \text{ km}$

- densité $\sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$



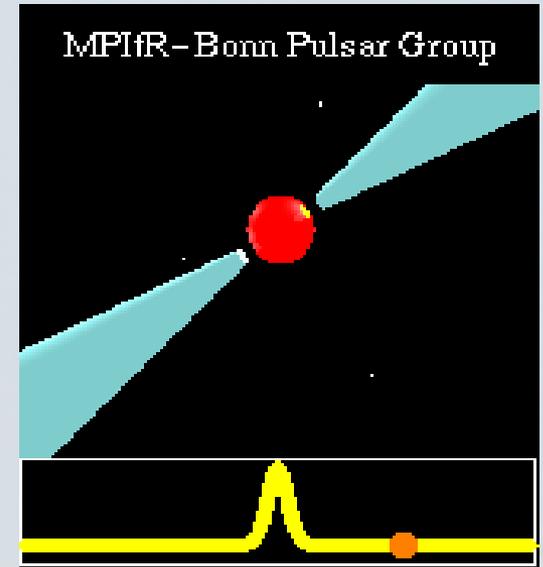
- Pulsars découverts en novembre 1967 : détection d'un signal de $P=1.337 \text{ s}$ en radio. Aujourd'hui : 1800 pulsars connus en radio, 50 en X, 6 en optique, et 7 en gamma (avant le lancement de *Fermi*)

Emission périodique d'un pulsar

Emploi d'**éphémérides** (jeu de données contenant la position du pulsar, la fréquence ou période de rotation et ses dérivées, ...) :

- radio ou X pour les pulsars connus
- obtenues par recherche à l'aveugle pour les pulsars non connus

→ calcul pour chaque photon détecté d'une **phase**, correspondant à une fraction dans la rotation du pulsar.

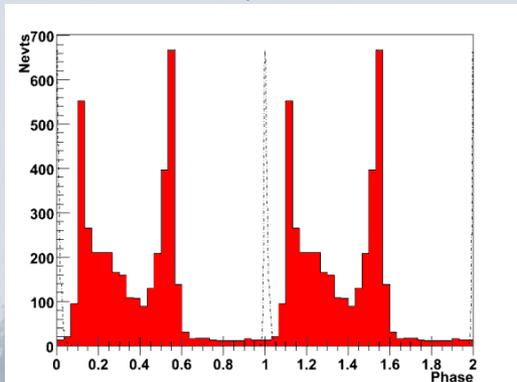


On « empile » ensuite les photons en fonction de leur phase pour obtenir un **phasogramme**.

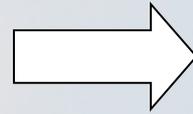
Pourquoi étudier les pulsars avec Fermi?

Informations obtenues par les observations :

- Nombre de pics
- Séparation des pics
- Décalage aux différents λ
- Forme du spectre en énergie

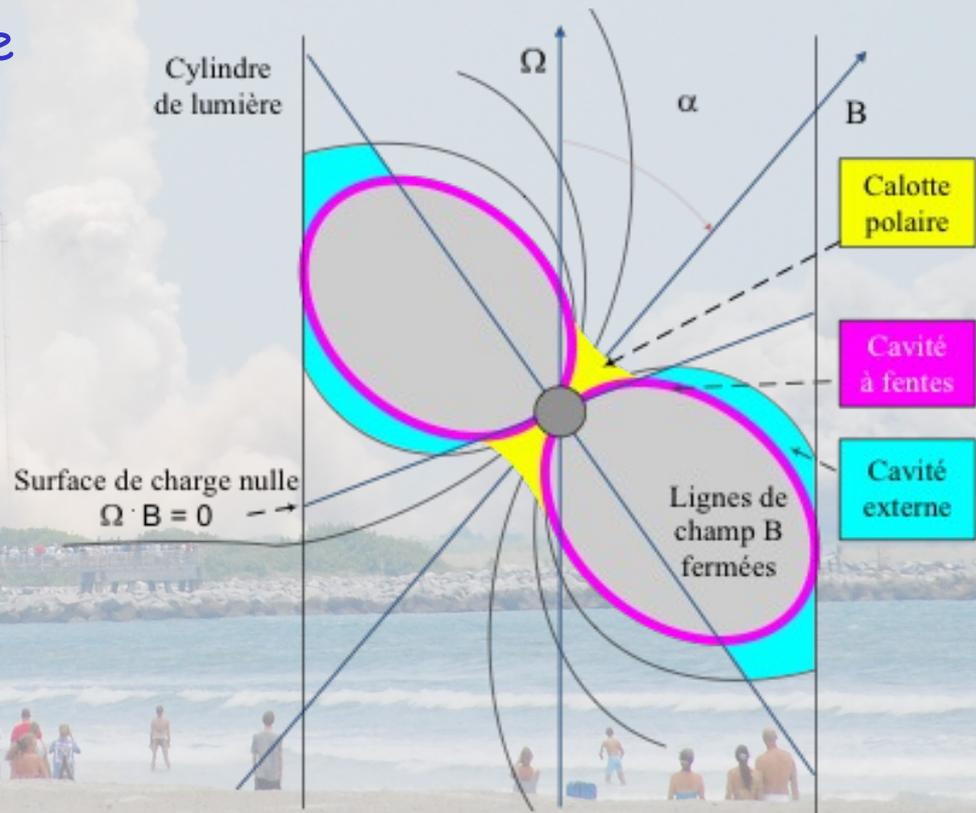


L'observation des pulsars avec Fermi permettrait de connaître la géométrie de l'émission γ .



Déductions :

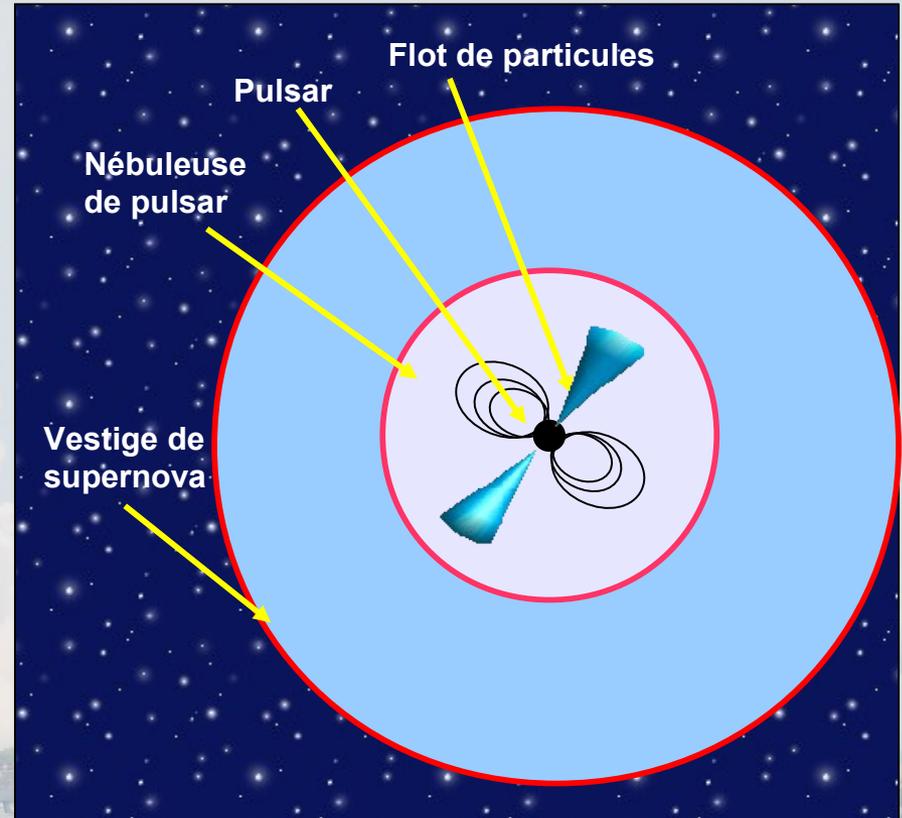
- Inclinaison du pulsar α
- Angle de visée
- Zone d'émission γ



Qu'est-ce qu'une nébuleuse de pulsar?

Après l'explosion en supernova, le pulsar émet un vent de particules chargées (e^\pm) à des vitesses très importantes.

Une **onde de choc** se forme à proximité du pulsar, zone **d'accélération des particules**.

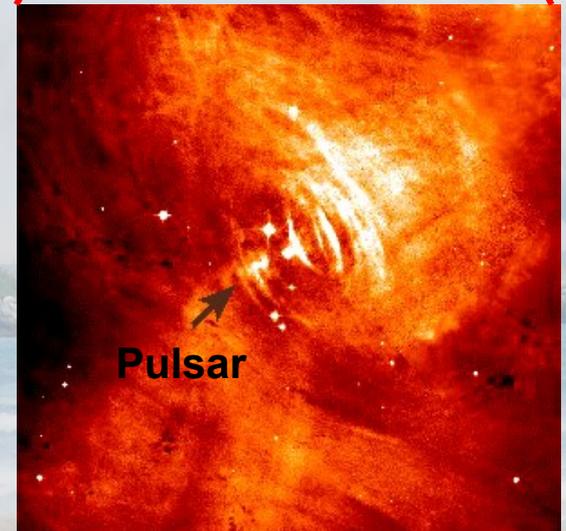
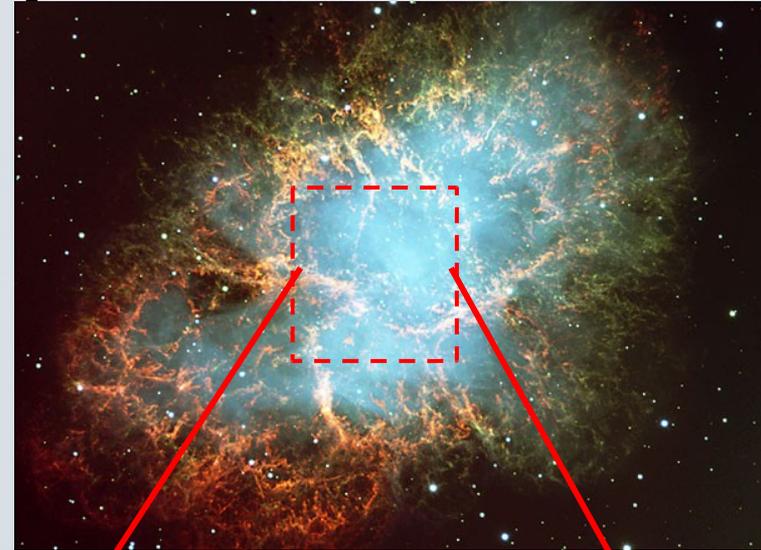


Description schématique d'une nébuleuse de pulsar entourée par un vestige de supernova

Mécanismes d'émission dans les nébuleuses de pulsar

2 principaux mécanismes d'émission non thermique:

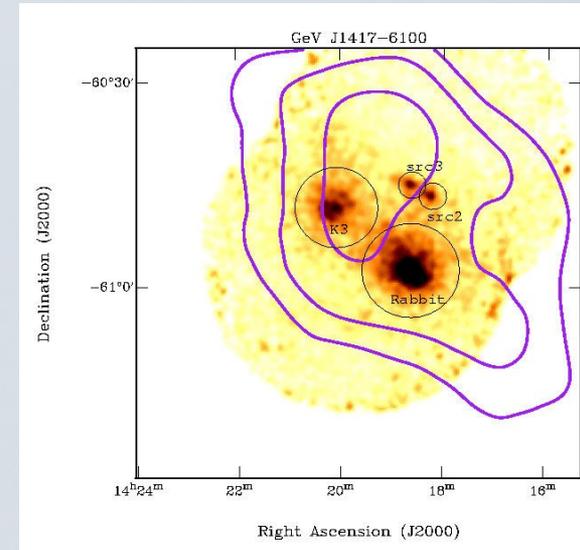
- Du domaine radio aux rayons X : **émission synchrotron** des particules chargées au niveau de l'onde de choc
- Des rayons X aux rayons gamma de très haute énergie : **émission Compton inverse** des particules chargées sur les photons ambiants (CMB, poussière, photons synchrotron, ...) ou **interaction proton-proton**



Nébuleuse du Crabe

Pourquoi étudier les nébuleuses de pulsars avec *Fermi*?

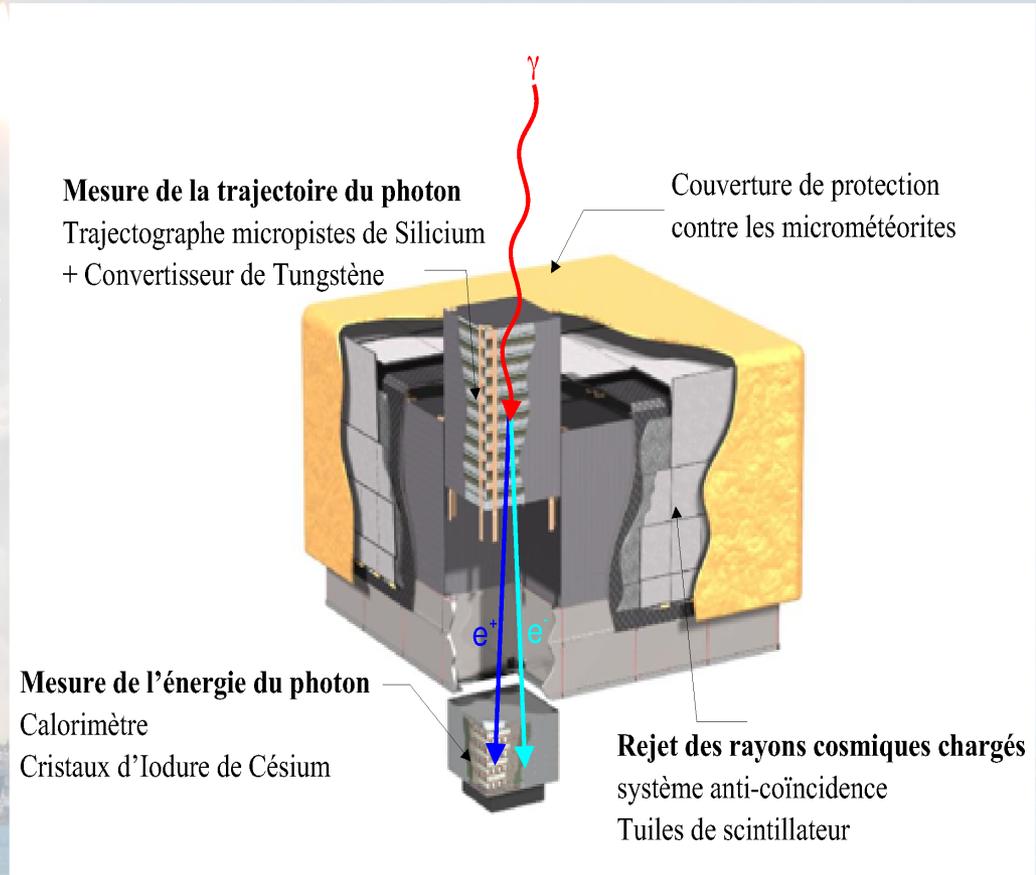
- Une quinzaine de nébuleuses situées dans des boîtes d'erreurs EGRET, mais pas fermement identifiées (résolution angulaire médiocre, surface efficace insuffisante)
 - Population dominante (dans les sources galactiques) à très haute énergie ($E > 100$ GeV)
 - De nombreux pulsars vus par *Fermi*
- Détection et identification de nébuleuses fortement attendue dans la bande d'énergie de *Fermi*



- Intervalle d'énergie permettant de **contraindre, voire discriminer les modèles** leptonique vs hadronique
 - Processus d'émission dans la nébuleuse liés aux paramètres physiques du pulsar
- Intérêt physique : l'étude de l'émission provenant des nébuleuses de pulsars permet la **compréhension des phénomènes d'accélération de particules au niveau du choc** et une meilleure connaissance des phénomènes physiques ayant lieu à proximité du pulsar.

Fermi, un télescope spatial et le Large Area Telescope

- **Détecteur de photons γ (20 MeV - 300 GeV) par conversion de paires**
- **Distingue les rayons γ des particules chargées**
- **Trajectographe et calorimètre permettent la mesure de la direction et de l'énergie du photon**
- **Très grand champ de vue: 20% du ciel à tout instant**
- **Couvre l'ensemble du ciel en 3 heures (2 orbites)**
- **25 fois plus sensible que son prédécesseur, EGRET**
- **Durée de vie: 5 à 10 ans**

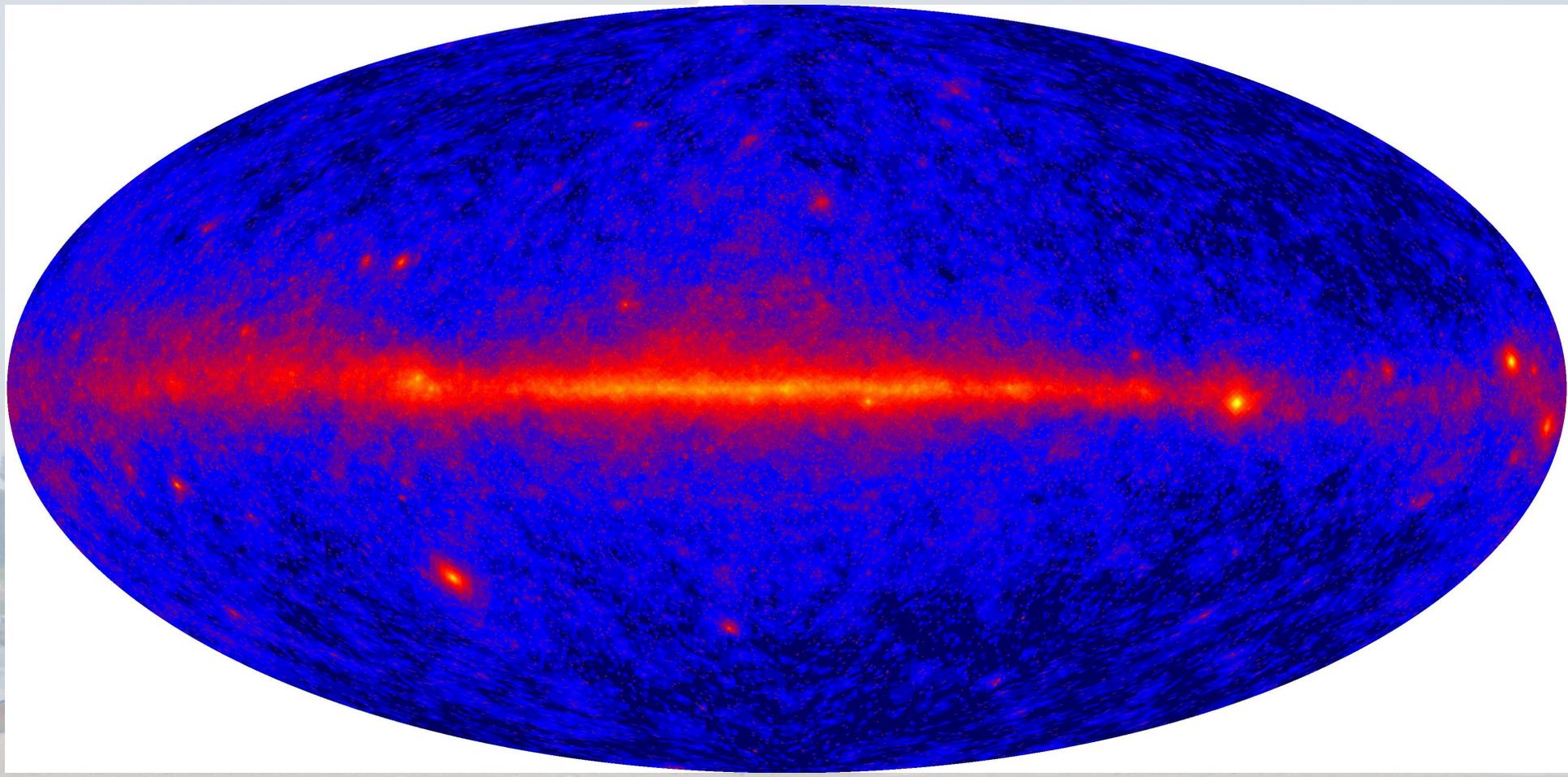




**11 Juin 2008:
lancement de Fermi,
Cap Canaveral
(Floride, Etats-Unis)**



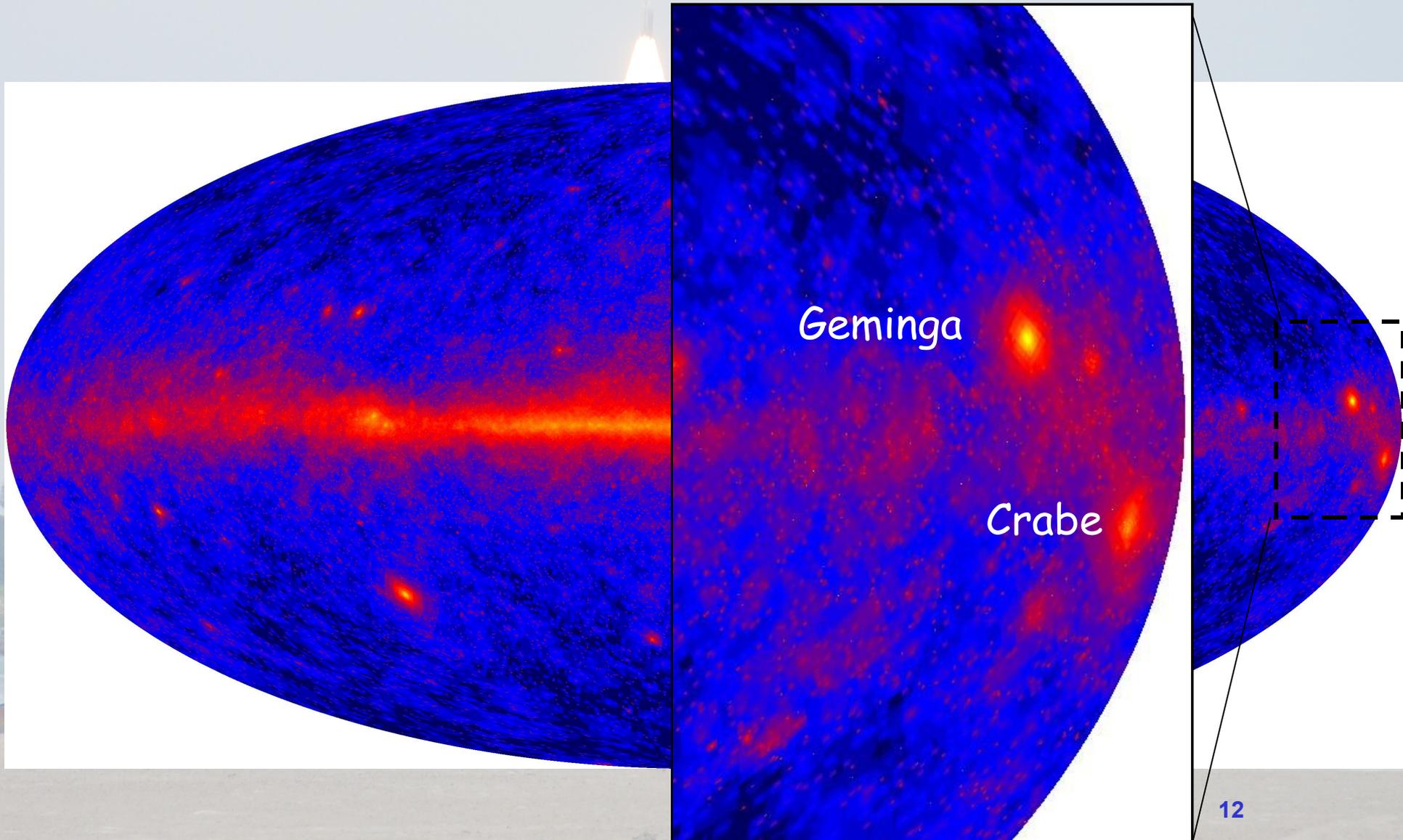
Carte du ciel de Fermi après 3 mois



Etude de la nébuleuse du Crabe avec *Fermi*

(article soumis à

Astrophysical Journal)



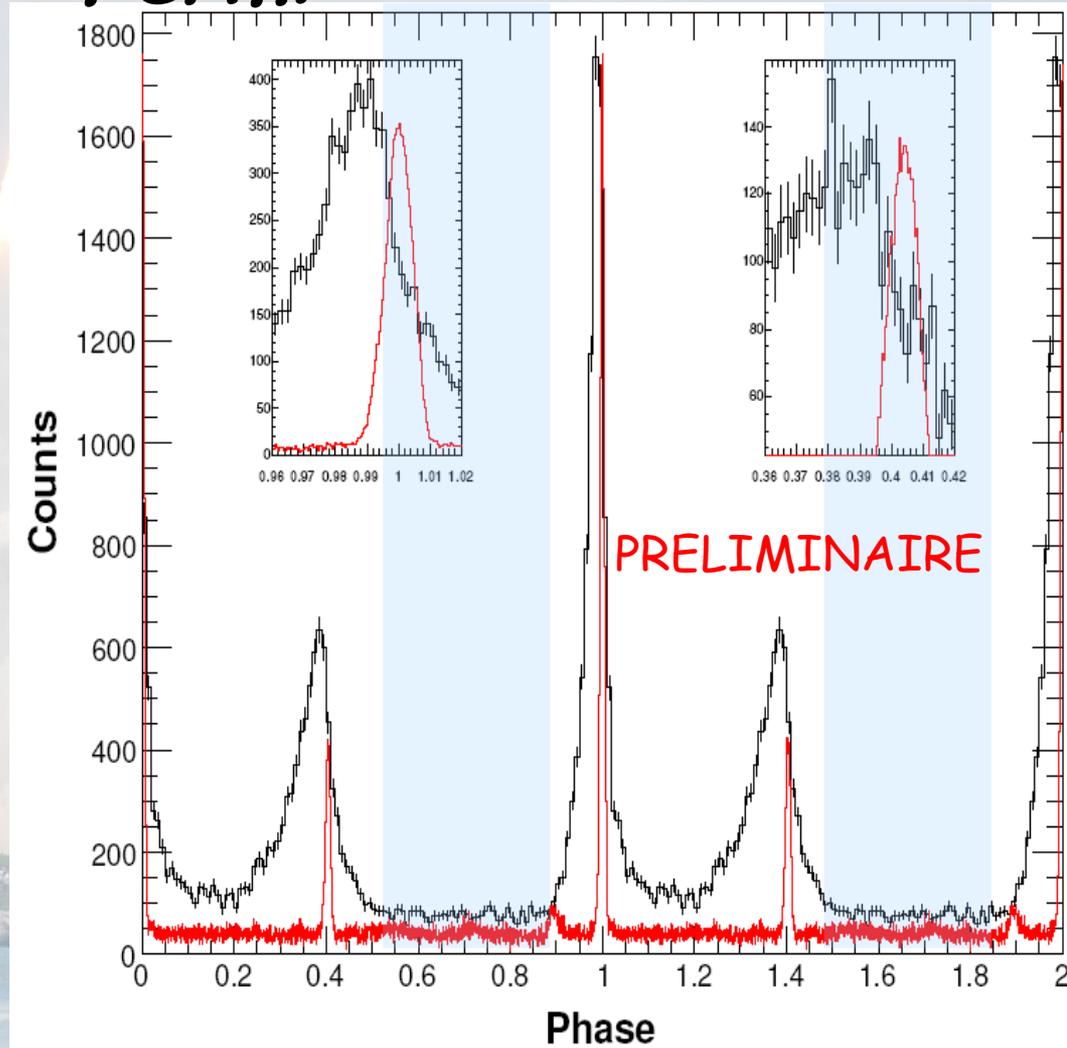
Etude de la nébuleuse du Crabe avec *Fermi*

- Chandelle standard de l'astronomie γ

- Ne peut être séparée spatialement du pulsar par *Fermi*

→ Nécessité d'éphémérides très précises pour construire le phasogramme du pulsar du Crabe.

- Etude de la nébuleuse dans la région non-pulsée (rectangles bleus), donc non contaminée par le pulsar

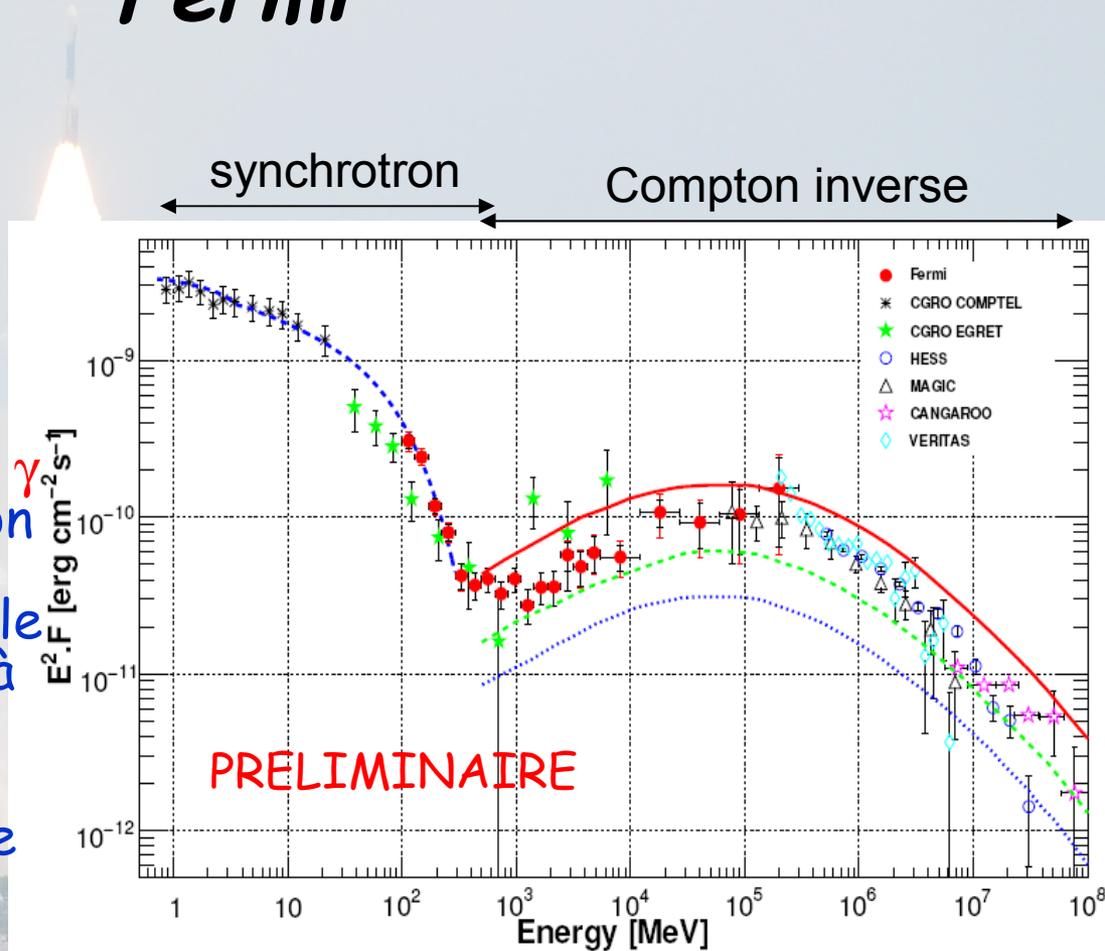


Phasogramme du pulsar du Crabe en rayons γ (noir) et dans le domaine radio (rouge)

Etude de la nébuleuse du Crabe avec Fermi

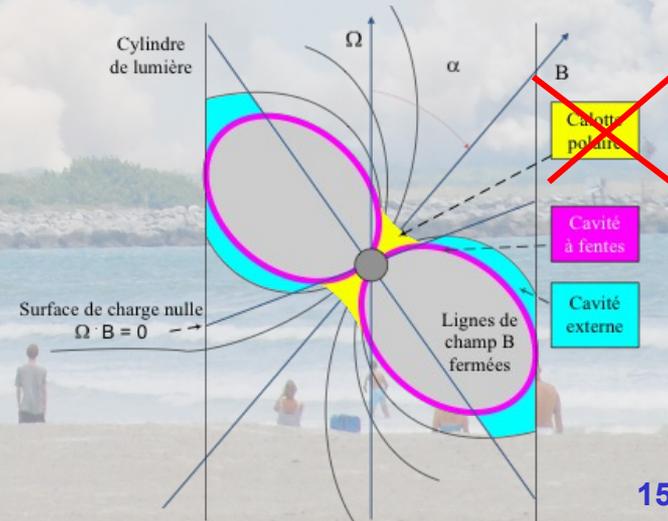
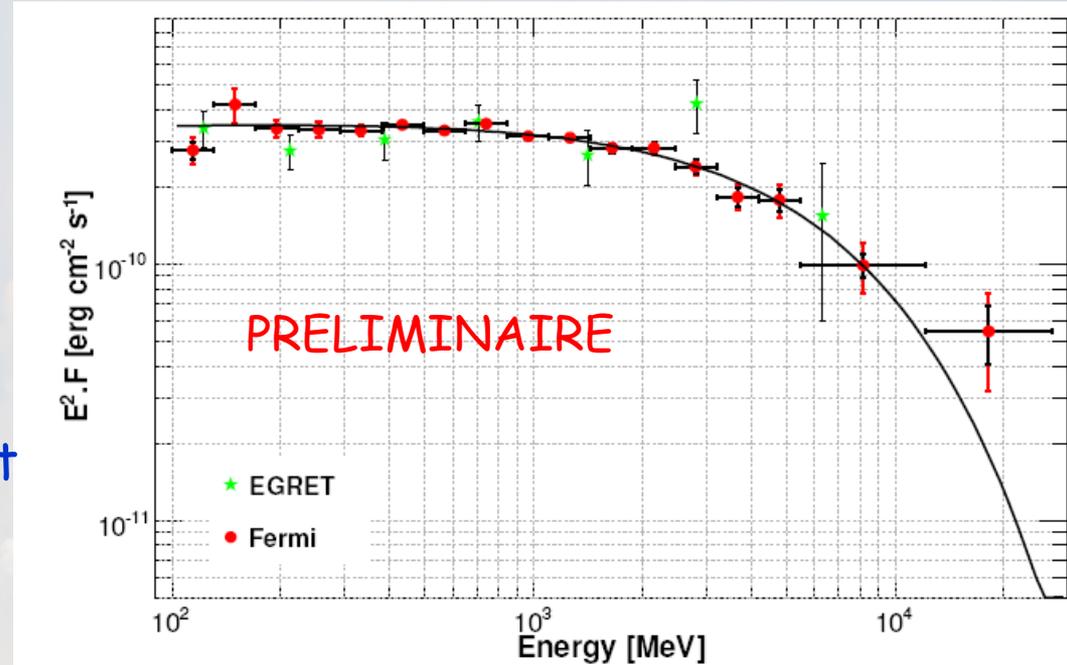
Contraintes sur :

- la forme générale du spectre (synchrotron et Compton inverse)
- le **spectre des électrons** (composante synchrotron)
- les **mécanismes responsables de l'émission γ** à haute énergie : l'émission Compton inverse est suffisante pour expliquer le spectre mesuré de 1 GeV à 100 TeV
- les **paramètres physiques de la nébuleuse**, tels que le champ magnétique de l'ordre de 100 à 200 μG , parfois déjà contraints par d'autres expériences (notamment les télescopes Cherenkov).



Etude du pulsar du Crabe avec *Fermi*

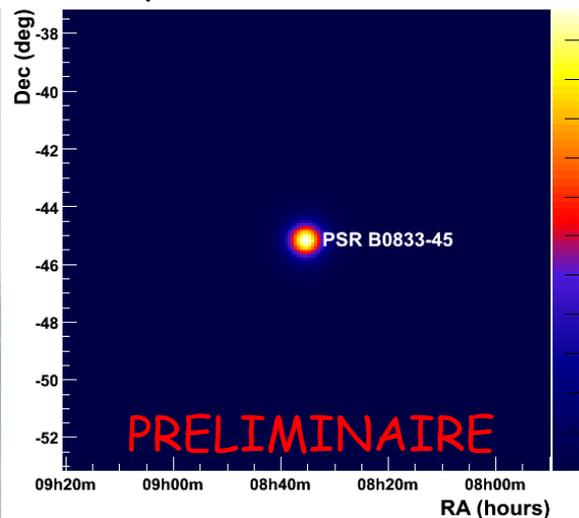
- Première mesure « directe » de la coupure spectrale du pulsar du Crabe
- Contraintes sur :
 - la **quantité d'énergie** produite par le pulsar et **convertie en photons γ** : 0,001 %
 - la forme spectrale à haute énergie
 - la **zone d'émission dans la magnétosphère** (altitude) et les **processus en jeu** : l'hypothèse de la calotte polaire est exclue



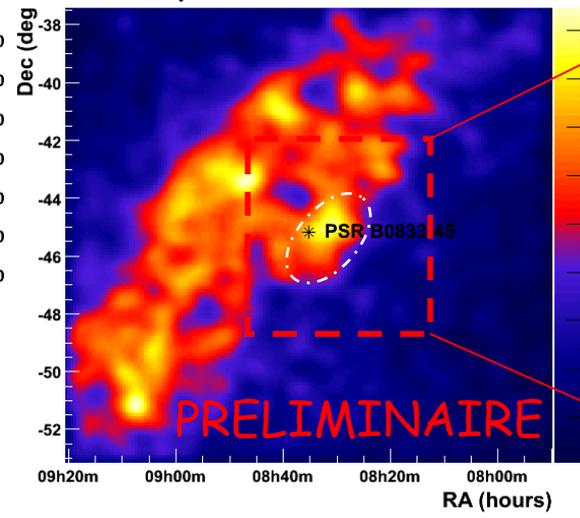
Etude de sources étendues

- Certaines nébuleuses sont plus étendues que la résolution angulaire de *Fermi*
- **Nécessité de caractériser leur extension** et estimer leur flux. Pour cela, l'émission du fond diffus (galactique, extragalactique) doit être connue avec une grande précision

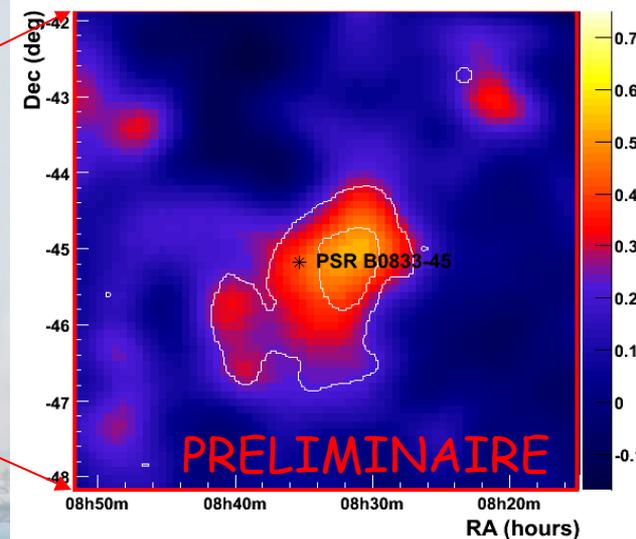
Source ponctuelle et brillante



Source plus faible et étendue



Carte d'excès de la nébuleuse Vela X



M.-H. Grondin & M. Lemoine-Goumard, ICRC 2009

Intérêt primordial pour l'étude de **différents types de sources** :
nébuleuses de pulsars, vestiges de supernovae, amas de galaxies...

Catalogue de nébuleuses

(*article en cours*)

- Une cinquantaine de pulsars détectés par *Fermi*
- 80 nébuleuses de pulsars détectées (tous domaines spectraux confondus)
- **Etude systématique** comparable à celle de la nébuleuse du Crabe, pour tous les pulsars détectés par *Fermi*:
 - construction de phasogrammes (fait appel aux différents radio-télescopes)
 - sélection de la région non-pulsée
 - analyse morphologique (la source est-elle étendue?)
 - analyse spectrale
- 3 nébuleuses de pulsars (Crabe, Vela X, MSH 15-52) ont d'ores et déjà été fermement identifiées et analysées en suivant cette méthode. Elles font l'objet d'articles indépendants.
- **Etude de populations** dans le domaine des rayons γ
- Intérêt individuel pour des sources détectées dans d'autres domaines spectraux: **modélisation** à l'aide de **données multi-longueur d'onde**

Conclusions et perspectives

- De nombreux résultats dès la première année de données: parmi les sources galactiques, la **majorité des détections est liée aux pulsars**.
- L'**étude des nébuleuses** doit être effectuée dans les **régions non-pulsées** des phasogrammes et requiert donc une **analyse temporelle de précision** du pulsar: cette étude a été effectuée en détail sur une source très brillante, la **nébuleuse du Crabe**
- Des **études morphologiques** sont en cours, permettant la **caractérisation de l'extension** des nébuleuses ainsi que d'autres classes de sources (galactiques et extragalactiques)
- Grâce à ces différentes études, un **travail d'analyse systématique de nébuleuses** liées aux pulsars détectés par *Fermi* est en cours
- **Modélisation de sources** pour les candidats les plus intéressants du catalogue: dans les prochains mois