

GLAST

Gamma-ray Large Area Space Telescope

— Damien Parent —

Responsable de stage : D.A. Smith

Les objectifs :

- *Avoir une connaissance générale sur les pulsars et les pulsars gamma.*
- *Mettre en évidence une pulsation à partir des outils d'analyses de l'expérience GLAST.*



TABLE DES MATIERES

Introduction	3
1 Généralités sur les pulsars	3
1.1 Les étoiles à neutrons	3
1.1.1 La formation des étoiles à neutrons	3
1.1.2 La structure des étoiles à neutrons	4
1.2 La découverte des pulsars	4
1.3 Les pulsars	5
2 Les pulsars gamma	5
2.1 Les processus d'émission gamma	6
2.2 Les modèles d'émission gamma	6
2.2.1 Le modèle de la calotte polaire	6
2.2.2 Le modèle de la cavité externe	6
2.3 Les pulsars EGRET	7
2.4 Courbe de lumière	7
2.5 Spectre en énergie	8
3 L'expérience GLAST	8
3.1 Généralités	8
3.2 Data Challenge 2	9
3.2.1 Objectif	9
3.2.2 Les outils d'analyse	10
3.3 Mise en évidence d'une pulsation	10
3.4 Analyse et résultats des données DC2	11
3.4.1 Recensement	11
3.4.2 Localisation	12
3.4.3 Sensibilité	12
3.4.4 Closeout	12
Conclusion	12
Remerciements	12
Bibliographie	13
Annexes	14

Introduction

1 Généralités sur les pulsars

1.1 Les étoiles à neutrons

1.1.1 La formation des étoiles à neutrons

Le destin d'une étoile est lié à sa masse. Plus elle est massive, moins elle passe de temps dans la séquence principale - pour une étoile de quinze masses solaires quelques dizaines de millions d'années au plus. Pendant cette phase, l'étoile synthétise des noyaux d'hélium à partir de protons. Elle y passe la majeure partie de sa vie. Quand les noyaux d'hydrogène viennent à manquer, la pression radiative qui compense la pression gravitationnelle chute. Le coeur se contracte et augmente en température, permettant la combustion de l'hélium. Les couches externes se dilatent et l'étoile a l'appellation de géante rouge.

Pour des étoiles supérieures à 8 masses solaires, la fusion thermonucléaire d'éléments de plus en plus lourds va continuer, jusqu'à créer un coeur de fer. La nucléosynthèse de tout autre élément plus lourd ne produit pas d'énergie, au contraire elle en consomme. A ce stade, la pression radiative créée par l'énergie nucléaire s'arrête. Le coeur s'effondre créant une onde de choc qui expulse les couches supérieures de l'étoile. C'est une supernova. Si le coeur a une masse comprise entre 1,4 et 5,5 masses solaires, il se stabilise en étoile à neutrons. C'est la pression de dégénérescence des neutrons qui repousse la pression gravitationnelle.

Etude sur la masse d'une étoile à neutrons

En théorie newtonienne, la masse limite inférieure pour une étoile à neutrons est la masse de Chandrasekhar égale à $1,4 M_{\odot}$, voir [5]. Elle correspond à la limite supérieure jusqu'à laquelle la pression de dégénérescence des électrons relativistes compense la pression gravitationnelle. Au dessus de cette masse, cette pression ne peut empêcher l'effondrement et les électrons se combinent avec les protons pour former des neutrons.

Pour calculer la masse limite supérieure avant l'effondrement en trou noir, on applique le même raisonnement que précédemment avec des neutrons. L'hypothèse est de considérer des neutrons dégénérés et relativistes. Le théorème du Viriel énonce que pour un système en équilibre dynamique, son énergie potentielle gravitationnelle est égale à deux fois son énergie cinétique. En appliquant ce théorème, à notre hypothèse, on obtient :

$$M_{lim} = \left(\frac{10\hbar c}{3G}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{m_n^2} = 5,5 M_{\odot} \quad (1)$$

L'encadrement de la masse d'une étoile à neutrons obtenu est :

$$1,4 M_{\odot} < M_{neutronstar} < 5,5 M_{\odot}$$

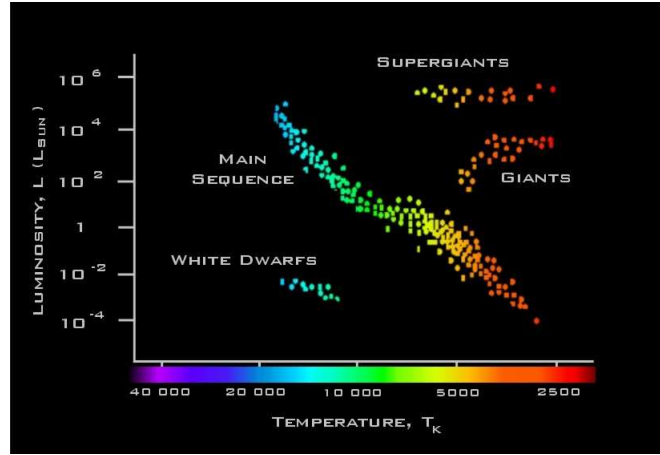


Figure 1: Diagramme d'Hertzsprung-Russell. Les flèches représentent le parcours d'une étoile jusqu'à la formation d'une étoile à neutrons

1.1.2 La structure des étoiles à neutrons

in progress

La structure des étoiles à neutrons est encore très mal connue, du point de vue théorique qu'expérimental.

Pour une masse comprise entre 1,44 et 5,5 masses solaires et un diamètre de 10 km environ, la densité de cet astre est de $10^{14} g.cm^{-3}$, soit la densité nucléaire, cela justifie le nom d'objet compact. La conservation du moment cinétique explique la grande vitesse de rotation du pulsar et l'intense champ magnétique par la conservation du flux magnétique $B = 10^{12} Gauss$.

1.2 La découverte des pulsars

En juillet 1967, Antony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell de l'Université de Cambridge, observent la scintillation des radiosources extragalactiques. Leur objectif est de différencier les quasars des radio-galaxies. Pour ces observations, ils ont construit un radiotélescope suffisamment sensible aux sources faibles. Par hasard, J. Bell découvre une source qui émet de façon constante et régulière des impulsions radios. Ils s'interrogent sur l'origine de cette source et déduisent rapidement une origine céleste. Les observations suivantes confirment un signal extrêmement stable dont la périodicité est de 1.337 secondes. A. Hewish et ses collègues identifient finalement ce rayonnement électromagnétique à une étoile à neutrons en rotation. Aujourd'hui, la source radio d'Hewish et Bell est appelée PSR B1919+21¹.

Cette découverte confirma les prédictions faites dans les années trente par Walter Baade

¹PSR signifie "Pulsating Source of Radio". **B1919+21** correspond aux coordonnées de la source pour l'équinoxe de 1950.

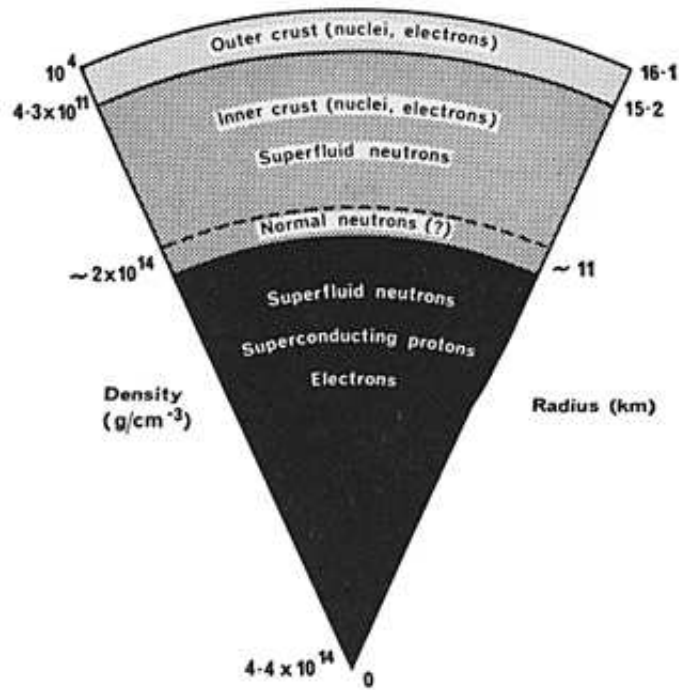


Figure 2: Structure d'une étoile à neutrons

et Fritz Zwicky sur les étoile à neutrons au sein des supernovae et fut rapidement confirmée par l'observation du pulsar situé dans la nébuleuse du Crabe. Rapidement, les astronomes du monde entier se sont mis à les débusquer. On en compte aujourd'hui plus de 1600.

1.3 Les pulsars

Vu précédemment, les pulsars sont des résidus de supernova. Ils appartiennent à la famille des objets compacts [5]. La définition la plus simple que l'on puisse donné à un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide entourée d'une magnétosphère intense. Cette configuration complexe crée un faisceau électromagnétique symétrique à l'axe magnétique. Selon certains critères que l'on décrira plus tard, ce rayonnement peut s'étendre du domaine radio au domaine gamma. L'axe de rotation et l'axe magnétique n'étant pas forcément aligné, le signal est perçu périodiquement vu de la Terre. L'analogie avec un phare marin est raisonnable.

2 Les pulsars gamma

Dans l'état actuel des connaissances, seulement 7 pulsars émettent un rayonnement gamma comparés aux 1600 pulsars radio.² Ils sont répertoriés dans le tableau [?], et

²Ici, le rayonnement gamma n'est pas thermique mais bien un rayonnement dû à la rotation couplée à la magnétosphère du pulsar.

connus sous le nom de pulsars EGRET.

On associe ainsi à ces pulsars une courbe de lumière et un spectre en énergie.

2.1 Les processus d'émission gamma

2.2 Les modèles d'émission gamma

Il existe depuis les années 1970, deux modèles qui décrivent les processus d'accélération et d'émission gamma au sein de la magnétosphère. Ils se différencient par leur lieu d'émission : le modèle de la calotte polaire et le modèle de la cavité externe. Aujourd'hui le manque de données ne permet pas de départager voire de valider ces modèles. L'expérience Glasp devrait soulever cette dégénérescence.

2.2.1 Le modèle de la calotte polaire

2.2.2 Le modèle de la cavité externe

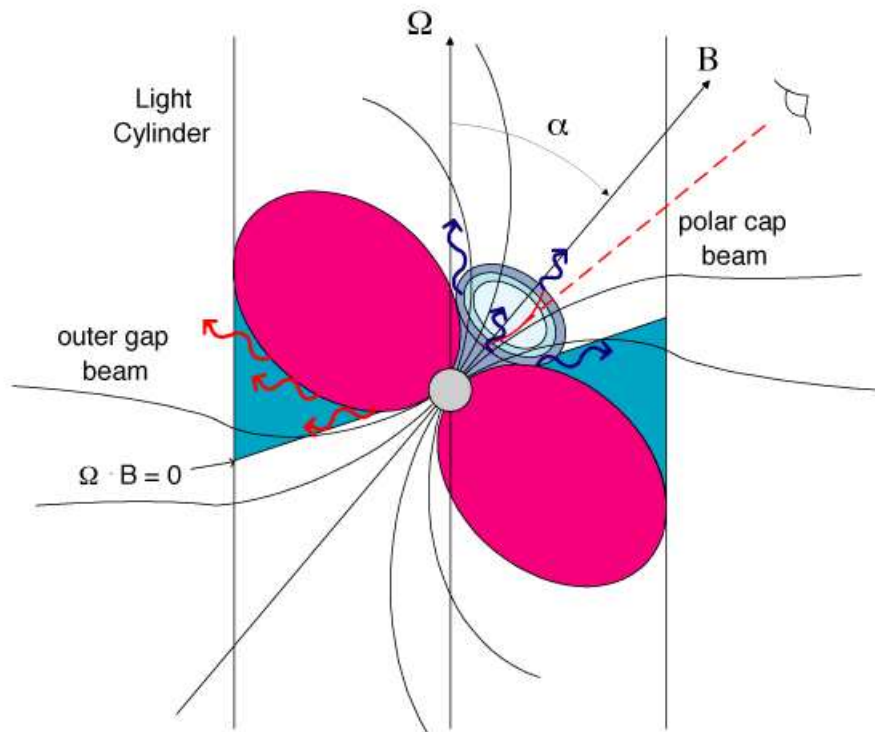


Figure 3: Polar gap and outer gap

Nom	Coordinates (deg)	D (kpc)	P (ms)	$\log\tau$
<i>PSR_B0531p21 - Crab</i>	(83.64,22.01)	2.0	33.403	3.1
<i>PSR_B1509m58</i>		4.4	150.658	3.2
<i>PSR_B0833m45 - Vela</i>	(128.83,-45.18)	0.5	89.315	4.1
<i>PSR_1706m44</i>	(257.43,-44.49)	1.8	102.450	4.2
<i>PSR_B1951p32</i>		2.5	39.530	5.0
<i>PSR_J0633p1746 - Geminga</i>	(98.48,17.78)	0.16	237.093	5.5
<i>PSR_B1055m52</i>	(164.49,-52.45)	1.5	197.108	5.7

Table 1: Pulsars gamma d’EGRET - tableau tiré de [2]

2.3 Les pulsars EGRET

2.4 Courbe de lumière

La construction d’une courbe de lumière ou phasogramme nécessite de connaître certains paramètres dynamiques sur la rotation du pulsar. Ces paramètres s’appellent les éphémérides. Pour la quasi totalité des pulsars, le flux de photons dans le domaine radio est assez élevé pour les déterminer³. La fréquence de rotation du pulsar en est le principal, elle est calculé par une transformée de Fourier à un instant t_0 de référence. A cela, on rajoute sa dérivée première caractérisant le ralentissement du pulsar et sa dérivée seconde. En développant en série de Taylor, on peut déterminer la fréquence à une date choisie (relation 3). Néanmoins, la détermination de la fréquence par extrapolation n’est pas infinie. Les pulsars sont soumis à des glitches, phénomène entraînant une chute de la fréquence lié à la structure interne de l’étoile. Il est donc indispensable d’avoir un suivi régulier des éphémérides.

$$f(t) = f(t_0) + \frac{df(t_0)}{dt}(t - t_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2f(t_0)}{dt^2}(t - t_0)^2 \quad (2)$$

A partir de ces éphémérides, il est possible de construire une courbe de lumière (figure ??). Elle représente l’empilation des photons en fonction de la fraction de tour pour un temps d’arrivé. Si deux photons ont exactement une période du pulsar de différence, ils sont empilés au même endroit. Ainsi la présence d’une émission pulsée se traduit par une accumulation prononcée de photon dans un canal. Par convention, la phase à l’origine correspond au pic radio.

³Geminga pulsar gamma n’a pas de contrepartie radio, il faut utiliser une autre méthode pour déterminer les éphémérides.

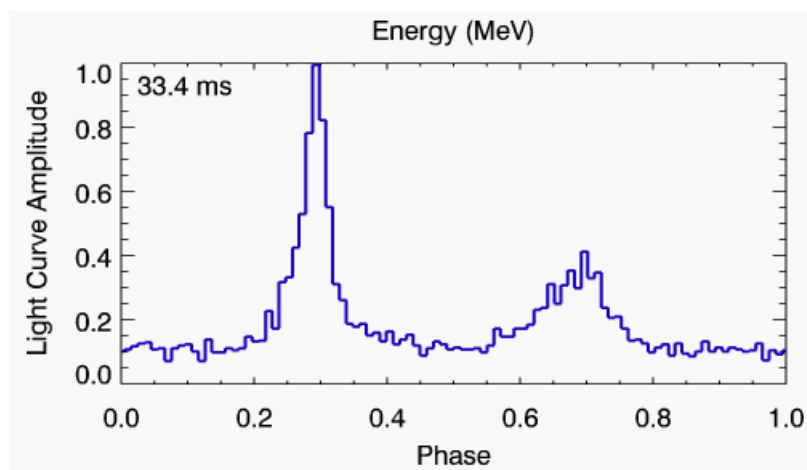


Figure 4: Courbe de lumière normalisée du pulsar du crab - tiré de [8]

2.5 Spectre en énergie

3 L'expérience GLAST

3.1 Généralités

GLAST pour Gamma-ray Large Area Space Telescope est un satellite spatial mais aussi un projet de collaboration internationale dont fait parti la France, l'Italie, la Suède, le Japon, l'Allemagne, et les USA. Financé essentiellement par la NASA, le lancement du satellite est prévu pour septembre 2007. La mission a pour but d'améliorer les connaissances en astronomie gamma. A son bord deux détecteurs complémentaires, le Large Area Telescope (LAT) a été conçu pour observer le ciel des hautes énergies et le GLAST Burst Monitor (GBM) étudiera les sursauts gamma plus en détail aux émissions transitoires intenses.

Objectifs de la mission GLAST

Les principaux objectifs sont présentés ci-dessous :

- Comprendre les mécanismes d'accélération des particules dans les AGN, les pulsars et les restes de supernova.
- Identifier les sources ponctuelles et les émissions diffuses.
- Déterminer le comportement des sursauts gamma
- Détecter par l'observation d'une raie d'annihilation la matière noire.

Description du satellite GLAST

Alimenté par des panneaux solaires et constitué d'une électronique spécifique à l'environnement spatial, GLAST est composé de deux instruments décrits ci-dessous :

- Le LAT : Plus sensible que son prédécesseur EGRET embarqué sur CGRO, le LAT est un télescope. Il observera le ciel dans un intervalle d'énergie de 20 MeV à 300 GeV et couvrira sa totalité au cours de ces deux orbites de 95 minutes par un mode de balancement. Il est composé de deux structures instrumentales qui se superposent. Un trajectographe détermine la direction du photon d'arrivé et un calorimètre mesure son énergie. Perpétuellement bombardé du rayonnement cosmique, le satellite est protégé par un détecteur d'anticoïncidence, lui permettant de sélectionner les photons des particules chargées.
- Le GBM : En complément au LAT, le GBM est un ensemble de plusieurs détecteurs scintillateurs dédié à l'étude des émissions transitoires, les sursauts gamma. Ces émissions présentent un spectre avec une cassure et un flux moyen autour de la centaine de keV, en dehors de la gamme d'énergie du LAT.

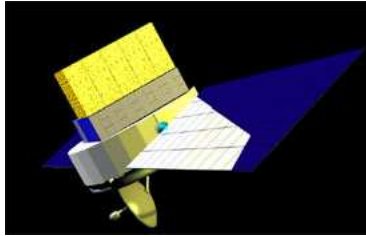


Figure 5: Satellite GLAST

3.2 Data Challenge 2

3.2.1 Objectif

La mise en place d'une expérience tel que GLAST demande une préparation au préalable importante. De la conception du satellite à l'étalonnage des détecteurs, le Data Challenge 2 (DC2) s'oriente vers l'élaboration et le contrôle des procédures d'analyse des données GLAST. De par cet aspect, DC2 démarre d'une simulation du ciel au rayonnement gamma pour une durée totale de 55 jours. Toutes les sources d'émission gamma sont incluses - blazars, pulsars, sursauts gamma, matière noire, plérions, restes de supernova et les fonds diffus galactique et extragalactique.

Le groupe d'astroparticules du Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan (CENBG) s'est orienté vers l'étude des pulsars, suite logique à l'expérience Céleste. La possibilité d'une collaboration avec le radio télescope de Nançay, a orienté le choix de la méthode de détection. Les courbes de lumière peuvent mettre en évidence une pulsation. C'est dans cet intérêt que l'observatoire de Nançay aura un suivi continu des éphémérides radio, de pulsars potentiellement émetteur gamma [6]. Dans le cadre du Data Challenge 2, les éphémérides radio de 98 pulsars sont mises à notre disposition, en rapport avec la simulation.

3.2.2 Les outils d'analyse

L'observation continue du télescope entraîne un flot important de données brutes (énergie et direction du photon, pour ne citer que les plus importantes). Pour une étude approfondie de ces données, une série d'outils d'analyse a été mise en place : les ScienceTools. Notre méthode de détection se base en partie sur ces outils énumérés et définis succinctement :

ScienceTools

- **gtselect** : Sélectionne la cible, l'intervalle d'énergie.
- **gtbary** : Barycentrisation.
- **gtephcomp** : Extrapole les éphémérides de la cible jusqu'à la date choisie.
- **gtpsearch** : Recherche de fréquence par une transformée de Fourier.
- **gtpphase** : Permet de créer le phasogramme du pulsar à partir des éphémérides.
- **gtsrcid** : Recouvrement des sources des catalogues.

L'outil gtp RTPulsar

A partir des principaux ScienceTools, le groupe d'astroparticule a mis en place une analyse automatique **gtp RTPulsar**, permettant d'avoir une vision la plus complète possible de la cible. Cet outil est le point de départ de la mise en évidence d'une pulsation, soit de la détection d'un pulsar. Un extrait du résultat de cet outil est présenté en annexe.

Description générale :

Chaque page est divisée en quatre parties distinctes. La première décrit qualitativement les éphémérides du pulsar et les paramètres appliqués. La deuxième partie est une carte du ciel, centrée sur la cible. A cause de problèmes de projection dû au gtselect, un cercle est juxtaposé indiquant la région réelle analysée. Additionné à cela, une fenêtre présente le phasogramme du pulsar, couvrant une gamme d'énergie choisie, et enfin une autre le résultat de l'outil gtpsearch.

3.3 Mise en évidence d'une pulsation

Expliqué précédemment, les courbes de lumière nous renseignent directement sur la présence d'une pulsation émise par une source. La mesure de la sensibilité de ces courbes nous indiquent quant à elle, la pertinence de la détection, en d'autres termes la confiance de la mesure. On définit la sensibilité par : $\sigma = \frac{\text{signal}}{\sqrt{\text{fond}}}$.

Dans ce sens, à partir des résultats de **gtp RTPulsar**, la sensibilité de chaque phasogramme associé aux pulsars est évaluée. On conclut à une détection, si la sensibilité calculée est égale ou supérieure à 3σ (voir tableau 2).

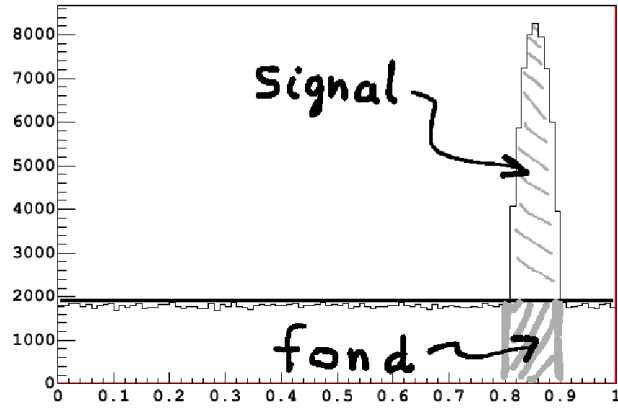


Figure 6: Phasogramme illustrant la mesure de sensibilité.

Sensibilité	Confiance de la mesure (%)
1σ	68,27
3σ	99,73
5σ	99,999973

Table 2: Taux de la confiance de mesure en fonction de la sensibilité - tableau tiré de [3].

Autre méthode de détection : Pulsar Blind Search

D'autres méthodes de détection sont en cours d'élaboration. Notamment à l'université de Santa Cruz, Marcus Zigler travaille sur la recherche en fréquence de toutes les sources du catalogue de Jean Ballet, permettant d'indiquer si la source pulse, dans quel cas il s'agit d'un pulsar. L'idée de base de son analyse est de calculer la transformée de Fourier de la différence de temps du temps d'arrivée d'un photon.

3.4 Analyse et résultats des données DC2

3.4.1 Recensement

La simulation du ciel gamma proposée dans le cadre DC2 est le point de départ de l'analyse. Le choix de travailler avec les éphémérides radio, choix discuté au préalable, nous impose de travailler à partir de la base de données des éphémérides de DC2. Elle est composée de 98 pulsars simulés à partir du modèle slot gap et distribués dans le plan galactique et les nuages de Magellan, dont les 7 pulsars d'EGRET.

Une collection de 98 pages, chacune associées à un pulsar, a été élaborée par notre analyse automatique **gtprtpulsar**. Pour différentes coupures en énergies et différents rayons, l'observation directe de 44 pulsars est affirmée. Soit au phasogramme ou au gtpsearch.

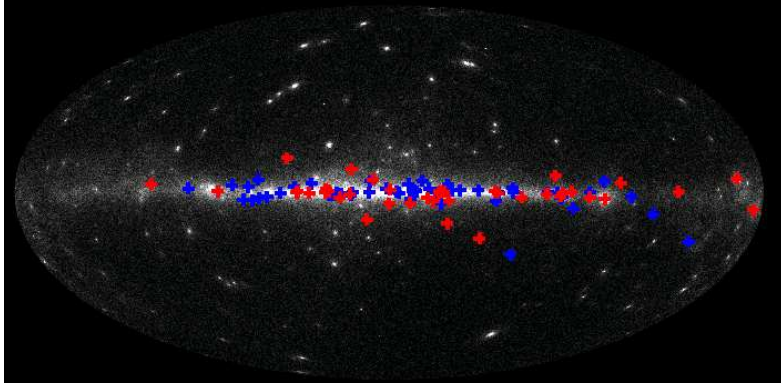


Figure 7: Distribution en coordonnées galactiques des 98 pulsars de la base de données de DC2. Les croix représentent la totalité des pulsars. Les croix rouges représentent les 44 pulsars de notre détection

3.4.2 Localisation

progress

Avec gtsrcid, nous avons effectué un recouvrement de nos 44 pulsars et du catalogue Jean Ballet. Le résultat obtenu est de 27 pulsars pour une probabilité sur les coordonnées de 70% soit une précision de 0,03 deg. Suite à ce résultat, nous avons comparé ces 27 pulsars et la liste de Marcus Ziegler. voir liste. Il semble que le blind search ne repère que les pulsars avec un flux important (la simulation n'est que de 55 jours), mais a repéré 3 pulsars inconnus.

3.4.3 Sensibilité

3.4.4 Closeout

Bordeaux a fait le choix des pulsars radio candidat gamma. Une liste a été proposée. Les radios éphémérides de Nancay et autres radio-télescopes remplaceront la base de données de DC2.

Conclusion

Remerciements

Bibliographie

- [1] Durand, E., Recherche de photons pulsés au-dessus de 30 GeV dans le Crabe et PSR B1951+32 avec le détecteur Cerenkov atmosphérique Céleste.
- [2] Bregeon, J., Contribution à l'étalonnage en énergie du calorimétrie du GLAST-LAT et qualification des modèles de cascades hadroniques disponibles sous GEANT4.
- [3] K.Hagiwara et al., Physical Review D66
- [4] Fierro, ...
- [5] Gourgoulhon, E., Objets Compacts, Cours du Master Sciences de l'Univers et Technologies Spatiales, Université Paris VI, Paris VII et Paris XI (2004 -2005)
- [6] Grondin, MH., Préparation de la science avec le satellite GLAST : L'étude des pulsars, Université Bordeaux 1 (2006).
- [7] Silk, J., Ed. Odile Jacob, Une brève histoire de l'univers.
- [8] <http://glast.stanford.edu/>
- [9] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, Australia Telescope National Facility, ATNF Pulsar Catalogue.

Annexes

Glossaire des termes scientifiques

AGN : Noyau actif de galaxie. Autre appellation de quasar.

blazar : Identique au quasar. Le jet de matière, la source de rayonnement sont dirigés dans notre direction.

Céleste :

CGRO : Compton Gamma Ray Observatory

EGRET : Energetic Gamma Ray Experiment Telescope

quasar : Objet extragalactique très éloigné (milliards d'années lumières), source de rayonnement intense. Après la seconde guerre mondiale, l'astronomie radio a profité du progrès important dans le domaine des radars pour introduire de nouvelles techniques d'observations. Notamment, la découverte du premier quasar (quasi-stellar) 3C273 en 1962 par l'australien C. Hazard a été faite dans le domaine radio. Les quasars connus sous le nom d'AGN (noyau actif de galaxie) sont la manifestation d'un trou noir supermassif accrétant de la matière. Ce processus est une source intense dans la totalité du spectre électromagnétique. La caractéristique étonnante de ces objets est la variabilité de leur rayonnement dans le temps.

plérion : Zone de chocs stationnaires entre le jet du pulsar et l'environnement (reste de la supernova associée).

scintillation : Fluctuation rapide de l'éclat lumineux.

sursaut gamma :