

Astronomie des pulsars γ après EGRET
Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches
version 0

Dumora Denis

5 novembre 2010



Table des Matières

Préambule	1
I Pulsars gamma à haute énergie	3
Introduction	5
1 Astronomie Gamma et Pulsars au milieu des années 90	13
1.1 Les précurseurs	13
1.1.1 SAS-2, une vision furtive du ciel gamma.	13
1.1.2 Premiers résultats pour l’astronomie gamma	13
1.1.2.1 Les dangers de la faible statistique	15
1.1.3 COS-B, une fenêtre s’ouvre sur les sources galactiques.	16
1.1.3.1 L’apport de COS-B pour les pulsars γ	16
1.2 EGRET, la révolution dans le ciel gamma.	18
1.2.1 Retour sur la détection embarquée	18
1.2.2 Les résultats révèlent un nouveau ciel gamma	18
1.2.3 EGRET et les pulsars γ	19
1.2.3.1 Les courbes de lumière	20
1.2.3.2 Les spectres	21
1.2.3.3 La spectroscopie résolue en phase	22
1.2.3.4 L’efficacité de conversion	23
1.2.4 Pour conclure sur EGRET	23
1.3 Le Ciel vu de la Terre : premiers succès des détecteurs Cerenkov.	24
1.4 Conséquences observationnelles	26
1.4.1 Un trou dans le spectre	26

1.5	En attendant GLAST....	26
1.5.1	Succéder à EGRET	26
1.5.2	CELESTE : baisser le seuil rapidement	27
1.5.2.1	Du côté des détecteurs Cerenkov	27
1.5.2.2	Utiliser les centrales solaires à tour pour échantillonner le front d'onde Cerenkov	27
2	CELESTE, un saut dans le vide...	31
2.1	Le projet CELESTE.	32
2.1.1	Diminuer le seuil d'un détecteur Cerenkov	33
2.1.2	Principe de la reconversion d'une centrale solaire à tour en détecteur Cerenkov	34
2.2	Les points essentiels du détecteur	34
2.2.1	Le déclenchement « Analogique ».	35
2.2.2	Validation de la datation des évènements.	36
2.2.2.1	CELESTE a vu le pulsar du Crabe !!!	37
2.3	Recherche de pulsars γ avec CELESTE	39
2.3.1	Le Crabe	39
2.3.1.1	Pulsations du Crabe	39
2.3.2	PSR B1951+32	40
2.4	Les conclusions de CELESTE	41
2.5	Contribution à CELESTE	41
3	Fermi, le ciel se révèle...	47
3.1	GLAST, succéder à EGRET...	47
3.2	Préparation de la mission	48
3.2.1	Les tests faisceaux	48
3.2.2	La validation du GPS	49
3.2.3	Préparation des éphémérides	51
3.2.4	Contribution à la préparation de la mission	53
3.3	Les pulsars de <i>Fermi</i>	54
3.3.1	Les pulsars « normaux »	56
3.3.2	Les pulsars milliseconde	56
3.3.3	Les pulsars détectés en gamma seulement	57

3.3.4	Quelques caractéristiques générales	57
3.3.5	Une histoire de Pulsars γ : Geminga	60
3.3.5.1	SAS-2 découvre une mystérieuse source γ	60
3.3.5.2	COS-B confirme, pas les observatoires radio...	61
3.3.5.3	EGRET, Geminga est identifié comme un pulsar γ	61
3.3.5.4	EGRET, Geminga est étudié en détails.	62
3.3.5.5	<i>Fermi</i> -LAT, un nouvel horizon	64
3.4	Conclusion	66
4	Pulsars γ et perspectives	79
4.1	Un successeur à <i>Fermi</i> -LAT?	79
4.1.1	De meilleures performances pour un détecteur γ dans la gamme du <i>GeV</i> ?	79
4.1.1.1	Une technologie innovante?	79
4.1.1.2	Un détecteur plus grand?	80
4.1.1.3	Quels points faibles pour le LAT?	80
4.1.1.4	Améliorer la reconstruction	81
4.1.1.5	Une mission ciblée	81
4.1.2	De meilleures performances pour un détecteur γ dans une autre gamme d'énergie?	81
4.2	Pulsars γ et futurs détecteurs Cerenkov	82
4.3	Pulsars γ dans un avenir proche.	84
4.3.1	Recherche de pulsars à d'autres longueurs d'ondes	84
4.3.2	Etude de la géométrie des faisceaux.	85
4.3.3	Ceux qu'on voit et ceux qu'on ne voit pas...	86
4.4	Un avenir au-delà des pulsars.	88
	Diffusion des connaissances	91
	Encadrement de stages et de thèses	95
	Liste des Publications	99

Table des figures

1.1	Phasogrammes du pulsar du Crabe à gauche et de celui de Vela à droite obtenus par SAS-2.	14
1.2	Spectre du Crabe obtenu par SAS-2	14
1.3	Excès de comptage sur la source γ 195 5, mis en évidence par SAS-2	15
1.4	PSR B1818-04 et PSR B1747-46 deux candidats pulsars γ non confirmés par la suite.	15
1.5	Carte du Ciel γ par COS-B	16
1.6	Phasogrammes du pulsar du Crabe et de Vela obtenus par COS-B (Bennett et al., 1977)	17
1.7	Spectres du pulsar du Crabe et de Vela obtenus par COS-B (Bennett et al., 1977)	17
1.8	Les sources du troisième catalogue EGRET (coordonnées galactiques projection Aitoff)	19
1.9	Courbes de lumière à différentes longueurs d'ondes (radio, optique, X et gamma) pour les 7 pulsars détectés par CGRO.	20
1.10	Spectre en énergie des 7 pulsars détectés par CGRO	21
1.11	Courbe de lumière (à gauche) et spectre par intervalle de phase (à droite) pour le pulsar du Crabe (Fierro et al., 1998).	22
1.12	Dépendance entre efficacité de conversion de l'énergie perdue par rotation en rayonnement gamma et potentiel des lignes de champ ouverte pour les pulsars CGRO.	23
1.13	Schéma de principe d'un imageur Cerenkov	25
1.14	Principe d'un échantillonneur de front d'onde Cerenkov du type de celui des expériences ASGAT et Themistocle.	25
2.1	Principe d'un échantillonneur Cerenkov à tour, en haut à gauche l'optique secondaire placée à l'emplacement de l'ancienne chaudière, à droite, un élément de la caméra placée à la focale de l'optique secondaire.	34
2.2	Schéma du champ d'héliostats de Thémis, les contours délimitent les groupes d'héliostats associés pour construire le trigger analogique.	35
2.3	Principe des modules sommateurs analogiques de CELESTE.	36
2.4	Principe du système d'acquisition dédié à l'observation du pulsar du Crabe en optique avec CELESTE.	38

2.5	Signal typique (courant de sortie du photomultiplicateur en fonction du temps) obtenu lors de la mesure des pulsations du Crabe en optique. Le signal observé est essentiellement la modulation à 100 Hz due à l'éclairage public.	38
2.6	Courbe de lumière du Crabe optique obtenue en sommant cinq prises de données. . .	38
2.7	Spectre de PSR B1951+32	40
3.1	Principe instrumental du contrôle de la datation des évènements du LAT.	50
3.2	Distribution des différences de temps GPS entre évènements communs CELESTE et LAT (à gauche), différences de temps évènement par évènement en fonction du temps (à droite), mettant en évidence la dent de scie d'amplitude 1 ms.	51
3.3	Après correction, distribution des différences de temps GPS entre évènements communs CELESTE et LAT (à droite), différences de temps évènement par évènement en fonction du temps (à gauche).	52
3.4	Position des pulsars détectés par <i>Fermi</i> -LAT en coordonnées galactiques. Les ronds verts représentent les pulsars connus en radio et détectés en gamma, les carrés bleus ceux détectés en gamma seulement, enfin les triangles rouges représentent les pulsars milliseconde. Les pulsars dont le nom apparaît sont ceux cités dans le document. . .	55
3.5	Courbe de lumière typique des pulsars à 2 pics détectés par <i>Fermi</i> -LAT. Ici, PSR J2021+3651 premier pulsar radio découvert en γ depuis EGRET.	58
3.6	Courbe de lumière typique des pulsars à un seul pic détectés par <i>Fermi</i> -LAT. Ici, PSR J0357+3206 pulsar découvert en γ , inconnu en radio.	58
3.7	Distribution de l'écart entre les pics en fonction du logarithme de la perte d'énergie par freinage des pulsars présentant 2 pics en gamma. Les ronds verts représentent les pulsars connus en radio et détectés en gamma, les carrés bleus ceux détectés en gamma seulement, enfin les triangles rouges représentent les pulsars milliseconde. . .	59
3.8	Diagramme P-Pdot représentant la dérivée de la période de rotation de chaque pulsar en fonction de sa période. La convention de couleur est la même que dans le graphe 3.7.	60
3.9	Excès de photons γ détecté dans la direction de Geminga par SAS-2	61
3.10	Courbe de lumière de Geminga vue par EGRET et telle que retrouvée à partir des évènements archivés COS-B et SAS-2.	62
3.11	A gauche, courbe de lumière de Geminga montrant les différents domaines du profil temporel. A droite, spectre de Geminga résolu en phase tel qu'observé par EGRET. . .	63
3.12	Spectre intégré en phase observé par EGRET	63
3.14	Spectre de Geminga intégré en phase obtenu en utilisant un an de données <i>Fermi</i> -LAT.	64
3.13	Courbe de lumière de Geminga obtenue en utilisant un an de données <i>Fermi</i>	64
3.15	A gauche, évolution de l'indice spectral de Geminga en fonction de la phase du pulsar. A droite, évolution de l'énergie de coupure en fonction de la phase du pulsar. Pour chaque, pas de phase, le modèle d'émission est compatible avec un spectre en loi de puissance coupé par une simple exponentielle.	65

3.16	Exemples de spectres résolus en phase obtenus avec un an de données <i>Fermi</i> -LAT.	65
4.1	Les cartes du ciel produites à partir du 3 ^{ème} catalogue d'EGRET à gauche et de la première année de donnée de <i>Fermi</i> -LAT à droite. La proportion de sources non identifiées est à peine plus faible dans le cas de <i>Fermi</i> -LAT.	80
4.2	Sensibilité comparée des différents détecteurs γ au-delà du GeV	83
4.3	Sensibilité comparée de CTA avec les détecteurs Cerenkov actuels	83
4.4	Diagramme pseudo P-Pdot, afin de tenir compte de la distance des sources et donc d'avoir une image de la détectabilité théorique des pulsars plus réaliste, les périodes et dérivées de la période sont renormalisées par rapport aux lignes iso-flux (normalisées au flux de Vela). Un pulsar de période P_0 , de dérivée de période P_1 d'énergie de freinage E_{dot} et situé à la distance d se trouvera donc à l'intersection de la ligne iso-flux $\sqrt{E_{dot}}/d^2$ et de la perpendiculaire à cette ligne passant par le point P_0, P_1 . Les ronds verts représentent les pulsars jeunes détectés en radio et vus par <i>Fermi</i> -LAT, les carrés bleus les pulsars détectés en gamma seulement par <i>Fermi</i> -LAT, les triangles rouges les pulsars milliseconde détectés par <i>Fermi</i> -LAT. Les points noirs représentent les pulsars radio dont la collaboration <i>Fermi</i> possède une éphéméride, les points gris ceux pour lesquels il n'y a pas de suivi radio pour <i>Fermi</i>	87

Préambule

Pendant longtemps, j'ai considéré qu'un prérequis à l'écriture de mon Habilitation à Diriger les Recherches, serait ma capacité à diriger ma propre recherche, je ne suis pas certain d'y être complètement parvenu, bien qu'avec un peu de recul une ligne directrice forte s'en dégage.

La HDR, validation par les pairs de la capacité d'un enseignant-chercheur ou d'un chercheur à encadrer des doctorants, peut paraître un exercice bien étrange dans l'activité schizophrénique d'un maître de conférences supposé partager son temps de façon à peu près équitable entre enseignement et recherche. En effet, si elle est requise pour encadrer des doctorants et donc pour, en quelque sorte, valider son activité de recherche aucune HDE (Habilitation à Diriger les Enseignements) n'est exigée pour valider l'autre volet de l'activité de l'enseignant-chercheur. La diffusion des connaissances auprès des étudiants serait une sorte de mal nécessaire ou pire, comme c'est souvent et malheureusement supposé par de nombreux esprits brillants, le corollaire évident d'une activité de recherche reconnue. En tant que phénoménologue devenu expérimentateur, il me paraît que les faits ont une sérieuse tendance à contredire cette dernière assertion.

Bien que l'exercice de la HDR ait un caractère plus individuel que la thèse, je tiens dans le préambule de ce manuscrit à adresser quelques remerciements qui me tiennent particulièrement à coeur. Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des membres permanents du groupe Astroparticules du CENBG, David, Thierry, Benoît et Marianne par ordre d'arrivée dans le groupe. Je suis très sensible au fait que dans une équipe dont je suis le seul universitaire, chacun d'eux ait accepté la nécessaire différence d'organisation et de rythme liée à la fonction d'enseignant-chercheur ainsi que mes choix plus personnels d'équilibrage de mon implication entre enseignement, recherche et responsabilités administratives, et ceci malgré l'activité plus que soutenue du groupe. Cela peut sembler une évidence mais de nombreux exemples montrent que cet équilibre de fonctionnement n'est pas forcément naturel. C'est vraiment très appréciable pour quelqu'un qui fait ce métier par choix et je les en remercie encore.

D'ordinaire, cette partie des thèses ou des rapports de stage est plutôt destinée au remerciement des tuteurs, je ferais ici l'inverse en consacrant quelques lignes pour remercier les doctorants et stagiaires qui durant ces presque quinze années ont chacun à leur manière enrichi mon parcours scientifique.

Je tiens particulièrement à remercier Berrie, le premier thésard du groupe Astroparticules et avec qui j'ai fait mes premières armes de physicien expérimentateur, pour la richesse des discussions de physique et pour les bières que l'on a partagées pendant la thèse et par la suite.

Je tiens aussi à remercier Emmanuel, le premier thésard que j'ai encadré et avec lequel nous avons mis en route la thématique « pulsars gamma ». Même si le travail des premiers temps sur CELESTE a pu paraître ingrat et frustrant au vu de l'absence de véritables résultats de physique, il n'en demeure

que son travail rigoureux et approfondi reste la pierre fondatrice des succès que nous connaissons aujourd'hui sur *Fermi*. La qualité pédagogique de son manuscrit accompagne encore les premiers pas des stagiaires et nouveaux thésards dans leur découverte du monde étrange qui est devenu notre quotidien et dont nous avons peut-être un peu perdu conscience des nombreux prérequis nécessaires pour l'aborder.

Enfin, je tiens à remercier Lucas, Damien et Marie-Hélène, qui ont partagé les moments intenses que nous vivons depuis le lancement de *Fermi* (et un peu avant) et qui chacun à leur manière et avec leur personnalité ont su faire en sorte que l'aventure des pulsars gamma au CENBG devienne un réel succès.

Je souhaite bonne chance à tous les 3, partis cette année en post-doc avec comme objectif de concrétiser des ambitions bien légitimes.

Je souhaite aussi remercier tous les étudiants qui ont eu à subir depuis maintenant de nombreuses années et avec plus ou moins de bonheur mes enseignements et pour m'avoir obligé à me remettre en question en permanence sur ma façon d'aborder la physique en général. Ils m'ont apporté cette respiration, à mon sens indispensable, qui conforte année après année mon choix assumé de devenir enseignant-chercheur. Même, s'il faut bien l'avouer, les contraintes d'emploi du temps qu'impose le rythme du calendrier universitaire sont parfois pesantes surtout dans la période actuelle d'analyse des données de *Fermi*.

Pour finir, je voudrais remercier tous ceux qui moins directement intéressés par la physique me supportent depuis des années, ils se reconnaîtront... Je les prie de m'excuser pour les explications un peu trop longues et pas toujours très claires des phénomènes physiques du quotidien qui ont une fâcheuse tendance à plomber l'ambiance des fins de soirées entre amis. Mais d'un autre côté, ils me connaissent depuis longtemps pour la plupart, ils devraient savoir qu'il ne faut pas poser ce genre de questions à un physicien...

J'espère qu'ils ne m'en veulent pas trop...

Première partie

Pulsars gamma à haute énergie



Introduction

Cette partie du document a comme fil rouge l'astronomie gamma et plus particulièrement l'étude des pulsars dans ce domaine de longueurs d'ondes.

Le document n'a pas pour objectif de revenir sur les notions fondamentales abordées celles-ci étant traitées très en détail dans l'ensemble des thèses soutenues au sein du groupe Astroparticules du CENBG (à commencer par la mienne pour ce qui est de la détection des gerbes atmosphériques). Le propos est plus d'illustrer la façon dont s'est insérée ma contribution au domaine de recherche durant les quinze dernières années.

Bien que le groupe Astroparticules du CENBG soit acteur d'une partie de l'histoire récente de cette discipline, celui-ci, fondé en 1995, a vu le jour au moment où l'observation du ciel gamma après 2 décennies d'exploration plus ou moins fructueuse vient de vivre 2 révolutions majeures.

Lancé au début des années 90, le satellite EGRET révèle un ciel gamma beaucoup plus riche que celui entr'aperçu par les missions précédentes SAS-2 et COS-B. Des 25 sources détectées jusqu'alors, on passe rapidement à plus de 100 pour atteindre près de 300 (271 plus exactement) à la fin des années 90. EGRET ouvre alors une fenêtre sur les phénomènes les plus violents de l'Univers.

Durant la même période, les télescopes Cerenkov détectent les premières sources au TeV validant une technique imaginée presque 30 ans plus tôt. Si les débuts peuvent sembler modestes, les sources visibles se comptant sur les doigts d'une main, l'évolution sera rapide. En moins de 15 ans l'astronomie gamma au sol est devenue un outil indiscutable de l'observation des phénomènes extrêmes dans l'Univers.

Lors de mon recrutement en 1995, l'intégration à un groupe d'expérimentateurs n'avait rien d'évident puisque mes travaux de thèse sur la simulation des gerbes atmosphériques me cataloguaient plutôt du côté des théoriciens, ou plus exactement des numériciens. Les résultats obtenus par mes simulations trouvaient alors leur application dans les expériences de détection au sol des particules issues de ces gerbes atmosphériques, le domaine d'énergie concerné se situant autour du « genoux » du spectre des rayons cosmiques (10^{15} eV) et au-delà, donc bien loin du GeV.

C'est cependant par la simulation que j'ai fait mes premiers pas en astronomie gamma, la reconstruction des directions des rayons cosmiques frappant l'atmosphère à partir de la détection au sol des muons secondaires des gerbes atmosphériques qu'ils engendrent, coeur de mon sujet de thèse (Dumora, 1994), n'étant au final pas très différente de la reconstruction des directions d'arrivée des gamma cosmiques à partir des photons du rayonnement Cerenkov détectés par les instruments dédiés à l'astronomie gamma au sol. Dans les deux cas, la particule détectée chemine en ligne droite de son point de production dans l'atmosphère jusqu'au détecteur...

Cet apprentissage s'est fait dans un premier temps sur l'imageur Cerenkov CAT, déjà sur le site de Thémis dans les Pyrénées Orientales. C'est aussi sur CAT que j'ai été confronté pour la première fois aux prises de données à travers les shifts nocturnes mais aussi à l'analyse de celles-ci, mon expérience de spécialiste des codes de simulation m'ayant éloigné des données réelles. Les longues nuits passées à suivre la progression silencieuse du télescope en compagnie de spécialistes de l'astronomie γ , m'ont permis d'accélérer ma transition du domaine des rayons cosmiques d'Ultra Haute Énergie vers l'astronomie des photons en dessous du TeV.

Avec le démarrage du projet CELESTE en 1995, cette activité devant l'ordinateur s'est rapidement enrichie d'un véritable travail expérimental. La phase exploratoire a débuté avec les premières études sur le terrain des propriétés optiques des héliostats de l'ancienne centrale solaire Thémis, éléments essentiels devant constituer l'optique primaire du futur détecteur. Elle s'est terminée en 1998 par la conclusion de la Phase 0 de CELESTE (Giebels , 1998; Giebels et al., 1998) et la détection des premiers pulses Cerenkov provenant de gerbes atmosphériques engendrées non pas par des gamma mais par des protons, validant tout de même le principe d'un échantillonneur Cerenkov à tour.

La très petite taille de la collaboration CELESTE a nécessité une implication de chacun dans tous les domaines de la physique expérimentale, de l'électronique à l'instrumentation et à l'acquisition de données. C'est à cette occasion que je suis probablement réellement devenu expérimentateur. C'est aussi durant cette période que je me suis intéressé à l'acquisition de données, assurant dans un premier temps une partie de la maintenance du logiciel de CELESTE, puis allant vers le développement, en particulier lors de la mise en place du sous système de détection de l'émission optique du pulsar du Crabe. Cette expérience m'a ensuite permis de développer les acquisitions de données des faisceaux tests de GLAST pilotés par le groupe du CENBG expérience qui m'a conduit à prendre en charge une grande partie des enseignements de ce domaine au sein des différentes spécialités du Master de physique de Bordeaux I.

Si CELESTE n'a conduit qu'à des résultats assez modestes sur le plan scientifique, elle n'en demeure pas moins une étape essentielle de l'évolution du groupe astroparticules vers la thématique des pulsars γ . En effet, la difficulté d'analyse des données à basse énergie nous a conduit à développer une expertise sur les différents aspects de la datation absolue des photons qui s'est révélée être un atout essentiel dans la préparation de la mission GLAST. CELESTE fût aussi l'occasion d'initier la discussion avec les radioastronomes de l'observatoire de Nançay préfigurant ainsi les échanges permanents actuels entre la communauté des pulsaristes radio et γ . Sans l'expérience acquise sur CELESTE, il n'est pas du tout évident que la mise en route sur une collaboration aussi large de GLAST ait pu se faire aussi naturellement. La compréhension de points critiques pour la réussite de la mission, en ce qui concerne les pulsars en particulier, nous a permis de saisir les opportunités d'assumer des tâches clés dans la collaboration et d'asseoir ainsi notre légitimité dans la communauté des γ d'une part et dans celle des pulsaristes radio d'autre part.

Cette position stratégique à l'interface des deux communautés a permis une exploitation rapide et efficace des données de *Fermi* par le groupe bordelais, travail concrétisé par la participation active des membres du groupe à la rédaction d'une fraction importante des papiers pulsars de *Fermi* et à la soutenance de trois thèses (Guillemot , 2009; Parent , 2009; Grondin , 2010) dont la qualité a été reconnue par la communauté scientifique directement en prise avec l'astronomie γ (les trois nouveaux docteurs sont actuellement en post-doc au sein d'équipe de renommée internationale) et au-delà (la thèse de Lucas Guillemot a reçu le prix de la meilleure thèse 2009 de l'Université de Bordeaux).

Après deux ans d'exploitation des données de *Fermi*, le bestiaire des pulsars émettant en γ avoisinant désormais la centaine, de nouvelles perspectives s'ouvrent quant à l'étude des mécanismes d'émission de ces sources. Des tendances générales mises en évidence dans le premier catalogue de pulsars de *Fermi* il ressort une certaine unité dans les caractéristiques des objets, cependant trop d'exceptions demeurent encore après ce premier examen pour tirer des conclusions quant à un modèle unifié de pulsars γ . La deuxième phase d'exploitation de *Fermi* devrait s'y attacher profitant des possibles 8 années supplémentaires de données pour approfondir les études de population et mener des études fines sur les émetteurs les plus intenses.

Le manuscrit s'articule autour de quelques articles pour lesquels j'ai eu une contribution active et qui reflètent à mon sens à la fois mon parcours durant ces quinze années et plus modestement l'évolution du domaine.



Bibliographie

Dumora D., Thèse Université Bordeaux I, 1994

Giebels B., Thèse Université Bordeaux I, 1998

Giebels, B., et al., 1998, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 412, 329

Guillemot, L., 2009, Thèse Université Bordeaux I

Parent, D., 2009, Thèse Université Bordeaux I

Grondin, M. H., 2010, Thèse Université Bordeaux I

Chapitre 1

Astronomie Gamma et Pulsars au milieu des années 90

Les années 90 voient l'avènement d'une double révolution pour l'astronomie gamma, le début de la décennie a vu d'une part le lancement du CGRO embarquant 4 instruments dédiés à l'observation du ciel à haute énergie (BATSE chargé de la détection des sursauts gamma, OSSE et COMPTEL pour les gamma de basse énergie, EGRET pour la partie haute énergie du spectre gamma jusqu'à 30 GeV) et d'autre part les toutes premières détections de sources gamma à haute énergie depuis le sol, preuve, après 20 ans de tâtonnements de la viabilité de la technique d'observation des cascades Cerenkov atmosphériques pour l'astronomie gamma haute énergie. Chacun des résultats obtenus apporte une nouvelle vision du ciel gamma mais est surtout accompagnée de son lot de questions. Des pistes s'ouvrent mais peu de réponses définitives sont apportées par ces instruments. Quels sont les sites d'accélération, quels mécanismes sont en jeu, quel lien existe-t-il entre ces accélérateurs cosmiques et la production des rayons cosmiques... ?

1.1 Les précurseurs

1.1.1 SAS-2, une vision furtive du ciel gamma.

Bien qu'éphémère, puisqu'elle dura moins de 7 mois (du 19 novembre 1972 au 8 juin 1973), la mission du Small Astronomy Satellite 2 (SAS-2) constitue le premier vrai succès de l'astronomie gamma après une décennie d'échecs dus en grande partie à la trop faible sensibilité des détecteurs. Si SAS-2 a permis pour la première fois de construire une carte du ciel γ , 2 des résultats les plus remarquables de la mission demeure la mise en évidence de l'émission γ de 2 pulsars déjà connus pour émettre à haute énergie et la découverte de la source inconnue γ 195 5.

1.1.2 Premiers résultats pour l'astronomie gamma

La faible sensibilité de SAS-2 et sa très courte durée de vie n'a permis de collecter au mieux que quelques centaines de photons sur les sources les plus intenses. Cette faible statistique a cependant

permis de mettre en évidence quelques caractéristiques des sources gamma :

- Certains pulsars apparaissent comme les sources les plus intenses du ciel gamma.
- L'émission gamma pulsée est mise en évidence (Thompson et al., 1975, 1977).

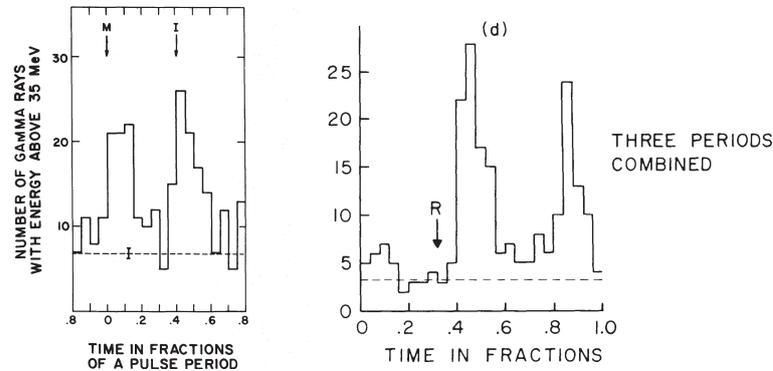


FIG. 1.1 – Phasogrammes du pulsar du Crabe à gauche et de celui de Vela à droite obtenus par SAS-2.

Comme le montrent les courbes de lumière du Crabe à gauche et de Vela à droite (1.1), la présence d'un phasogramme non plat désigne l'étoile à neutrons en rotation rapide et son environnement immédiat en corotation comme source du rayonnement gamma.

- Le spectre en loi de puissance décroissante avec l'énergie semble être la règle, comme le montre le spectre du Crabe (1.2) (Thompson et al., 1977).

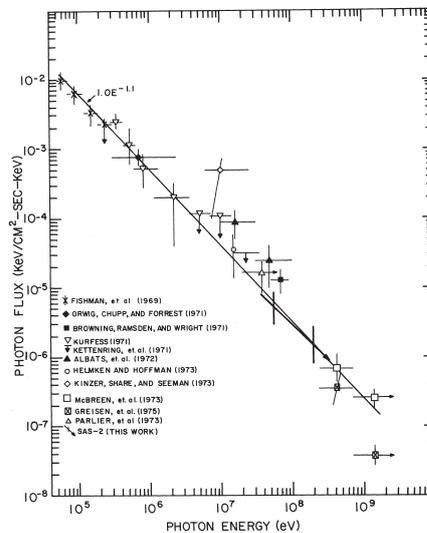


FIG. 1.2 – Spectre du Crabe obtenu par SAS-2

La présence d'un spectre non thermique signe l'émission de particules accélérées.

- Certaines sources ne semblent émettre qu'à haute énergie à l'image de γ 195 5 (Thompson et al., 1977) (la 1.3 montre un excès significatif de gamma à la position de la source), qui est inconnue aux autres longueurs d'ondes.

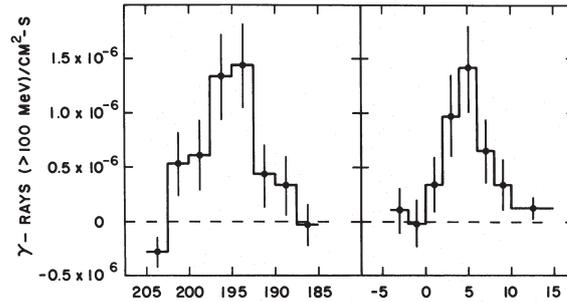


FIG. 1.3 – Excès de comptage sur la source $\gamma 195 5$, mis en évidence par SAS-2

1.1.2.1 Les dangers de la faible statistique

Malgré les informations apportées par SAS-2 sur le ciel gamma, un certain nombre de résultats n'a pas trouvé de confirmation par la suite. De manière générale, la faible statistique représente un danger pour l'astronomie gamma. Ce danger prend tout son sens dans la recherche de pulsations, puisque les photons sont alors distribués sur la période de rotation réduisant d'autant la statistique par bin. Il convient alors de se montrer très prudent et rigoureux avant de déclarer une source comme candidat à l'émission pulsée. Le danger est encore accru lorsqu'on essaie d'établir l'émission pulsée à partir de listes de candidats, puisque au final la probabilité de détection fortuite se retrouve multipliée par le nombre de « candidats » pulsars étudiés (Ogelman et al., 1976; Thompson et al., 1983).

Ceci est illustré par les 2 candidats pulsars gamma PSR B1818-04 et PSR B1747-46 proposés par SAS-2 qui n'ont pas trouvé de confirmation.

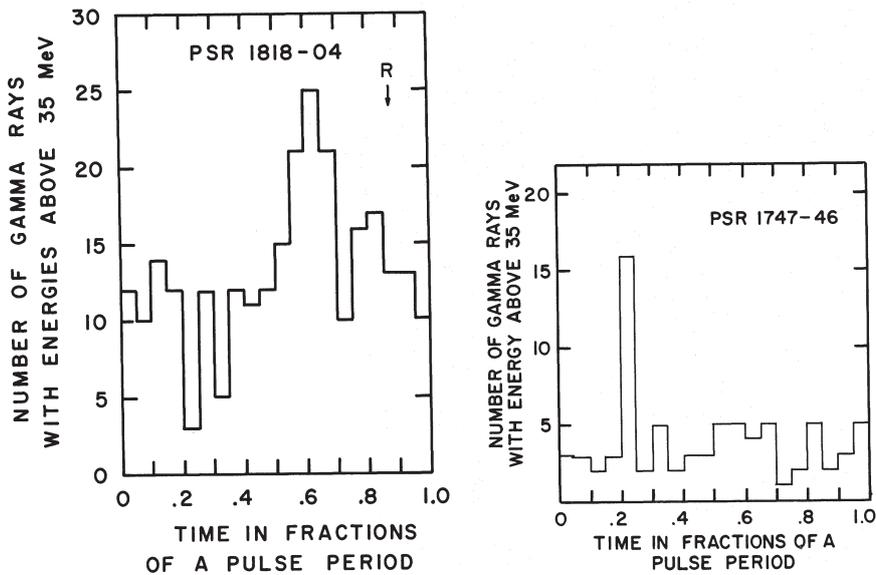


FIG. 1.4 – PSR B1818-04 et PSR B1747-46 deux candidats pulsars γ non confirmés par la suite.

1.1.3 COS-B, une fenêtre s'ouvre sur les sources galactiques.

COS-B, lancé le 9 août 1975, première mission de l'agence spatiale européenne s'est attaché, pendant pratiquement 7 ans à cartographier en détail l'émission γ de la Galaxie. Le catalogue (Swanenburg et al., 1981) révèle 22 sources ponctuelles appartenant au plan Galactique. Parmi celles-ci seules 3 seront identifiées à des objets connus par ailleurs, 2 sont les pulsars de Vela et du Crabe. Un sera identifié comme tel plus tard, Geminga, la mystérieuse source γ 195 5 détectée par SAS-2.

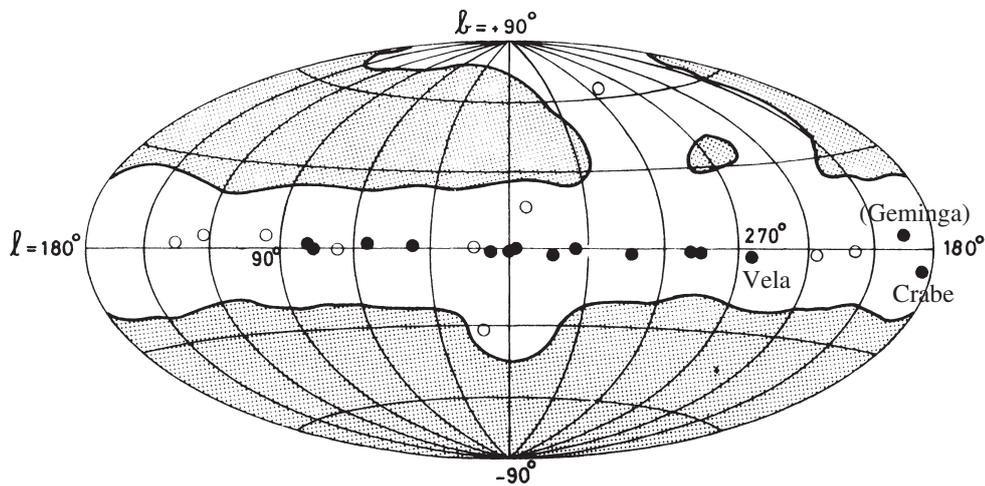


FIG. 1.5 – Carte du Ciel γ par COS-B

1.1.3.1 L'apport de COS-B pour les pulsars γ .

Bien que COS-B n'ait pas mis en évidence de nouveaux pulsars gamma, l'augmentation très significative de la statistique obtenue sur les sources connues a permis d'affiner sensiblement les résultats obtenus par SAS-2 sur le Crabe et Vela (Bennett et al., 1977).

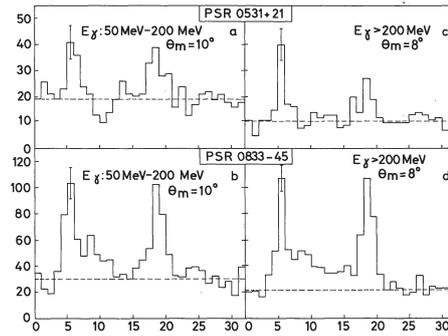


FIG. 1.6 – Phasogrammes du pulsar du Crabe et de Vela obtenus par COS-B (Bennett et al., 1977)

De la même façon, les spectres (Bennett et al., 1977) commencent à livrer de nouvelles informations, si celui du Crabe (à gauche) semble toujours suivre une simple loi de puissance décroissante avec l'énergie, celui de Vela à droite laisse apparaître ce qui pourrait être interprété comme une coupure à haute énergie.

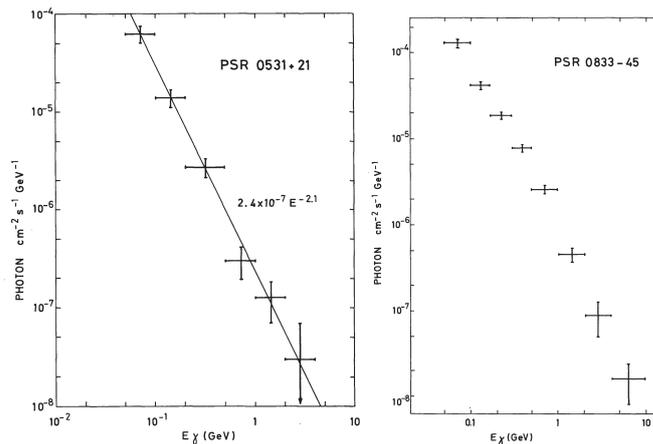


FIG. 1.7 – Spectres du pulsar du Crabe et de Vela obtenus par COS-B (Bennett et al., 1977)

En revanche, l'étude systématique de quelques 100 pulsars (Buccheri et al., 1983) sur les 300 alors connus en radio n'a pas permis la mise en évidence d'un seul nouvel émetteur de rayons gamma pulsés, soulignant ainsi les 2 difficultés majeures du domaine.

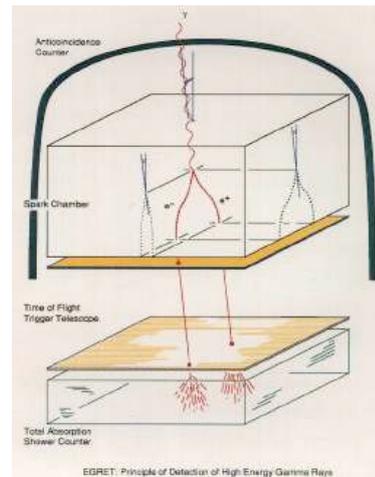
1. Avoir une sensibilité suffisante afin d'accumuler la statistique nécessaire à s'extraire du bruit de fond.
2. Posséder des éphémérides radio contemporaines donnant donc des paramètres rotationnels variables sur la période d'observation de la source afin de pouvoir « empiler » les photons avec la bonne phase. Des paramètres rotationnels obsolètes conduisent à un étalement rapide du phasogramme, et donc à la disparition des pulses.

1.2 EGRET, la révolution dans le ciel gamma.

EGRET embarqué à bord du Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) en compagnie de 3 autres détecteurs (BATSE, OSSE et COMPTEL) est lancé le 5 avril 1991, durant 9 ans de mission il va révéler la richesse du ciel gamma à haute énergie.

1.2.1 Retour sur la détection embarquée

Comme tous les détecteurs gamma à haute énergie, le principe de détection d'EGRET repose sur la conversion du photon incident en paire électron-positon dont on va pouvoir mesurer l'interaction avec la matière. La mesure des paramètres de la cascade électromagnétique se développant dans le détecteur, permet d'obtenir après reconstruction la position dans le détecteur, la direction d'arrivée et l'énergie de la particule. Le système de datation des événements associé permet quant à lui de remonter au temps d'arrivée du photon sur le détecteur.



EGRET bénéficie donc des avantages de la détection directe des rayons gamma, puisque ce sont directement les particules issues de la conversion du gamma en paire électron-positon qui vont laisser une information dans le détecteur, le bouclier d'anticoïncidence permettant quant à lui la réjection du bruit de fond constitué par les rayons cosmiques chargés.

Cependant, du fait de la limitation en volume et en masse imposée par la mise sur orbite, la surface de collection d'EGRET était réduite à $\sim 1500 \text{ cm}^2$. Elle constitue malgré tout un progrès considérable si on la compare avec celle de ces 2 prédécesseurs puisque EGRET apparaît comme étant 20 fois plus sensible que COS-B au-dessus de 100 MeV (le flux minimal donné dans le tableau est à comprendre comme le flux minimal détectable avec un niveau de confiance de 5σ pour une couverture complète du ciel sur 1 an).

	SAS-2	COS-B	EGRET
Surface efficace de détection	540 cm^2	50 cm^2	1500 cm^2
Durée de la mission	7 mois	6 ans et 8 mois	9 ans et 2 mois
Flux minimal $E > 100 \text{ MeV}$		$10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$5,3 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

1.2.2 Les résultats révèlent un nouveau ciel gamma

En 1995, la collaboration EGRET produit le second catalogue de sources gamma (Thompson et al., 1995), il comprend 129 sources, dont 40 noyaux actifs de galaxie (AGN), 5 pulsars et 1 éruption solaire, 71 des sources du catalogue ne sont pas identifiées.

Deux autres pulsars, PSR B1706-44 et PSR B1055-52 sont identifiés dans les données EGRET.

Le sixième pulsar PSR B1951+32 présent dans le second catalogue n'apparaît pas dans le troisième.

Enfin, un septième pulsar γ , PSR B1509-58, non détecté à haute énergie par EGRET, l'est par COMPTEL (Kuiper et al., 1999) détecteur aussi embarqué sur CGRO et observant dans la gamme 0,8 – 30 MeV.

Le bilan de CGRO pour les pulsars est donc de 7 (6 vus jusqu'aux énergies d'EGRET, 1 seulement vu à basse énergie), à cela il faut ajouter 3 autres détections marginales PSR B1046-58, PSR B0656+14 et PSR J0218+4232 qui ouvre d'importantes perspectives sur l'émission γ supposée (ou non) des pulsars milliseconde. Il est à noter que tous les 3 seront confirmés comme détections fermes par *Fermi* (Abdo et al., 2010a, 2009b).

Les résultats principaux d'EGRET ont été résumés dans Thompson (2008).

1.2.3.1 Les courbes de lumière

La plus grande surface effective de collection d'EGRET a permis d'obtenir des courbes de lumière (Phasogramme) d'une grande précision, le système de datation des évènements et l'utilisation d'éphémérides contemporaines des observations permettant de comparer les phasogrammes à différentes longueurs d'ondes.

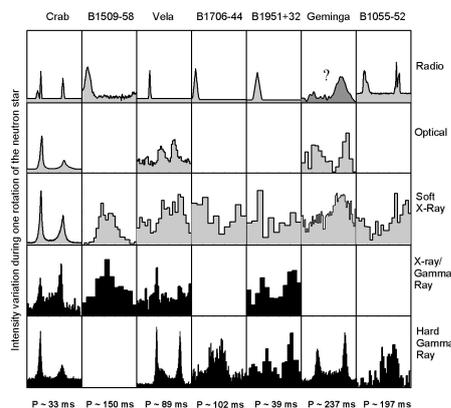


FIG. 1.9 – Courbes de lumières à différentes longueurs d'ondes (radio, optique, X et gamma) pour les 7 pulsars détectés par CGRO.

Ces courbes de lumière apparaissent différentes avec la longueur d'onde trahissant une dépendance de l'émission avec l'énergie. Cette dépendance est non seulement géométrique due à une forme de faisceau variable avec l'énergie (pic étroit en radio, doubles pics plus larges en gamma traduisant différentes formes du cône d'émission) mais aussi liée à la physique des processus puisque des spectres thermiques peuvent être détectés en rayons X alors que les spectres en loi de puissance caractéristiques de l'émission de particules accélérées sont observés en radio et en gamma.

1.2.3.2 Les spectres

Les spectres observés pour les pulsars d’EGRET montrent que l’essentiel de l’énergie émise par ces astres l’est dans le domaine des rayons γ .

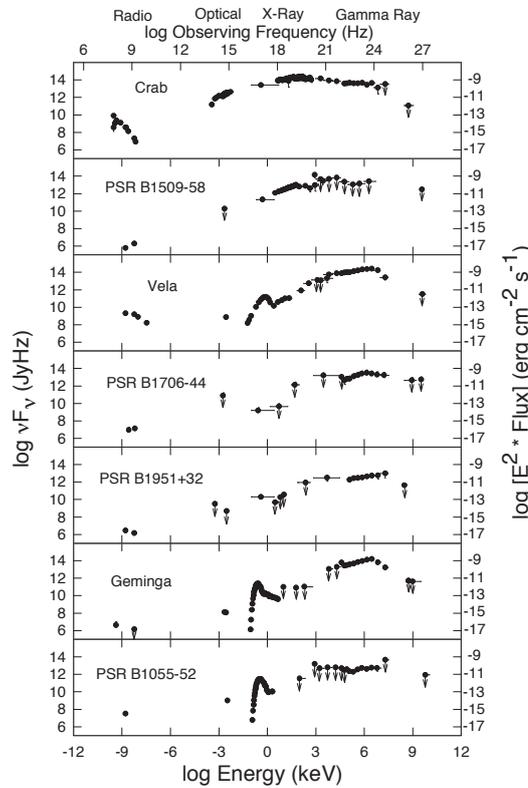


FIG. 1.10 – Spectre en énergie des 7 pulsars détectés par CGRO

Hormis pour le Crabe et PSR B1951+32, les spectres laissent entrevoir une coupure au-delà de quelques GeV, cette coupure a été reliée au champ magnétique à la surface de l’étoile à neutrons, hypothèse qui semble être confirmée par l’absence d’émission gamma à haute énergie observée pour PSR B1509-58 qui possède le champ magnétique le plus intense des 7.

Cette coupure des spectres confirmée comme nous le verrons plus loin par la non-détection au sol des pulsars gamma, est un paramètre essentiel des modèles d’émission haute énergie. La forme de la coupure permettant de discriminer entre une émission proche de la surface de l’étoile et une émission dans la magnétosphère externe.

Malheureusement, la faible statistique à haute énergie, due d’une part à la faiblesse du flux mais aussi au fait que les particules rétrodiffusées de la cascade électromagnétique se développant dans le détecteur pour les événements à haute énergie activent le veto, n’a pas permis à EGRET de poser des conclusions sur la forme de cette coupure.

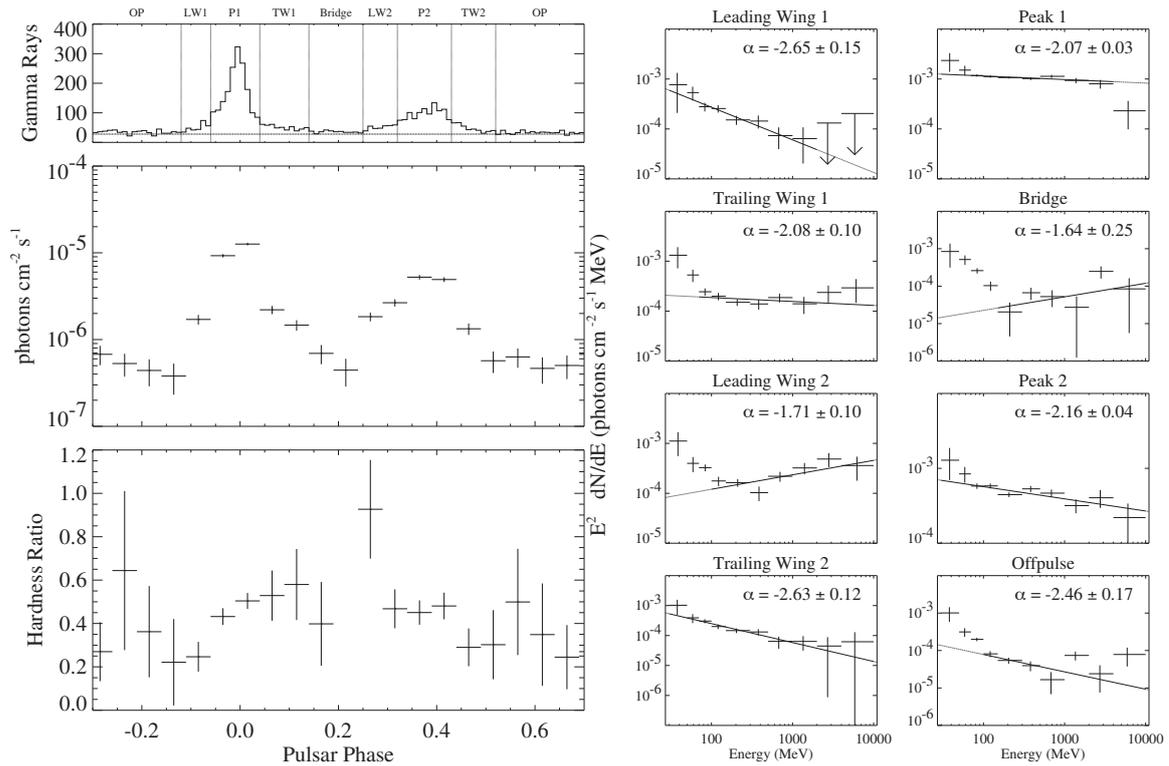


FIG. 1.11 – Courbe de lumière (à gauche) et spectre par intervalle de phase (à droite) pour le pulsar du Crabe (Fierro et al., 1998).

1.2.3.3 La spectroscopie résolue en phase

La statistique importante sur les pulsars les plus lumineux a permis l'étude spectrale des pulsars dans chaque intervalle de phase (Fierro et al., 1998) révélant ainsi non seulement une variation de flux en fonction de la position dans la rotation du pulsar, ce qui était attendu mais aussi une variation d'indice spectral, mettant ainsi en évidence la présence de plusieurs populations de particules accélérées contribuant à l'émission du pulsar.

Cette approche de spectroscopie résolue en phase est plus à même de traduire les modèles d'émission qu'une étude spectrale globale de l'ensemble de la rotation du pulsar.

La faible surface de collection du détecteur ainsi que l'incertitude importante sur la surface effective de collection au-delà quelques GeV rend les points haute énergie peu dignes de confiance.

Néanmoins, une tendance générale se dégage pour les pulsars. Il semble que leur spectre coupe à haute énergie. Ce comportement est conforme aux prédictions des modèles. Cependant le faible nombre de photons collectés à haute énergie ne permet pas de discriminer entre les modèles, leur principale distinction observationnelle étant justement la forme de la coupure spectrale à haute énergie.

1.2.3.4 L'efficacité de conversion

Enfin, malgré le très faible nombre de pulsars détectés, une tendance semble se dégager des résultats d'EGRET quant à la capacité des pulsars d'émettre des gamma. Il apparaît que le potentiel au niveau des lignes de champ ouvertes et la fraction d'énergie perdue par ralentissement convertie en émission gamma sont liés 1.12, fixant de fait une limite théorique à l'émission quand cette efficacité devient de l'ordre de l'unité.

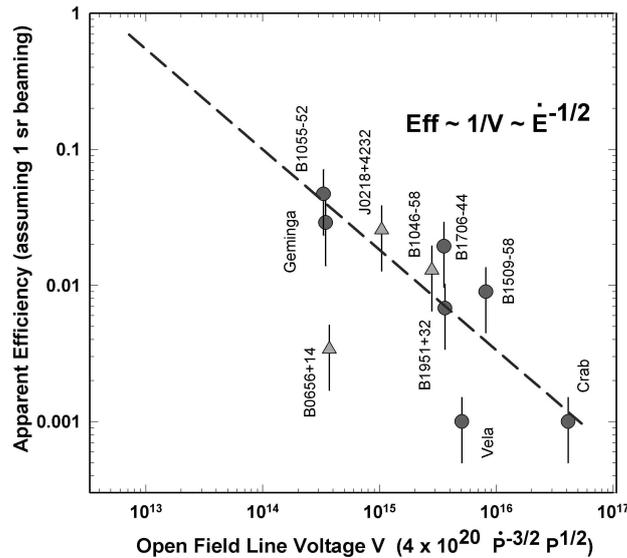


FIG. 1.12 – Dépendance entre efficacité de conversion de l'énergie perdue par rotation en rayonnement gamma et potentiel des lignes de champ ouverte pour les pulsars CGRO.

1.2.4 Pour conclure sur EGRET

Malgré la somme d'informations importante qu'a apporté EGRET sur l'émission gamma des pulsars, la faiblesse du nombre d'objets détectés fait de chacun d'eux une exception dans un domaine (spectre, forme de la courbe de , ...). De plus, la faible statistique à haute énergie même si elle révèle une coupure ne permet pas d'en donner la forme, élément essentiel pour la discrimination des modèles d'émission proposés. Aucun d'entre eux n'est définitivement écarté par les contraintes apportées par EGRET.

Les tendances entrevues ne permettent donc que d'ouvrir les pistes d'étude pour les futurs détecteurs qui devront avoir une bien meilleure sensibilité afin d'une part d'augmenter sensiblement le nombre de sources détectées et d'autre part d'augmenter la statistique de photons pour les objets individuels, en particulier pour la partie à plus haute énergie.

1.3 Le Ciel vu de la Terre : premiers succès des détecteurs Cerenkov.

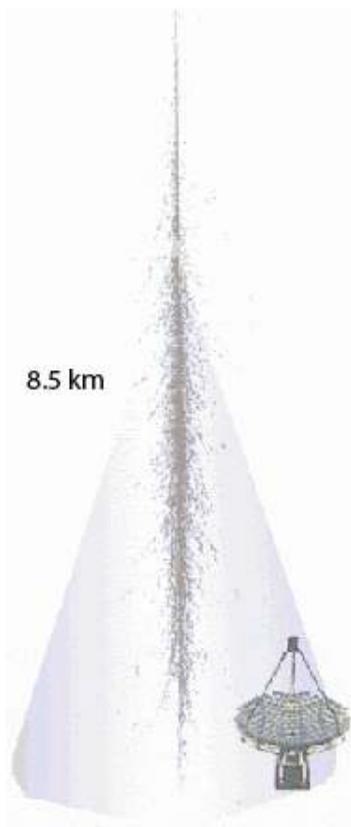
Les spectres en loi de puissance décroissante observés à haute énergie ont pour conséquence une diminution dramatique du flux de particules observées avec l'énergie de celles-ci. Ceci conduit à la perte de sensibilité des détecteurs embarqués au-delà de quelques GeV. De plus, l'opacité de l'atmosphère aux rayons gamma interdit de construire des télescopes de grande surface au sol comme en radio ou en optique et de profiter ainsi d'une surface de collection quasi illimitée. Le photon gamma interagit avec l'atmosphère en produisant une cascade de particules diluant ainsi l'information quant à la nature, l'énergie et la direction d'arrivée de la particule incidente.

Les avantages de l'observation embarquée sont évidents puisque la particule est détectée directement. Cela facilite l'identification et permet une reconstruction plus simple de l'évènement, limitant donc les sources de bruit de fond. Cependant, la limitation du volume et de la masse embarquée contraint de façon drastique la résolution angulaire et la surface de collection, conduisant donc au final à une faible sensibilité. Une détection directe implique une surface de collection nécessairement inférieure à la surface physique du détecteur.

L'idée de la détection indirecte du rayonnement cosmique depuis le sol n'est pas nouvelle puisque c'est à partir du sol qu'a été mise en évidence cette émission haute énergie au début du XX^{ème} siècle. L'avantage de la détection indirecte est que la surface de collection est beaucoup plus grande que la surface physique du détecteur, l'information sur l'évènement étant distribuée à travers l'ensemble des particules secondaires de la cascade se développant dans l'atmosphère. Le prix à payer est la détection de suffisamment de particules secondaires pour pouvoir reconstruire l'évènement. Ainsi, les détecteurs au sol de cascades atmosphériques souffrent-ils d'un seuil en énergie très élevé (quelques TeV), les cascades de plus basse énergie étant absorbées dans l'atmosphère et n'atteignant donc pas le détecteur.

Cette difficulté peut être assez largement contournée en observant, non pas les particules secondaires elles mêmes, mais le rayonnement Cerenkov associé au développement de la cascade dans l'atmosphère. Cette technique est d'autant plus intéressante que la quantité de rayonnement Cerenkov émis par l'ensemble des particules de la cascade atmosphérique est directement liée à l'énergie et à la nature de la particule primaire entrant dans l'atmosphère, la forme de la gerbe Cerenkov étant quant à elle caractéristique de la nature de la particule. Il est étonnant de constater que la détection de quelques eV (photons dans le visible) permet d'avoir une information fiable sur une particule plusieurs centaines de milliards de fois plus énergétique.

La technique de détection de la gerbe Cerenkov a donc pour avantage une grande surface de collection, largement supérieure à la surface physique du détecteur puisque ce n'est pas le photon gamma qui est directement détecté mais la gerbe Cerenkov associée qui s'étend sur plusieurs kilomètres dans le ciel. On arrive à des surfaces de collection de plusieurs milliers de m² pour un détecteur de quelques dizaines de m². De plus, le très grand bras de levier, que constitue l'atmosphère permet une meilleure résolution angulaire que pour les satellites. En revanche, le prix à payer est une réjection du fond hadronique plus difficile et un seuil en énergie beaucoup plus élevé.



Si la technique a été décrite dès les années 60, la grande percée dans le domaine n'a eu lieu qu'en 1989 avec la détection de la nébuleuse du Crabe au TeV par l'expérience Whipple (Weekes et al., 1989), un imageur Cerenkov, donc un détecteur reconstruisant l'image du développement de la cascade Cerenkov dans l'atmosphère.

Ces presque 30 ans d'attente s'expliquent par la difficulté de la méthode autant du côté de la technique observationnelle que de celui de l'analyse des données.

La détection du flash Cerenkov demande une électronique d'acquisition très rapide afin de pouvoir extraire le signal lumineux d'une durée de quelques ns du bruit de fond constitué par la lumière du ciel nocturne.

Un évènement γ une fois détecté est noyé dans le bruit de fond des gerbes Cerenkov associées à l'interaction des protons du rayonnement cosmique dans l'atmosphère, évènements plus nombreux de plusieurs ordres de grandeurs ce qui rend l'identification des évènements γ particulièrement délicate.

FIG. 1.13 – Schéma de principe d'un imageur Cerenkov

Cette première détection est bientôt confirmée par ASGAT (Goret et al., 1993) et Themistocle (Baillon et al., 1991) 2 expériences installées sur le site de l'ancienne centrale solaire Thémis à Targassonne dans les Pyrénées Orientales. Elles n'utilisent pas la technique d'imagerie avec un télescope unique, mais un multi-détecteur échantillonnant le front d'onde Cerenkov.

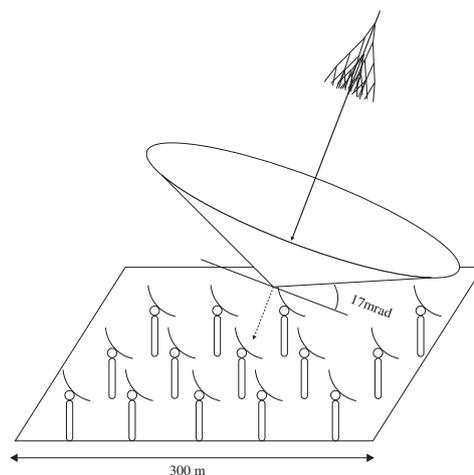


FIG. 1.14 – Principe d'un échantillonneur de front d'onde Cerenkov du type de celui des expériences ASGAT et Themistocle.

Rapidement les télescopes Cerenkov donnent des résultats fiables et reproductifs à très haute énergie à partir de 250 GeV. En 1995, le catalogue Cerenkov n'en demeure pas moins modeste puisque seules quelques sources sont détectées et confirmées à ces énergies, la nébuleuse du Crabe et 2 blazars Mrk421 et Mrk501. Aucun pulsar n'est détecté à aussi haute énergie.

1.4 Conséquences observationnelles

1.4.1 Un trou dans le spectre

Le changement de technique d'observation rendu nécessaire par les spectres en loi de puissance décroissante des sources gamma a pour conséquence un trou dans le spectre d'observation du ciel. En effet, la bande d'énergie allant grossièrement de 10 GeV à 300 GeV demeure inaccessible à l'observation.

Or, ce que semblent indiquer les spectres haute énergie observés par EGRET d'une part, et la grande différence en nombre de sources entre le ciel gamma au GeV et celui observé au sol, c'est qu'une physique riche se cache dans la zone inexplorée.

La règle commune pour les spectres des sources gamma étant la loi de puissance, l'accès à la partie haute du spectre ne peut se faire qu'en augmentant la sensibilité des détecteurs ce qui implique pour les instruments embarqués une plus grande surface de collection, et pour les instruments au sol une meilleure réjection du fond hadronique.

De plus, dans le cas des pulsars la coupure spectrale observée dans le domaine du GeV implique nécessairement une diminution du seuil en énergie des expériences au sol.

1.5 En attendant GLAST...

1.5.1 Succéder à EGRET

Fort de la révolution apportée par EGRET dans la connaissance du ciel gamma et des évidentes limitations du détecteur dans sa gamme d'énergie supérieure, le successeur d'EGRET en ce milieu des années 90 est déjà programmé. Ce sera GLAST dont le lancement est envisagé pour 2005.

Les caractéristiques principales du détecteur doivent être les suivantes :

- Surface de collection très sensiblement supérieure à celle d'EGRET afin d'étendre l'exploration du ciel gamma à des sources plus faibles.
- Contrairement à EGRET qui est un instrument de pointé, GLAST bénéficiera d'un large champ de vue afin de pouvoir observer en mode de fonctionnement normal, les phénomènes transitoires comme les sursauts gamma ou les flares d'AGN.
- Enfin, la gamme d'énergie est supposée s'étendre jusqu'à 300 GeV afin de couvrir la zone aveugle du spectre et permettre une éventuelle calibration croisée avec les instruments au sol.

1.5.2 CELESTE : baisser le seuil rapidement

1.5.2.1 Du côté des détecteurs Cerenkov

Si les premiers résultats obtenus au milieu des années 90 par les imageurs Cerenkov peuvent laisser imaginer une seconde génération d'instruments de très grande sensibilité permettant de détecter la partie haute des spectres en loi de puissance des sources gamma, ils ne proposent pas de solution réelle, dans un avenir proche tout au moins, pour détecter les pulsars gamma. En effet, les coupures dans l'émission observées autour de quelques GeV pour les pulsars d'EGRET interdisent tout espoir de détection d'une émission pulsée au seuil des imageurs Cerenkov (250 GeV). Une baisse d'un facteur 10 du seuil de ces détecteurs bien qu'envisagée à l'époque était peu réaliste à court terme puisque nécessitant la construction de structures de type imageur de très grande taille (c'est ce que fera l'expérience MAGIC dont la première prise de données date de 2004). En effet, en dessous de la centaine de GeV, la taille angulaire des gerbes Cerenkov devient extrêmement petite donnant une image difficilement identifiable et discriminable des sources de bruit de fond dans la caméra des imageurs.

La nécessaire baisse du seuil des détecteurs au sol passe donc par une augmentation très significative de la surface de collection du détecteur afin que celui-ci soit sensible au faible nombre de photons Cerenkov émis par les cascades atmosphériques produites par des gamma d'énergie sensiblement inférieure à 100 GeV.

Une solution envisagée alors est, non plus de faire l'image de la gerbe Cerenkov, mais d'échantillonner le front d'onde avec un très grand nombre de miroirs. L'idée est alors de réutiliser la très grande surface de miroirs des centrales solaires construites dans les années 80 et dont l'exploitation a rapidement été abandonnée.

1.5.2.2 Utiliser les centrales solaires à tour pour échantillonner le front d'onde Cerenkov

L'idée d'échantillonner le front d'onde Cerenkov plutôt que de reconstruire l'image de la gerbe n'est pas nouvelle puisque la technique a déjà été utilisée avec un certain succès par les expériences AS-GAT et Themistocle autour du TeV. Cependant, dans ce cas, l'objectif clairement affirmé est d'aller défricher la bande spectrale inexplorée. Les projets (CELESTE en France, STACEE et Solar-2 aux États-Unis, GRAAL en Espagne) s'appuient sur la réutilisation d'une partie importante des infrastructures des centrales solaires à tour construites dans les années 80 suivant ainsi l'idée émise en 1990 par Tumer et al. (1990).

- La très grande surface du détecteur permet de collecter une partie importante des photons de la gerbe Cerenkov et par conséquent de baisser le seuil en énergie.
- Une grande partie des infrastructures étant construites, la mise en oeuvre de ce type d'expérience est extrêmement rapide en regard de l'échelle industrielle de l'installation.
- L'optique est adaptée. En effet, aussi surprenant que cela puisse paraître, la qualité optique des héliostats d'une centrale solaire est suffisante pour cette astronomie puisqu'il ne s'agit pas de faire une image d'un objet situé à grande distance mais simplement de focaliser un rayonnement produit dans l'atmosphère à une dizaine de kilomètres au-dessus du site. De plus, la taille angulaire des gerbes Cerenkov est très voisine de la taille angulaire apparente du soleil ce qui conduit à des conditions de focalisation des héliostats « naturellement » convenables pour l'astronomie Cerenkov.

- Les héliostats servant d’optique primaire, la tour sur laquelle était focalisé à l’origine le rayonnement solaire abritera une optique secondaire ainsi que le système de détection en lieu et place de la chaudière de la centrale.

Bibliographie

Abdo, A. A., et al., 2009, ApJ, 706, 1331

Abdo, A. A., et al., 2009, Science, 325, 848

Abdo, A. A., et al., 2010, ApJ, 187, 460

Baillon, P., et al., 1991, International Cosmic Ray Conference, 1, 220

Bennett, K., et al., 1977, A&A, 61, 279

Buccheri, R., et al., 1983, A&A, 128, 245

Fierro, J. M., Michelson, P. F., Nolan, P. L., & Thompson, D. J., 1998, ApJ, 494, 734

Goret, P., Palfrey, T., Tabary, A., Vacanti, G., & Bazer-Bachi, R., 1993, A&A, 270, 401

Halpern, J. P., & Holt, S. S., 1992, Nature, 357, 222

Hartman, R. C., et al., 1999, ApJS, 123, 79

Kuiper, L., Hermsen, W., Krijger, J. M., Bennett, K., Carramiñana, A., Schönfelder, V., Bailes, M., & Manchester, R.N., 1999, A&A, 351, 119

Ogelman, H., Fichtel, C. E., Kniffen, D. A., & Thompson, D. J., 1976, ApJ, 209, 584

Swanenburg, B. N., et al., 1981, ApJL, 243, L69

Thompson, D. J., Fichtel, C. E., Kniffen, D. A., & Ogelman, H. B., 1975, ApJL, 200, L79

Thompson, D. J., Fichtel, C. E., Kniffen, D. A., Ogelman, H. B., & Lamb, R. C., 1976, ApL, 17, 173

Thompson, D. J., Fichtel, C. E., Hartman, R. C., Kniffen, D. A., & Lamb, R. C., 1977, ApJ, 213, 252

Thompson, D. J., Bertsch, D. L., Hartman, R. C., & Hunter, S. D., 1983, A&A, 127, 220

Thompson, D. J., et al., 1995, ApJS, 101, 259

Thompson, D. J., 2001, American Institute of Physics Conference Series, 558, 103

Thompson, D. J., 2008, Reports on Progress in Physics, 71, 116901

Tumer, O. T., O'Neill, J. T., Zych, A. D., & White, R. S., 1990, Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 14, 351

Weekes, T. C., et al., 1989, ApJ, 342, 379

Chapitre 2

CELESTE, un saut dans le vide...

Sommaire

1.1	Les précurseurs	13
1.1.1	SAS-2, une vision furtive du ciel gamma.	13
1.1.2	Premiers résultats pour l'astronomie gamma	13
1.1.3	COS-B, une fenêtre s'ouvre sur les sources galactiques.	16
1.2	EGRET, la révolution dans le ciel gamma.	18
1.2.1	Retour sur la détection embarquée	18
1.2.2	Les résultats révèlent un nouveau ciel gamma	18
1.2.3	EGRET et les pulsars γ	19
1.2.4	Pour conclure sur EGRET	23
1.3	Le Ciel vu de la Terre : premiers succès des détecteurs Cerenkov.	24
1.4	Conséquences observationnelles	26
1.4.1	Un trou dans le spectre	26
1.5	En attendant GLAST...	26
1.5.1	Succéder à EGRET	26
1.5.2	CELESTE : baisser le seuil rapidement	27

Au milieu des années 90, EGRET a donc ouvert le ciel γ au GeV. Cependant, les flux observés en loi de puissance décroissante avec l'énergie des photons ainsi que la surface efficace nécessairement limitée du détecteur imposent une limite haute à l'énergie des photons observés, autour de 10 GeV.

Par ailleurs, au sol, la technique d'imagerie Cerenkov bute alors sur une énergie seuil autour de 250 GeV que ce soit par Whipple avec son grand miroir de 75 m² ou avec le futur télescope CAT et sa caméra haute définition.

Comme écrit précédemment, l'objectif de CELESTE était de défricher avant le lancement de GLAST, la partie du spectre électromagnétique située dans la bande 10 – 250 GeV.

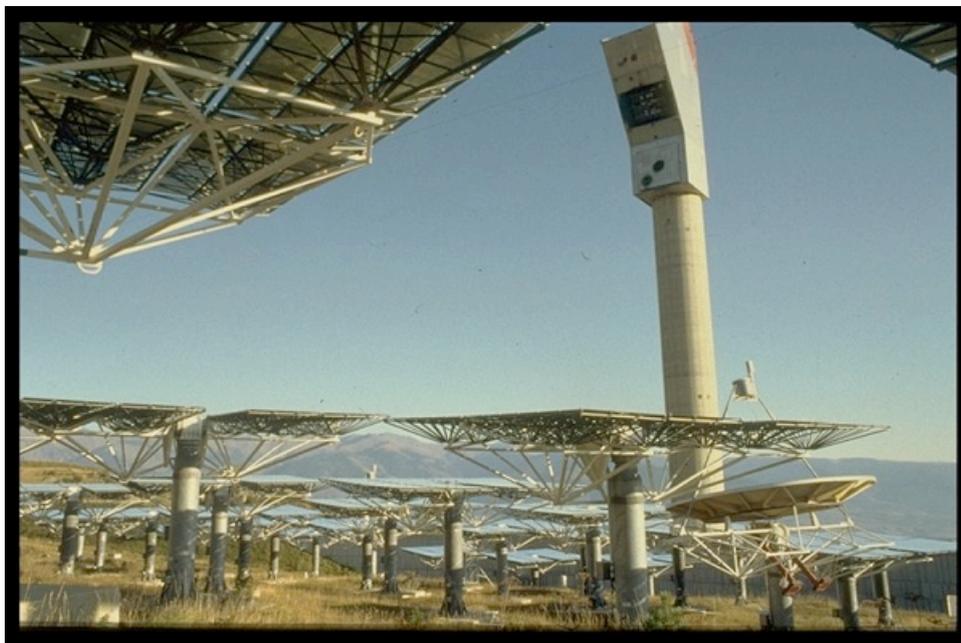
Plus que la simple volonté d'aller explorer le dernier « trou » dans le spectre électromagnétique couvert par l'astronomie, l'intérêt de la bande autour de la dizaine de GeV devient évident lorsqu'il s'agit d'étudier les pulsars γ . En effet, comme vu dans le chapitre précédent, c'est dans cette gamme d'énergie que coupent les spectres de ces sources et la forme de la coupure est, comme déjà évoqué, un

paramètre essentiel dans la définition de la zone d'émission du rayonnement haute énergie. Il apparaît donc comme nécessaire d'avoir un maximum de points du spectre au-delà de 1 GeV et ceci avec les barres d'erreur les plus réduites possibles.

L'objectif affiché lors de la présentation du projet était d'atteindre lors de la dernière phase de CELESTE un seuil en énergie de 20 GeV.

2.1 Le projet CELESTE.

CELESTE repose sur la technique d'échantillonnage du front d'onde déjà mise en oeuvre avec succès au TeV sur le site de Thémis au début des années 90 par les expériences ASGAT et Themistocle.



La conception d'un échantillonneur de front d'onde Cerenkov devant détecter des photons gamma de basse énergie repose sur les éléments indispensables suivants :

- Une grande surface de miroir afin de collecter une partie importante de la très faible lumière émise par les gerbes Cerenkov associées au développement des cascades atmosphériques engendrées par les gamma.
- Des miroirs répartis sur une grande surface, typiquement un disque de 150 m de rayon ce qui correspond à la taille de la tache de lumière Cerenkov au sol, ceci afin d'avoir un bon échantillonnage des différentes parties du front d'onde. Ce qui sera indispensable pour espérer pouvoir reconstruire la direction d'arrivée du photon.
- Un champ de vue réduit, suffisant pour contenir en grande partie la gerbe Cerenkov mais pas trop grand pour ne pas intégrer trop de bruit de fond. Les photons Cerenkov détectés étant des photons du visible rien ne les distingue du bruit lumineux ambiant du ciel nocturne.
- Un déclenchement extrêmement rapide afin de profiter de la brièveté du signal Cerenkov (\sim ns) et ne pas intégrer trop de bruit de fond.

– Enfin, pour une étude des pulsars, un système de datation fiable des évènements est nécessaire. Les 2 premiers points sont pleinement satisfaits par les centrales solaires, et représentent la plus grande partie de l'infrastructure d'un tel détecteur Cerenkov. C'est l'existence de ces sites industriels laissés vacants au début des années 90 qui a en grande partie justifié les expériences d'échantillonnage du front d'onde Cerenkov développées à la fin des années 90 (CELESTE, STACEE, Solar-2, GRAAL,...). En effet, bien que les détecteurs proposés s'éloignaient assez sensiblement du « détecteur idéal » en faisant de nombreuses concessions à la lourde infrastructure déjà présente, celle-ci autorisait en revanche un déploiement très rapide et à assez faible coût pour des expériences occupant plusieurs centaines de mètres dans chacune des trois directions de l'espace. Elles représentaient une alternative intéressante en attendant le lancement de GLAST et la construction des imageurs Cerenkov de troisième génération attendus entre 2003 et 2005.

2.1.1 Diminuer le seuil d'un détecteur Cerenkov

Le seuil en énergie d'une expérience Cerenkov peut être grossièrement défini à l'aide du rapport signal sur racine du bruit $\frac{S}{\sqrt{B}}$, où le signal est la quantité de lumière Cerenkov vue par le détecteur et le bruit est constitué des photons du fond de ciel reçu pendant le temps d'intégration du signal.

Le bruit de fond de ciel peut alors s'écrire :

$$B = A \cdot \varepsilon \cdot \Omega \cdot \tau \cdot L$$

où A est la surface de collection, ε l'efficacité globale de collection (optique et électronique), Ω le champ de vue, L la luminosité du ciel nocturne et τ la durée de la fenêtre d'intégration.

En première approximation, on peut considérer que le signal Cerenkov est proportionnel à l'énergie du photon primaire ce qui donne pour S :

$$S \propto A \cdot \varepsilon \cdot E$$

Le rapport caractéristique de l'énergie seuil devient donc :

$$\frac{S}{\sqrt{B}} \propto \sqrt{\frac{A \cdot \varepsilon}{\Omega \cdot \tau \cdot L}} E$$

Pour un rapport $\frac{S}{\sqrt{B}}$ donné, on estime alors l'énergie seuil :

$$E_{seuil} \propto \sqrt{\frac{\Omega \cdot \tau \cdot L}{A \cdot \varepsilon}}$$

Ω étant une valeur contrainte car la gerbe Cerenkov doit être contenue dans le champ de vue du détecteur, il n'est plus possible de jouer que sur le temps d'intégration τ qui doit être le plus court possible (quelques ns, de l'ordre de grandeur de la durée du flash Cerenkov), sur l'efficacité globale de collection ε et bien évidemment sur la surface de collection A , ce dernier paramètre étant probablement le plus accessible.

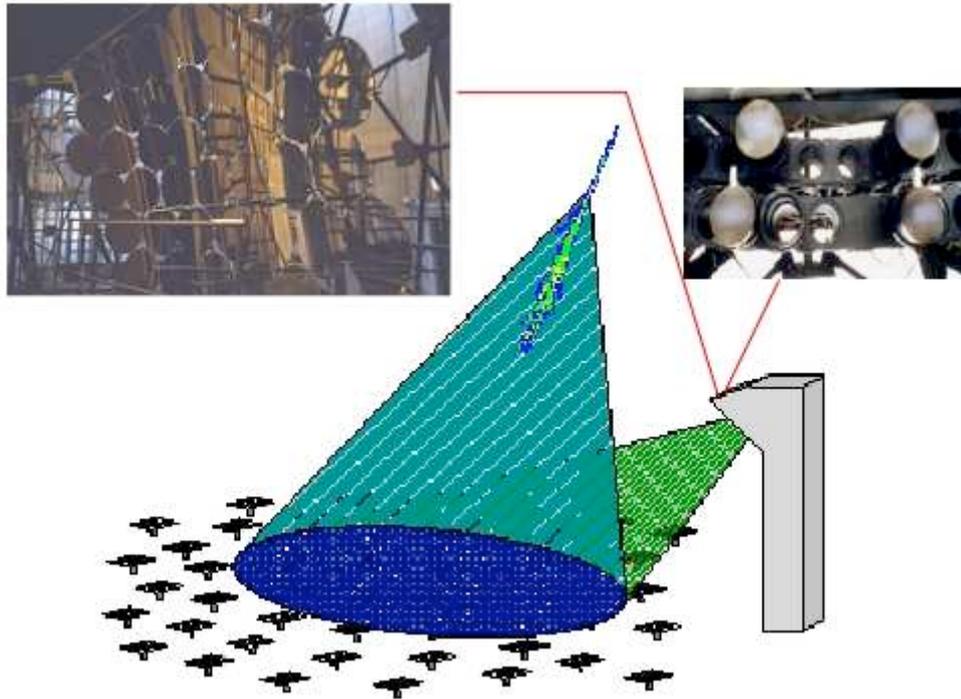


FIG. 2.1 – Principe d'un échantillonneur Cerenkov à tour, en haut à gauche l'optique secondaire placée à l'emplacement de l'ancienne chaudière, à droite, un élément de la caméra placée à la focale de l'optique secondaire.

2.1.2 Principe de la reconversion d'une centrale solaire à tour en détecteur Cerenkov

Un instrument comme CELESTE est un échantillonneur de front d'onde Cerenkov. Il doit donc donner pour chaque évènement la densité de lumière mesurée en différents points du front d'onde de la gerbe. Les héliostats jouant le rôle d'optique primaire collectent la lumière Cerenkov qui est focalisée, à l'emplacement de l'ancienne chaudière de la centrale, sur une optique secondaire chargée de séparer les faisceaux vers une caméra constituée de photomultiplicateurs rapides placés en son foyer.

L'optique secondaire est donc en quelque sorte chargée de faire l'image des héliostats sur les fenêtres d'entrée des photomultiplicateurs de la caméra. C'est donc un des éléments qui permet d'obtenir le champ de vue réduit indispensable à une réjection raisonnable du bruit de fond ambiant, l'autre étant le cône de Winston collé sur la face d'entrée de chacun des photomultiplicateurs de la caméra.

2.2 Les points essentiels du détecteur

Bien que plusieurs projets d'échantillonneurs Cerenkov réutilisant les anciennes centrales solaires aient été développés à la fin des années 90, (STACEE, Solar-2 aux États-Unis, et GRAAL en Espagne), CELESTE a été le seul détecteur de cette classe à réellement abaisser son seuil de détection à

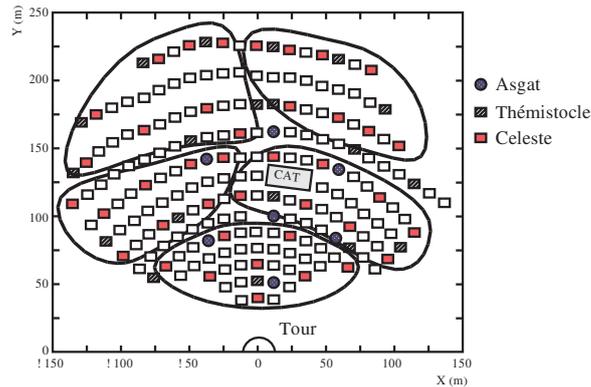


FIG. 2.2 – Schéma du champ d’héliostats de Thémis, les contours délimitent les groupes d’héliostats associés pour construire le trigger analogique.

quelques dizaines de GeV, condition indispensable pour espérer observer l’émission γ des pulsars. Il n’est pas question ici de décrire l’ensemble du détecteur et de ses évolutions (décrit plus en détail dans la proposition d’expérience (CELESTE, Experimental proposal), mais aussi dans Paré et al. (2002) ainsi que dans l’ensemble des thèses et en particulier, de Naurois (2000); Durand (2003); Manseri (2004, ,) mais seulement 2 points essentiels qui ont permis à CELESTE d’apporter, de façon modeste il est vrai, sa contribution à l’étude des pulsars γ .

2.2.1 Le déclenchement « Analogique ».

Une des originalités de CELESTE par rapport à ses cousines a été sa capacité réelle à détecter des gerbes Cerenkov issues de γ d’énergie voisine de 40 GeV, alors que le seuil des autres expériences de même type est demeuré assez largement au-dessus de 150 GeV, bien trop loin des valeurs des coupures en énergie observées par EGRET pour pouvoir espérer observer une quelconque émission pulsée.

Le principe général de déclenchement de l’acquisition d’un échantillonneur est de considérer que l’on détecte une cascade Cerenkov quand un nombre donné d’héliostats a été illuminé par le front d’onde, c’est-à-dire que chaque héliostat a reçu un nombre de photons supérieur à un niveau donné dans un laps de temps court (quelques ns). Pour des raisons évidentes de simplicité, les autres expériences ont choisi un déclenchement numérique, exigeant donc que le signal récolté sur chaque héliostat franchisse individuellement le seuil de déclenchement, avant de compter dans un second niveau le nombre d’héliostats ayant franchi le seuil. Ce déclenchement numérique présente un inconvénient certain en ce qui concerne l’énergie seuil de l’expérience puisque la surface qui doit être envisagée dans la formule donnée précédemment n’est donc pas la surface totale de collection mais plutôt celle de chaque héliostat individuel, ce qui ramène le seuil global de déclenchement à des valeurs assez voisines de celles des imageurs.

Afin de baisser sensiblement le seuil de CELESTE, le choix a été fait d’utiliser un déclenchement analogique, par groupe d’héliostats voisins augmentant donc sensiblement la valeur de la surface de collection et donc diminuant d’autant le seuil.

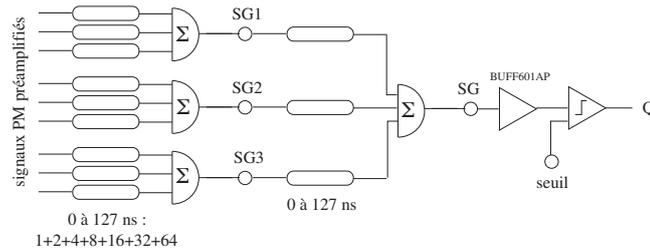


FIG. 2.3 – Principe des modules sommateurs analogiques de CELESTE.

Ce type de déclenchement présente tout de même des contraintes importantes en comparaison avec un trigger numérique individuel. En effet, afin que la sommation analogique puisse se faire correctement 2 écueils importants doivent être surmontés, le premier concerne la sommation des signaux analogiques au GHz eux-mêmes, le second concerne la construction de la somme puisque les chemins optiques pour chacune des voies étant différents, une remise en temps de chaque voie analogique doit être opérée afin de reconstituer la brièveté du front d'onde Cerenkov au niveau de la somme analogique finale. A ceci, vient s'ajouter une contrainte supplémentaire liée à la configuration même de l'échantillonneur à tour. Le signal Cerenkov devant être renvoyé des héliostats vers le point focal fixe au niveau de la tour, les différences de chemins optiques entre les voies dépendent par conséquent de l'endroit pointé dans le ciel et doivent donc être ajustées au cours du suivi de la course de l'astre dans le ciel. Pour CELESTE, cette mise en temps a été effectuée par l'intermédiaire de boîtes à retards analogiques pilotables développées au CENBG.

C'est grâce à ce dispositif ajusté par logiciel au cours de l'acquisition de données (rafraîchissement toutes les 30 s, ce qui correspond en moyenne à un changement d'1 ns d'un des retards analogiques de la boîte) que le seuil en énergie de CELESTE a pu être abaissé.

2.2.2 Validation de la datation des évènements.

L'autre élément essentiel de CELESTE pour l'étude des pulsars concerne bien évidemment la détermination précise des dates d'arrivée des photons. Cet aspect est décrit en détail dans la thèse qu'Emmanuel Durand (Durand, 2003) a soutenue au CENBG sous ma co-direction.

Plusieurs aspects sont à prendre en considération :

- Le premier est bien évidemment la datation à proprement parler.
Pour CELESTE, la détermination de la date locale d'arrivée de l'évènement se fait par la lecture d'une horloge GPS incluse dans le châssis VME de contrôle de l'acquisition. A chaque déclenchement, la date est lue et stockée dans le fichier de données.
- Le second concerne les corrections à apporter à la date locale d'arrivée du photon afin de tenir compte des différents délais de propagation depuis la source jusqu'au détecteur.
Cette procédure dite de barycentrisation puisque les dates d'arrivée du photon sont rapportées au barycentre du Système Solaire, se fait a posteriori. Elle est délicate du fait de la précision nécessaire sur la date barycentrée et sur le nombre de facteurs correctifs à maîtriser.

- Enfin, en ce qui concerne les pulsars γ , un troisième aspect est à prendre en considération, l'obtention d'éphémérides valides pour l'objet considéré.

En effet, du fait du très faible nombre de photons attendus en provenance de la source, il est impossible d'effectuer une recherche de périodicité à l'aide des dates des photons gamma détectés. La solution consiste donc à calculer en fonction de la date d'arrivée du photon et des paramètres du modèle de rotation donnés par l'éphéméride (période du pulsar, dérivée de la période, voire plus), la phase de chaque événement c'est-à-dire la fraction de tour, ceci afin « d'empiler » les photons de même phase pour construire la courbe de lumière du pulsar.

Une erreur dans l'une de ces 3 étapes conduit inévitablement à l'obtention d'une courbe de lumière plate et par conséquent à la non détection du pulsar. Dans le cadre de CELESTE, étant donné que la détection de pulsars ne pouvait être que marginale, il était nécessaire de valider l'ensemble de la chaîne pour pouvoir conclure sur une non-détection éventuelle.

2.2.2.1 CELESTE a vu le pulsar du Crabe!!!

Le moyen le plus direct pour valider l'ensemble de la chaîne de datation est de voir le pulsar de façon reproductible à plusieurs moments de l'année, ainsi, la datation GPS, la procédure de barycentrisation et l'utilisation correcte des éphémérides sont validées. Si cette solution n'a pas de sens en γ puisque le signal pulsé, s'il existe, ne pourra être mis en évidence qu'avec une extrême difficulté, elle est en revanche envisageable à une longueur d'onde pour laquelle le nombre de photons reçus est plus favorable.

Un échantillonneur Cerenkov est un immense télescope optique de plusieurs centaines de m², à ceci près qu'il est myope, puisque la seule chose qu'on lui demande est de collecter le front d'onde lumineux de la gerbe Cerenkov. Cette myopie n'est pas gênante pour les pulsars puisqu'il n'est pas question d'effectuer l'image de la source mais seulement de mesurer la variation temporelle de l'émission du pulsar. En revanche, la très grande surface de miroir est un atout considérable, malgré cela, le seul pulsar accessible aux longueurs d'ondes optiques sans un télescope géant est le pulsar du Crabe dont la magnitude est tout de même voisine de 17... Les quelques autres pulsars optiques connus sont des sources extrêmement faibles de magnitude inférieure à 23!!!

Le principe de la mesure de la pulsation optique du Crabe repose sur la mesure des courants en sortie des photomultiplicateurs collectant la lumière des héliostats pointant le pulsar. L'échantillonnage de ces courants envoyés sur les entrées analogiques d'une carte d'acquisition doit être associé à une datation précise de chaque échantillon à l'aide de l'horloge GPS de l'expérience. Ceci est réalisé en envoyant un signal périodique de déclenchement simultanément sur une des entrées de la carte d'acquisition échantillonnant les courants et sur l'horloge GPS, chaque tick d'horloge possédant donc une date donnée par le GPS, il est aisé de reconstruire la date de chaque échantillon pris par la carte d'acquisition.

Bien évidemment, la configuration géométrique de la centrale solaire n'ayant pas grand chose à voir avec celle d'un télescope optique, elle confère au système un très grand champ de vue. Le signal recueilli sur chacune des voies en regard avec un héliostat est par conséquent essentiellement le fruit du fond de ciel lumineux.

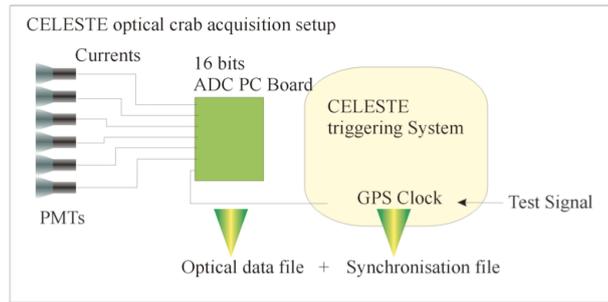


FIG. 2.4 – Principe du système d’acquisition dédié à l’observation du pulsar du Crabe en optique avec CELESTE.

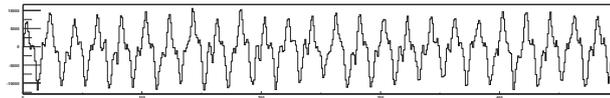


FIG. 2.5 – Signal typique (courant de sortie du photomultiplicateur en fonction du temps) obtenu lors de la mesure des pulsations du Crabe en optique. Le signal observé est essentiellement la modulation à 100 Hz due à l’éclairage public.

Un filtrage sévère des sources de bruit lumineux local est alors indispensable (50 Hz et 100 Hz de l’éclairage public ainsi que leurs premières harmoniques).

Une fois le filtrage des sources de bruit locales effectué, la barycentrisation des dates des échantillons ainsi que le calcul des phases à partir d’une éphéméride contemporaine permet de construire la courbe de lumière.

La répétition de cette mesure à différentes époques, si elle conduit à l’empilement en phase des différentes courbes de lumière valide l’ensemble de la procédure de datation de l’expérience. C’est ce qui a été constaté avec CELESTE, comme le montre la courbe de lumière ci-dessous(2.6), correspondant à l’empilement de 5 prises de données sur un an sur le pulsar du Crabe.

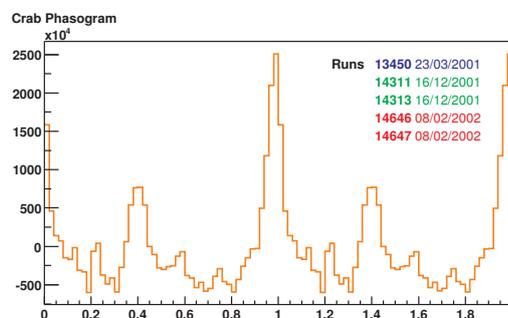


FIG. 2.6 – Courbe de lumière du Crabe optique obtenue en sommant cinq prises de données.

Si cette mesure a permis de valider in situ la datation des évènements et donc la capacité de CELESTE à voir un signal pulsé dans l'hypothèse où celui-ci est présent, elle a surtout eu le mérite de nous permettre de nous confronter à l'ensemble des problématiques liées à la détection de l'émission périodique des pulsars, expérience qui se révélera essentielle lors de notre implication sur GLAST.

2.3 Recherche de pulsars γ avec CELESTE

De part sa configuration et le temps d'intégration nécessaire pour obtenir un signal γ sur une source, la recherche de signal γ pulsé par CELESTE a été restreinte à un très petit nombre de candidats. Des 6 pulsars γ détectés par EGRET, seuls 3 sont visibles depuis le site de Thémis, le pulsar du Crabe, Geminga et PSR B1951+32. Les spectres EGRET indiquent que le Crabe et PSR B1951+32 ne semblent pas montrer de coupure à haute énergie ce qui laisse de l'espoir pour une détection à quelques dizaines de GeV. En revanche, le spectre de Geminga montrant une coupure autour de 2 GeV, laisse peu d'espoir pour une détection à haute énergie. Sa grande proximité avec le Crabe en terme d'ascension droite plaide aussi en sa défaveur puisque CELESTE ne peut observer une source qu'autour de son transit, observer Geminga revenait à diminuer le nombre de prises de données sur le Crabe principal candidat à une émission haute énergie.

L'étude des pulsars γ par CELESTE s'est donc focalisée sur le Crabe, chandelle standard de l'astronomie gamma au sol (en ce qui concerne l'émission non pulsée de la nébuleuse), et plus marginalement sur PSR B1951+32 faible source de photons γ au GeV et qui n'a jamais été vue par les télescope gamma au sol.

2.3.1 Le Crabe

La première source gamma observée par les télescopes au sol (Weekes et al., 1989) est un passage obligé pour tout détecteur Cerenkov. La détection de sa nébuleuse constitue l'objet du premier papier scientifique de chaque expérience, les résultats obtenus sont alors supposés valider à la fois les qualités techniques du détecteur et la maîtrise des méthodes d'analyses des signaux. CELESTE n'a pas échappé à la règle (de Naurois et al., 2002) à ceci près que pour la première fois, les résultats présentés donnent d'une part des mesures dans une zone inexplorée du spectre de la nébuleuse autour de 60 GeV, soit à une énergie inférieure de 4 fois à celle des imageurs de l'époque et d'autre part une limite supérieure sur l'émission du pulsar aux énergies de CELESTE. Cette mesure demeurera unique jusqu'à la détection en 2008 par MAGIC (Aliu et al., 2008) de pulsations du Crabe autour de 25 GeV. L'absence de détection de la composante pulsée aux énergies de CELESTE confirme que l'émission au-delà du seuil de CELESTE provient essentiellement du pléïon environnant le pulsar et non du pulsar lui même.

2.3.1.1 Pulsations du Crabe

Bien que le papier Crabe de CELESTE (de Naurois et al., 2002) conclue sur une non détection du pulsar, une étude approfondie revenant sur une sélection spécifique des données à basse énergie a été menée par Emmanuel Durand (Durand, 2003) au cours de son travail de thèse. Ce travail a mis

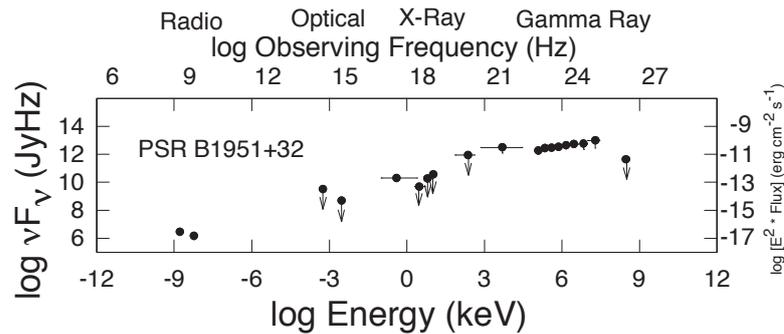


FIG. 2.7 – Spectre de PSR B1951+32

en évidence la grande variété des conditions de prise de donnée durant la vie de l'expérience et par conséquent la difficulté pour extraire un lot homogène, présentant en particulier la même sensibilité à basse énergie. En effet, si détection du pulsar il y a, elle concerne nécessairement des photons dont l'énergie est au plus près du seuil de l'expérience. C'est aussi près du seuil que la réponse du détecteur est la moins maîtrisée tant du point de vue de la compréhension du détecteur lui-même, il ne faut pas oublier que l'atmosphère qui constitue proprement parler le calorimètre du détecteur est un milieu changeant que de la physique des gerbes Cerenkov elles-mêmes dont l'extension réduite à ces énergies rend la discrimination γ /proton cosmique très délicate, conduisant donc à une augmentation sensible du bruit de fond d'évènements non désirés.

Bien que la barre des 5σ (valeur communément admise de la significativité des tests statistiques d'uniformité pour déclarer une source comme détectée) n'ait jamais été franchie, la valeur en a été approchée laissant supposer qu'une augmentation de la statistique à basse énergie aurait permis la première détection de l'émission γ pulsée du crabe à haute énergie. Malheureusement, cette hypothèse n'aura pas pu être vérifiée par CELESTE, puisque une modification de la configuration du détecteur (passage de 40 à 53 héliostats dont certains utilisés en veto (Manseri, 2004)) permettant une meilleure maîtrise de la surface efficace de collection et par conséquent une amélioration de la précision sur les flux mesurés a eu pour conséquence une augmentation sensible du seuil en énergie de l'expérience privant ainsi CELESTE de ses évènements à basse énergie.

2.3.2 PSR B1951+32

PSR B1951+32 pulsar détecté par EGRET mais apparaissant comme une source très faible est le deuxième candidat pulsar gamma étudié par CELESTE (Durand, 2003). Son étude se justifiait par le fait que d'une part son spectre tel que mesuré par EGRET présente un indice très favorable laissant entendre que l'émission haute énergie est privilégiée et d'autre part qu'il ne montre pas de coupure au GeV.

L'étude met en évidence les conditions très difficiles de prise de données sur cette source conduisant à une très faible efficacité de détection basse énergie, il n'est donc pas étonnant que la conclusion de CELESTE sur l'émission pulsée de cette source en soit restée à une limite supérieure.

2.4 Les conclusions de CELESTE

CELESTE restera comme la première expérience au sol à être allé explorer le domaine d'énergie laissé vacant entre les limites hautes des détecteurs embarqués qqs GeV et les imageurs Cerenkov au sol ~ 200 GeV. Si l'apport scientifique peut paraître relativement modeste, c'est essentiellement dû d'une part à la difficulté intrinsèque de reconstruction des événements à basse énergie et donc à la discrimination des gamma avec le fond des protons cosmiques et d'autre part aux difficultés liées à l'exploitation du site de Thémis. Pour fonctionner, un télescope Cerenkov doit observer les nuits sans nuage et sans Lune pour se prémunir du bruit de fond lumineux. Sur le site de Thémis, le cycle utile du détecteur était assez largement inférieur à 10%. Un site suffisamment ensoleillé pour la construction d'une centrale solaire ne garantit pas des nuits de qualité astronomique. Cette nécessité vitale d'un ciel pur pour un détecteur Cerenkov a motivé l'installation des détecteurs de la troisième génération sur des sites abritant déjà des observatoires optiques (MAGIC aux Canaries, VERITAS sur le site du FLWO Arizona) ou connus pour la qualité de leur ciel (HESS en Namibie).

Malgré tout, juste avant la révolution du domaine de l'astronomie gamma au sol apportée par les Multi-Imageurs de troisième génération (en premier lieu HESS) dont la sensibilité est incomparable mais le seuil en énergie toujours très sensiblement supérieur à celui de CELESTE (MAGIC mis à part), CELESTE a apporté sa contribution à l'étude des sources γ connues jusqu'alors au sol (Crabe (de Naurois et al., 2002), Noyaux Actifs de Galaxie MrK421, Mrk501 et 1ES1426+428 (Smith et al., 2006)) et dans un domaine d'énergie encore vierge de toute mesure.

Du point de vue technique, CELESTE a pleinement atteint ces objectifs permettant de valider les choix techniques ambitieux effectués lors de sa conception.

Enfin, un des apports essentiels de CELESTE s'est révélé par la suite lors du travail sur GLAST, les difficultés rencontrées dans l'analyse des données ont permis de développer une expertise reconnue en particulier dans le domaine de l'étude des pulsars.

Dix ans après la première ébauche du projet, CELESTE a cessé de fonctionner le 21 juin 2004.

2.5 Contribution à CELESTE

Ma contribution à CELESTE a débuté au tout début du projet, dans un premier temps par des simulations des cascades atmosphériques et des gerbes Cerenkov associées, suite logique de mon travail de thèse. Cette activité qui avait démarré de manière éphémère sur l'expérience CAT, m'a conduit à inclure la simulation d'une émission Cerenkov réaliste dans le code CORSIKA de simulation des gerbes atmosphériques. Ce travail a rapidement été accompagné par la modélisation de la réponse du prototype du détecteur (Giebels et al., 1998). En parallèle, j'ai pris en charge la maintenance et le développement du code de contrôle de l'acquisition de données jusqu'à la fin de l'expérience assurant l'évolution du code au fil des modifications de l'expérience et l'assistance des expérimentateurs présents sur le site durant les périodes d'observations.

Enfin, mon intérêt pour la thématique pulsar m'a amené à prendre en charge la validation de la chaîne de datation par l'étude du pulsar du Crabe en optique et à accompagner Emmanuel Durand dans son travail de thèse, travail constituant une des pierres fondatrices de l'activité pulsar au sein du groupe astroparticules du CENBG.

Si la thématique pulsar a constitué une part importante de mon activité sur les sources de CELESTE, elle n'a pas été la seule puisque j'ai aussi abordé la thématique AGN à travers l'analyse des données prises sur 1ES1426+428 (Smith et al., 2006) et l'encadrement au quotidien de la dernière année de thèse d'Elisabeth Brion en 2004 lors du congé sabbatique au SLAC de David Smith son directeur de thèse.

Bibliographie

Aliu, E., et al., 2008, *Science*, 322, 1221

de Naurois, M., 2000, Thèse Université Paris VI

de Naurois, M., et al., 2002, *ApJ*, 566, 343

Durand, E., 2003, Thèse Université Bordeaux I

Giebels, B., et al., 1998, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 412, 329

Lavalle, J., et al., 2006, *A&A*, 450, 1

Manseri, H., 2004, Thèse Ecole Polytechnique

Paré, E., et al., 2002, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 490, 71

Smith, D. A., et al., 2006, *A&A*, 459, 45

Weekes, T. C., et al., 1989, *ApJ*, 342, 379



ELSEVIER

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 490 (2002) 71–89

**NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH**
Section A

www.elsevier.com/locate/nima

CELESTE: an atmospheric Cherenkov telescope for high energy gamma astrophysics

E. Paré^{a,*}, B. Balaugé^b, R. Bazer-Bachi^d, H. Bergeret^f, F. Berny^f, N. Briand^d, P. Bruel^a, M. Cerutti^a, J. Collon^f, A. Cordier^f, P. Cornebise^f, G. Debiais^e, J.-P. Dezalay^d, D. Dumora^b, E. Durand^b, P. Eschstruth^f, P. Espigat^c, B. Fabre^e, P. Fleury^a, J. Gilly^a, J.-C. Guillaud^b, C. Gregory^a, N. Hérault^{e,f}, J. Holder^f, M. Hrabovsky^g, S. Incerti^b, A. Jouenne^f, L. Kalt^a, R. LeGallou^b, B. Lott^b, O. Lodygensky^f, P. Manigot^a, H. Manseri^a, H. Manitaz^a, M. Martin^f, R. Morano^a, G. Morineaud^a, F. Münz^{c,h}, A. Musquère^d, M. de Naurois^a, J. Neveu^f, J.-M. Noppe^f, J.-F. Olive^d, M. Palatka^g, A. Perez^b, J. Québert^b, A. Rebi^b, T. Reposeur^{b,*}, L. Rob^h, P. Roy^f, J.-L. Sans^b, T. Sako^a, P. Schovanek^g, D.A. Smith^b, P. Snabreⁱ, G. Villard^f

^aLaboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique, Route de Saclay, F-91128 Palaiseau Cedex, France

^bCentre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, CNRS/IN2P3-Université Bordeaux 1, Domaine du Haut Vigneau, BP 120, F-33175 Gradignan Cedex, France

^cLaboratoire de Physique Corpusculaire et Cosmologie, Collège de France, 11 place Marcelin Berthelot, F-75231 Paris Cedex 05, France

^dCentre d'Etude Spatiale des Rayonnements, 9 avenue du Colonel Roche, BP 4346, F-31028 Toulouse Cedex 4, France

^eGroupe de Physique Fondamentale, Université de Perpignan, 52, Avenue de Villeneuve, F-66860 Perpignan Cedex, France

^fLaboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Université de Paris-Sud, Bat. 200, BP 34, F-91898 Orsay Cedex, France

^gJoint Lab. Optics, Academy of Sciences and Palacky University, 17, listopadu 50, 77207 Olomouc, Czech Republic

^hInstitute of Particles and Nuclear Physics, Charles University, V Holesovickach 2, 180 00 Prague 8, Czech Republic

ⁱInstitut de science et de génie des Matériaux et Procédés, Odeillo, France

Received 16 April 2002; accepted 18 April 2002

Abstract

CELESTE is an atmospheric Cherenkov telescope based on the sampling method which makes use of the decommissioned THEMIS solar electrical plant in the French Pyrénées. A large (2000 m²) mirror surface area from 40 independent heliostats followed by a secondary optic, a trigger system using analog summing techniques and signal digitization with 1 GHz flash ADCs make possible the detection of cosmic γ -rays down to 30 GeV. This paper provides a detailed technical description of the CELESTE installation. © 2002 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Gamma-ray astronomy; Atmospheric Cherenkov detector

*Corresponding author.

E-mail addresses: reposeur@in2p3.fr (T. Reposeur).

* Deceased.

MEASUREMENT OF THE CRAB FLUX ABOVE 60 GeV WITH THE CELESTE CERENKOV TELESCOPE

M. DE NAUROIS,^{1,2} J. HOLDER,^{3,4} R. BAZER-BACHI,⁵ H. BERGERET,³ P. BRUEL,¹ A. CORDIER,³ G. DEBIAIS,⁶ J.-P. DEZALAY,⁵
D. DUMORA,⁷ E. DURAND,⁷ P. ESCHSTRUTH,³ P. ESPIGAT,⁸ B. FABRE,⁶ P. FLEURY,¹ N. HÉRAULT,^{3,6} M. HRABOVSKY,⁹
S. INCERTI,⁷ R. LE GALLOU,⁷ F. MÜNZ,^{8,10} A. MUSQUÈRE,⁵ J.-F. OLIVE,⁵ E. PARÉ,^{1,11} J. QUÉBERT,⁷ R. C. RANNOT,^{7,12}
T. REPOSEUR,⁷ L. ROB,¹⁰ P. ROY,³ T. SAKO,^{1,13} P. SCHOVANEK,⁹ D. A. SMITH,⁷ P. SNABRE,¹⁴ AND A. VOLTE⁸

Received 2001 July 13; accepted 2001 October 10

ABSTRACT

We have converted the former solar electrical plant THEMIS (French Pyrenees) into an atmospheric Cerenkov detector called CELESTE, which records gamma rays above 30 GeV (7×10^{24} Hz). Here we present the first sub-100 GeV detection by a ground-based telescope of a gamma-ray source, the Crab Nebula, in the energy region between satellite measurements and imaging atmospheric Cerenkov telescopes. At our analysis threshold energy of 60 ± 20 GeV we measure a gamma-ray rate of 6.1 ± 0.8 minute⁻¹. Allowing for 30% systematic uncertainties and a 30% error on the energy scale yields an integral gamma-ray flux of $I(E > 60\text{GeV}) = 6.2^{+5.3}_{-2.3} \times 10^{-6}$ photons m⁻² s⁻¹. The analysis methods used to obtain the gamma-ray signal from the raw data are detailed. In addition, we determine the upper limit for pulsed emission to be less than 12% of the Crab flux at the 99% confidence level, in the same energy range. Our result indicates that if the power law observed by EGRET is attenuated by a cutoff of form e^{-E/E_0} , then $E_0 < 26$ GeV. This is the lowest energy probed by a Cerenkov detector and leaves only a narrow range unexplored beyond the energy range studied by EGRET.

Subject headings: gamma rays: observations — ISM: individual (Crab Nebula) — pulsars: individual (Crab Pulsar) — supernova remnants

1. INTRODUCTION

The Crab was the first source of gamma rays to be convincingly detected by ground-based telescopes (Weekes et al. 1989; Vacanti et al. 1991), and measurements of its emission spectrum between 250 GeV and 20 TeV by various atmospheric Cerenkov detectors are now available (Hillas et al. 1998; Aharonian et al. 2000; Piron 2000;¹⁵ Masterson et al. 2001). The flux measurement above 190 ± 60 GeV recently reported by the STACEE experiment, using the mirrors of a solar energy research facility to collect Cerenkov light, is the first detection below 200 GeV by a ground-based device (Oser et al. 2001). At these energies emission from the Crab is steady and generally accepted to come from the nebula, arising from the inverse Compton scat-

tering of the synchrotron photons observed at lower energies (Gould 1965; de Jager & Harding 1992).

The EGRET detector on board the *Compton Gamma Ray Observatory* was used to study the Crab from 0.03 to 10 GeV (Fierro et al. 1998). The differential energy spectrum measured by EGRET is well described by the sum of two power laws. Below 0.1 GeV the steep spectrum is attributed to the synchrotron radiation from the nebula, while beyond 0.1 GeV the spectrum hardens and is dominated by pulsed emission. The detailed origin of the pulsar emission is uncertain. The outer gap (Cheng, Ho, & Ruderman 1986; Romani & Yadigaroglu 1995; Hirotani & Shibata 2001a) and polar cap (Daugherty & Harding 1982) models offer differing pictures. Current very high energy measurements create difficulties for some outer gap models (Lessard et al. 2000), but refining the picture requires observations in the heretofore uncovered 10–200 GeV region. Determining the energy at which pulsed emission is again overtaken by the nebula flux is one of the goals of the present work.

While the Crab itself is a rather special object, the success of the synchrotron self-Compton (SSC) model as applied to the nebula has wide implications. On the one hand, this bright source is a test piece for the study of supernova remnants as the acceleration sites of high-energy cosmic rays, with at issue the question of whether proton or electron acceleration dominates in a given source. In addition, the SSC mechanism is a cornerstone for the interpretation of the broadband spectra of active galactic nuclei (AGNs) of the blazar class (Dermer & Schlickeiser 1993; Ghisellini & Maraschi 1996; Marcowith, Henri, & Pelletier 1995). The experimental data from the Crab which support the SSC picture consist of EGRET flux measurements up to 10 GeV, with large uncertainties in the region above 1 GeV (de Jager et al. 1996), and the extrapolation across more than a decade in energy to the spectra measured by the atmospheric Cerenkov experiments. Clearly, an independent

¹ Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.

² Current address: Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Energies, Université de Paris VI–VII, France.

³ Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay, France.

⁴ Current address: Department of Physics and Astronomy, University of Leeds, Leeds, UK.

⁵ Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements, Toulouse, France.

⁶ Groupe de Physique Fondamentale, Université de Perpignan, France.

⁷ Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, France; smith@cenbg.in2p3.fr.

⁸ Physique Corpusculaire et Cosmologie, Collège de France, Paris, France.

⁹ Joint Laboratory Optics, Academy of Sciences and Palacky University, Olomouc, Czech Republic.

¹⁰ Nuclear Center, Charles University, Prague, Czech Republic.

¹¹ Deceased.

¹² Current address: Nuclear Research Laboratory, Bhabha Atomic Research Center, Trombay Mumbai, India.

¹³ Current address: Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Japan.

¹⁴ Institut de Science et de Génie des Matériaux et Procédés, Odeillo, France.

¹⁵ http://lppn90.in2p3.fr/~cat/Papers/these_piron.ps.gz.

Chapitre 3

Fermi, le ciel se révèle...

Sommaire

2.1	Le projet CELESTE.	32
2.1.1	Diminuer le seuil d'un détecteur Cerenkov	33
2.1.2	Principe de la reconversion d'une centrale solaire à tour en détecteur Cerenkov	34
2.2	Les points essentiels du détecteur	34
2.2.1	Le déclenchement « Analogique ».	35
2.2.2	Validation de la datation des évènements.	36
2.3	Recherche de pulsars γ avec CELESTE	39
2.3.1	Le Crabe	39
2.3.2	PSR B1951+32	40
2.4	Les conclusions de CELESTE	41
2.5	Contribution à CELESTE	41

3.1 GLAST, succéder à EGRET...

Les découvertes d'EGRET ont montré toute la richesse potentielle de l'observation du ciel autour du GeV, suscitant rapidement un intérêt fort pour la construction d'un satellite gamma s'appuyant sur les techniques modernes de détection. En effet, bien qu'EGRET ait été lancé en 1991, son principe de fonctionnement diffère assez peu de celui de ses prédécesseurs des années 70. Ceci peut aisément s'expliquer par la conception assez ancienne du détecteur dont la première ébauche a vu le jour à la toute fin des années 60, le projet final soumis en 1978, héritant d'une dizaine d'années de tests. La technique de détection utilisée par EGRET, repose donc sur des composants de technologie déjà ancienne au moment de sa finalisation, une chambre à étincelle munie de convertisseurs, un système de temps de vol pour obtenir la direction du photon incident, un calorimètre constitué de cristaux d'Iodure de Sodium pour mesurer l'énergie de la particule et un dôme d'anticoïncidence pour s'affranchir du bruit de fond que constituent les rayons cosmiques chargés. L'histoire mouvementée du lancement de CGRO par une navette spatiale, repoussé du fait de l'explosion de Challenger en 1986,

n'a fait qu'accentuer le caractère presque obsolète du détecteur devant ouvrir une nouvelle ère dans l'exploration du ciel au GeV.

Dès 1994, visant à remédier aux principales « faiblesses » d'EGRET, une proposition pour la construction d'un détecteur reposant sur les techniques modernes de détection en physique des particules a vu le jour (Atwood & the GLAST Collaboration, 1994). Les principaux atouts du nouveau détecteur étaient :

- Une meilleure acceptance, permettant donc une couverture du ciel plus efficace.
- Une meilleure efficacité de collection.
- Une meilleure résolution angulaire afin de mieux identifier les sources de gamma (168 des 271 sources du troisième catalogue EGRET demeurent non identifiées)
- Une gamme en énergie étendue, en particulier vers les hautes énergies (E_γ 10 GeV) pour lesquelles EGRET devient très peu efficace à cause d'une part des spectres d'émission en loi de puissance décroissante avec l'énergie et d'autre part au veto intempestif provoqué par les particules des cascades électromagnétiques à haute énergie rétrodiffusées dans le scintillateur du dôme d'anticoïncidence.
- Un temps mort du détecteur très sensiblement amélioré, la chambre à étincelle d'EGRET demeurant inopérante pendant les 100 ms suivant un évènement.
- Une longévité étendue du détecteur, celle d'EGRET étant contrainte, en particulier, par la réserve de fluide nécessaire au fonctionnement de la chambre à étincelles.

La design proposé trace déjà les grandes lignes de ce que sera le LAT, l'instrument principal de GLAST, constitué de tours segmentées comprenant chacune un détecteur en deux parties associant un détecteur de traces à un calorimètre. Le détecteur de traces est composé de couches alternées $X - Y$ de silicium épaissies d'une couche de tungstène pour assurer la conversion des photons, permettant une reconstruction de la direction d'arrivée du photon. Le calorimètre est constitué de cristaux d'Iodure de Césium pour assurer la reconstruction de l'énergie de la particule incidente.

L'avantage d'un tel détecteur, outre ses qualités intrinsèques en terme de précision de reconstruction des paramètres de la particule incidente, est qu'il ne nécessite pas de fluide pour fonctionner, et ne voit donc pas sa durée de vie limitée par la quantité de consommables à embarquer.

3.2 Préparation de la mission

Si l'implication du groupe astroparticules du CENBG dans la phase préparatoire de la mission a commencé dès 1998 lors d'un test très préliminaire d'un élément du calorimètre au CERN, elle ne s'est vraiment concrétisée sous l'impulsion de Benoît Lott qu'à partir de 2002, par une série de tests sur accélérateur des modules du calorimètre. Ce n'est qu'à partir de 2006 que les compétences acquises sur CELESTE au niveau du timing tant sur le plan de la datation elle-même que de la reconstruction correcte des phases ont été mises à profit pour valider l'ensemble de la chaîne de datation des évènements.

3.2.1 Les tests faisceaux

Le groupe astroparticules du CENBG a concrétisé son implication technique dans le calorimètre par une série de tests sous faisceau préliminaires menés en 2002 et 2003. Les résultats inattendus de ces

tests (Lott et al., 2006) ont été le point de départ de la campagne de tests finale utilisant un module de calibration du LAT l'été 2006 au CERN et l'automne 2006 au GSI.

L'objectif des tests faisceau a été double pour GLAST.

– Calibration en énergie.

Les tests faisceau en ions lourds (GANIL et GSI) ont eu pour but de valider la procédure de calibration en vol du détecteur à partir de la détection des ions lourds du rayonnement cosmique. Cette validation était d'autant plus importante que très peu de références existaient alors sur la réponse des cristaux d'Iodure de Césium aux ions lourds de haute énergie. Si le test du printemps 2003 au GANIL a confirmé les attentes, celui au GSI (automne 2003) a mis en évidence un comportement inattendu des cristaux aux ions lourds relativistes (Lott et al., 2006).

– Reconstruction des gamma.

Les tests faisceau en gamma ou électrons (CERN, 2002 et 2003) ont quant à eux eu pour objectif premier de valider la reconstruction en énergie des événements gamma. Bien que la théorie de la cascade électromagnétique soit connue depuis longtemps, les tests se sont imposés du fait d'une part de la très faible épaisseur du détecteur ($8X_0$ pour le calorimètre) qui pour une part importante des événements ne contient pas l'ensemble de la cascade et donc nécessite une prise en compte des fuites et d'autre part de la géométrie du détecteur.

Les faisceaux au CERN contenant aussi des hadrons, les études de sélection des événements gamma/hadrons ont aussi été menées par la même occasion.

Outre la prise de données, mon rôle dans ces différentes campagnes de faisceaux tests a été l'écriture des codes d'acquisition de données et de visualisation en ligne, des codes de préanalyse ainsi que la mise en oeuvre de l'infrastructure réseau nécessaire à la communication des différents sous-systèmes.

Comme écrit précédemment, ces tests préliminaires ont conduit la collaboration à envisager une campagne de tests à plus grande échelle qui a occupé une partie de l'année 2006. Cette campagne s'appuyait sur l'utilisation du module de calibration, constitué de 2 tours complètes (trajectographe + calorimètre) et d'un calorimètre seul ainsi que quelques éléments du dôme anticoïncidence, chacun des sous-systèmes étant instrumenté avec l'électronique de vol. Les résultats de cette campagne de tests ont permis de valider la reconstruction des événements par le LAT.

Dans la problématique pulsar, la bonne résolution en énergie 8% – 9% entre 1 et 10 GeV revêt une importance capitale dans la détermination de la forme de la coupure à haute énergie de l'émission pulsée et donc dans la localisation des lieux de production des gamma dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons.

3.2.2 La validation du GPS

Si la qualité de la reconstruction en énergie des événements influe directement sur la qualité des résultats de physique que l'on peut tirer des observations, le point critique pour la mise en évidence d'une émission pulsée demeure la datation correcte des événements. Cette considération est loin d'être anecdotique puisque la liste des missions spatiales qui ont connu des problèmes de datation des événements est longue, on peut par exemple citer XMM, INTEGRAL, CHANDRA, CGRO, ROSAT,... Les causes de ses dysfonctionnement sont variées. Elles vont de problèmes d'attribution de la bonne date au bon événement ce qui est problématique dans la mesure où tous les événements ne sont pas ramenés au sol, l'information correcte est perdue avec aucune chance de pouvoir la récupérer, ce qui

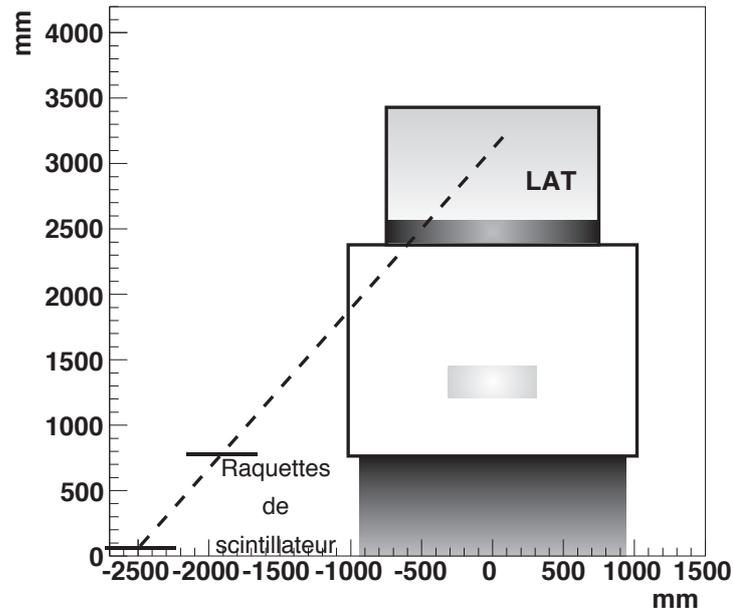


FIG. 3.1 – Principe instrumental du contrôle de la datation des événements du LAT.

a été le cas pour CHANDRA par exemple. D'autres missions spatiales ont connu des problèmes de stabilité des dates fournies (XMM, INTEGRAL, ROSAT).

Le système de datation des événements détectés par le LAT repose sur l'utilisation du GPS de GLAST. Si l'utilisation de cette technologie peut paraître très éprouvée en ce qui concerne la navigation terrestre par exemple, il n'en va pas de même à la précision de datation absolue exigée pour l'étude des pulsars. Il nous a donc paru nécessaire (David Smith et moi-même), de contrôler le système de datation de l'instrument avant le lancement.

La manipulation proposée reposait sur la confiance que l'on avait sur la précision du système de datation GPS, lui aussi, utilisé par CELESTE. En effet, l'obtention de manière stable et répétée du phasogramme du pulsar du Crabe en optique était la preuve de notre compréhension de l'appareil et de la qualité des dates absolues fournies.

Le dispositif envisagé est très simple (3.1), 2 raquettes de scintillateurs placées à côté du LAT lors de son assemblage final sur le satellite dans les locaux de Spectrum Astro (General Dynamics, Gilbert, Arizona) sont chargées lors d'une détection en coïncidence de déclencher le GPS de CELESTE fournissant ainsi une date absolue à l'évènement. En parallèle, le LAT déclenche sur les muons cosmiques fournissant d'une part des événements datés avec le GPS de GLAST mais aussi une trajectoire reconstruite. L'étude porte alors sur les dates des événements ayant traversé les deux détecteurs.

Les tests menés fin février 2007 dans l'enceinte de Spectrum Astro ont révélé un comportement inquiétant des dates relatives. Après vérification, il est apparu que la dent de scie observée 1 ms toutes les 290 s (pente $-3,4 \mu\text{s} \cdot \text{s}^{-1}$) provenait d'une erreur dans les algorithmes de calcul des dates GPS de GLAST, phénomène encore plus dramatique en cas de perte du signal GPS (ce qui peut arriver en orbite), mode pour lequel la datation est assurée par les horloges internes du satellite pour lequel la pente subsiste mais la remise à zéro de la dent de scie ne se fait pas lorsque $\Delta T = 1$ ms.

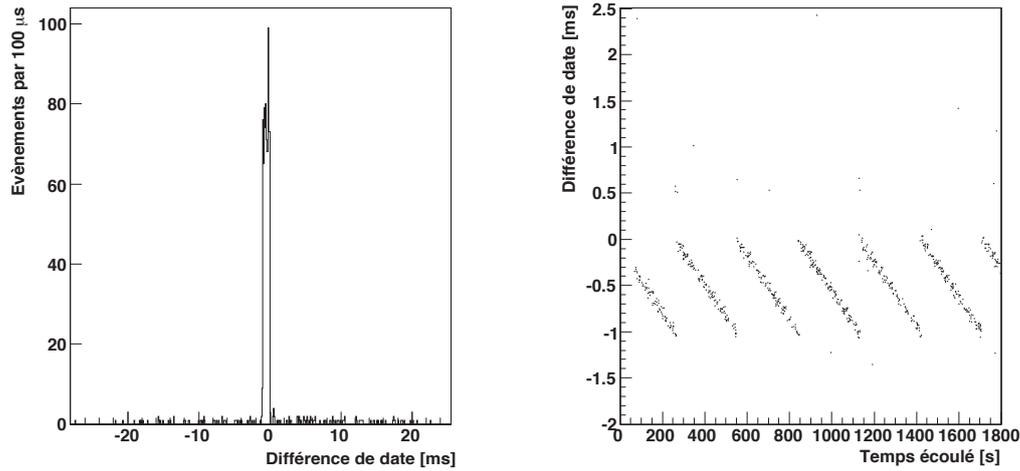


FIG. 3.2 – Distribution des différences de temps GPS entre évènements communs CELESTE et LAT (à gauche), différences de temps évènement par évènement en fonction du temps (à droite), mettant en évidence la dent de scie d’amplitude 1 ms.

La correction du problème, contrôlée par une série de tests à l’automne 2007 conduit à une différence moyenne des dates meilleure que $300ns$ (probablement due au moins en partie à l’imprécision sur les dates fournies par le GPS de CELESTE), précision confirmée lors de la calibration en vol du satellite (Abdo et al., 2009a).

3.2.3 Préparation des éphémérides

Bien que la sensibilité de GLAST et son mode de pointé balayant continûment le ciel permettent de collecter une grande statistique de photons, l’exercice d’extraire des seules données gamma les paramètres de rotation du pulsar afin de construire les courbes de lumière demeure très difficile et très coûteux en temps de calcul. Le prix à payer devient carrément exorbitant pour les pulsars milliseconde qui cumulent 2 défauts pour les méthodes basées sur des transformées de Fourier, leur courte période et leur faible flux, nécessitant donc une intégration des photons sur un temps très long. Une troisième propriété des pulsars milliseconde rend l’exercice carrément illusoire, ils appartiennent pour un grand nombre d’entre eux à des systèmes binaires augmentant ainsi le nombre de paramètres rotationnels à déterminer.

Lorsque les statistiques de photons sont faibles, la méthode la plus directe pour calculer la phase de chaque photon et construire les courbes de lumière consiste à utiliser les paramètres de rotation du pulsar déterminés à des longueurs d’ondes pour lesquelles la statistique est plus favorable, en général radio mais aussi rayons X pour les pulsars émettant seulement à haute énergie.

Comme pour les missions précédentes (EGRET (Arzoumanian et al., 1994)), la préparation d’une base de données d’éphémérides de pulsars était prévue pour GLAST. Les pulsars étant des émetteurs radio faibles leur observation nécessite l’utilisation des plus grands radiotélescopes. A partir de

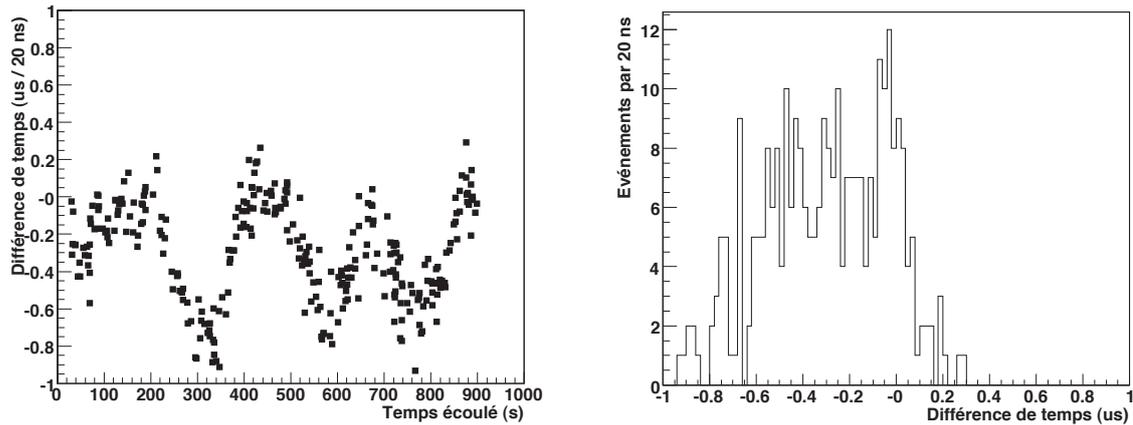


FIG. 3.3 – Après correction, distribution des différences de temps GPS entre évènements communs CELESTE et LAT (à droite), différences de temps évènement par évènement en fonction du temps (à gauche).

2006, les contacts noués avec le groupe pulsars de l’observatoire de Nançay pour la construction des éphémérides ont permis à Lucas Guillemot, thésard dont j’ai co-encadré le travail, et moi-même de mieux cerner les problématiques liées à la construction de celles-ci dans l’optique de leur utilisation par GLAST.

En effet, la configuration de la mission rend ce travail très spécifique et inédit :

- Contrairement à ses prédécesseurs, GLAST ne pointe pas, il reçoit donc en permanence des photons de tous les pulsars émetteurs gamma visibles depuis la Terre. Il est donc nécessaire de pouvoir déterminer la phase d’un photon à n’importe quel moment de la mission, et par conséquent d’avoir des éphémérides valides en permanence sous peine d’attribuer une mauvaise phase au photon et donc de perdre le signal pulsé. Ce n’était pas le cas pour les missions précédentes qui pointaient les sources et pouvaient donc se contenter d’éphémérides valides seulement pendant la durée du pointé.
- Le ciel entier étant balayé en permanence, ces éphémérides valides doivent être disponibles pour tous les pulsars connus (1800).

Jusqu’à 2006, il n’y avait pas de détermination systématique des paramètres rotationnels des pulsars, ceux-ci étaient déterminés au moment de l’étude du pulsar et stockés dans la base de données de l’ATNF (<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>). Les valeurs obtenues n’ayant qu’un caractère indicatif, elles deviennent rapidement obsolètes quand il s’agit de les utiliser pour la reconstruction de la phase des photons du pulsar.

La construction d’éphémérides mises à jour régulièrement pour les quelques 1800 pulsars connus n’étant pas envisageable autant en terme de temps d’observation nécessaire sur les grands télescopes (certains pulsars sont de très faibles émetteurs radio) qu’en terme de disponibilité humaine pour réduire les données (analyse des données radio, production des temps d’arrivée et construction des éphémérides), une sélection des candidats gamma a été nécessaire. Elle s’est appuyée sur les paramètres directeurs issus des résultats d’EGRET d’une part et des modèles théoriques d’autre part :

- L’énergie rayonnée par les pulsars qui nous intéressent étant produite par leur ralentissement, le critère principal de sélection des « candidats » émetteurs gamma a été leur énergie de ralentissement $E = 4\pi^2 I \nu \Omega \text{ erg.s}^{-1}$ où I est le moment d’inertie de l’étoile à neutrons traditionnellement pris

constant d'un pulsar à l'autre et égal à $I \cdot 10^{45} g.cm^2$. Empiriquement, en se basant sur la poignée de pulsars EGRET, il apparaît que l'émission γ semble couper pour des valeurs de l'énergie de ralentissement $\dot{E} \approx 3.10^{34} erg.s^{-1}$. Les grosses incertitudes portant sur la faible statistique de pulsars gamma connue (6) et sur la valeur du moment d'inertie de l'étoile, a conduit à sélectionner les pulsars dont l'énergie de ralentissement est un tiers de cette valeur seuil soit $\dot{E} \approx 10^{34} erg.s^{-1}$. Ceci réduit la liste des candidats à environ 250 sur les quelques 1800 pulsars connus.

- Afin de définir des priorités, ces « candidats » ont été classés en fonction de leur flux γ attendu $\Phi_\gamma \frac{L_\gamma}{d^2} \propto \frac{\sqrt{\dot{E}}}{d^2}$, avec d distance du pulsar à l'observatoire et L_γ luminosité γ attendue alors supposée proportionnelle à la tension des lignes de champ ouvertes $V \simeq 3.18 \times 10^{-3} \sqrt{\dot{E}}$.
- Enfin, les pulsars dont le très faible flux radio (et non émetteurs de rayons X pulsés) exige un temps d'observation déraisonnable ont été éliminés.

La liste finale des cibles a ainsi été réduite à 215 candidats émetteurs γ (Smith et al., 2008) soit un peu plus d'un dixième des pulsars connus. Malgré cela, la constitution de cette base de données, partie du travail de thèse de Lucas Guillemot, a nécessité un énorme travail de collecte et d'analyse des données sur les plus grands radio télescopes du Monde : Parkes en Australie pour les pulsars visibles seulement dans l'hémisphère Sud, Jodrell Bank en Angleterre, Nançay en France pour l'hémisphère Nord et dans une moindre mesure Green Bank Telescope aux Etats-Unis et Arecibo pour les pulsars les plus faibles, et enfin les données X des satellites RXTE et XMM pour les pulsars seulement émetteurs à haute énergie.

La construction de cette base de données hébergée sur les serveurs du CENBG et plus tard sur celui de l'HEASARC (NASA) a constitué un des points critiques de la réussite de GLAST dans le domaine des pulsars. La réussite de la collaboration entre les différents observatoires radio ainsi que les résultats obtenus par *Fermi*, ont même conduit à désormais largement dépasser le nombre escompté de pulsars dont les paramètres rotationnels sont suivis régulièrement puisque la base de données d'éphémérides compte actuellement 834 entrées. Ce travail est toujours poursuivi par Lucas Guillemot au cours de son Post-Doc au Max Planck Institut für Radioastronomie à Bonn puisqu'il est désormais chargé de la coordination des différentes observations.

3.2.4 Contribution à la préparation de la mission

Outre la participation à la prise de données de chacun des tests faisceau de 2002 à 2006, j'ai écrit les codes d'acquisition de données pour chacun des tests préliminaires pour lesquels le CENBG était moteur (CERN 2002 et 2003, GANIL 2003 et GSI 2003). La multiplication des manipulations ainsi que l'évolution de l'électronique d'acquisition à base de modules VME m'ont conduit à écrire une version finale du code C++ gérant les fonctionnalités générales des modules VME dans une classe unique banalisée, permettant ainsi l'implémentation très rapide d'une classe fille spécialisée lors de l'ajout de modules de type nouveau ; la gestion parallèle de différents systèmes, ainsi que de la visualisation des évènements on-line faisant appel à un fonctionnement en multi-threading du programme d'acquisition.

L'utilisation de baies d'acquisition déportées dans les salles d'expériences sous faisceau et donc pilotées par protocole TCP/IP à travers le réseau m'ont conduit à participer au développement du MobileNet conçu par Serge Bordères au sein du service informatique du CENBG. Ce système de routage intelligent permet de distribuer des connexions réseau locales à partir d'une seule connexion sur le

réseau hôte. L'avantage d'un tel système dans le cadre d'une acquisition de données est de pouvoir reproduire les mêmes conditions réseau sur le site de l'expérience que dans la salle de manipulation du laboratoire dans laquelle le système d'acquisition a été développé et testé. Cela assure un déploiement rapide, sans changement de configuration, des différents systèmes participant à l'acquisition. La version finale du dispositif est intégrée dans un châssis 19" et a été utilisée très intensivement avec succès lors des tests CERN de l'été 2006, elle est désormais utilisée par d'autres groupe de recherche du CENBG pour leurs expériences sur accélérateur.

En ce qui concerne la validation de la datation GPS de GLAST, j'ai développé les codes permettant de valider le principe de la mesure proposée en utilisant deux GPS du type de celui présent sur CELESTE. J'ai préparé le système d'acquisition pour qu'il soit opérationnel dans les locaux d'assemblage du satellite. Je n'ai malheureusement pas pu participer à la prise de données, les locaux de Spectrum Astro étant aussi utilisés pour des applications militaires leur accès est très restreint pour les non américains.

Pour la partie éphémérides, j'ai contribué à l'établissement de la liste des candidats à suivre en priorité ainsi qu'au développement des codes préliminaires permettant de constituer la base de données, travail par la suite pris pleinement en charge par Lucas Guillemot.

La participation au Data Challenge a aussi permis de mettre en évidence les lacunes du software d'analyse développé spécifiquement par la mission pour les pulsars, ce qui a conduit dans un premier temps à son amélioration puis dans un second à son abandon au profit de Tempo2 software largement diffusé dans la communauté pulsar radio.

3.3 Les pulsars de *Fermi*

Le 11 juin 2008, GLAST a été lancé depuis Cap Canaveral à bord d'une fusée Delta II, quelques semaines plus tard après validation de son bon fonctionnement, comme le veut la tradition, il est rebaptisé, *Fermi* s'apprête à scruter le ciel gamma.

Une préparation minutieuse de la mission ne suffit malheureusement pas à sa réussite, un détecteur répondant aux spécifications techniques n'implique pas de pouvoir faire la science envisagée au départ. CELESTE en a été un des nombreux exemples.

Au moment du lancement de *Fermi*, la liste des questions ouvertes sur l'émission gamma des pulsars alimentés par leur ralentissement est longue, EGRET ayant finalement apporté peu de réponses définitives :

- Les 6 (une petite dizaine en comptant les détections marginales a posteriori) pulsars γ d'EGRET sont-ils des exceptions dans le ciel ou la partie émergée de l'iceberg ?
Le faible nombre de sources détectées par EGRET a permis de tirer quelques caractéristiques communes, mais aussi des différences, chacun s'individualisant en étant « le plus quelque chose... ».
- Geminga seul pulsar émettant seulement à haute énergie est-il un objet unique ou l'avant garde d'une population restée cachée jusqu'alors ?
Depuis sa découverte au début des années 70 par SAS-2, aucune mission gamma n'a découvert d'autres Geminga.
- Les pulsars milliseconde peuvent-ils être émetteurs γ ?

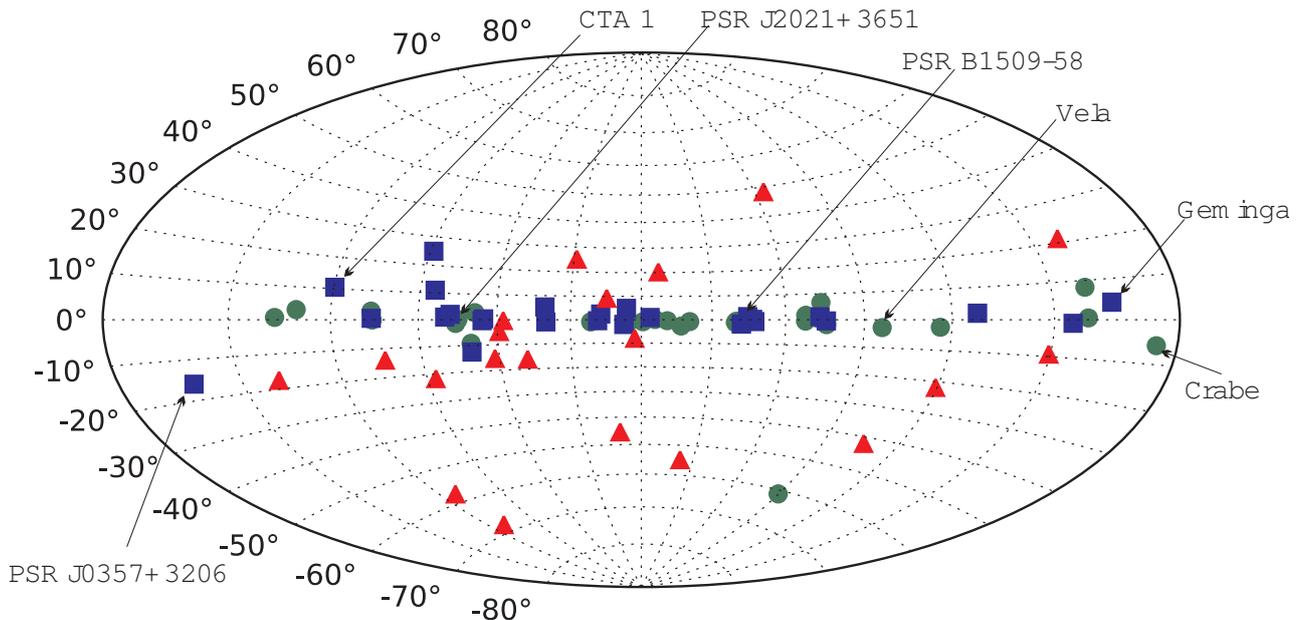


FIG. 3.4 – Position des pulsars détectés par *Fermi*-LAT en coordonnées galactiques. Les ronds verts représentent les pulsars connus en radio et détectés en gamma, les carrés bleus ceux détectés en gamma seulement, enfin les triangles rouges représentent les pulsars milliseconde. Les pulsars dont le nom apparaît sont ceux cités dans le document.

Selon les modèles d'émission, celle-ci est attendue ou au contraire très défavorisée. Sur ce point particulier, les prévisions théoriques sont donc contradictoires, la détection marginale (Kuiper et al., 2000) de PSR J0218+4232 par EGRET n'apportant pas de réponse définitive au débat.

- Quelle est la localisation de l'émission gamma des pulsars, proche de l'étoile ou dans la magnétosphère externe ?

Cette question devant être tranchée par la forme de la coupure spectrale est restée en suspens du fait de la faible efficacité d'EGRET à haute énergie. Au moment du lancement de *Fermi*, les modèles de type Polar Cap (PC) avec accélération des particules près de l'étoile et les modèles de types Outer Gap (OG) ou Slot Gap (SG) prédisant une accélération des particules loin de l'étoile dans la magnétosphère externe demeurent en compétition.

Apporter des réponses à ces questions demande d'un part d'avoir un détecteur performant (le LAT est 25 fois plus sensible que ne l'était EGRET), mais aussi d'avoir des sources à observer. Ce dernier point a été rapidement tranché puisque le premier « nouveau pulsar » depuis EGRET, PSR J2021+3651 (Abdo et al., 2009d) a été détecté de façon significative durant la phase de qualification de *Fermi* à peine 3 jours après la mise sous tension du détecteur.

Très rapidement les réponses aux 3 premières interrogations sont arrivées, on peut distinguer 3 classes de pulsars détectés par *Fermi*, les pulsars « normaux » découverts grâce aux éphémérides radio, les pulsars seulement émetteurs γ et découverts grâce à l'analyse temporelle des seules données *Fermi* et enfin les pulsars milliseconde.

3.3.1 Les pulsars « normaux »

Ces pulsars déjà connus en radio ont pour caractéristiques communes une période de rotation supérieure à $P \approx 30$ ms et un fort ralentissement $\dot{P} \in [10^{-17}, 10^{-13}]$. La majorité d'entre eux ont un âge caractéristique faible $\tau \approx \frac{P}{2\dot{P}}$ et la rotation rapide de l'étoile à neutrons résiduelle est le fruit direct de l'explosion de la supernova de type II par conservation du moment cinétique de l'étoile. Leur champ magnétique de surface élevé $B_S \sim 10^{12}$ G traduit la conservation du flux magnétique durant l'effondrement gravitationnel de l'étoile conduisant à un « gel » des lignes de champ magnétique.

De l'ensemble des pulsars détectés sans ambiguïté par EGRET, seul Geminga n'appartient pas à cette catégorie. C'est leur recherche qui a justifié la construction de la base de données d'éphémérides radio.

La détection par *Fermi* de 30 d'entre eux à ce jour n'est donc pas une surprise et permet donc d'envisager une étude de leurs caractéristiques communes moins biaisée par la faible statistique.

3.3.2 Les pulsars milliseconde

Lorsque nous avons (David Smith et moi-même) proposé comme sujet de thèse les « détections de pulsars milliseconde avec le *Fermi*-LAT » à Lucas Guillemot, le défi était beaucoup plus important. En effet, lors du lancement de *Fermi* rien n'indiquait qu'une population de pulsars milliseconde émetteurs γ se cachait dans la Galaxie (Abdo et al., 2009c), seule la détection marginale de PSR J0218+4232 pouvait le laisser entrevoir.

Même si l'émission supposée des pulsars milliseconde est, à l'instar de celle des pulsars normaux, le fruit du ralentissement de l'étoile, l'origine du phénomène est sensiblement différente. En effet, les pulsars « milliseconde » sont de vieux pulsars, leur âge caractéristique, estimateur acceptable de l'âge réel pour les pulsars normaux, pouvant même dépasser celui de l'Univers !!!

L'histoire de ces pulsars est donc différente, ils sont dits recyclés. Après avoir vécu leur vie de pulsar « normal » et subi un ralentissement les conduisant inexorablement à l'extinction de leur émission (zone dépeuplée en bas à droite du diagramme $P - \dot{P}$), ils réaccélèrent par accrétion du moment cinétique de leur compagnon. En effet, ces pulsars se trouvent préférentiellement dans des systèmes binaires (pour 80% d'entre eux), configuration très rare chez les pulsars normaux qui sont essentiellement des astres isolés (moins de 1% des pulsars normaux dans des systèmes binaires).

Cette réaccélération jusqu'à des périodes voisines de la ms, leur confère des propriétés sensiblement différentes de celles des pulsars normaux. Ils présentent une très grande stabilité avec des valeurs caractéristiques de ralentissement faibles $\dot{P} \approx 10^{-17}$, et des champs magnétiques de surface sensiblement moins élevés que ceux des pulsars normaux $B_S \sim 10^8$ G. Ce dernier point est un des arguments plaidant pour une faible efficacité des pulsars milliseconde à accélérer des particules jusqu'aux hautes énergies.

La première année de fonctionnement de *Fermi* s'est conclue par la détection de 8 pulsars milliseconde, découverte faisant l'objet d'une publication dans *Science* (Abdo et al., 2009c), et surtout, le coeur de la thèse de Lucas Guillemot soutenue le 24 septembre 2009 au CENBG (Guillemot, 2009). Cette première série de détections a été suivie par celle d'une douzaine d'autres portant ainsi le nombre de pulsars milliseconde émetteurs γ à 21.

3.3.3 Les pulsars détectés en gamma seulement

Depuis sa découverte en tant que source γ par SAS-2 dans les années 70 puis son identification en tant que pulsar γ par EGRET presque 20 ans plus tard, Geminga est resté le seul pulsar dont l'émission n'est connue qu'à haute énergie. Ce statut d'astre unique n'a pas survécu plus de 2 mois au démarrage de *Fermi* avec la découverte du pulsar PSR J0007+7303 dans le reste de supernova CTA1 (Abdo et al., 2008). Le coeur des restes de supernova, vestige de la coquille de matière éjectée lors de l'explosion de l'étoile massive originelle est une cible privilégiée pour la recherche de pulsars, l'étoile à neutrons étant supposée se former au centre du système.

Bien que le groupe du CENBG soit plutôt impliqué dans la recherche de pulsars déjà connus à d'autres longueurs d'ondes (« normaux » ou milliseconde), cette découverte met en lumière 2 qualités essentielles de *Fermi*, le saut en sensibilité accompli par rapport aux missions précédentes et la grande force du mode de balayage continu du Ciel qui permet de s'affranchir du choix de cible potentielle.

Au bout d'un an, 16 de ces nouveaux « Geminga » ont été découverts par *Fermi* (Abdo et al., 2009b) mettant en évidence l'existence d'une population d'étoiles à neutrons inconnues jusqu'alors. Cette découverte associée à celle de l'émission des pulsars milliseconde a valu à *Fermi* de faire la couverture du numéro de Science du 14 août 2009.

Les caractéristiques de ces pulsars silencieux en radio ne semblent pas différer de celles des pulsars normaux laissant supposer que leur non-détection en radio pourrait être due à la géométrie des faisceaux radio et gamma.

Depuis, la population de pulsars découverts par leur émission γ a atteint le nombre de 25, soit presque autant que celle des pulsars « normaux », laissant supposer que les pulsars silencieux en radio sont potentiellement aussi nombreux que ceux identifiés par leur émission radio.

L'absence de découverte de pulsars milliseconde par leur émission γ s'explique par le fait qu'explorer le domaine des très courtes périodes est extrêmement coûteux en terme de temps de calcul, difficulté encore accrue par la faible luminosité γ de ces sources.

3.3.4 Quelques caractéristiques générales

Si les détections de pulsars mettent en évidence une somme d'individus, le nombre élevé de sources de chacun des 3 types permet d'extraire des caractéristiques générales qui sont détaillées dans le premier catalogue de pulsars de *Fermi* (Abdo et al., 2010a) présentant l'étude de 46 de ces objets détectés durant les 6 premiers mois de fonctionnement de *Fermi*.

Malgré toutes les précautions d'usage qu'il faut prendre lorsqu'on doit tirer des conclusions sur une population aussi biaisée

- étant donné leur très faible flux, les pulsars milliseconde détectés par *Fermi* sont nécessairement très proches pour pouvoir apparaître en dehors du plan galactique extrêmement bruité par le fond diffus de γ .
- les éphémérides dont dispose *Fermi* ne couvrent pas de façon uniforme la population de pulsars connus en radio.
- les algorithmes de recherche des pulsars émetteurs γ seuls ne permettent pas la découverte de pulsars milliseconde ou de pulsars dans les systèmes binaires.

– etc.

un certain nombre de tendances générales semblent faire jour :

- Il n’y a pas de différences notables dans l’émission γ observée pour chacun des 3 types de pulsars. S’il y a des différences entre pulsars à l’intérieur de chacune des catégories, il ne semble pas en revanche y en avoir de manière globale entre chacune d’entre elles.
- Forme de la courbe de lumière
 - La majorité des courbes de lumières présentent 2 pics étroits suggérant la présence de caustiques.

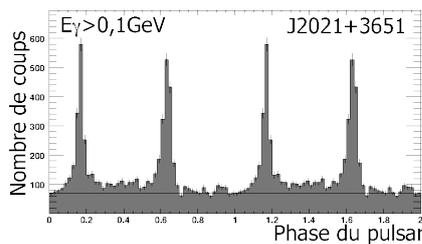


FIG. 3.5 – Courbe de lumière typique des pulsars à 2 pics détectés par *Fermi*-LAT. Ici, PSR J2021+3651 premier pulsar radio découvert en γ depuis EGRET.

- Lorsqu’un seul pic est observé, il est généralement plus large suggérant que pour ces pulsars la ligne de visée coupe le cône d’émission tangentiellement.

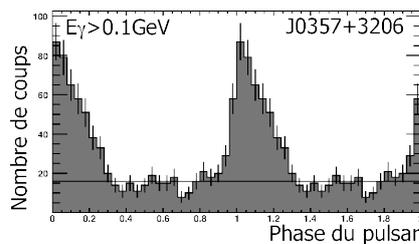


FIG. 3.6 – Courbe de lumière typique des pulsars à un seul pic détectés par *Fermi*-LAT. Ici, PSR J0357+3206 pulsar découvert en γ , inconnu en radio.

- Ces 2 configurations vont dans le sens d’une émission à haute altitude dans la magnétosphère (Outer Gap et partie externe du modèle Slot Gap).
- Lorsque 2 pics sont présents dans la courbe de lumière γ , la distribution des écarts entre pics apparaît comme étant bimodale, piquant autour de 0,2 – 0,3 comme attendu par les modèles de type OG et autour de 0,4 – 0,5 comme prédit par les modèles de type TPC.

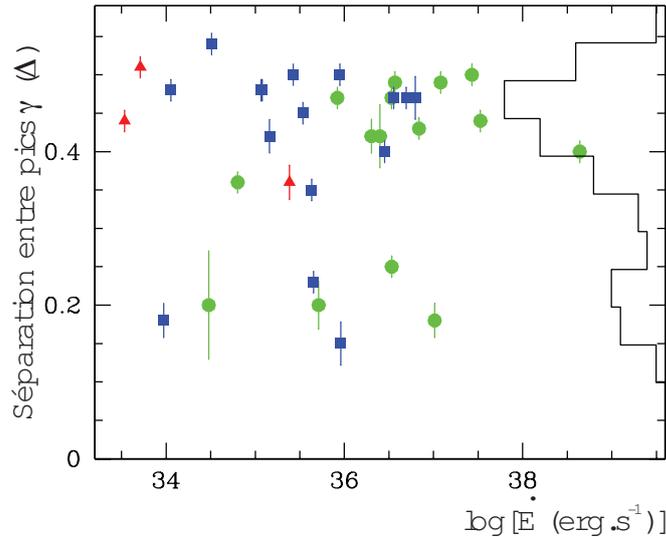


FIG. 3.7 – Distribution de l'écart entre les pics en fonction du logarithme de la perte d'énergie par freinage des pulsars présentant 2 pics en gamma. Les ronds verts représentent les pulsars connus en radio et détectés en gamma, les carrés bleus ceux détectés en gamma seulement, enfin les triangles rouges représentent les pulsars milliseconde.

- Pour les pulsars émetteurs radio
 - Le décalage entre pic radio et pic gamma apparaît comme corrélé, ce qui est une indication en faveur des modèles dont l'émission gamma a lieu à haute altitude dans la magnétosphère.
- A de très rares exceptions près, ces courbes de lumière se révèlent compatibles avec les modèles d'émission proches de la calotte polaire.
- Un nombre important des pulsars détectés présente une évolution du rapport des amplitudes des 2 pics P2 et P1 allant vers une extinction progressive de P1 à haute énergie.
- Les coupures en énergie de forme simple exponentielle sont la règle suggérant une fois de plus une émission privilégiée dans la magnétosphère externe. La dispersion de cette coupure est assez faible essentiellement comprise entre 1 et 3 GeV, le crabe avec sa coupure autour de 6 GeV et PSR B1509-58 avec sa coupure à très basse énergie se démarquant notablement.

Enfin, le placement des sources détectées par *Fermi*-LAT sur le traditionnel diagramme P-Pdot confirme les attentes extrapolées à partir des résultats d'EGRET. Les pulsars émetteurs γ se situent plutôt en haut à gauche du diagramme, ce sont des pulsars jeunes. On ne note pas de distinction réelle entre pulsars γ déjà connus en radio et pulsars émetteurs seulement en γ , les pulsars milliseconde en bas à gauche se distinguent aussi, ce qui était moins attendu.

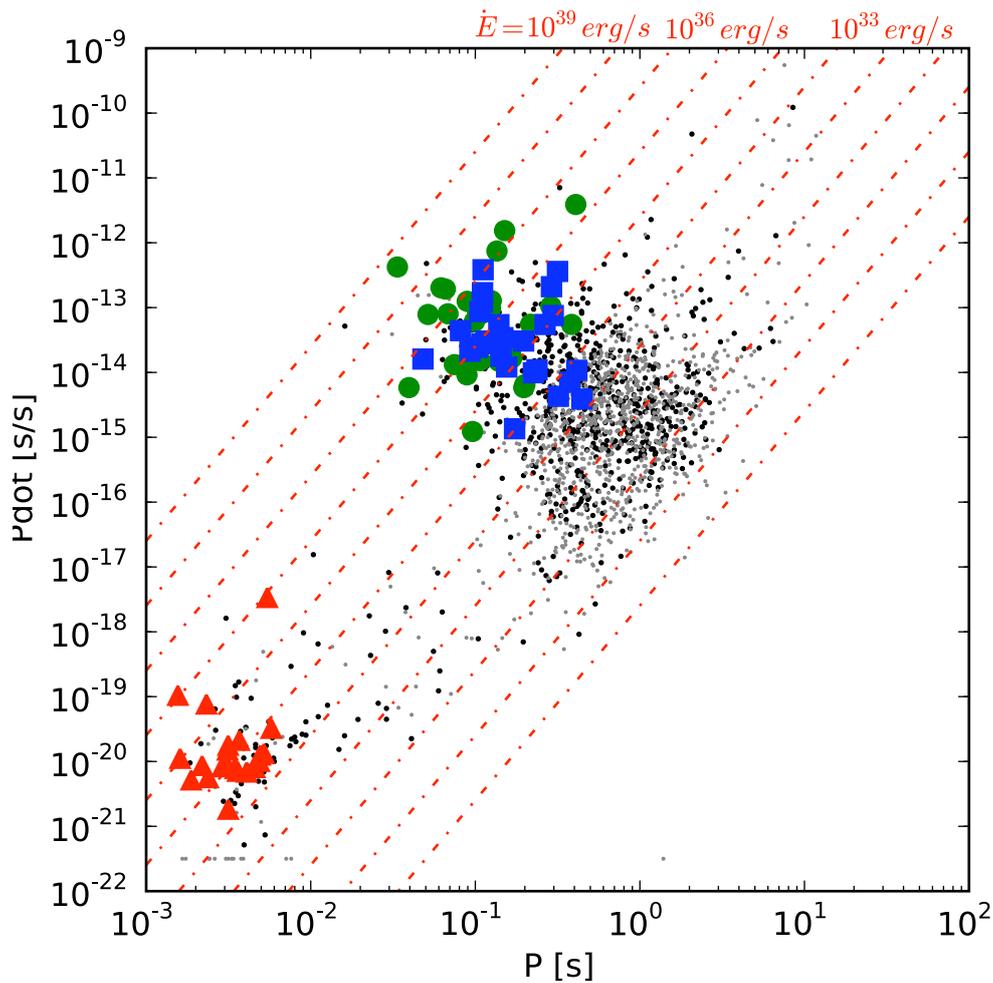


FIG. 3.8 – Diagramme P-Pdot représentant la dérivée de la période de rotation de chaque pulsar en fonction de sa période. La convention de couleur est la même que dans le graphe 3.7.

3.3.5 Une histoire de Pulsars γ : Geminga

Bien que Geminga ait perdu son statut d'unique pulsar émetteur seulement à haute énergie, il n'en demeure pas moins par son histoire mouvementée et par l'intérêt qu'a suscité cette source, un témoin privilégié de l'évolution de l'astronomie γ .

3.3.5.1 SAS-2 découvre une mystérieuse source γ .

1975, une centaine de photons concentrés autour de 195° de longitude galactique et un peu au dessus du plan marque les débuts modestes de l'aventure de Geminga.

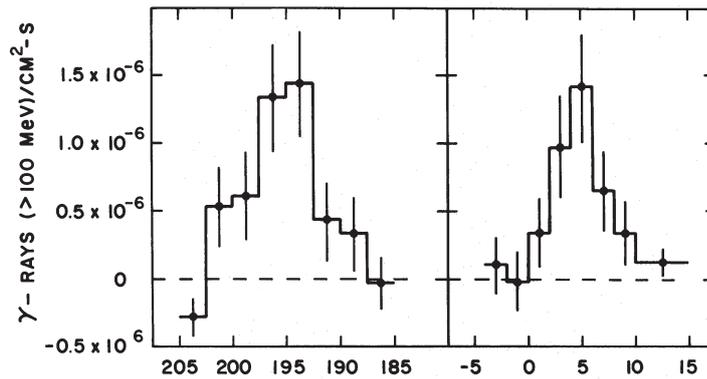


FIG. 3.9 – Excès de photons γ détecté dans la direction de Geminga par SAS-2

Troisième source γ après le Crabe et Vela à être découverte, et identifiée comme une source ponctuelle, une recherche de pulsations est naturellement effectuée (Thompson et al., 1977) malgré la très faible statistique, donnant à la source sa première période possible de P 59 s avec une valeur énorme de sa dérivée \dot{P} $2,2 \times 10^{-9}$ et son premier spectre Γ 1,9. La très courte durée de vie de SAS-2 n'a pas permis de pousser l'étude plus avant.

3.3.5.2 COS-B confirme, pas les observatoires radio...

La source devenue CG195 4 résiste toujours à la détection radio (c'est à ce moment qu'elle devient Geminga pour les radioastronomes tout d'abord), mais COS-B confirme rapidement la détection de la source ponctuelle vue par SAS-2 et précise les paramètres de son émission pulsée P 59,19687 s et \dot{P} $1,385 \times 10^{-9}$ ainsi que son indice spectral Γ 1,8 plus dur que celui du Crabe (Masnou et al., 1977).

3.3.5.3 EGRET, Geminga est identifié comme un pulsar γ .

Immédiatement après la mise en évidence de l'émission pulsée en X de Geminga avec une période de 237ms par ROSAT (Halpern & Holt, 1992), elle est confirmée par EGRET (Bertsch et al., 1992).

Geminga est démasqué, c'est une étoile à neutrons isolée, proche, en rotation rapide. Sa période et son ralentissement $P = 237\text{ms}$ et $\dot{P} = 11,4 \times 10^{-15}$, son champ magnétique déduit $B_S = 1,6 \times 10^{12}\text{Gauss}$, son âge évalué à 300000 ans et sa perte d'énergie par rotation $\dot{E} = 3,5 \times 10^{34}\text{erg.s}^{-1}$, en font un pulsar γ presque comme les autres. Ces valeurs sont retrouvées dans la foulée dans les archives de COS-B (Bignami & Caraveo, 1992) et SAS-2 (Mattox et al., 1992) missions pour lesquelles la faible statistique respectivement 1897 photons et 82 photons a rendu périlleuse la recherche de la période réelle du pulsar.

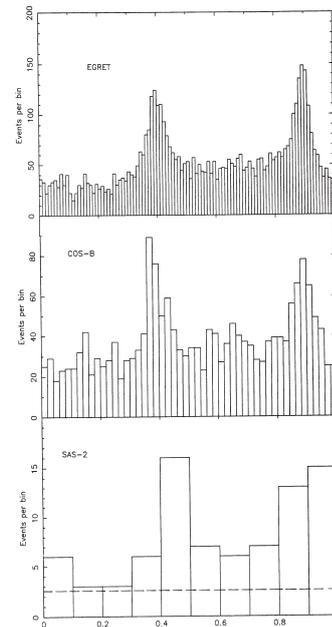


FIG. 3.10 – Courbe de lumière de Geminga vue par EGRET et telle que retrouvée à partir des événements archivés COS-B et SAS-2.

3.3.5.4 EGRET, Geminga est étudié en détails.

La statistique sur la seconde source constante la plus intense du ciel au GeV augmentant, a permis d'envisager des études spectrales portant sur les photons issus d'une portion de la courbe de lumière (Mayer-Hasselwander et al., 1994) mettant en évidence une variation d'indice spectral de la source en fonction de sa rotation. Ces études, systématisées pour les sources intenses (Fierro et al., 1998), ont ouvert la voie à une étude « dynamique » de l'émission γ .

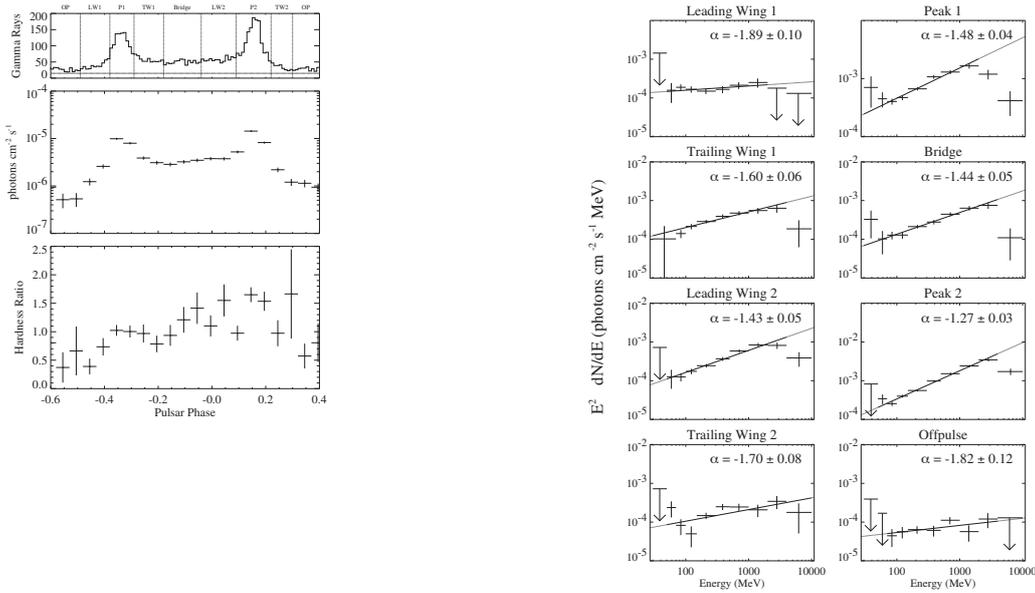


FIG. 3.11 – A gauche, courbe de lumière de Geminga montrant les différents domaines du profil temporel. A droite, spectre de Geminga résolu en phase tel qu’observé par EGRET.

En revanche, la faible statistique collectée par EGRET aux plus hautes énergies n’a pas permis de trancher sur la forme de la coupure spectrale pourtant visible sur le spectre global de l’émission de l’étoile autour de 2 GeV.

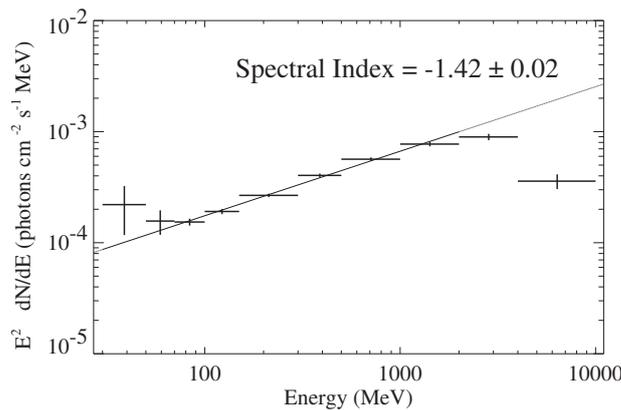


FIG. 3.12 – Spectre intégré en phase observé par EGRET

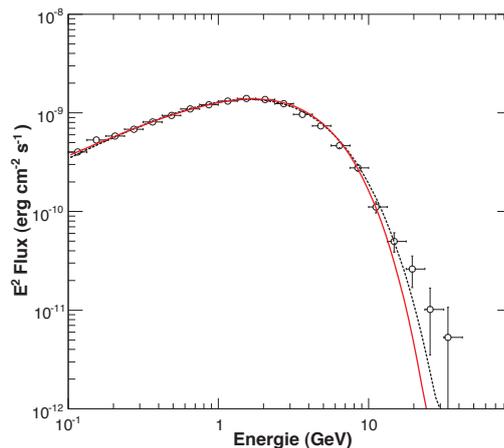


FIG. 3.14 – Spectre de Geminga intégré en phase obtenu en utilisant un an de données *Fermi*-LAT.

3.3.5.5 *Fermi*-LAT, un nouvel horizon

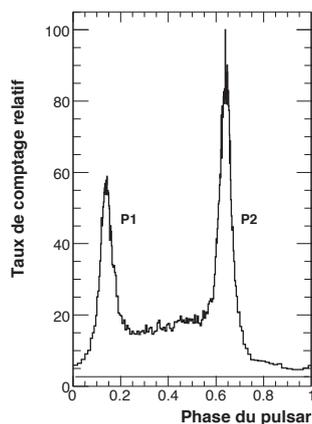


FIG. 3.13 – Courbe de lumière de Geminga obtenue en utilisant un an de données *Fermi*.

Si l'apport le plus évident de *Fermi* pour les pulsars dans la première année de fonctionnement est l'explosion du nombre de détections et l'émergence de nouvelles familles d'émetteurs de photons γ pulsés, la sensibilité de *Fermi* et la résolution temporelle améliorée apportent des informations essentielles sur les sources individuelles.

L'étude de Geminga sur la première année de données (Abdo et al., 2010b) permet de se faire une idée des possibilités ouvertes par le LAT du fait de l'augmentation spectaculaire du nombre de photons γ disponibles pour les analyses de données (60000 photons de Geminga en un an d'utilisation du LAT contre quelques milliers pour les 9 ans

d'EGRET).

Cette profusion de photons amène aussi son lot de nouvelles questions, ainsi si EGRET n'avait pas pu trancher sur la forme de la coupure par manque de statistique à haute énergie, la réponse apportée par *Fermi* peut paraître déroutante, car aucune des formes spectrales attendues ne s'ajuste de façon satisfaisante sur le spectre intégré de la source !!!

Loin de remettre en cause l'ensemble des modèles, cette difficulté traduit simplement le fait que le LAT est plus sensible que ces-derniers, le spectre observé apparaissant ainsi comme la superposition de l'émission de plusieurs populations d'électrons vues à différents moments de la rotation de l'étoile,

cette somme de loi de puissance tronquées de différents indices et différentes énergies de coupure intégrée sur l'ensemble de la rotation ne donnant pas les paramètres attendus par les modèles.

En revanche, la très grande statistique accumulée permet de sonder très en détail l'évolution des paramètres spectraux de l'étoile donnant non seulement des informations sur la localisation dans la magnétosphère du pulsar des populations d'électrons émettant les gamma, mais aussi des indications sur la géométrie de l'émission.

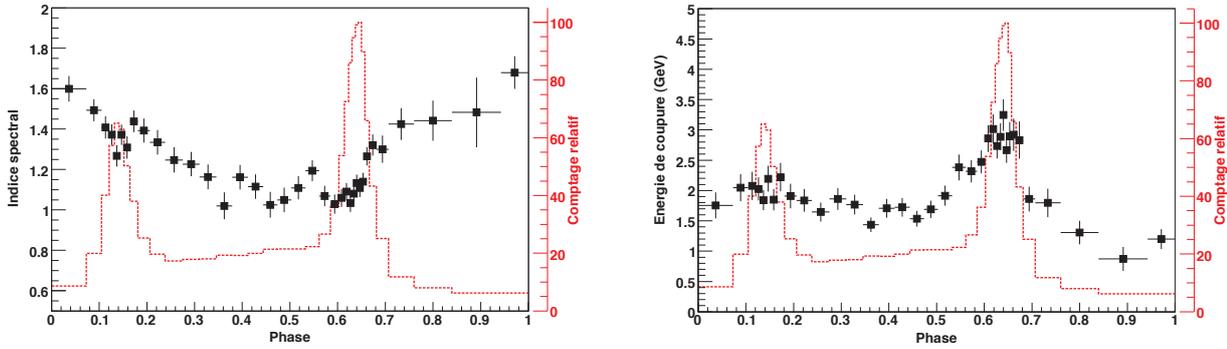


FIG. 3.15 – A gauche, évolution de l'indice spectral de Geminga en fonction de la phase du pulsar. A droite, évolution de l'énergie de coupure en fonction de la phase du pulsar. Pour chaque pas de phase, le modèle d'émission est compatible avec un spectre en loi de puissance coupé par une simple exponentielle.

L'évolution violente de l'indice spectral au passage du maximum des pics de la courbe de lumière visible sur la figure de gauche représentant une indication forte de la présence d'un effet de caustiques, effet prévu dans les modèles de type Slot Gap (Two Pole Caustics). L'énergie de coupure 3.15, de son côté, suit plutôt l'évolution de la courbe de lumière confirmant le durcissement des spectres au voisinage des maxima d'émission tel qu'il avait été observé par EGRET et confirmé par AGILE.

Le LAT permet donc de sonder la géométrie des faisceaux de gamma émis par le pulsar, l'étude des spectres résolus en phase devenant alors l'outil essentiel de discrimination des modèles d'émission comme présenté par EGRET.

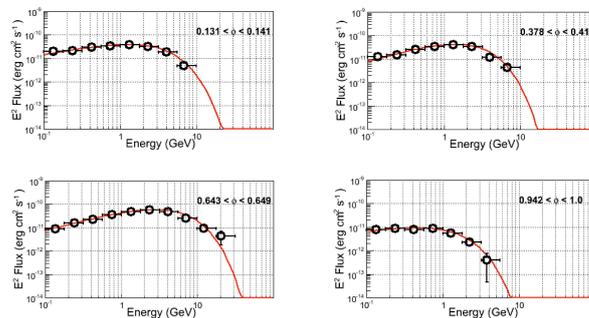


FIG. 3.16 – Exemples de spectres résolus en phase obtenus avec un an de données *Fermi*-LAT.

Si pendant longtemps l'attente de données en quantité suffisante a été un frein à la discrimination entre modèles d'émission haute énergie des pulsars, il semble désormais acquis que les niveaux de détail atteints par les résultats expérimentaux du LAT poussent ces modèles à se complexifier afin d'améliorer leur capacité à décrire les observations, tant pour les objets individuels que pour les populations.

3.4 Conclusion

Conclure le chapitre *GLAST/Fermi* semble largement prématuré tant les résultats obtenus au cours des 2 premières années sont riches et continuent à s'accumuler à un rythme soutenu. Comme cela a été le cas pour chacune des missions précédentes, le lancement d'un nouvel instrument révolutionne la vision du ciel gamma et appelle à des remises en question sur notre compréhension des objets émettant à haute énergie. Le cas des pulsars en est un exemple typique, puisqu'en quelques mois d'observation du ciel par *Fermi 2* nouvelles populations d'étoiles à neutrons émettrices de γ ont rejoint celle des pulsars jeunes connus en radio. Chacune de ces populations apporte un nouvel éclairage sur les mécanismes d'émission haute énergie des pulsars pour lesquels une certaine universalité semble se dégager, privilégiant des zones d'émission plutôt éloignées de la surface de l'étoile, ainsi que sur la géométrie des faisceaux de γ dont la structure détaillée semble désormais accessible à l'observation.

Bibliographie

- Abdo, A. A., et al., 2008, *Science*, 322, 1218
- Abdo, A.A., et al, 2009, *Astroparticle Physics*, 32, 193
- Abdo, A. A., et al., 2009, *Science*, 325, 840
- Abdo, A. A., et al., 2009, *Science*, 325, 848
- Abdo, A. A., et al., 2009, *ApJ*, 700, 1059
- Abdo, A. A., et al., 2010, *ApJ*, 187, 460
- Abdo, A. A., et al., 2010, *ApJ*, 720, 272
- Arzoumanian, Z., Nice, D. J., Taylor, J. H., & Thorsett, S. E., 1994, *ApJ*, 422, 671
- Atwood, W. B., & the GLAST Collaboration 1994, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 342, 302
- Atwood, W. B., et al., 2009, *ApJ*, 697, 1071
- Bertsch, D. L., et al., 1992, *Nature*, 357, 306
- Bignami, G. F., & Caraveo, P. A., 1992, *Nature*, 357, 287
- Fierro, J. M., Michelson, P. F., Nolan, P. L., & Thompson, D. J., 1998, *ApJ*, 494, 734
- Guillemot, L., 2009, Thèse Université Bordeaux I
- Halpern, J. P., & Holt, S. S., 1992, *Nature*, 357, 222
- Kuiper, L., Hermsen, W., Verbunt, F., Thompson, D. J., Stairs, I.H., Lyne, A. G., Strickman, M. S., & Cusumano, G., 2000, *A&A*, 359, 615
- Lott, B., et al., 2006, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 560, 395
- Masnou, J. L., et al., 1977, *Recent Advances in Gamma-Ray Astronomy*, 124, 33
- Mattox, J. R., Bertsch, D. L., Fichtel, C. E., Hartman, R. C., Kniffen, D. A., & Thompson, D. J., 1992, *ApJL*, 401, L23
- Mayer-Hasselwander, H. A., et al., 1994, *ApJ*, 421, 276

Smith, D. A., et al., 2008, ApJ, 492, 923

Thompson, D. J., Fichtel, C. E., Hartman, R. C., Kniffen, D. A., & Lamb, R. C., 1977, ApJ, 213, 252



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 560 (2006) 395–404

NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH
Section A

www.elsevier.com/locate/nima

Response of the GLAST LAT calorimeter to relativistic heavy ions

B. Lott^{a,*}, F. Piron^b, B. Blank^a, G. Bogaert^c, J. Bregeon^a, G. Cachel^a, A. Chekhtman^d,
P. d’Avezac^c, D. Dumora^a, J. Giovinazzo^a, J.E. Grove^d, M. Hellström^e, A. Jacholkowska^b,
W.N. Johnson^d, E. Nuss^b, Th. Reposeur^a, D.A. Smith^a, K. Sümmerer^e, for the
GLAST collaboration

^aCentre d’Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan, CNRS/IN2P3-Université Bordeaux I, Domaine du Haut Vigneau,
BP 120, F-33175 Gradignan Cedex, France

^bLaboratoire de Physique Théorique et d’Astroparticules, Université de Montpellier II, Place Eugene Bataillon, F - 34095 Montpellier Cedex 5, France

^cLaboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique, Route de Saclay, F-91128 Palaiseau Cedex, France

^dNaval Research Laboratory, Code 7651, 4555 Overlook Avenue, Washington, DC 20375-6817, USA

^eGesellschaft für Schwerionenforschung, Planckstrasse 1, D-64291 Darmstadt, Germany

Received 17 December 2005; accepted 17 December 2005

Available online 17 January 2006

Abstract

The CsI calorimeter of the Gamma-Ray Large-Area Space Telescope (GLAST) will be calibrated in flight with cosmic-ray heavy ions. In order to determine the response of the calorimeter to relativistic heavy ions lighter than Fe, an experiment was carried out at the GSI heavy ion facility using the Fragment Separator (FRS). The measured response exhibits an unexpected feature for light ions, opposite to that observed at low incident energy: for a given deposited energy, the observed signal is greater for these ions than for protons (or more generally $Z = 1$ minimum ionizing particles). Pulse shapes are found to be almost identical for carbon ions and $Z = 1$ particles, with a significant slow scintillation component, which constitutes another departure from the low-energy behavior. Data on the energy resolution for the individual CsI crystals and on the loss of ions due to nuclear reactions in the calorimeter are also presented.

© 2006 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 29.40.Mc; 95.55.Ka

Keywords: Scintillation; Relativistic heavy ions; CsI; Calorimeter

1. Introduction

The Gamma-Ray Large-Area Space Telescope (GLAST) [1] is the next generation high-energy gamma-ray satellite, to be launched by NASA in 2007. GLAST’s main instrument, the large area telescope (LAT) [2] will cover the energy range between 20 MeV and 300 GeV. The LAT will comprise three subsystems: a tracker made of 18 layers of crossed silicon strips interlaced with W converter foils, wherein the incident gamma ray converts into a e^+e^- pair, a CsI calorimeter (8.5 radiation lengths in thickness, made of 1536 crystals) sampling the electromagnetic-shower

energy, and an anticoincidence shield for vetoing charged cosmic rays. The LAT will be composed of 16 elements called towers, each made of a tracker and a calorimeter module.

In orbit, the energy calibration and the response monitoring of the calorimeter will exploit the energy deposits of cosmic-ray heavy ions (essentially C, N, O, Si and Fe). Fig. 1 displays a typical energy spectrum of carbon ions at GLAST’s flight altitude (565 km), as calculated with the code CREME [3]. This spectrum is depleted at low energy due to the geomagnetic cutoff and peaks around 4 GeV/nucleon. Within the calorimeter, most ions will induce nuclear reactions with Cs or I nuclei. The others (less than 30% for Fe) will only suffer ionization energy loss. As the ion energies are close to

*Corresponding author.

E-mail address: lott@cenbg.in2p3.fr (B. Lott).

THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE *FERMI* GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE MISSION

W. B. ATWOOD¹, A. A. ABDO^{2,5,8}, M. ACKERMANN³, W. ALTHOUSE³, B. ANDERSON¹, M. AXELSSON⁴, L. BALDINI⁵, J. BALLE⁶,
D. L. BAND^{7,8}, G. BARBIELLINI^{9,10}, J. BARTELT³, D. BASTIERI^{11,12}, B. M. BAUGHMAN¹³, K. BECHTOL³, D. BÉDÉRÈDE¹⁴,
F. BELLARDI⁵, R. BELLAZZINI⁵, B. BERENJI³, G. F. BIGNAMI¹⁵, D. BISELLO^{11,12}, E. BISSALDI¹⁶, R. D. BLANDFORD³, E. D. BLOOM³,
J. R. BOGART³, E. BONAMENTE^{17,18}, J. BONNELL⁸, A. W. BORGLAND³, A. BOUVIER³, J. BREGEON⁵, A. BREZ⁵, M. BRIGIDA^{19,20},
P. BRUEL²¹, T. H. BURNETT²², G. BUSETTO^{11,12}, G. A. CALIANDRO^{19,20}, R. A. CAMERON³, P. A. CARAVEO²³, S. CARIUS²⁴,
P. CARLSON²⁵, J. M. CASANDJIAN⁶, E. CAVAZZUTI²⁶, M. CECCANTI⁵, C. CECCHI^{17,18}, E. CHARLES³, A. CHEKHTMAN^{2,27},
C. C. CHEUNG⁸, J. CHIANG³, R. CHIPAUX²⁸, A. N. CILLIS⁸, S. CIPRINI^{17,18}, R. CLAUS³, J. COHEN-TANUGI²⁹, S. CONDAMOR³,
J. CONRAD^{25,30}, R. CORBET⁸, L. CORUCCI⁵, L. COSTAMANTE³, S. CUTINI²⁶, D. S. DAVIS^{8,31}, D. DECOTIGNY²¹, M. DEKLOTZ³²,
C. D. DERMER², A. DE ANGELIS³³, S. W. DIGEL³, E. DO COUTO E SILVA³, P. S. DRELL³, R. DUBOIS³, D. DUMORA^{34,35},
Y. EDMONDS³, D. FABIANI⁵, C. FARNIER²⁹, C. FAVUZZI^{19,20}, D. L. FLATH³, P. FLEURY²¹, W. B. FOCKE³, S. FUNK³, P. FUSCO^{19,20},
F. GARGANO²⁰, D. GASPARRINI²⁶, N. GEHRELS^{8,36}, F.-X. GENTIT³⁷, S. GERMANI^{17,18}, B. GIEBELS²¹, N. GIGLIETTO^{19,20}, P. GIOMMI²⁶,
F. GIORDANO^{19,20}, T. GLANZMAN³, G. GODFREY³, I. A. GRENIER⁶, M.-H. GRONDIN^{34,35}, J. E. GROVE², L. GUILLEMOT^{34,35},
S. GUIRIEC²⁹, G. HALLER³, A. K. HARDING⁸, P. A. HART³, E. HAYS⁸, S. E. HEALEY³, M. HIRAYAMA^{8,31}, L. HJALMARS-DOTTER⁴,
R. HORN³², R. E. HUGHES¹³, G. JÓHANNESSEN³, G. JOHANSSON²⁴, A. S. JOHNSON³, R. P. JOHNSON¹, T. J. JOHNSON^{8,36},
W. N. JOHNSON², T. KAMAE³, H. KATAGIRI³⁸, J. KATAOKA³⁹, A. KAVELAARS³, N. KAWAI^{40,39}, H. KELLY³, M. KERR²²,
W. KLAMRA²⁵, J. KNÖDLSER⁴¹, M. L. KOCIAN³, N. KOMIN^{6,29}, F. KUEHN¹³, M. KUSS⁵, D. LANDRIU⁶, L. LATRONICO⁵, B. LEE⁴²,
S.-H. LEE³, M. LEMOINE-GOUMARD^{34,35}, A. M. LIONETTO^{43,44}, F. LONGO^{9,10}, F. LOPARCO^{19,20}, B. LOTT^{34,35}, M. N. LOVELLETTE²,
P. LUBRANO^{17,18}, G. M. MADEJSKI³, A. MAKEEV^{27,2}, B. MARANGELLI^{19,20}, M. M. MASSAI⁵, M. N. MAZZIOTTA²⁰, J. E. MCENERY⁸,
N. MENON^{5,32}, C. MEURER³⁰, P. F. MICHELSON^{3,59}, M. MINUTI⁵, N. MIRIZZI^{19,20}, W. MITTHUMSIRI³, T. MIZUNO³⁸,
A. A. MOISEEV⁷, C. MONTE^{19,20}, M. E. MONZANI³, E. MORETTI^{9,10}, A. MORSELLI^{43,44}, I. V. MOSKALENKO³, S. MURCIA³,
T. NAKAMORI³⁹, S. NISHINO³⁸, P. L. NOLAN³, J. P. NORRIS⁴⁵, E. NUSS²⁹, M. OHNO⁴⁶, T. OHSUGI³⁸, N. OMODEI⁵, E. ORLANDO¹⁶,
J. F. ORMES⁴⁵, A. PACCAGNELLA^{11,47}, D. PANEQUE³, J. H. PANETTA³, D. PARENT^{34,35}, M. PEARCE²⁵, M. PEPE^{17,18}, A. PERAZZO³,
M. PESCE-ROLLINS⁵, P. PICOZZA^{43,44}, L. PIERI¹¹, M. PINCHERA⁵, F. PIRON²⁹, T. A. PORTER¹, L. POUPARD⁶, S. RAINÒ^{19,20},
R. RANDO^{11,12}, E. RAPPOSELLI⁵, M. RAZZANO⁵, A. REIMER³, O. REIMER³, T. REPOSEUR^{34,35}, L. C. REYES⁴⁸, S. RITZ^{8,36},
L. S. ROCHESTER³, A. Y. RODRIGUEZ⁴⁹, R. W. ROMANI³, M. ROTH²², J. J. RUSSELL³, F. RYDE²⁵, S. SABATINI^{43,44},
H. F.-W. SADROZINSKI¹, D. SANCHEZ²¹, A. SANDER¹³, L. SAPOZHNIKOV³, P. M. SAZ PARKINSON¹, J. D. SCARGLE⁵⁰,
T. L. SCHALK¹, G. SCOLIERI⁵¹, C. SGRÒ⁵, G. H. SHARE^{2,52}, M. SHAW³, T. SHIMOKAWABE³⁹, C. SHRADER⁷,
A. SIERPOWSKA-BARTOSIK⁴⁹, E. J. SISKIND⁵³, D. A. SMITH^{34,35}, P. D. SMITH¹³, G. SPANDRE⁵, P. SPINELLI^{19,20}, J.-L. STARCK⁶,
T. E. STEPHENS⁸, M. S. STRICKMAN², A. W. STRONG¹⁶, D. J. SUSON⁵⁴, H. TAJIMA³, H. TAKAHASHI³⁸, T. TAKAHASHI⁴⁶,
T. TANAKA³, A. TENZE⁵, S. TETHER³, J. B. THAYER³, J. G. THAYER³, D. J. THOMPSON⁸, L. TIBALDO^{11,12}, O. TIBOLLA⁵⁵,
D. F. TORRES^{56,49}, G. TOSTI^{17,18}, A. TRAMACERE^{57,3}, M. TURRI³, T. L. USHER³, N. VILCHEZ⁴¹, V. VITALE^{43,44}, P. WANG³,
K. WATTERS³, B. L. WINER¹³, K. S. WOOD², T. YLINEN^{24,25}, AND M. ZIEGLER¹

¹ Santa Cruz Institute for Particle Physics, Department of Physics and Department of Astronomy and Astrophysics, University of California at Santa Cruz, Santa Cruz, CA 95064, USA

² Space Science Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA

³ W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Department of Physics and SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA; peterm@stanford.edu

⁴ Stockholm Observatory, Albanova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

⁵ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

⁶ Laboratoire AIM, CEA-IRFU/CNRS/Université Paris Diderot, Service d'Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

⁷ Center for Research and Exploration in Space Science and Technology (CRESST), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

⁸ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

⁹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

¹⁰ Dipartimento di Fisica, Università di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

¹¹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy

¹² Dipartimento di Fisica "G. Galilei," Università di Padova, I-35131 Padova, Italy

¹³ Department of Physics, Center for Cosmology and Astro-Particle Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

¹⁴ IRFU/Dir, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

¹⁵ Istituto Universitario di Studi Superiori (IUSS), I-27100 Pavia, Italy

¹⁶ Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Giessenbachstraße, 85748 Garching, Germany

¹⁷ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹⁸ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹⁹ Dipartimento di Fisica "M. Merlin" dell'Università e del Politecnico di Bari, I-70126 Bari, Italy

²⁰ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari, 70126 Bari, Italy

²¹ Laboratoire Leprince-Ringuet, École Polytechnique, CNRS/IN2P3, Palaiseau, France

²² Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195-1560, USA

²³ INAF-Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, I-20133 Milano, Italy

²⁴ School of Pure and Applied Natural Sciences, University of Kalmar, SE-391 82 Kalmar, Sweden

²⁵ Department of Physics, Royal Institute of Technology (KTH), AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

²⁶ Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, I-00044 Frascati (Roma), Italy

²⁷ George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA

²⁸ IRFU/SEDI, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

Pulsar timing for the *Fermi* gamma-ray space telescope[★]

D. A. Smith^{1,2}, L. Guillemot^{1,2}, F. Camilo³, I. Cognard^{4,5}, D. Dumora^{1,2}, C. Espinoza⁷, P. C. C. Freire⁸, E. V. Gotthelf³, A. K. Harding⁹, G. B. Hobbs¹⁰, S. Johnston¹⁰, V. M. Kaspi¹¹, M. Kramer⁷, M. A. Livingstone¹¹, A. G. Lyne⁷, R. N. Manchester¹⁰, F. E. Marshall⁹, M. A. McLaughlin¹², A. Noutsos⁷, S. M. Ransom¹³, M. S. E. Roberts¹⁴, R. W. Romani¹⁵, B. W. Stappers⁷, G. Theureau^{4,5,6}, D. J. Thompson⁹, S. E. Thorsett¹⁶, N. Wang¹⁷, and P. Weltevrede¹⁰

¹ Université de Bordeaux, Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan, UMR 5797, 33175 Gradignan, France
e-mail: smith@cenbg.in2p3.fr

² CNRS/IN2P3, Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan, UMR 5797, 33175 Gradignan, France

³ Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, NY 10027, USA

⁴ Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, LPCE UMR 6115, CNRS/INSU, 45071 Orléans, France

⁵ Station de radioastronomie de Nançay, Observatoire de Paris, CNRS/INSU, 18330 Nançay, France

⁶ GEPI, Observatoire de Paris, CNRS, Université Paris Diderot, Place Jules Janssen 92190 Meudon, France

⁷ University of Manchester, Jodrell Bank Observatory, Macclesfield, Cheshire SK11 9DL, UK

⁸ Arecibo Observatory, HC 3 Box 53995, Arecibo, Puerto Rico 00612, USA

⁹ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

¹⁰ Australia Telescope National Facility, CSIRO, PO Box 76, Epping NSW 1710, Australia

¹¹ McGill University, Montreal, Quebec, Canada

¹² West Virginia University, Department of Physics, PO Box 6315, Morgantown, WV 26506, USA

¹³ National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, VA 22903, USA

¹⁴ Eureka Scientific, Inc., 2452 Delmer Street Suite 100, Oakland, CA 94602-3017, USA

¹⁵ Department of Physics, Stanford University, California, USA

¹⁶ Department of Astronomy & Astrophysics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA

¹⁷ National Astronomical Observatories-CAS, 40-5 South Beijing Road, Urumqi 830011, PR China

Received 29 May 2008 / Accepted 19 October 2008

ABSTRACT

We describe a comprehensive pulsar monitoring campaign for the Large Area Telescope (LAT) on the *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (formerly GLAST). The detection and study of pulsars in gamma rays give insights into the populations of neutron stars and supernova rates in the Galaxy, into particle acceleration mechanisms in neutron star magnetospheres, and into the “engines” driving pulsar wind nebulae. LAT’s unprecedented sensitivity between 20 MeV and 300 GeV together with its 2.4 sr field-of-view makes detection of many gamma-ray pulsars likely, justifying the monitoring of over two hundred pulsars with large spin-down powers. To search for gamma-ray pulsations from most of these pulsars requires a set of phase-connected timing solutions spanning a year or more to properly align the sparse photon arrival times. We describe the choice of pulsars and the instruments involved in the campaign. Attention is paid to verifications of the LAT pulsar software, using for example giant radio pulses from the Crab and from PSR B1937+21 recorded at Nançay, and using X-ray data on PSR J0218+4232 from XMM-Newton. We demonstrate accuracy of the pulsar phase calculations at the microsecond level.

Key words. space vehicles: instruments – stars: pulsars: general – gamma-rays: observations – ephemerides

1. Introduction

Forty years after the discovery of rotating neutron stars much is unknown about their emission processes, and in particular the radio emission mechanism is still largely not understood (Lorimer & Kramer 2004; Lyubarsky 2008). Of the nearly two thousand known pulsars, six have been detected in GeV gamma-rays with high confidence, using the EGRET detector on the *Compton Gamma-Ray Observatory* (CGRO) (Thompson et al. 1999).

The Large Area Telescope (LAT) on the *Fermi* Gamma-ray Space Telescope (formerly the *Gamma-ray Large Area Space Telescope*, or GLAST) went into orbit on 2008 June 11 (Atwood et al. 2008). The sensitivity and time resolution of this instrument will allow it to discover tens or more of new

gamma-ray pulsars (Smith & Thompson 2008). Notably, it will be able to determine the sources among the 169 unidentified EGRET sources that are pulsars. However, even with a sensitivity more than 30 times greater than that of EGRET, the LAT’s rate of gamma-ray photon detection will be small. For example, the Crab pulsar is the third brightest known gamma-ray pulsar, but will trigger the LAT only once every 500 revolutions of the neutron star (15 s), on average. While the Crab pulsar should be detected by the LAT with high confidence in less than a day, it will take years to detect pulsars near the sensitivity threshold, with days separating individual photon arrival times. A search for pulsations using gamma-ray data alone is quite difficult in these conditions (Atwood et al. 2006; Ransom 2007). Accurate knowledge of the rotation parameters increases LAT pulsed sensitivity. However, many neutron stars slow down irregularly, a phenomenon known as “timing noise”, making it difficult to

[★] Full Table 1 is only available in electronic form at the CDS via anonymous ftp to [cdsarc.u-strasbg.fr](ftp://cdsarc.u-strasbg.fr) (130.79.128.5) or via <http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?J/A+A/492/923>

28. F. Aharonian *et al.*, *Astron. Astrophys.* **499**, 273 (2009).
 29. A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **183**, 46 (2009).
 30. B. J. McLean, G. R. Greene, M. G. Lattanzi, B. Pirenne, *ASP Conf. Ser.* **216**, 145 (2000).
 31. The Fermi LAT Collaboration is supported by NASA and the U.S. Department of Energy; the Commissariat à l'Énergie Atomique and CNRS/Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (France); the Agenzia Spaziale

Italiana and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italy); the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), and Japan Aerospace Exploration Agency (Japan); and the K. A. Wallenberg Foundation, Swedish Research Council, and National Space Board (Sweden). Additional support was provided by the Istituto Nazionale di Astrofisica (Italy) and the Centre National d'Études Spatiales (France).

Supporting Online Material

www.sciencemag.org/cgi/content/full/325/5942/845/DC1
 SOM Text
 Figs. S1 and S2
 References

29 May 2009; accepted 20 July 2009
 10.1126/science.1177023

A Population of Gamma-Ray Millisecond Pulsars Seen with the Fermi Large Area Telescope

A. A. Abdo,^{1*} M. Ackermann,² M. Ajello,² W. B. Atwood,³ M. Axelsson,^{4,5} L. Baldini,⁶ J. Ballet,⁷ G. Barbiellini,^{8,9} M. G. Baring,¹⁰ D. Bastieri,^{11,12} B. M. Baughman,¹³ K. Bechtol,² R. Bellazzini,⁶ B. Berenji,² G. F. Bignami,¹⁴ R. D. Blandford,² E. D. Bloom,² E. Bonamente,^{15,16} A. W. Borgland,² J. Bregeon,⁶ A. Brez,⁶ M. Brigida,^{17,18} P. Bruel,¹⁹ T. H. Burnett,²⁰ G. A. Caliandro,^{17,18} R. A. Cameron,² F. Camilo,²¹ P. A. Caraveo,²² P. Carlson,^{4,23} J. M. Casandjian,⁷ C. Cecchi,^{15,16} Ö. Çelik,²⁴ E. Charles,² A. Chekhtman,^{1,25} C. C. Cheung,²⁴ J. Chiang,² S. Ciprini,^{15,16} R. Claus,² I. Cognard,²⁶ J. Cohen-Tanugi,²⁷ L. R. Cominsky,²⁸ J. Conrad,^{4,23,29} R. Corbet,^{24,30} S. Cutini,³¹ C. D. Dermer,¹ G. Desvignes,²⁶ A. de Angelis,³² A. de Luca,¹⁴ F. de Palma,^{17,18} S. W. Digel,² M. Dormody,³ E. do Couto e Silva,² P. S. Drell,² R. Dubois,² D. Dumora,^{33,34} Y. Edmonds,² C. Farnier,²⁷ C. Favuzzi,^{17,18} S. J. Fegan,¹⁹ W. B. Focke,² M. Frailis,³² P. C. C. Freire,³⁵ Y. Fukazawa,³⁶ S. Funk,² P. Fusco,^{17,18} F. Gargano,¹⁸ D. Gasparrini,³¹ N. Gehrels,^{24,37} S. Germani,^{15,16} B. Giebels,¹⁹ N. Giglietto,^{17,18} F. Giordano,^{17,18} T. Glanzman,² G. Godfrey,² I. A. Grenier,⁷ M. H. Grondin,^{33,34} J. E. Grove,¹ L. Guillemot,^{33,34} S. Guiriec,³⁸ Y. Hanabata,³⁶ A. K. Harding,²⁴ M. Hayashida,² E. Hays,²⁴ G. Hobbs,³⁹ R. E. Hughes,¹³ G. Jóhannesson,² A. S. Johnson,² R. P. Johnson,³ T. J. Johnson,^{24,37} W. N. Johnson,¹ S. Johnston,³⁹ T. Kamae,² H. Katagiri,³⁶ J. Kataoka,⁴⁰ N. Kawai,^{41,42} M. Kerr,²⁰ J. Knödlseher,⁴³ M. L. Kocian,² M. Kramer,⁴⁴ M. Kuss,⁶ J. Lande,² L. Latronico,⁶ M. Lemoine-Goumard,^{33,34} F. Longo,^{8,9} F. Loparco,^{17,18} B. Lott,^{33,34} M. N. Lovellette,¹ P. Lubrano,^{15,16} G. M. Madejski,² A. Makeev,^{1,25} R. N. Manchester,³⁹ M. Marelli,²² M. N. Mazziotta,¹⁸ W. McConville,^{24,37} J. E. McEnery,²⁴ M. A. McLaughlin,⁴⁵ C. Meurer,^{4,29} P. F. Michelson,² W. Mitthumsiri,² T. Mizuno,³⁶ A. A. Moiseev,^{37,46} C. Monte,^{17,18} M. E. Monzani,² A. Morselli,⁴⁷ I. V. Moskalenko,² S. Murgia,² P. L. Nolan,² J. P. Norris,⁴⁸ E. Nuss,²⁷ T. Ohsugi,³⁶ N. Omodei,⁶ E. Orlando,⁴⁹ J. F. Ormes,⁴⁸ D. Paneque,² J. H. Panetta,² D. Parent,^{33,34} V. M. Pelassa,²⁷ M. Pepe,^{15,16} M. Pesce-Rollins,⁶ F. Piron,²⁷ T. A. Porter,³ S. Rainò,^{17,18} R. Rando,^{11,12} S. M. Ransom,⁵⁰ P. S. Ray,¹ M. Razzano,⁶ N. Rea,^{51,52} A. Reimer,^{2,53} O. Reimer,^{2,53} T. Reposeur,^{33,34} S. Ritz,²⁴ L. S. Rochester,² A. Y. Rodriguez,⁵² R. W. Romani,² M. Roth,²⁰ F. Ryde,^{4,23} H. F. W. Sadrozinski,³ D. Sanchez,¹⁹ A. Sander,¹³ P. M. Saz Parkinson,³ J. D. Scargle,⁵⁴ T. L. Schalk,³ C. Sgrò,⁶ E. J. Siskind,⁵⁵ D. A. Smith,^{33,34} P. D. Smith,¹³ G. Spandre,⁶ P. Spinelli,^{17,18} B. W. Stappers,⁴⁴ J. L. Starck,⁷ E. Striani,^{47,56} M. S. Strickman,¹ D. J. Suson,⁵⁷ H. Tajima,² H. Takahashi,³⁶ T. Tanaka,² J. B. Thayer,² J. G. Thayer,² G. Theureau,²⁶ D. J. Thompson,²⁴ S. E. Thorsett,³ L. Tibaldo,^{11,12} D. F. Torres,^{52,58} G. Tosti,^{15,16} A. Tramacere,^{2,59} Y. Uchiyama,² T. L. Usher,² A. Van Etten,² V. Vasileiou,^{30,46} C. Venter,^{24,60} N. Vilchez,⁴³ V. Vitale,^{47,56} A. P. Waite,² E. Wallace,²⁰ P. Wang,² K. Watters,² N. Webb,⁴³ P. Weltevrede,³⁹ B. L. Winer,¹³ K. S. Wood,¹ T. Ylinen,^{4,23,61} M. Ziegler³

Pulsars are born with subsecond spin periods and slow by electromagnetic braking for several tens of millions of years, when detectable radiation ceases. A second life can occur for neutron stars in binary systems. They can acquire mass and angular momentum from their companions, to be spun up to millisecond periods and begin radiating again. We searched Fermi Large Area Telescope data for pulsations from all known millisecond pulsars (MSPs) outside of globular clusters, using rotation parameters from radio telescopes. Strong gamma-ray pulsations were detected for eight MSPs. The gamma-ray pulse profiles and spectral properties resemble those of young gamma-ray pulsars. The basic emission mechanism seems to be the same for MSPs and young pulsars, with the emission originating in regions far from the neutron star surface.

After the discovery of pulsars, 15 years elapsed before instrumental and computing advances enabled the first radio detections of neutron stars with millisecond spin periods (1). Similarly, 17 years after the launch of

the Compton Gamma Ray Observatory (CGRO), the Large Area Telescope (LAT) on the Fermi Gamma-ray Space Telescope (formerly GLAST) is now revealing new classes of GeV gamma-ray pulsars. Here, we report LAT detections of pulsed

gamma rays from eight galactic millisecond pulsars (MSPs), confirming the marginal detection of PSR J0218+4232 made using the Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET) detector on CGRO (2), and including the first MSP seen with the LAT, PSR J0030+0451 (3). A companion article (4) describes the discovery of 16 young pulsars on the basis of their gamma-ray emission alone. In addition, the LAT has detected about 20 young, radio-loud pulsars (5–7). The AGILE collaboration has recently detected pulsed gamma-ray emission from an MSP in the globular cluster M28 (8).

The Fermi LAT measurements of pulsars in all three of these categories will clarify how neutron stars accelerate the charged particles that radiate at gamma-ray and lower energies. Observed pulse profiles depend on the beam shapes and how they sweep across Earth; comparison of the radio, x-ray, and gamma-ray profiles constrains models of beam formation in pulsar magnetospheres. For gamma-ray pulsars, the high-energy emission dominates the power of the observed electromagnetic radiation (9). Consequently, gamma rays provide a probe of these cosmic accelerators. Millisecond pulsars shine for billions of years longer than do normal pulsars. We now know that they can radiate brightly in gamma rays.

The LAT images the entire sky every 3 hours at photon energies from 20 MeV to >300 GeV (10). Incident gamma rays convert to electron-positron pairs in tungsten foils, leaving tracks in single-sided silicon strip detectors that provide the photon direction. A hodoscopic CsI calorimeter samples the photon energy, and charged particles are rejected through the use of information from a segmented scintillator array.

MSPs form a distinct class, with small spin periods ($P < 30$ ms) and minuscule braking rates ($\dot{P} < 10^{-17}$). Most are in binary systems. The idea that they have been spun up by the torque resulting from accretion of mass from their companions (11) is supported by the recent observations reported in (12). MSPs are 10^8 to 10^{10} years old, whereas the young gamma-ray pulsars are 10^3 to 10^5 years old. Their surface magnetic fields are a factor of 10^4 weaker than when the neutron star first formed. However, both the rate of rotational kinetic energy loss, $\dot{E} = 4\pi^2 \dot{I} P / P^3$ (on the assumptions of dipole magnetic fields and a neutron star moment of inertia $I = 10^{45}$ g-cm²), and the magnetic field at the light cylinder, $B_{LC} = 4\pi^2 (3\dot{I} P / 2c^3 P^5)^{1/2}$ (where c is the speed of light), are comparable to those of newly formed pulsars (13). On the basis of theoretical models of gamma-ray emission from MSPs, it

was predicted that Fermi would detect roughly 10 pulsed detections in 1 year (14, 15).

The Australia Telescope National Facility (ATNF) pulsar database, V1.35 (16, 17), lists 1794 spin-powered pulsars, of which 168 have $P < 30$ ms and $\dot{P} < 10^{-17}$. Of these, 96 are in globular clusters (18). Here, we consider the 72 remaining field MSPs. A radio and x-ray pulsar timing campaign provided rotation ephemerides for Fermi (19). MSP timing solutions were obtained from the Nançay Radio Telescope (20), the Parkes Radio Telescope (21), the Green Bank Telescope (22), the Lovell Telescope at Jodrell

Bank Observatory (23), the Arecibo Observatory radio telescope (24), and the Westerbork Synthesia Radio Telescope (25). For six of the field MSPs, we used noncontemporaneous ephemerides from the ATNF database. The timing parameters used in this work will be made available on the servers of the Fermi Science Support Center (26).

For the gamma-ray timing analysis, we used LAT data acquired from 30 June 2008 to 15 March 2009, selecting events with energy > 0.1 GeV that passed the diffuse gamma-ray selection cuts (10). For pulsars with galactic latitude $|b| > 10^\circ$, we selected events within 1° of the radio

position; this threshold was reduced to 0.5° for $|b| < 10^\circ$ because of the bright gamma-ray background in the galactic plane resulting from cosmic rays interacting with the interstellar medium. LAT photon arrival times were recorded with an accuracy relative to UTC better than $1 \mu\text{s}$ (27).

Following this analysis, eight MSPs showed strong gamma-ray pulsations with H-test (28) values of > 25 (Fig. 1 and Table 1). Three are associated with EGRET sources: PSRs J0030+0451, J0218+4232, and J1614-2230. The latter was discovered in a radio search of unidentified EGRET sources (29). All of the detected pulsars had con-

Table 1. Properties of the millisecond pulsars detected by Fermi. For each pulsar we give the galactic longitude and latitude (l, b), the rotational period P , the distance d , and the spin-down power \dot{E} . Pulsars marked “b” belong to binary systems. The distances come from parallax measurements except for the values marked by an asterisk, which are based on the dispersion measure. The \dot{E} values have been computed using period derivatives corrected for the Shklovskii effect (36). The δ parameter gives the phase offset between the

maximum of the radio emission and that of the nearest gamma-ray peak, and Δ is the peak separation for two-peaked gamma-ray profiles. Integral photon and energy fluxes over 0.1 GeV are given, as well as spectral indices, exponential cutoff energies, and gamma-ray emission efficiencies η . The systematic uncertainties stemming from the instrument response and the diffuse background are $(-0.1, +0.3)$ for Γ , $(-10\%, +20\%)$ for E_c , $(-10\%, +30\%)$ for the photon flux, and $(-10\%, +20\%)$ for the energy flux.

Pulsar name	l, b	P (ms)	d (pc)	$\text{Log } \dot{E}$ (ergs s^{-1})	δ	Δ	Photon flux >0.1 GeV (10^{-8} photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Energy flux >0.1 GeV (10^{-11} ergs $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Spectral index	Exponential cutoff energy (GeV)	η (%)
J0030+0451	113.1°, -57.6°	4.865	300 ± 90	33.54	0.16	0.45	5.5 ± 0.7	4.9 ± 0.3	1.3 ± 0.2	1.9 ± 0.4	15 ± 9
J0218+4232 (b)	139.5°, -17.5°	2.323	2700 ± 600*	35.39	0.50	—	5.6 ± 1.3	3.5 ± 0.5	2.0 ± 0.2	7 ± 4	13 ± 6
J0437-4715 (b)	253.4°, -42.0°	5.757	156 ± 2	33.46	0.45	—	4.4 ± 1.0	1.9 ± 0.3	2.1 ± 0.3	2.1 ± 1.1	1.9 ± 0.3
J0613-0200 (b)	210.4°, -9.3°	3.061	480 ± 140	34.10	0.42	—	3.1 ± 0.7	3.1 ± 0.3	1.4 ± 0.2	2.9 ± 0.7	7 ± 4
J0751+1807 (b)	202.7°, 21.1°	3.479	620 ± 310	33.85	0.42	—	2.0 ± 0.7	1.7 ± 0.2	1.6 ± 0.2	3.4 ± 1.2	11 ± 11
J1614-2230 (b)	352.5°, 20.3°	3.151	1300 ± 250*	33.7	0.20	0.48	2.3 ± 2.1	2.5 ± 0.8	1.0 ± 0.3	1.2 ± 0.5	100 ± 80
J1744-1134	14.8°, 9.2°	4.075	470 ± 90	33.60	0.85	—	7.1 ± 1.4	4.0 ± 1.0	1.5 ± 0.2	1.1 ± 0.2	27 ± 12
J2124-3358	10.9°, -45.4°	4.931	250 ± 125	33.6	0.85	—	2.9 ± 0.5	3.4 ± 0.3	1.3 ± 0.2	2.9 ± 0.9	6 ± 6

¹Space Science Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA. ²W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Department of Physics, and SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA. ³Santa Cruz Institute for Particle Physics, Department of Physics and Department of Astronomy and Astrophysics, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA. ⁴Oskar Klein Centre for Cosmo Particle Physics, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden. ⁵Department of Astronomy, Stockholm University, SE-106 91 Stockholm, Sweden. ⁶Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy. ⁷Laboratoire AIM, CEA/IRFU/CNRS/Université Paris Diderot, Service d’Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France. ⁸Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, I-34127 Trieste, Italy. ⁹Dipartimento di Fisica, Università di Trieste, I-34127 Trieste, Italy. ¹⁰Department of Physics and Astronomy, Rice University, Houston, TX 77251, USA. ¹¹Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy. ¹²Dipartimento di Fisica “G. Galilei,” Università di Padova, I-35131 Padova, Italy. ¹³Department of Physics, Center for Cosmology and Astroparticle Physics, Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA. ¹⁴Istituto Universitario di Studi Superiori, I-27100 Pavia, Italy. ¹⁵Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy. ¹⁶Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, I-06123 Perugia, Italy. ¹⁷Dipartimento di Fisica “M. Merlin” dell’Università e del Politecnico di Bari, I-70126 Bari, Italy. ¹⁸Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari, I-70126 Bari, Italy. ¹⁹Laboratoire Leprince-Ringuet, Ecole Polytechnique, CNRS/IN2P3, Palaiseau, France. ²⁰Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA. ²¹Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, NY 10027, USA. ²²INAF-Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, I-20133 Milano, Italy. ²³Department of Physics, Royal

Institute of Technology (KTH), AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden. ²⁴NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA. ²⁵George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA. ²⁶Laboratoire de Physique et Chimie de l’Environnement, UMR 6115 CNRS, F45071 Orléans Cedex 02, and Station de Radio-astronomie de Nançay, Observatoire de Paris, CNRS/INSU, F18330 Nançay, France. ²⁷Laboratoire de Physique Théorique et Astroparticules, Université Montpellier 2, CNRS/IN2P3, Montpellier, France. ²⁸Department of Physics and Astronomy, Sonoma State University, Rohnert Park, CA 94928, USA. ²⁹Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden. ³⁰University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD 21250, USA. ³¹Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, I-00044 Frascati (Roma), Italy. ³²Dipartimento di Fisica, Università di Udine and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, Gruppo Collegato di Udine, I-33100 Udine, Italy. ³³CNRS/IN2P3, Centre d’Études Nucléaires Bordeaux Gradignan, UMR 5797, 33175 Gradignan, France. ³⁴Université de Bordeaux, Centre d’Études Nucléaires Bordeaux Gradignan, UMR 5797, 33175 Gradignan, France. ³⁵Arecibo Observatory, Arecibo, PR 00612, USA. ³⁶Department of Physical Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan. ³⁷University of Maryland, College Park, MD 20742, USA. ³⁸University of Alabama, Huntsville, AL 35899, USA. ³⁹Australia Telescope National Facility, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Epping, NSW 1710, Australia. ⁴⁰Waseda University, 1104 Totsukamachi, Shinjuku, Tokyo 1698050, Japan. ⁴¹Cosmic Radiation Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 3510198, Japan. ⁴²Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro City, Tokyo 152-8551, Japan. ⁴³Centre d’Étude Spatiale des Rayonnements, CNRS/UPS, BP 44346, F-30128 Toulouse Cedex 4, France. ⁴⁴Jodrell Bank Centre for Astrophysics, School of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK.

⁴⁵Department of Physics, West Virginia University, Morgantown, WV 26506, USA. ⁴⁶Center for Research and Exploration in Space Science and Technology, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA. ⁴⁷Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma “Tor Vergata,” I-00133 Roma, Italy. ⁴⁸Department of Physics and Astronomy, University of Denver, Denver, CO 80208, USA. ⁴⁹Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, 85748 Garching, Germany. ⁵⁰National Radio Astronomy Observatory (NRAO), Charlottesville, VA 22903, USA. ⁵¹Sterrenkundig Instituut “Anton Pannekoek,” 1098 SJ Amsterdam, Netherlands. ⁵²Institut de Ciències de l’Espai (IEECSIC), Campus UAB, 08193 Barcelona, Spain. ⁵³Institut für Astronomie und Teilchenphysik, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, A6020 Innsbruck, Austria. ⁵⁴Space Sciences Division, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035, USA. ⁵⁵NYCB RealTime Computing Inc., Lattingtown, NY 11560, USA. ⁵⁶Dipartimento di Fisica, Università di Roma “Tor Vergata,” I-00133 Roma, Italy. ⁵⁷Department of Chemistry and Physics, Purdue University Calumet, Hammond, IN 46323, USA. ⁵⁸Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats, Barcelona, Spain. ⁵⁹Consorzio Interuniversitario per la Fisica Spaziale, I-10133 Torino, Italy. ⁶⁰Unit for Space Physics, NorthWest University, Potchefstroom Campus, Private Bag X6001, Potchefstroom 2520, South Africa. ⁶¹School of Pure and Applied Natural Sciences, University of Kalmar, SE-391 82 Kalmar, Sweden.

*National Research Council Research Associate.
†Royal Swedish Academy of Sciences Research Fellow, funded by a grant from the K. A. Wallenberg Foundation.
‡To whom correspondence should be addressed. E-mail: guillemo@cenbg.in2p3.fr (L.G.); tyrel.j.johnson@nasa.gov (T.J.J.); kerrm@u.washington.edu (M.K.); smith@cenbg.in2p3.fr (D.A.S.)

temporaneous radio ephemerides with weighted root mean square timing residuals of 10 μ s or less. For all eight MSPs, uncertainties in the dispersion measure led to uncertainties of less than 0.005 rotations in the extrapolation of the radio pulse arrival times to infinite frequency;

such values are negligible for the gamma-ray light curve bin widths imposed by the photon counts. Analyses for PSRs J0218+4232, J0613-0200, J1614-2230, J1744-1134, and J2124-3358 using ephemerides from different observatories confirmed the absolute phase alignment.

We also searched for steady point-source emission at the locations of the 72 field MSPs. For 13 locations, including those of the eight pulsed detections, emission exceeded the diffuse gamma-ray background by at least 5σ . For the five sources for which only steady emission was seen, the 95%

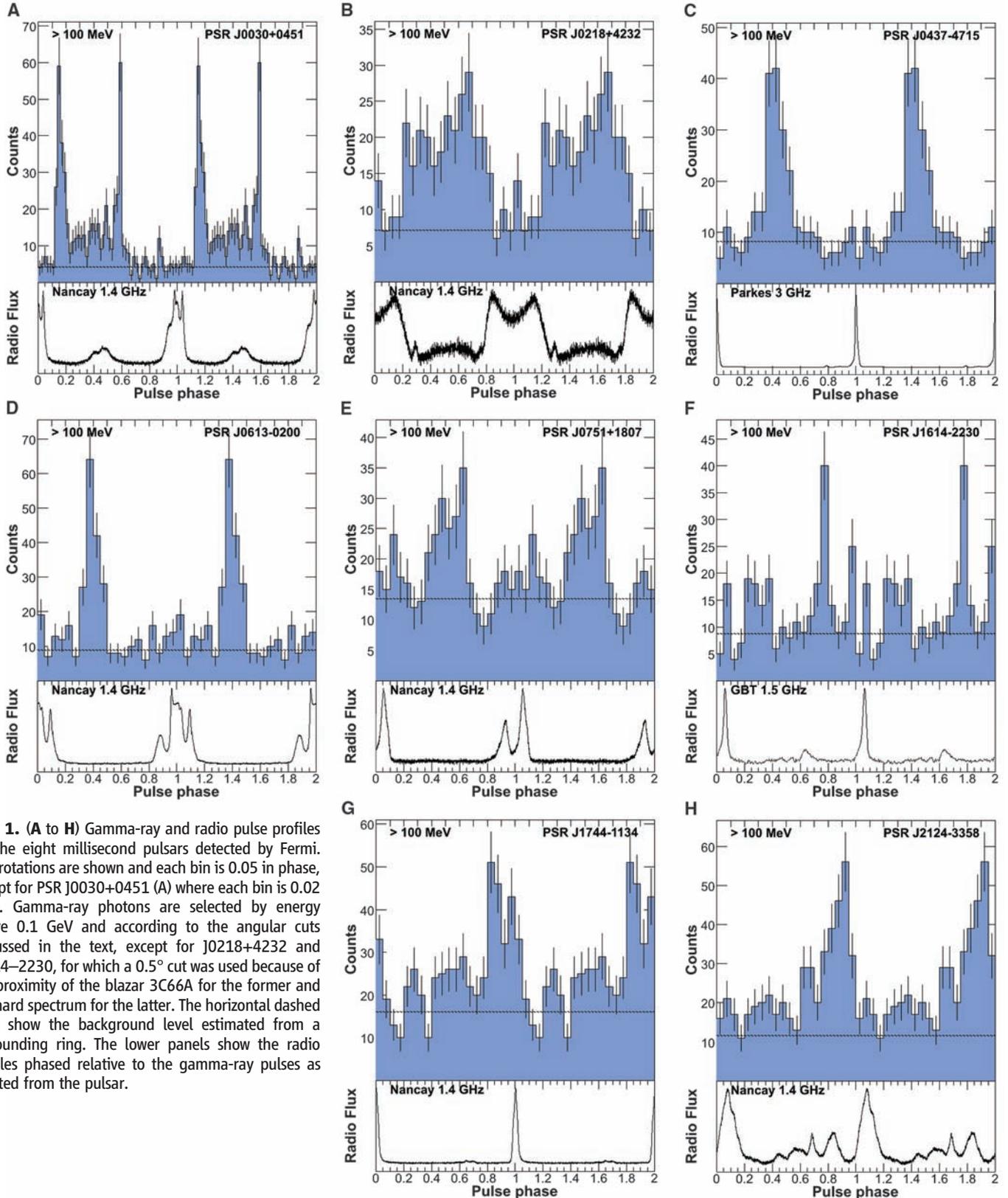


Fig. 1. (A to H) Gamma-ray and radio pulse profiles for the eight millisecond pulsars detected by Fermi. Two rotations are shown and each bin is 0.05 in phase, except for PSR J0030+0451 (A) where each bin is 0.02 wide. Gamma-ray photons are selected by energy above 0.1 GeV and according to the angular cuts discussed in the text, except for J0218+4232 and J1614-2230, for which a 0.5° cut was used because of the proximity of the blazar 3C66A for the former and the hard spectrum for the latter. The horizontal dashed lines show the background level estimated from a surrounding ring. The lower panels show the radio profiles phased relative to the gamma-ray pulses as emitted from the pulsar.

confidence level radii contained no other candidates besides PSRs J0034–0534, J0610–2100, J1600–3053, J1939+2134, and J1959+2048.

We used the spectral likelihood methods described in (30) (see supporting online text). To reduce the background from cosmic-ray interactions in the upper atmosphere, we required photon zenith angles to be less than 105° and excluded time periods when Earth's limb came within 28° of the source. Because of uncertainties in the instrument response, we rejected events with energies below 0.2 GeV. We modeled the gamma-ray spectra with an exponentially cut-off power law of the form $N_0 E^{-\Gamma} \exp[-(E/E_c)]$, where E is the photon energy, E_c is the exponential cutoff energy, Γ is the spectral index, and N_0 is a normalization factor (Table 1). The cutoff energies ranged from 1 GeV to almost 4 GeV (neglecting the J0218+4232 cut-off, which has a large error) and the spectra were hard ($\Gamma < 2$). Overall, the MSP spectral shapes resembled those of young pulsars.

We converted the integral energy fluxes h to luminosities using $L_\gamma = 4\pi h d^2$, where d is the pulsar distance. This corresponds to a flux correction factor $f_\Omega = 1$, appropriate for a fan-like beam as given by outer-magnetosphere emission models (31). Six of the pulsars are close and have parallax distance measurements (32–34), although uncertainties are large in some cases. The distances to PSR J0218+4232 and PSR J1614–2230 are based on the dispersion measures and the NE2001 galactic electron density model (35). MSPs have low intrinsic \dot{P} values and are relatively close; hence, the kinematic Shklovskii contribution (36) $\dot{P}_s =$

$P\mu^2 d/c$ (where μ is the proper motion) is non-negligible. \dot{P}_s is subtracted from the observed \dot{P} before computing the spin-down power \dot{E} and the corresponding gamma-ray efficiency $\eta = L_\gamma/\dot{E}$ (Table 1). Uncertainties in \dot{E} are generally a few percent or less, except for PSRs J1614–2230 and J2124–3358, where they are larger (60% and 32%, respectively) because the large uncertainty in the distance leads to a correspondingly large uncertainty in \dot{P}_s . Uncertainties in η are much larger because $L_\gamma \sim d^2$ and hence the effect of the distance uncertainty is doubled. Such a large efficiency for PSR J1614–2230 would indicate that the distance is overestimated. Reducing the distance would both reduce the Shklovskii correction (thereby increasing \dot{E}) and decrease L_γ . Other possible systematic uncertainties in the \dot{E} and η values come from the neutron star moment of inertia, which is assumed to be 10^{45} g-cm². Measured values of neutron star masses cover a range from about 1.25 to 1.75 solar masses (37, 38), and the estimated moments of inertia vary correspondingly (39). Also, the flux correction factor f_Ω may differ from the assumed value of 1 (31).

Five of the eight gamma-ray MSPs are in binary systems. An eclipsing orbit, or interactions with the stellar wind of the companion, could affect the gamma-ray flux. We found no flux variability at their orbital periods (<25% of the flux at the 95% confidence level).

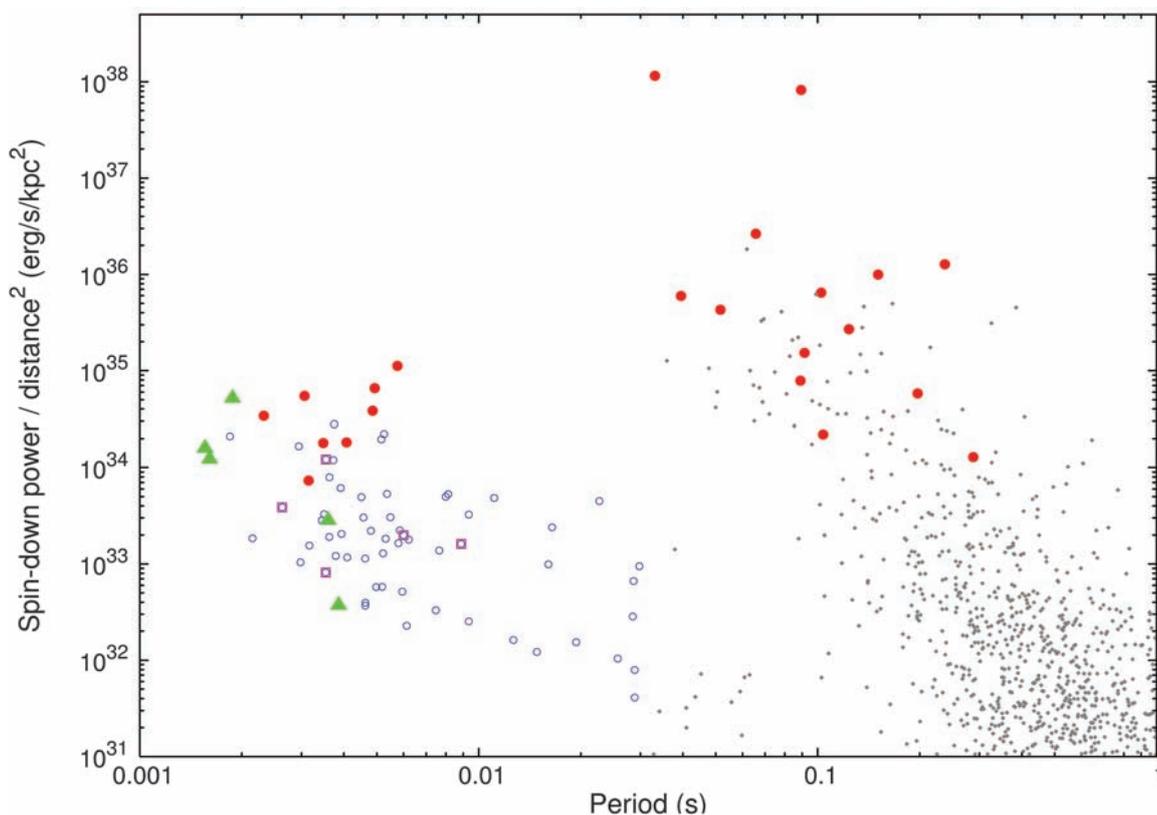
The observed MSP gamma-ray profiles and their relation to the radio profiles are similar to those observed for young pulsars. For PSRs

J0030+0451 and J1614–2230, the double-peaked profiles with separation $\Delta \sim 0.45$ and first-peak lag $\delta \sim 0.15$ are almost identical to observed profiles for most young pulsars (5–7, 30). A higher proportion of MSPs have a dominant single gamma-ray peak at $\delta \sim 0.5$, but the young pulsar PSR J2229+6114 has a similar pulse profile. For both MSPs and young pulsars, the gamma-ray peaks (single or multiple) are centered on phases 0.3 to 0.4 relative to the radio peak. MSP radio profiles tend to be complex with many components, and in these cases it can be difficult to identify the relevant radio phase. Also, the statistics of the gamma-ray profiles are currently relatively poor.

The spin-down powers of all the detected millisecond and normal gamma-ray pulsars lie above a common threshold of $\sim 5 \times 10^{33}$ ergs s⁻¹ kpc⁻², another similarity between these two classes (Fig. 2). Pulsars undetected in gamma rays of both classes lie above this threshold, possibly because (i) distance estimates may be in error for individual pulsars; (ii) the gamma-ray emission beam (or at least strong parts of it) may not sweep across Earth; or (iii) neutron star moments of inertia may be less than the assumed 10^{45} g-cm² for some pulsars, so that a given \dot{P} corresponds to a smaller \dot{E} .

Polar cap MSP models, where the bulk of the emission originates near the surface of the neutron star, predict that the pulsed gamma rays are roughly aligned with the magnetic poles (40). In outer gap (OG) (41) and slot gap (SG) (42) models, the bulk of the emission originates in the outer magnetosphere in narrow gaps along the last open field lines, forming wide fan beams that

Fig. 2. Spin-down power \dot{E} normalized to the distance squared versus the rotational period for pulsars outside of globular clusters. Where proper motions are available, the \dot{E} values have been corrected for the Shklovskii effect (see text). The eight MSPs reported here are indicated by solid circles, as are young, radio-loud gamma-ray pulsars. The five MSPs likely associated with the nonpulsed point-source detections are indicated by triangles. MSPs for which contemporaneous rotation parameters are unavailable are shown as squares. Undetected MSPs are indicated by open circles, and small dots show undetected normal pulsars. The young radio-loud gamma-ray pulsars are the seven CGRO detections (9) and recent Fermi detections (7, 44).



are not aligned with the magnetic poles. In the MSP gamma-ray light curves in Fig. 1, we see that although some of the gamma-ray peaks are aligned with the radio peaks that are thought to be aligned with the magnetic poles, most are not. This favors the outer-magnetosphere model geometry.

The similarities of the gamma-ray pulse profiles, the E dependence, and the spectral properties strongly suggest that the same basic emission mechanism is operating in both classes. Magnetic field strengths at the neutron star surface, derived assuming dipole fields, differ by four orders of magnitude between MSPs and young pulsars. On the other hand, B_{LC} is comparable for both. Fermi data for young pulsars (5–7, 30) favor outer-magnetosphere emission models over models where the emission comes from close to the polar cap.

The MSP models (40–42) assume curvature radiation from electrons whose energies arise from a balance between acceleration by the pulsar electric field and the curvature radiation loss in a dipole magnetic field. The cutoff energy thus directly measures the accelerating electric field. The observed values in the range 1 to 4 GeV indicate that the emission is not taking place near the surface—where the electric field is stronger and the cutoff energies for MSPs would reach 10 GeV and could exceed 50 GeV (43)—but at some altitude above the neutron star surface.

For current SG and OG models, only MSPs with the highest spin-down power have a high enough electric potential for electron-positron pair production. Most of the MSPs detected by Fermi are below this threshold. Thus, some revision of the outer-magnetosphere models is needed. Surface magnetic fields may be stronger than assumed, perhaps because of magnetic multipoles or more compact neutron stars. Alternatively, the magnetic field at the light cylinder may play a greater role in particle acceleration than has been assumed.

References and Notes

- D. C. Backer, S. R. Kulkarni, C. Heiles, M. M. Davis, W. M. Goss, *Nature* **300**, 615 (1982).
- L. Kuiper *et al.*, *Astron. Astrophys.* **359**, 615 (2000).
- A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J.* **699**, 1171 (2009).
- A. A. Abdo *et al.*, *Science* **325**, 840 (2009); published online 2 July 2009 (10.1126/science.1175558).
- A. A. Abdo *et al.*, Fermi LAT Collaboration, *Astrophys. J.* **695**, L72 (2009).
- A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J.* **700**, 1059 (2009).
- A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J.* **699**, L102 (2009).
- A. Pellizzoni *et al.*, AGILE Collaboration, *Astrophys. J.* **695**, L115 (2009).
- D. J. Thompson *et al.*, *Astrophys. J.* **516**, 297 (1999).
- W. B. Atwood *et al.*, *Astrophys. J.* **697**, 1071 (2009).
- M. A. Alpar, A. F. Cheng, M. A. Ruderman, J. Shaham, *Nature* **300**, 728 (1982).
- A. M. Archibald *et al.*, *Science* **324**, 1411 (2009); published online 21 May 2009 (10.1126/science.1172740).
- D. R. Lorimer, M. Kramer, *Handbook of Pulsar Astronomy* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2004).
- L. Zhang, J. Fang, S. B. Chen, *Astrophys. J.* **666**, 1165 (2007).
- S. A. Story, P. L. Gonthier, A. K. Harding, *Astrophys. J.* **671**, 713 (2007).
- R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, M. Hobbs, *Astrophys. J.* **129**, 1993 (2005).
- The ATNF Pulsar Catalogue is available at www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat.
- F. Camilo, F. A. Rasio, *ASP Conf. Ser.* **328**, 147 (2005).
- D. A. Smith *et al.*, *Astron. Astrophys.* **492**, 923 (2008).
- G. Theureau *et al.*, *Astron. Astrophys.* **430**, 373 (2005).
- R. N. Manchester, *AIP Conf. Ser.* **983**, 584 (2008).
- D. L. Kaplan *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **117**, 643 (2005).
- G. Hobbs, A. G. Lyne, M. Kramer, C. E. Martin, C. Jordan, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **353**, 1311 (2004).
- A. Dowd, W. Sisk, J. Hagen, *ASP Conf. Ser.* **202**, 275 (2000).
- J. L. L. Voûte *et al.*, *Astron. Astrophys.* **385**, 733 (2002).
- Fermi Science Support Center (<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc>).
- Fermi LAT Collaboration, <http://arxiv.org/abs/0904.2226> (2009).
- O. C. de Jager, B. C. Raubenheimer, J. W. H. Swanepoel, *Astron. Astrophys.* **221**, 180 (1989).
- F. Crawford *et al.*, *Astrophys. J.* **652**, 1499 (2006).
- A. A. Abdo *et al.*, Fermi LAT Collaboration, *Astrophys. J.* **696**, 1084 (2009).
- K. P. Watters, R. W. Romani, P. Weltevrede, S. Johnston, *Astrophys. J.* **695**, 1289 (2009).
- A. N. Lommen *et al.*, *Astrophys. J.* **545**, 1007 (2000).
- A. T. Deller, J. P. W. Verbiest, S. J. Tingay, M. Bailes, *Astrophys. J.* **685**, L67 (2008).
- A. W. Hotan, M. Bailes, S. M. Ord, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **369**, 1502 (2006).
- J. M. Cordes, T. J. W. Lazio, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0207156> (2002).
- I. S. Shklovskii, *Sov. Astron.* **13**, 562 (1970).
- M. Kramer *et al.*, *Science* **314**, 97 (2006); published online 14 September 2006 (10.1126/science.1132305).
- J. P. W. Verbiest *et al.*, *Astrophys. J.* **679**, 675 (2008).
- J. M. Lattimer, M. Prakash, *Science* **304**, 536 (2004).
- A. K. Harding, V. V. Usov, A. G. Muslimov, *Astrophys. J.* **622**, 531 (2005).
- L. Zhang, K. S. Cheng, *Astron. Astrophys.* **398**, 639 (2003).
- A. G. Muslimov, A. K. Harding, *Astrophys. J.* **617**, 471 (2004).
- T. Bulik, B. Rudak, J. Dyks, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **317**, 97 (2000).
- A. A. Abdo *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **183**, 46 (2009).
- The Fermi LAT Collaboration is supported by NASA and the U.S. Department of Energy; the Commissariat à l'Énergie Atomique/IRFU and CNRS/Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (France); the Agenzia Spaziale Italiana and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italy); the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), and Japan Aerospace Exploration Agency (Japan); and the K. A. Wallenberg Foundation, Swedish Research Council, and National Space Board (Sweden). Additional analysis during the operations phase was provided by the Istituto Nazionale di Astrofisica (Italy). The Parkes telescope is funded by the Commonwealth Government and is managed by CSIRO. The GBT is operated by the NRAO, a facility of NSF operated under cooperative agreement by Associated Universities Inc. The Arecibo Observatory is part of the National Astronomy and Ionosphere Center, operated by Cornell University under a cooperative agreement with NSF. The Nançay Radio Telescope is operated by the Paris Observatory, associated with the CNRS. The Lovell Telescope is owned and operated by the University of Manchester with support from the UK Science and Technology Facilities Council. The Westerbork Synthesis Radio Telescope is operated by ASTRON in the Netherlands.

Supporting Online Material

www.sciencemag.org/cgi/content/full/1176113/DC1

SOM Text

References

11 May 2009; accepted 24 June 2009

Published online 2 July 2009;

10.1126/science.1176113

Include this information when citing this paper.

Impact of Anode Microstructure on Solid Oxide Fuel Cells

Toshio Suzuki,^{1*} Zahir Hasan,¹ Yoshihiro Funahashi,² Toshiaki Yamaguchi,¹ Yoshinobu Fujishiro,¹ Masanobu Awano¹

We report a correlation between the microstructure of the anode electrode of a solid oxide fuel cell (SOFC) and its electrochemical performance for a tubular design. It was shown that the electrochemical performance of the cell was extensively improved when the size of constituent particles was reduced so as to yield a highly porous microstructure. The SOFC had a power density of greater than 1 watt per square centimeter at an operating temperature as low as 600°C with a conventional zirconia-based electrolyte, a nickel cermet anode, and a lanthanum ferrite perovskite cathode material. The effect of the hydrogen fuel flow rate (linear velocity) was also examined for the optimization of operating conditions. Higher linear fuel velocity led to better cell performance for the cell with higher anode porosity. A zirconia-based cell could be used for a low-temperature SOFC system under 600°C just by optimizing the microstructure of the anode electrode and operating conditions.

Although solid oxide fuel cells (SOFCs) are available commercially for local and emergency power generation, there are materials challenges that must be overcome for

their wider use (1–5). Some of the features that make them attractive—their high efficiency and use with hydrocarbon fuels—stems from their high operating temperatures (often in excess of

700°C). These high temperatures are also a drawback in that transition metals used in the electrode materials can diffuse into the electrolyte and lower performance and, ultimately, lifetime. Thus, lowering the operation temperature can be beneficial for the commercialization of SOFC systems, since it can offer quick start-up ability, which in turn can allow for their use in applications such as transportable power sources and auxiliary power units for automobiles. Many studies of SOFCs aim at lowering their operating temperature (6–13). In recent years, much effort has been devoted to the development of SOFCs, especially in the search for new electrode and electrolyte materials. Lanthanum gallate perovskite [e.g., (La, Sr)(Ga, Mg)O₃, or LSGM] is one of the successful materials for a low- or intermediate-temperature SOFC elec-

¹Advanced Manufacturing Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya, 463-8560 Japan. ²Fine Ceramics Research Association, Nagoya, 463-8560 Japan.

*To whom correspondence should be addressed. E-mail: toshio.suzuki@aist.go.jp

THE FIRST *FERMI* LARGE AREA TELESCOPE CATALOG OF GAMMA-RAY PULSARS

A. A. ABDO^{1,2}, M. ACKERMANN³, M. AJELLO³, W. B. ATWOOD⁴, M. AXELSSON^{5,6}, L. BALDINI⁷, J. BALLE⁸, G. BARBIELLINI^{9,10}, M. G. BARING¹¹, D. BASTIERI^{12,13}, B. M. BAUGHMAN¹⁴, K. BECHTOL³, R. BELLAZZINI⁷, B. BERENJI³, R. D. BLANDFORD³, E. D. BLOOM³, E. BONAMENTE^{15,16}, A. W. BORGLAND³, J. BREGEON⁷, A. BREZ⁷, M. BRIGIDA^{17,18}, P. BRUEL¹⁹, T. H. BURNETT²⁰, S. BUSON¹³, G. A. CALIANDRO^{17,18}, R. A. CAMERON³, F. CAMILO²¹, P. A. CARAVEO²², J. M. CASANDJIAN⁸, C. CECCHI^{15,16}, Ö. ÇELİK^{23,24,25}, E. CHARLES³, A. CHEKHTMAN^{1,26}, C. C. CHEUNG²³, J. CHIANG³, S. CIPRINI^{15,16}, R. CLAUS³, I. COGNARD²⁷, J. COHEN-TANUGI²⁸, L. R. COMINSKY²⁹, J. CONRAD^{6,30,69}, R. CORBET^{23,25}, S. CUTINI³¹, P. R. DEN HARTOG³, C. D. DERMER¹, A. DE ANGELIS³², A. DE LUCA^{22,33}, F. DE PALMA^{17,18}, S. W. DIGEL³, M. DORMODY⁴, E. DO COUTO E SILVA³, P. S. DRELL³, R. DUBOIS³, D. DUMORA^{34,35}, C. ESPINOZA³⁶, C. FARNIER²⁸, C. FAVUZZI^{17,18}, S. J. FEGAN¹⁹, E. C. FERRARA²³, W. B. FOCKE³, P. FORTIN¹⁹, M. FRAILIS³², P. C. C. FREIRE³⁷, Y. FUKAZAWA³⁸, S. FUNK³, P. FUSCO^{17,18}, F. GARGANO¹⁸, D. GASPARRINI³¹, N. GEHRELS^{23,39}, S. GERMANI^{15,16}, G. GIAVITTO⁴⁰, B. GIEBELS¹⁹, N. GIGLIETTO^{17,18}, P. GIOMMI³¹, F. GIORDANO^{17,18}, T. GLANZMAN³, G. GODFREY³, E. V. GOTTHELF²¹, I. A. GRENIER⁸, M.-H. GRONDIN^{34,35}, J. E. GROVE¹, L. GUILLEMOT^{34,35}, S. GUIRIEC⁴¹, C. GWON¹, Y. HANABATA³⁸, A. K. HARDING²³, M. HAYASHIDA³, E. HAYS²³, R. E. HUGHES¹⁴, M. S. JACKSON^{6,30,42}, G. JÓHANNESSEN³, A. S. JOHNSON³, R. P. JOHNSON⁴, T. J. JOHNSON^{23,39}, W. N. JOHNSON¹, S. JOHNSTON⁴³, T. KAMAE³, G. KANBACH⁴⁴, V. M. KASPI⁴⁵, H. KATAGIRI³⁸, J. KATAOKA^{46,47}, N. KAWAI^{46,48}, M. KERR²⁰, J. KNÖDLSIEDER⁴⁹, M. L. KOCIAN³, M. KRAMER^{36,50}, M. KUSS⁷, J. LANDE³, L. LATRONICO⁷, M. LEMOINE-GOUMARD^{34,35}, M. LIVINGSTONE⁴⁵, F. LONGO^{9,10}, F. LOPARCO^{17,18}, B. LOTT^{34,35}, M. N. LOVELLETTE¹, P. LUBRANO^{15,16}, A. G. LYNE³⁶, G. M. MADEJSKI³, A. MAKEEV^{1,26}, R. N. MANCHESTER⁴³, M. MARELLI²², M. N. MAZZIOTTA¹⁸, W. MCCONVILLE^{23,39}, J. E. MCENERY²³, S. MCGLYNN^{6,42}, C. MEURER^{6,30}, P. F. MICHELSON³, T. MINEO⁵¹, W. MITTHUMSIRI³, T. MIZUNO³⁸, A. A. MOISEEV^{24,39}, C. MONTE^{17,18}, M. E. MONZANI³, A. MORSELLI⁵², I. V. MOSKALENKO³, S. MURGIA³, T. NAKAMORI⁴⁶, P. L. NOLAN³, J. P. NORRIS⁵³, A. NOUTSOS³⁶, E. NUSS²⁸, T. OHSUGI³⁸, N. OMODEI⁷, E. ORLANDO⁴⁴, J. F. ORMES⁵³, M. OZAKI⁵⁴, D. PANEQUE³, J. H. PANETTA³, D. PARENT^{34,35}, V. PELASSA²⁸, M. PEPE^{15,16}, M. PESCE-ROLLINS⁷, F. PIRON²⁸, T. A. PORTER⁴, S. RAINÒ^{17,18}, R. RANDO^{12,13}, S. M. RANSOM⁵⁵, P. S. RAY¹, M. RAZZANO⁷, N. REA^{56,57}, A. REIMER^{3,58}, O. REIMER^{3,58}, T. REPOSEUR^{34,35}, S. RITZ⁴, A. Y. RODRIGUEZ⁵⁶, R. W. ROMANI³, M. ROTH²⁰, F. RYDE^{6,42}, H. F.-W. SADROZINSKI⁴, D. SANCHEZ¹⁹, A. SANDER¹⁴, P. M. SAZ PARKINSON⁴, J. D. SCARGLE⁵⁹, T. L. SCHALK⁴, A. SELLERHOLM^{6,30}, C. SGRÒ⁷, E. J. SISKIND⁶⁰, D. A. SMITH^{34,35}, P. D. SMITH¹⁴, G. SPANDRE⁷, P. SPINELLI^{17,18}, B. W. STAPPERS³⁶, J.-L. STARCK⁸, E. STRIANI^{52,61}, M. S. STRICKMAN¹, A. W. STRONG⁴⁴, D. J. SUSON⁶², H. TAJIMA³, H. TAKAHASHI³⁸, T. TAKAHASHI⁵⁴, T. TANAKA³, J. B. THAYER³, J. G. THAYER³, G. THEUREAU²⁷, D. J. THOMPSON²³, S. E. THORSETT⁴, L. TIBALDO^{8,12,13}, O. TIBOLLA⁶³, D. F. TORRES^{56,64}, G. TOSTI^{15,16}, A. TRAMACERE^{3,65}, Y. UCHIYAMA^{3,54}, T. L. USHER³, A. VAN ETTEN³, V. VASILEIOU^{23,24,25}, C. VENTER^{23,66}, N. VILCHEZ⁴⁹, V. VITALE^{52,61}, A. P. WAITE³, P. WANG³, N. WANG⁶⁷, K. WATTERS³, P. WELTEVREDE⁴³, B. L. WINER¹⁴, K. S. WOOD¹, T. YLINEN^{6,42,68}, AND M. ZIEGLER⁴

¹ Space Science Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA

² National Research Council Research Associate, National Academy of Sciences, Washington, DC 20001, USA

³ W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Department of Physics and SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA; rwr@astro.stanford.edu

⁴ Santa Cruz Institute for Particle Physics, Department of Physics and Department of Astronomy and Astrophysics, University of California at Santa Cruz, Santa Cruz, CA 95064, USA

⁵ Department of Astronomy, Stockholm University, SE-106 91 Stockholm, Sweden

⁶ The Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

⁷ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy

⁸ Laboratoire AIM, CEA-IRFU/CNRS/Université Paris Diderot, Service d'Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

⁹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

¹⁰ Dipartimento di Fisica, Università di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

¹¹ Rice University, Department of Physics and Astronomy, MS-108, P.O. Box 1892, Houston, TX 77251, USA

¹² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy

¹³ Dipartimento di Fisica "G. Galilei," Università di Padova, I-35131 Padova, Italy

¹⁴ Department of Physics, Center for Cosmology and Astro-Particle Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

¹⁵ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹⁶ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹⁷ Dipartimento di Fisica "M. Merlin" dell'Università e del Politecnico di Bari, I-70126 Bari, Italy; andrea.caliandro@ba.infn.it

¹⁸ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari, 70126 Bari, Italy

¹⁹ Laboratoire Leprince-Ringuet, École Polytechnique, CNRS/IN2P3, Palaiseau, France

²⁰ Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195-1560, USA

²¹ Columbia Astrophysics Laboratory, Columbia University, New York, NY 10027, USA

²² INAF-Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, I-20133 Milano, Italy

²³ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA; elizabeth.c.ferrara@nasa.gov

²⁴ Center for Research and Exploration in Space Science and Technology (CRESST), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

²⁵ University of Maryland, Baltimore County, Baltimore, MD 21250, USA

²⁶ George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA

²⁷ Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, LPCE UMR 6115 CNRS, F-45071 Orléans Cedex 02, and Station de radioastronomie de Nançay, Observatoire de Paris, CNRS/INSU, F-18330 Nançay, France

²⁸ Laboratoire de Physique Théorique et Astroparticules, Université Montpellier 2, CNRS/IN2P3, Montpellier, France

²⁹ Department of Physics and Astronomy, Sonoma State University, Rohnert Park, CA 94928-3609, USA

³⁰ Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

³¹ Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, I-00044 Frascati (Roma), Italy

FERMI-LAT OBSERVATIONS OF THE GEMINGA PULSAR

A. A. ABDO^{1,2,57}, M. ACKERMANN³, M. AJELLO³, L. BALDINI⁴, J. BALLE⁵, G. BARBIELLINI^{6,7}, D. BASTIERI^{8,9},
B. M. BAUGHMAN¹⁰, K. BECHTOL³, R. BELLAZZINI⁴, B. BERENJI³, G. F. BIGNAMI¹¹, R. D. BLANDFORD³, E. D. BLOOM³,
E. BONAMENTE^{12,13}, A. W. BORGLAND³, J. BRÉGEON⁴, A. BREZ⁴, M. BRIGIDA^{14,15}, P. BRUEL¹⁶, T. H. BURNETT¹⁷,
G. A. CALIANDRO¹⁸, R. A. CAMERON³, P. A. CARAVEO¹⁹, J. M. CASANDJIAN⁵, C. CECCHI^{12,13}, Ö. ÇELİK^{20,21,22}, E. CHARLES³,
A. CHEKHTMAN^{1,23}, C. C. CHEUNG^{1,2,57}, J. CHIANG³, S. CIPRINI¹³, R. CLAU³, J. COHEN-TANUGI²⁴, J. CONRAD^{25,26,58},
C. D. DERMER¹, F. DE PALMA^{14,15}, M. DORMODY²⁷, E. DO COUTO E SILVA³, P. S. DRELL³, R. DUBOIS³, D. DUMORA^{28,29},
Y. EDMONDS³, C. FARNIER²⁴, C. FAVUZZI^{14,15}, S. J. FEGAN¹⁶, W. B. FOCKE³, P. FORTIN¹⁶, M. FRAILIS^{30,31}, Y. FUKAZAWA³²,
S. FUNK³, P. FUSCO^{14,15}, F. GARGANO¹⁵, D. GASPARRINI³³, N. GEHRELS²⁰, S. GERMANI^{12,13}, G. GIAVITTO^{6,7}, N. GIGLIETTO^{14,15},
F. GIORDANO^{14,15}, T. GLANZMAN³, G. GODFREY³, I. A. GRENIER⁵, M.-H. GRONDIN^{28,29}, J. E. GROVE¹, L. GUILLEMOT^{28,29,34},
S. GUIRIEC³⁵, D. HADASCH³⁶, A. K. HARDING²⁰, E. HAYS²⁰, R. E. HUGHES¹⁰, G. JÓHANNESSEN³, A. S. JOHNSON³,
T. J. JOHNSON^{20,37}, W. N. JOHNSON¹, T. KAMAE³, H. KATAGIRI³², J. KATAOKA³⁸, N. KAWAI^{39,40}, M. KERR¹⁷, J. KNÖDLSSEDER⁴¹,
M. KUSS⁴, J. LANDE³, L. LATRONICO⁴, M. LEMOINE-GOUMARD^{28,29}, F. LONGO^{6,7}, F. LOPARCO^{14,15}, B. LOTT^{28,29},
M. N. LOVELLETTE¹, P. LUBRANO^{12,13}, A. MAKEEV^{1,23}, M. MARELLI¹⁹, M. N. MAZZIOTTA¹⁵, J. E. MCENERY^{20,37}, C. MEURER^{25,26},
P. F. MICHELSON³, W. MITTHUMSIRI³, T. MIZUNO³², A. A. MOISEEV^{21,37}, C. MONTE^{14,15}, M. E. MONZANI³, A. MORSELLI⁴²,
I. V. MOSKALENKO³, S. MURGIA³, P. L. NOLAN³, J. P. NORRIS⁴³, E. NUSS²⁴, T. OHSUGI⁴⁴, N. OMODEI³, E. ORLANDO⁴⁵,
J. F. ORMES⁴³, M. OZAKI⁴⁶, D. PANEQUE³, J. H. PANETTA³, D. PARENT^{1,23,28,29}, V. PELASSA²⁴, M. PEPE^{12,13}, M. PESCE-ROLLINS⁴,
F. PIRON²⁴, T. A. PORTER³, S. RAINÒ^{14,15}, R. RANDO^{8,9}, P. S. RAY¹, M. RAZZANO⁴, A. REIMER^{3,47}, O. REIMER^{3,47},
T. REPOSEUR^{28,29}, L. S. ROCHESTER³, A. Y. RODRIGUEZ¹⁸, R. W. ROMANI³, M. ROTH¹⁷, F. RYDE^{26,48}, H. F.-W. SADROZINSKI²⁷,
A. SANDER¹⁰, P. M. SAZ PARKINSON²⁷, J. D. SCARGLE⁴⁹, C. SGRÒ⁴, E. J. SISKIND⁵⁰, D. A. SMITH^{28,29}, P. D. SMITH¹⁰, G. SPANDRE⁴,
P. SPINELLI^{14,15}, M. S. STRICKMAN¹, D. J. SUSON⁵¹, H. TAKAHASHI⁴⁴, T. TAKAHASHI⁴⁶, T. TANAKA³, J. B. THAYER³,
J. G. THAYER³, D. J. THOMPSON²⁰, L. TIBALDO^{5,8,9,59}, D. F. TORRES^{18,36}, G. TOSTI^{12,13}, A. TRAMACERE^{3,52,53}, T. L. USHER³,
A. VAN ETEN³, V. VASILEIOU^{21,22}, C. VENTER⁵⁴, N. VILCHEZ⁴¹, V. VITALE^{42,55}, A. P. WAITE³, P. WANG³, K. WATTERS³,
B. L. WINER¹⁰, K. S. WOOD¹, T. YLINEN^{26,48,56}, AND M. ZIEGLER²⁷

¹ Space Science Division, Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375, USA

² National Academy of Sciences, Washington, DC 20001, USA

³ W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Department of Physics and SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

⁴ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy; massimiliano.razzano@pi.infn.it

⁵ Laboratoire AIM, CEA-IRFU/CNRS/Université Paris Diderot, Service d'Astrophysique, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

⁶ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

⁷ Dipartimento di Fisica, Università di Trieste, I-34127 Trieste, Italy

⁸ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova, I-35131 Padova, Italy

⁹ Dipartimento di Fisica "G. Galilei," Università di Padova, I-35131 Padova, Italy

¹⁰ Department of Physics, Center for Cosmology and Astro-Particle Physics, The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA

¹¹ Istituto Universitario di Studi Superiori (IUSS), I-27100 Pavia, Italy

¹² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹³ Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Perugia, I-06123 Perugia, Italy

¹⁴ Dipartimento di Fisica "M. Merlin" dell'Università e del Politecnico di Bari, I-70126 Bari, Italy

¹⁵ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari, 70126 Bari, Italy; Fabio.Gargano@ba.infn.it

¹⁶ Laboratoire Leprince-Ringuet, École polytechnique, CNRS/IN2P3, Palaiseau, France

¹⁷ Department of Physics, University of Washington, Seattle, WA 98195-1560, USA

¹⁸ Institut de Ciències de l'Espai (IEEC-CSIC), Campus UAB, 08193 Barcelona, Spain

¹⁹ INAF-Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, I-20133 Milano, Italy

²⁰ NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

²¹ Center for Research and Exploration in Space Science and Technology (CRESTT) and NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

²² Department of Physics and Center for Space Sciences and Technology, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, MD 21250, USA

²³ George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA

²⁴ Laboratoire de Physique Théorique et Astroparticules, Université Montpellier 2, CNRS/IN2P3, Montpellier, France

²⁵ Department of Physics, Stockholm University, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

²⁶ The Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova, SE-106 91 Stockholm, Sweden

²⁷ Santa Cruz Institute for Particle Physics, Department of Physics and Department of Astronomy and Astrophysics, University of California at Santa Cruz, Santa Cruz, CA 95064, USA

²⁸ CNRS/IN2P3, Centre d'Études Nucléaires Bordeaux Gradignan, UMR 5797, Gradignan 33175, France; dumora@cenbg.in2p3.fr

²⁹ Université de Bordeaux, Centre d'Études Nucléaires Bordeaux Gradignan, UMR 5797, Gradignan 33175, France

³⁰ Dipartimento di Fisica, Università di Udine and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, Gruppo Collegato di Udine, I-33100 Udine, Italy

³¹ Osservatorio Astronomico di Trieste, Istituto Nazionale di Astrofisica, I-34143 Trieste, Italy

³² Department of Physical Sciences, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

³³ Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, I-00044 Frascati (Roma), Italy

³⁴ Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53121 Bonn, Germany

³⁵ Center for Space Plasma and Aeronomic Research (CSPAR), University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA

³⁶ Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Barcelona, Spain

³⁷ Department of Physics and Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

³⁸ Research Institute for Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1, Okubo, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

³⁹ Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro City, Tokyo 152-8551, Japan

⁴⁰ Cosmic Radiation Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan

Chapitre 4

Pulsars γ et perspectives

Bien que ce chapitre traite des futurs instruments de l'astronomie γ et que ceux-ci sont généralement des outils « multi-cibles », la discussion va se focaliser essentiellement sur l'apport de tels détecteurs à la thématique pulsars. Il ne prétend pas présenter un panorama exhaustif de la prochaine génération d'instruments et de leur implication dans l'évolution globale du domaine de l'astronomie γ .

4.1 Un successeur à *Fermi-LAT* ?

Fermi-LAT a été lancé il y a désormais un peu plus de 2 ans, c'est généralement le délai raisonnable à partir duquel la réflexion sur la construction de la nouvelle génération s'engage ; à peine 3 ans après le lancement d'EGRET, le design général de GLAST était déjà bien avancé (Atwood & the GLAST Collaboration, 1994). Il semble donc légitime de s'interroger sur ce que devrait être le successeur de *Fermi-LAT*. Cependant, il semble bien difficile à l'heure actuelle de répondre à la question : « comment dépenser de façon raisonnable 1 milliard de dollars pour construire un successeur à *Fermi* ? »

4.1.1 De meilleures performances pour un détecteur γ dans la gamme du *GeV* ?

La question n'a de sens que si l'on envisage un véritable saut en terme de performances, la construction d'un détecteur se contentant de corriger les éventuels points faibles du LAT ne justifie certainement pas l'investissement. *Fermi* doit fonctionner 5 ans probablement 10 ce qui lui permet d'accumuler, s'il ne rencontre pas de problème, une statistique au moins 5 fois plus grande sur chacune des sources.

4.1.1.1 Une technologie innovante ?

La problématique est pour l'instant assez différente de celle ayant conduit à la réflexion sur le successeur d'EGRET. Lors de son lancement, les techniques de détection employées pour EGRET, conçu dans les années 70, ne différaient fondamentalement pas de celles des missions précédentes et ne

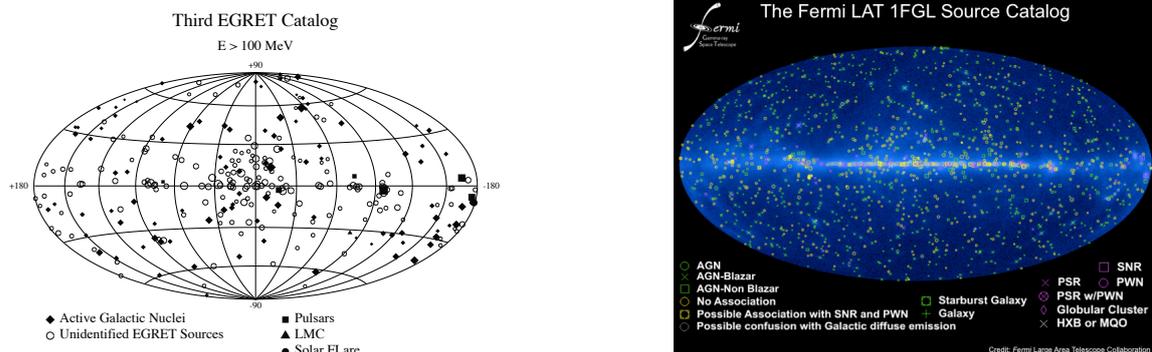


FIG. 4.1 – Les cartes du ciel produites à partir du 3^{ème} catalogue d’EGRET à gauche et de la première année de donnée de *Fermi*-LAT à droite. La proportion de sources non identifiées est à peine plus faible dans le cas de *Fermi*-LAT.

correspondaient pas à l’état de l’art des détecteurs haute énergie au sol. Le LAT est constitué d’un trajectographe Silicium et d’un calorimètre constitué de cristaux d’iodure de Césium ce qui sur le principe ne le différencie pas des détecteurs présents au LHC. Ce n’est donc pas sur l’aspect technologique que pourrait se faire pour l’instant un éventuel saut qualitatif.

4.1.1.2 Un détecteur plus grand ?

Une augmentation de la surface du détecteur suffisamment significative n’est pas non plus envisageable, l’encombrement et la masse de GLAST ayant déjà nécessité un lanceur parmi les plus puissants disponibles. La masse des cristaux du calorimètre est une contrainte forte, ne laissant espérer au mieux qu’un gain d’un facteur de 2 à 4 en surface pour une même configuration (charge utile d’une Ariane V autour de 20 T pour une satellisation en orbite basse à 500 km), ceci ne réglant pas le problème de la puissance électrique nécessaire à l’instrumentation des nouvelles voies d’électronique et encore moins le dépassement du budget initial...

4.1.1.3 Quels points faibles pour le LAT ?

Les pistes d’amélioration très significatives sont pour le moment assez maigres, ceci d’autant plus que ce n’est pas vraiment dans la quantité de photons recueillis par le LAT qu’il pourrait y avoir une faiblesse mais plutôt dans la qualité de la reconstruction de ceux-ci, avec 630 sources non identifiées sur 1451 (Abdo et al., 2010b) soit un peu plus de 55% de sources identifiées. *Fermi* se révèle à peine meilleur qu’EGRET (Hartman et al., 1999), avec 170 sources non identifiées sur 271 (37% de sources identifiées).

Dans une certaine mesure, on peut considérer que la sensibilité du LAT est trop grande par rapport à sa PSF, ce qui ne permet pas de lever la confusion entre les sources. En ce qui concerne les pulsars, les

difficultés viennent plutôt de la maîtrise du fond diffus galactique qui a tendance à noyer les sources les plus faibles.

4.1.1.4 Améliorer la reconstruction

Améliorer la qualité de reconstruction des γ pose le problème de la méthode de détection des photons, aux énergies du LAT, la détection repose sur la conversion du γ en paire électron-positon. La limitation principale de la qualité de la reconstruction angulaire provient essentiellement de la diffusion coulombienne multiple des particules chargées dans le détecteur, phénomène difficile à contraindre puisqu'un minimum de matière est nécessaire pour assurer la conversion du photon et la détection de la trajectoire de chacune des particules filles mais c'est cette même matière qui est à l'origine de la perte d'information directionnelle. La solution serait, à l'instar des détecteurs Cerenkov qui utilisent des kilomètres d'atmosphère, d'augmenter le bras de levier en construisant un trajectographe beaucoup plus haut que celui du LAT tout en conservant une quantité de matière traversée du même ordre.

Si la dimension de la base du détecteur n'est pas augmentée pour des raisons de masse se posera alors le problème du champ de vue balayé nécessairement réduit par la nouvelle configuration du détecteur (plus haut pour une même largeur), et donc de la perte d'un des points forts du LAT capable de scruter l'ensemble du ciel quasiment en permanence (le ciel est entièrement couvert en 2 orbites soit environ 3 heures) et ainsi d'observer en continu la variabilité du ciel γ .

4.1.1.5 Une mission ciblée

Les caractéristiques du LAT sont contraintes par son caractère d'observatoire généraliste non dédié à l'étude d'objets astrophysiques particuliers. Si on considère que le LAT a ou va remplir sa mission qui consiste à faire l'inventaire des différents types d'émetteurs γ au GeV, il peut être intéressant d'envisager pour lui succéder des instruments conçus pour étudier en détail des familles de cibles particulières. Dans ce cas, la contrainte du très grand champ de vue disparaît et permet de nouveau d'envisager une amélioration de la PSF. Ce type de mission pointant sur un nombre limité de sources pourrait être adaptée à l'étude détaillée des pulsars et de leur interaction avec leur environnement proche (Nébuleuse à vent par exemple), une telle mission n'est pour le moment pas d'actualité. Le ciel γ au GeV pourrait demeurer inaccessible longtemps après la fin de *Fermi*.

4.1.2 De meilleures performances pour un détecteur γ dans une autre gamme d'énergie ?

Si pendant longtemps la couverture du ciel à haute énergie présentait un trou entre les énergies de quelques GeV et celles de quelques centaines de GeV, l'arrivée de *Fermi-LAT* combinée à la diminution du seuil en énergie des détecteurs au sol y a remédié tout au moins pour la prochaine décennie.

C'est probablement dans la gamme 1 – 100 MeV, que se situe le défi actuel de la conception d'un instrument de nouvelle génération. Bien que plusieurs fois reportée, la fin d'INTEGRAL est proche laissant le domaine vide de détecteur. Si la réflexion sur un successeur est déjà bien avancée en ce

qui concerne la détection des sursauts gamma (détecteur ECLAIRS (Schanne et al., 2006) à bord de la plateforme SVOM, satellite GRIPS (Greiner et al., 2009)), elle ne fait que démarrer en ce qui concerne la définition d'un instrument capable d'observer les sources dans la gamme immédiatement inférieure à celle couverte par *Fermi*-LAT, bien que la gamme d'énergie couverte par GRIPS permette d'observer jusqu'à 50 MeV. La définition d'un tel instrument capable d'effectuer un saut qualitatif par rapport à COMPTEL aussi significatif que celui de *Fermi*-LAT par rapport à EGRET, n'est pas aisée dans un domaine d'énergie où le bruit de fond est potentiellement important et la technique de détection complexe (masque codé, télescope Compton). Cette gamme d'énergie intermédiaire entre les gamma nucléaires et la centaine de MeV, est potentiellement intéressante pour la physique de pulsars. En effet, *Fermi*-LAT a mis en évidence plus de 70 pulsars, parmi eux seul PSR J1513–5908 (le fameux PSR B1509–58 vu par COMPTEL) possède vraisemblablement une coupure spectrale inférieure à 700 MeV et même probablement très inférieure. Il est difficile de croire que cet objet est unique mais comme les « cousins » de Geminga à leur époque, les objets similaires résistent à l'observation.

La PSF de *Fermi*-LAT se dégradant très vite en dessous de 100 MeV, l'émission pulsée de tels objets se retrouve probablement noyée dans le bruit de fond galactique. Un instrument de meilleure résolution angulaire que le LAT dans la gamme d'énergie inférieure à 50 MeV pourrait permettre la mise en évidence de ces pulsars. L'étude de la polarisation de l'émission gamma accessible aux instruments travaillant dans la gamme d'énergie permettrait aussi l'obtention d'informations complémentaires sur les mécanismes d'accélération et la validité des modèles d'émission haute énergie ((Dyks et al., 2004) par exemple).

4.2 Pulsars γ et futurs détecteurs Cerenkov

Si l'astronomie gamma au sol a rencontré depuis 20 ans de très grands succès, sa contribution à la physique des pulsars demeure des plus modestes, puisqu'après le travail exploratoire vers les basses énergies initié par CELESTE, seule la collaboration MAGIC a observé une émission pulsée, celle du Crabe (Aliu et al., 2008), qui, si on en croit les résultats de *Fermi*-LAT représente de loin le meilleur compromis flux, indice spectral, énergie de coupure, pour une observation de l'émission pulsée au-delà de quelques dizaines de GeV. Il est malheureusement probable que pour la nouvelle génération d'imageurs Cerenkov, l'étude des pulsars demeure un domaine très marginal, ceci malgré les objectifs de seuil en énergie affichés.

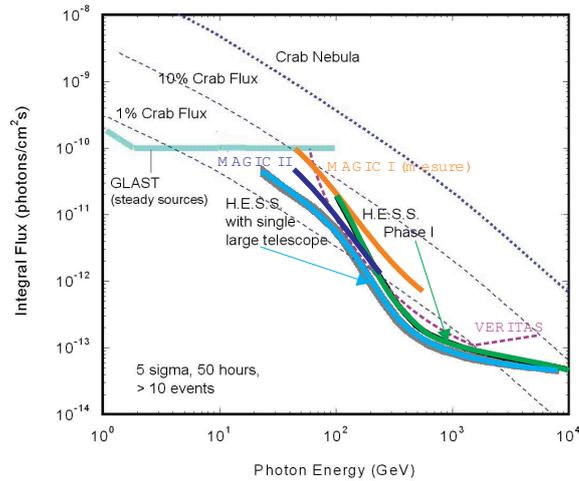


FIG. 4.2 – Sensibilité comparée des différents détecteurs γ au-delà du GeV

En effet, HESS-2 avec son télescope central de 28 m de diamètre espère atteindre un seuil en énergie de 20 GeV en mode mono-télescope, MAGIC II en mode stéréo a son seuil autour de 50 GeV ce qui laisse peu d'espoir de voir d'autres pulsars que le Crabe.

Dans un avenir plus lointain, CTA risque avoir du mal à faire beaucoup mieux, l'accent ayant été mis tout au moins pour la partie de l'observatoire située dans l'hémisphère Sud sur la sensibilité plutôt que sur le seuil en énergie ($E_{thres} \sim 100$ GeV). L'instrument Nord envisage un seuil en énergie autour de 10 GeV, mais il faudra certainement attendre les résultats de HESS-2 pour se convaincre que la sensibilité autour de 20 GeV et en dessous correspond bien à celle prédite par les simulations Monte-Carlo.

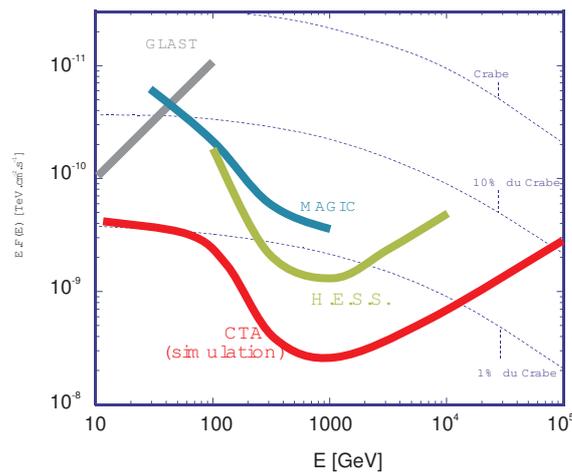


FIG. 4.3 – Sensibilité comparée de CTA avec les détecteurs Cerenkov actuels

L'expérience de CELESTE dans le domaine a montré (bien que la technique employée soit différente (échantillonnage du front d'onde contre imageur)) qu'aux basses énergies le détecteur devient très sensible aux effets atmosphériques rendant très difficile l'analyse des données proches du seuil de déclenchement. Cet effet est en partie responsable de la différence constatée entre les performances attendues du détecteur pour la reconstruction des événements γ basse énergie sur la base de simulations numériques et celles obtenues sur le terrain à la suite de l'analyse d'événements réels. Il est clair que les sites hébergeant la nouvelle génération de détecteurs Cerenkov possèdent des qualités intrinsèques bien supérieures en terme de bruit de fond du ciel nocturne, il est cependant difficile de quantifier l'impact de ces effets. Sur le site de Thémis par exemple, l'imageur Cerenkov CAT dont le seuil de déclenchement se situait au dessus de 200 GeV n'a pas montré l'extrême sensibilité aux conditions atmosphériques constatée par CELESTE au voisinage de 40 GeV.

Au-delà, de la performance réelle des futurs détecteurs Cerenkov autour de 10 GeV, il est à craindre au vu des énergies de coupure concentrées pour la majorité des pulsars autour de 2 – 3 GeV mesurées par *Fermi*-LAT que l'apport d'informations au-delà de 10 GeV soit faible. La contribution directe de l'astronomie γ au sol devrait donc demeurer modeste pendant encore un certain temps, à moins bien évidemment que certains pulsars ne montrent dans leur spectre à Très Haute Énergie, un rebond dû à une composante Inverse Compton prédite par certains modèles et mise en évidence de façon non ambiguë (la détection de Geminga au TeV a été annoncée (Vishwanath et al., 1993), confirmée immédiatement (Bowden et al., 1993) et interprétée (Kaul, 1996) pour ne plus jamais être vue par la suite) par l'extraordinaire augmentation de sensibilité à haute énergie cette fois des détecteurs de la nouvelle génération.

4.3 Pulsars γ dans un avenir proche.

Il semble donc probable que les résultats de *Fermi* demeurent un élément central de l'étude des pulsars à haute énergie pour la prochaine décennie. Il n'est d'ailleurs pas évident qu'à l'heure actuelle détecter plus de pulsars γ soit une priorité. Le nombre de pulsars détectés dans chacune des 3 catégories (pulsars « normaux » connus en radio, pulsars émetteurs γ seuls et pulsars milliseconde) permet d'ores et déjà comme le montre le catalogue de pulsars de *Fermi* de situer le champ d'étude bien au-delà des tentatives de généralisation à partir de quelques cas particuliers comme cela avait été le cas pour EGRET. A ces 3 catégories, il faut probablement associer les sources non identifiées. En effet, 17 des 40 nouveaux objets du premier catalogue de pulsars de *Fermi* sont associés à des sources non identifiées du troisième catalogue EGRET, parmi eux 5 sont des pulsars découverts en radio postérieurement à EGRET. De la même façon, il semble raisonnable d'imaginer que parmi les 600 sources continues non identifiées du premier catalogue *Fermi* se cache un certain nombre de pulsars dont l'émission périodique est détectable à d'autres longueurs d'onde que gamma.

4.3.1 Recherche de pulsars à d'autres longueurs d'ondes

Si lors de la phase préparatoire, les observations aux autres longueurs d'onde sont apparues, à travers la production d'éphémérides de rotation, comme l'auxiliaire indispensable à la découverte de nouveaux pulsars γ ; Il est apparu, dès les premiers résultats de *Fermi*, et la preuve faite, d'une part de sa

capacité inédite à trouver la signature de pulsations à partir des données γ seules et d'autre part par la mise en évidence des pulsars milliseconde comme émetteurs de rayonnement haute énergie, que le sens de l'interaction entre *Fermi* et les télescopes observant aux autres longueurs d'ondes pouvait s'inverser. Les sources de rayonnement γ découvertes par *Fermi* sont donc rapidement devenues un champ d'exploration pour les autres instruments, en particulier, les radiotélescopes.

Ainsi, si parmi les 16 premiers pulsars découverts en γ par *Fermi*, un certain nombre d'entre eux avait déjà subi une observation minutieuse garantissant leur qualité de pulsars silencieux en radio, pour d'autres en revanche, cette recherche n'avait jamais été poussée. La donnée d'une période et d'une position même approximative dans le ciel par *Fermi* permettant de contraindre l'espace de recherche ont conduit à la mise en évidence de pulsations radio chez certains des pulsars « γ » découverts (Camillo et al., 2009).

La découverte de l'émission γ des pulsars milliseconde et la possibilité que de nombreuses sources *Fermi* non identifiées soient en réalité des pulsars jusqu'alors inconnus ont poussé les grands radiotélescopes à s'associer dans le Pulsar Timing Consortium, structure héritière de celle mise en place pour assurer à la collaboration *Fermi* l'obtention d'éphémérides de rotation des pulsars telle que définie dans la liste des candidats pulsars γ pour *Fermi* (Smith et al., 2008).

Depuis, 23 pulsars milliseconde supplémentaires ont été découverts en radio à la position de sources continues *Fermi*, l'utilisation des éphémérides radio établis alors, permettant pour certains d'entre eux la mise en évidence de pulsation γ .

4.3.2 Etude de la géométrie des faisceaux.

La distinction entre pulsars γ émetteurs radio et non émetteurs radio revêt une importance particulière lorsqu'on s'intéresse à la géométrie des faisceaux d'émission. Si la forme de la coupure spectrale est comme cela a déjà été souligné un des indicateurs du modèle d'émission haute énergie, la différence de localisation des zones d'accélération des particules dans la magnétosphère prédite par les différents modèles conduit à des caractéristiques relatives des courbes de lumière radio et gamma spécifiques. Les courbes de lumières observées apparaissent donc comme le résultat de la combinaison de la localisation des zones d'émission liées au modèle (proche de l'étoile à neutron pour le modèle Polar Cap, plus loin dans la magnétosphère pour les modèles Slot Gap et Outer Gap) et de la géométrie particulière du système étudié.

Les paramètres géométriques caractérisant l'étoile étant :

- l'angle α que fait l'axe magnétique du pulsar avec son axe de rotation.
- l'angle β entre la direction de l'axe magnétique et celle de l'observateur.
- l'angle ζ entre l'axe de rotation et la direction d'observation.

L'étude détaillée des courbes de lumière γ (écart entre les pics pour le phasogrammes à plusieurs pics, écart entre la phase du pic radio et du pic γ pour les pulsars connus en radio) permet de remonter à ces paramètres moyennant des hypothèses sur le modèle d'émission. La levée de la dégénérescence peut être obtenue par une détermination extérieure de la géométrie du pulsar à partir de l'orientation l'image de la nébuleuse associée vue en X par exemple, si cette nébuleuse existe ou par l'étude de la variation de la polarisation du signal radio au cours de la rotation du pulsar.

La précision des données obtenues par *Fermi* associée à une approche multi-longueurs d'onde permet donc de poser des contraintes sans précédent non seulement sur la géométrie de l'astre et de son

environnement mais aussi de permettre une approche discriminante des modèles d'émission, ce qui n'était pas le cas auparavant.

Cette approche qui permet d'individualiser le traitement de chaque source, renforce paradoxalement les conclusions générales sur les populations de pulsars que l'on peut tirer des résultats obtenus.

Jusqu'à *Fermi*, le calcul de la luminosité des sources à partir du flux mesuré se faisait, faute d'information sur les paramètres des faisceaux, en supposant que pour tous les pulsars l'émission γ se produisait dans un cône d'ouverture 1 sr, ce qui pouvait conduire à des valeurs non physiques de l'efficacité de conversion de l'énergie de rotation du pulsar en rayonnement, cela sans pouvoir conclure sur l'existence ou non d'un mécanisme supplémentaire de production de rayonnement γ dans l'étoile non lié à la perte de moment cinétique.

4.3.3 Ceux qu'on voit et ceux qu'on ne voit pas...

Lors de l'élaboration de la liste des candidats, les critères de sélection choisis étaient le fruit des résultats obtenus par EGRET et de considérations théoriques. Avec le recul de deux années de données, et pour la première fois, il semble que les critères de sélection utilisés pour établir cette liste reflètent une certaine réalité physique. En effet, des 46 pulsars émetteurs radio et détectés en γ seuls 15 ne sont pas dans la liste. Parmi eux, 11 pulsars milliseconde naturellement éliminés par le critère de l'énergie de ralentissement minimale $\dot{E} < 10^{-34} \text{ erg.s}^{-1}$. Les 4 restants ont été découverts en radio postérieurement à l'établissement de la liste soit fortuitement soit dans le cadre du Pulsar Timing Consortium après recherche aux positions de sources continues *Fermi*. S'ils avaient été découverts avant l'établissement de la liste, ils auraient figuré dans le premier quart des 215 candidats à observer en priorité.

Parmi les 50 premiers pulsars de la liste établie en 2008, seule une quinzaine de sources ne présente aucun signe de pulsation γ . Il est donc légitime de s'interroger sur l'origine de cette absence d'émission à haute énergie. Les faisceaux radio étant réputés étroits et émis de la calotte polaire au contraire des faisceaux gamma plus larges, une géométrie conduisant l'observateur à voir l'émission γ sans émission radio associée est facilement envisageable. Le contraire semble plus difficile à réaliser d'un point de vue géométrique.

L'étude approfondie des pulsars radio non-émetteurs γ est donc probablement riche d'informations et doit être considérée comme une population à part entière. Elle révèle par son absence d'émission haute énergie ou sa non-détection depuis la terre, des contraintes sur les mécanismes d'émission ou sur la disposition des faisceaux de particules dans la magnétosphère. L'hypothèse de faisceaux radio plus larges que ceux couramment admis commence à être envisagée (Ravi et al., 2010).

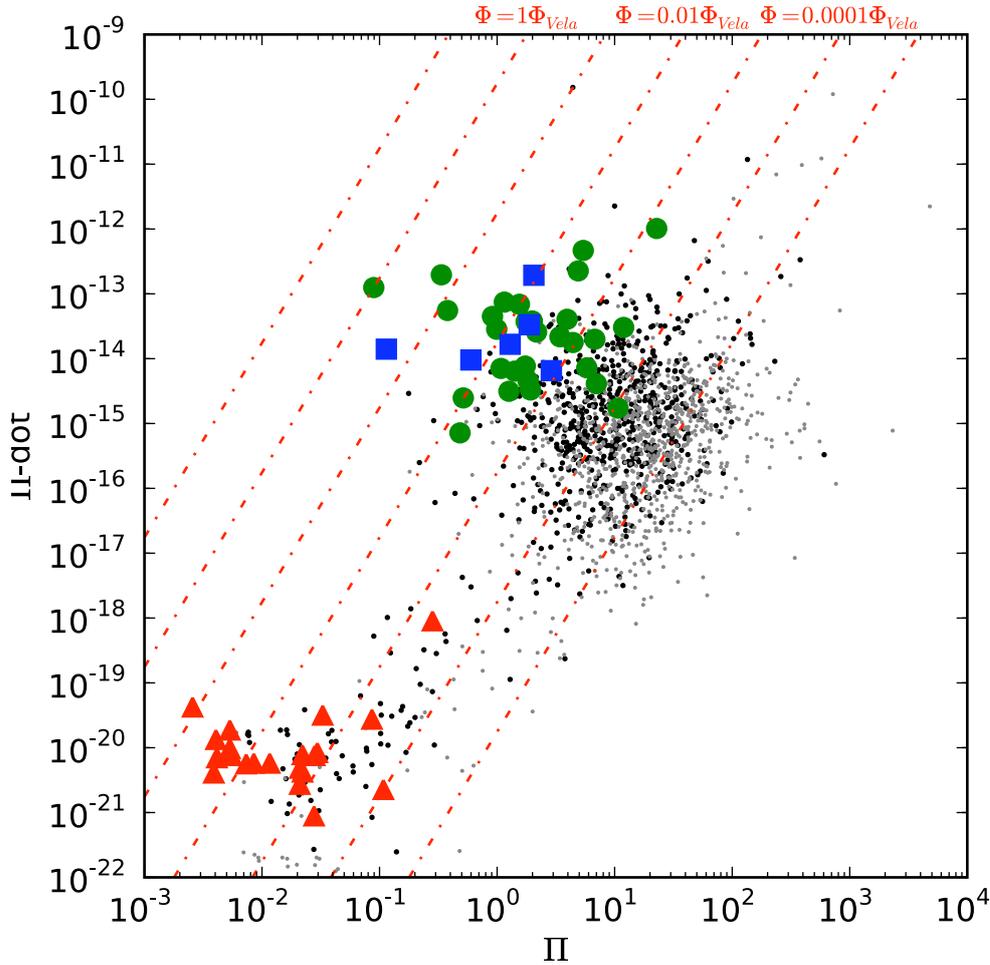


FIG. 4.4 – Diagramme pseudo P-Pdot, afin de tenir compte de la distance des sources et donc d’avoir une image de la détectabilité théorique des pulsars plus réaliste, les périodes et dérivées de la période sont renormalisées par rapport aux lignes iso-flux (normalisées au flux de Vela). Un pulsar de période P_0 , de dérivée de période P_1 d’énergie de freinage E_{dot} et situé à la distance d se trouvera donc à l’intersection de la ligne iso-flux $\sqrt{E_{dot}}/d^2$ et de la perpendiculaire à cette ligne passant par le point P_0, P_1 . Les ronds verts représentent les pulsars jeunes détectés en radio et vus par *Fermi*-LAT, les carrés bleus les pulsars détectés en gamma seulement par *Fermi*-LAT, les triangles rouges les pulsars milliseconde détectés par *Fermi*-LAT. Les points noirs représentent les pulsars radio dont la collaboration *Fermi* possède une éphéméride, les points gris ceux pour lesquels il n’y a pas de suivi radio pour *Fermi*.

Cette étude fait bien évidemment de nouveau appel à une approche multi-longueurs d’onde puisque ces pulsars ne sont pas émetteurs γ . L’étude a été commencée à la fin du printemps 2010 par Daniel Eismann, stagiaire de Licence, qui s’est focalisé sur un nombre réduit de candidats, afin de mettre en place une méthodologie pour une étude sur une plus large statistique. La première phase du travail consiste à identifier les causes évidentes de non-détection, comme par exemple l’absence d’éphémé-

rides radio valides ou une distance trop importante pour pouvoir espérer un flux dépassant la sensibilité de *Fermi*, ce tri effectué seul un petit nombre de candidats subsistent (Dumora et al., 2010) et nécessiteront une étude approfondie afin d'essayer de contraindre la géométrie de leur émission.

4.4 Un avenir au-delà des pulsars.

Si l'étude des pulsars γ avec *Fermi* permet de mieux cerner l'accélération des particules dans l'environnement immédiat de l'étoile en sondant la magnétosphère, elle s'est révélée indispensable pour l'étude d'une autre partie du reste de la supernova originelle, la nébuleuse à vent de pulsar (PWNe) associée à l'étoile. En effet, si aux énergies du TeV, l'émission du pulsar est éteinte (coupure spectrale autour du GeV) laissant le champ libre à l'étude de la nébuleuse, il n'en va pas de même aux énergies du LAT pour lesquelles le flux de gamma pulsés est généralement plusieurs fois supérieur à celui de la PWNe. L'étude conjointe des 2 objets s'est donc révélée indispensable dans le cas de *Fermi* (Grondin, 2010). Afin de mettre en évidence la source continue plus faible que constitue la PWNe, il est nécessaire d'éliminer l'émission du pulsar des données. Ceci se fait naturellement par l'analyse temporelle des événements, seuls les photons du Off-pulse du pulsar étant conservés pour l'analyse de l'émission continue.

L'étude de ses objets sur une large gamme spectrale doit permettre de mettre en évidence le couplage entre le pulsar et la nébuleuse et de comprendre en détail les modalités d'accélération des particules dans la PWNe. Actuellement, le fonctionnement conjoint de télescopes de grande sensibilité sur une large gamme de longueurs d'ondes offre l'opportunité d'effectuer des études poussées en ce sens. La thématique PWNe portée dans le groupe Astroparticules du CENBG par Marianne Lemoine Goumard s'est vue soutenue au niveau européen par l'obtention d'une ERC, la thématique pulsar γ étant étroitement associée.

Enfin, pour en revenir aux projets instrumentaux du futur, il est clair que si les pulsars paraissent hors du champ de CTA du fait du seuil en énergie probablement trop élevé du détecteur, il n'en est pas du tout de même pour l'étude des PWNs qui bénéficieraient de la grande sensibilité de l'instrument et de sa résolution angulaire améliorée. Il reste comme souvent en physique expérimentale que le recouvrement temporel des différentes expériences semble de plus en plus restreint, limitant ainsi les possibilités d'interaction des différentes expériences en particulier dans le cadre d'observations simultanées multi-longueurs d'onde.

Bibliographie

- Abdo, A. A., et al., 2010, ApJ, 187, 460
- Abdo, A. A., et al., 2010, ApJS, 188, 405
- Aliu, E., et al., 2008, Science, 322, 1221
- Atwood, W. B., & the GLAST Collaboration 1994, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 342, 302
- Bowden, C. C. G., et al., 1993, Journal of Physics G Nuclear Physics, 19, L29
- Camilo, F., et al., 2009, ApJ, 705, 1
- Dyks, J., Harding, A. K., & Rudak, B., 2004, ApJ, 606, 1125
- Dumora, D., Eismann, D., Smith, D. A., Parent, D., Guillemot, L., 2010, Pulsar 2010, Chia, Italy, Conférence Poster
- Greiner, J., et al., 2009, Experimental Astronomy, 23, 91
- Grondin, M. H., 2010, Thèse Université Bordeaux I
- Hartman, R. C., et al., 1999, ApJS, 123, 79
- Kaul, R. K., 1996, Astrophysics and Space Science, 239, 15
- Ravi, V., Manchester, R. N., & Hobbs, G., 2010, ApJL, 716, L85
- Schanne, S., et al., 2006, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 567, 327
- Smith, D. A., et al., 2008, ApJ, 492, 923
- Vishwanath, P. R., Sathyanarayana, G. P., Ramanamurthy, P. V., & Bhat, P. N., 1993, A&A, 267, L5

Diffusion des connaissances.

Durant les 15 dernières années, l'évolution rapide de la qualité des résultats obtenus dans le domaine des astroparticules et en particulier en astronomie γ des hautes énergies a permis à la discipline de sortir de son caractère marginal, tant au niveau de la taille de la communauté scientifique que de sa diffusion vers le public. C'est donc tout naturellement que ce mouvement s'est accompagné d'un effort de diffusion des connaissances vers le public.

Diffusion vers les étudiants

Dès 1997, nous avons, avec David Smith, proposé un cours consacré aux astroparticules dans le cadre du DEA de modélisation des milieux astrophysiques, formation à l'époque cohabilitée par Toulouse et Bordeaux. Ce cours, se déroulait durant une semaine bloquée sur le site de Thémis, le programme alternant cours théoriques en matinée et observations sur l'instrument CELESTE durant les nuits.

Cet enseignement a pris fin en 2002, un enseignement de M2 entièrement théorique a pris la suite dans le cadre du Master 2 Astrophysique, Plasmas, Corpuscules de l'Université Bordeaux I.

En Septembre 2009, je suis intervenu dans la cadre de l'école d'été de physique des Astroparticules organisée à l'Observatoire de Haute Provence.

Diffusion vers le public

La dimension relativement modeste de l'expérience CELESTE et le caractère très spécialisé de la technique de détection, on conduit à une communication sous forme de séminaires grand public donnés dans le cadre des associations à vocations scientifiques ou d'interventions dans les Collèges et Lycées voire de journées portes ouvertes sur le site même de la centrale solaire Thémis.

Le caractère international de GLAST/*Fermi* et l'imaginaire associé aux missions NASA ont permis d'envisager une communication plus large. Celle-ci s'est tout d'abord concrétisée par la réalisation d'une plaquette présentant essentiellement le positionnement du groupe bordelais dans la collaboration GLAST, ce document demeure encore aujourd'hui la seule brochure en langue française accessible sur le site de la NASA consacré à GLAST/*Fermi* (http://www.nasa.gov/pdf/188895main_BROCHURE-GLAST_french.pdf).

Par la suite, à l'occasion du lancement du satellite, le groupe Astroparticules du CENBG a produit un DVD grand public. La contribution de l'équipe au LAT ainsi que les principaux enjeux

scientifiques étaient présentés dans un petit film de 7 mn, ce document aussi diffusé sur le web (<http://www.youtube.com/watch?v=54IBWt-O8Co>).

Le format court du film ainsi que la densité d'informations qu'il contient ont conduit le groupe à produire un CD d'accompagnement présentant plus en détail les objets étudiés par *Fermi* ainsi que les enjeux scientifiques de la mission à travers un dossier thématique dont j'ai assuré l'essentiel de la mise en oeuvre.

Le DVD ainsi que la plaquette représentent encore le support privilégié des différentes interventions grand public faites par les membres du groupe auprès du jeune public, le document a été largement diffusé dans les collèges et lycées de la région servant de point de départ à une interaction un peu plus construite avec les classes lors des TER de spécialité par exemple.

Encadrement de stages et de thèses.

1. Stages de Licence

(a) CELESTE

- Juillet 1997 : Benoît Lavraud, *Contribution à la phase Ia de l'expérience CELESTE : Application au contrôle des retards analogiques.* (Stage JANUS)
- Juin 1998 : Jilian Pastor, *Participation à l'expérience CELESTE : Caractérisation de l'optique et du champ de vue.* (Stage JANUS)
- Juin 2000 : Marc Crapeau, *Etude d'une nouvelle stratégie de déclenchement pour CELESTE.* (Stage JANUS)
- Juin 2002 : Thibault Cavalié, *Etude de la limite d'observation des pulsars optiques par le détecteur Cerenkov CELESTE.* (Stage JANUS)

(b) GLAST

- Juin 2005 : Marie-Hélène Grondin, *Contribution à la calibration du satellite GLAST : Analyse des événements muons dans le calorimètre.*
- Juin 2005 : Marie-Hélène Grondin, *Contribution à la calibration du satellite GLAST : Etude des première données physiques du LAT.* (Stage JANUS)
- Juin 2006 : Guillaume Castex et Alexandre Romanoff, *Les Ephémérides de pulsars pour le satellite GLAST-LAT.*

(c) Fermi

- Juin 2009 : Luc Halipré, *Etude de spectres gammas de pulsars, à partir des données prises lors des six premiers mois de fonctionnement de Fermi.* (Stage JANUS)

Les stages JANUS sont des stages longs pour lesquels l'IN2P3 octroie une allocation. Ils s'adressent aux meilleurs étudiants de fin de licence afin de les sensibiliser aux thématiques de l'institut.

2. Stages de Maîtrise (M1)

(a) Grandes Gerbes de l'air

- Juin 1994 : Frédéric Soulu, *Interaction des muons des Grandes Gerbes de l'Air avec le champ magnétique terrestre*

(b) CELESTE

- Juin 1995 : Olivier Choussat, *Contribution aux tests préliminaires de l'expérience CELESTE : Simulation des images des héliostats.*
- Juin 1995 : Leymarie Frédéric et Sébastien Castex, *Contribution à la caractérisation de gerbes de rayons cosmiques par lumière Cerenkov.*

- Juin 1999 : Ludovic Gaudichet, *Participation à la reconstruction de gerbes atmosphériques.*
 - (c) GLAST
 - Juin 2006 : Marie-Hélène Grondin, *Préparation de la Science avec le satellite GLAST : l'Etude des Pulsars. (stage poursuivi l'année suivante par une thèse dans le groupe sous la co-direction de David Smith et de Marianne Lemoine-Goumard.)*
 - Juin 2007 : Clément Surville, *Détermination d'un offset dans le système de datation du satellite GLAST.*
 - (d) *Fermi*
 - Juin 2009 : Romuald Bouffet, *Construction d'une éphéméride de Geminga à l'aide des 10 premiers mois de données Fermi. (Prix du meilleur stage 2009 de l'Institut de Physique Fondamentale, Université Bordeaux I)*
3. Stages de DEA (M2)
- (a) CELESTE
 - Juin 1999 : Emmanuel Durand, *Contribution à la calibration de CELESTE : Alignement fin des héliostats.*
4. Thèses
- (a) CELESTE
 - 20 Janvier 2003 : Emmanuel Durand, *Recherche de photons pulsaés au-dessus de 30 GeV dans le Crabe et PSR B1951+32 avec le détecteur Cerenkov atmosphérique CELESTE. (co-direction avec David Smith)*
 - (b) *Fermi*
 - 24 Septembre 2009 : Lucas Guillemot, *Détections de pulsars milliseconde avec le Fermi-LAT. (co-direction avec David Smith). (Prix de la meilleure thèse, Université Bordeaux 2009).*

Liste des Publications.

Thématique Grande Gerbes de l’Air

1. Dumora, D., Procureur, J., & Stamenov, J. N.
Evidence for the behaviour of the photoproduction cross section at ultra-high energies, *JPhG*, **18** (1992), 1839-1847
2. Châtelet, E., Dumora, D., Procureur, J., & Stamenov, J. N.
Photonuclear cross-section and selection of muon-poor EAS for the search of local sources., *NCimA*, **106** (1993), 811-822
3. Danilova, T. V., Dumora, D., Erlykin, A. D., & Procureur, J.
'Time-track complementarity' in the study of EAS longitudinal development, *JPhG*, **20** (1994), 961-978
4. Danilova, T. V., Dumora, D., Erlykin, A. D., & Procureur, J.
Method for studying the longitudinal development of extensive air showers on the basis of time-track complementarity for muons, *PAN*, **59** (1996), 109-118
5. Dumora, D., Erlykin, A. D., & Procureur, J.
The 'muon eye' as a super-mini array, *JPhG*, **22** (1996), 273-289
6. RM Martirosov et al
Primary Energy Spectrum Obtained with Extended Statistics and Search for Sources with the GAMMA Array on Mt. Aragats, *Journal of Advances in Space Research*, (2005)

Cerenkov

1. Giebels, B., et al.
Prototype tests for the CELESTE solar array gamma-ray telescope., *NIMPA*, **412** (1998), 329-341
2. Barrau, A., et al.
The CAT imaging telescope for very-high-energy gamma-ray astronomy., *NIMPA*, **416** (1998), 278-292
3. Le Bohec, S., et al.
A new analysis method for very high definition imaging atmospheric Cherenkov telescopes as applied to the CAT telescope., *NIMPA*, **416** (1998), 425-437

4. Djannati-Atai, A., et al.
Very High Energy Gamma-ray spectral properties of MKN 501 from CAT Čerenkov telescope observations in 1997, *A&A*, **350** (1999), 17-24
5. Gokhale, V. N., Bhattacharyya, S., Rannot, R. C., Dumora, D., Procureur, J., Tickoo, A. K., & Bhat, C. L.
Polarization state of atmospheric Cerenkov events —guidance from simulation studies, *NCimC*, **24** (2001), 675
6. Paré, E., et al.
CELESTE : an atmospheric Cherenkov telescope for high energy gamma astrophysics, *NIMPA*, **490** (2002), 71-89
7. de Naurois, M., et al.
Measurement of the Crab Flux above 60 GeV with the CELESTE Cerenkov Telescope, *ApJ*, **566** (2002), 343-357
8. Smith, D. A., et al.
Mrk 421, Mrk 501, and 1ES 1426+428 at 100 GeV with the CELESTE Cherenkov telescope, *A&A*, **459** (2006), 453-464
9. Lavallo, J., et al.
Indirect search for dark matter in M 31 with the CELESTE experiment, *A&A*, **450** (2006), 1-8

GLAST/*Fermi*

1. Lott, B., et al.
Response of the GLAST LAT calorimeter to relativistic heavy ions, *NIMPA*, **560** (2006), 395-404
2. Smith, D. A., et al.
Pulsar timing for the Fermi gamma-ray space telescope, *A&A*, **492** (2008), 923-931
3. Abdo, A. A., et al.
The Fermi Gamma-Ray Space Telescope Discovers the Pulsar in the Young Galactic Supernova Remnant CTA 1, *Sci*, **322** (2008), 1218
4. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C, *Sci*, **323** (2009), 1688
5. Abdo, A. A., et al.
Discovery of Pulsed γ -Rays from the Young Radio Pulsar PSR J1028-5819 with the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **695** (2009), L72-L77
6. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of the Vela Pulsar, *ApJ*, **696** (2009), 1084-1093
7. Aharonian, F., et al.
Simultaneous Observations of PKS 2155-304 with HESS, Fermi, RXTE, and Atom : Spectral Energy Distributions and Variability in a Low State, *ApJ*, **696** (2009), L150-L155

8. Abdo, A. A., et al.
Fermi/Large Area Telescope Discovery of Gamma-Ray Emission from the Flat-Spectrum Radio Quasar PKS 1454-354, *ApJ*, **697** (2009), 934-941
9. Abdo, A. A., et al.
Measurement of the Cosmic Ray e^+e^- Spectrum from 20GeV to 1TeV with the Fermi Large Area Telescope, *PhRvL*, **102** (2009), 181101
10. Atwood, W. B., et al.
The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission, *ApJ*, **697** (2009), 1071-1102
11. Abdo, A. A., et al.
Fermi Discovery of Gamma-ray Emission from NGC 1275, *ApJ*, **699** (2009), 31-39
12. Abdo, A. A., et al.
Early Fermi Gamma-ray Space Telescope Observations of the Quasar 3C 454.3, *ApJ*, **699** (2009), 817-823
13. Abdo, A. A., et al.
Fermi/Large Area Telescope Discovery of Gamma-Ray Emission from a Relativistic Jet in the Narrow-Line Quasar PMN J0948+0022, *ApJ*, **699** (2009), 976-984
14. Abdo, A. A., et al.
Pulsed Gamma Rays from the Millisecond Pulsar J0030+0451 with the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **699** (2009), 1171-1177
15. Abdo, A. A., et al.
Discovery of Pulsations from the Pulsar J0205+6449 in SNR 3C 58 with the Fermi Gamma-Ray Space Telescope, *ApJ*, **699** (2009), L102-L107
16. Abdo, A. A., et al.
Bright Active Galactic Nuclei Source List from the First Three Months of the Fermi Large Area Telescope All-Sky Survey, *ApJ*, **700** (2009), 597-622
17. Abdo, A. A., et al.
Fermi/Large Area Telescope Bright Gamma-Ray Source List, *ApJS*, **183** (2009), 46-66
18. Abdo, A. A., et al.
Pulsed Gamma-rays from PSR J2021+3651 with the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **700** (2009), 1059-1066
19. Abdo, A. A., et al.
Fermi LAT Observations of LS I +61°303 : First Detection of an Orbital Modulation in GeV Gamma Rays, *ApJ*, **701** (2009), L123-L128
20. Abdo, A. A., et al.
Detection of 16 Gamma-Ray Pulsars Through Blind Frequency Searches Using the Fermi LAT, *Sci*, **325** (2009), 840
21. Abdo, A. A., et al.
Detection of High-Energy Gamma-Ray Emission from the Globular Cluster 47 Tucanae with Fermi, *Sci*, **325** (2009), 845

22. Abdo, A. A., et al.
A Population of Gamma-Ray Millisecond Pulsars Seen with the Fermi Large Area Telescope, *Sci*, **325** (2009), 848
23. Abdo, A. A., et al.
The on-orbit calibration of the Fermi Large Area Telescope, *APh*, **32** (2009), 193-219
24. Abdo, A. A., et al.
Fermi LAT Observation of Diffuse Gamma Rays Produced Through Interactions Between Local Interstellar Matter and High-energy Cosmic Rays, *ApJ*, **703** (2009), 1249-1256
25. Abdo, A. A., et al.
Fermi LAT Discovery of Extended Gamma-Ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W51C, *ApJ*, **706** (2009), L1-L6
26. Abdo, A. A., et al.
Fermi/LAT observations of LS 5039, *ApJ*, **706** (2009), L56-L61
27. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of GRB 090902B : A Distinct Spectral Component in the Prompt and Delayed Emission, *ApJ*, **706** (2009), L138-L144
28. Abdo, A. A., et al.
A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects, *Natur*, **462** (2009), 331-334
29. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Detection of Pulsed γ -rays from the Vela-like Pulsars PSR J1048-5832 and PSR J2229+6114, *ApJ*, **706** (2009), 1331-1340
30. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Gamma-Ray Detection of the Radio Galaxy M87, *ApJ*, **707** (2009), 55-60
31. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of High-energy Gamma-ray Emission from GRB 080825C, *ApJ*, **707** (2009), 580-592
32. Abdo, A. A., et al.
Multiwavelength Monitoring of the Enigmatic Narrow-Line Seyfert 1 PMN J0948+0022 in 2009 March-July, *ApJ*, **707** (2009), 727-737
33. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of TeV-Selected Active Galactic Nuclei, *ApJ*, **707** (2009), 1310-1333
34. Abdo, A. A., et al.
Radio-Loud Narrow-Line Seyfert 1 as a New Class of Gamma-Ray Active Galactic Nuclei, *ApJ*, **707** (2009), L142-L147
35. Abdo, A. A., et al.
Fermi large area telescope observations of the cosmic-ray induced γ -ray emission of the Earth's atmosphere, *PhRvD*, **80** (2009), 122004

36. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Measurements of the Diffuse Gamma-Ray Emission at Intermediate Galactic Latitudes, *PhRvL*, **103** (2009), 251101
37. Fermi LAT Collaboration, et al.
Modulated High-Energy Gamma-Ray Emission from the Microquasar Cygnus X-3, *Sci*, **326** (2009), 1512
38. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of the Crab Pulsar And Nebula, *ApJ*, **708** (2010), 1254-1267
39. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of the Very Hard Gamma-ray Blazar PG 1553+113, *ApJ*, **708** (2010), 1310-1320
40. Weltevrede, P., et al.
Gamma-ray and Radio Properties of Six Pulsars Detected by the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **708** (2010), 1426-1441
41. Acciari, V. A., et al.
Discovery of Very High Energy Gamma Rays from PKS 1424+240 and Multiwavelength Constraints on Its Redshift, *ApJ*, **708** (2010), L100-L106
42. De Pasquale, M., et al.
Swift and Fermi Observations of the Early Afterglow of the Short Gamma-Ray Burst 090510, *ApJ*, **709** (2010), L146-L151
43. Abdo, A. A., et al.
Detection of Gamma-Ray Emission from the Starburst Galaxies M82 and NGC 253 with the Large Area Telescope on Fermi, *ApJ*, **709** (2010), L152-L157
44. Abdo, A. A., et al.
Fermi Observations of Cassiopeia and Cepheus : Diffuse Gamma-ray Emission in the Outer Galaxy, *ApJ*, **710** (2010), 133-149
45. Abdo, A. A., et al.
PKS 1502+106 : A New and Distant Gamma-ray Blazar in Outburst Discovered by the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **710** (2010), 810-827
46. Abdo, A. A., et al.
Spectral Properties of Bright Fermi-Detected Blazars in the Gamma-Ray Band, *ApJ*, **710** (2010), 1271-1285
47. Abdo, A. A., et al.
Fermi-Lat Discovery of GeV Gamma-Ray Emission from the Young Supernova Remnant Cassiopeia A, *ApJ*, **710** (2010), L92-L97
48. Fermi-Lat Collaboration, et al.
A change in the optical polarization associated with a γ -ray flare in the blazar 3C279, *Natur*, **463** (2010), 919-923

49. Abdo, A. A., et al.
Gamma-Ray Emission from the Shell of Supernova Remnant W44 Revealed by the Fermi LAT, *Sci*, **327** (2010), 1103
50. Abdo, A. A., et al.
Observations of the Large Magellanic Cloud with Fermi, *A&A*, **512** (2010), A7
51. Abdo, A. A., et al.
PSR J1907+0602 : A Radio-Faint Gamma-Ray Pulsar Powering a Bright TeV Pulsar Wind Nebula, *ApJ*, **711** (2010), 64-74
52. Abdo, A. A., et al.
Observations of Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies with the Fermi-Large Area Telescope Detector and Constraints on Dark Matter Models, *ApJ*, **712** (2010), 147-158
53. Abdo, A. A., et al.
Observation of Supernova Remnant IC 443 with the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **712** (2010), 459-468
54. Abdo, A. A., et al.
Fermi Detection of Delayed GeV Emission from the Short Gamma-Ray Burst 081024B, *ApJ*, **712** (2010), 558-564
55. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Search for Photon Lines from 30 to 200 GeV and Dark Matter Implications, *PhRvL*, **104** (2010), 091302
56. Abdo, A. A., et al.
Spectrum of the Isotropic Diffuse Gamma-Ray Emission Derived from First-Year Fermi Large Area Telescope Data, *PhRvL*, **104** (2010), 101101
57. Abdo, A. A., et al.
Discovery of Pulsed γ -Rays from PSR J0034-0534 with the Fermi Large Area Telescope : A Case for Co-Located Radio and γ -Ray Emission Regions, *ApJ*, **712** (2010), 957-963
58. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of PSR J1836+5925, *ApJ*, **712** (2010), 1209-1218
59. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of the Vela-X Pulsar Wind Nebula, *ApJ*, **713** (2010), 146-153
60. Abdo, A. A., et al.
The Vela Pulsar : Results from the First Year of Fermi LAT Observations, *ApJ*, **713** (2010), 154-165
61. Abdo, A. A., et al.
The First Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars, *ApJS*, **187** (2010), 460-494
62. Abdo, A. A., et al.
Detection of the Energetic Pulsar PSR B1509-58 and its Pulsar Wind Nebula in MSH 15-52 Using the Fermi-Large Area Telescope, *ApJ*, **714** (2010), 927-936

63. Abdo, A. A., et al.
Fermi-Large Area Telescope Observations of the Exceptional Gamma-ray Outbursts of 3C 273 in 2009 September, *ApJ*, **714** (2010), L73-L78
64. Abdo, A. A., et al.
The First Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope, *ApJ*, **715** (2010), 429-457
65. Acciari, V. A., et al.
The Discovery of γ -Ray Emission from the Blazar RGB J0710+591, *ApJ*, **715** (2010), L49-L55
66. Ackermann, M., et al.
Constraints on dark matter annihilation in clusters of galaxies with the Fermi large area telescope, *JCAP*, **5** (2010), 25
67. Fermi-LAT Collaboration, et al.
Fermi Gamma-Ray Imaging of a Radio Galaxy, *Sci*, **328** (2010), 725
68. Abdo, A. A., et al.
The Spectral Energy Distribution of Fermi Bright Blazars, *ApJ*, **716** (2010), 30-70
69. Abdo, A. A., et al.
Suzaku Observations of Luminous Quasars : Revealing the Nature of High-energy Blazar Emission in Low-level Activity States, *ApJ*, **716** (2010), 835-849
70. Ackermann, M., et al.
Fermi Observations of GRB 090510 : A Short-Hard Gamma-ray Burst with an Additional, Hard Power-law Component from 10 keV TO GeV Energies, *ApJ*, **716** (2010), 1178-1190
71. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope First Source Catalog, *ApJS*, **188** (2010), 405-436
72. Ackermann, M., et al.
GeV Gamma-ray Flux Upper Limits from Clusters of Galaxies, *ApJ*, **717** (2010), L71-L78
73. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of the Supernova Remnant W28 (G6.4-0.1), *ApJ*, **718** (2010), 348-356
74. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope View of the Core of the Radio Galaxy Centaurus A, *ApJ*, **719** (2010), 1433-1444
75. Abdo, A. A., et al.
Gamma-Ray Emission Concurrent with the Nova in the Symbiotic Binary V407 Cygni, *Sci*, **329** (2010), 817-821
76. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observations of Gamma-ray Pulsars PSR J1057-5226, J1709-4429, and J1952+3252, *ApJ*, **720** (2010), 26-40
77. Abdo, A. A., et al.
Fermi-LAT Observations of the Geminga Pulsar, *ApJ*, **720** (2010), 272-283

78. Abdo, A. A., et al.
The Fermi-LAT High-Latitude Survey : Source Count Distributions and the Origin of the Extragalactic Diffuse Background, *ApJ*, **720** (2010), 435-453
79. Ackermann, M., et al.
Fermi Gamma-ray Space Telescope Observations of Gamma-ray Outbursts from 3C 454.3 in 2009 December and 2010 April, *ApJ*, **721** (2010), 1383-1396
80. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope and Multi-wavelength Observations of the Flaring Activity of PKS 1510-089 between 2008 September and 2009 June, *ApJ*, **721** (2010), 1425-1447
81. Abdo, A. A., et al.
Gamma-ray Light Curves and Variability of Bright Fermi-detected Blazars, *ApJ*, **722** (2010), 520-542
82. Abdo, A. A., et al.
Fermi-LAT Study of Gamma-ray Emission in the Direction of Supernova Remnant W49B, *ApJ*, **722** (2010), 1303-1311
83. Abdo, A. A., et al.
Fermi Large Area Telescope Observation of a Gamma-ray Source at the Position of Eta Carinae, *ApJ*, **723** (2010), 649-657

Proceeding de conférences

1. Châtelet, E., Dumora, D., & et al.
Photoproduction Cross Section and Selection of Muon Poor EAS in the UMC Experiment, *ICRC*, **4** (1993), 207
2. Danilova, T., Dumora, D., & et al.
Muon Production Depth in EAS and the "Time-Track Complementarity", *ICRC*, **4** (1993), 211
3. Danilova, T. V., Dumora, D., Erlykin, A. D., & Procureur, J.
"Time-track complementarity" in the study of EAS longitudinal development, *AIPC*, **276** (1993), 431-434
4. Batovsky, S. A., Dumora, D., Kirov, I. N., Nikolskaja, N. M., Procureur, J., & Stamenov, J. N.
Primary Composition Study Using a New Parameter for a Constant Efficiency Selection of EAS at Mountain Altitudes, *ICRC*, **3** (1995), 536
5. Dumora, D., & Procureur, J.
Selection of EAS with Constant Energy in the Tibet Experiment, *ICRC*, **3** (1995), 540
6. Smith, D. A., et al.
First Detection of Gamma Rays from the Crab Nebula with the CELESTE "Solar Farm" Cherenkov Detector, *NuPhS*, **80** (2000), 163-172
7. Gokhale, V. N., Bhattacharyya, S., Tickoo, A. K., Rannot, R. C., Procureur, J., Dumora, D., & Bhat, C. L.
Prospects from measuring polarization state of atmospheric Cerenkov events, *AIPC*, **558** (2001), 629-632

8. Dumora, D., Maneva, G. M., Procureur, J., Smith, D. A., & Temnikov, P. P.
Artificial neural networks for the shower reconstruction of gamma-showers in the energy range [20-300] GeV, *NuPhS*, **97** (2001), 255-258
9. Dumora, D.
Search for high energy gamma ray pulsar emission with the CELESTE Experiment, *ICRC*, **6** (2001), 2436
10. Thompson, D. J., et al.
Gamma-Ray Pulsar Candidates for GLAST, *AAS*, **38** (2006), 1106
11. Baldini, L., et al.
Preliminary results of the LAT Calibration Unit beam tests, *AIPC*, **921** (2007), 190-204
12. Guillemot, L., Lonjou, V., Dumora, D., Lemoine-Goumard, M., Parent, D., Reposeur, T., Smith, D. A., & Webb, N.
Preparing GLAST LAT studies of the millisecond pulsar PSR J0218+4232 and the blazar 3C 66A, *AIPC*, **921** (2007), 395-396
13. Parent, D., Dumora, D., Guillemot, L., Lemoine-Goumard, M., Reposeur, T., & Smith, D. A.
Search for PSR B 1951+32 with the GLAST LAT, *AIPC*, **921** (2007), 409-410
14. Reposeur, T., Dumora, D., Guillemot, L., Lemoine-Goumard, M., Parent, D., & Smith, D.
Early Pulsar Observations and GLAST LAT Performance, *AIPC*, **921** (2007), 425-426
15. Razzano, M., Dumora, D., & Gargano, F.
High-energy gamma-ray observations of Geminga with the Fermi Large Area Telescope, *arXiv*, (2009), arXiv :0912.5442