



Astronomie gamma entre 30 MeV et 300 GeV avec GLAST

Philippe Bruel
Laboratoire Leprince-Ringuet
CNRS/In2p3/Ecole polytechnique

Plan

- GLAST
 - Le détecteur
 - Les performances
- Les sujets d'étude
 - Le fond diffus galactique
 - Les restes de supernovae
 - Les pulsars
 - Les nébuleuses de pulsars
 - Les microquasars/binaires
 - Les noyaux actifs de galaxie
 - Les sursauts gamma
 - La matière noire

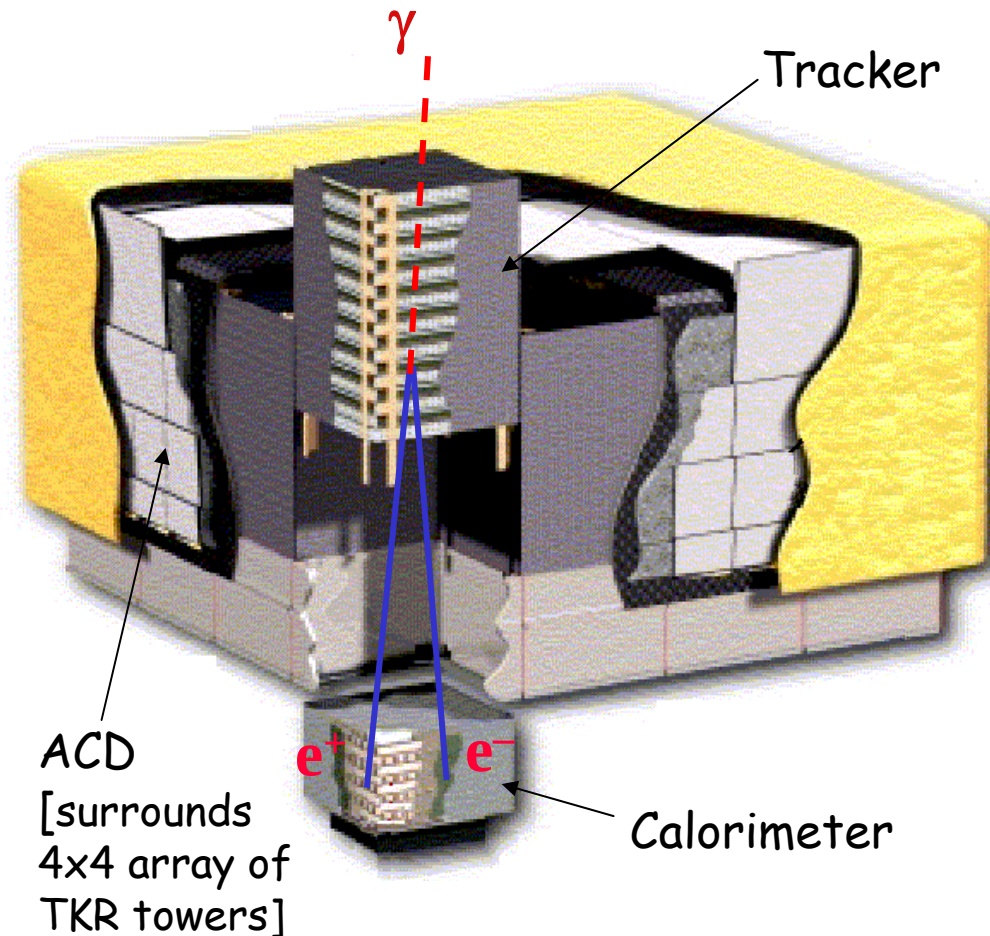
Gamma ray Large Area Space Telescope

- GLAST =
 - Glast Burst Monitor (GBM) : 10 keV à 30 MeV
 - Large Area Telescope (LAT) : 30 MeV à 300 GeV
 - Lancement : février 2008
 - Durée de la mission : 5 ans (-> 10 ans)
- LAT :
 - Collaboration US (NASA,DOE), Italie (INFN,ASI), France (CNRS/CEA), Japon, Suède
 - Successeur d'EGRET (1991-2000)



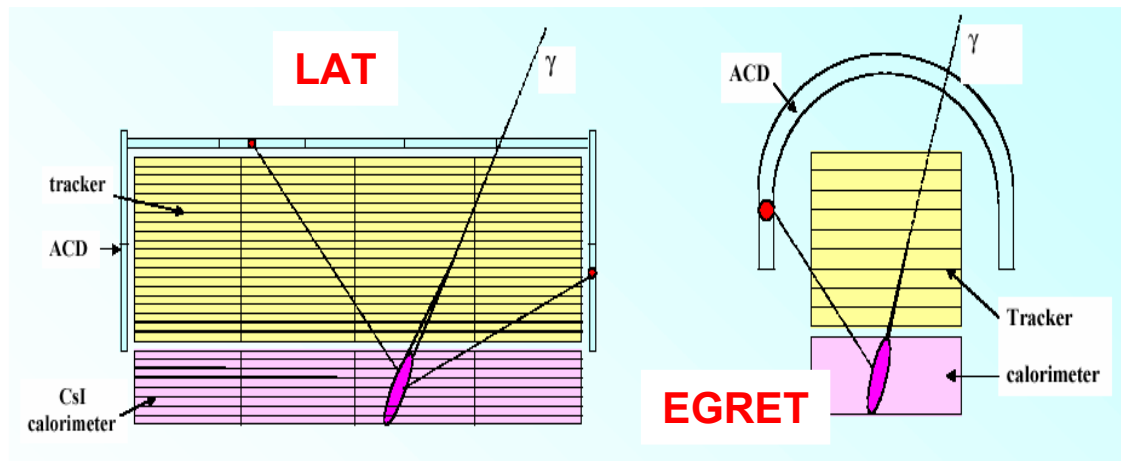
Large Area Telescope (LAT) Overview

- Segmented Anticoincidence Detector (ACD)
 - 89 plastic scintillator tiles.
 - Rejects background of charged cosmic rays; segmentation minimizes self-veto effects at high energy.
- Precision Si-strip Tracker (TKR)
 - 18 XY tracking planes. Single-sided silicon strip detectors ($228\ \mu\text{m}$ pitch), 880,000 channels.
 - Tungsten foil converters
 - 1.5 radiation lengths
 - Measures the photon direction; gamma ID.
- Hodoscopic CsI Calorimeter (CAL)
 - Array of 1536 CsI(Tl) crystals in 8 layers. 3072 spectroscopy chans.
 - 8.5 radiation lengths
 - Hodoscopic array supports bkg rejection and shower leakage correction
 - Measures the photon energy; images the shower.



Comparaison EGRET/LAT

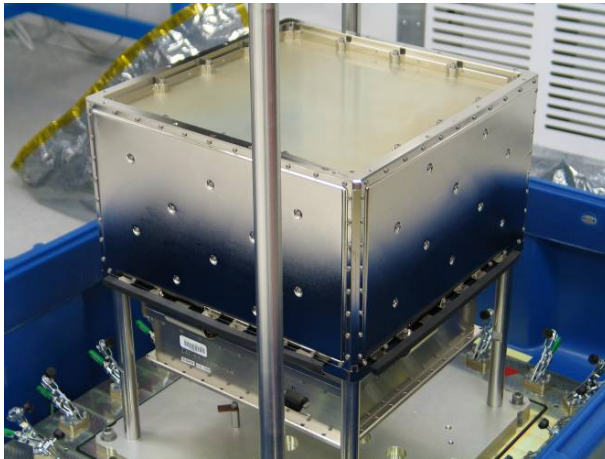
- Les leçons d'EGRET :
 - Petit champ de vue (0.5 sr)
 - Anticoïncidence monolithique : problème de véto à très haute énergie
 - Chambres à étincelles : consommable/efficacité décroissante/temps mort (~100ms)
 - Calorimètre monolithique : pas d'imagerie des gerbes
- LAT :
 - Grand champ de vue (2.4 sr)
 - Anticoïncidence segmenté
 - Calorimètre segmenté
 - Tracker haute efficacité, détecteurs de trace près des plans de conversion pour minimiser l'erreur due au scattering multiple
 - Pas de consommable
 - temps mort petit (25 μ s)



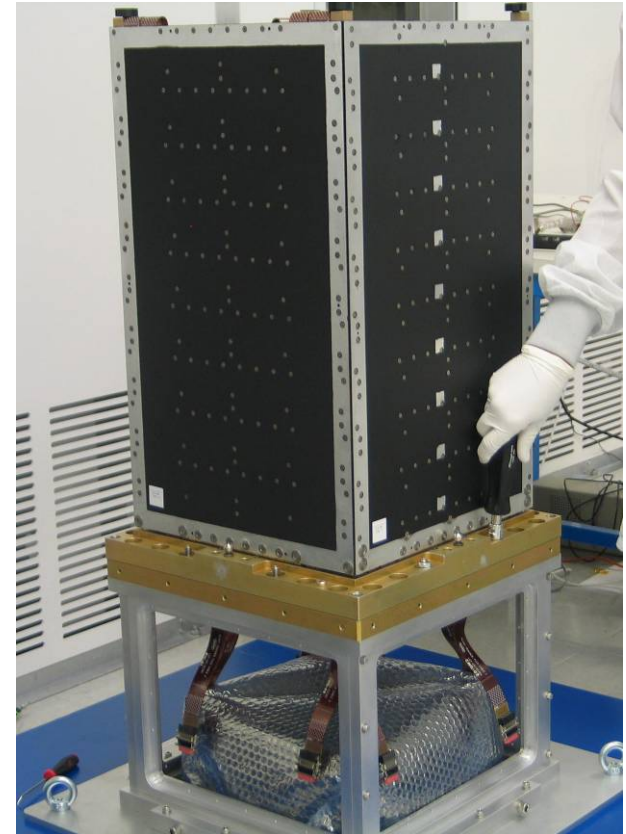
Les éléments du LAT



Anti-coincidence



**1 module du
calorimètre**



**1 module
du tracker**

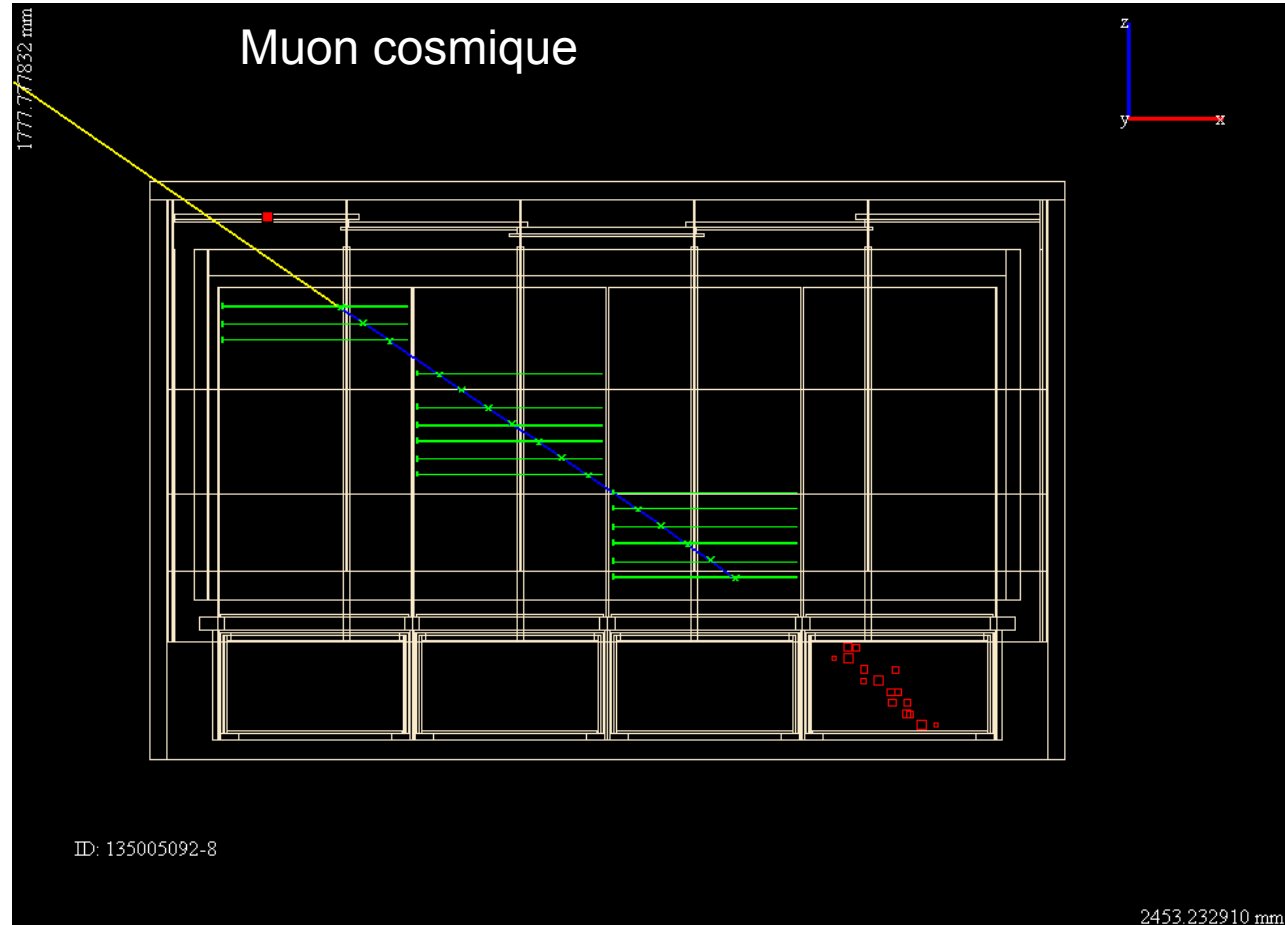
Intégration du LAT



10-15 septembre 2007

Ecole de physique des
astroparticules

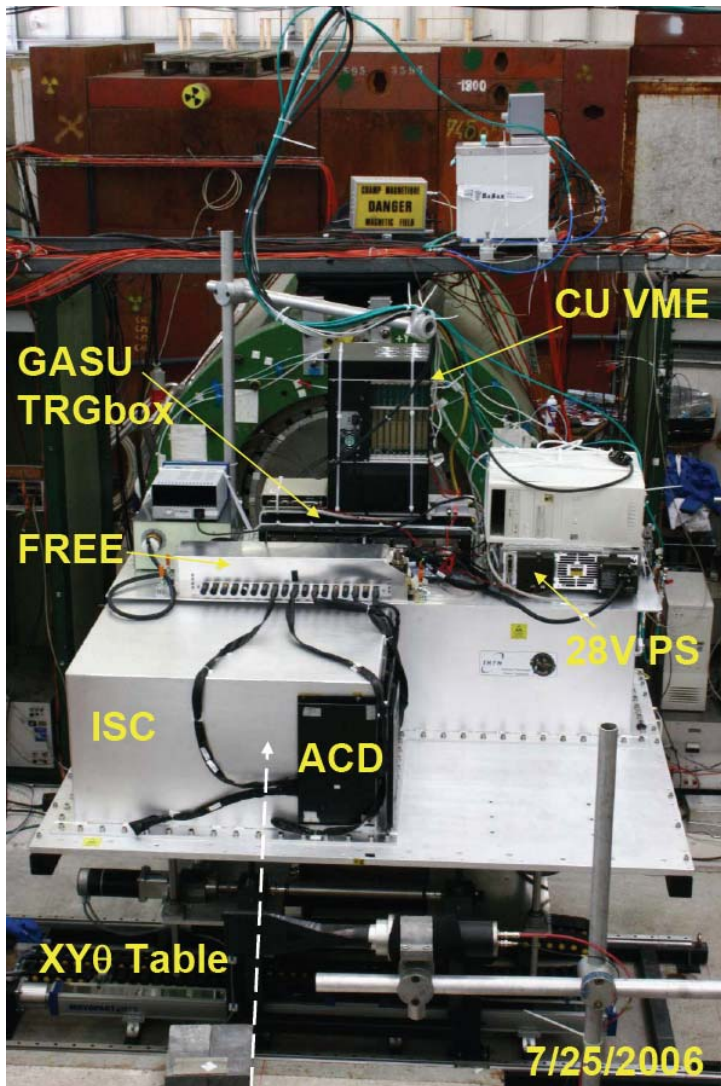
Prêt à partir !



Reconstruction/réjection du bruit de fond

- Reconstruction du rayon gamma
 - Direction :
 - Meilleure mesure dans la partie haute du tracker (plan de conversion mince)
 - Utilise la mesure en énergie pour estimer le scattering multiple
 - Energie :
 - Très grand espace de phase : en énergie, angle et position
 - $E < \sim 1 \text{ GeV}$: la fraction déposée dans le tracker est importante
 - $E > \sim 1 \text{ GeV}$: les pertes de fuite sont importantes
 - Pertes dans les cracks entre modules
- Réjection du bruit de fond :
 - Trigger (2.5 kHz)/Filtre en vol (400 Hz)/Analyse au sol : réduction d'un facteur 10^6 (bruit de fond $< 10\%$ du diffus extragalactique)
 - ACD : réjection des particules chargées qui rentrent dans le LAT
 - Tracker : ACD de secours + topologie
 - Calorimètre : topologie

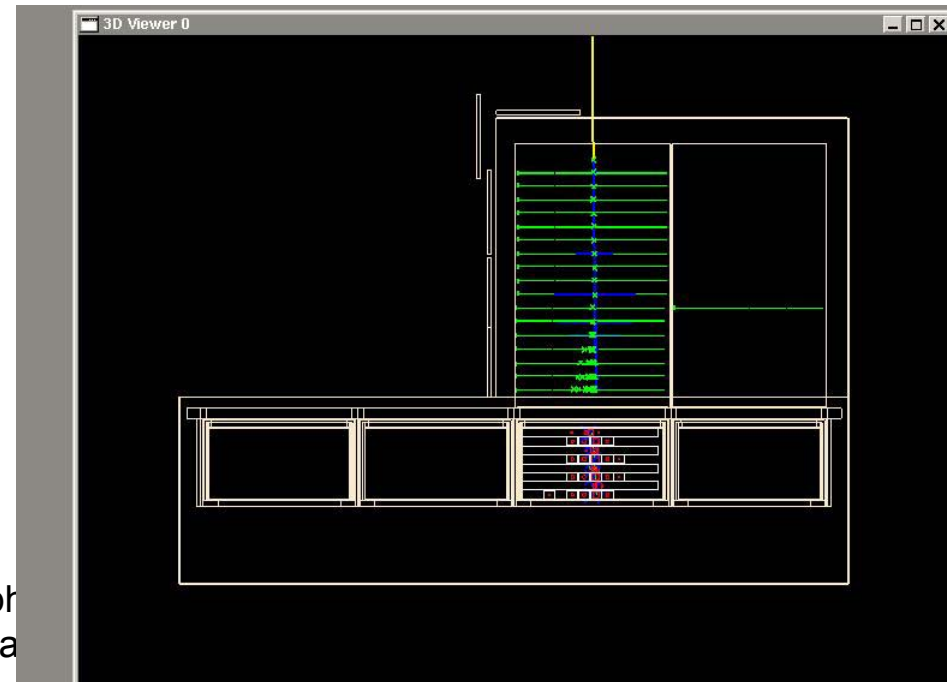
Testé en faisceau au CERN



10-15 septembre 2007

- 4 weeks at PS/T9 area (26/7-23/8)
 - Gammas @ 0-2.5 GeV
 - Electrons @ 1,5 GeV
 - Positrons @ 1 GeV (through MMS)
 - Protons @ 6,10 GeV (w/ & w/o MMS)
- 11 days at SPS/H4 area (4/9-15/9)
 - Electrons @ 10,20,50,100,200,280 GeV
 - Protons @ 20,100 GeV
 - Pions @ 20 GeV

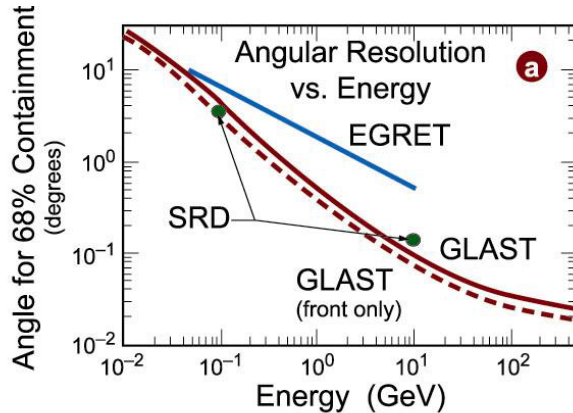
Ecole de ph
astropa



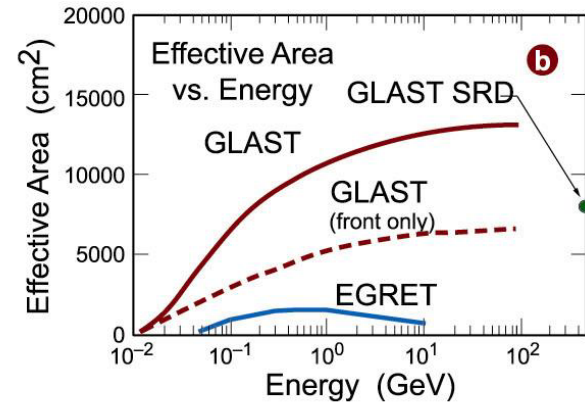
Performances

(page officielle : http://www-glast.slac.stanford.edu/software/IS/glast_lat_performance.htm)

Optimized Point Spread Function

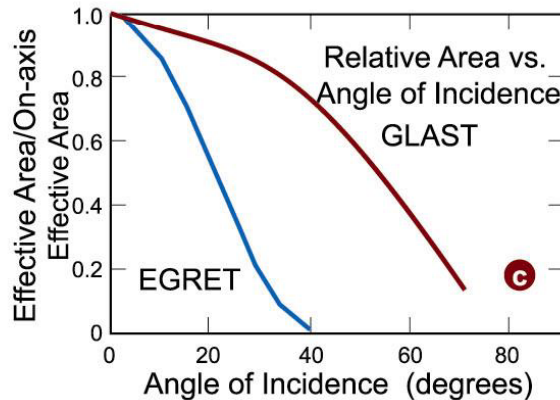


Large Effective Area

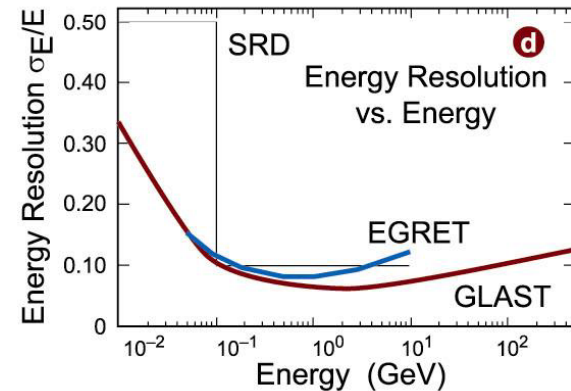


Wide Field of View

FOV: 2.4 Sr
SRD: 2.0 Sr



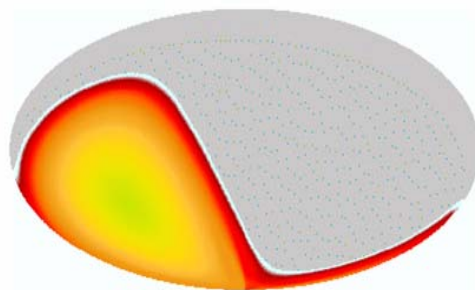
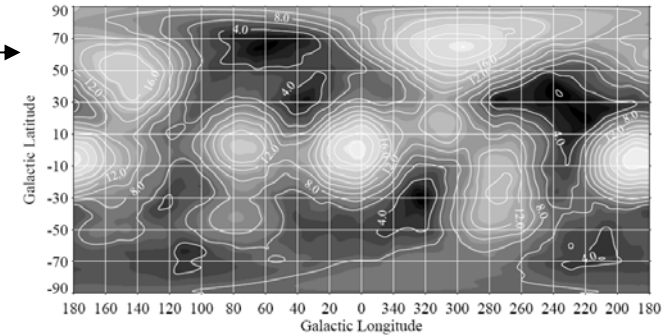
Good Energy Resolution



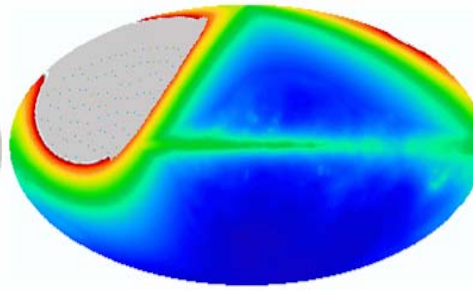
Point Source Sensitivity (high latitude)
Two Years: = 1.6×10^{-9} ph/cm²/s (> 100 MeV)

Mode d'observation

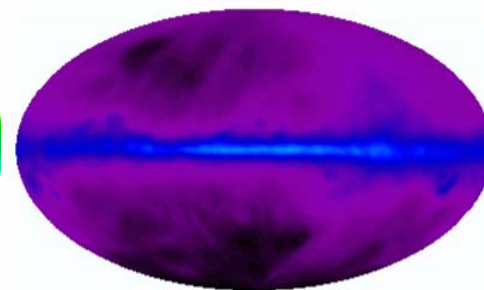
- EGRET : mode pointé uniquement
- GLAST : scanning mode
 - Possible grâce au grand champ de vue
 - Exposition plus uniforme
 - Ciel complet en deux orbites (3h)
 - Chaque région est vue pendant 30min



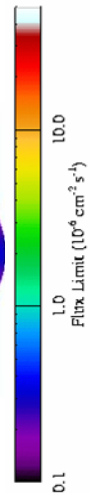
100 s



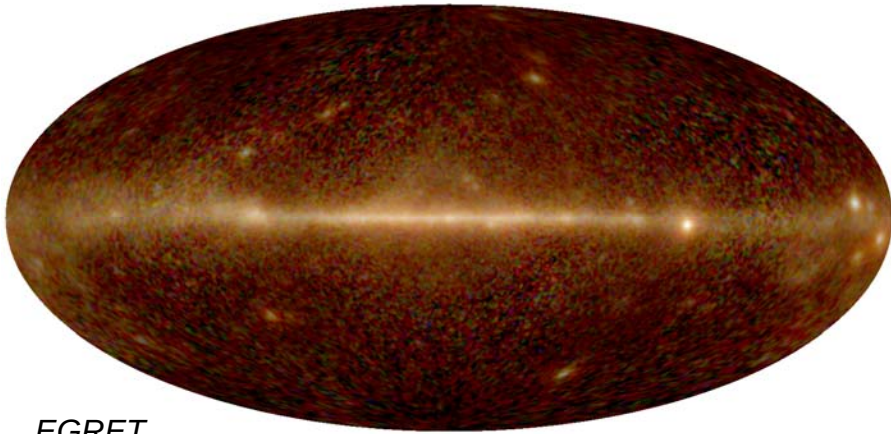
1 orbite (90 min)



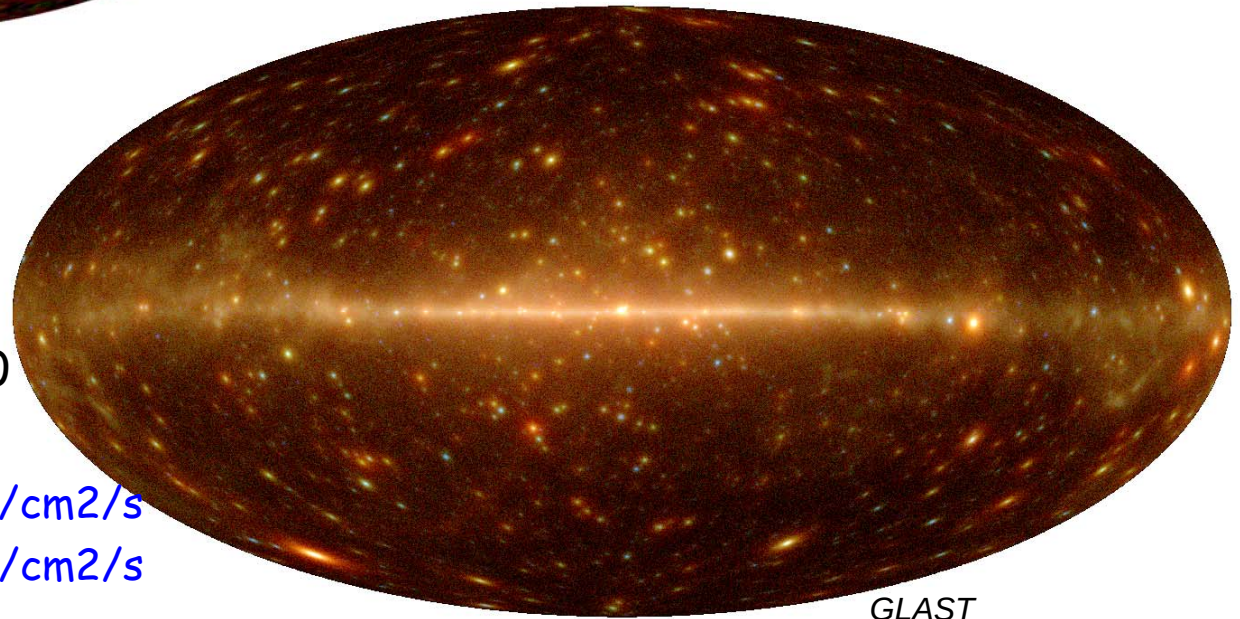
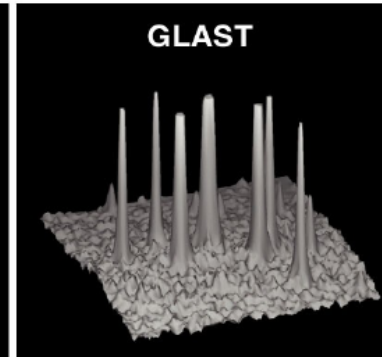
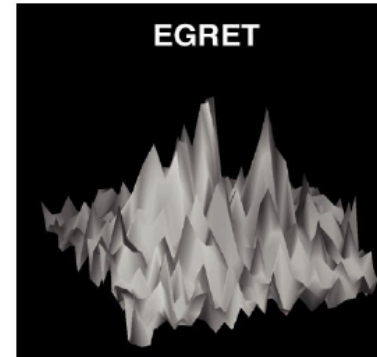
1 jour



Ciel gamma EGRET -> GLAST



EGRET
>100 MeV, mission entière

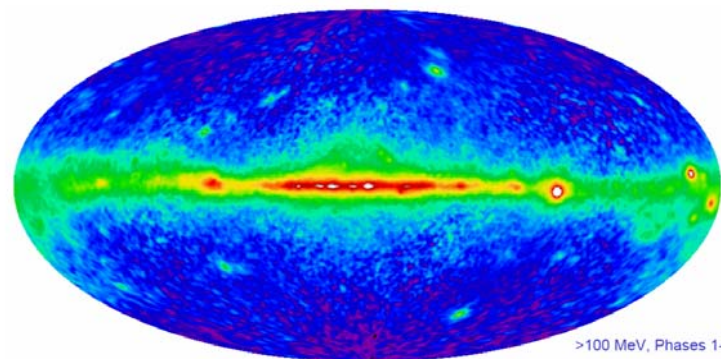


GLAST
>100 MeV, 1 an simulé

- x25 en sensibilité
- De 271 sources à ~9000
- En un an :
 - 5σ pour flux $> 4 \cdot 10^{-9}$ ph/cm²/s
 - 30" pour flux = 10^{-7} ph/cm²/s
(sensibilité d'EGRET)

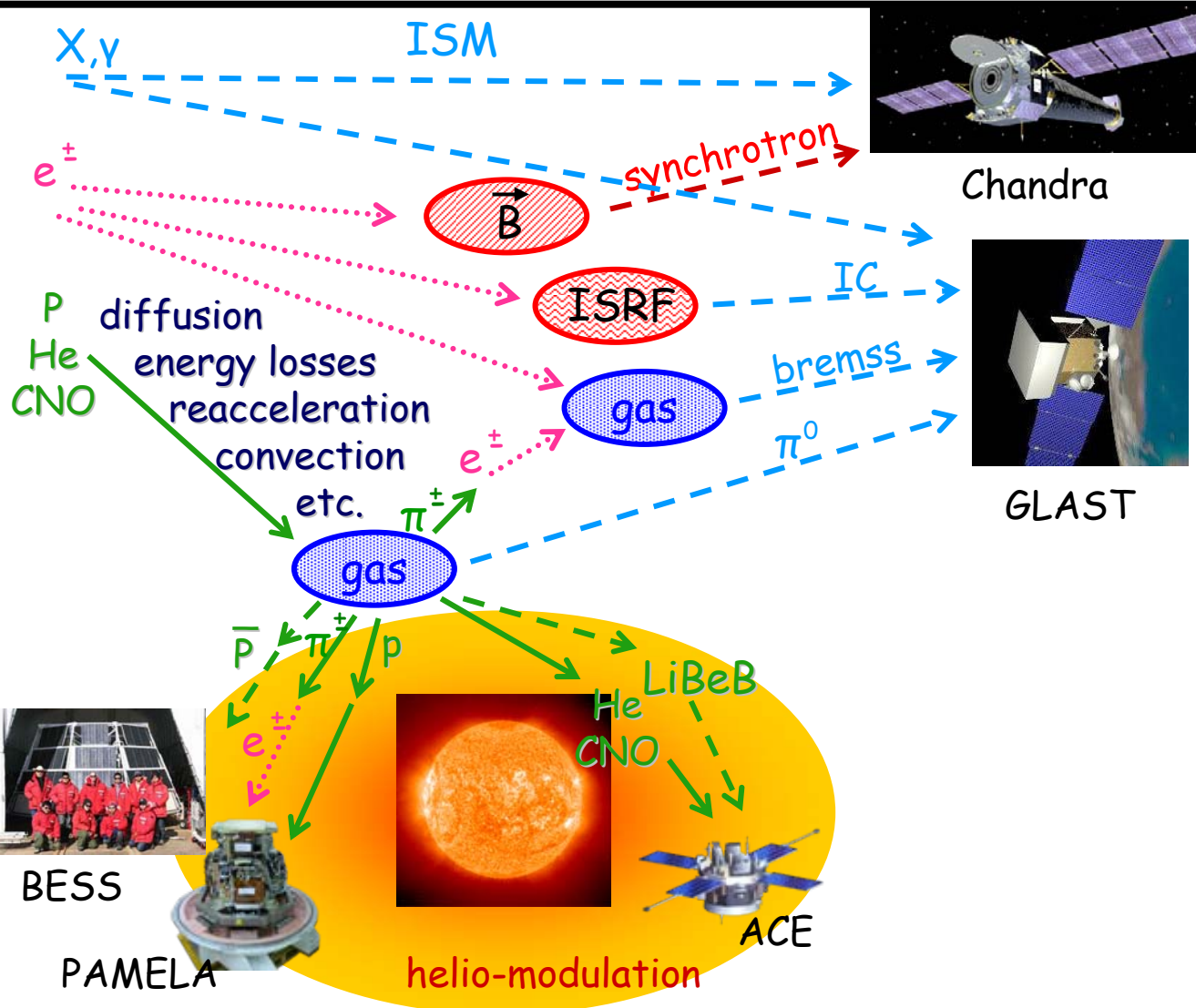
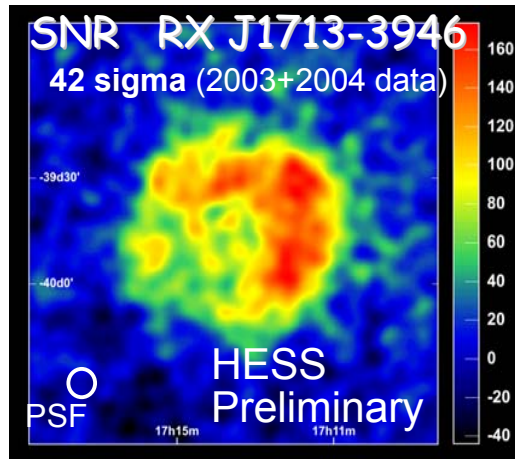
Le fond diffus galactique

- La "source" la plus brillante
- A la fois :
 - Un sujet d'étude
 - Un bruit de fond pour la recherche de sources



- C'est le résultat de l'interaction des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, BremsStrahlung, inverse Compton)
- Les ingrédients :
 - Distribution des sources
 - Spectres et intensités des rayons cosmiques à la source
 - Propagation des rayons cosmiques
 - Distribution du gaz interstellaire
 - Rayonnement interstellaire

Rayons cosmiques dans la galaxie

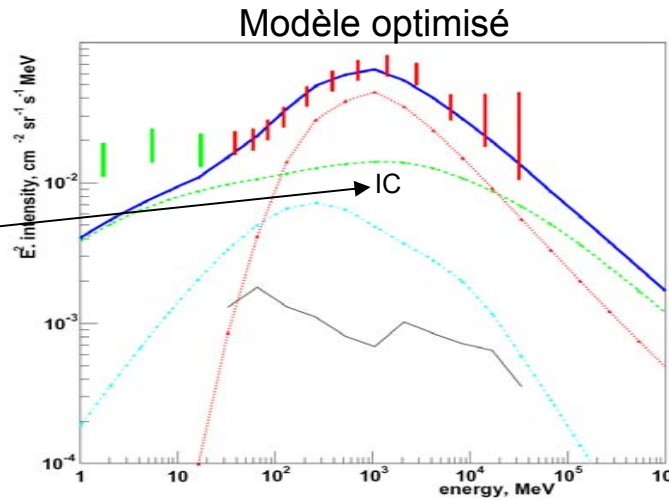
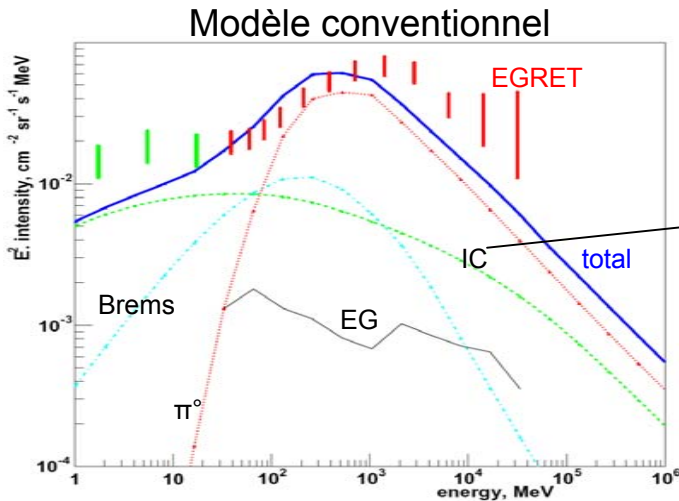
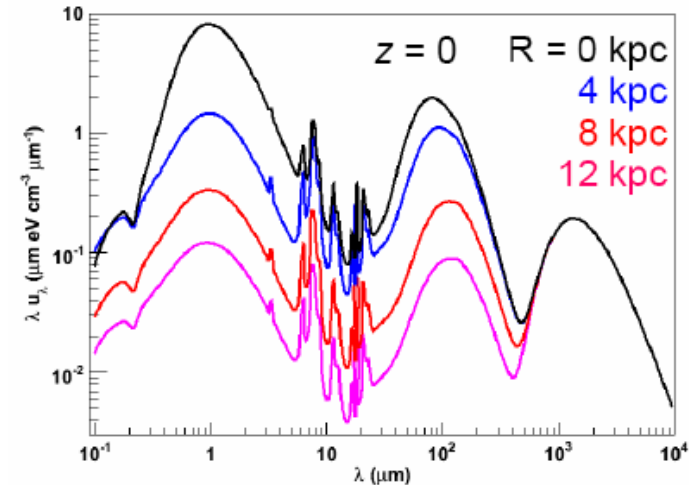


(illustration Moskalenko)

GALPROP

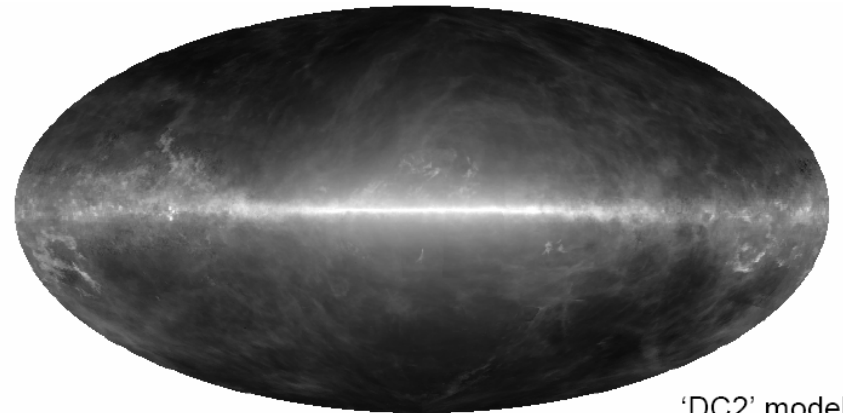
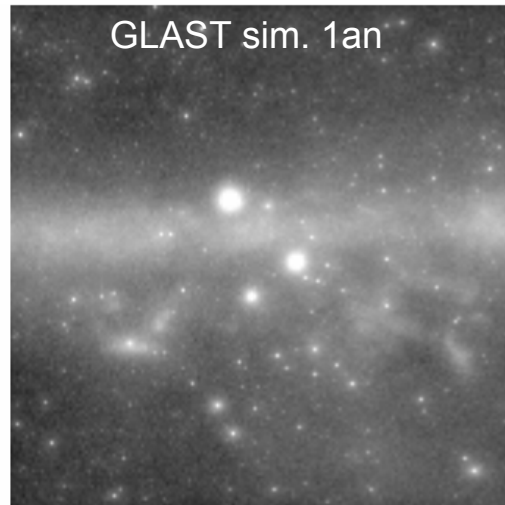
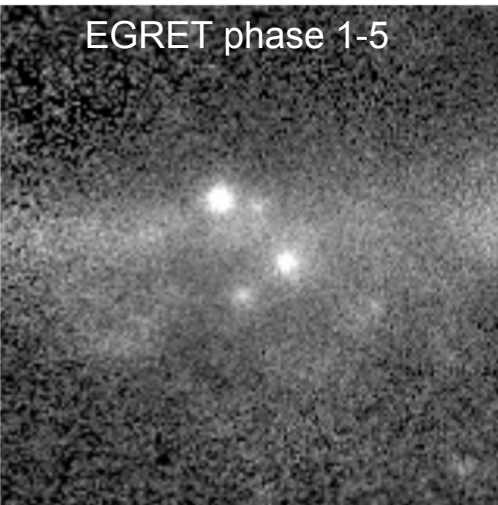
- Le code utilisé par GLAST, sans cesse amélioré :

- données H I et CO
- H_2 (facteur X_{CO})
- ISRF
- IC anisotropique



Digel, Moskalenko,
Porter, Reimer,
Strong

Le fond diffus avec GLAST

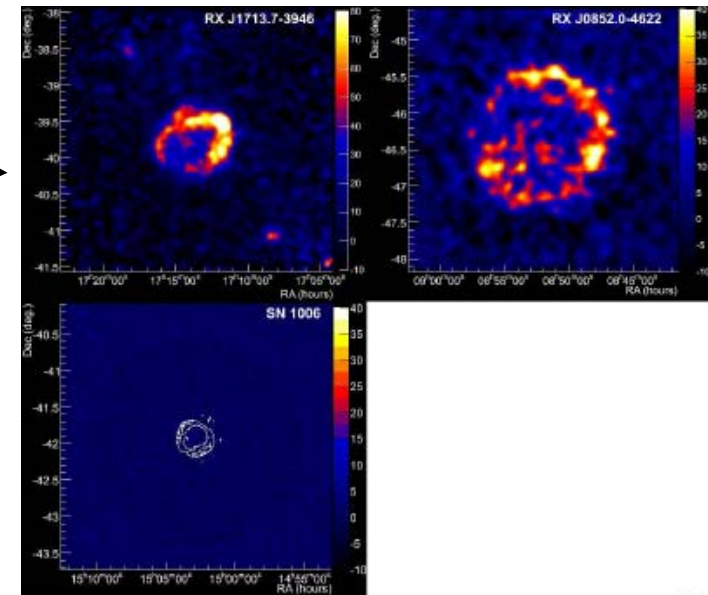
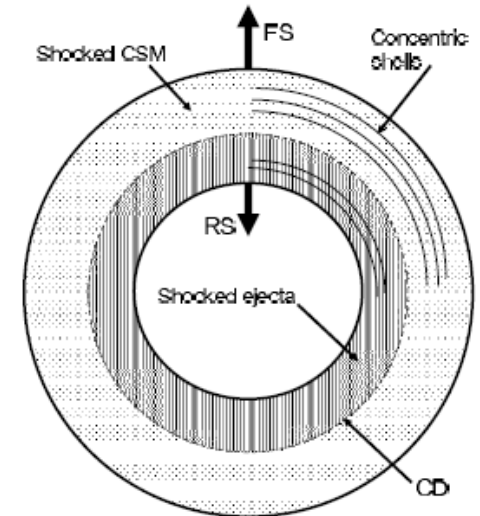


'DC2' model

- GLAST devrait apporter des éléments de réponse à :
 - *GeV excess* (problème de calibration d'EGRET ??)
 - Nuages moléculaires
 - 'dark' gas (Grenier et al)
 - Centre galactique
 - Contribution due aux sources ponctuelles
 - Conséquences sur le fond diffus extragalactique gamma

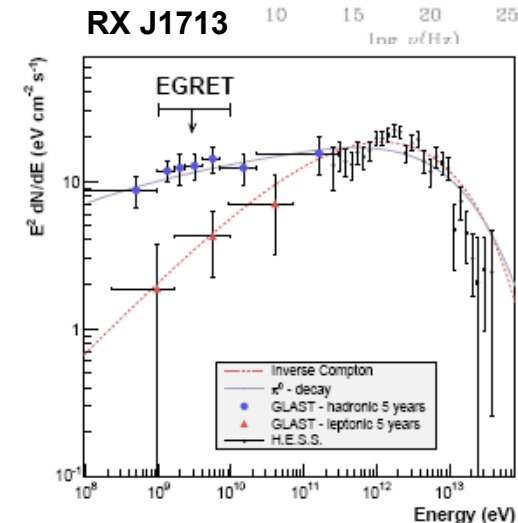
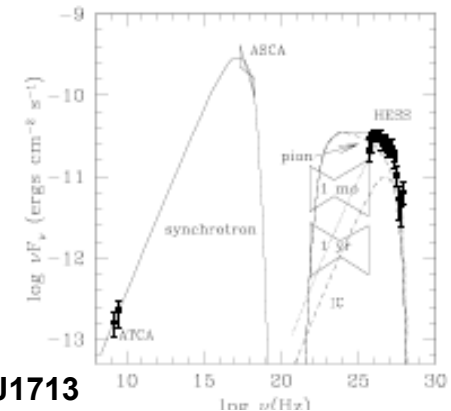
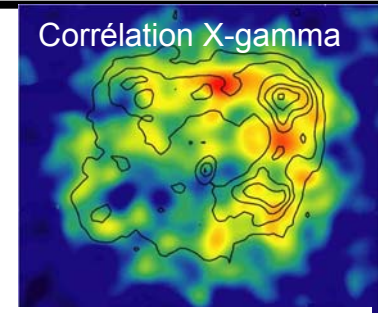
Les restes de supernovae

- Choc créé par la rencontre des restes de la supernova en expansion avec le milieu environnant : accélération de particules
- Des preuves expérimentales :
 - Émission X non thermique : synchrotron dû à des électrons au TeV
 - Émission gamma au dessus de 100 GeV (HESS)
- EGRET n'a pas détecté de SNR :
 - Flux pas assez forts
 - Résolution angulaire pas assez bonne



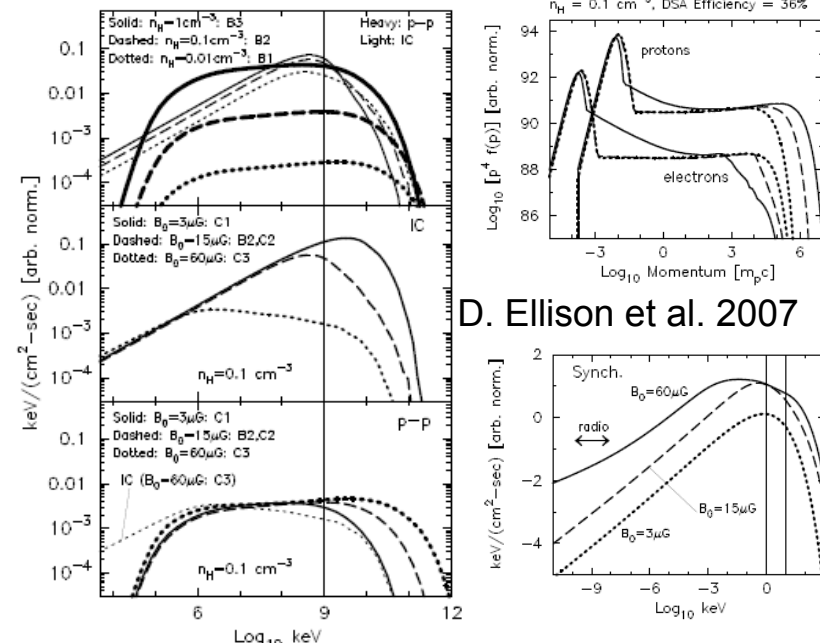
Origine de l'émission gamma

- Deux possibilités :
 - Origine hadronique : collisions des protons de haute énergie $\rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 - Origine leptonique : électrons de haute énergie
 - Synchrotron
 - Compton inverse sur des photons ambiants
- En mesurant entre 30 MeV et 300 GeV, GLAST devrait pouvoir différencier les deux scénarios :
 - Dans le cas leptonique, le spectra gamma en dessous de 100 GeV doit être dur (à cause du spectre synchrotron)

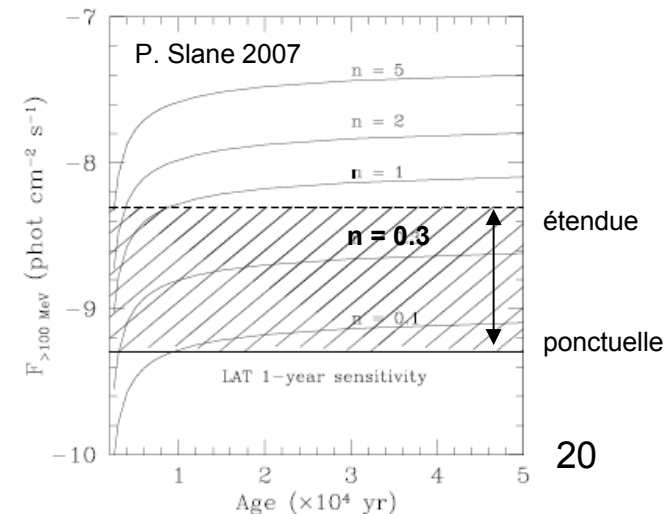
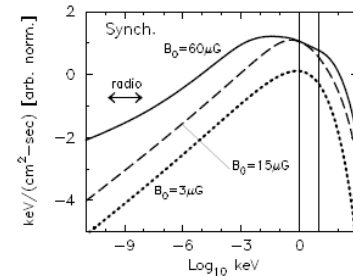


Origine de l'émission gamma

- Densité ambiante ↗
 - Signal $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ plus important
 - Mais signal thermique X plus important (apparition de raies d'émission)
- Champ magnétique ↗
 - Le spectre Compton inverse en dessous de 100 GeV peut ressembler au spectre d'origine hadronique
 - Mais signal synchrotron plus important



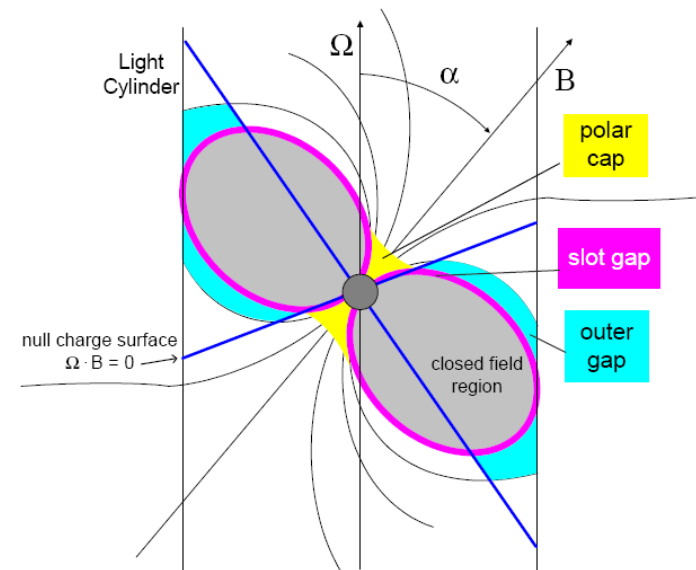
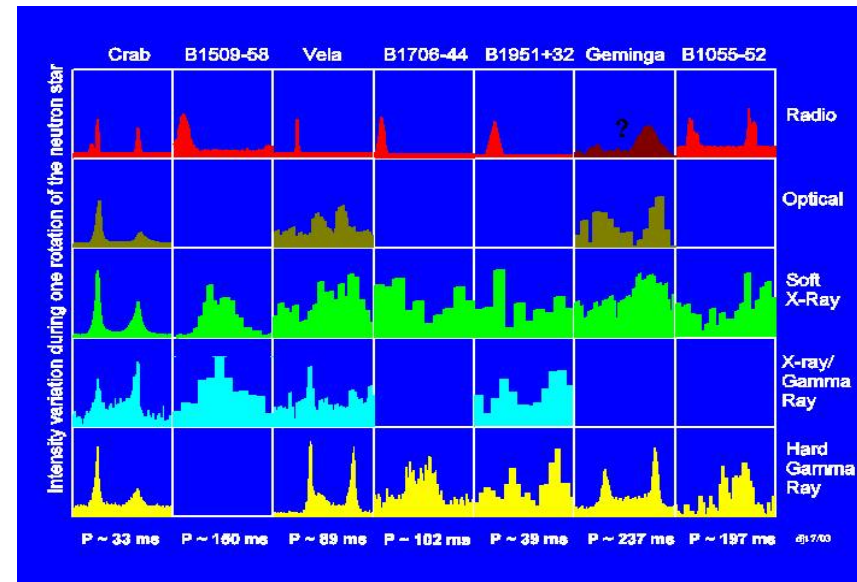
D. Ellison et al. 2007



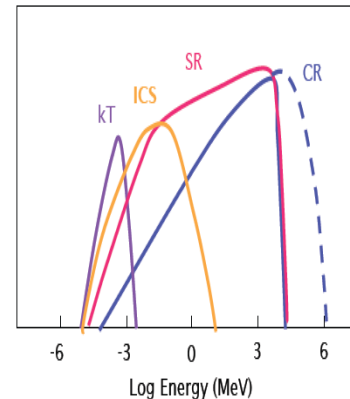
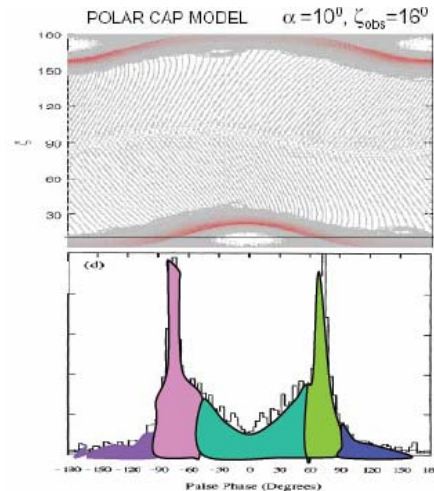
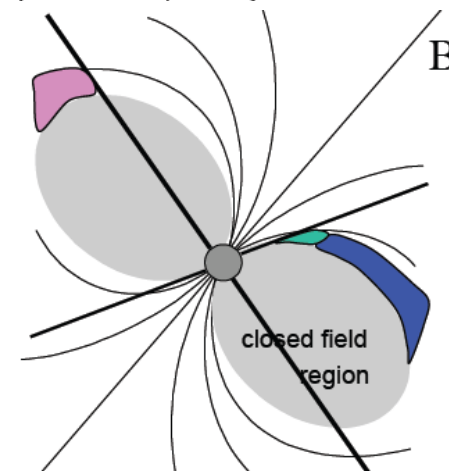
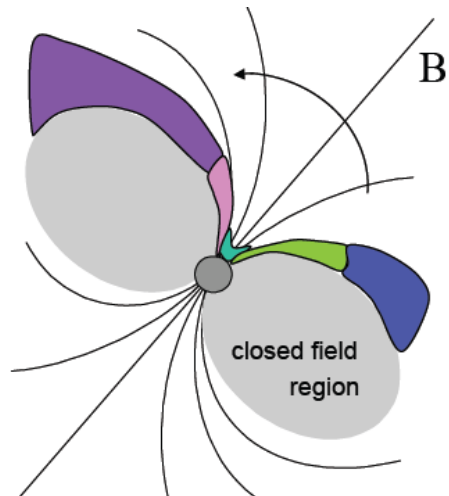
- GLAST a de très bons atouts : domaine d'énergie, résolution angulaire, sensibilité
- Mais les SNRs 'hadroniques' dans des régions de densité typique ($n = 0.3 \text{ cm}^{-3}$) risquent d'être difficiles à détecter

Les pulsars

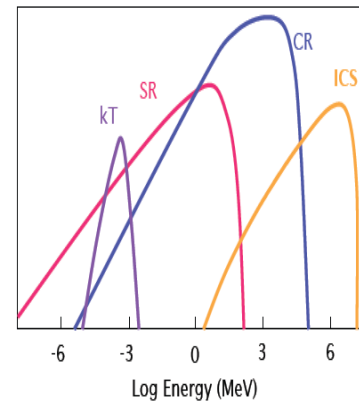
- EGRET a vu 7 pulsars (+3)
- Profil typique à deux pics
- 3 types de modèles en fonction de la zone d'accélération :
 - Polar cap
 - Slot gap
 - Outer gap
- Différents processus en jeu :
 - Rayonnement de courbure
 - Rayonnement synchrotron
 - Compton inverse
 - Création de paire (γ -B , γ - γ)



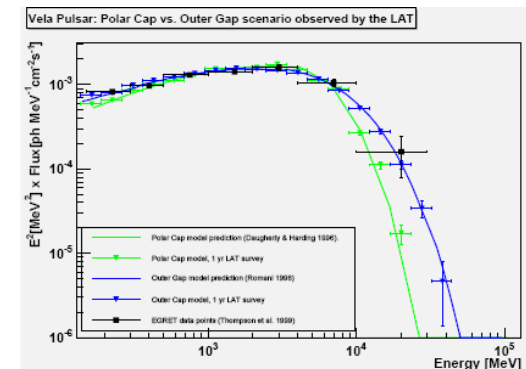
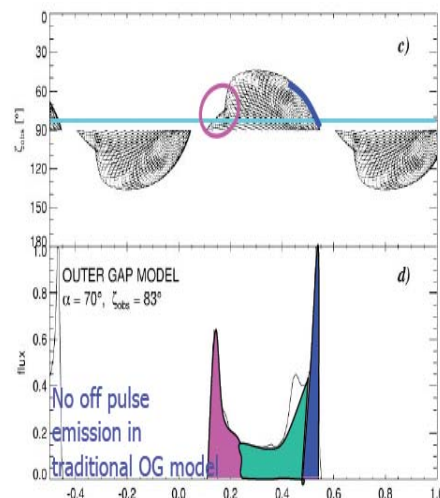
Profils et spectres des pulsars



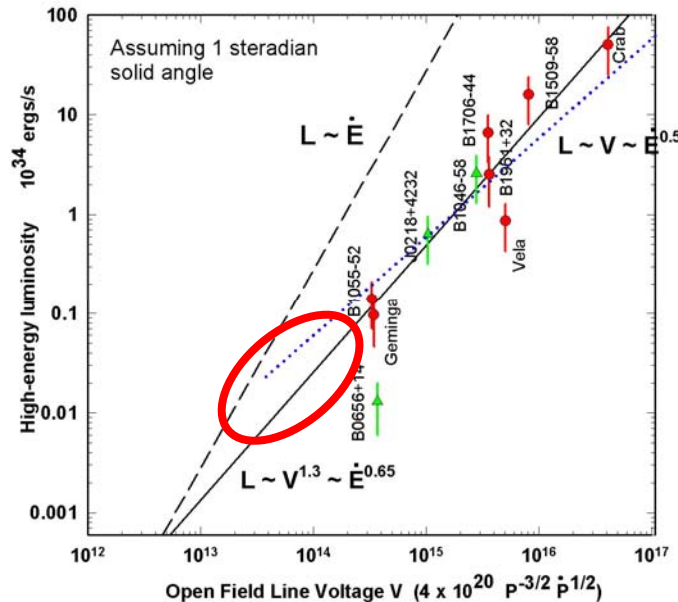
A. Harding



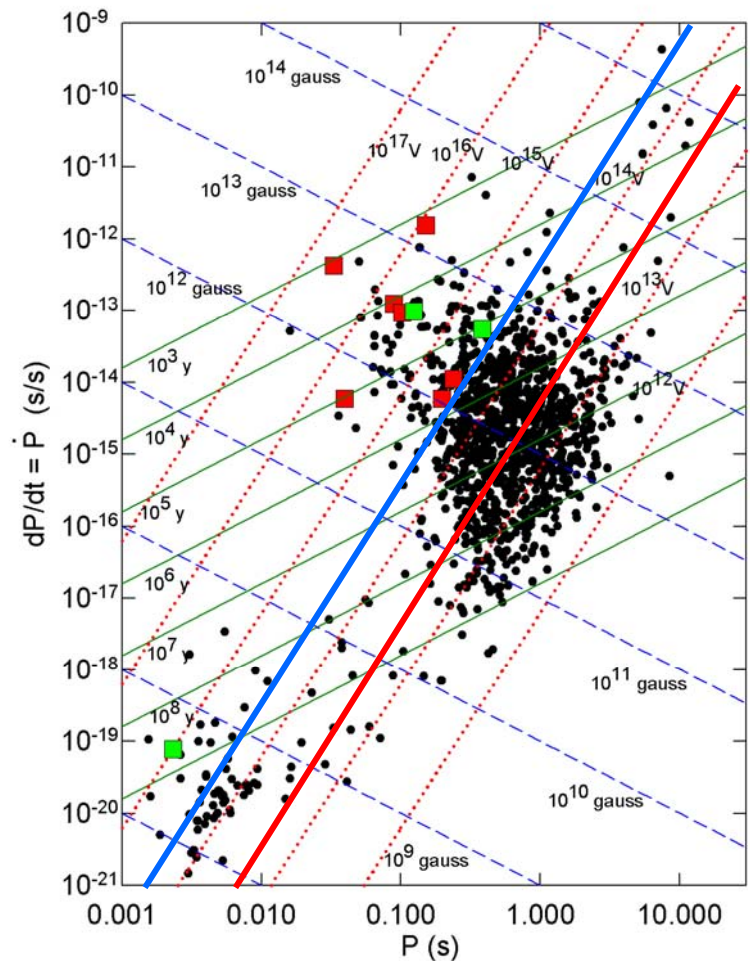
GLAST obtiendra des profils et des spectres (moyennés et résolus en phase) plus précis
 -> meilleure connaissance des zones d'accélération et des mécanismes d'émission gamma



Plus de pulsars avec GLAST



EGRET :
 $V > 4 \cdot 10^{14}$
 GLAST :
 $V > \sim 3 \cdot 10^{13}$



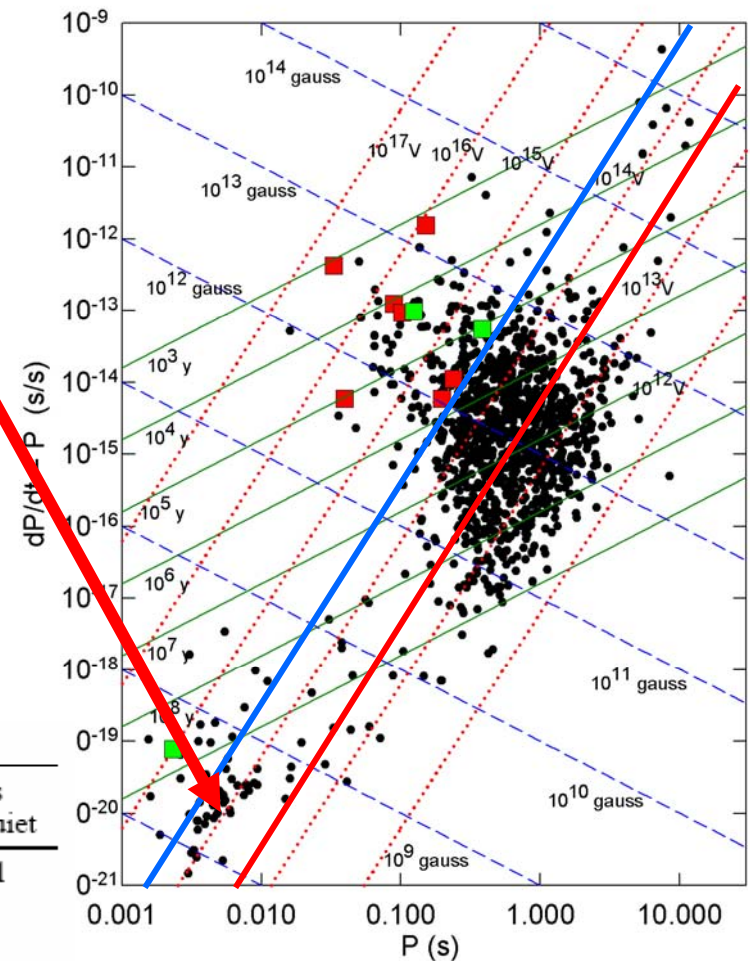
- Etude de population : en fonction des paramètres des pulsars (la période, l'âge, l'intensité,...)

Plus de pulsars avec GLAST

- Des pulsars milliseconde ?
 - champ magnétique moins élevé
 - moins de création de paire (γ -B)
 - moins d'écrantage
 - zone accélératrice $\rightarrow$ plus haute altitude
 - cutoff plus haut
- Ratio avec/sans émission radio
(importance des éphémérides pour la recherche d'émission pulsée- CENBG)

TABLE 1. Predicted GLAST pulsar populations

	Normal pulsars		Millisecond pulsars	
	Radio-loud	Radio-quiet	Radio-loud	Radio-quiet
Low Altitude Slot gap [10][27]	81	43	16	99-131
High Altitude Slot gap [13]	5	49		
Outer Gap [13]	1	258		
[17]	78	740		

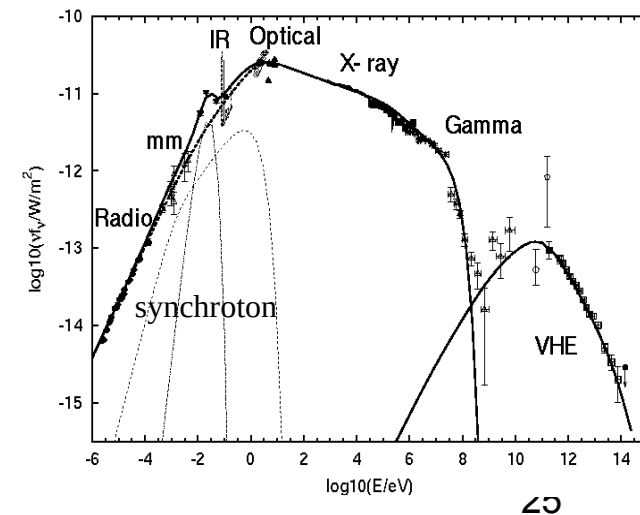


Les nébuleuses de pulsars

- Créées par l'interaction du vent du pulsar avec le milieu environnant : source continue d'énergie (spin down)
- Electrons relativistes :
 - Émission synchrotron
 - Compton inverse sur
 - CMB, infrarouge, optique
 - Émission synchrotron
- Nébuleuse du Crabe
 - Spécificité : champ magnétique important $\sim 160 \text{ G}$ $\rightarrow$ émission synchrotron importante $\rightarrow$ photons cibles pour le Compton inverse

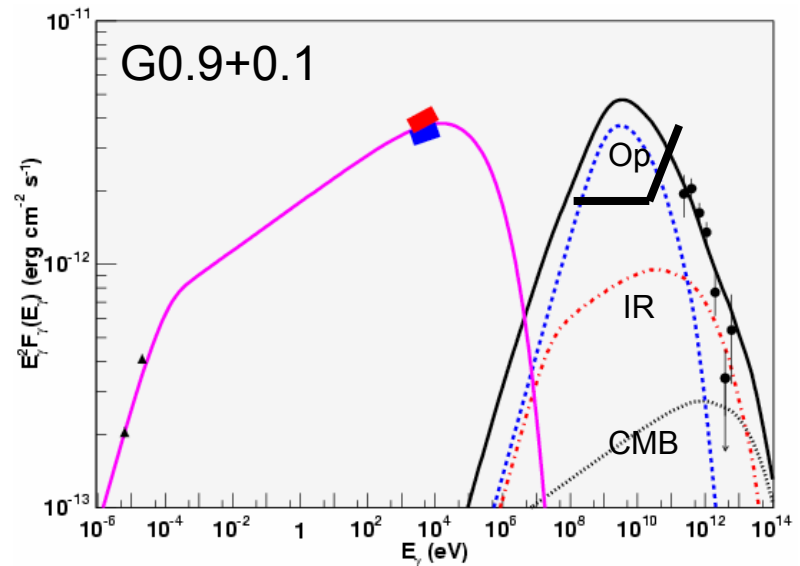
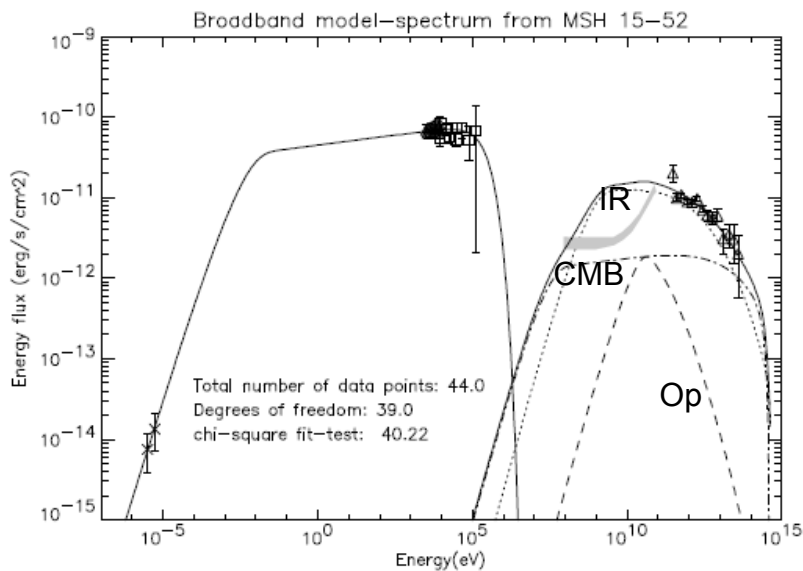
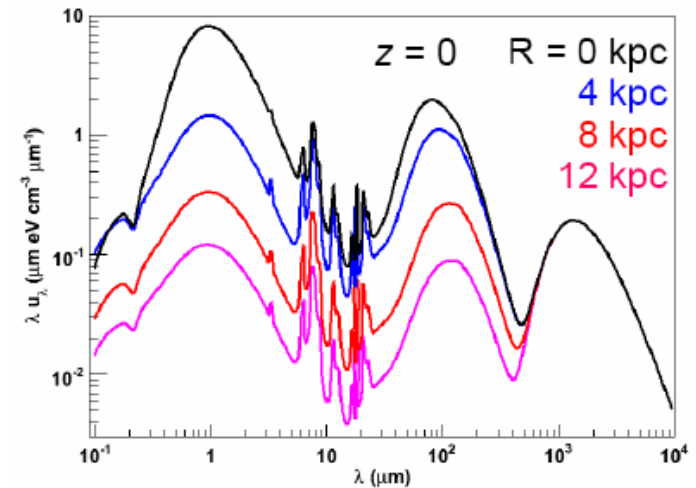


Radio, optical, X-rays



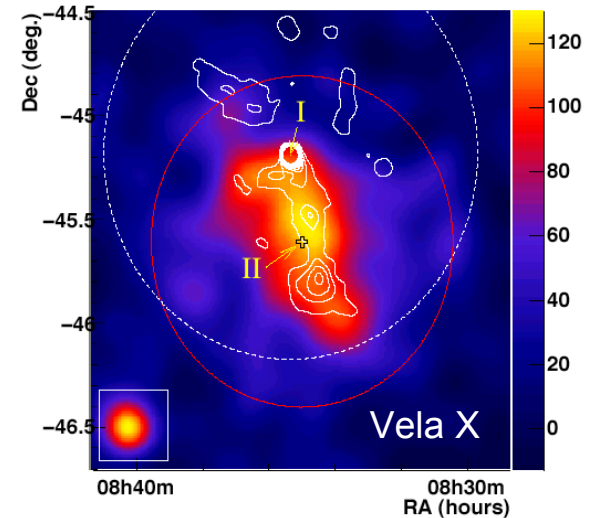
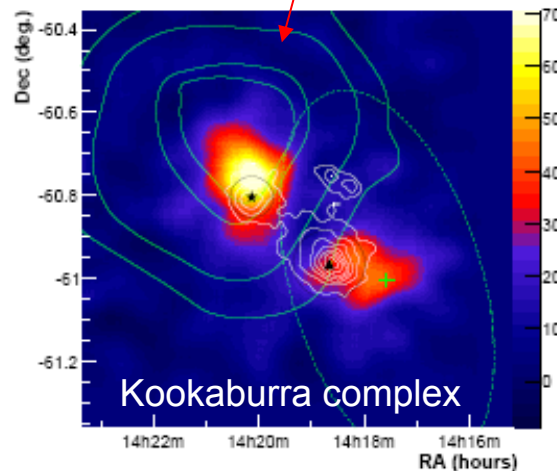
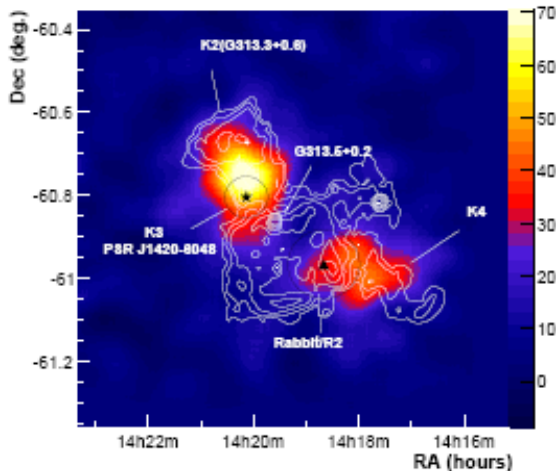
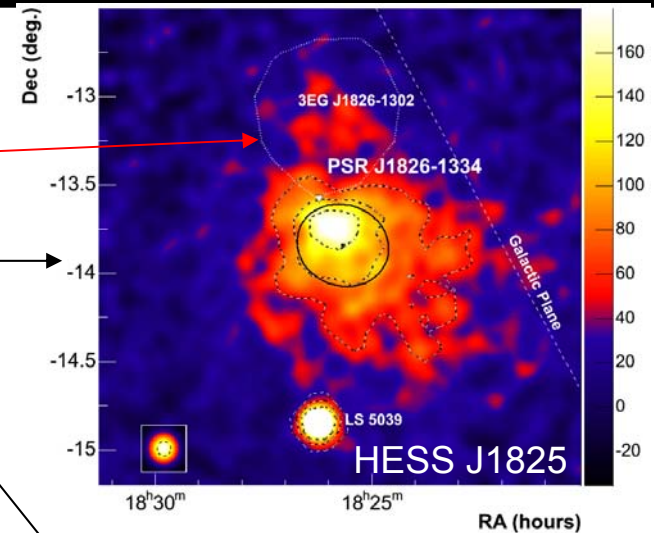
Modèle leptonique 1 zone

- Spectre des électrons en puissance brisée :
 - $E_1 \sim 10^{16} \text{ eV} / (B_{\mu\text{G}}^2 t_{\text{kan}})$
 - $E_2 \sim 10^{15} \text{ eV} \sqrt{80/B_{\mu\text{G}}}$
- Importance de la connaissance du spectre des photons cibles



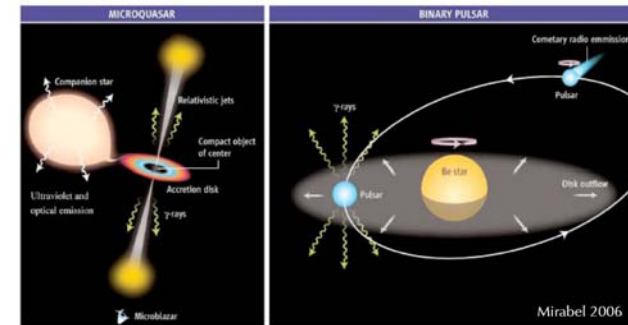
Avec GLAST

- Excepté le Crabe, aucune nébuleuse de pulsar n'a été clairement vue/associée par EGRET
- Plus de 10 vues par HESS
- GLAST devrait en voir plusieurs :
 - Meilleure sensibilité
 - Meilleure résolution angulaire

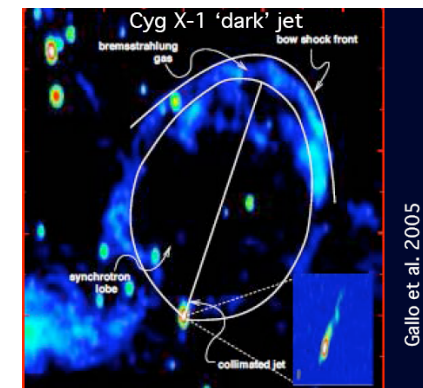
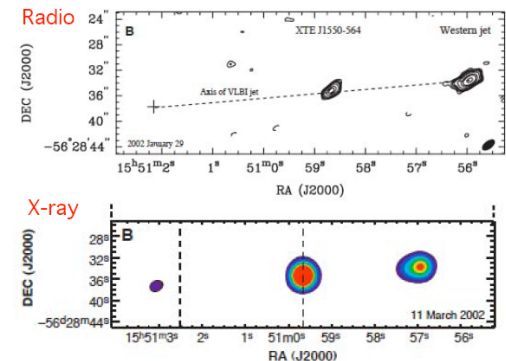


Binaires X, binaires gamma, microquasars

- Binaires :
 - Trou noir/étoile à neutron en orbite autour d'un compagnon stellaire
 - Energie :
 - Accrétion de la matière du compagnon
 - Rotation du pulsar
 - Plasma chauffé $1 \text{ keV} < T < 50 \text{ MeV}$, trop bas pour Glast
 - Mais il y a des processus non thermiques : jets relativistes (radio)
 - Ressemblances avec les AGN : microquasars
 - Mais la probabilité d'avoir le jet qui pointe vers nous est faible, et il est difficile de profiter de la variabilité : 1h (AGN) $\rightarrow$ 1us (microquasar)
- Emission dans les jets :
 - Spectre synchrotron $\rightarrow$ e- en E-2.2, mais émission trop faible pour Glast
- Interaction des jets dans l'ISM :
 - choc $\rightarrow$ accélération $\rightarrow$ gammas (1 an glast ?)

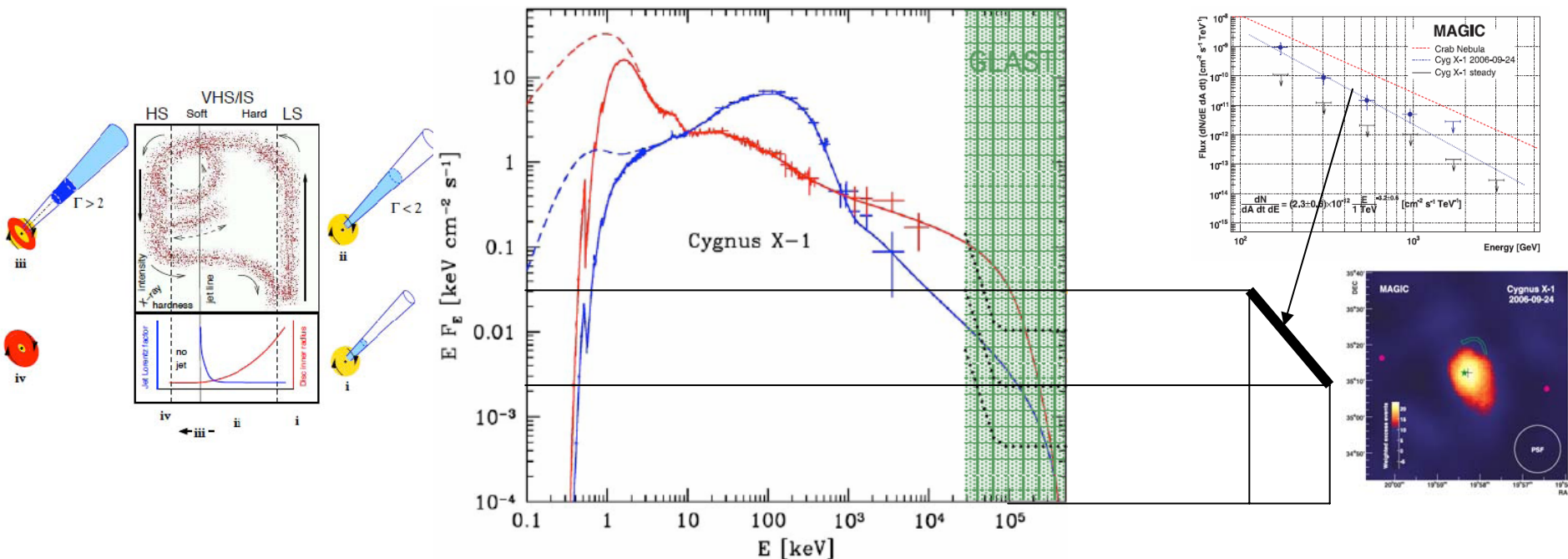


Corbel et al. 2002



Emission proche de l'objet compact

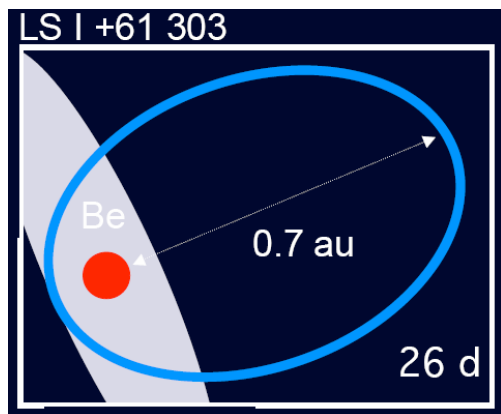
- Queues à haute énergie ~ 10 MeV, voire plus
- Changements d'état haut/bas associés à des éjections relativistes
- Exemple : Cygnus X-1 (vu récemment par MAGIC : $\sim 4\sigma$)
- Monitorer ces objets avec GLAST et corrélérer avec activité X



Binaires gamma

- 3 objets vus au dessus de 100 GeV (HESS, MAGIC)
- Inverse-Compton sur les photons de l'étoile -> émission gamma
- Mais le signal gamma est atténué par création de paire dans le champ de photons de l'étoile -> modulation orbitale
- (LS I +61 303 et LS 5039 seraient plutôt des pulsars, comme PSR B1259-63)

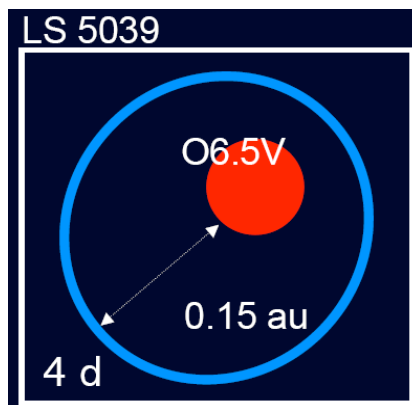
EGRET + MAGIC



GLAST : en ~2 mois

10-15 septembre 2007

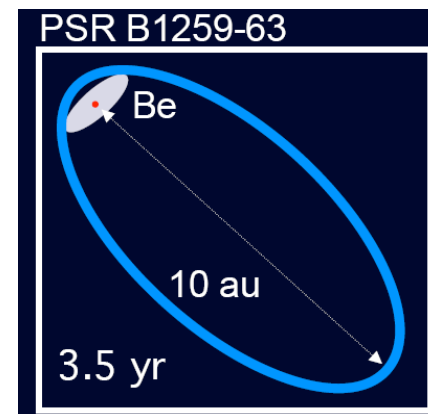
EGRET + HESS



GLAST : en ~1 an

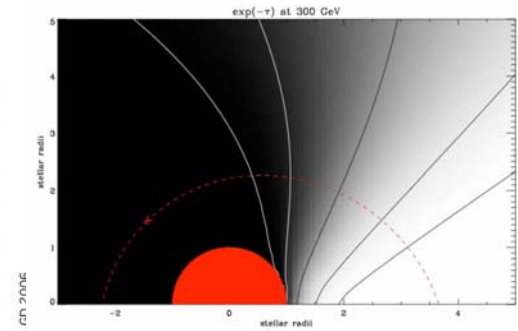
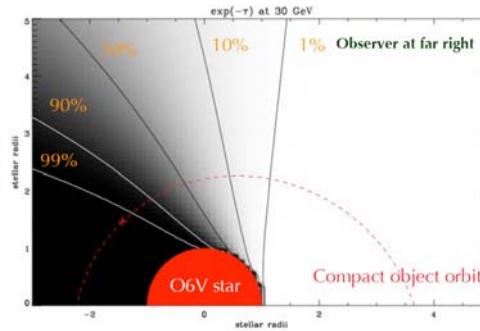
Ecole de physique des
astroparticules

HESS

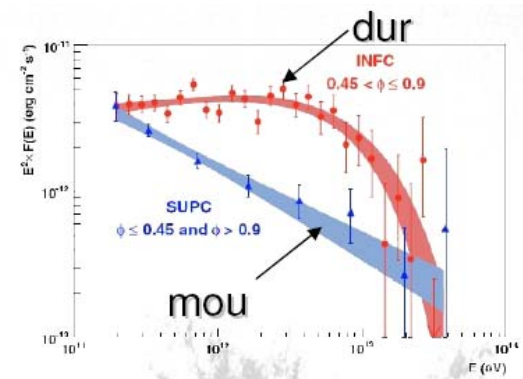
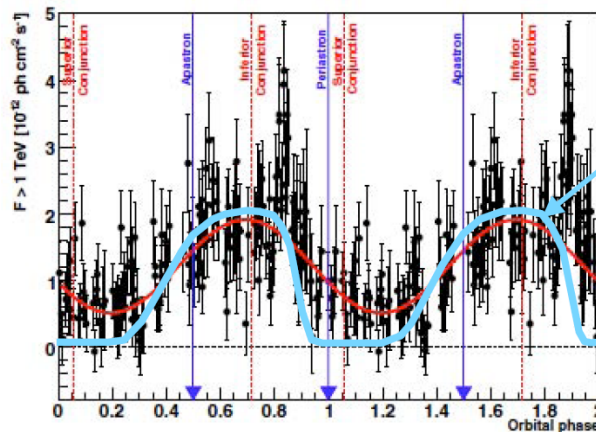
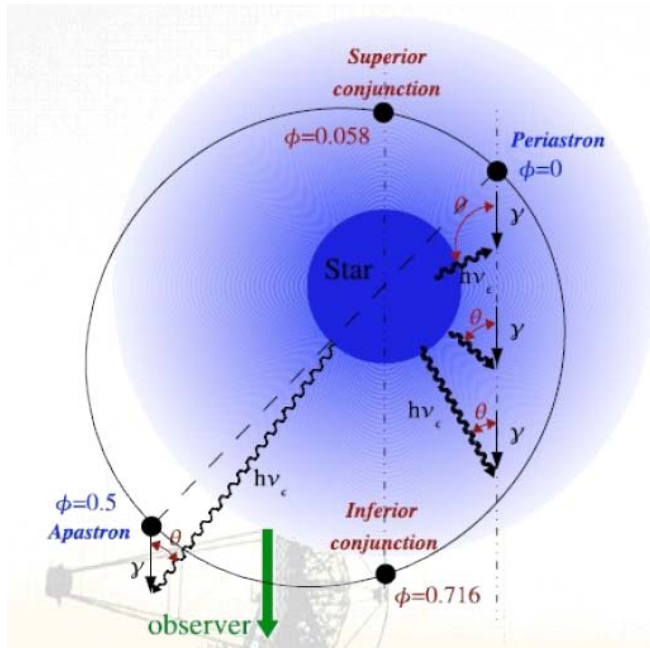


LS 5039

- Variabilité orbitale vue par HESS
- La géométrie étant connue, on peut calculer l'émission gamma avec précision (Dubus et al.)
- L'absorption n'explique pas tout



GD 2006



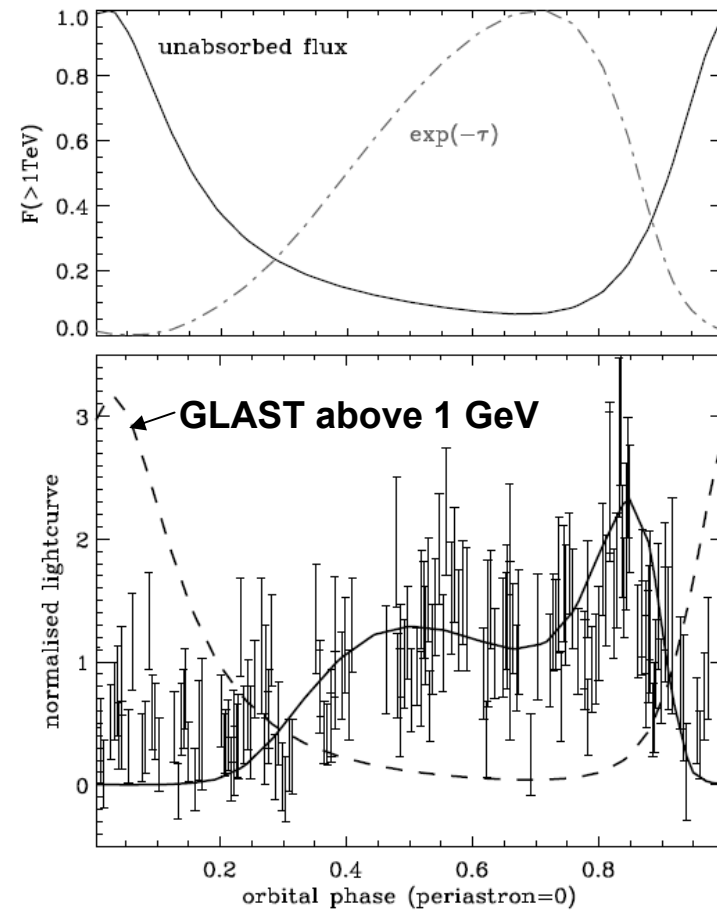
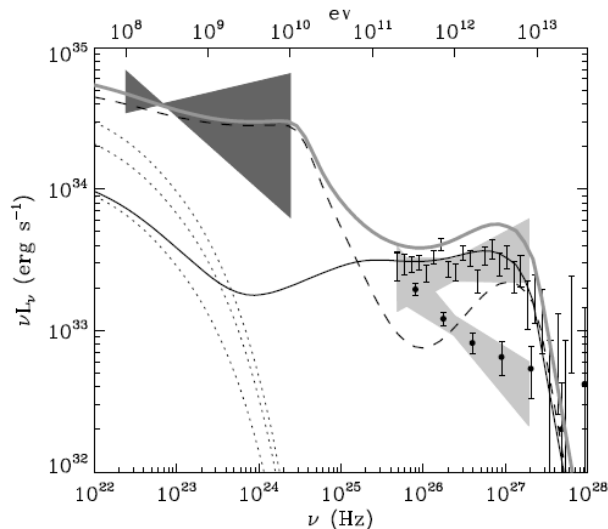
10-15 septembre 2007

Ecole de physique des
astroparticules

31

LS 5039

- La prise en compte de l'anisotropie de l'émission inverse Compton permet un meilleur accord
- Sauf pour la conjonction supérieure (état bas) : effet de cascade ?
- GLAST devrait voir la modulation en ~ 1 an

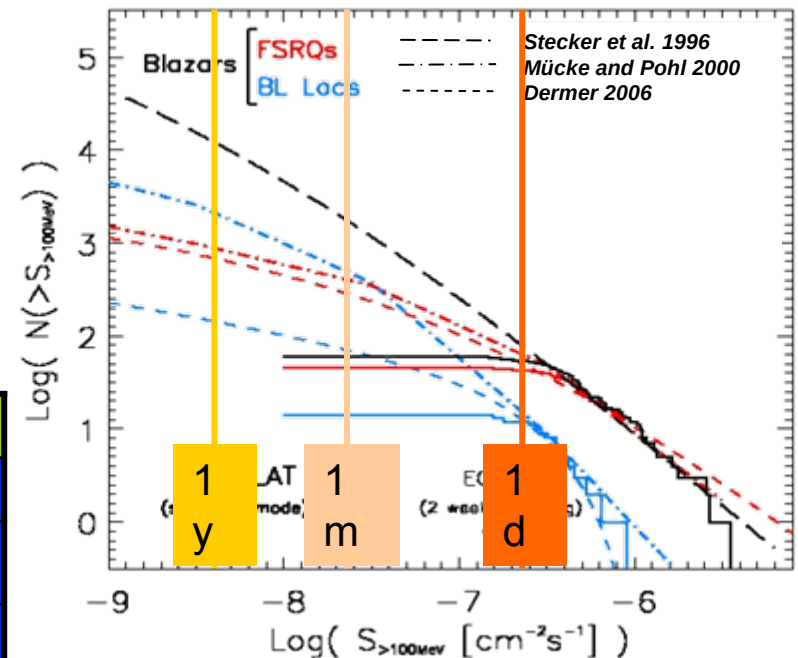


Dubus et al. 2007, Soumis a A&A

Les noyaux actifs de galaxie

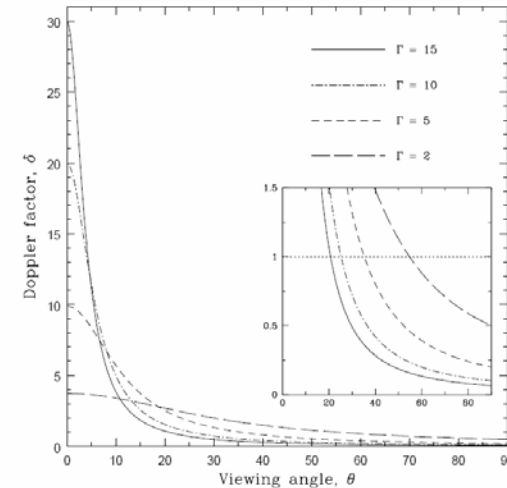
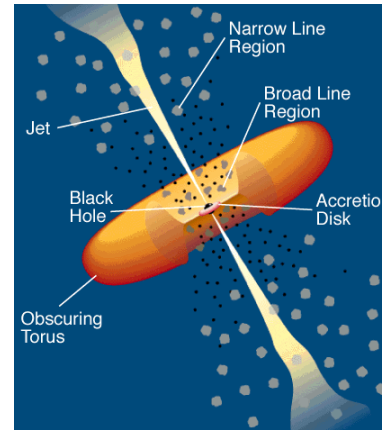
- EGRET en a vu ~70 (sur un catalogue de 271)
- Tous sont radio loud et ~97% sont des blazars
- Une classe d'objets très importante pour GLAST :

Time	FSRQ	BLLac
1 d	~60	~15
1w	150-200	50-150
1m	250-400	70-500
1y	800-1000	200-2000

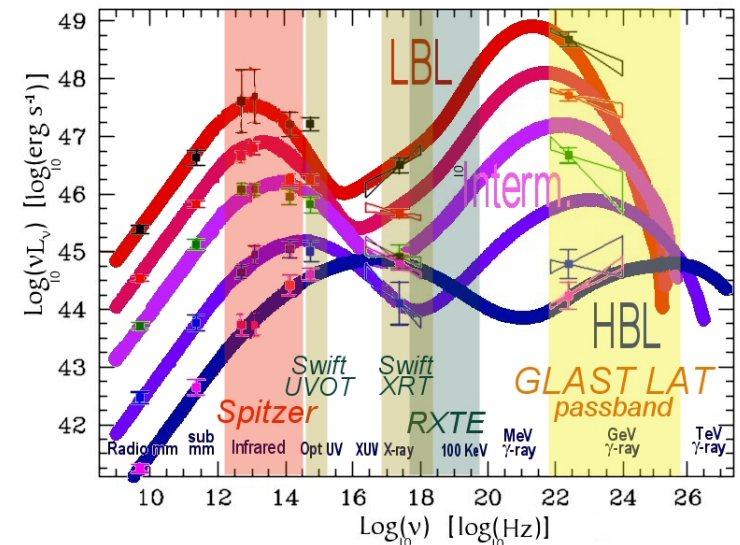


Les blazars

- Le jet pointe vers nous
- La(les) source(s) de particules relativistes se déplace(nt) à des vitesses relativistes $\rightarrow$ facteur Doppler relativiste (3/10/50) $\rightarrow$ importance de l'angle du jet par rapport à nous
- Modèles :
 - Hadronique
 - Leptonique
 - Synchrotron-Self-Compton
 - Photons externes (disque, BLR)
- GLAST revisitera la "séquence" avec une plus grande statistique d'objets (jusqu'aux blazars au TeV)
- Etudes multi longueur d'onde
- Mesurer/étudier la variabilité

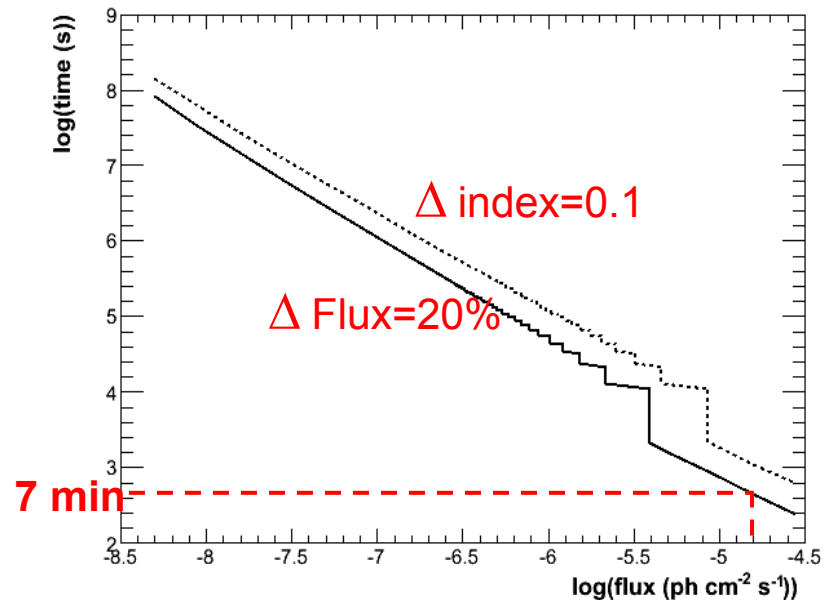
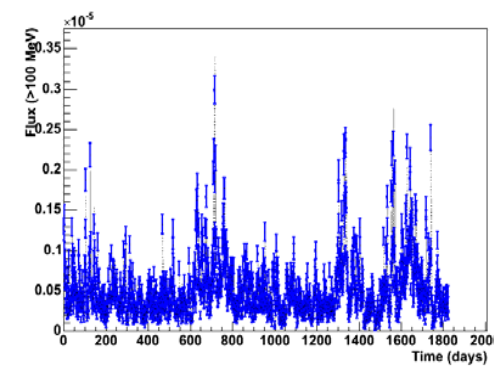
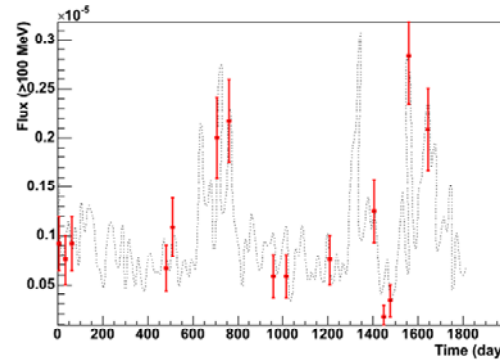
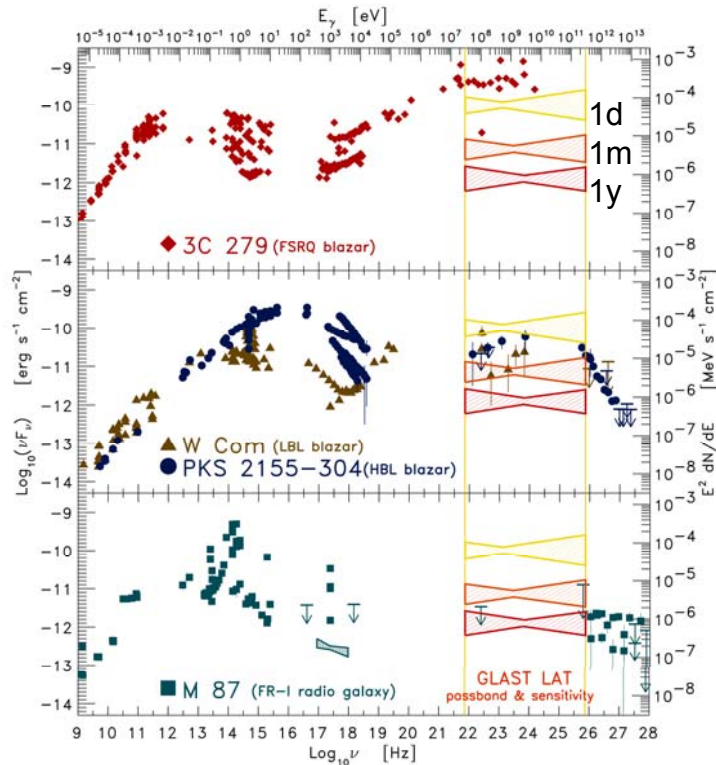


Fossati et al.(1998), Donato et al. (2002)



Plus grande sensibilité

- Voir de nouveaux objets
- Mieux voir les plus brillants
 - Etats hauts/états bas
 - Monitoring

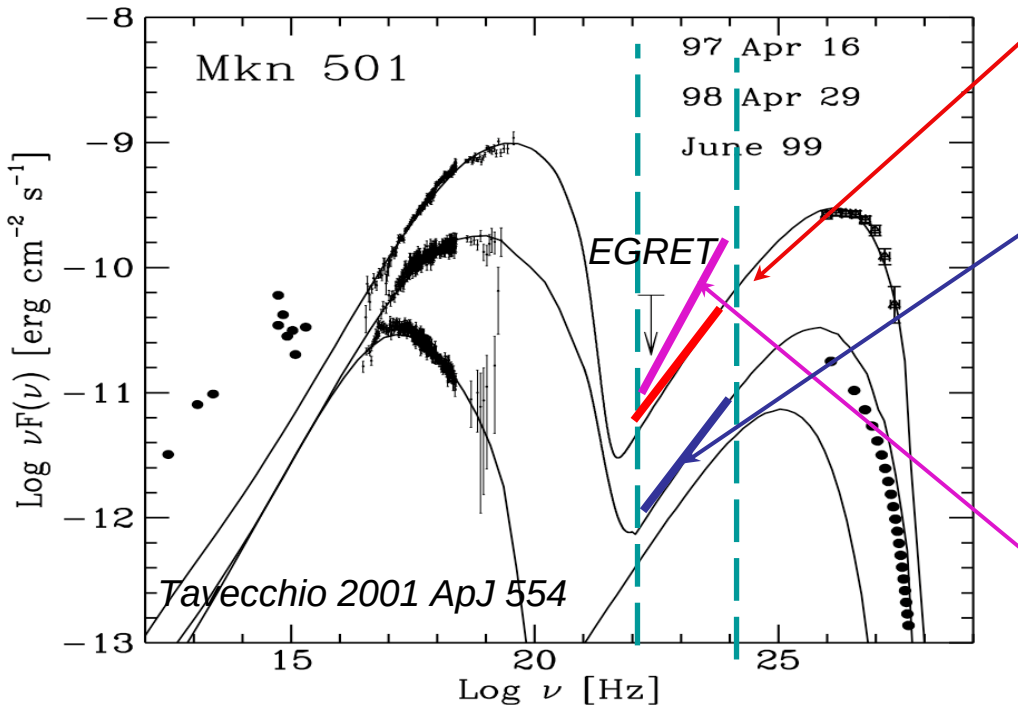


B. Lott

Max flux detected by EGRET: $2 \cdot 10^{-5} \text{ ph (E>100 MeV) cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ for PKS1622-297

Mkn 501

$$\frac{dF}{dE} = K \cdot \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-a}$$



0.1-10 GeV

High

$K = 1.4 \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $a = 1.45$

$F(>0.1 \text{ GeV}) = 9.0 \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Time for 5 σ detection: 0.85 days

$\Delta F_{>0.1 \text{ GeV}} \sim 54\%$; $\Delta a \sim 22\%$

Low

$K = 2.3 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $a = 1.45$

$F(>0.1 \text{ GeV}) = 1.42 \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Time for 5 σ detection: 7 days

$\Delta F_{>0.1 \text{ GeV}} \sim 49\%$; $\Delta a \sim 21\%$

EGRET high, Kataoka 1996, ApJ 514

This is the **ONLY** measurement of Mrk501 at these energies; it is a ~ 5 sigma detection

$K = 2.7 \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $a = 1.3$

$F(>0.1 \text{ GeV}) = 1.8 \times 10^{-7} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Time for 5 σ detection: 0.3 days

$\Delta F_{>0.1 \text{ GeV}} \sim 62\%$; $\Delta a \sim 27\%$

D. Paneque et al., ICRC 2007

Variabilité/Multi-longueur d'onde

- L'étude la variabilité est indispensable pour mieux comprendre comment fonctionnent les blazars
- Importance d'avoir des données multi-longueur d'onde simultanées
- De nombreuses campagnes multi-longueur d'onde ont déjà été demandées/acceptées
- Monitoring automatique de 20 sources (jour/semaine, données publiques) →
- Alertes pour tous les objets au dessus de 2.10^{-6} ph/cm²/s (~24 par an)

accepted RXTE or Suzaku proposals on these targets

Source Name	TYPE	Campaign Manager
PKS 0528+134	FSRQ	B. Lott
3C 273	FSRQ	J. Carson
3C 279	FSRQ	G. Madejski
Mrk 501	HBL	D. Paneque
1ES 1959+650	HBL	
Mrk 421	HBL	
PKS 2155-304	HBL	B. Giebels
BL Lacertae	LBL/IBL	G. Tosti

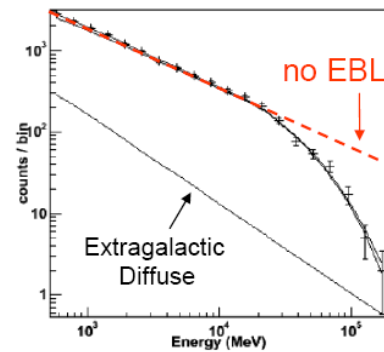
0208-512	3EGJ0210-5055
0235+164	3EGJ0237+1635
PKS 0528+134	3EGJ0530+1323
PKS 0716+714	3EGJ0721+7120
0827+243	3EGJ0829+2413
OJ 287	3EGJ0853+1941
Mrk 421	3EGJ1104+3809
W Com	3EGJ1222+2841
3C 273	3EGJ1229+0210
3C 279	3EGJ1255-0549
1406-076	3EGJ1409-0745
H 1426+428	NA
1510-089	3EGJ1512-0849
PKS 1622-297	3EGJ1625-2955
1633+383	3EGJ1635+3813
Mrk 501	NA
NRAO 530	3EGJ1733-1313
1ES 1959+650	NA
PKS 2155-304	3EG2158-3023
BL_Lacertae	3EGJ2202+4217
3C 454.3	3EGJ2254+1601
1ES 2344+514	NA

Rayonnement diffus extragalactique

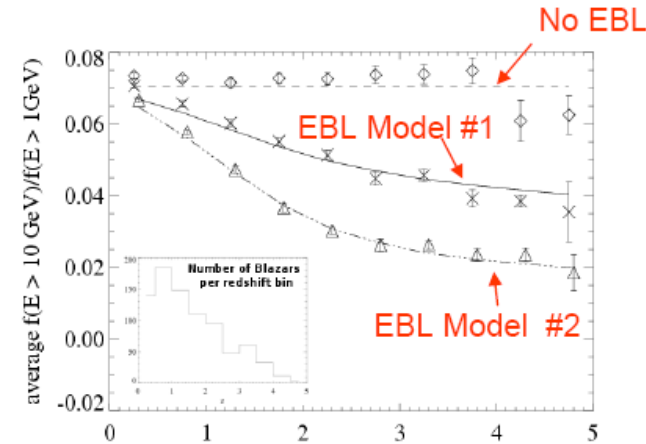
Atténuation des photons
au GeV par interaction γ - γ :
sensibilité au **rayonnement**
optique-UV

(mais il faut faire la différence
avec une atténuation à la
source)

1-year GLAST simulation of Blazar at $z = 1$

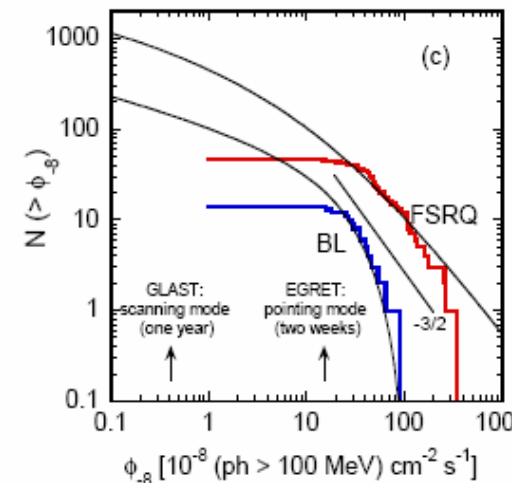
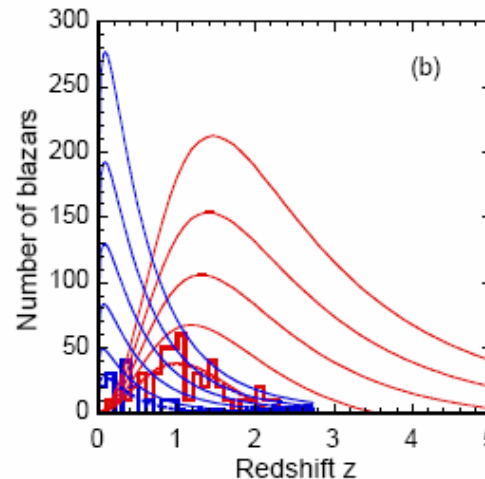
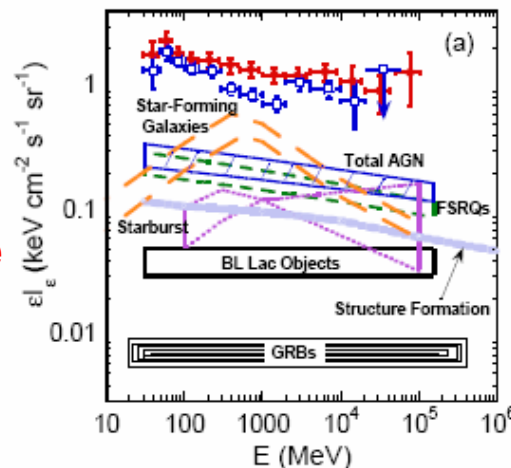


L. Reyes



C. Dermer

Mesure du
rayonnement
Gamma
extragalactique



10-15 septembre 2007

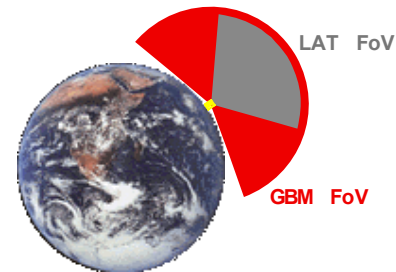
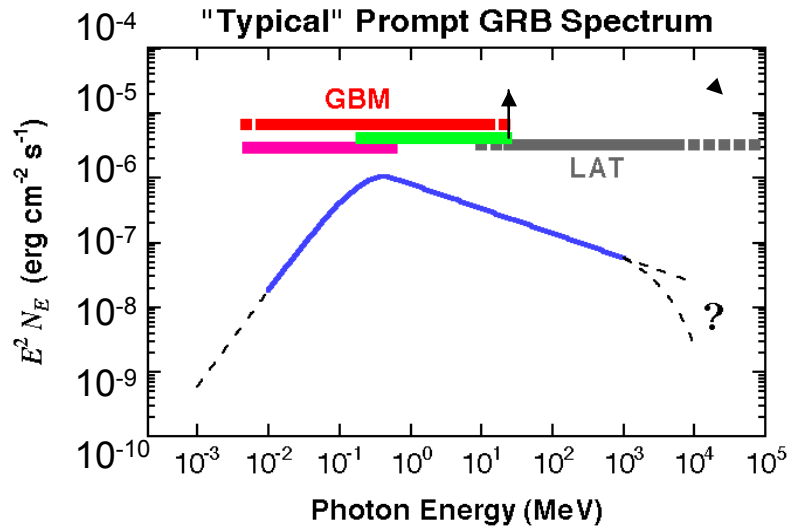
Ecole de physique des
astroparticules

38

GLAST = LAT + GBM



- Large Area Telescope (LAT)
 - De 30 MeV à 300 GeV
 - onboard and ground burst triggers, localization, spectroscopy
- Glast Burst Monitor (GBM)
 - 12 détecteurs NaI (de 8 keV à 1 MeV)
 - Trigger et localisation
 $<15^\circ$ en 2 sec / 5° en 30 min
 - spectroscopie
 - 2 détecteurs BGO (de 150 keV à 30 MeV)
 - spectroscopie



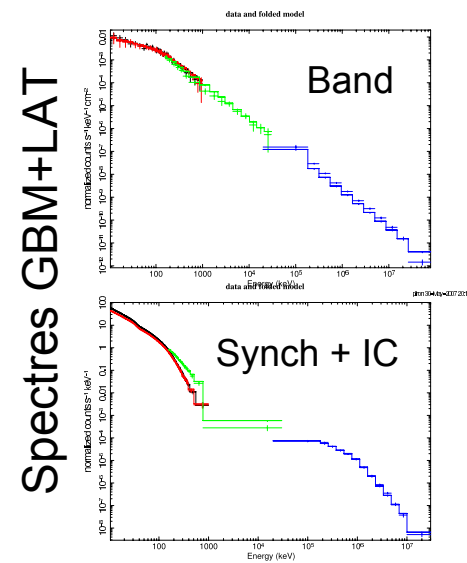
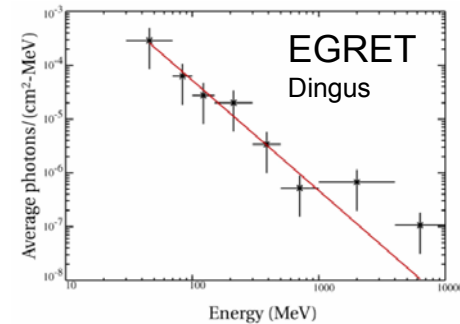
10-15 septembre 2007

Ecole de physique des
astroparticules

39

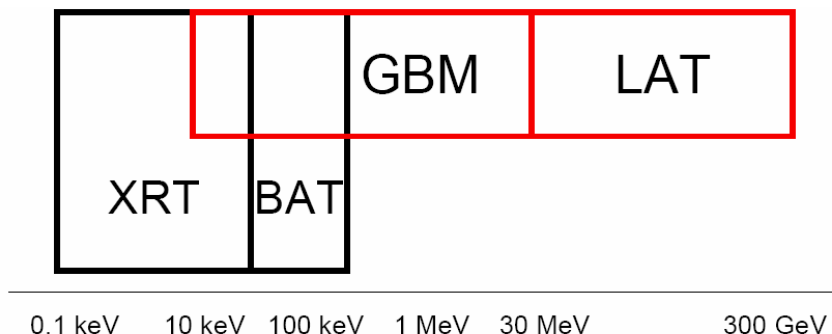
Les GRB vus par GLAST

- Très peu de connaissance sur le spectre des GRB au dessus de 50 MeV : EGRET n'a vu que 4+3 GRB (petit champ de vue, faible surface effective, temps mort important : ~100 ms)
- Spectre moyen de 4 GRB d'EGRET : index ~ 2
 - 45 photons au dessus de 30 MeV
 - 4 photons au dessus de 1 GeV
- GBM : ~200 GRB/an (d'après BATSE)
- >60 GRB/an dans le champ de vue du LAT
- Statistique "attendue" pour le LAT :
 - Band function :
 - 50 GRB/an avec plus de 10 photons au dessus de 30 MeV
 - 1 ou 2 GRB/mois avec plus de 100 photons
 - Quelques GRB/an avec une émission au dessus de 50 GeV
 - Synchrotron + inverse Compton
- Etudier
 - Le spectre prompt et l'afterglow
 - Comment varient avec le temps les composantes basse et haute énergie



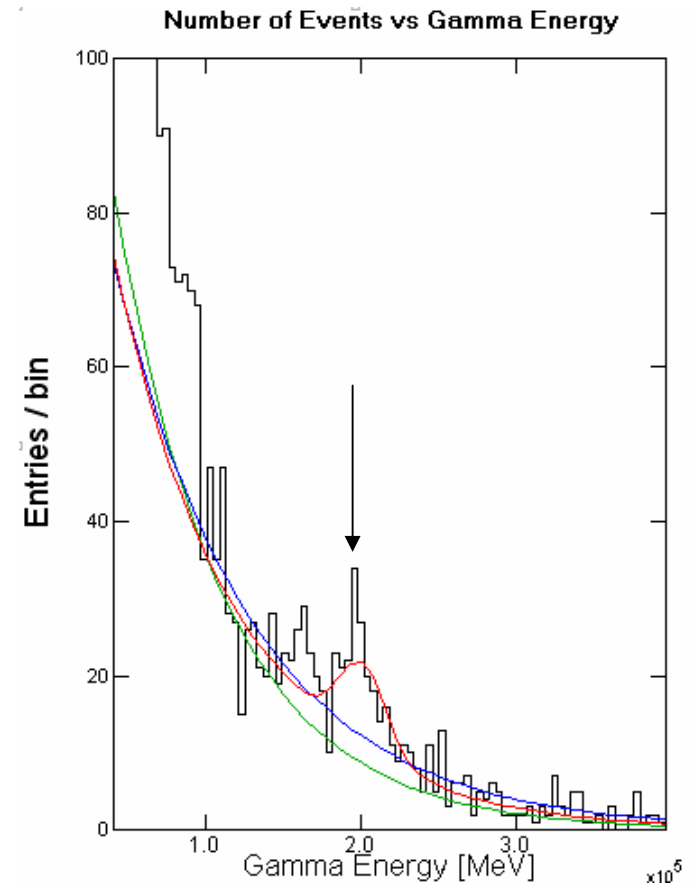
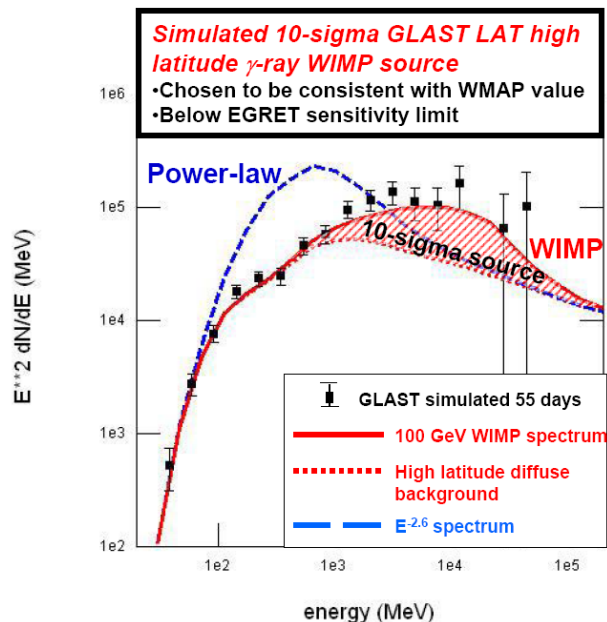
Assurer la meilleure couverture

- Maximiser le suivi en passant en mode pointé pendant ~5 heures
 - 1 fois par semaine quand le burst est dans le champ de vue du LAT (quasiment tous)
 - 1 fois par mois quand le burst n'est pas dans le champ de vue du LAT (~1/10)
- Collaboration Swift/GLAST :
 - Swift pointera sur les alertes lancées par GLAST
 - GLAST fera un scan fréquent des GRB vus par Swift
 - Swift et GLAST permettront une mesure de l'afterglow sur 9 ordres de grandeur en énergie
- Swift : 100 GRB/an
 - 20 GRB vus par Swift dans le champ de vue du LAT
 - 20 GRB détectés par le GBM seront détectés par Swift



Matière noire

- Où chercher ?
 - Centre galactique
 - Sous-structures (clumps)
 - Halo
 - Extragalactique
- Spectre (pour le continuum)
 - Pas une loi de puissance
 - Pas de contrepartie



- Le signal en or : une raie en énergie à la masse du neutralino

Conclusions

- GLAST en orbite en février 2008
 - Première année : données privées (sauf GRB/sursauts)
 - Ensuite (->10 ans) : toutes les données seront publiques
- GLAST permettra de mieux voir le ciel gamma de ~ 30 MeV à ~ 300 GeV (x25 en sensibilité)
- ~ 9000 sources (?)
- Importance de l'analyse multi-longueur d'onde