



# Astronomie gamma entre 30 MeV et 300 GeV avec GLAST

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

# Plan

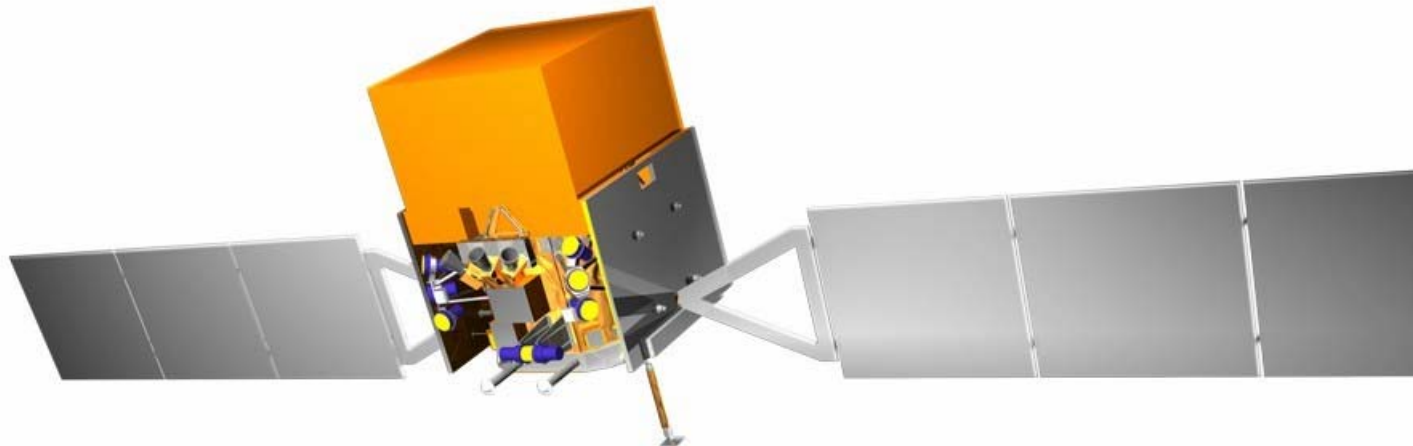
---

- 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

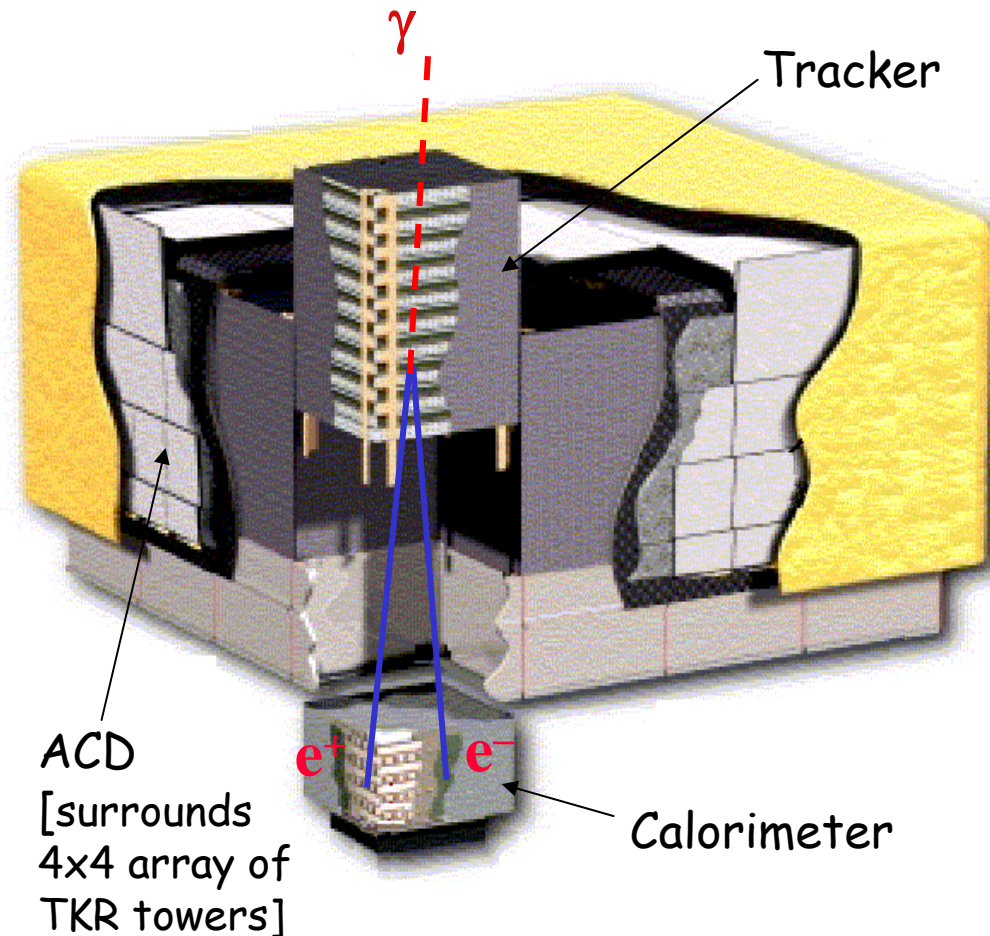
---

- 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)



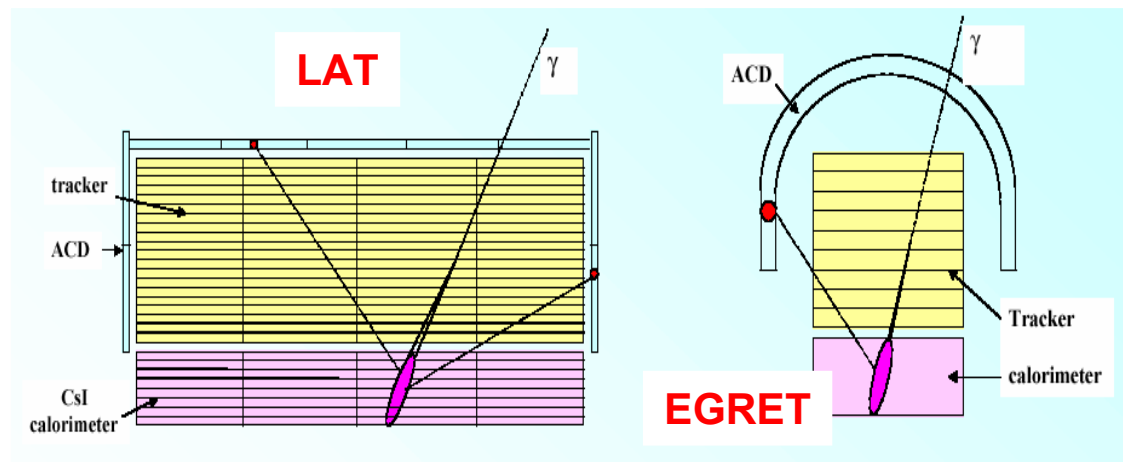
# Large Area Telescope (LAT) Overview

- 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  $\mu$ s)

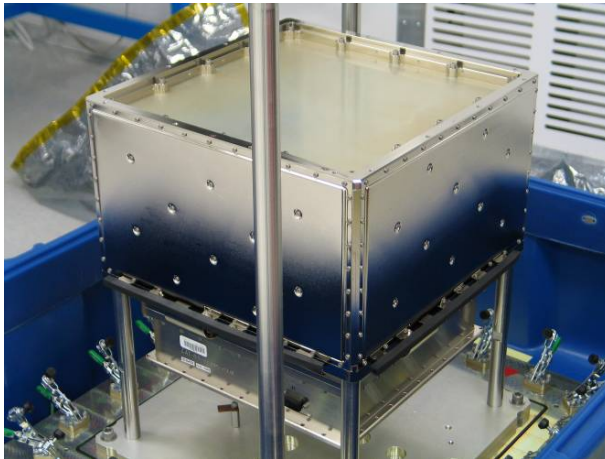




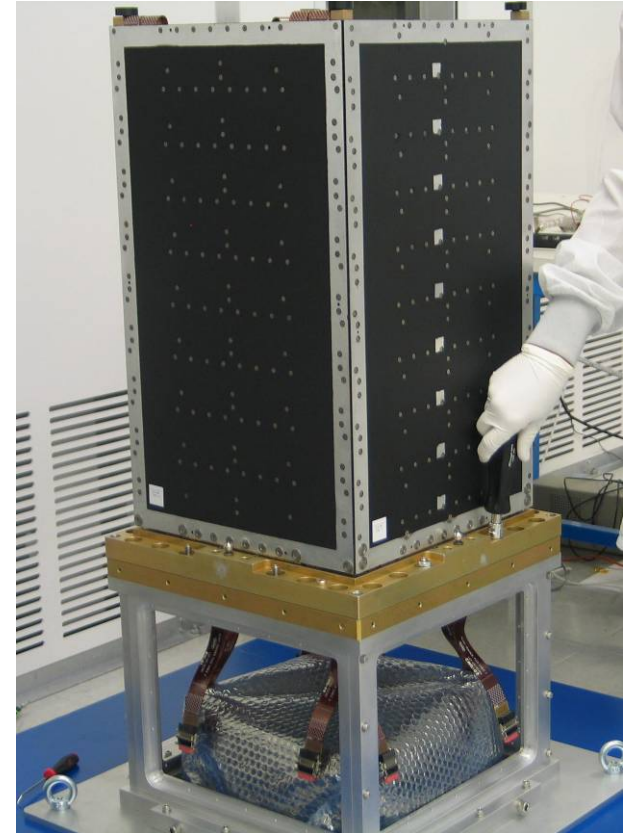
# Les éléments du LAT



**Anti-coincidence**



**1 module du  
calorimètre**



**1 module  
du tracker**

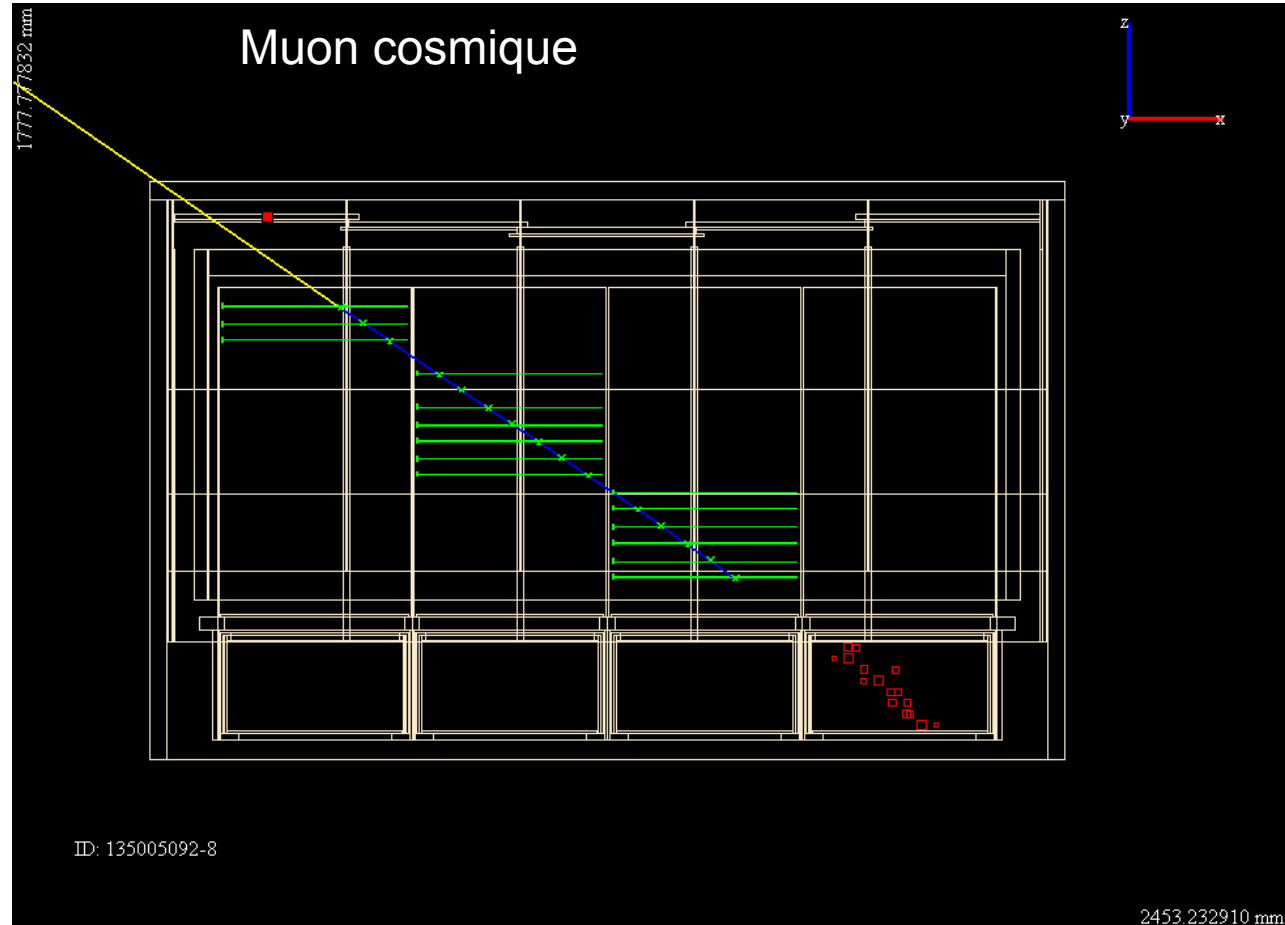
# Intégration du LAT



10-15 septembre 2007

Ecole de physique des  
astroparticules

# Prêt à partir !



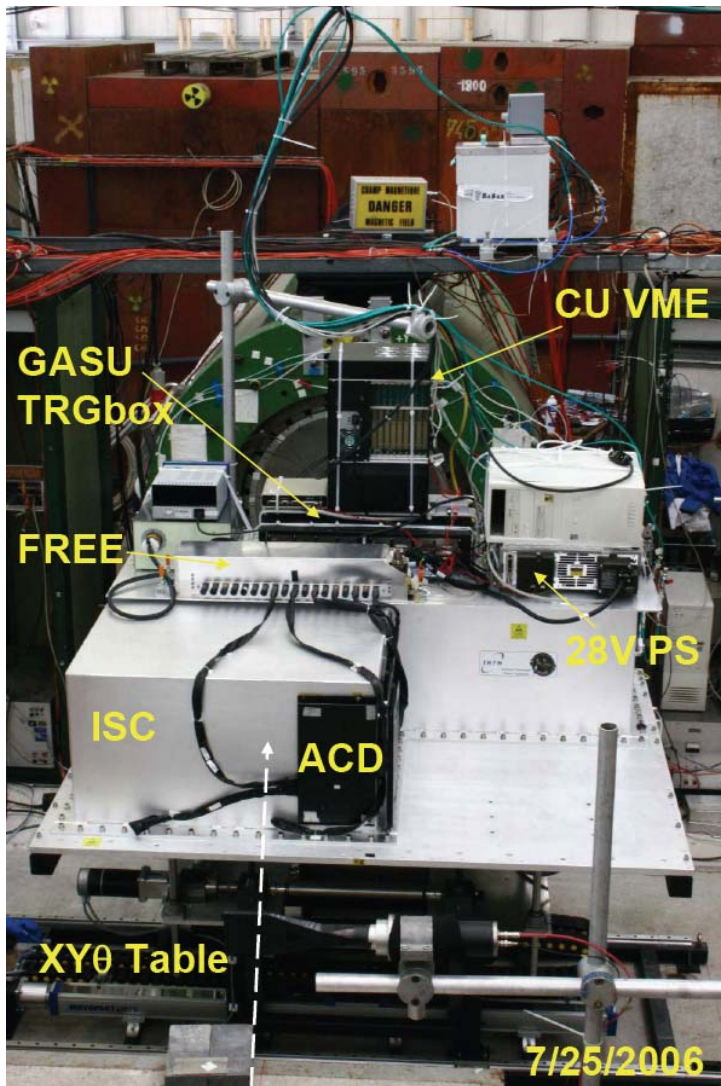


# Reconstruction/réjection du bruit de fond

---

- 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

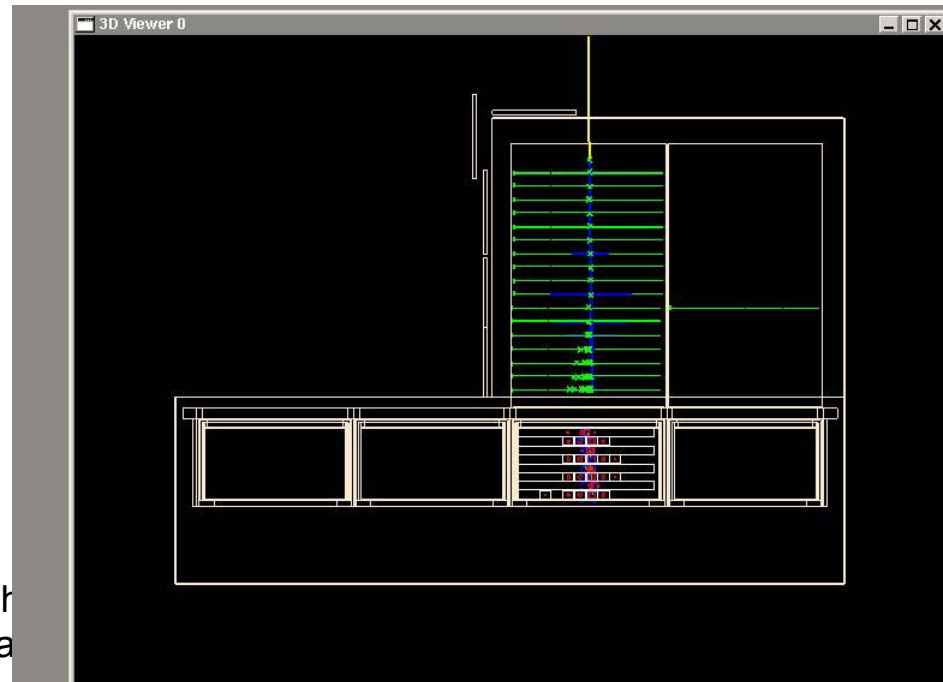
# Testé en faisceau au CERN



10-15 septembre 2007

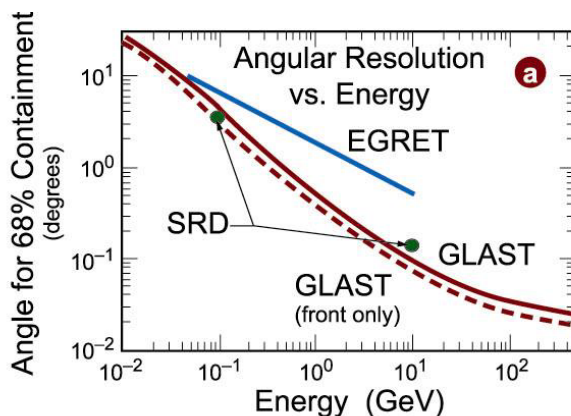
- 4 weeks at PS/T9 area (26/7-23/8)
  - Gammas @ 0-2.5 GeV
  - Electrons @ 1,5 GeV
  - Positrons @ 1 GeV (through MMS)
  - Protons @ 6,10 GeV (w/ & w/o MMS)
- 11 days at SPS/H4 area (4/9-15/9)
  - Electrons @ 10,20,50,100,200,280 GeV
  - Protons @ 20,100 GeV
  - Pions @ 20 GeV

Ecole de ph  
astropa

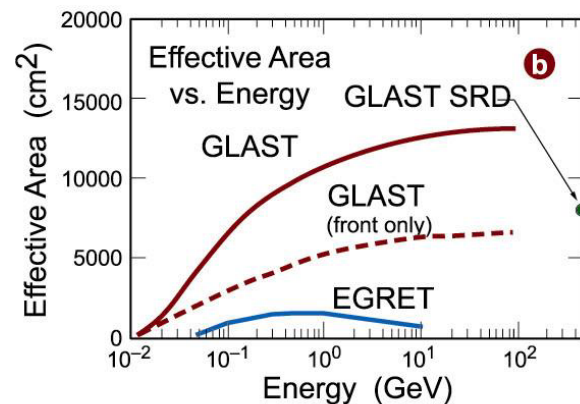


# Performances

**Optimized Point Spread Function**

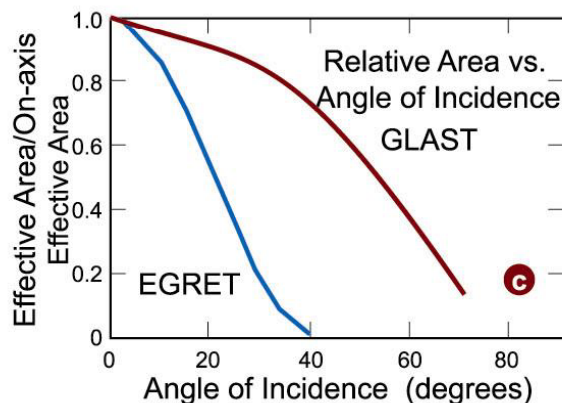


**Large Effective Area**

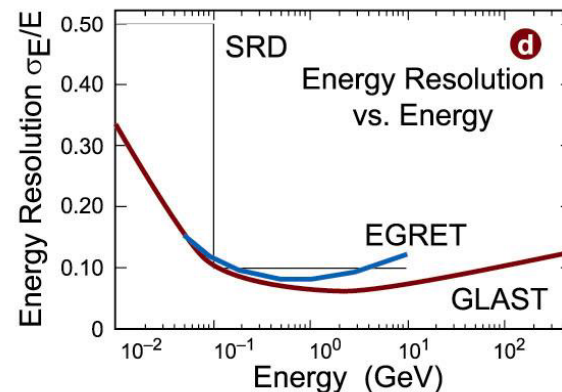


**Wide Field of View**

FOV: 2.4 Sr  
SRD: 2.0 Sr



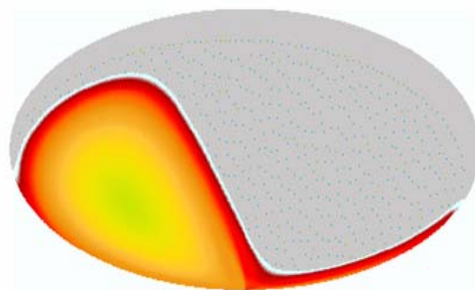
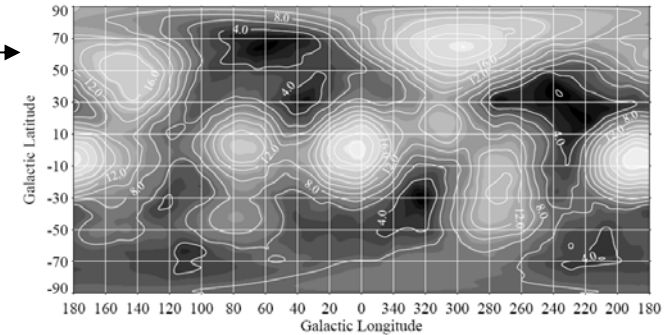
**Good Energy Resolution**



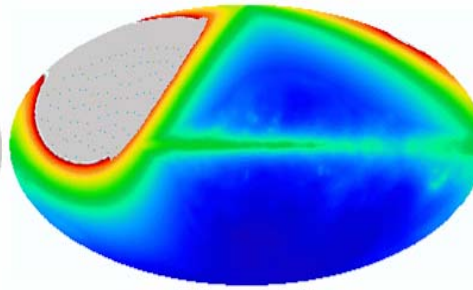
**Point Source Sensitivity (high latitude)**  
Two Years: =  $1.6 \times 10^{-9}$  ph/cm²/s (> 100 MeV)

# Mode d'observation

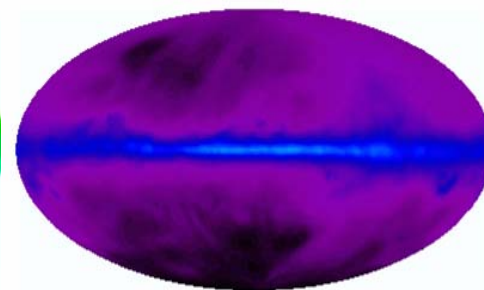
- EGRET : mode pointé uniquement
- GLAST : scanning mode
  - Possible grâce au grand champ de vue
  - Exposition plus uniforme
  - Ciel complet en deux orbites (3h)
  - Chaque région est vue pendant 30min



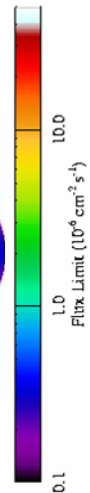
100 s



1 orbite (90 min)

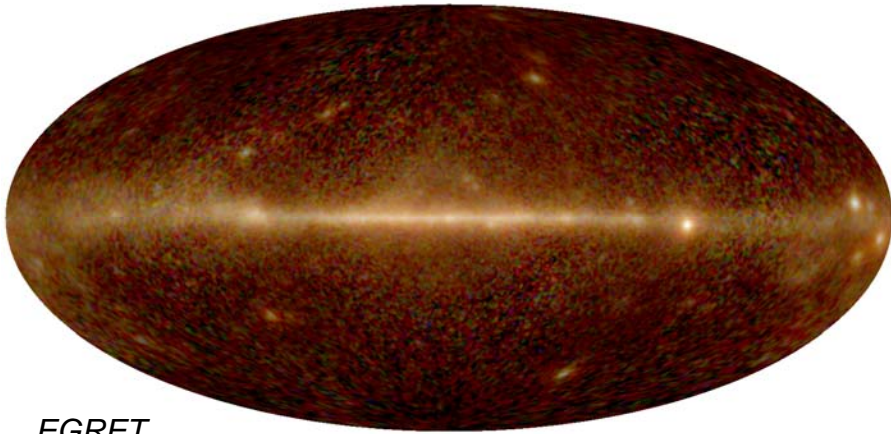


1 jour

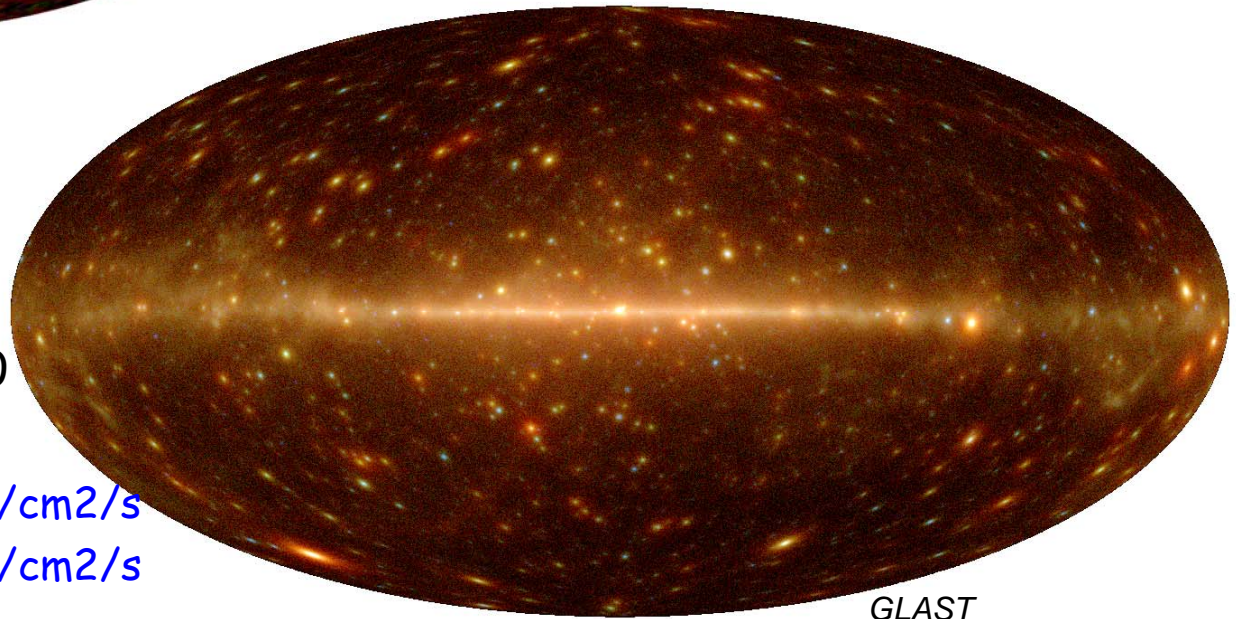
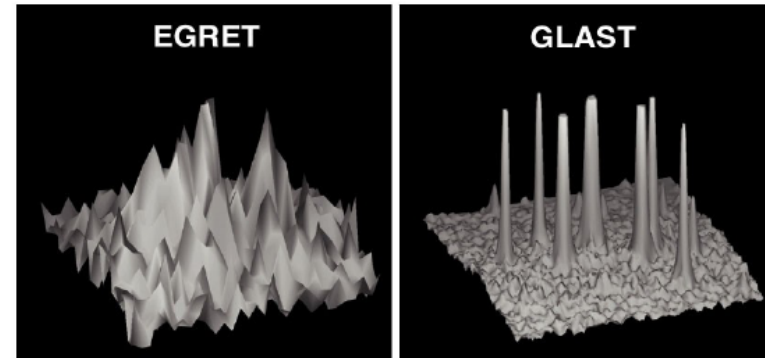




# Ciel gamma EGRET -> GLAST



EGRET  
>100 MeV, mission entière

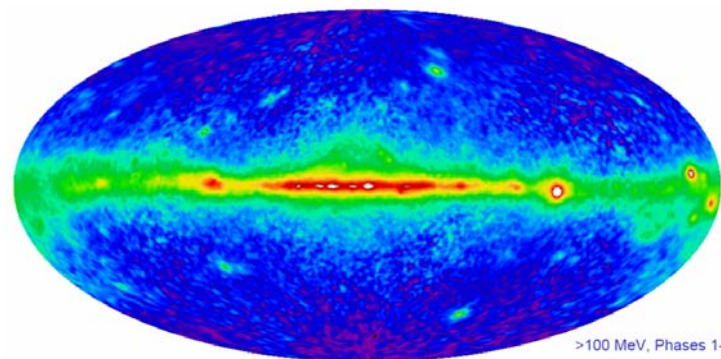


GLAST  
>100 MeV, 1 an simulé

- x25 en sensibilité
- De 271 sources à ~9000
- En un an :
  - $5\sigma$  pour flux  $> 4 \cdot 10^{-9}$  ph/cm<sup>2</sup>/s
  - 30" pour flux =  $10^{-7}$  ph/cm<sup>2</sup>/s  
(sensibilité d'EGRET)

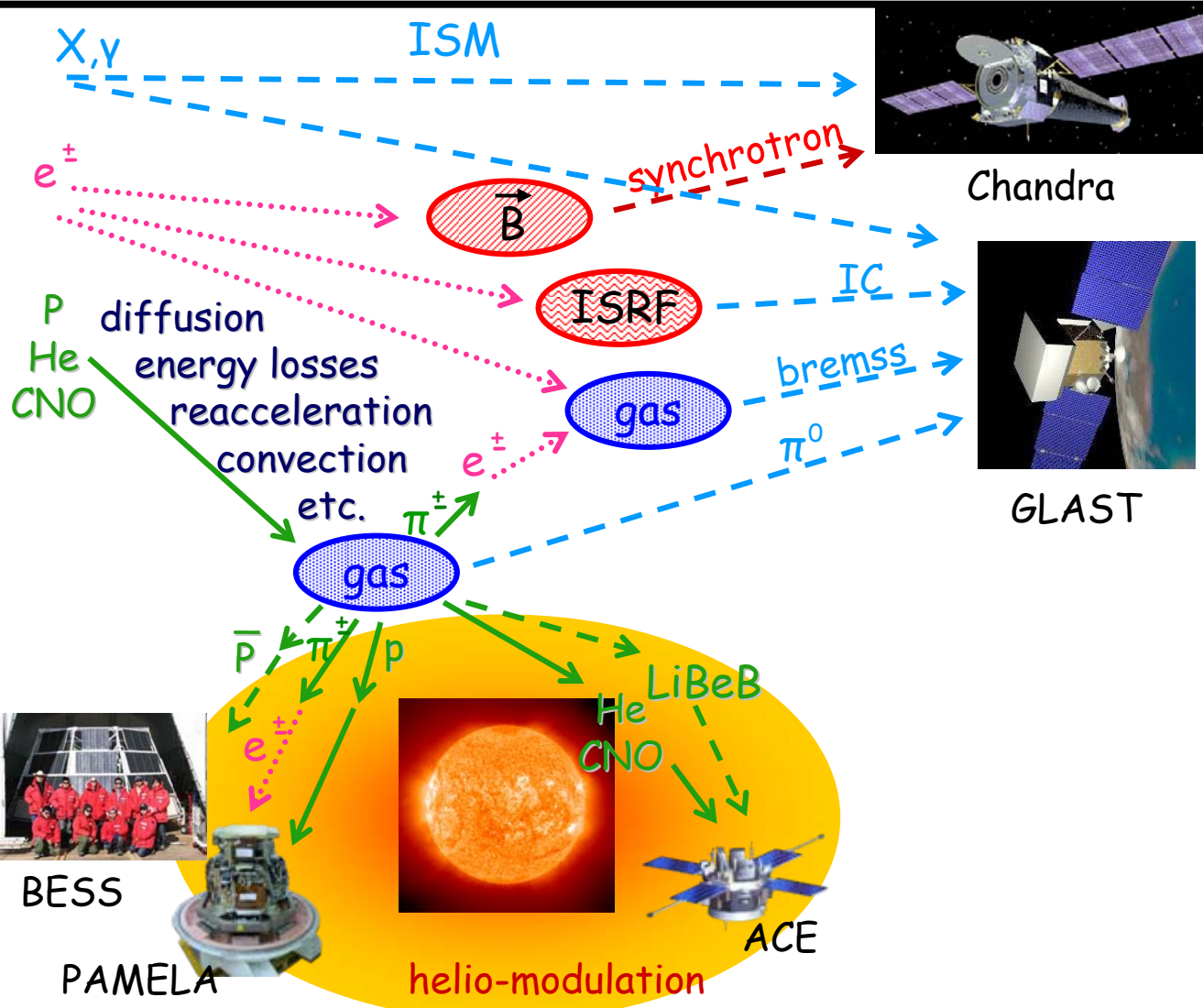
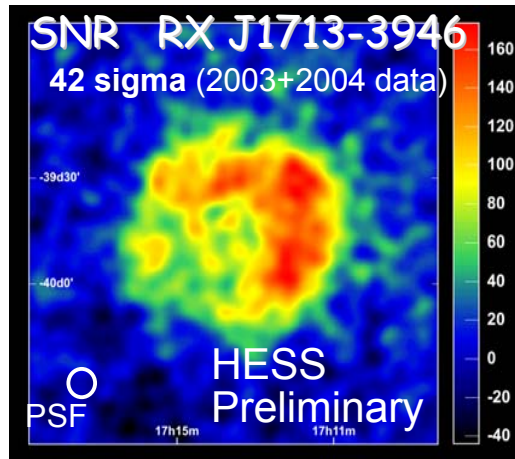
# Le fond diffus galactique

- 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

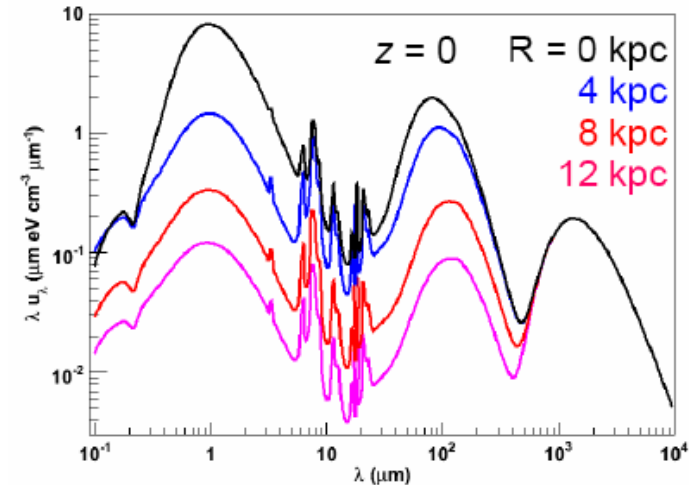


(illustration Moskalenko)

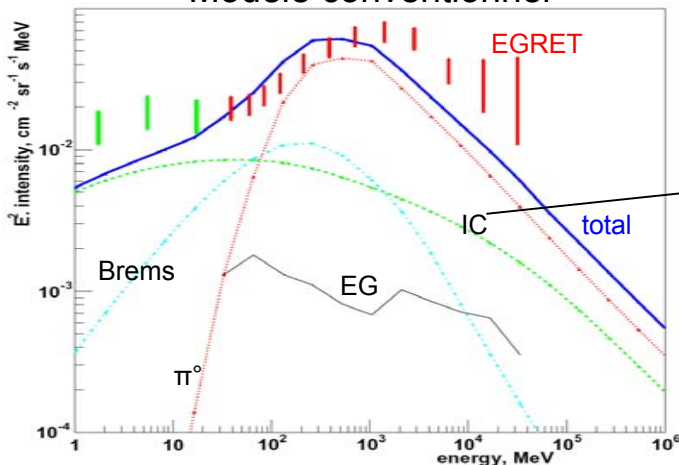
# GALPROP

- Le code utilisé par GLAST, sans cesse amélioré :

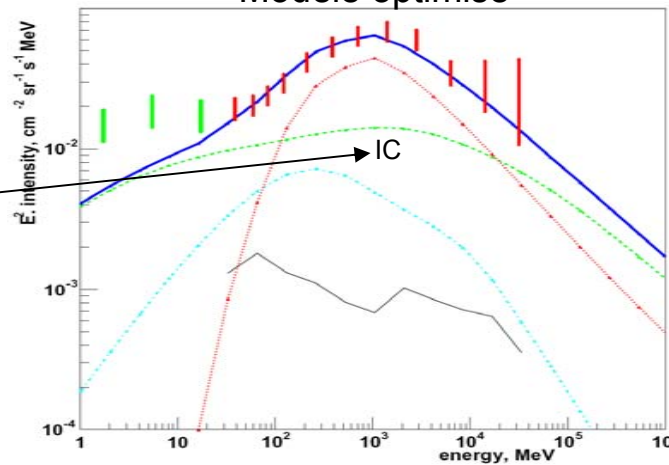
- données H I et CO
- $H_2$  (facteur  $X_{CO}$ )
- ISRF
- IC anisotropique



Modèle conventionnel



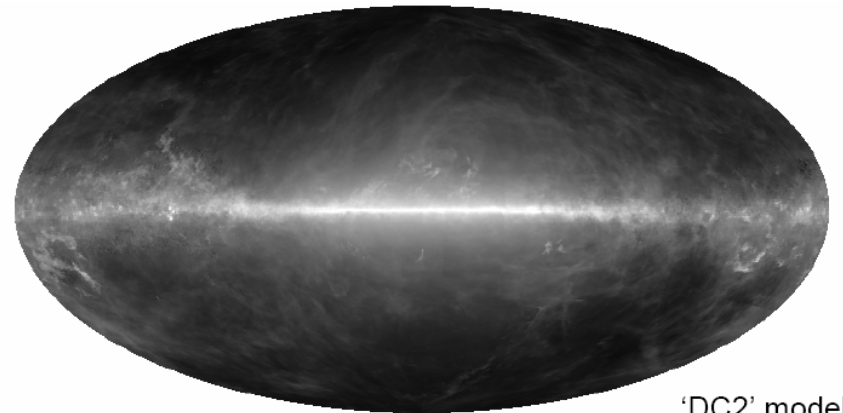
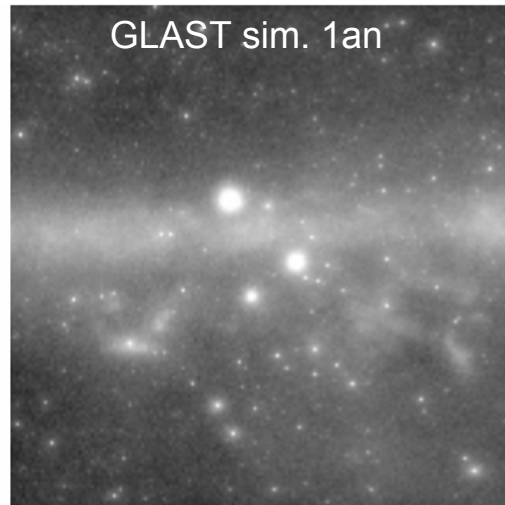
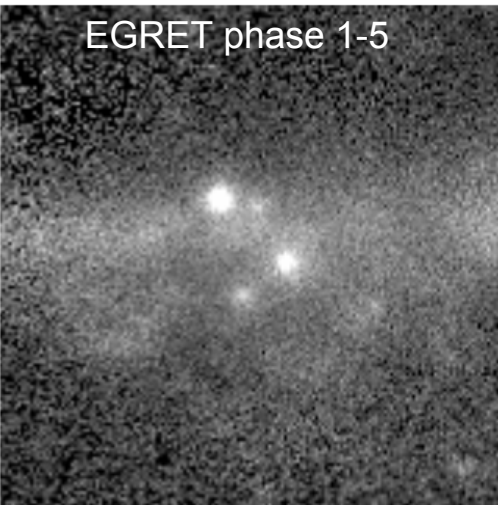
Modèle optimisé



Digel, Moskalenko,  
Porter, Reimer,  
Strong



# Le fond diffus avec GLAST

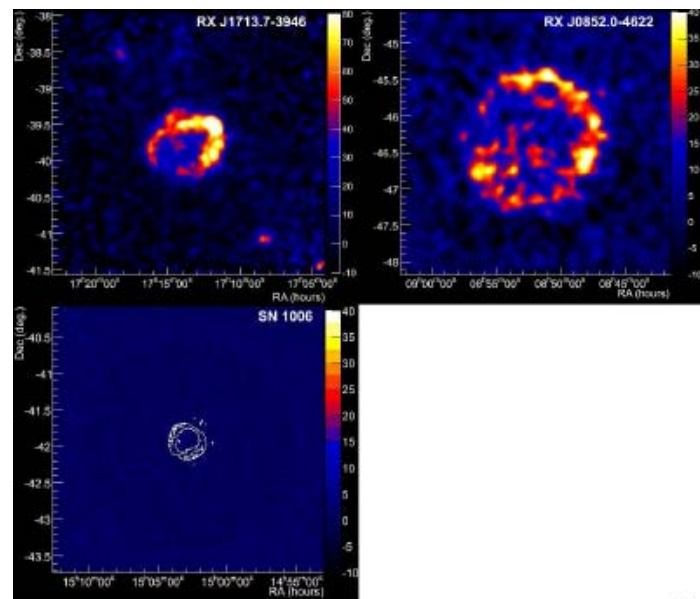
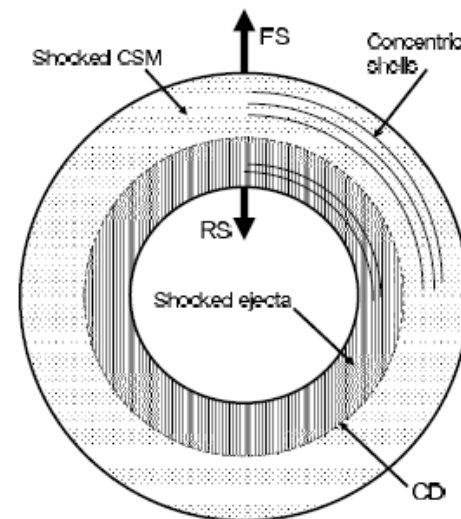


'DC2' model

- 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

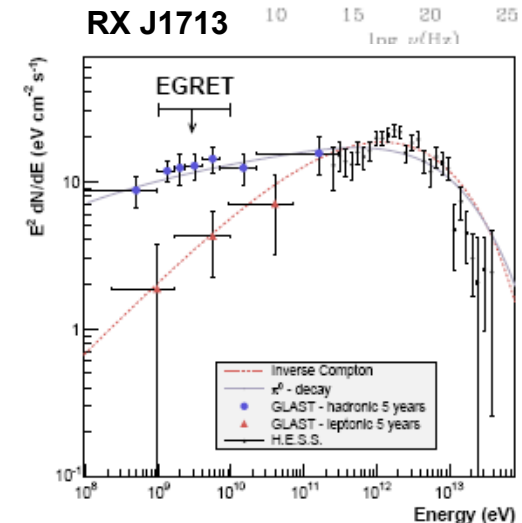
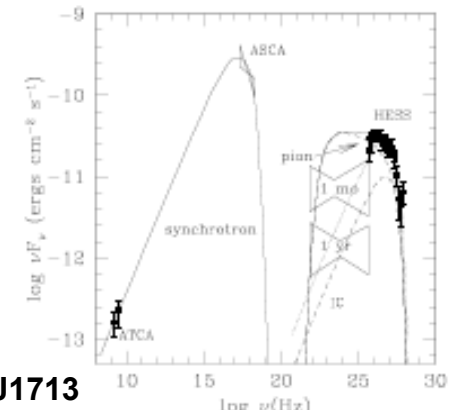
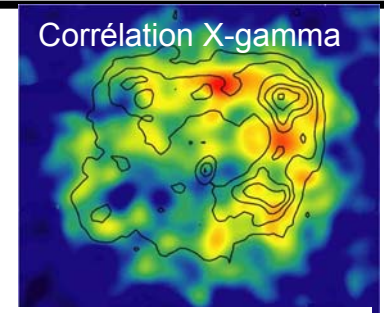
# Les restes de supernovae

- 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



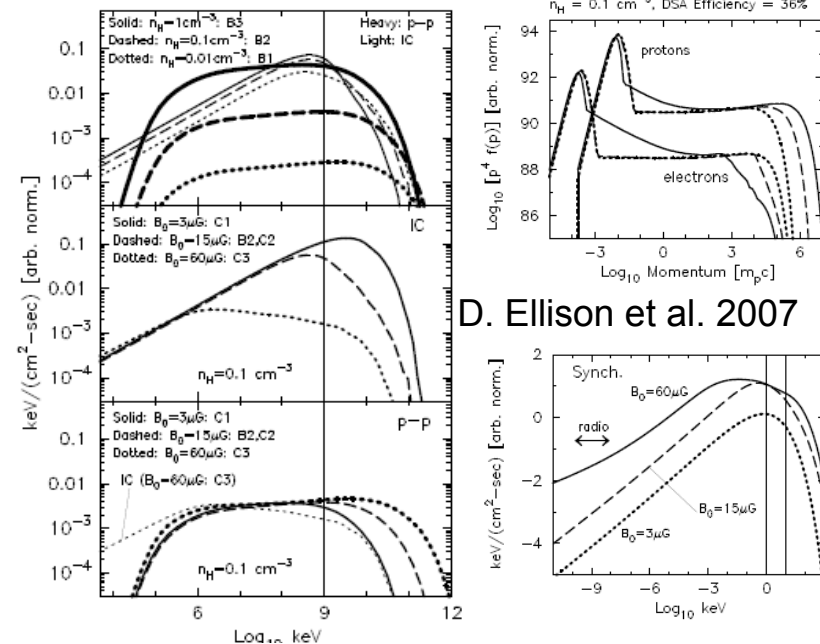
# Origine de l'émission gamma

- 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)

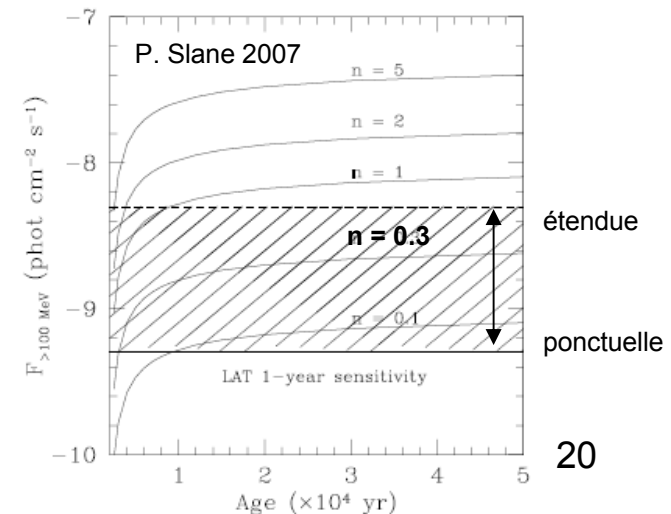


# Origine de l'émission gamma

- 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



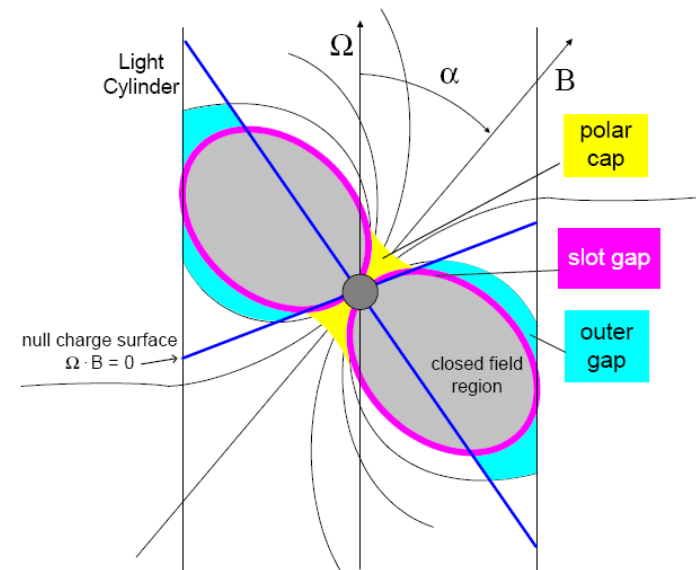
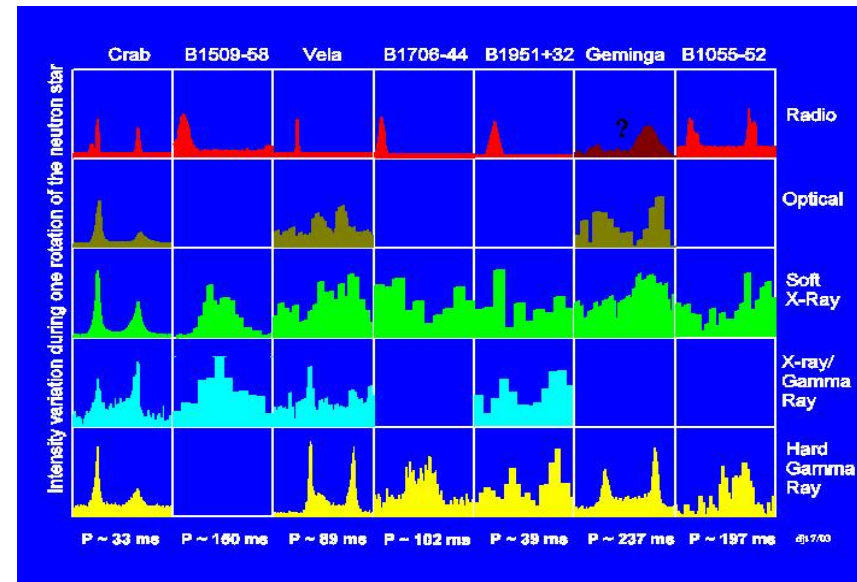
P. Slane 2007

- 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

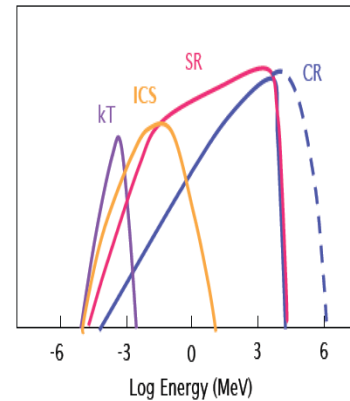
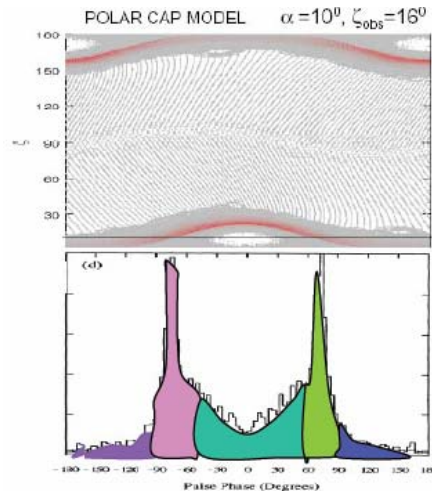
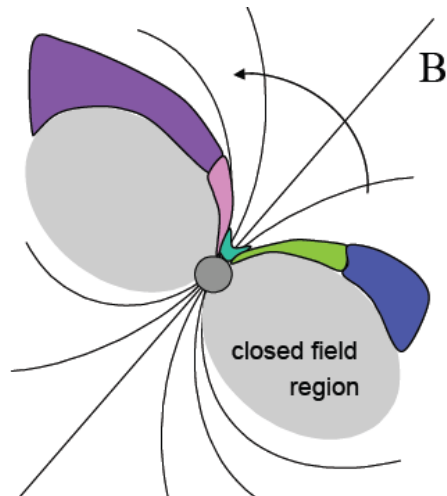


# Les pulsars

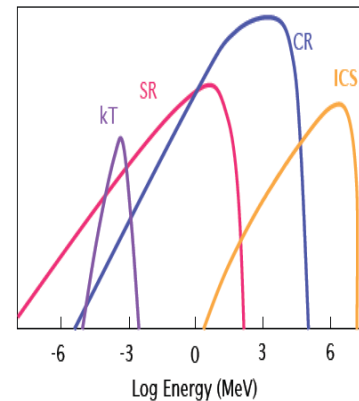
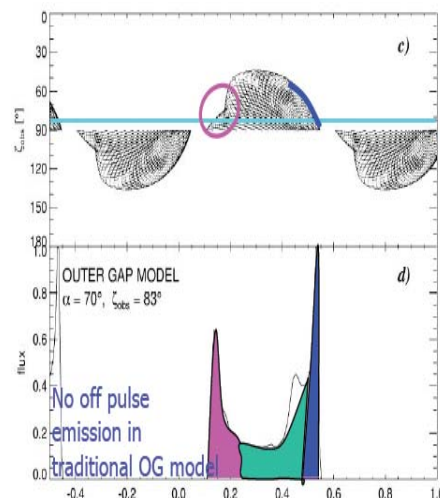
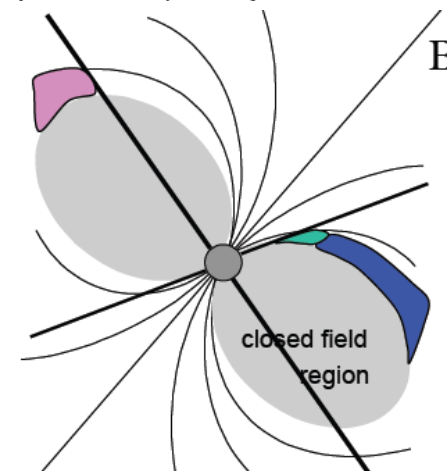
- EGRET a vu 7 pulsars (+3)
- Profil typique à deux pics
- 3 types de modèles en fonction de la zone d'accélération :
  - Polar cap
  - Slot gap
  - Outer gap
- Différents processus en jeu :
  - Rayonnement de courbure
  - Rayonnement synchrotron
  - Compton inverse
  - Création de paire ( $\gamma$ -B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



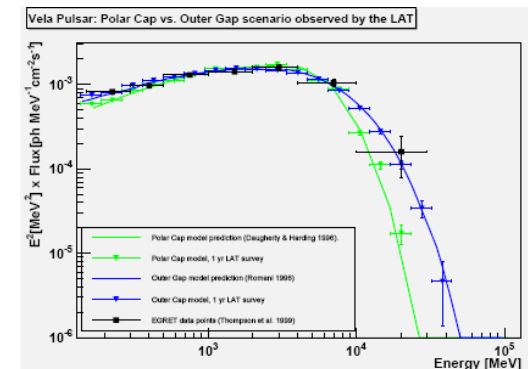
# Profils et spectres des pulsars



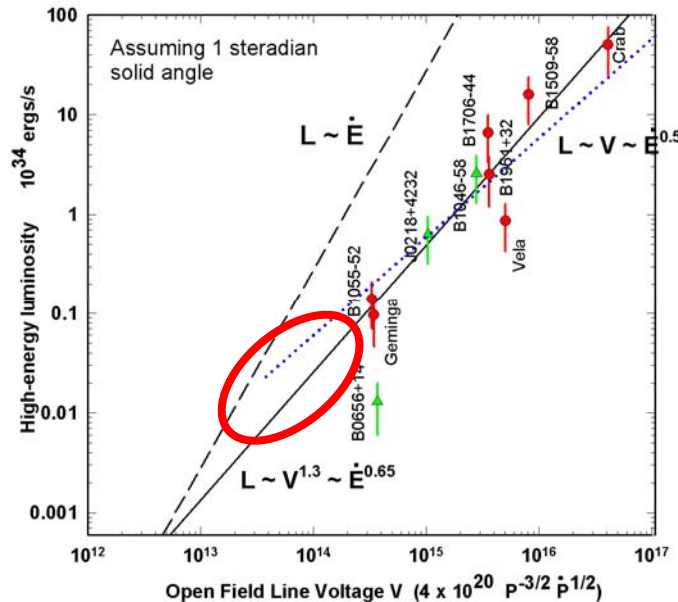
A. Harding



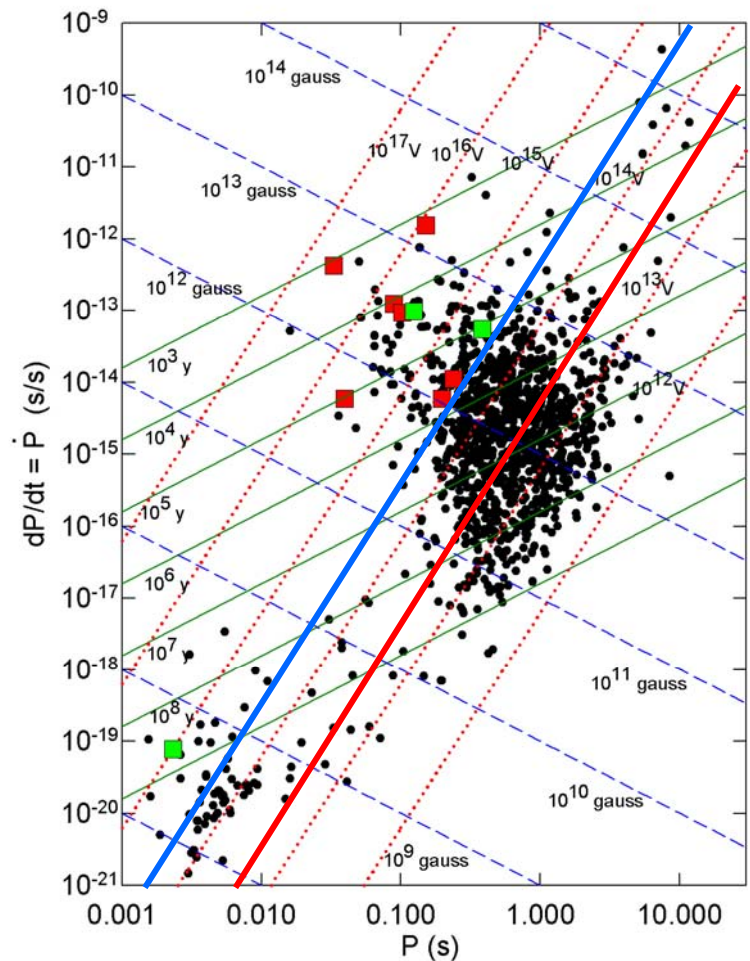
GLAST obtiendra des profils et des spectres (moyennés et résolus en phase) plus précis  
 -> meilleure connaissance des zones d'accélération et des mécanismes d'émission gamma



# Plus de pulsars avec GLAST



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



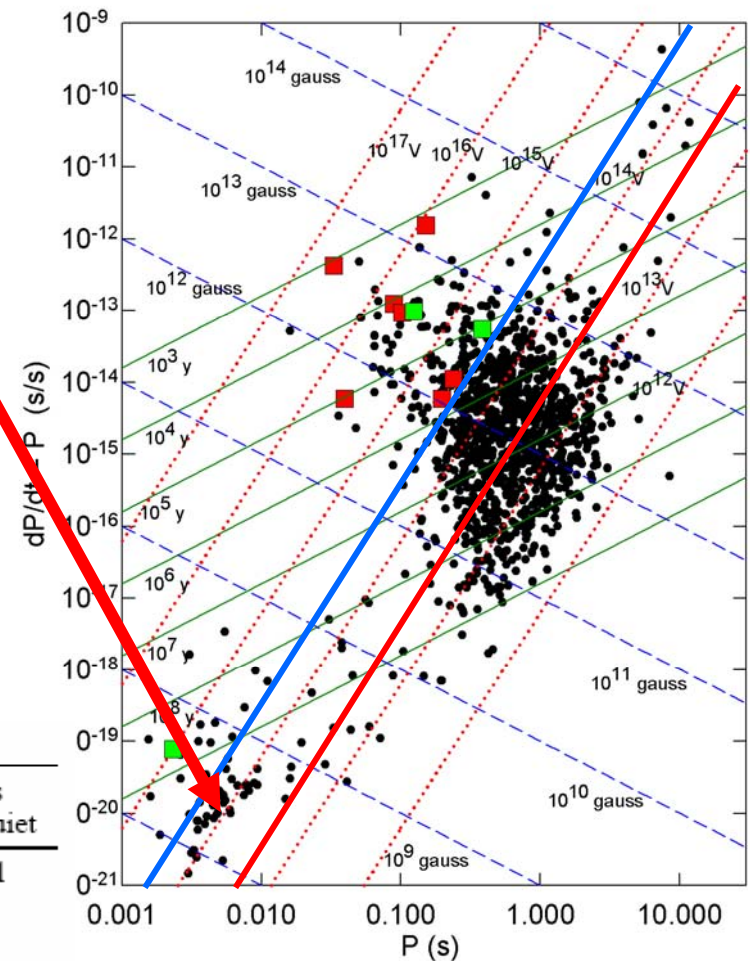
- Etude de population : en fonction des paramètres des pulsars (la période, l'âge, l'intensité,...)

# Plus de pulsars avec GLAST

- Des pulsars milliseconde ?
  - champ magnétique moins élevé
  - moins de création de paire ( $\gamma$ -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		



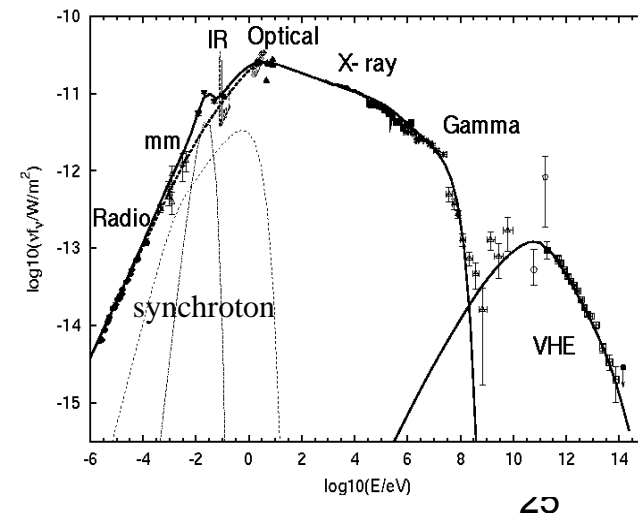


# Les nébuleuses de pulsars

- 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  $\sim 160$  G  $\rightarrow$  émission synchrotron importante  $\rightarrow$  photons cibles pour le Compton inverse

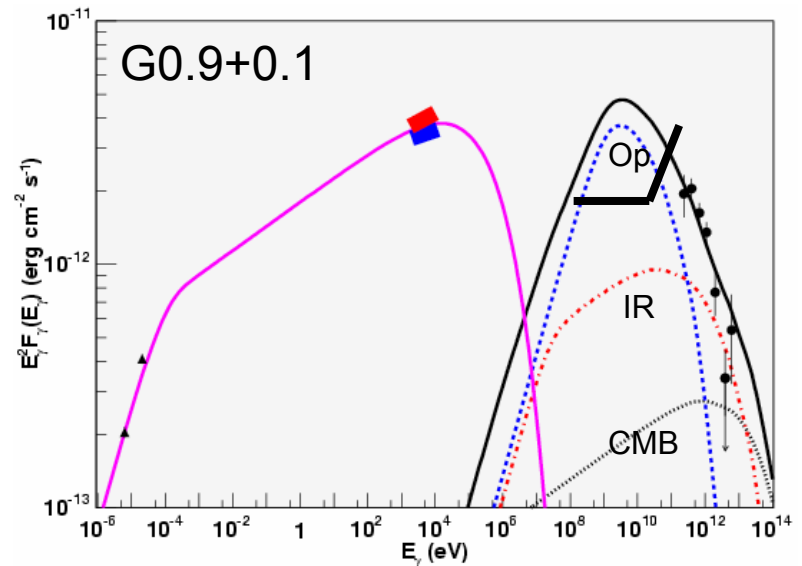
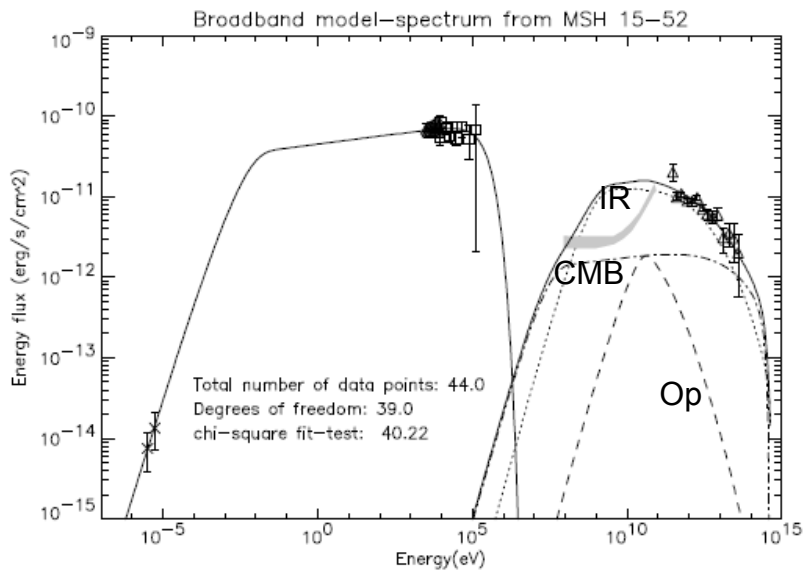
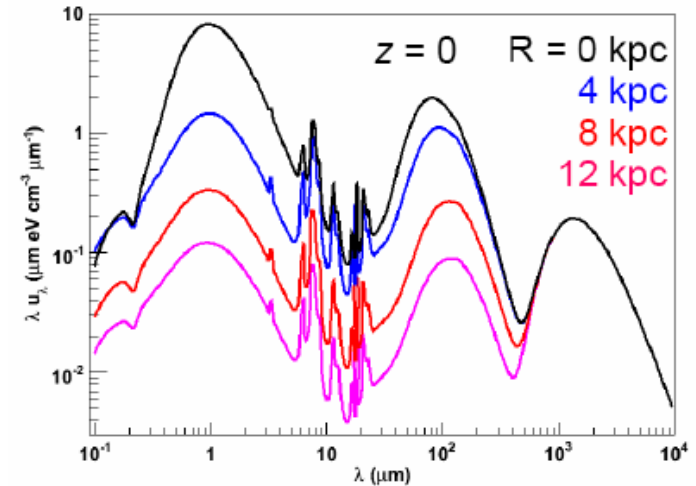


*Radio, optical, X-rays*



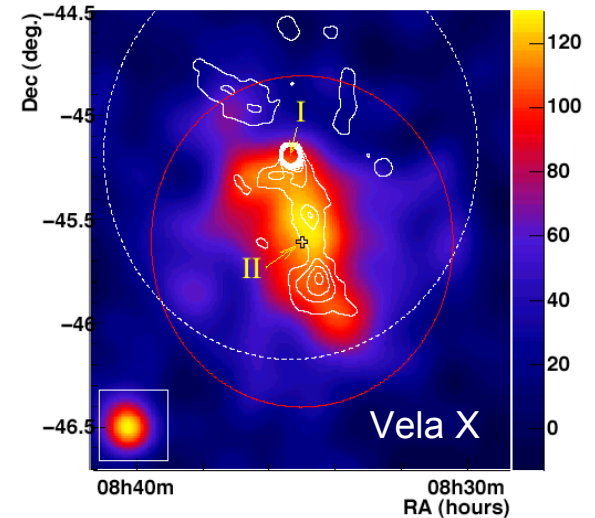
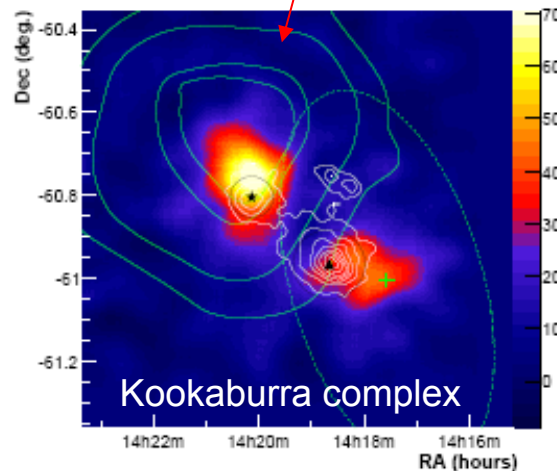
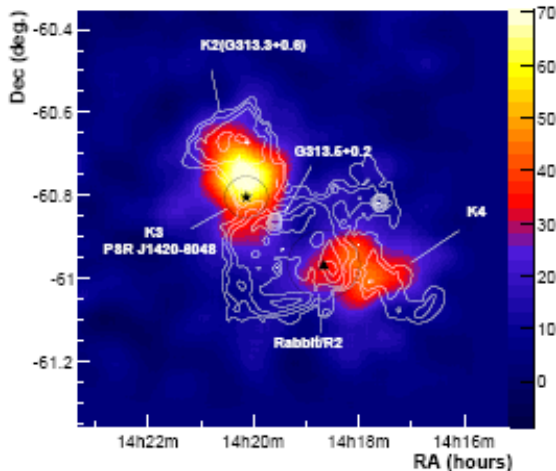
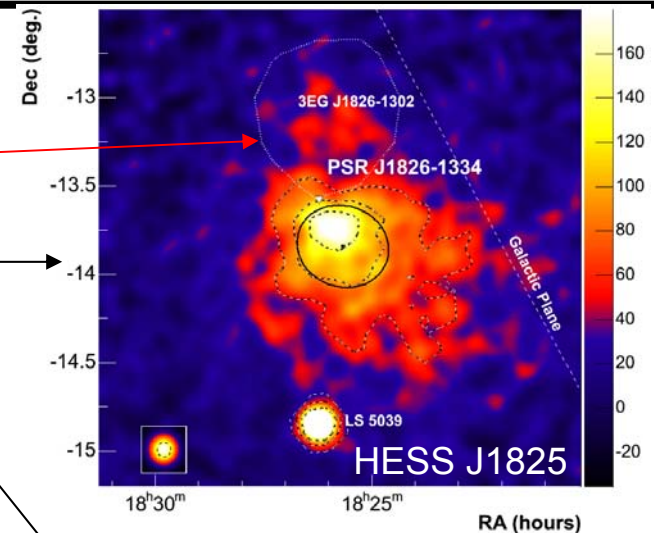
# Modèle leptonique 1 zone

- 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



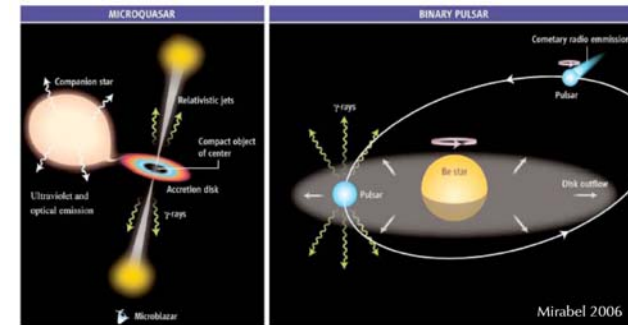
# Avec GLAST

- 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

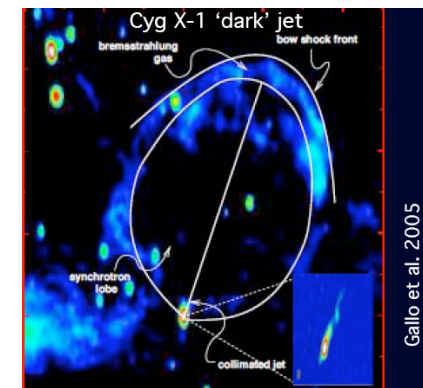
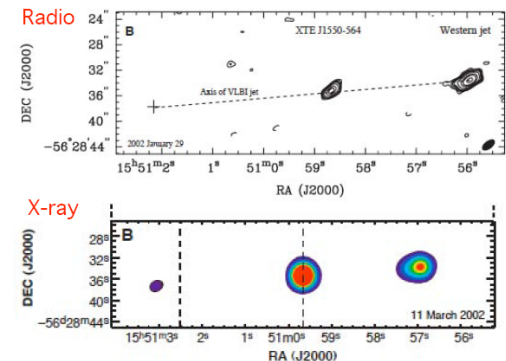


# Binaires X, binaires gamma, microquasars

- 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 ?)



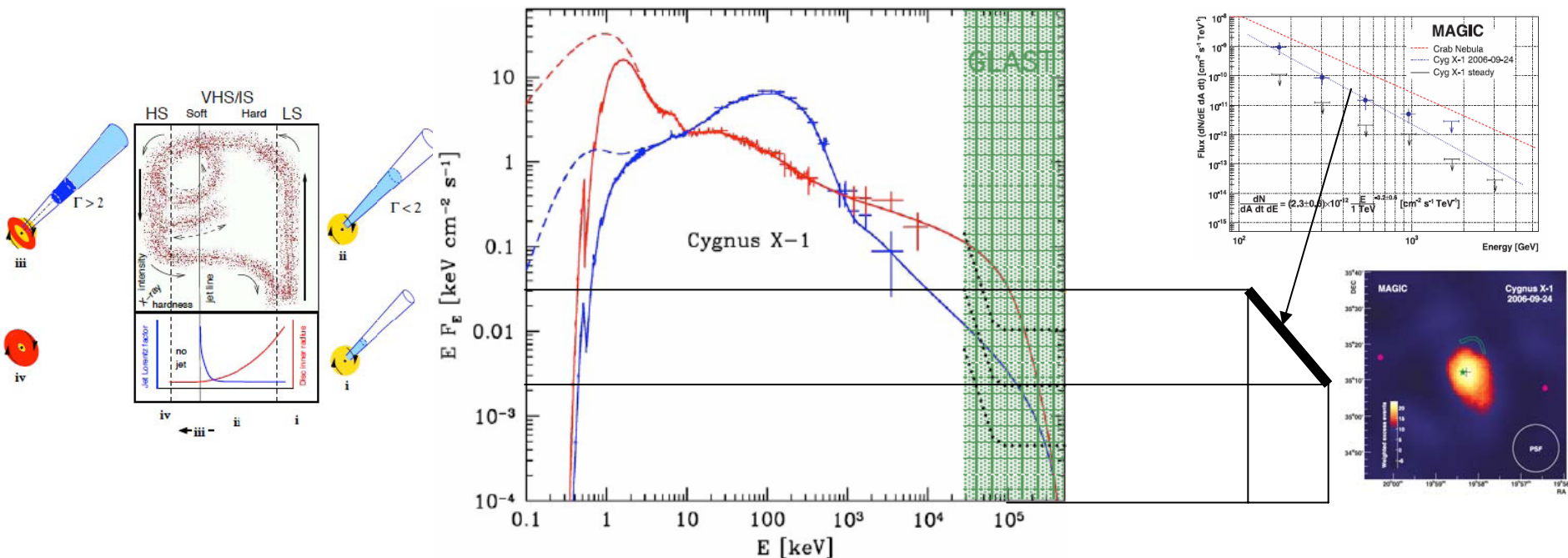
Corbel et al. 2002



Gallo et al. 2005

# Emission proche de l'objet compact

- Queues à haute énergie  $\sim 10$  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

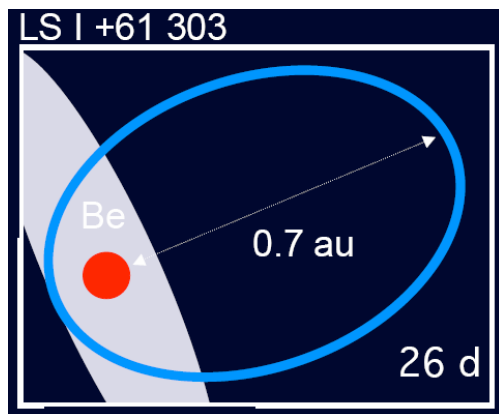




# Binaires gamma

- 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)

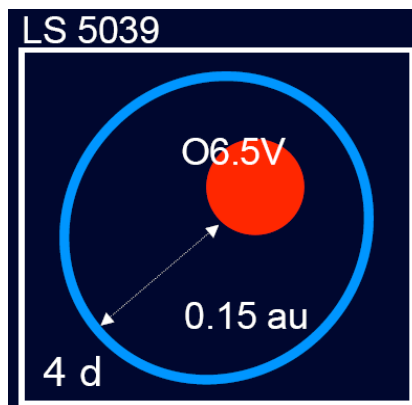
EGRET + MAGIC



GLAST : en ~2 mois

10-15 septembre 2007

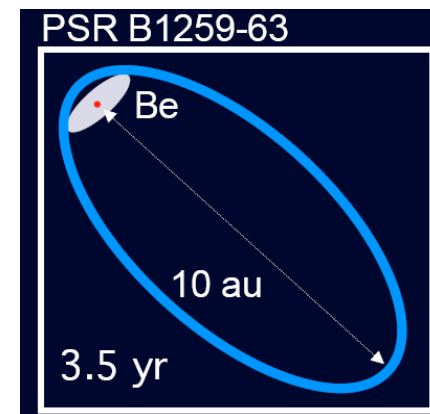
EGRET + HESS



GLAST : en ~1 an

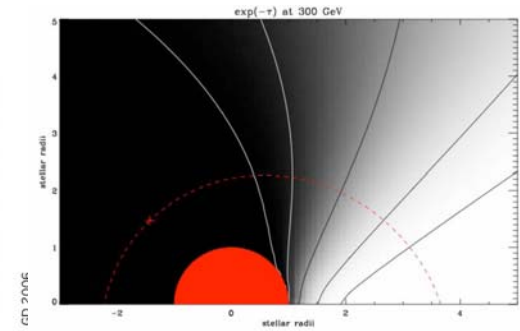
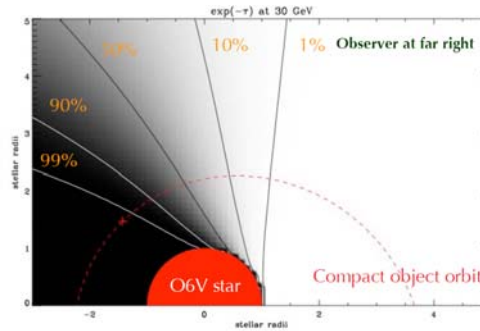
Ecole de physique des  
astroparticules

HESS

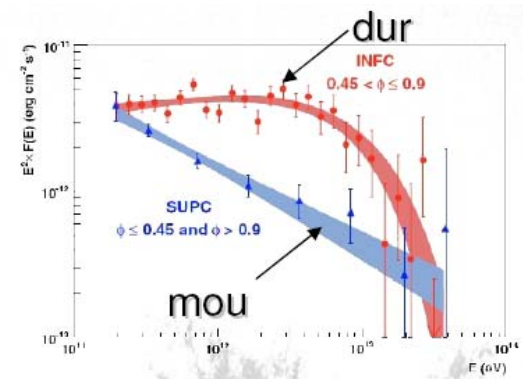
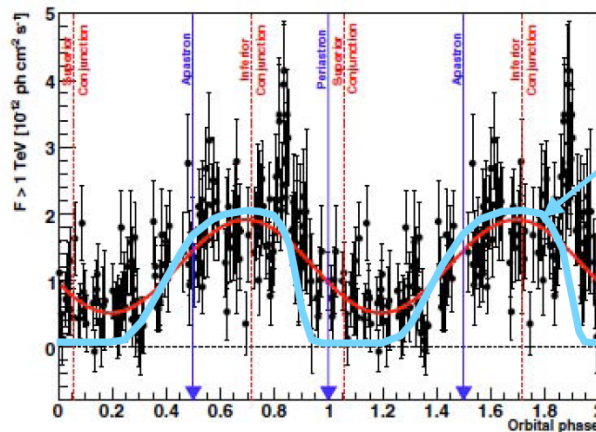
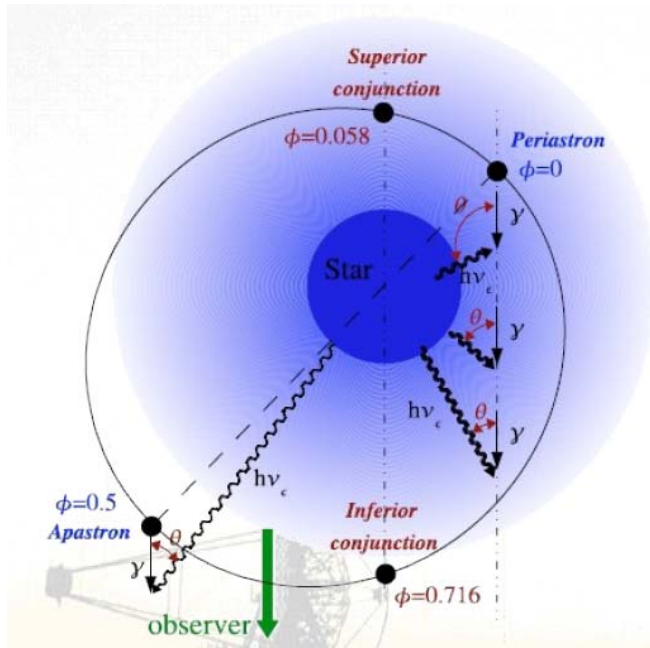


# LS 5039

- 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



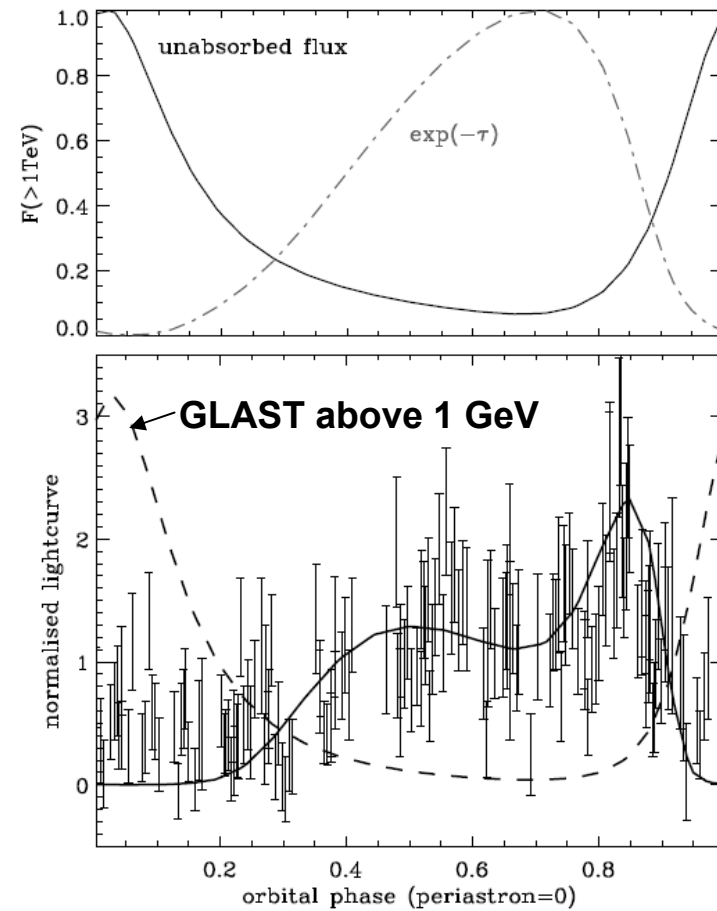
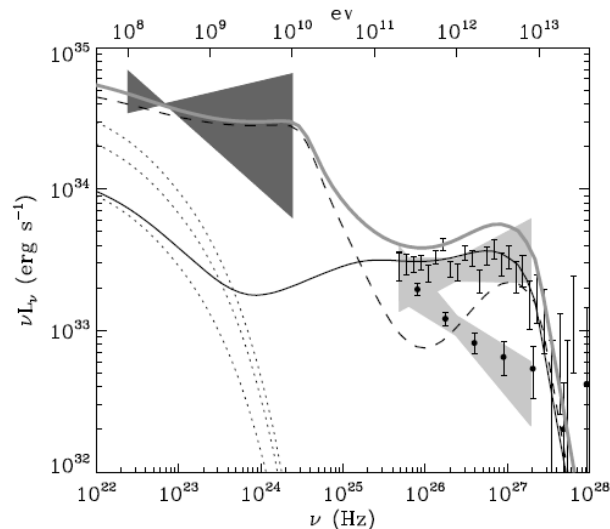
10-15 septembre 2007

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  $\sim 1$  an

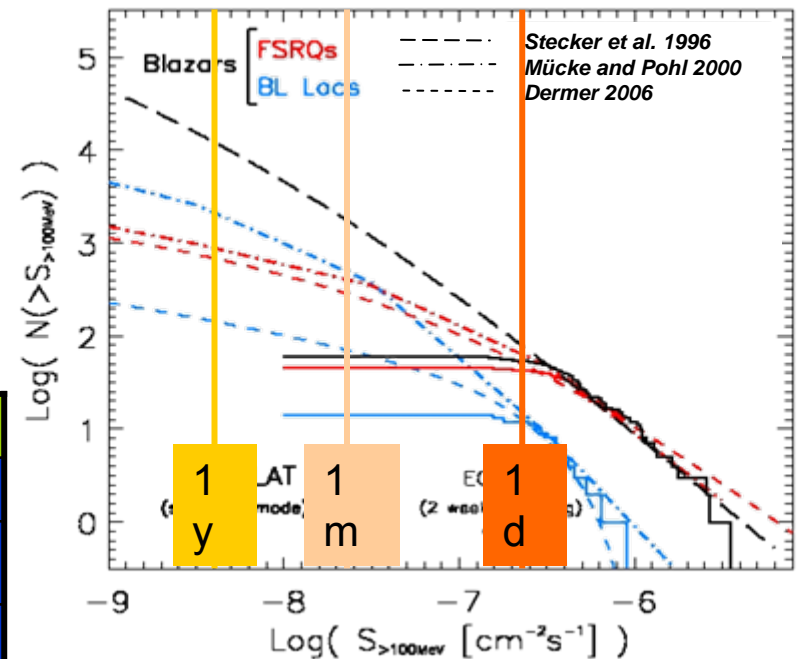


Dubus et al. 2007, Soumis a A&A

# 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 :

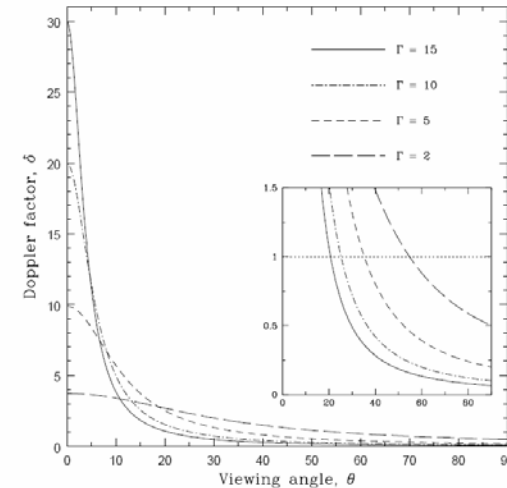
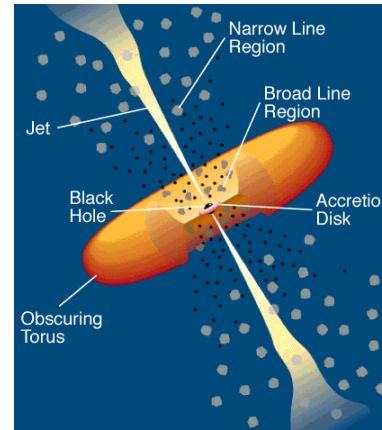
Time	FSRQ	BLLac
1 d	~60	~15
1w	150-200	50-150
1m	250-400	70-500
1y	800-1000	200-2000



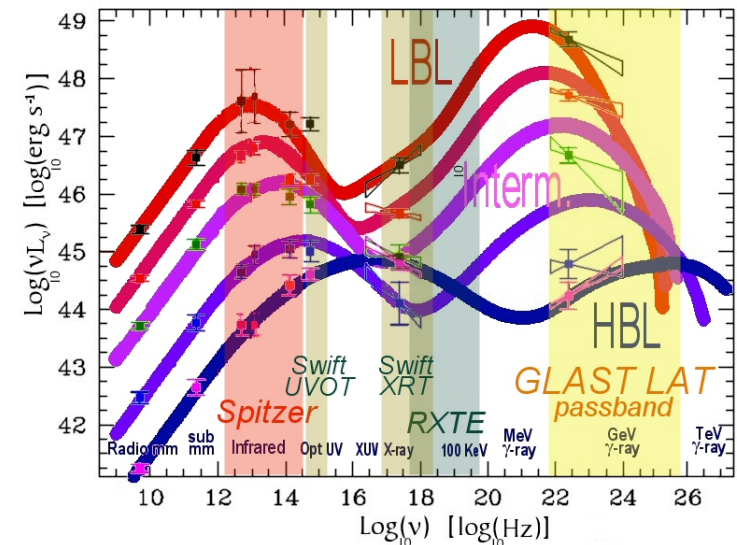


# Les blazars

- 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

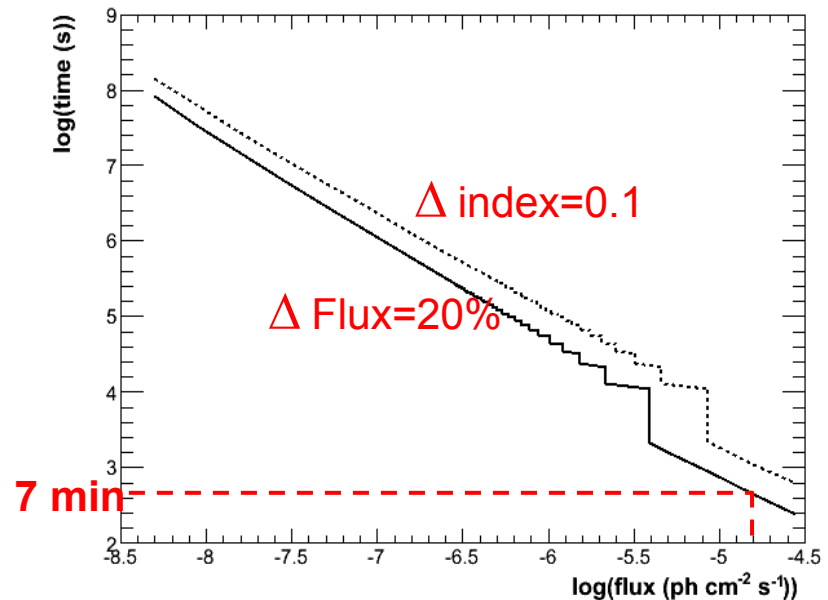
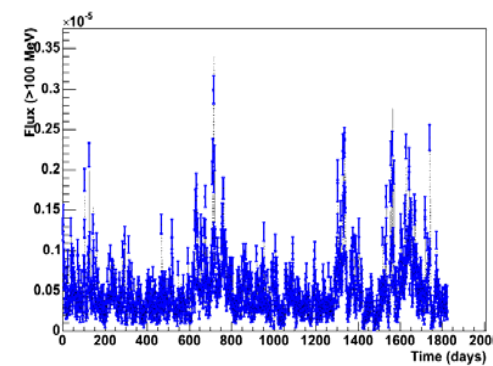
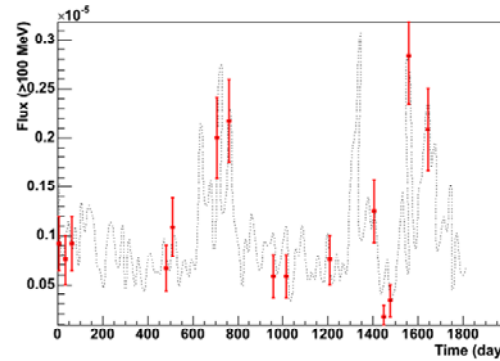
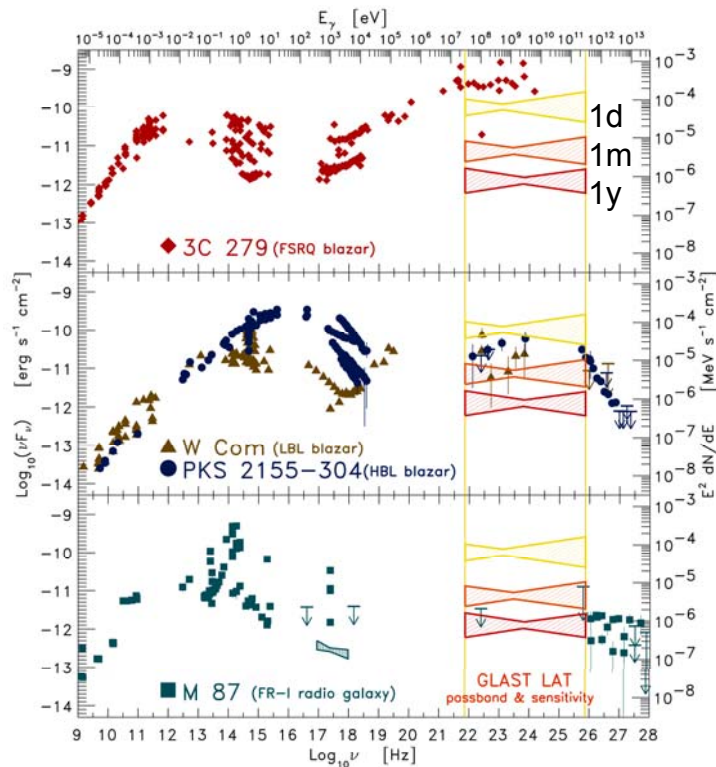


Fossati et al.(1998), Donato et al. (2002)



# Plus grande sensibilité

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

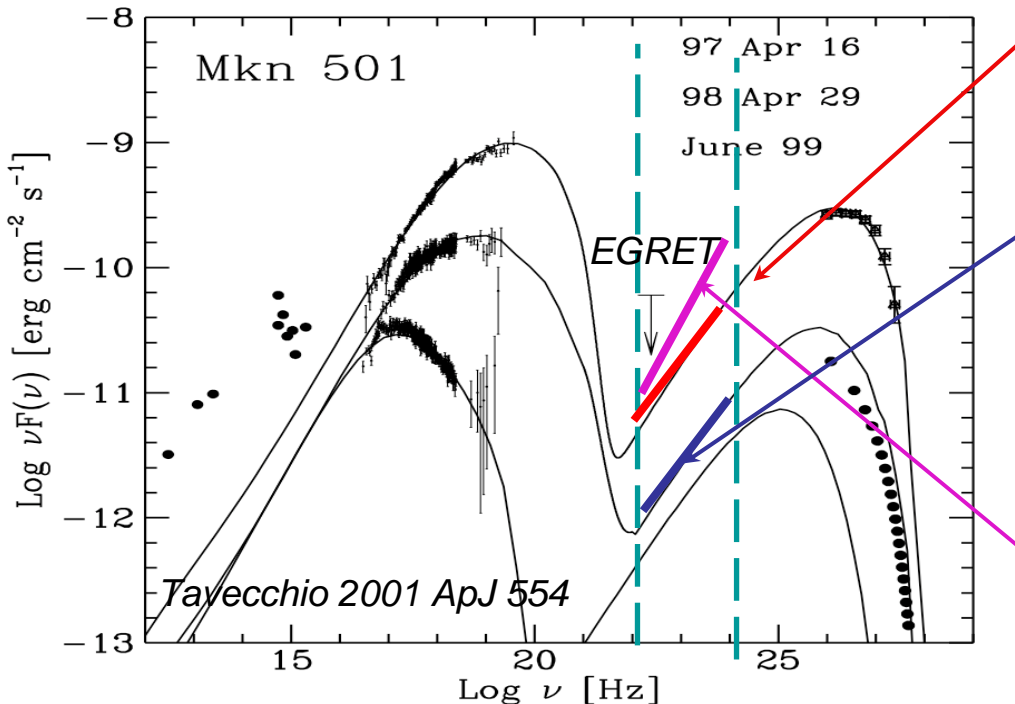


B. Lott

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  $\sigma$  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  $\sigma$  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  $\sim 5$  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  $\sigma$  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/cm<sup>2</sup>/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

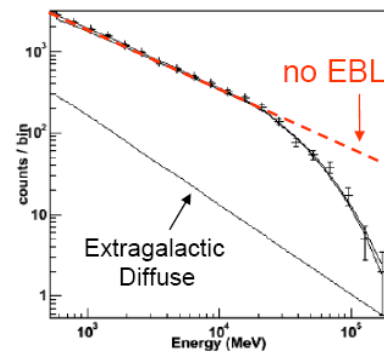


# Rayonnement diffus extragalactique

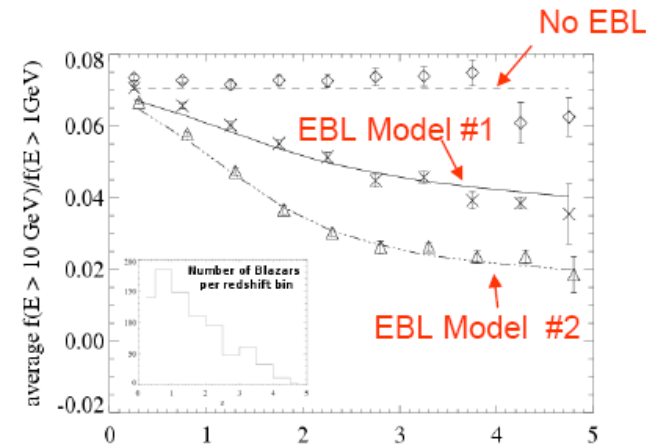
Atténuation des photons  
au GeV par interaction  $\gamma$ - $\gamma$ :  
sensibilité au **rayonnement**  
**optique-UV**

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

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

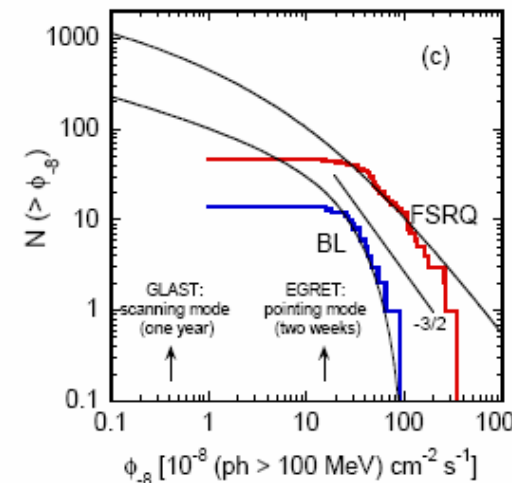
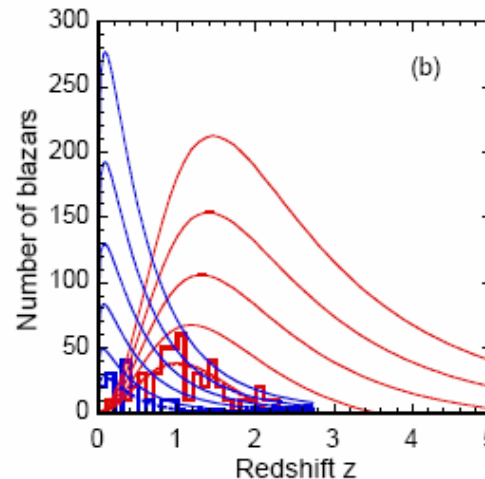
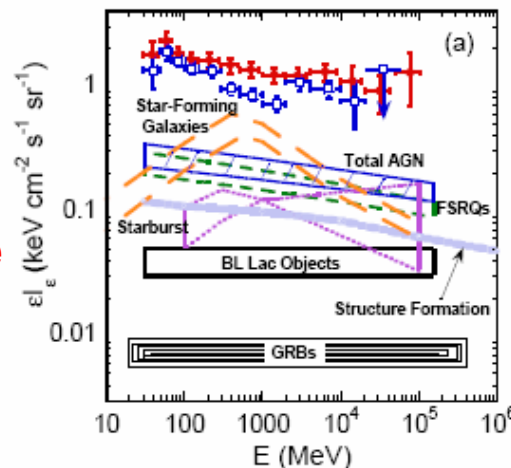


L. Reyes



C. Dermer

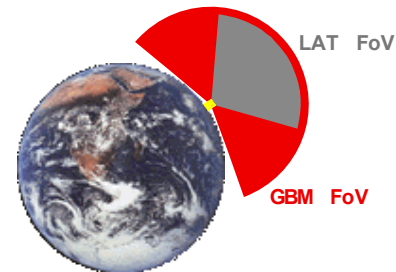
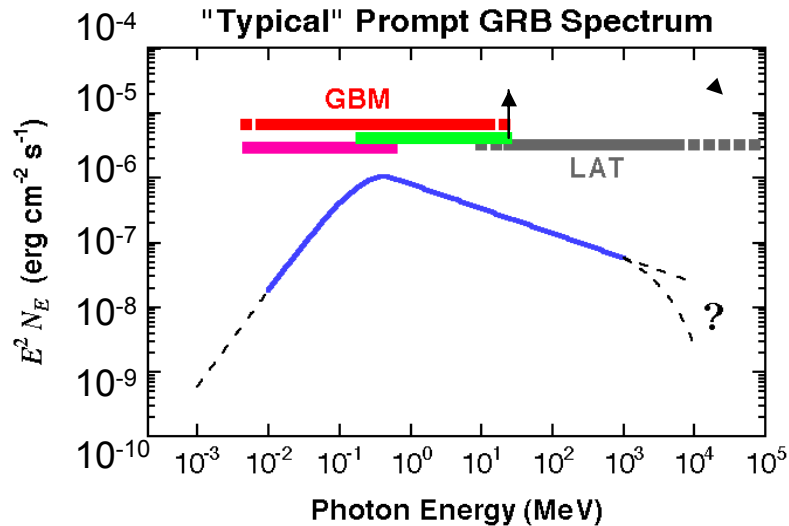
Mesure du  
**rayonnement**  
**Gamma**  
**extragalactique**



# 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 /  $5^\circ$  en 30 min
    - spectroscopie
  - 2 détecteurs BGO (de 150 keV à 30 MeV)
    - spectroscopie

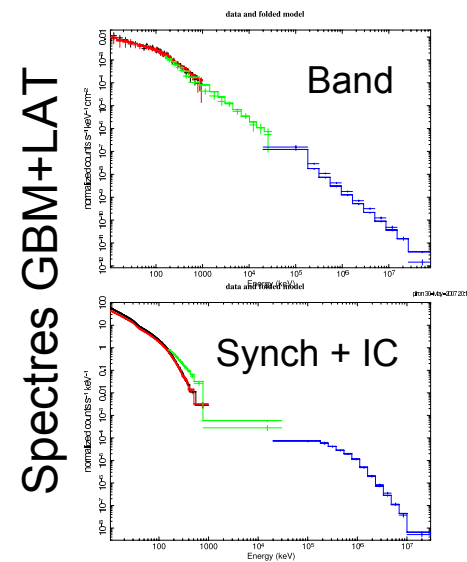
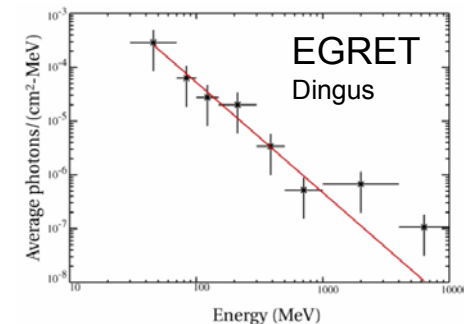


10-15 septembre 2007

Ecole de physique des  
astroparticules

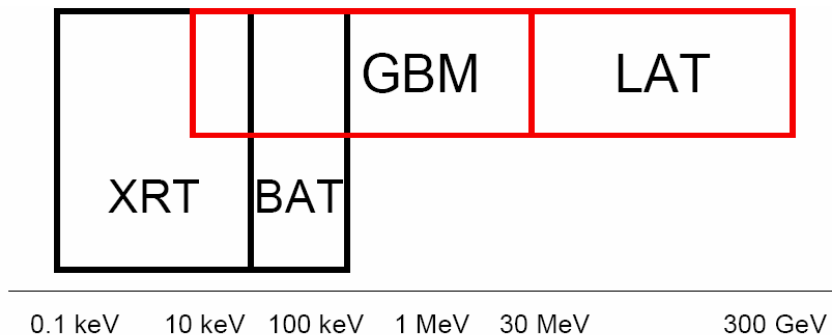
# Les GRB vus par GLAST

- 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  $\sim 2$ 
  - 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

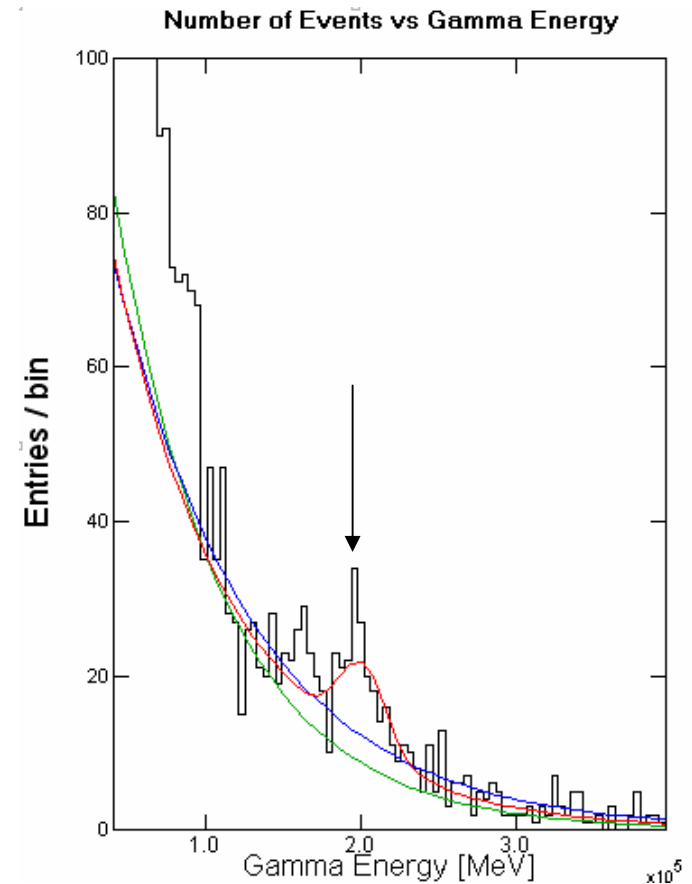
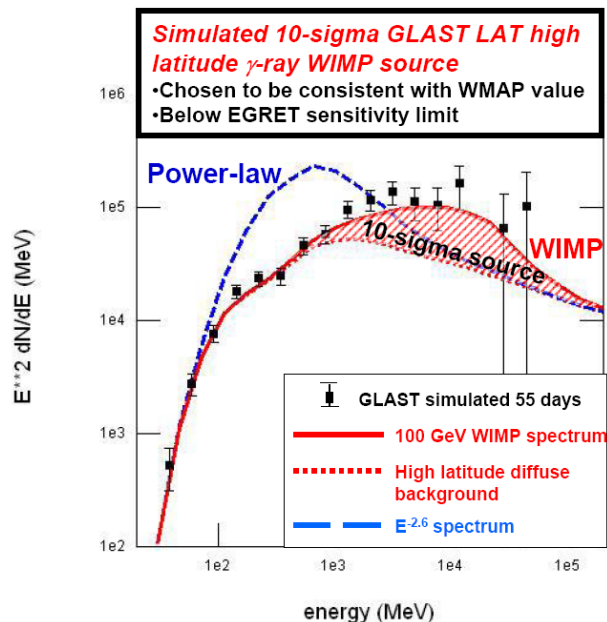
- Maximiser le suivi en passant en mode pointé pendant ~5 heures
  - 1 fois par semaine quand le burst est dans le champ de vue du LAT (quasiment tous)
  - 1 fois par mois quand le burst n'est pas dans le champ de vue du LAT (~1/10)
- Collaboration Swift/GLAST :
  - Swift pointera sur les alertes lancées 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  $\sim 30$  MeV à  $\sim 300$  GeV (x25 en sensibilité)
- $\sim 9000$  sources (?)
- Importance de l'analyse multi-longueur d'onde