

Les photons gamma de haute énergie ou les portes du ciel extrême

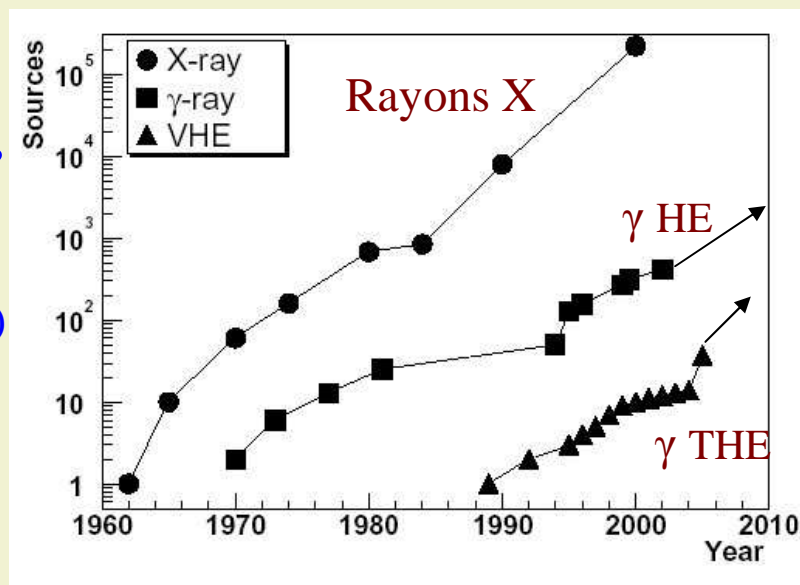


Les photons γ de haute énergie sont des messagers privilégiés pour **identifier et modéliser** les accélérateurs cosmiques

- Propagation en ligne droite (\neq rayons cosmiques chargés)
- On dispose maintenant de détecteurs suffisamment sensibles et de **résolution angulaire souvent meilleure que 0.1°**
- Cette résolution est essentielle pour identifier la source par une “**contrepartie**” à d’autres longueurs d’onde
- La modélisation passe par la connaissance du spectre à bande large allant **de la radio aux gamma de très haute énergie**

→ D’importants progrès ces dernières années

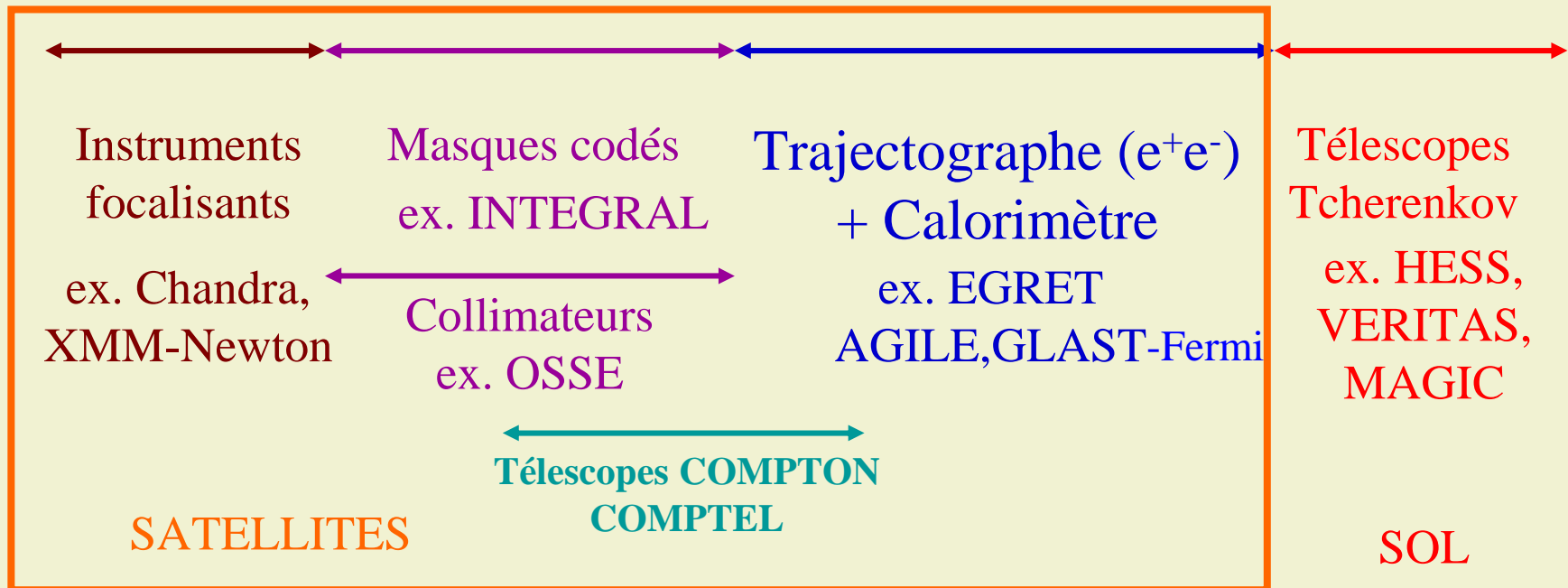
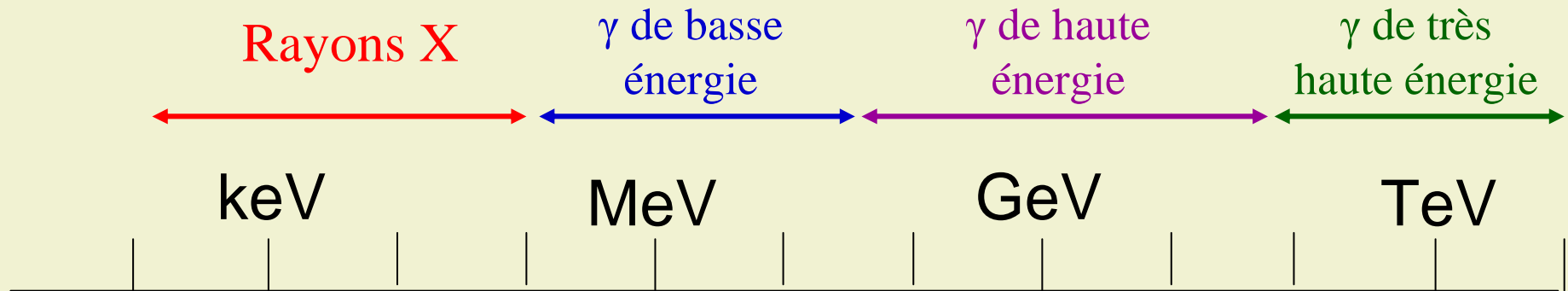
- ❖ satellites (γ de haute énergie : HE)
- ❖ détecteurs au sol (γ de très haute énergie : THE)



Les photons gamma de haute énergie

- Une instrumentation de plus en plus performante
- Un choix de résultats en astrophysique
- À la recherche de « nouvelle physique »
- Vers de nouveaux observatoires « gamma »

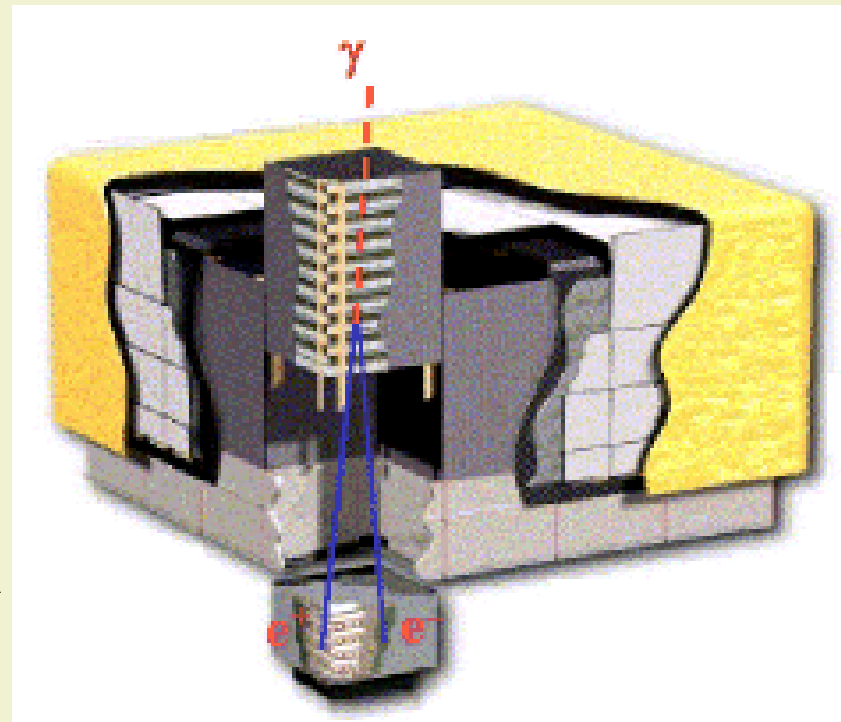
1. Une instrumentation de plus en plus performante



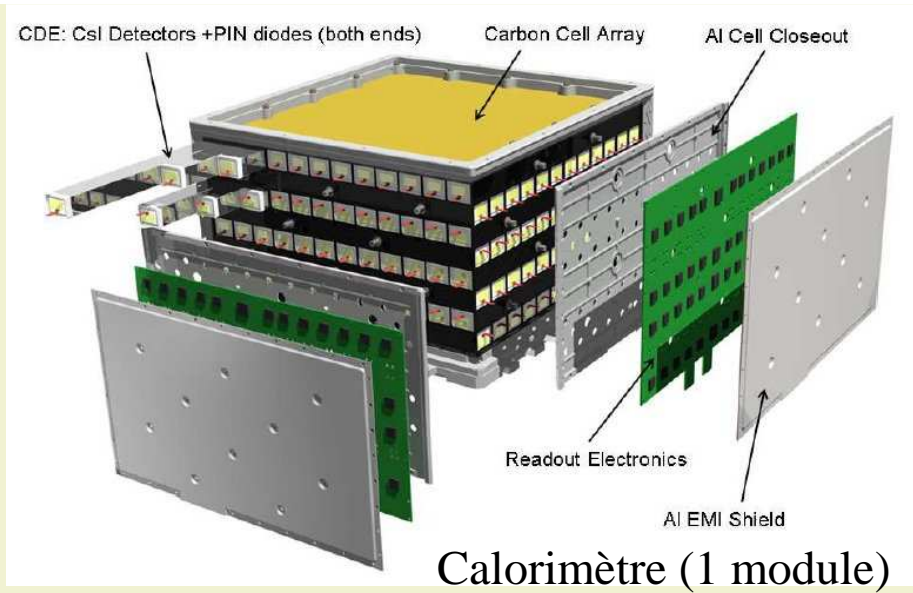
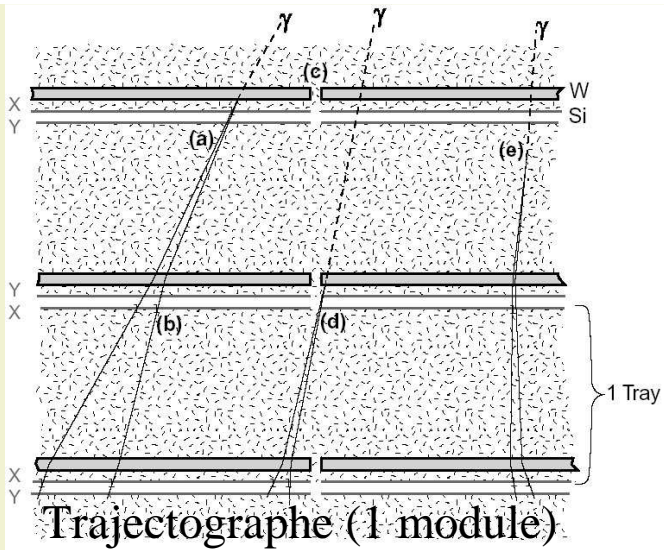
1.1 Le domaine des hautes énergies (30 MeV-300 GeV) : satellites AGILE et Fermi Gamma-ray Space Telescope

Trois composantes dans l'instrument

- **Dôme antikoïncidence**
→ élimine les particules incidentes chargées
- **Trajectographe** : empilement de plaques de matériau (W, Pb) pour la conversion du γ en paire e^+e^- et de plans de détecteur à pistes de silicium (18 plans pour Fermi)
→ mesure de direction
- **Calorimètre** (CsI (Tl), $10 X_0$ pour Fermi) → mesure de l'énergie



Large Area Telescope (LAT) du
satellite FGST ex GLAST (NASA) :
lancé en Juin 2008



B. Degrange

Fermi γ -ray Space Telescope

arXiv
0902.1089



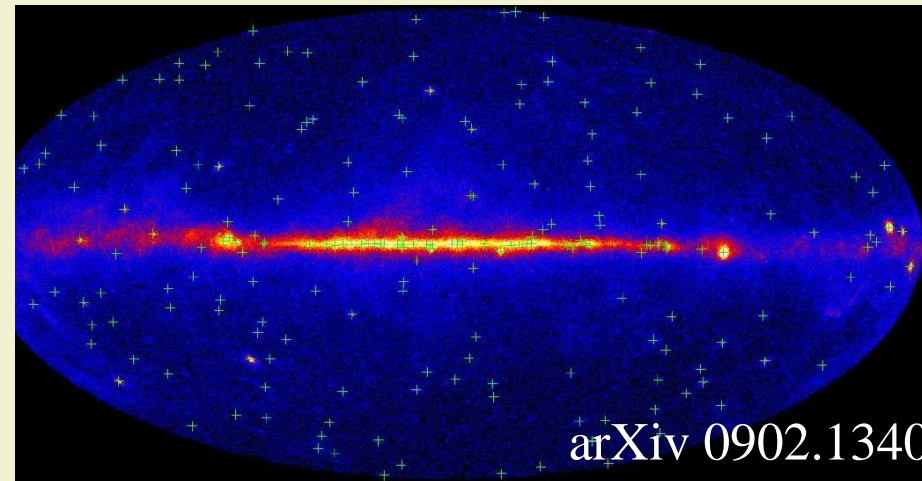
D'EGRET (1991-2000) au télescope spatial Fermi (LAT)

- Très grand champ de vue (2.4 sr): le ciel est complètement couvert en 3 heures
- Gain en résolution angulaire (en moyenne $\times 3$ meilleure qu'EGRET)
- Grande surface effective (1 m²) ($\times 5$ meilleure qu'EGRET)
- Domaine d'énergie étendu (\rightarrow 300 GeV) : recouvrement partiel avec celui des expériences au sol \rightarrow complémentarité dans cette zone..
- Faible temps mort, essentiel pour l'étude des sursauts gamma aux hautes énergies (Des milliers de γ sont détectés en quelques secondes !)
- Le satellite comporte un détecteur spécialisé de sursauts gamma (GBM = Gamma-ray Burst Monitor 10 keV-10 MeV) qui donne l'alerte au LAT.



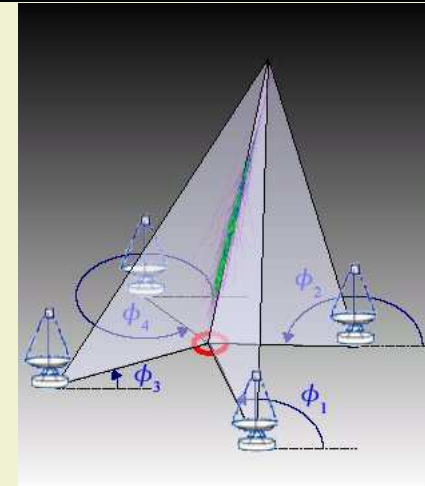
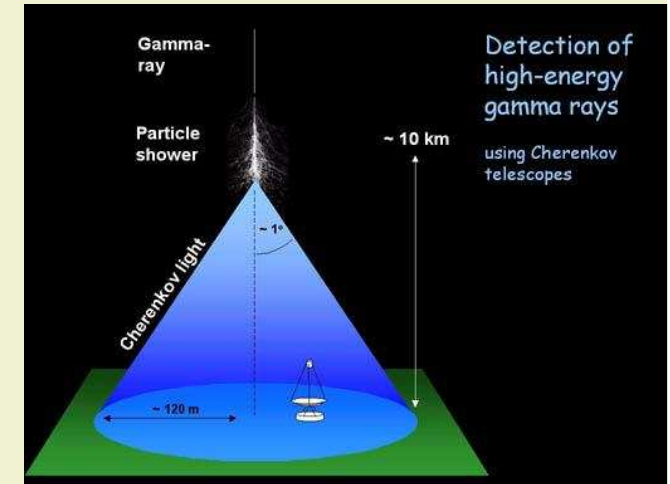
B. Degrange

Au bout de 6 mois, 205 sources brillantes ($>10\sigma$)

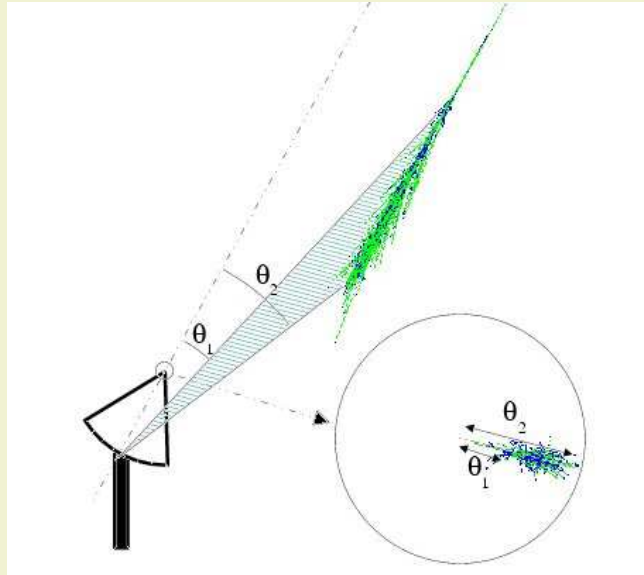


1.2 Le domaine des très hautes énergies (50 GeV-50 TeV)

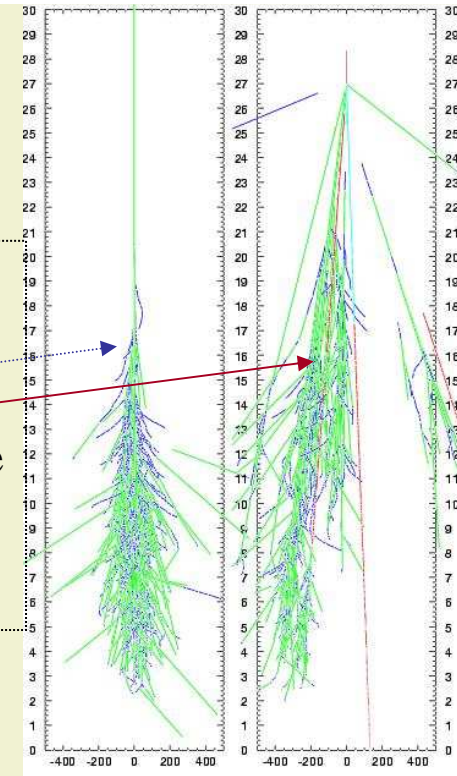
- Les γ interagissent dans la haute atmosphère \rightarrow **gerbe électromagnétique** détectée depuis le sol grâce à l'émission de **lumière Tcherenkov dans l'atmosphère**.
- La lumière Tcherenkov est émise par les électrons **ultra-relativistes** le long d'un cône étroit ($\theta < 1^\circ$) et illumine au sol une zone de **300 m de diamètre environ** à 1800 m d'altitude.
- Un télescope situé dans la zone éclairée détecte la gerbe s'il recueille un nombre suffisant de photons Tcherenkov \rightarrow **surface effective de détection** \sim quelques 10^5 m^2
- Avec un ensemble de plusieurs télescopes, **on peut reconstruire la gerbe en 3D (stéréoscopie)** \rightarrow nombre total de photons Tcherenkov (estimateur de l'énergie primaire)



Télescopes imageurs à effet Tcherenkov atmosphérique



Problème principal:
distinguer les gerbes
produites par les γ
et les gerbes hadroniques.
La sensibilité est surtout fixée
par la capacité à rejeter le
fond hadronique \rightarrow
Imagerie Tcherenkov



- On enregistre dans chaque télescope l'image de la gerbe en lumière Tcherenkov avec une caméra à grain fin dans le plan focal \rightarrow analyse (formes + directions des images)
- Bonne discrimination gamma-hadron particulièrement pour les ensembles stéréoscopiques (facteurs de rejet ≈ 10000 pour les sources ponctuelles)
- Résolution angulaire de 4' à 6' meilleure que celle des satellites gamma
- Mais ... champ de vue limité (5° de diamètre pour H.E.S.S.) \rightarrow on doit suivre une source dans son mouvement apparent sur le ciel.
- Mais ... ne fonctionne que par nuit claire sans lune (10% du temps)



VERITAS



CANGAROO III



MAGIC



HESS I

Expérience	Nombre de télescopes	Diamètre du réflecteur (m)	Site
CANGAROO III	4	10	Australia
HESS I (→II)	4→4 (+1 en 2010)	12 (28)	Namibia
MAGIC I→II	1 → 2	17	Canaries
VERITAS	4	12	Arizona

caméra
de
H.E.S.S.

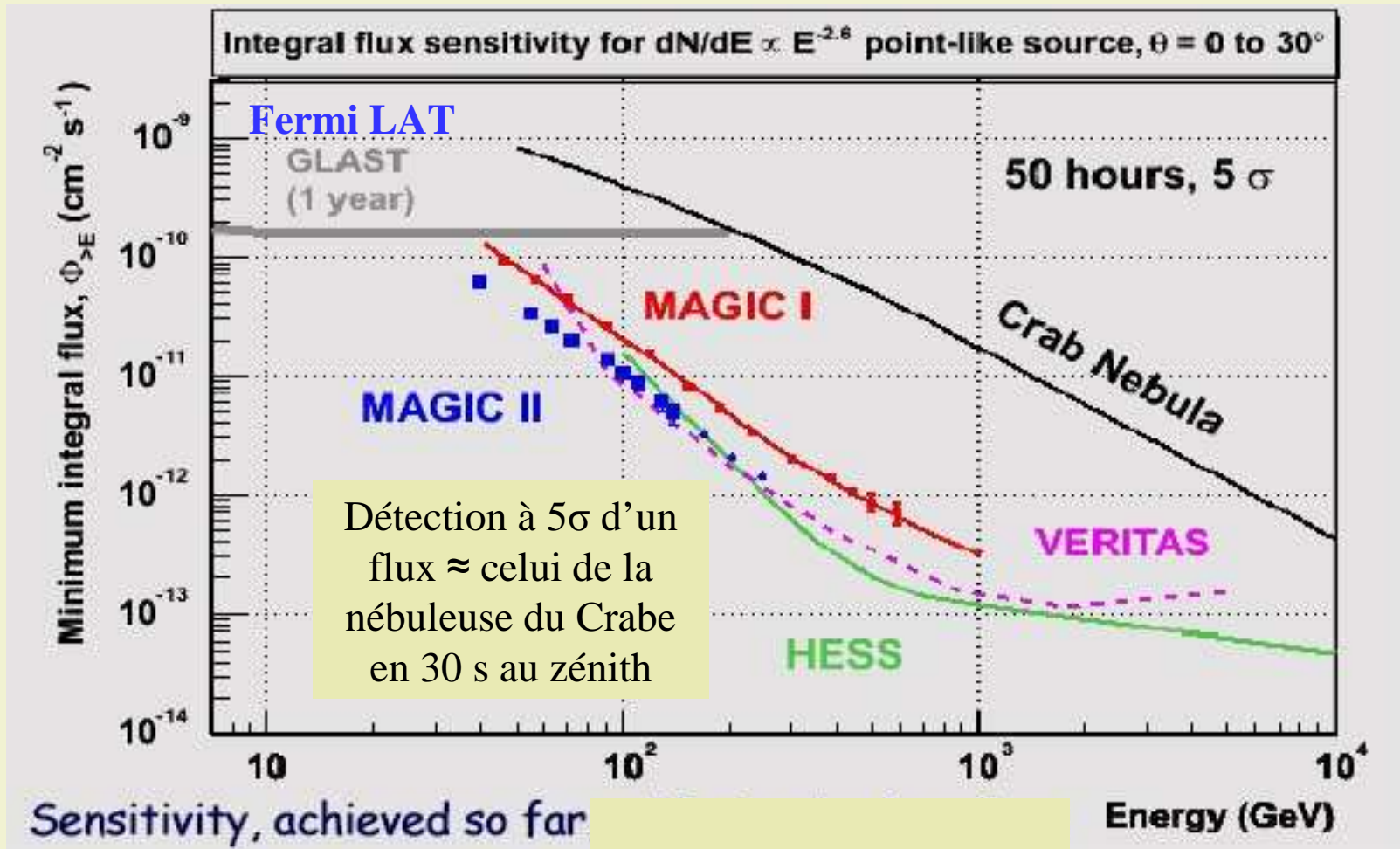


B. Degrange



caméra
de
MAGIC

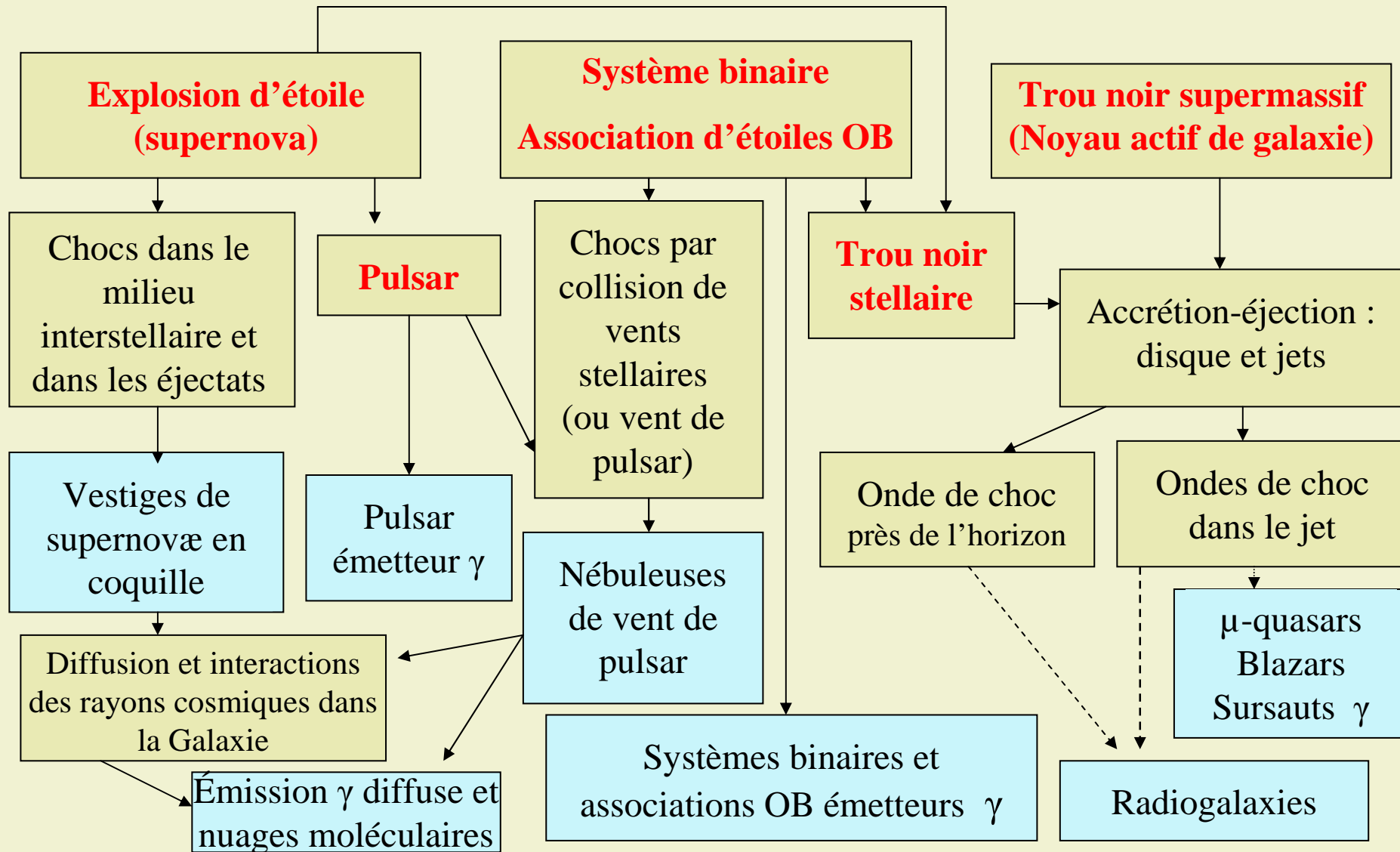
Les systèmes actuels de télescopes Tcherenkov atteignent une sensibilité de $0.01 \times$ flux de la nébuleuse du Crabe



2. Un choix de résultats en astrophysique

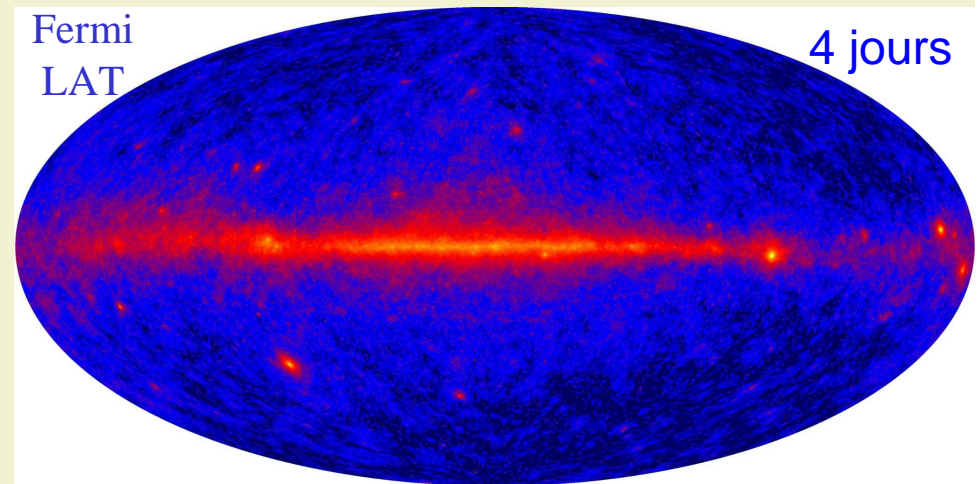
- La richesse du ciel gamma à haute énergie
- Les pulsars : des objets surtout étudiés par les satellites γ
- Quelques sources galactiques étendues : des objets surtout étudiés par les télescopes Tcherenkov
- Les blazars : des objets extragalactiques étudiés à la fois par les satellites γ et les télescopes Tcherenkov

2.1 La richesse du ciel gamma connu aujourd'hui ($E > 100$ MeV)

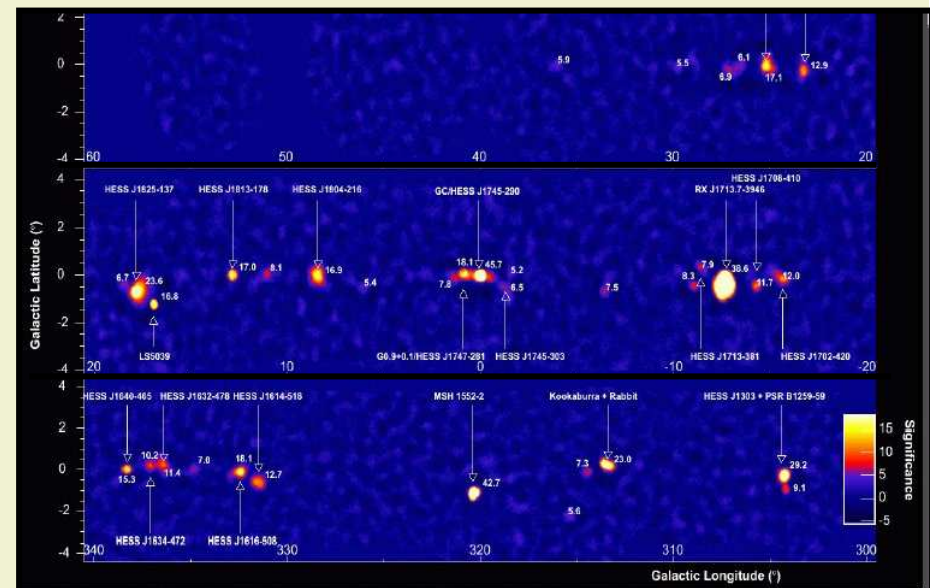


Un contraste entre les deux domaines d'énergie : le fond γ diffus galactique

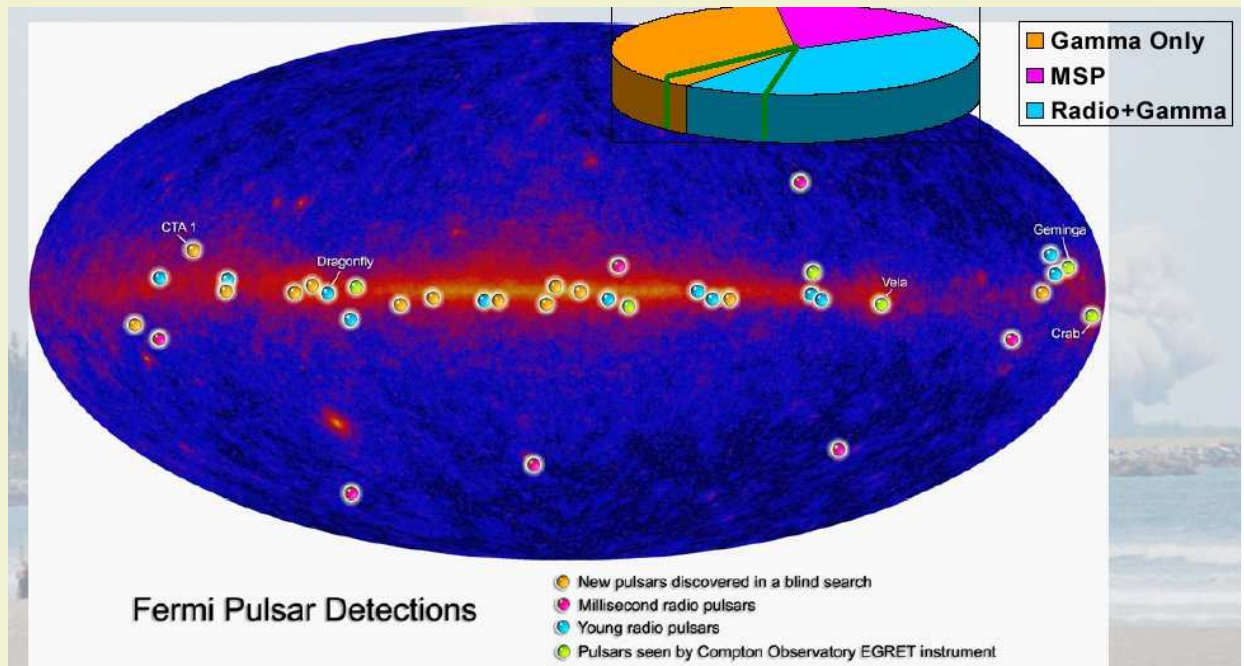
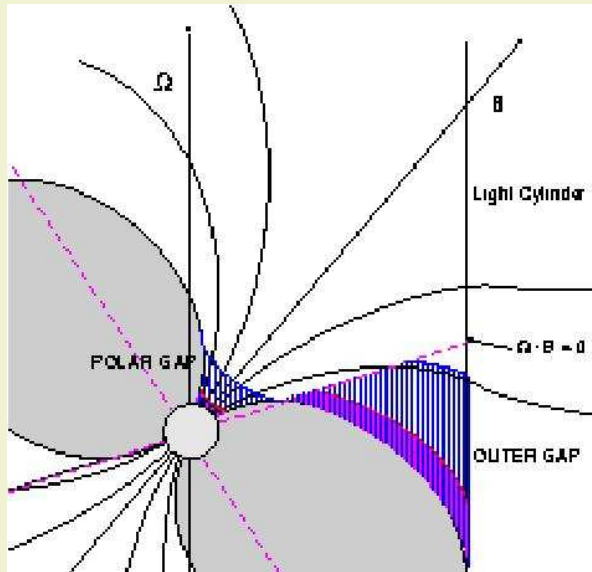
- Dans le domaine **20 MeV-10 GeV** (EGRET, AGILE & Fermi LAT), le flux de γ diffus produit par les interactions des rayons cosmiques avec le milieu interstellaire est très important et doit être compris et soustrait pour trouver les sources individuelles.
- Dans le domaine **120 GeV-30 TeV** (H.E.S.S.), ce flux diffus est beaucoup plus faible et les sources individuelles (ponctuelles et étendues) apparaissent clairement.



H.E.S.S. Relevé du plan galactique



2.2 Les pulsars émetteurs γ : le télescope Fermi en a déjà observé plus de 30



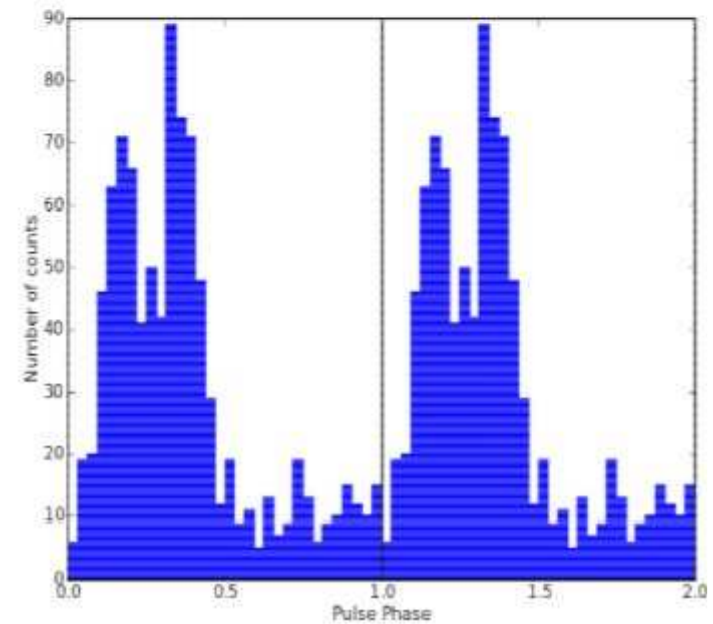
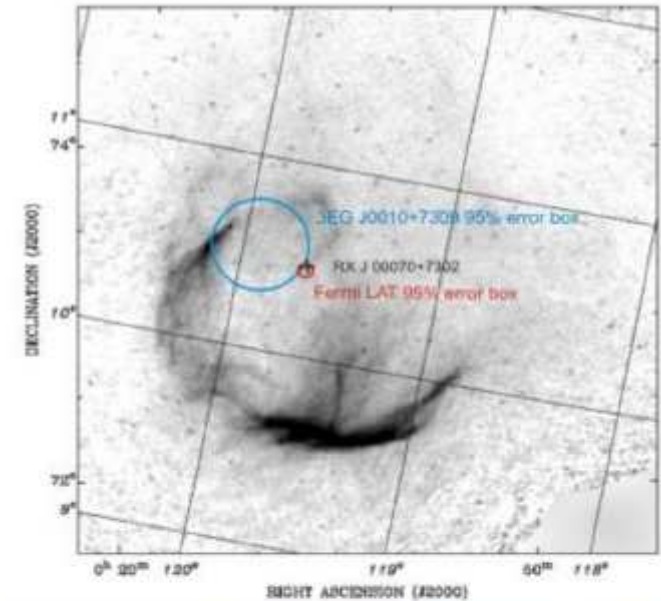
- Les 6 pulsars déjà détectés par EGRET
- 12 autres radio-pulsars
- 13 nouveaux pulsars, seulement détectés en γ (cf Geminga lors de sa découverte)
- 6 pulsars milliseconde (pulsars « morts » dont la rotation est réactivée par accrétion de la matière d'une étoile compagne)
- Les nouvelles données du télescope Fermi sur les pulsars permettent d'exclure les calottes polaires comme zone d'émission des γ : ce sont plus vraisemblablement les cavités externes proches du cylindre de lumière.

D. Smith, Moriond 2009

CTA1, un pulsar découvert par le télescope Fermi dans une recherche en aveugle (période inconnue a priori)

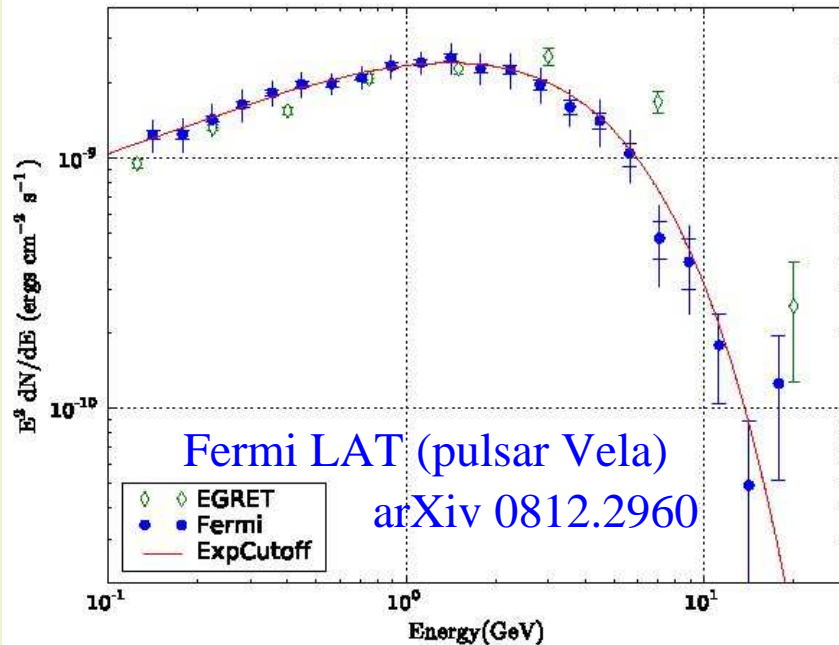
- Le vestige de supernova G119.5+10.2 (CTA1) : coquille partielle en radio (90' de diamètre)
- $D=1,4\pm 0,3$ kpc, Âge $\approx 5000-15000$ years
- Il y a une faible source X au centre d'une petite nébuleuse (mais sans signe de périodicité), compatible avec une source EGRET (mais la position donnée par EGRET est entachée d'une grande incertitude)
- Avec plus de 900 photons ($E > 100$ MeV) détectés, le télescope Fermi a pu déterminer la périodicité par une méthode de différentiation temporelle:
 - ◆ $P = 316$ ms, $dP/dt = 3.6 \times 10^{-13}$
 - ◆ Âge caractéristique : 14000 ans

Scienceexpress, Oct. 16 2008
arXiv 0810.3562

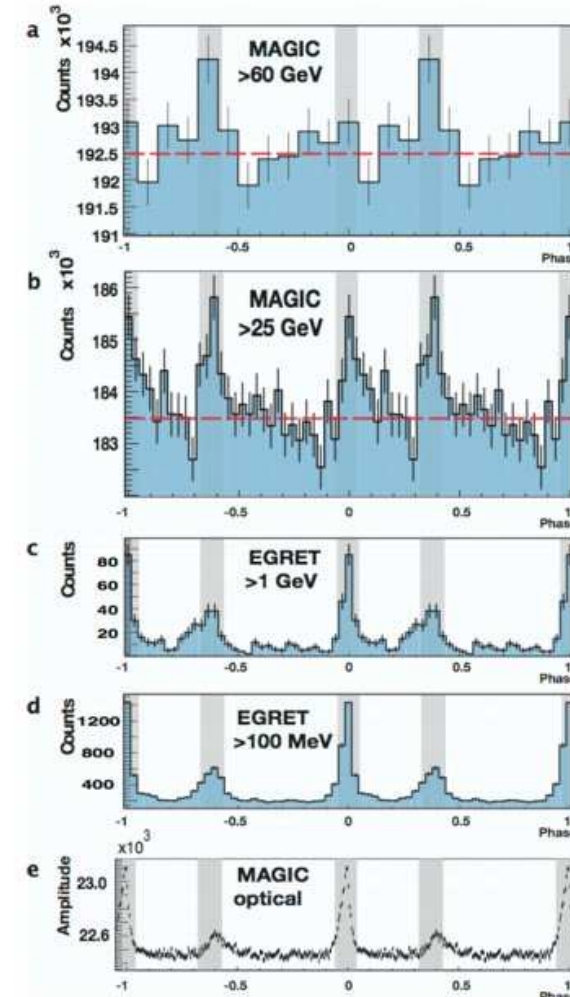


Pulsars : les spectres

MAGIC arXiv 0809.2998



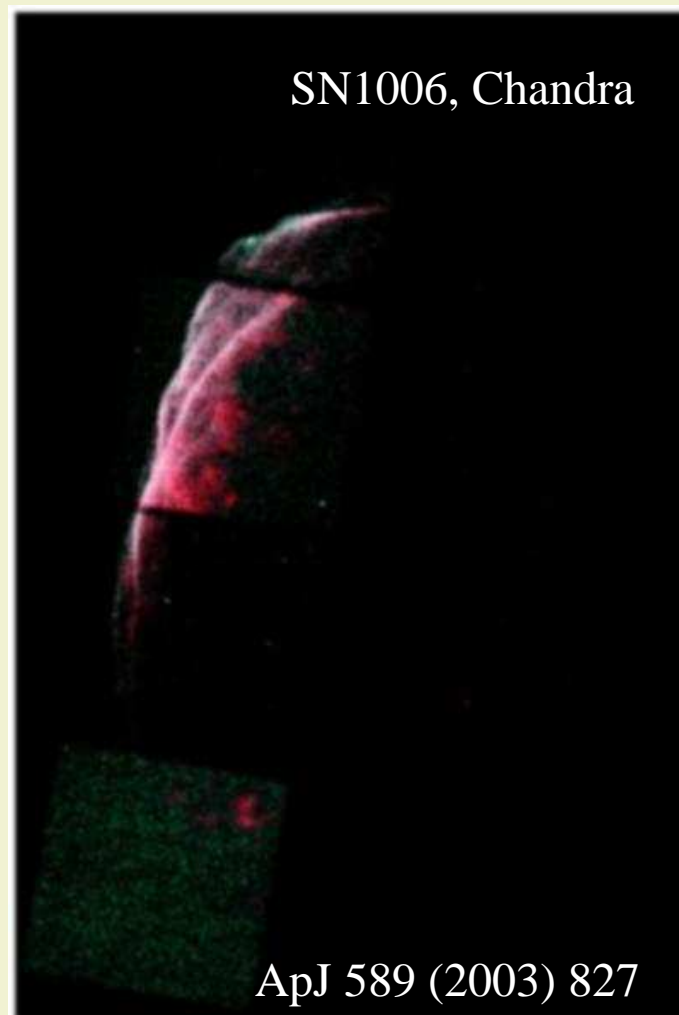
- Le télescope Fermi confirme que les spectres gamma des pulsars s'effondrent aux alentours de 10 GeV (cas du pulsar de Vela sur la figure).
- Au sol, le télescope Tcherenkov MAGIC a pu mettre en évidence le signal du pulsar du Crabe avec un seuil à 25 GeV obtenu grâce à un déclenchement spécial.

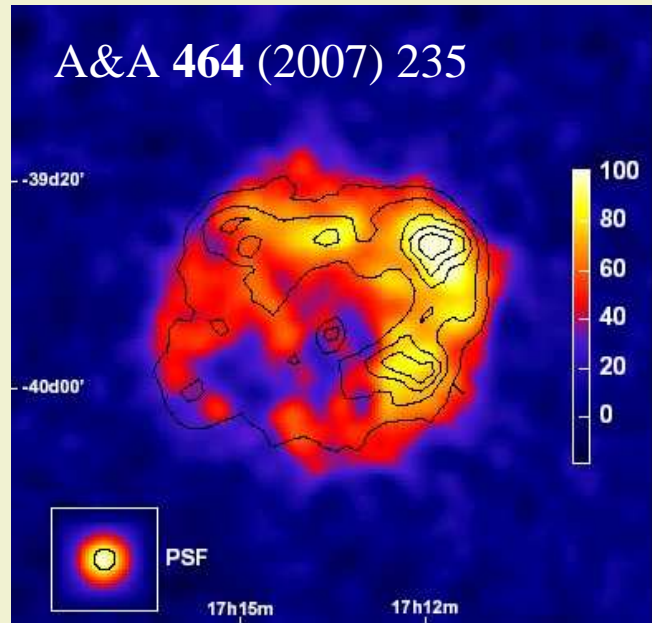


2.3 Quelques sources galactiques étendues

Vestiges de supernovæ en coquille

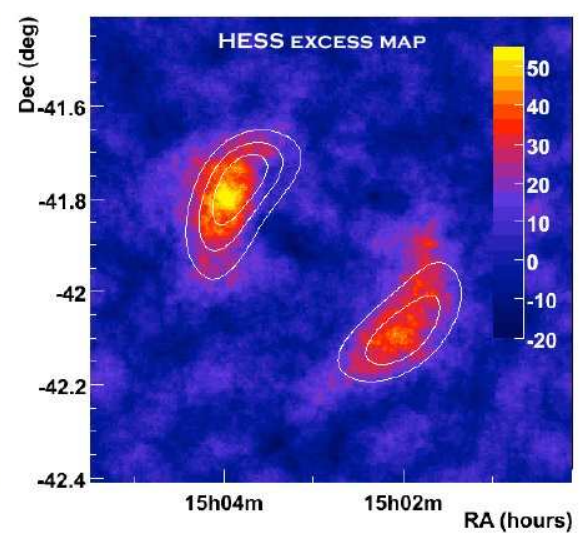
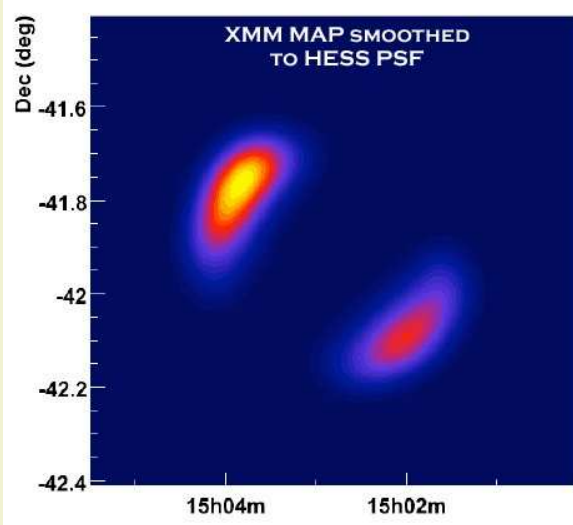
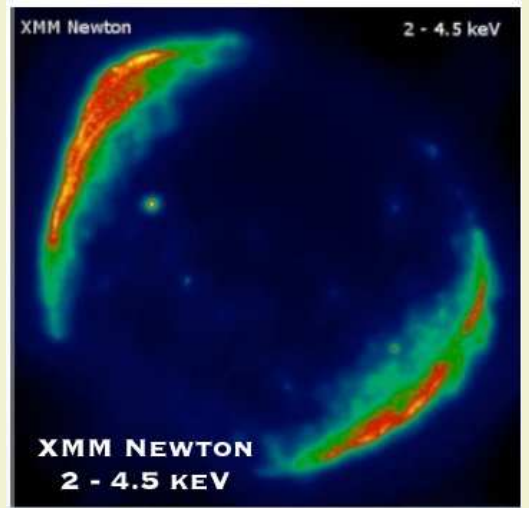
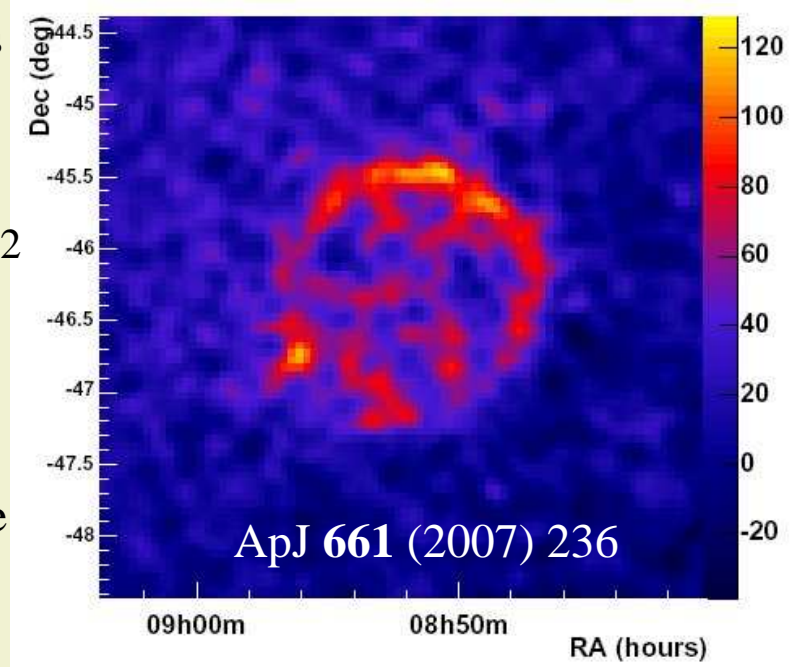
- Les vestiges de supernovæ en coquille sont les principaux candidats pour rendre compte de l'accélération des rayons cosmiques galactiques jusqu'au genou du spectre :
 - ◆ Accélération diffusive par onde de choc
 - ◆ 10% de l'énergie mécanique des supernovæ suffit pour rendre compte de l'injection des rayons cosmiques dans la Galaxie..
- Les fins filaments observés dans la partie non thermique ($E > 2$ keV) du spectre en rayons X (synchrotron) montrent que les électrons y sont accélérés jusqu'à 100 TeV et indiquent la position du choc.
- Les vestiges de supernovæ sont souvent des sources étendues → absence de détection claire par EGRET (la source ne ressort pas assez sur le fond diffus de γ).
- Au-dessus de 100 GeV, H.E.S.S., MAGIC et VERITAS fournissent des images résolues de plusieurs vestiges de supernovæ.





2 sources intenses
 (\approx Crabe):
 RX J1713-3946
 (à gauche)
 et RX J0852.0-4622
 (ou Vela Jr)
 (à droite)

Ci-dessous,
 une source faible
 (1% du Crabe)
SN1006



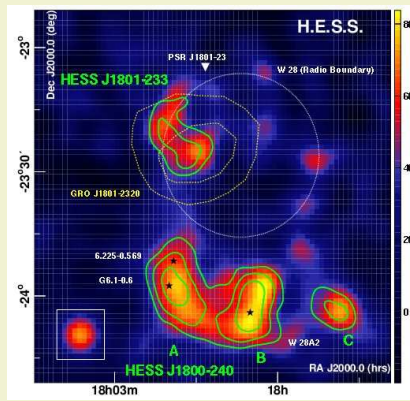
B. Degrange

SFP Champs & particules
 16 Mai 2009

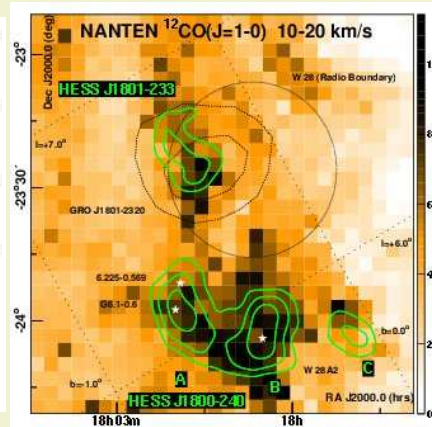
M. Naumann-Godó, Moriond 2009
 20

Vestiges de très anciennes supernovæ ($> 10^4$ ans) en interaction avec des nuages moléculaires

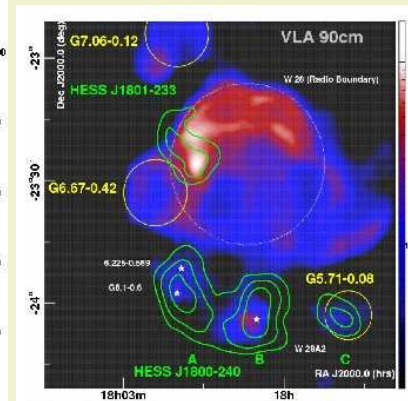
L'exemple de W28 (35000 à 150000 ans) : Choc dans le nuage moléculaire attesté par maser OH 1720 MHz



Carte γ



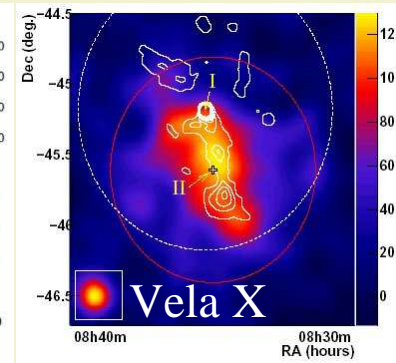
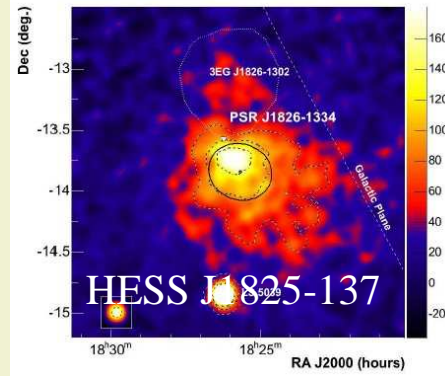
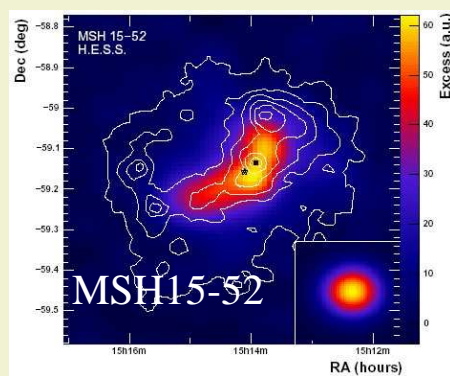
Carte CO (radio)



Carte radio (VLA)

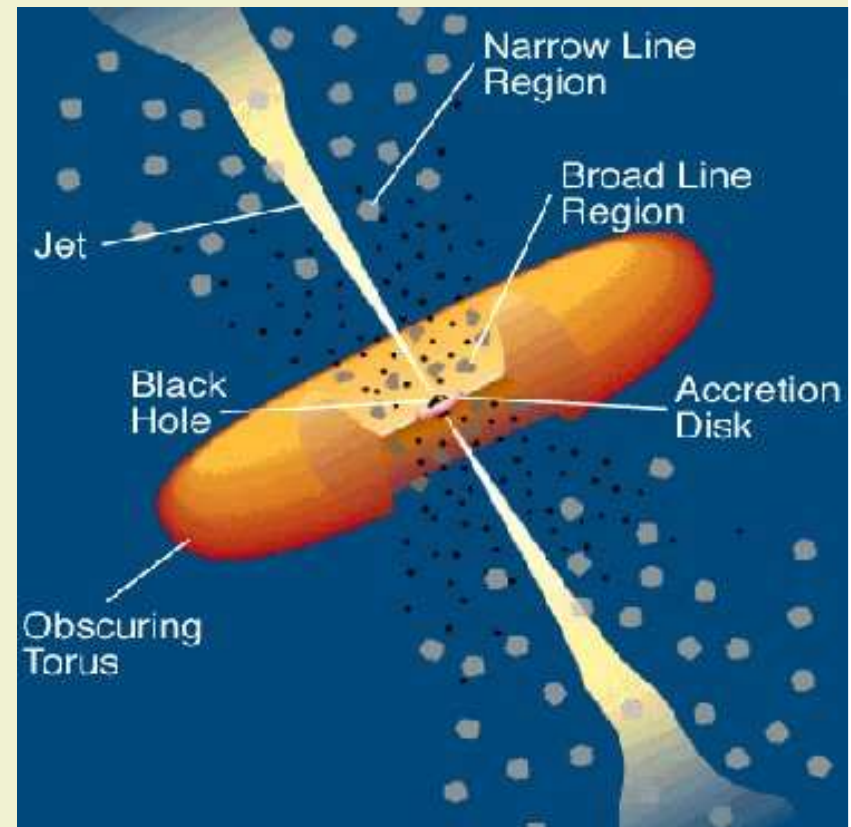
W28 : le signal γ coïncide avec le nuage moléculaire

Nébuleuses de vent de pulsar : les plus nombreuses dans le relevé du plan galactique par H.E.S.S. : morphologies γ (ci-dessous) souvent décentrées / pulsar

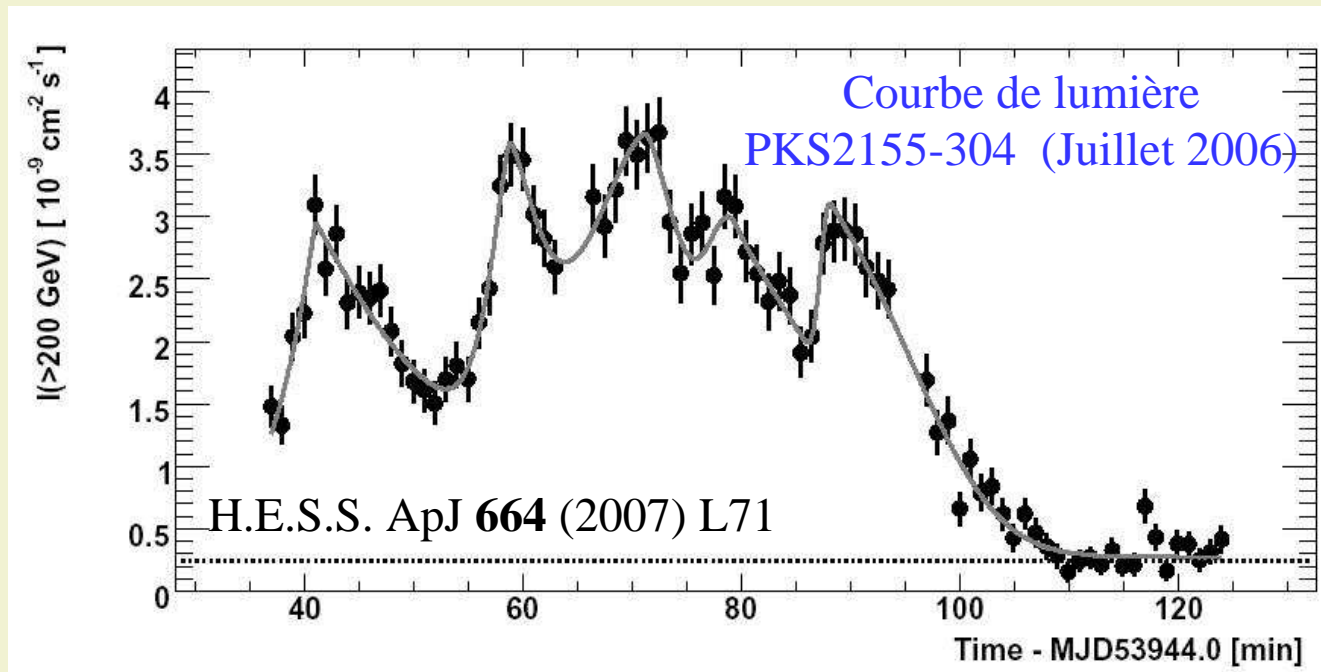


2.4 Les noyaux actifs de galaxie de type « blazars »

- EGRET a découvert > 60 noyaux actifs de galaxie (NAG) et le télescope spatial Fermi en a déjà identifié 106.
- Les télescopes Tcherenkov ont découvert plus de 20 NAG émettant au-dessus de 100 GeV.
- Toutes ces sources sont fortes en radio ($\sim 5\%$ de tous les NAG) ; l'émission radio est due jets relativistes éjectés de la région centrale.
- Tous les NAG émettant des γ sauf 3 appartiennent à la classe des « blazars » dont les propriétés caractéristiques sont dues à un effet d'observation : les jets sont émis à petit angle par rapport à la ligne de visée.
- Les 3 exceptions sont les radio-galaxies: **M87** (HEGRA, H.E.S.S., MAGIC, Fermi LAT), **Centaurus A** (H.E.S.S. Fermi LAT) et **NGC 1275** (Fermi LAT)



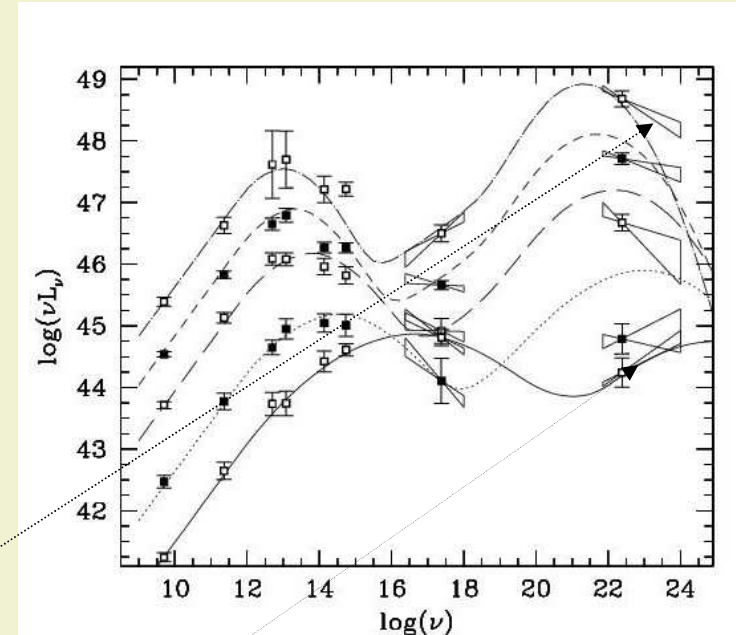
Caractéristiques des blazars



- Les blazars sont des sources variables présentant à la fois :
 - ◆ Une très haute luminosité γ (> 10 fois le flux du Crabe pour PKS 2155-304 en Juillet 2006)
 - ◆ Une forte luminosité sur de courtes échelles de temps (~ 2 minutes pour PKS2155-304 en Juillet 2006) \rightarrow **contrainte sur la taille de la région émettrice**
- Et pour éviter l'opacité ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$) \rightarrow **contrainte sur le facteur de Lorentz du jet:**
 $\Gamma >$ ou ≈ 10

Des blazars observés par EGRET/Fermi aux blazars émetteurs au TeV

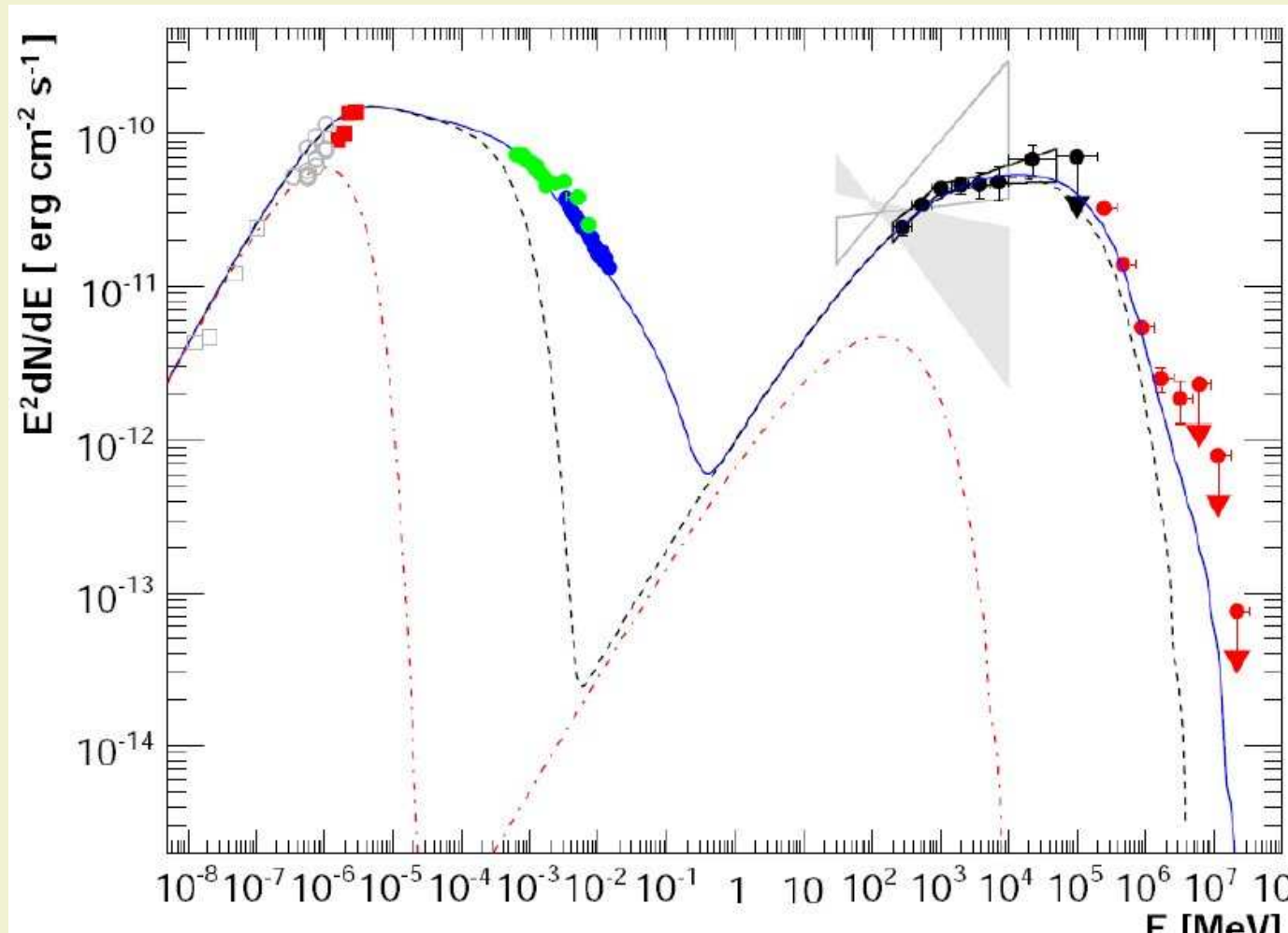
- **Spectres à bande large $E^2 d\Phi/dE$ des blazars :**
on observe une séquence quasi continue (Fossati et al. 1998)
- **Deux larges bosses :**
 - ◆ **Bosse synchrotron** pouvant aller de l'infrarouge aux rayons X durs.
 - ◆ **Bosse gamma** (probablement due à l'effet Compton inverse) pouvant aller du MeV au TeV.
- **Radio-quasars à spectre plat (FSRQ)**
 - ◆ Plus haute luminosité $\approx 10^{47} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$
 - ◆ Pic synchrotron dans l'infrarouge
 - ◆ EGRET/Fermi explorent la partie descendante de la bosse gamma
- **BL Lac** (d'après la source BL Lacertæ qui en est le prototype)
 - ◆ Luminosité plus basse $\approx 10^{45} - 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$
 - ◆ EGRET/Fermi explorent la partie ascendante de la bosse gamma
 - ◆ Les télescopes Tcherenkov en explorent la partie descendante



- **Fermi** a identifié 57 FSRQ et 42 BL Lac
- **Les télescopes Tcherenkov** ont essentiellement détecté une vingtaine de BL Lac

Une campagne d'observations simultanées à plusieurs longueurs d'onde **IR-optique-rayons X-Fermi GST-H.E.S.S.** sur le blazar PKS 2155-304 (arXiv 0903.2924) $z=0.117$

12 jours en 2008



3. À la recherche de “nouvelle physique”

- Recherche indirecte de matière noire
 - ◆ Fond diffus galactique (Fermi)
 - ◆ Centre Galactique (H.E.S.S.)
 - ◆ Galaxies naines sphéroïdales (Télescopes Tcherenkov)
 - ◆ Les électrons cosmiques (Fermi, H.E.S.S.)
- Tests de l'invariance de Lorentz
 - ◆ Blazar PKS 2155-304 (H.E.S.S.)
 - ◆ Sursauts gamma (Fermi)

3.1 Recherche indirecte de matière noire

γ issus d'annihilation de particules massives à interaction faible

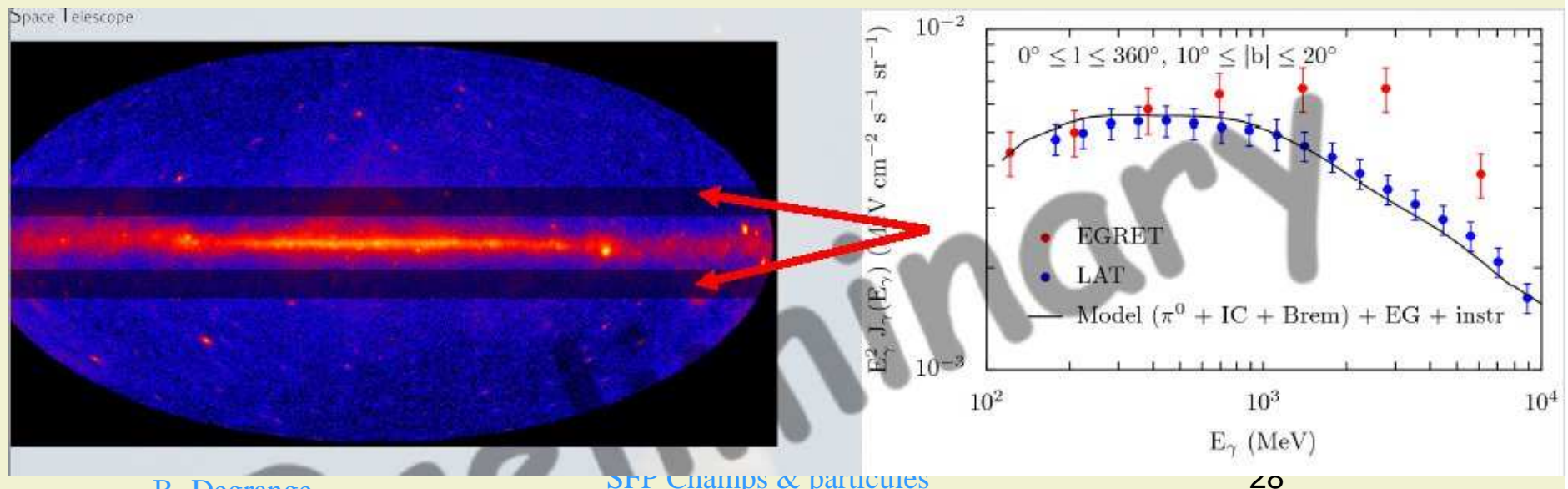
$$\frac{d\Phi}{dE} = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle \sigma v \rangle}{m^2} \frac{d\bar{n}_\gamma}{dE} \times \bar{J}(\Delta\Omega)\Delta\Omega \quad \text{avec} \quad J = \int_{\text{ligne-de-visée}} \rho^2[r(s)] ds$$

- Les galaxies sont censées être incluses dans des **halos de matière noire** de densité $\rho(r)$.
- Cette matière est censée être composée de particules de Majorana χ , à interaction faible et **de masse M comprise entre environ 50 GeV et quelques TeV** (particule supersymétrique ou particule de Kaluza-Klein la plus légère).
- Une concentration suffisante de telles particules produit des réactions d'annihilation $\chi+\chi \rightarrow \dots \rightarrow \gamma + \dots \rightarrow$ **source de rayonnement gamma ...** **mais aussi de paires e^+e^-** , proton-antiproton etc.
- **La source doit être stable.** Le spectre des γ s'arrête à **la masse de la particule.** La signature spectrale est essentielle pour exclure une origine astrophysique classique.

Le fond diffus galactique observé par le télescope Fermi

- EGRET avait trouvé un excès de flux non expliqué au-dessus de 1 GeV qui avait alimenté les spéculations sur une contribution possible d'annihilations de particules de matière noire.
- On peut prédire le flux diffus à partir d'un modèle de distribution de matière dans la Galaxie contraint par des données d'observation (radio : raie à 21 cm de l'hydrogène atomique, raie du CO, etc.). La prédiction tient compte du bremsstrahlung, de la diffusion Compton inverse et de la production de π^0 .
- Le télescope Fermi (résultat préliminaire) ne confirme pas cet excès pour des latitudes galactiques moyennes $10^\circ < |b| < 20^\circ$ (où la correction due à la soustraction des sources ponctuelles est faible)

G. Johannesson, Moriond 2009



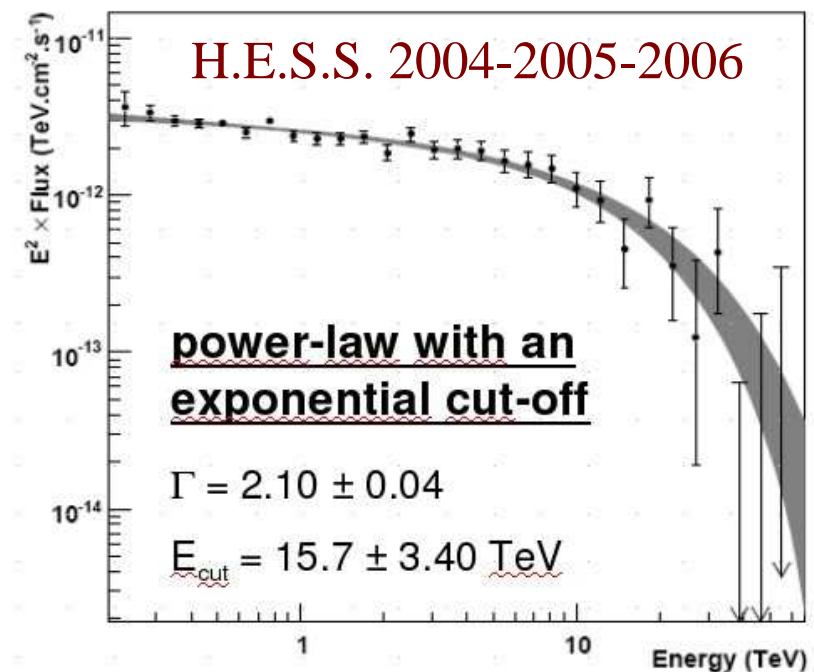
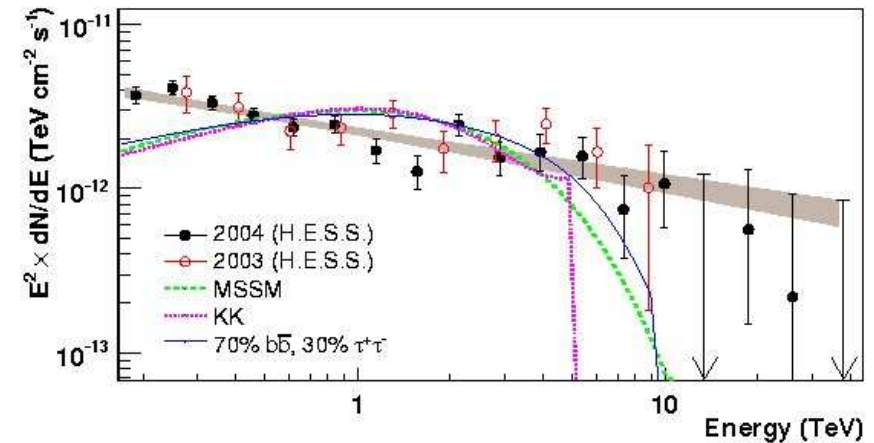
B. Degrange

SFR Champs & particules
16 Mai 2009

20

La source centrale de la Galaxie HESS J1745-290

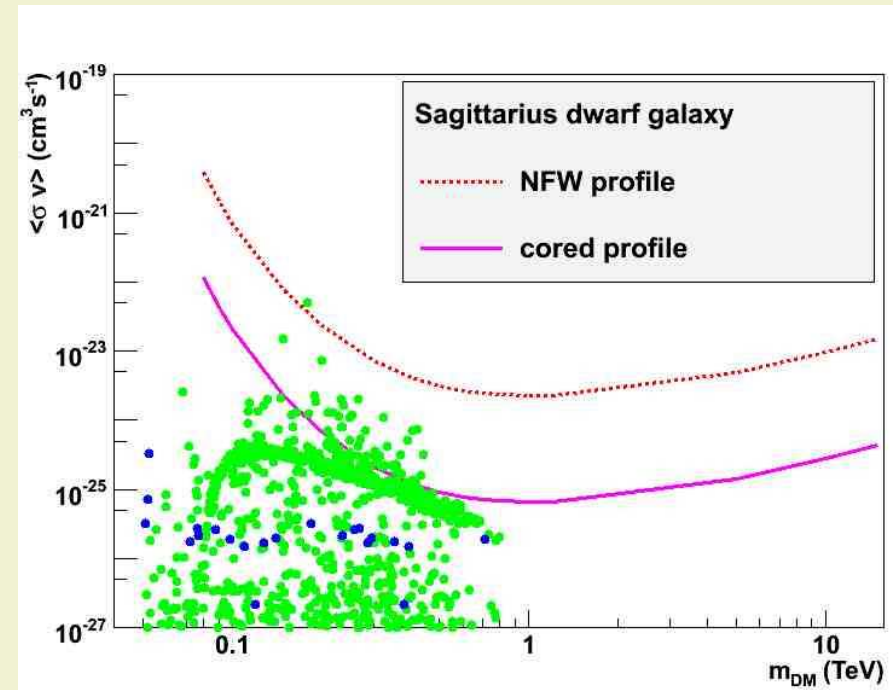
- Source compatible avec le trou noir central (3.6×10^6 masses solaires), mais aussi avec la nébuleuse de pulsar G359.95-0.04. Le vestige de supernova Sgr A Est semble exclu.
- Source stable sur 3 ans avec un flux $\approx 10\%$ de celui de la nébuleuse du Crabe.
- Le trou noir central est le siège de sursauts d'intensité en IR et en rayons X, mais qui ne sont pas observés au TeV sur la source HESS J1745-290 (observations simultanées Chandra-H.E.S.S. astro-ph 0812.3762)
- Spectre en loi de puissance avec coupure exponentielle au-delà de 10 TeV : l'annihilation de particules de matière noire est exclue comme composante principale.



M. Vivier, Moriond 2009

Des candidats intéressants : les galaxies naines sphéroïdales

- Les galaxies naines sphéroïdales sont des candidats intéressants :
 - ◆ Le rapport Masse/Luminosité implique une grande quantité de matière noire
 - ◆ La quasi-absence de gaz et de poussières rend peu vraisemblable un signal γ d'origine classique
- Limites supérieures sur les flux de γ de l'ordre de $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pour plusieurs galaxies naines sphéroïdales : **Sagittarius** 24 kpc (H.E.S.S.), **Draco** 82 kpc (VERITAS, MAGIC), **Ursa Minor** 66 kpc (VERITAS), **Willman-1** 38 kpc (VERITAS), de même que sur la surdensité **Canis major** (8 kpc) qui pourrait être une galaxie naine (H.E.S.S.)
- Les contraintes dans le plan $\{ \langle \sigma v \rangle, m_\chi \}$ dépendent du profil de densité envisagé : exemple de la galaxie naine Sagittarius ci-contre.

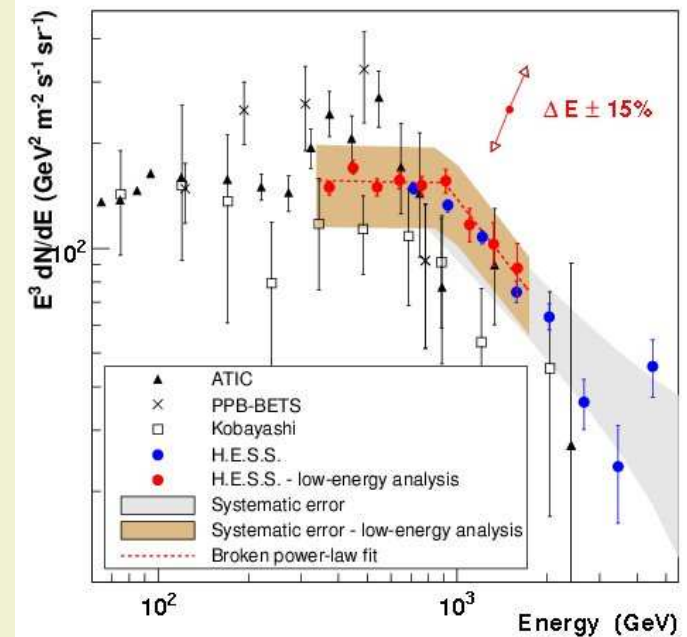
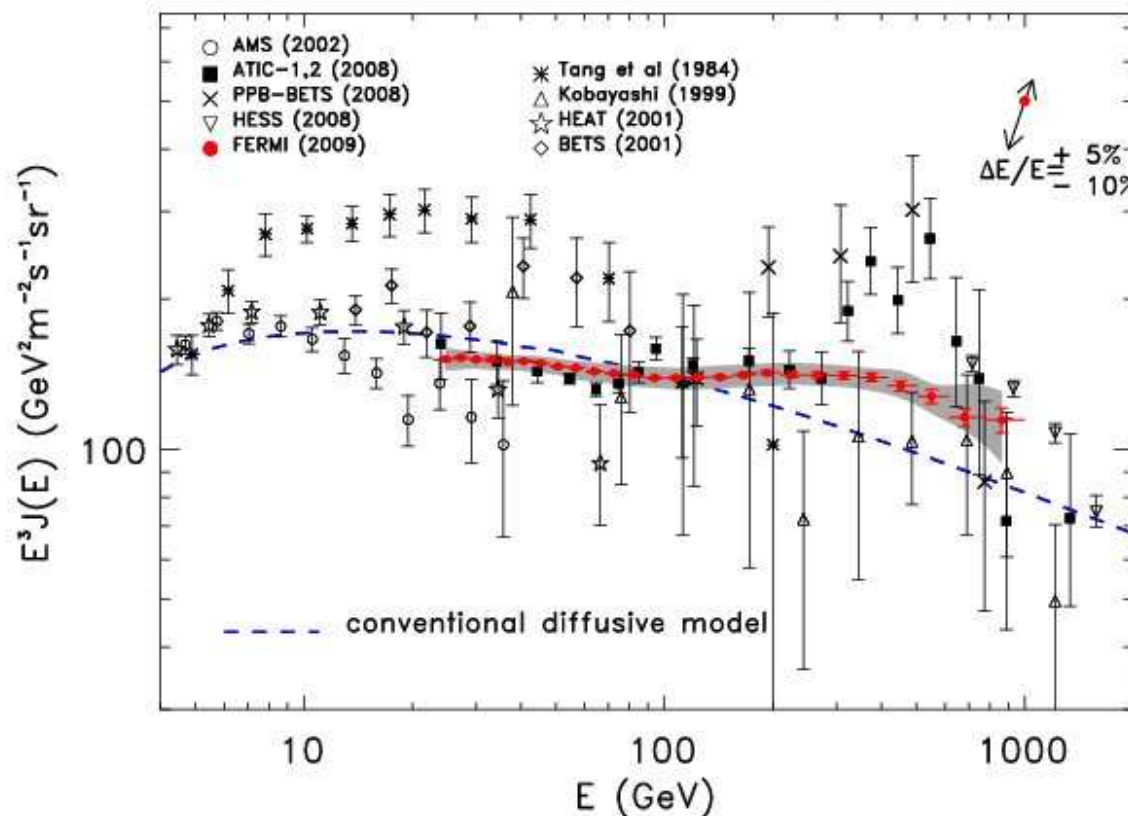


H.E.S.S. Galaxie naine du Sagittaire

Spectre des électrons cosmiques (e^\pm) : l'anomalie annoncée par ATIC (Nature **456** (2008) 362, expérience en ballon) n'est pas confirmée

Fermi LAT arXiv 0905.0025

H.E.S.S. arXiv 0905.0105



La légère déviation par rapport au modèle d'émission diffuse peut très bien être due aux pulsars proches ($D < 1$ kpc)

3.2 Tests de l'invariance de Lorentz

- Certaines théories de gravité quantique prédisent une violation de l'invariance de Lorentz à l'échelle de la masse de Planck qui entraîne...
- une modification des relations de dispersion pour $E \ll E_P$

$$E^2 - p^2 c^2 - m^2 c^4 \approx \pm E^2 \left(\frac{\xi_n E}{E_P} \right)^n$$

- ◆ → modification des seuils de réactions (invoquée pour empêcher la photoproduction de pions si la coupure GZK n'était pas présente)
- ◆ → dépendance de la vitesse du photon par rapport à son énergie : ainsi pour $n=1$:

$$v = \frac{dE}{dp} = c \left(1 + \frac{\xi E}{E_P} \right) = c \left(1 + \frac{E}{M_{QG} c^2} \right)$$

La vitesse des photons dépend-elle de leur énergie ?

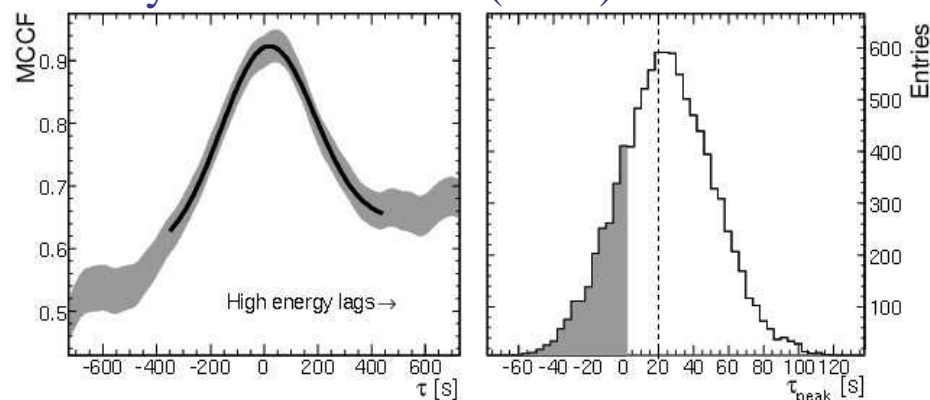
- On se sert des phénomènes transitoires produits à des distances cosmologiques

- Sursauts gamma (e.g. Fermi GBM+LAT GRB 080916C)
- Éruption de blazars: (Whipple Obs.: Mkn 421 en Mai 1996, MAGIC: Mkn 501 de Mai à Juillet 2005, H.E.S.S.: PKS2155-304 en Juillet 2006)

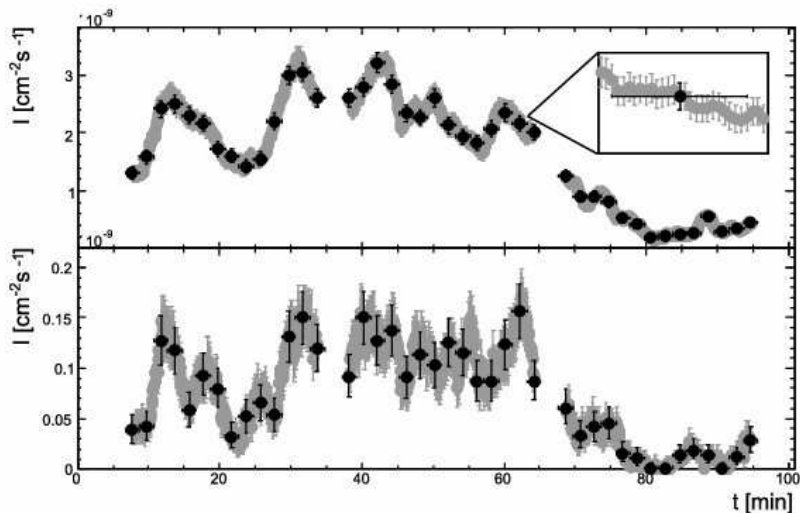
- On recherche des décalages temporels entre courbes de lumière obtenues dans différents domaines d'énergie.

PKS2155-304: fonction de corrélation des 2 courbes en fonction du décalage temporel

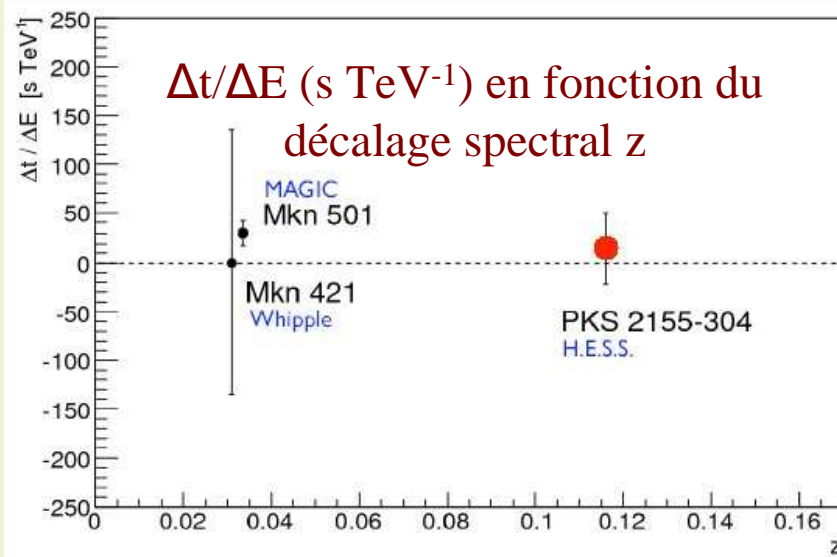
Phys. Rev. Lett. 101(2008)170402



PKS2155-304: 200 < E < 800 GeV



PKS2155-304: E > 800 GeV



Sursauts gamma : GRB 080916C

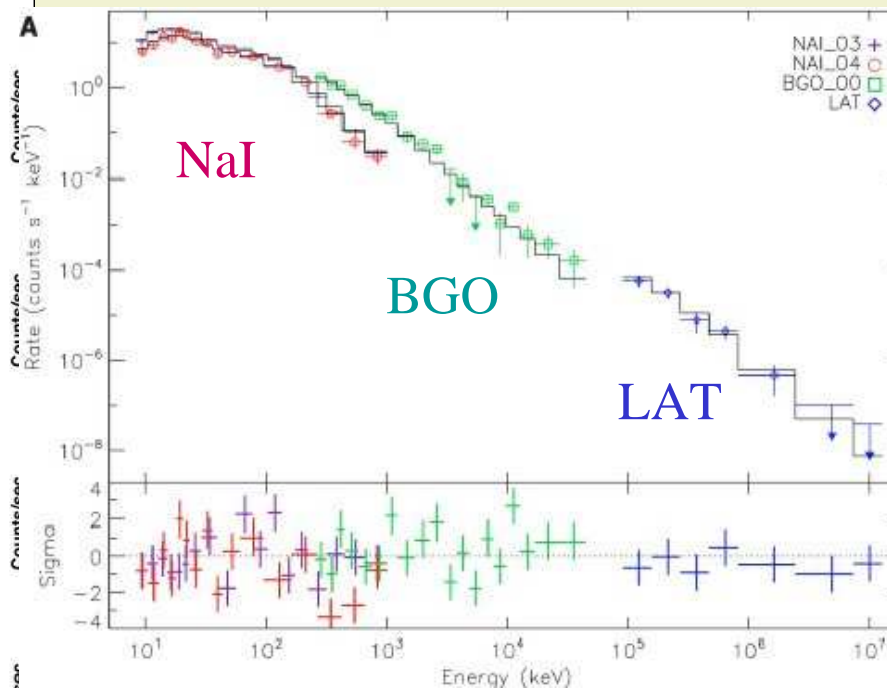
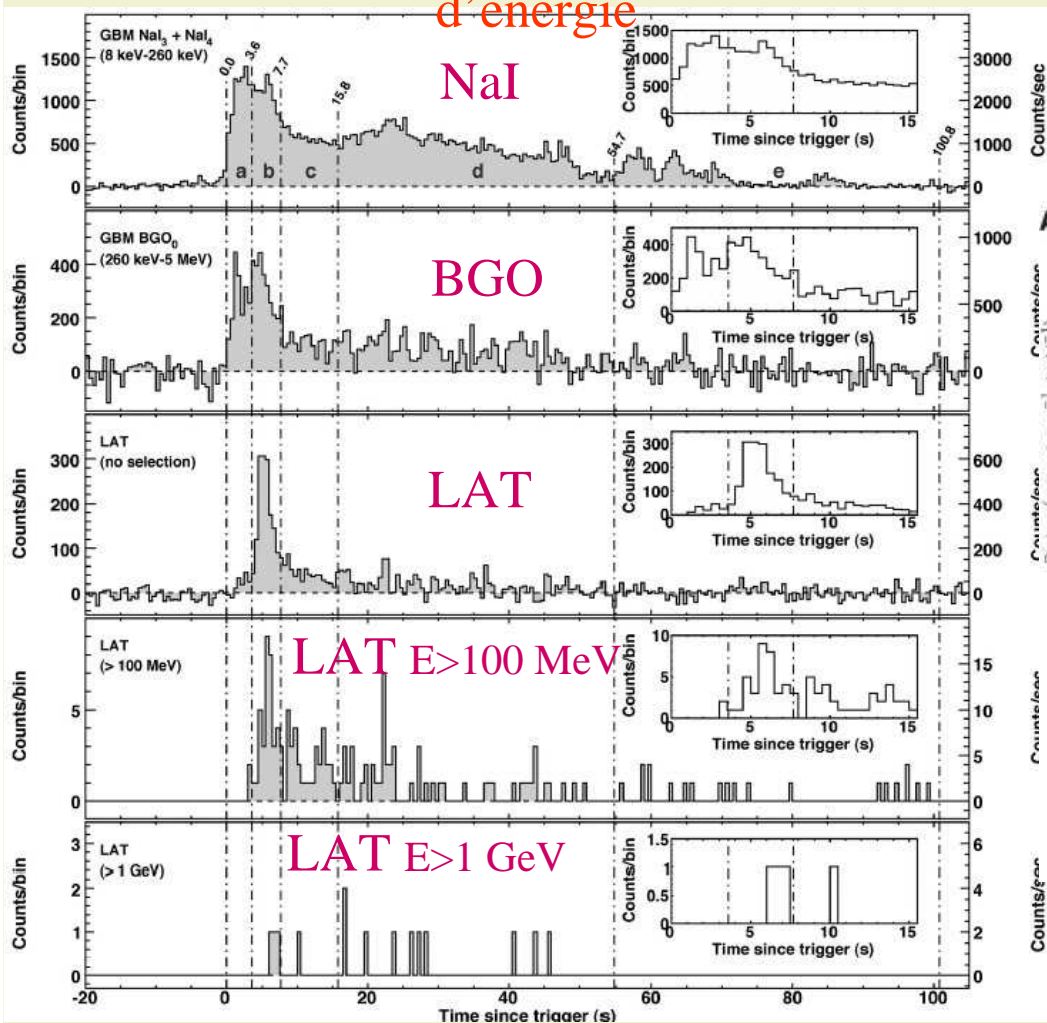
Fermi GBM + LAT

Courbes de lumière en différentes bandes

Scienceexpress 19 Feb. 2009

d'énergie

Premier spectre d'un sursaut allant de 10 keV to 10 GeV



Redshift $z = 4,35 \pm 0,15$

Bornes inférieures sur $M_{\text{QG}} = \xi^{-1}E_p/c^2$

Source	Expérience / Satellite	Référence	Bornes inférieures sur M_{QG} (GeV/c ²)
GRB 021206	RHESSI	S. Boggs et al. 2004	1.8×10^{17}
35 GRB's	BATSE + HETE-2 + SWIFT	J. Ellis et al. 2006	0.14×10^{17}
GRB 080916C	Fermi (GBM+LAT)	A.A. Abdo et al. 2009	13×10^{17}
Blazar Mkn 421	Whipple Observatory	S.D. Biller et al.	0.6×10^{17}
Blazar Mkn 501	MAGIC	J. Albert et al.	2.6×10^{17}
Blazar PKS2155-304	H.E.S.S.	F. Aharonian et al.	7.2×10^{17}

4. Vers de nouveaux observatoires « gamma »

- Le court terme : exploiter la complémentarité des satellites et des télescopes Tcherenkov dans le domaine 30 GeV-300 GeV ; les phases II de H.E.S.S. et de MAGIC
- Le moyen terme : vers de grands réseaux d'imageurs à effet Tcherenkov atmosphérique (CTA, AGIS)

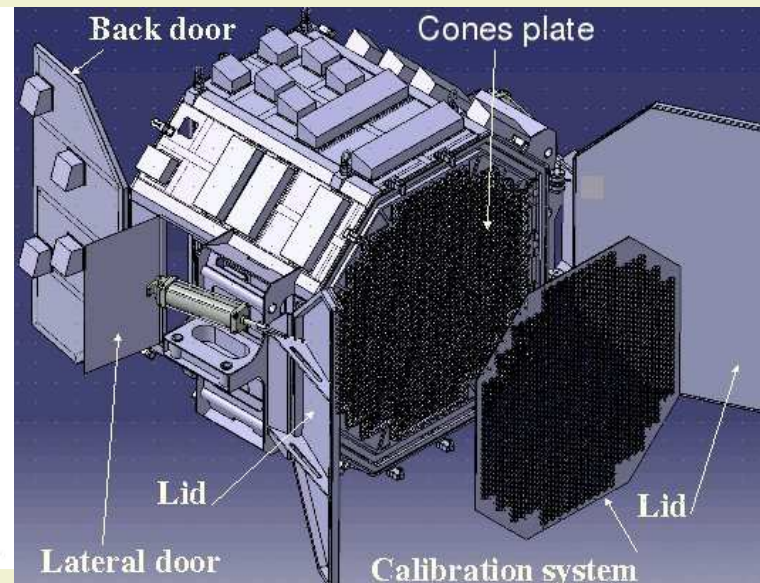
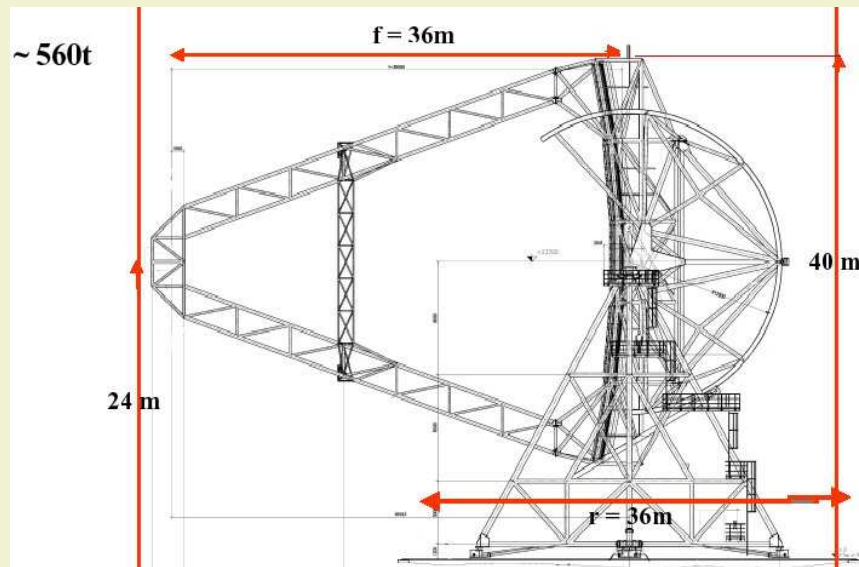
4.1 Le court terme : H.E.S.S. II et MAGIC II

- Pour la première fois, on va disposer d'un domaine spectral commun aux satellites (télescope spatial Fermi) et aux détecteurs au sol à seuil bas :
 $30 \text{ GeV} < E < 300 \text{ GeV}$ (MAGIC II, H.E.S.S. II)
- Tirer parti de la complémentarité des deux types d'instruments pour les sources variables (blazars) ou les événements imprévisibles (sursauts gamma)
 - ◆ les satellites (grand champ de vue) qui donnent l'alerte en cas de comportement éruptif
 - ◆ et les détecteurs au sol (grande surface efficace) qui fournissent une courbe de lumière à haute résolution temporelle (minute).
- Sources extra-galactiques accessibles à plus grand décalage spectral (plus faible absorption par le fond infrarouge)

La phase II de H.E.S.S. (2010-...)



- Installer un très grand télescope au centre des 4 télescopes actuels
- Objectifs principaux :
 - ◆ Étendre vers le bas le domaine d'énergie jusque vers 30 GeV (mono-télescope)
 - ◆ La stéréoscopie (très grand télescope + 1 des 4 autres) est possible pour $E > 80$ GeV
 - ◆ Gagner un facteur 2 en sensibilité au-dessus de 100 GeV (domaine stéréo de H.E.S.S. I)
- Complémentarité avec le télescope spatial Fermi



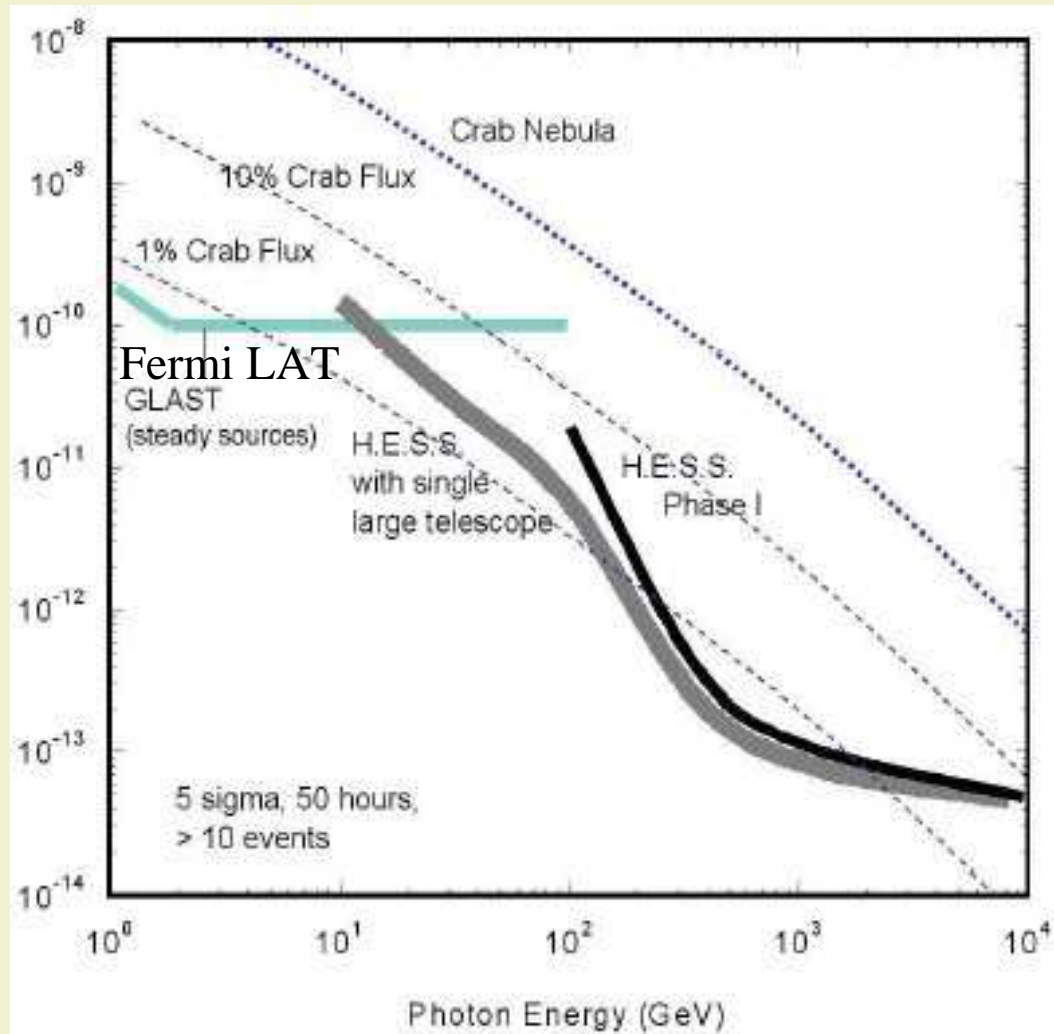
- Miroir parabolique composé de 860 facettes, 28 m de diamètre, 600 m²
- Distance focale de 36 m
- Caméra de 2048 photomultiplicateurs de 0.07° de diamètre angulaire
- Adaptation de la distance focale à l'altitude de visée (distance moyenne du maximum de gerbe) sur une plage de 10 cm
- Caméra déchargeable pour tests et entretien
- Nouvelle électronique
 - ◆ 2 niveaux de déclenchement (taux d'environ 2 kHz attendu en mode mono)
 - ◆ nouvelles mémoires analogiques SAM (Swift Analogue Memories)

L'ère du télescope spatial Fermi, de MAGIC II et de H.E.S.S. II

Jun 2008

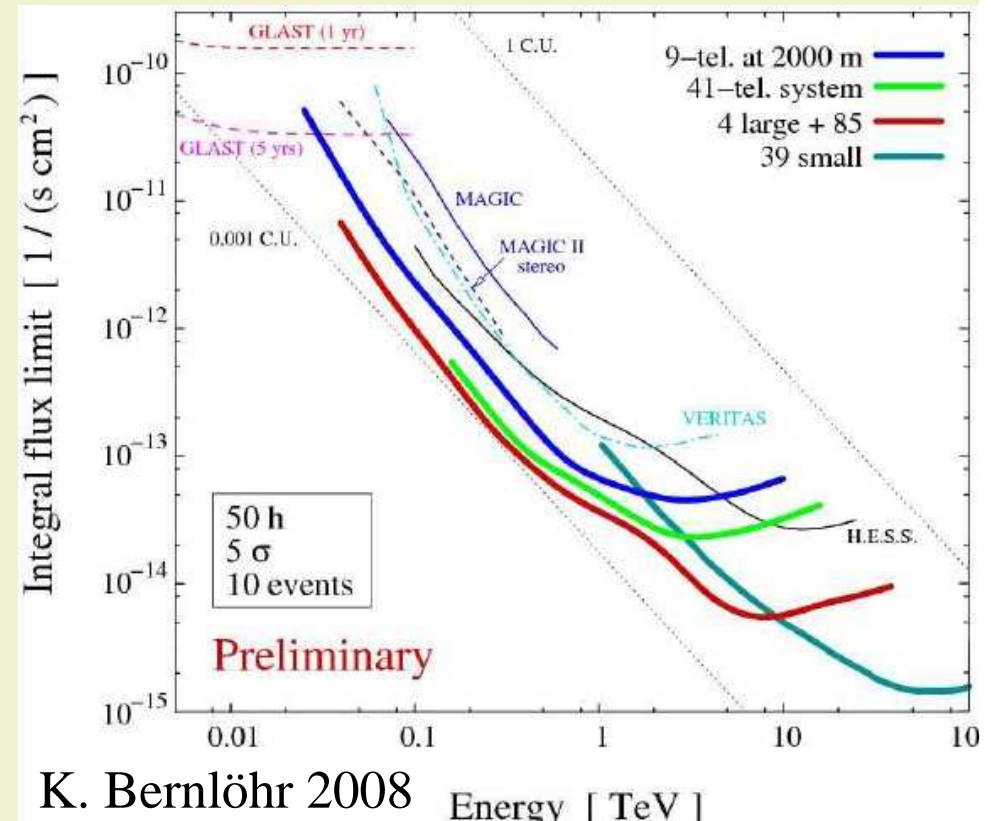
Septembre 2008

2010



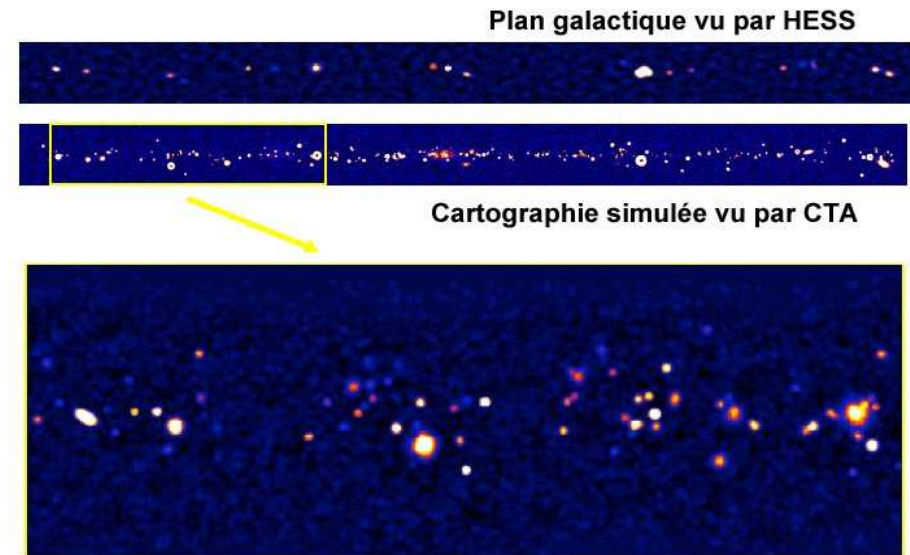
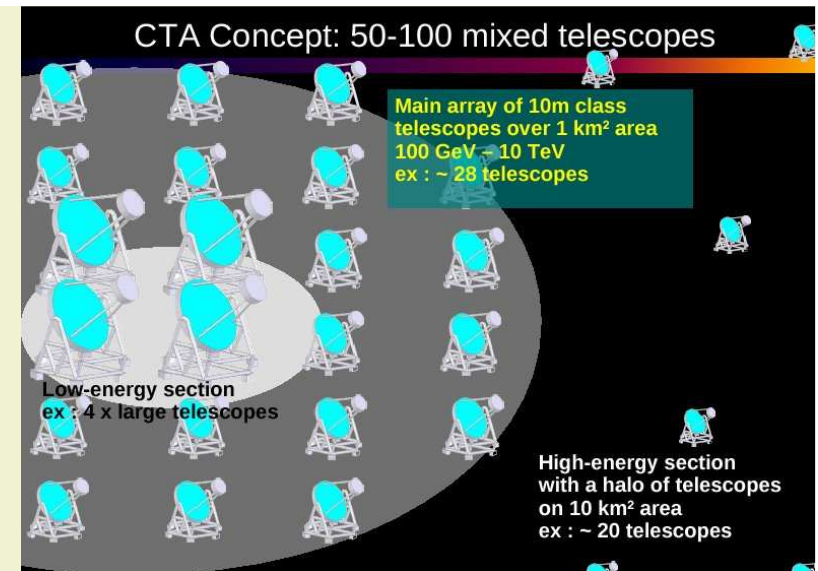
4.2 Le moyen terme : vers de grands réseaux d'imageurs à effet Tcherenkov atmosphérique

- 3 types de télescopes :
 - ◆ quelques très grands télescopes pour le domaine 30 GeV – 100 GeV
 - ◆ environ 40 télescopes de type HESS I pour atteindre la sensibilité du milli-Crabe autour du TeV
 - ◆ environ 25 petits télescopes répartis sur une grande surface (10 km²) pour explorer le domaine E > 10 TeV
- Résolution angulaire ~ 2 minutes d'arc
- Collaboration HESS-MAGIC + autres groupes en vue d'un tel projet **CTA = Cherenkov Telescope Array** (≈ 2014 ?)
- Projet américain concurrent : **AGIS=Advanced Gamma-ray Imaging System**
- Fonctionnement en observatoires



CTA : un retour scientifique garanti

- **La résolution angulaire de CTA** permettra une **meilleure séparation des sources dans le plan galactique** et facilitera leur identification avec une source X ou radio.
- Catalogue de près de 1000 sources galactiques et extra-galactiques → **études de populations**
- Détection de **nouveaux types de sources à haute énergie**, notamment :
 - ◆ Galaxies à flambée d'étoiles (nombreuses supernovae → superbulles)
 - ◆ Galaxies ultra-lumineuses en infrarouge « ULIRG » (étoiles en formation, forts vents stellaires)
 - ◆ Amas de galaxies
 - ◆ Sources « exotiques » (matière noire)



Simulations CTA/AGIS
Digel + Funk (Stanford) + Hinton (Leeds)

Conclusion :

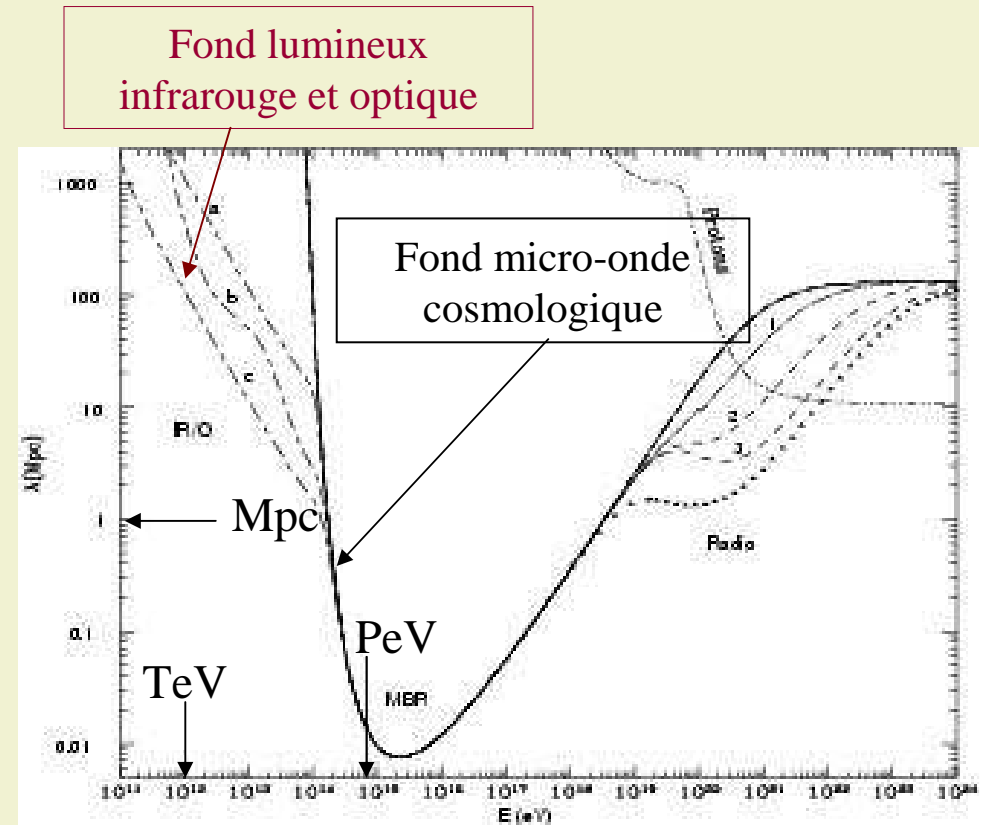
une discipline en développement rapide

- Les 6 premiers mois de fonctionnement du télescope spatial Fermi ont déjà abouti à des résultats remarquables (fond diffus, et déjà plus de 200 sources pulsars, blazars et radiogalaxies, sursauts gamma) → un programme scientifique prometteur pour les 10 ans à venir.
- Les télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique disposent maintenant d'un catalogue de près de 100 sources :
 - ◆ galactiques : nébuleuses de pulsars et vestiges de supernovae en coquille d'âges divers, systèmes binaires, associations OB ;
 - ◆ extra-galactiques : blazars, radio-galaxies
- À court terme, H.E.S.S. et MAGIC vont bénéficier des apports de leur phase II et exploiter leur complémentarité avec les télescopes spatiaux Fermi et AGILE.
- À plus long terme, les découvertes garanties par les projets d'observatoires CTA et AGIS associeront encore plus étroitement les groupes issus de la physique des particules et ceux de l'astrophysique.

Compléments

- Jusque vers 100 GeV, l'Univers est transparent au rayonnement γ
- Dans l'Univers, les cibles photoniques sont les plus nombreuses, et les γ de très haute énergie ($E > 100$ GeV) peuvent être absorbés par création de paires ($\gamma + \text{photon} \rightarrow e^+e^-$), par exemple :
 - dans la photosphère d'une étoile massive très lumineuse ($\sim 10^{16}$ photons par cm^3) ;
 - sur des distances intergalactiques (sources extragalactiques $z > 0.3$) :
 - ◆ par le fond infrarouge et optique au-delà de quelques TeV \rightarrow contraintes sur ce fond difficile à mesurer directement ;
 - ◆ par le fond micro-onde (CMB) à 2.7 K au-delà de 100 TeV.

Où les γ sont-ils absorbés ?

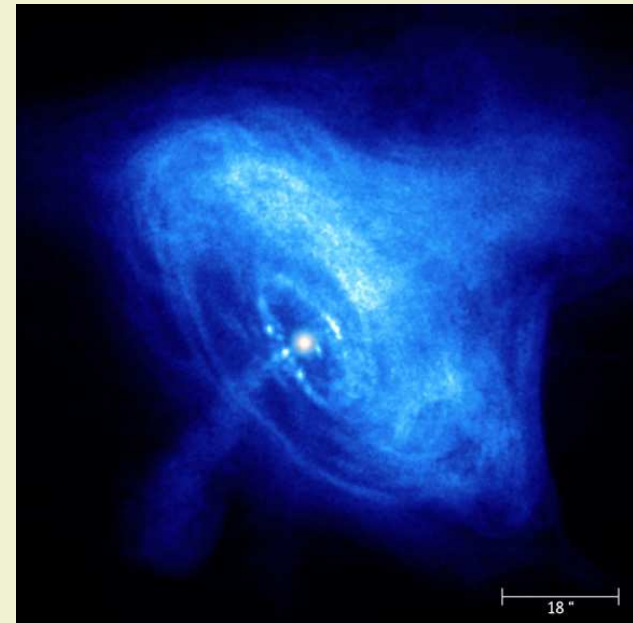


**Longueur moyenne d'absorption (Mpc)
en fonction de l'énergie du γ**

Détecter les γ dans l'espace ou au sol ?

Des surfaces effectives de détection adaptées aux flux de γ

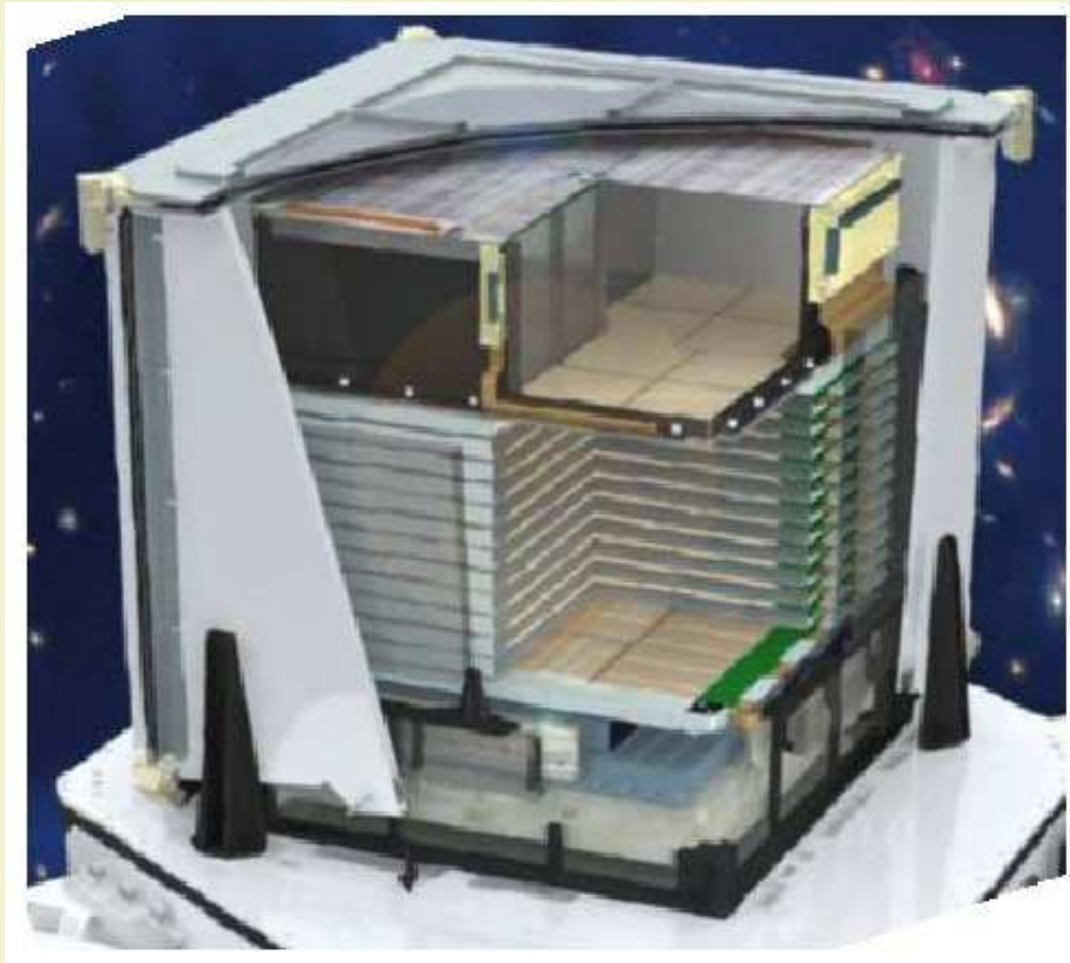
- Tendence générale de décroissance des spectres avec l'énergie $d\Phi/dE = K E^{-\gamma}$ avec γ voisin de 2
- La nébuleuse du Crabe est une source stable et l'une des plus fortes dans le domaine gamma. et sert de chandelle standard.
- Ordres de grandeur des flux de γ :
 - ◆ $\Phi(E > 1 \text{ GeV}) \approx 10^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
→ 260 événements par mois par m^2
(satellite)
 - ◆ $\Phi(E > 1 \text{ TeV}) \approx 2 \times 10^{-7} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
→ 72 événements par heure par 10^5 m^2
(téléscope Tcherenkov)



La nébuleuse du Crabe en rayons X observée par le satellite Chandra. Elle est vue comme une source ponctuelle par les détecteurs de γ

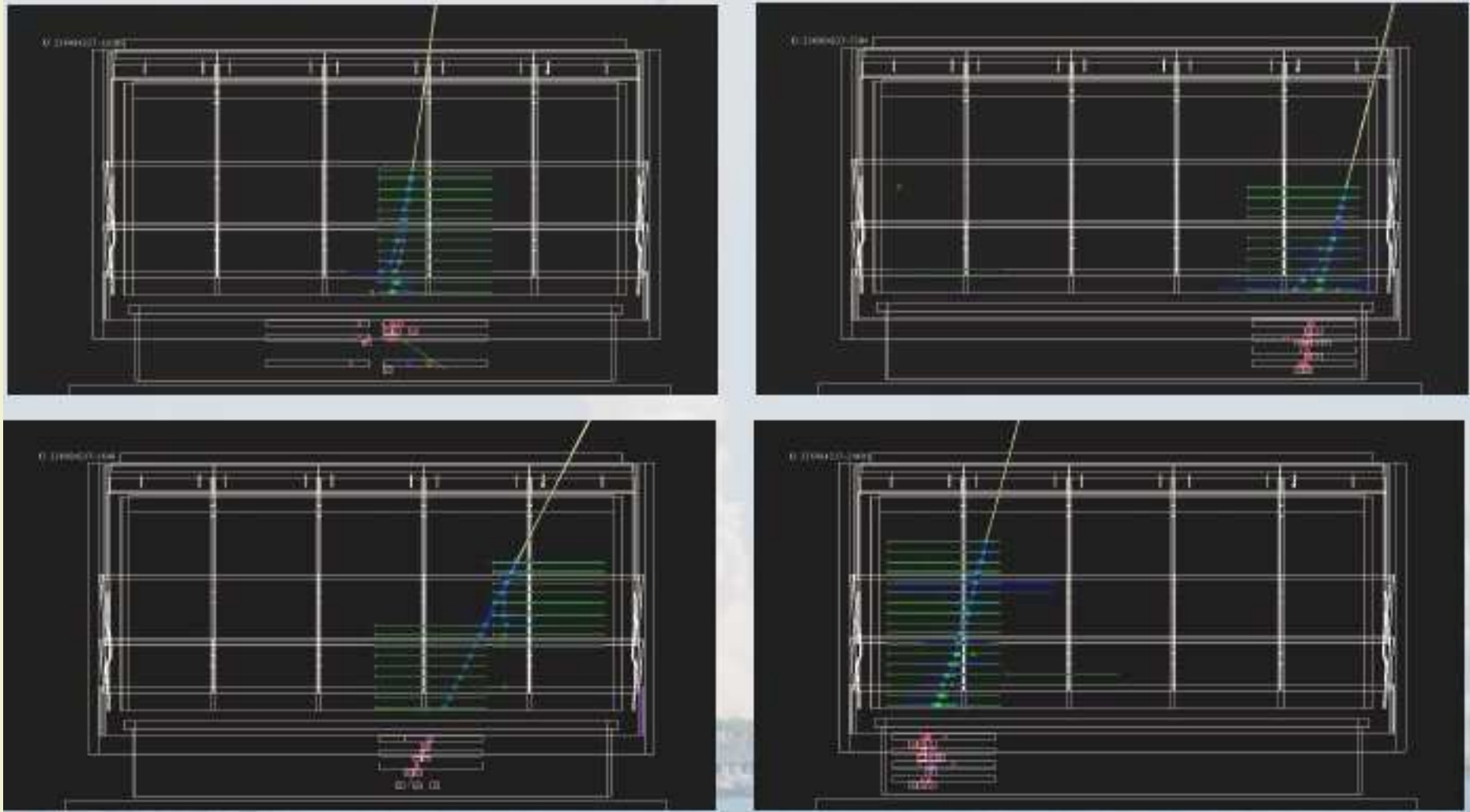
Le télescope AGILE lancé en Avril 2007

Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero



- Détecteur de rayons X (Super-AGILE)
- Trajectographe (14 plans)
- Calorimètre CsI (TI) $1.5 X_0$

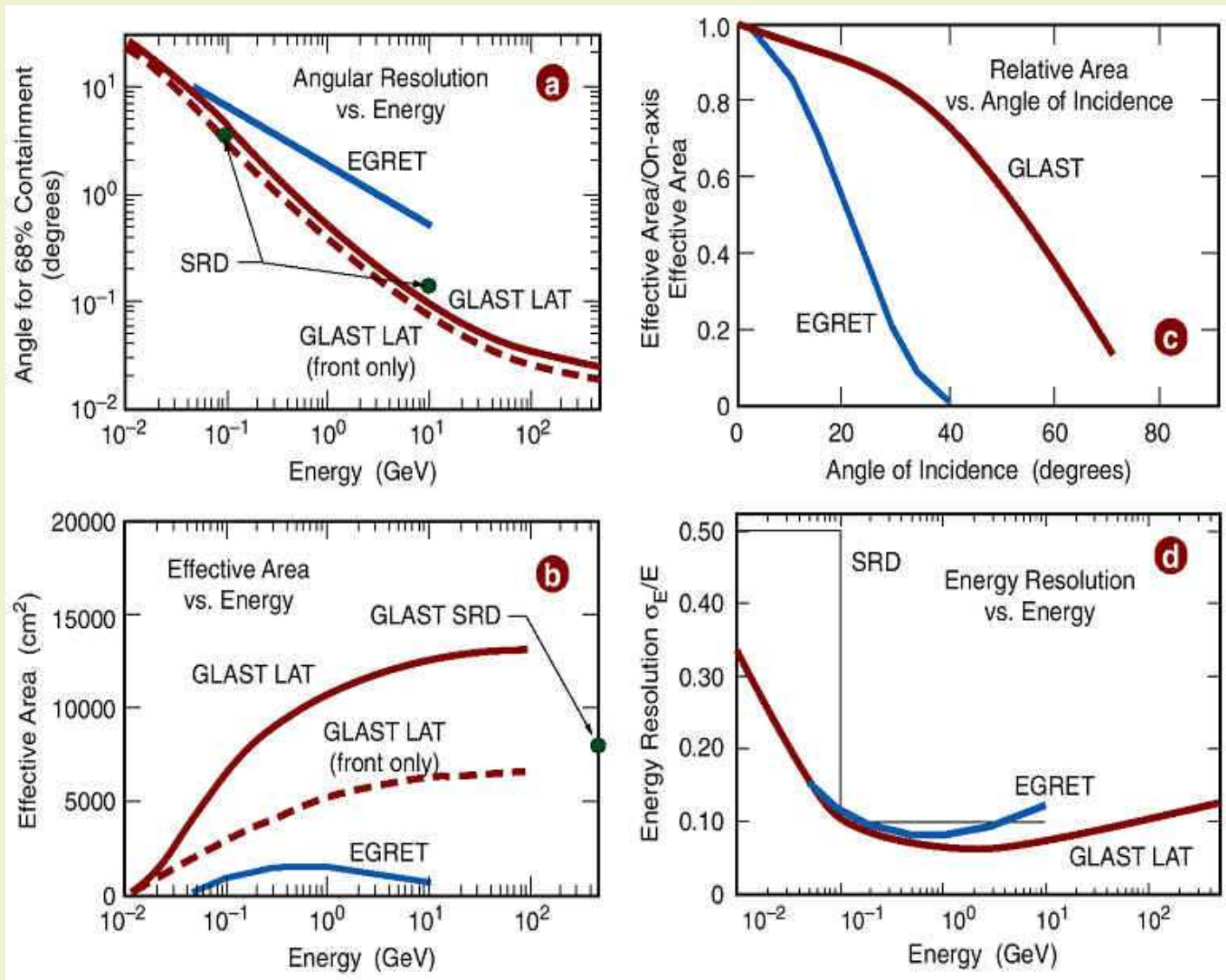
Quelques photons γ détectés par le LAT (trajectographe + calorimètre)



D'EGRET à AGILE et au Large Area Telescope (LAT) du Fermi Gamma-ray Space Telescope

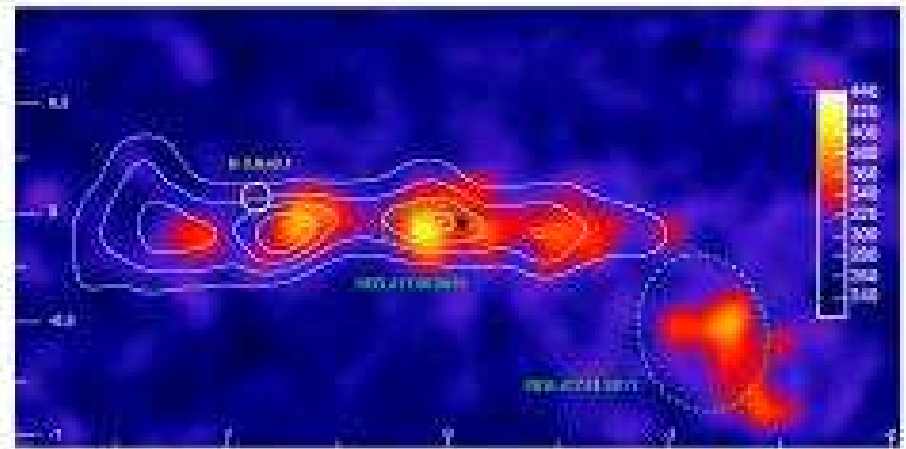
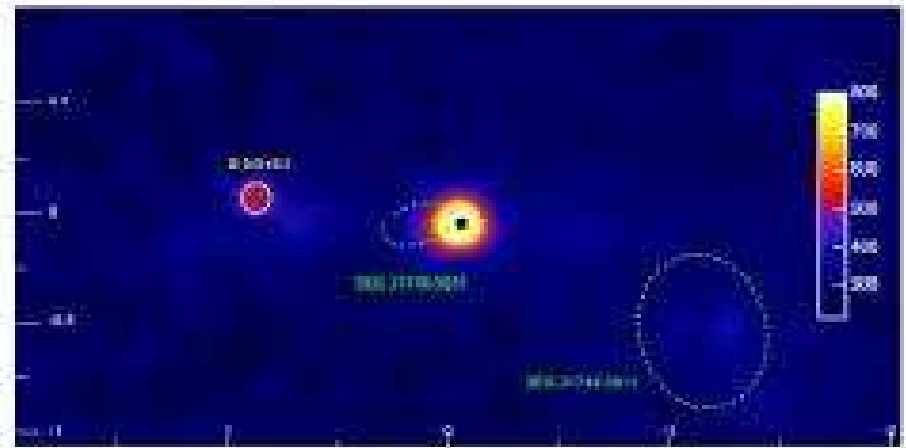
Instrument	EGRET	AGILE	FGST (LAT)
Lancement	1991	Avril 2007	Juin 2008
Domaine d'énergie	2 MeV-30 GeV	30 MeV-50 GeV	10 MeV-300 GeV
Trajectographe	Chambre à étincelles	Pistes de silicium + W (14 pl.)	Pistes de silicium (18 pl. dont 14 avec W et 2 avec Pb)
Calorimètre	NaI (Tl) 8.5 X ₀	CsI (Tl) 1.5 X ₀	CsI (Tl) 10 X ₀
Surface effective de détection	1200 cm ² à 1 GeV	700 cm ² à 1 GeV	10 000 cm ² à 10 GeV
Champ de vue	0.20 stérad.	2 stérad.	2.4 stérad.
Résolution angulaire	1.5° à 1 GeV	0.6°	0.12° à 10 GeV 4° à 100 MeV
Temps mort	0.1 s	200 μs	26,5 μs

Fermi LAT (ex GLAST) comparé à EGRET



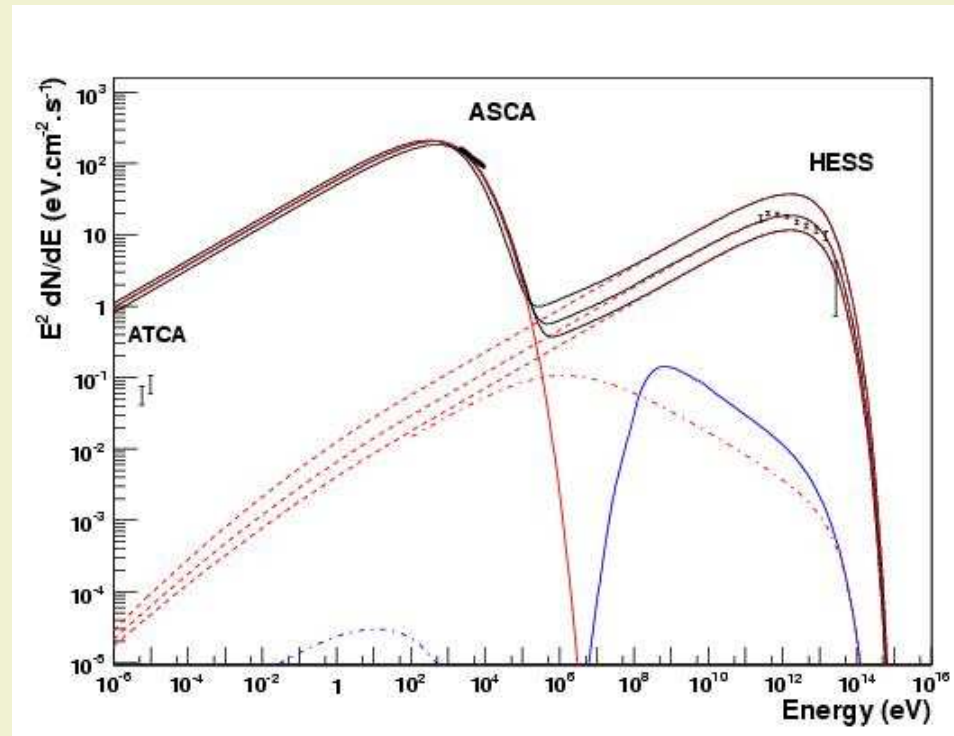
Aux énergies de H.E.S.S., le seul fond diffus appréciable est localisé dans les nuages moléculaires centraux

- Deux sources brillantes :
HESS J1745-290, compatible avec le trou noir central **SgrA***, et **G0.9+0.1** vestige de supernova composite, qu'il faut soustraire pour mettre en évidence ...
- ... les régions d'émission γ diffuse
Nature 439 (2006) 695
 - ◆ La source EGRET 3EG1744-3011
 - ◆ Les nuages moléculaires géants (révélés par l'émission radio des molécules CO and CS : contours blancs sur la carte)



Modélisation du spectre à bande large (radio-X- γ) de RX J1713-3946 :(1) Émission des électrons dominante ?

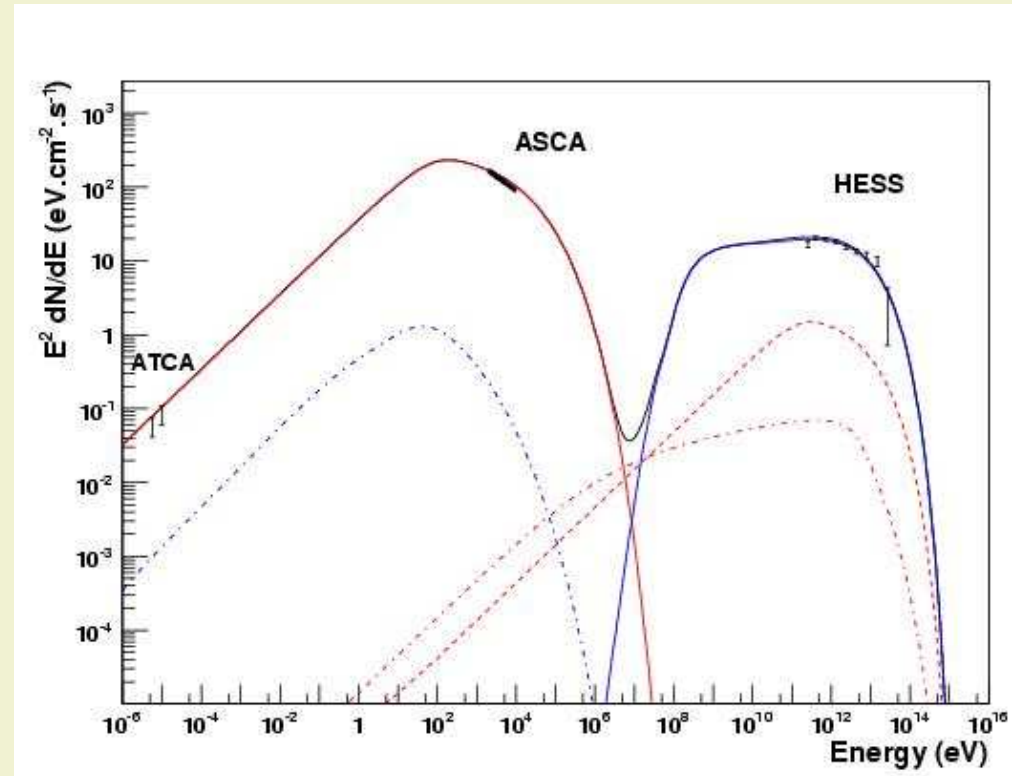
- Spectre des électrons accélérés en loi de puissance d'indice 2,4 + coupure exponentielle à 80 TeV
- Énergie injectée 10^{50} erg
- Rapport e/p à l'injection 3×10^{-2}
- ... mais :
 - ◆ incompatibilité avec les données radio
 - ◆ champs magnétiques faibles, comparables avec la moyenne interstellaire, peu compatibles avec un choc fort.



Spectres globaux : de haut en bas
B = 6 μ G, 8 μ G, 10 μ G.

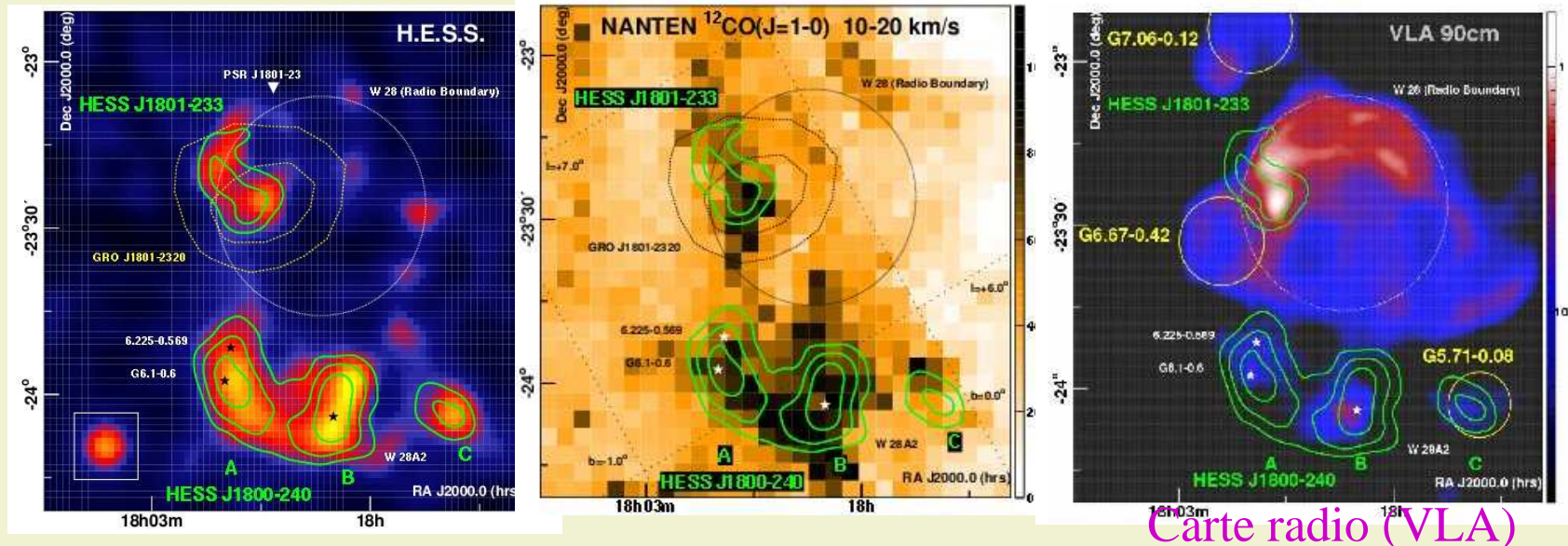
Modélisation du spectre à bande large (radio-X- γ) de RX J1713-3946 :(2) Émission des protons dominante ?

- Spectre des protons accélérés en loi de puissance d'indice 1,98 et coupure exponentielle à 120 TeV
- Énergie injectée 10^{50} erg
- Rapport e/p à l'injection: 5×10^{-4}
- $B = 35 \mu\text{G}$ (choc)
- Densité $1,5 \text{ p cm}^{-3}$



Les données de Fermi-LAT aideront à trancher entre les deux modèles

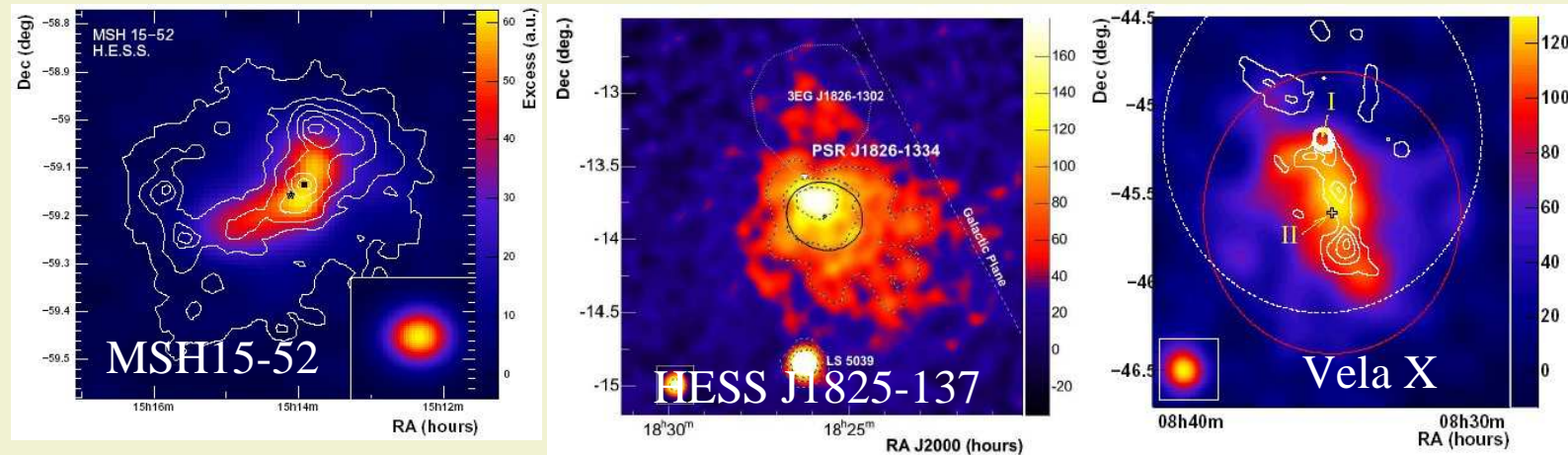
Vestiges de très anciennes supernovæ ($> 10^4$ ans) en interaction avec des nuages moléculaires



Carte radio (VLA)

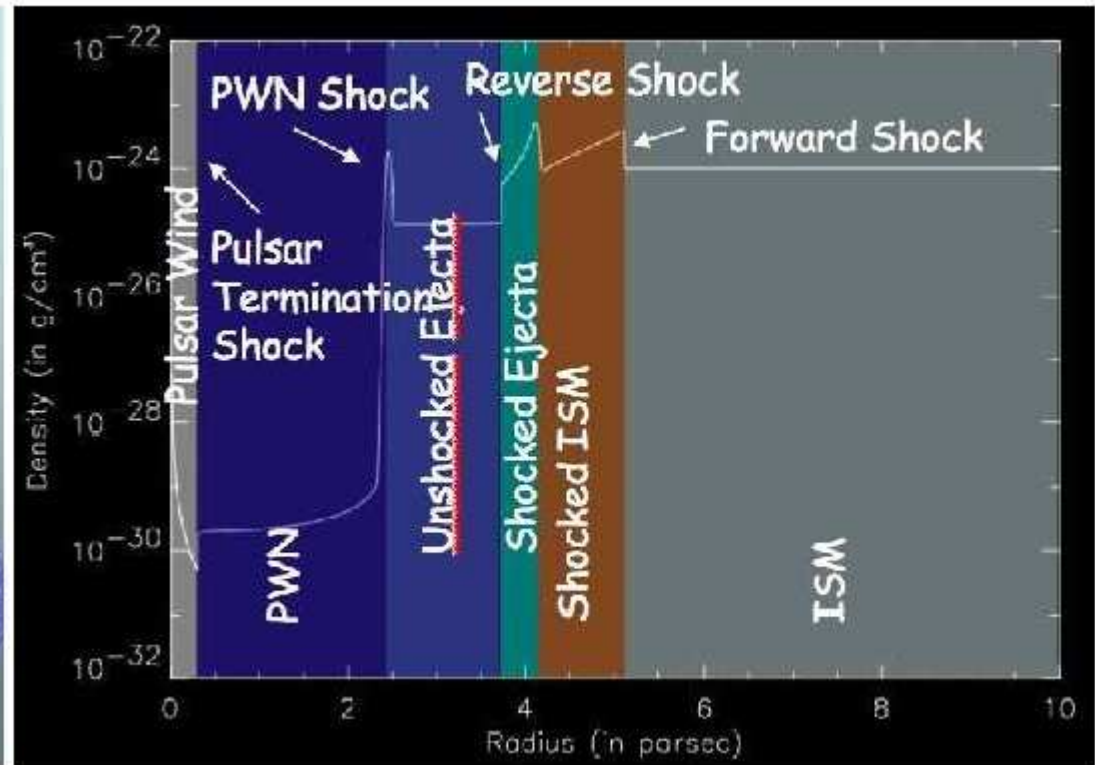
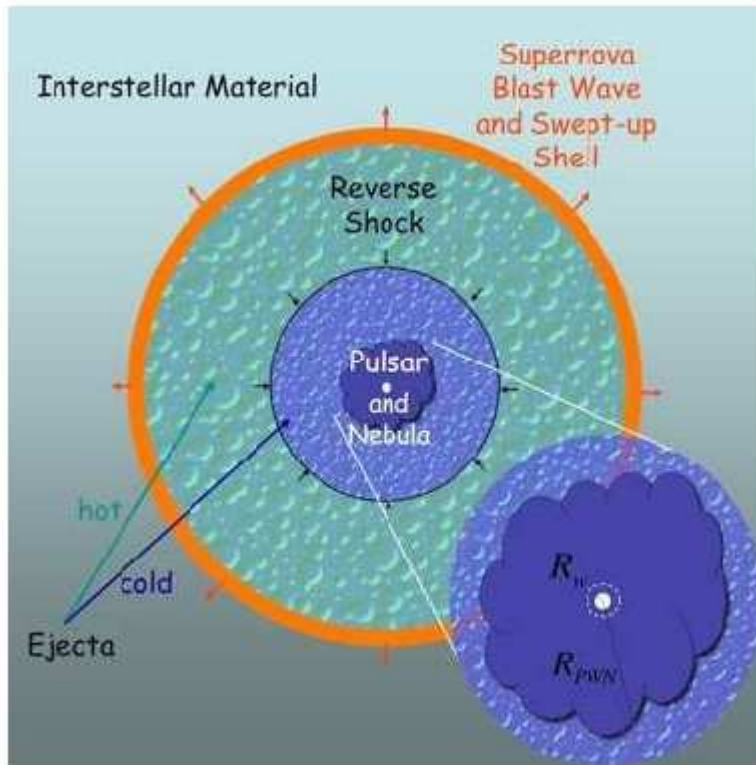
- W28 : âge entre 35000 et 150000 ans (phase radiative).
- Distance entre 1.8 et 3.3 kpc
- Interaction avec nuage moléculaire dans sa partie est et nord-est, signée par des **émissions masers** OH (1720 MHz) (inversion de population dans le gaz choqué)
- **Le signal γ coïncide avec le nuage moléculaire**
- Les sources au sud correspondent à des régions de formation d'étoiles (régions H II) et ne sont peut-être pas liées à W28.
- Des cas analogues ont été trouvés par MAGIC et VERITAS avec IC 443 et par H.E.S.S. avec W51

Autres sources galactiques au-dessus de 100 GeV

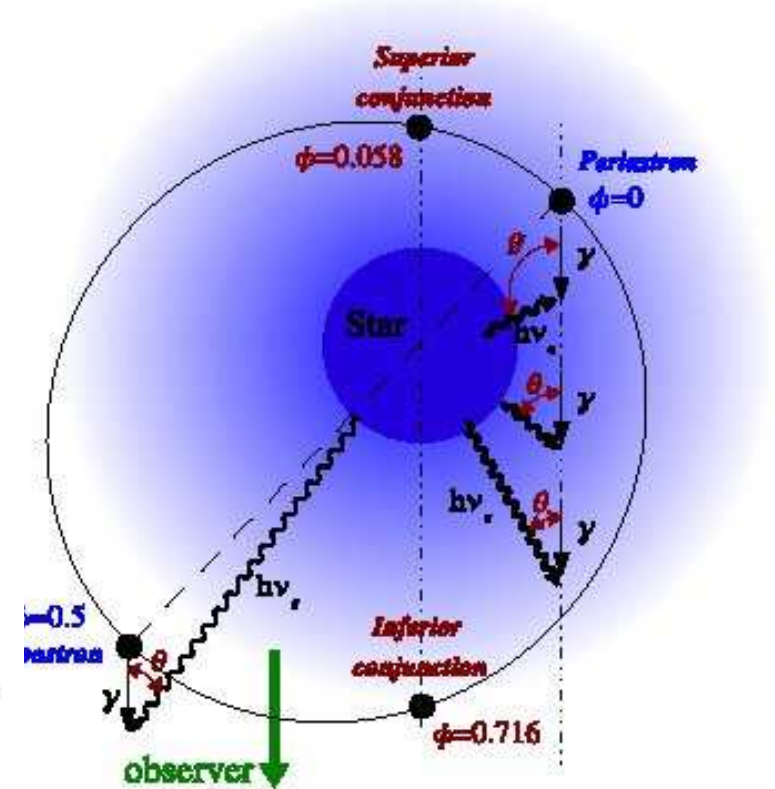
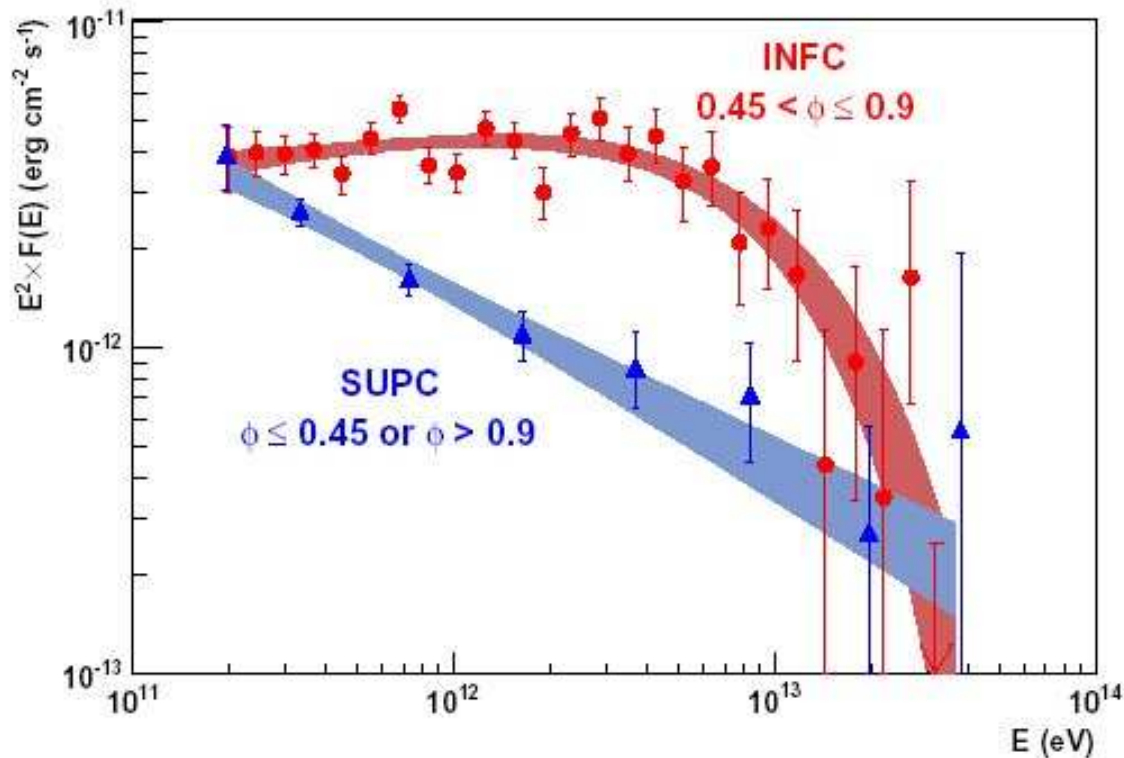


- Les sources galactiques les plus nombreuses découvertes au-dessus de 100 GeV sont les **nébuleuses de vent de pulsar**. La nébuleuse est souvent étendue et décentrée par rapport au pulsar de distances comparables à la taille de la nébuleuse elle-même..
- On a découvert **plusieurs systèmes binaires** émetteurs de γ au-dessus de 100 GeV:
 - ◆ PSR B 1259-63 + étoile massive Be star (période 3.4 ans) (H.E.S.S.)
 - ◆ LS 5039 (période 3.9 jours) (H.E.S.S.)
 - ◆ LS I+61°303 (période 26.8 jours) (MAGIC)
- Associations OB, **régions de forts vents stellaires** d'étoiles Wolf-Rayet
 - ◆ Cyg. OB2 (HEGRA)
 - ◆ Westerlund 2 (H.E.S.S.)

Schéma d'une nébuleuse de vent de pulsar d'après P. Slane arXiv 0811.1954



Le système binaire LS 5039 : modulation orbitale du flux γ



- Spectres très différents dans des phases orbitales différentes : spectre plus dur au voisinage de la conjonction inférieure.
- L'absorption des γ par l'intense champ de photons de l'étoile pourrait expliquer partiellement la modulation.

Classification des blazars

FSRQ et BL Lac (LBL et HBL)

■ Flat Spectrum Radio Quasar (FSRQ)

- ◆ Plus haute luminosité $\approx 10^{47} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$
- ◆ Pic synchrotron dans l'infrarouge
- ◆ EGRET/FGST explorent la partie descendante de la bosse gamma

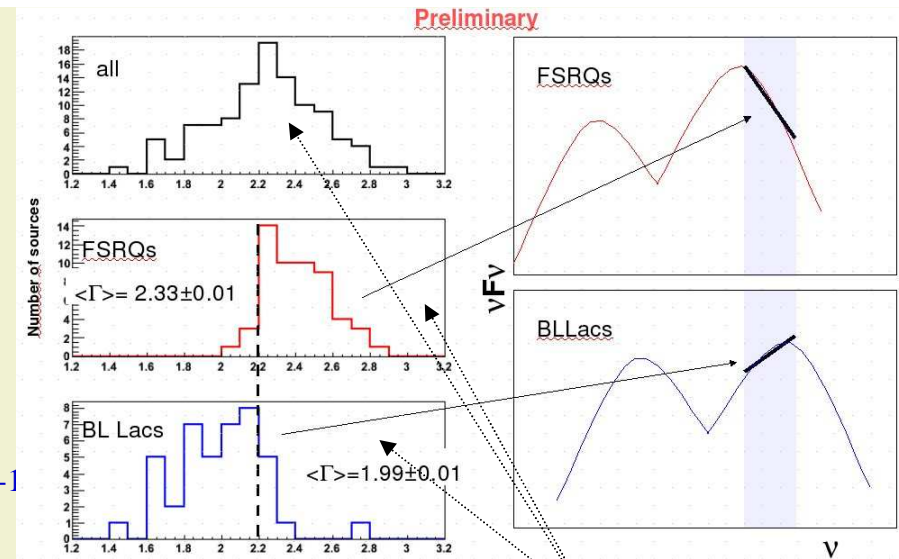
■ BL Lac (d'après la source BL Lacertæ qui en est le prototype)

- ◆ Luminosité plus basse $\approx 10^{45} - 10^{46} \text{ erg s}^{-1}$
- ◆ EGRET/FGST explorent la partie ascendante de la bosse gamma
- ◆ Deux variétés :

- **LBL (Low frequency BL Lac)** : pic synchrotron dans l'infrarouge ou le visible et pic gamma au GeV
- **HBL (High frequency BL Lac)** : pic synchrotron dans l'UV ou les rayons X et pic gamma au TeV

■ Le télescope Fermi a identifié 57 FSRQ et 42 BL Lac (dont 35 LBL et 7 HBL)

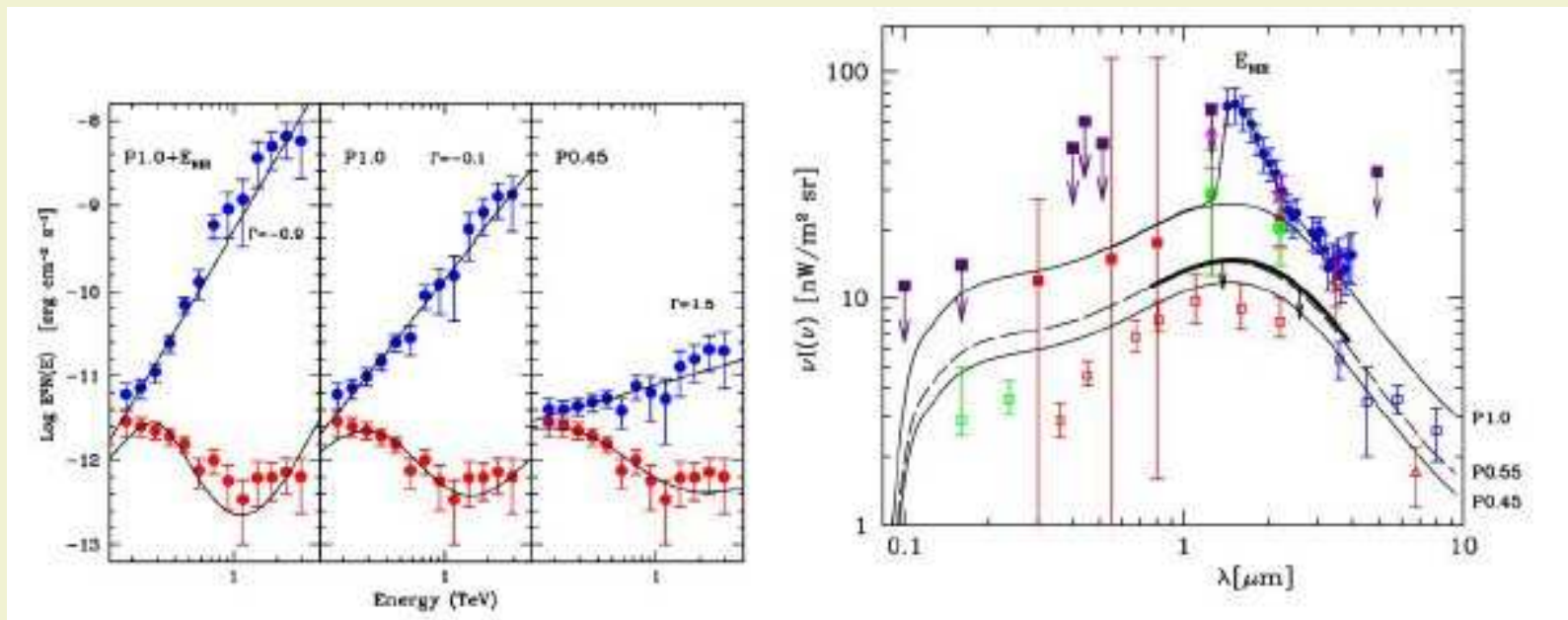
■ Les télescopes Tcherenkov ont essentiellement détecté une vingtaine de BL Lac de type HBL (exceptions : BL Lacertæ=LBL et 3C279=FSRQ (MAGIC))



FGST :
distribution des
indices spectraux
(B. Lott 2009)

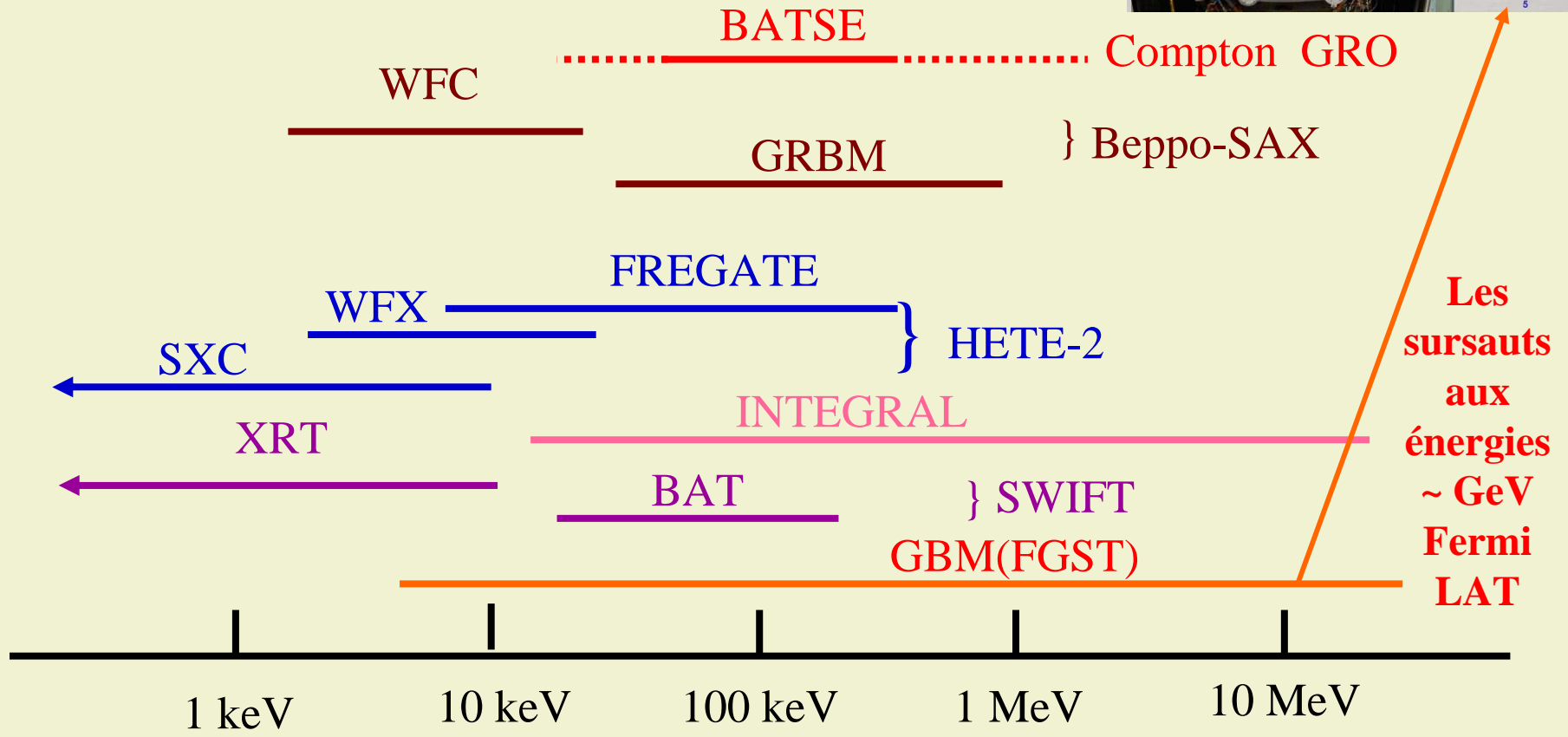
Les spectres des blazars apportent des contraintes sur l'intensité de la lumière de fond extragalactique (Nature **440** (2006) 1018)

- H.E.S.S. a utilisé les spectres de deux blazars lointains **1ES1102-232** et **H2356-309** pour borner l'effet de l'absorption des γ par la lumière de fond extragalactique (infrarouge proche et visible)
- Après correction de l'effet d'absorption, le spectre à la source doit avoir un indice spectral $> 1.5 \rightarrow$ pour une forme donnée du spectre de la lumière de fond, on constate que **son intensité est proche des bornes inférieures fournies par le simple comptage de galaxies.**

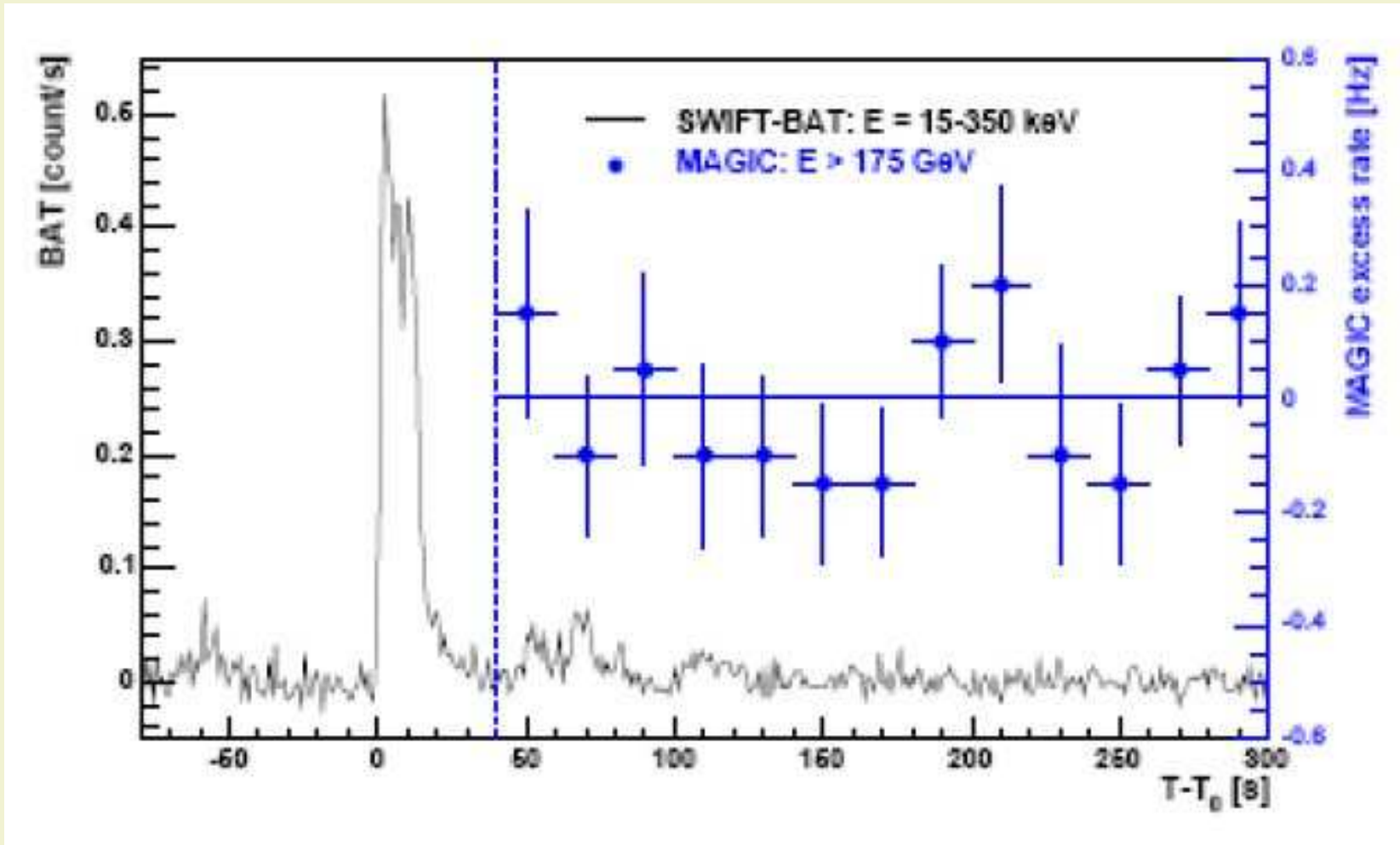


Sursauts gamma

- Jusqu'au lancement de la mission spatiale Fermi, les sursauts gamma n'étaient étudiés qu'aux énergies < quelques MeV
- Le détecteur GBM (Gamma-ray Burst Monitor 10 keV-10 MeV) à bord du satellite donne l'alerte au télescope gamma (LAT)



Sursauts gamma : pas de détection $E > 175$ GeV malgré les capacités de repointage rapide de MAGIC

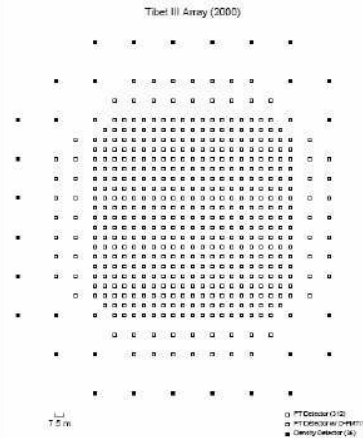


Expériences d'astronomie gamma à grand champ de vue

On détecte les particules chargées et les γ secondaires de la gerbe arrivant au sol (haute altitude)

Tibet

- 4300m asl
- Scintillator array
- 497 detectors
 - 0.5m² each
 - 5mm lead on each
- 5.3x10⁴ m² (phys. area)
- 680 Hz trigger rate
- 0.9° resolution



Tibet III



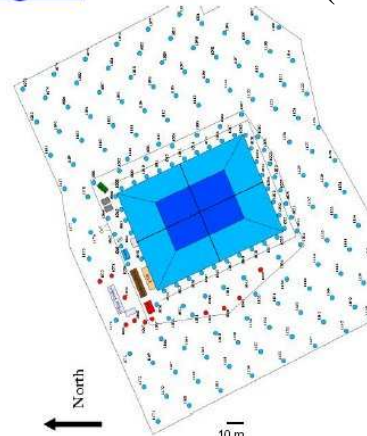
Scintillateurs



Milagro

Milagro Los Alamos (USA)

- 2600m asl
- Water Cherenkov Detector
- 898 detectors
 - 450(t)/273(b) in pond
 - 175 water tanks
- 3.4x10⁴ m² (phys. area)
- 1700 Hz trigger rate
- 0.5° resolution
- 90% proton rejection



« Piscine » (détecteur Tcherenkov à eau)

Grand champ de vue et 100% de temps utile
 mais faible discrimination γ /hadron :
 avec MILAGRO, il faut 3 mois pour détecter la
 nébuleuse du Crabe à 5 σ

Des détecteurs à grand champ de vue compléteront les réseaux d'imageurs Tcherenkov sans vraiment les concurrencer

- Il existe un projet américain de détecteur à effet Tcherenkov dans l'eau **High Altitude Water Cherenkov (HAWC)** qui devrait être installé à **4100 m d'altitude dans la Sierra Negra (Mexique)**.
- Sa sensibilité devrait être **10 fois meilleure que celle de MILAGRO** : la nébuleuse du **Crabe sera détectée en un jour** (au lieu de 3 mois).
- **Relevé systématique** du ciel avec une sensibilité limitée et détection de **phénomènes imprévisibles** (sursauts de noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma).
- 900 cuves à eau (5 m de diamètre, 4.3 m de haut) sur une grille carrée 30×30 (22500 m²)
- Un photomultiplicateur de 8" au fond de chaque cuve et regardant vers le haut. **On détecte les particules chargées (nécessité de la haute altitude) et les γ secondaires de la gerbe.**
- Discrimination hadron/gamma à partir de la distribution plus ou moins régulière des signaux de chaque cuve.
- Résolution angulaire : 0.2° à 0.3°