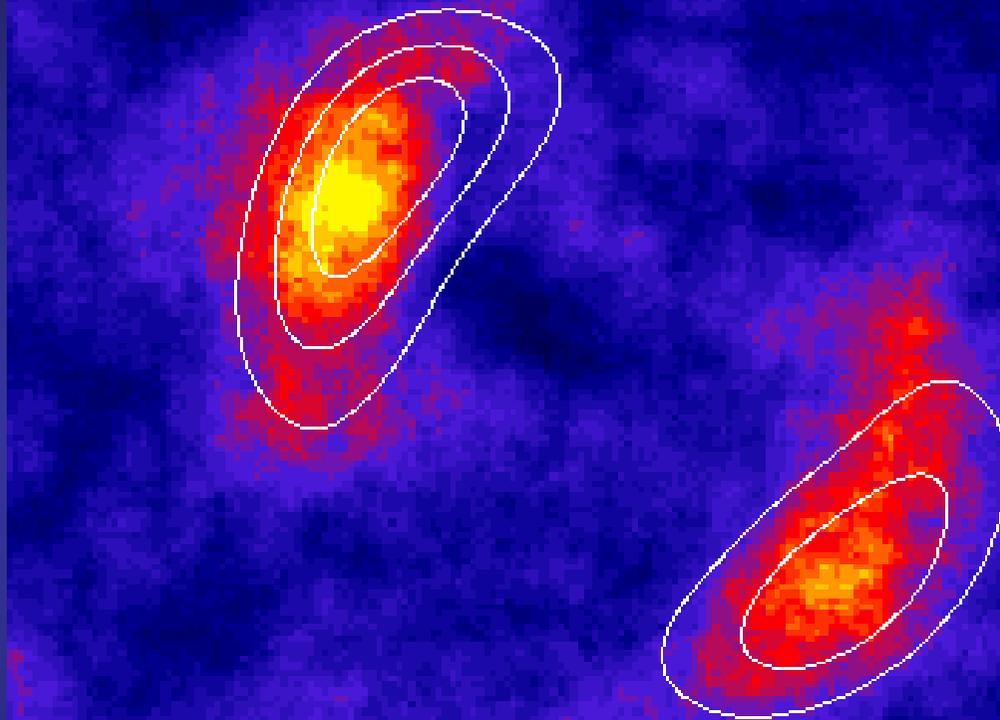


# Introduction à l'Astronomie Gamma



**Bernard Degrange**  
LLR, Ecole polytechnique & CNRS/IN2P3

## L'Astronomie Gamma : à la recherche des photons les plus énergétiques de l'Univers

eV :	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$
Hz :	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$10^{13}$	$10^{14}$	$10^{15}$	$10^{16}$	$10^{17}$	$10^{18}$	$10^{19}$
m		mm		$\mu\text{m}$				nm		
	Radio	Millimétrique	Infra-rouge	Op.	Ultra-vt.			Rayons X		

Elle couvre aujourd'hui 10 ordres de grandeur en énergie

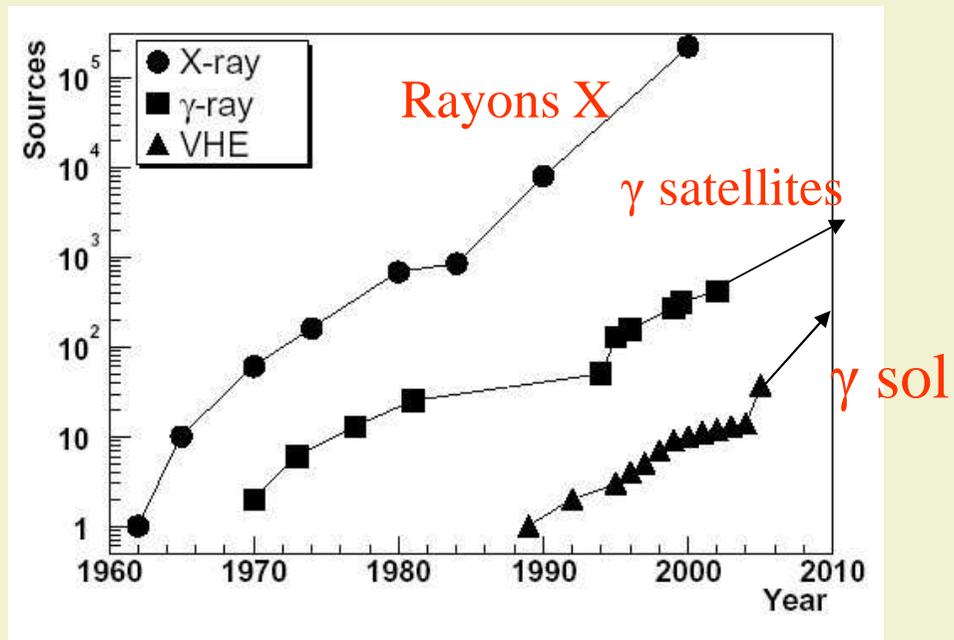
eV :	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$10^{13}$	$10^{14}$	$10^{15}$
	MeV		GeV			TeV			PeV	
$\gamma$	SATELLITES GAMMA			DÉTECTEURS AU SOL						
	Basses énergies			Hautes énergies			Très hautes énergies			

# Introduction à l'Astronomie Gamma

- Un bref historique
  - ◆ Une longue période pionnière (avant 1990)
  - ◆ L'envol (1990-2000)
  - ◆ La maturité (depuis 2000)
- Les enjeux astrophysiques
  - ◆ L'origine des rayons cosmiques
  - ◆ Les sources  $\gamma$  : des laboratoires sans équivalent terrestre
  - ◆ Les aspects cosmologiques
- Les défis instrumentaux
  - ◆ Les phénomènes de base de la détection
  - ◆ Panorama des différentes techniques dans différents domaines spectraux
  - ◆ Performances actuelles en sensibilité et résolution angulaire
- Perspectives

# 1. Un bref historique

- Une longue période pionnière (avant ~ 1990)
- L'envol (1990-2000)
- La maturité (depuis 2000)



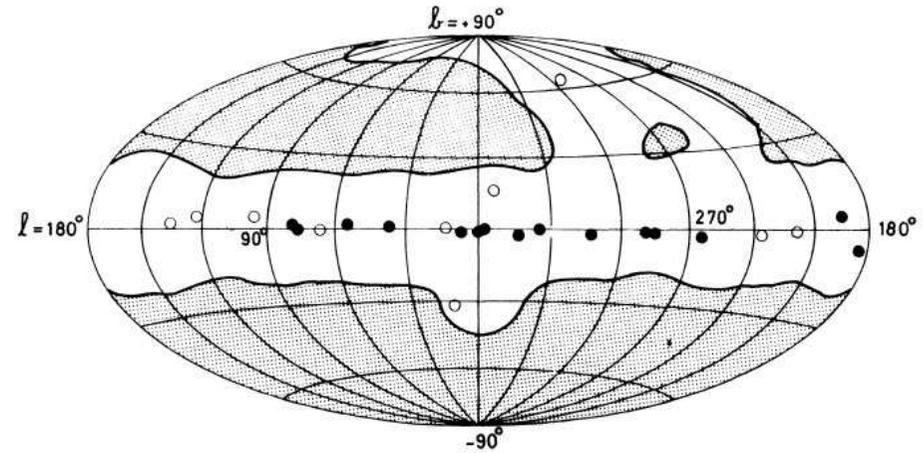
## 1.a Une longue période pionnière

- Avant 1967 :
  - ◆ Seulement des limites supérieures sur un flux de  $\gamma$  obtenues par des détecteurs à bord de ballons (dès 1949, Hulsizer & Rossi).et le satellite Explorer II (1965)
  - ◆ L'astronomie X débute en 1962 avec la découverte de la source Scorpius X 1 (Giacconi, Gursky, Paolini et Rossi, 1962)
- Les premiers satellites détecteurs de  $\gamma$  :
  - ◆ OSO-3 (1967-1968)  $E > 50$  MeV : détecte un flux de  $\gamma$  d'origine galactique
  - ◆ Satellite militaire Vela (1969) découvre les sursauts gamma ( $E \sim$  MeV) qui ne seront révélés à la communauté scientifique qu'en 1973
  - ◆ SAS-2 (1972-1973)  $E > 35$  MeV : détecte le flux  $\gamma$  diffus de la Galaxie et 3 sources ponctuelles : la nébuleuse du Crabe (le signal périodique du pulsar et le signal continu de la nébuleuse), la nébuleuse de Vela et une source qui, à l'époque n'avait pas de contrepartie en radio comme en optique : « Geminga ».
  - ◆ COS-B (1975-1982)  $E > 100$  MeV : détecte le flux  $\gamma$  diffus de la Galaxie et 25 sources ponctuelles dont une 3C273 est extra-galactique
- Au sol, les premiers télescopes à effet Tcherenkov atmosphériques n'arrivent pas à extraire un signal de  $\gamma$  ( $E \sim$  TeV) crédible de l'énorme fond dû aux rayons cosmiques chargés (voir D.J. Fegan, arXiv1104.2403)

## 1.b L'envol (1990-2000)

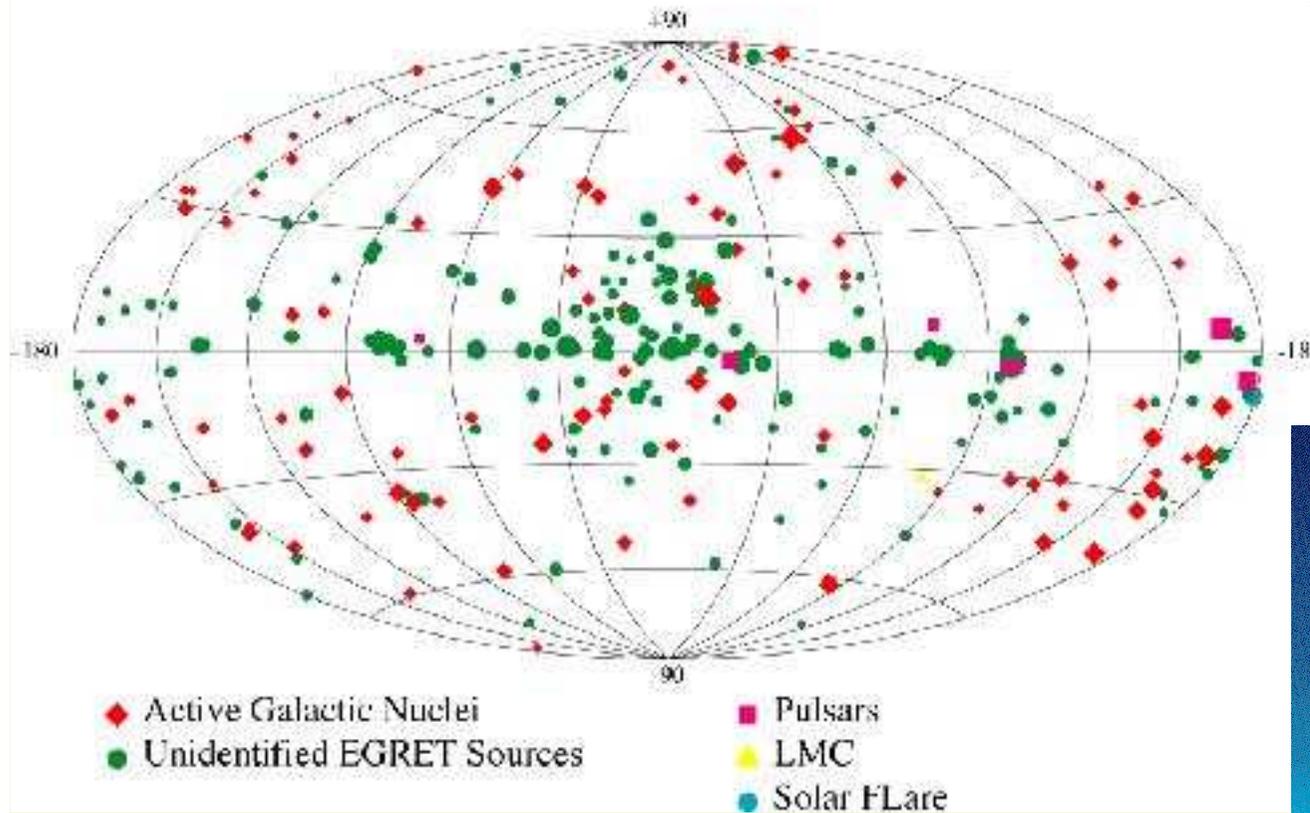
- La mission spatiale franco-russe GRANAT (1989-1994) :
  - ◆ SIGMA (35 keV-1,3 MeV) télescope à masque codé
- Le satellite Compton Gamma-Ray Observatory de la NASA (CGRO, 1991-2000)
  - ◆ BATSE (20 keV-1 MeV) : 4 détecteurs NaI pour la détection de sursauts  $\gamma$  → catalogue de 2740 sursauts gamma + isotropie. Origine extragalactique confirmée en 1997 (Beppo-SAX)
  - ◆ OSSE (50 keV-10 MeV) : collimateurs orientables + détecteur « phoswich » (NaI/CsI)
  - ◆ Comptel (0,8 MeV-30 MeV) : télescope à effet Compton
  - ◆ EGRET (2MeV-30 GeV) : chambre à étincelles + calorimètre → ~ 300 sources
- Premiers succès des techniques au sol reposant sur la lumière Tcherenkov des gerbes atmosphériques
  - ◆ L'imagerie Tcherenkov : découverte en 1989 du signal de la nébuleuse du Crabe au TeV à l'Observatoire Whipple (Arizona, USA)
  - ◆ L'échantillonnage temporel : ASGAT et Thémistocle (France) confirment le signal du Crabe en 1993, puis CÉLESTE (France) et STACEE (USA) après 1998
  - ◆ Progrès en imagerie Tcherenkov
    - HEGRA 1995 Canaries (stéréoscopie)
    - CAT 1996 France (imagerie à haute définition)
  - ◆ En 2000, quelques sources confirmées d'émission au TeV : nébuleuse du Crabe et 5 noyaux actifs de galaxie de type « blazar » : Mkn421, Mkn501, H1426+428, 1ES1959+650, 1ES2344+514, surtout détectés dans leurs phases éruptives.

# De COS-B (1975-1982) 25 sources ...

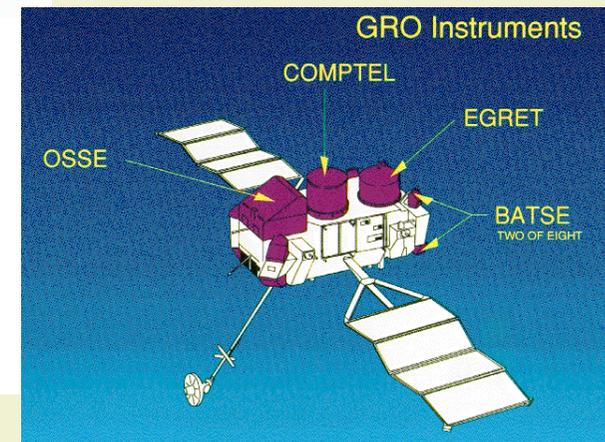


## Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



... à EGRET  
(1991-2000)  
~ 300 sources



# La première détection d'un signal gamma cosmique au sol

1989

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 342:379-395, 1989 July 1  
© 1989. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## OBSERVATION OF TeV GAMMA RAYS FROM THE CRAB NEBULA USING THE ATMOSPHERIC CERENKOV IMAGING TECHNIQUE

T. C. WEEKES,<sup>1</sup> M. F. CAWLEY,<sup>2</sup> D. J. FEGAN,<sup>3</sup> K. G. GIBBS,<sup>1</sup> A. M. HILLAS,<sup>4</sup> P. W. KWOK,<sup>1</sup> R. C. LAMB,<sup>5</sup>  
D. A. LEWIS,<sup>5</sup> D. MACOMB,<sup>5</sup> N. A. PORTER,<sup>3</sup> P. T. REYNOLDS,<sup>1,3</sup> AND G. VACANTI<sup>5</sup>

Received 1988 August 1; accepted 1988 December 9

### ABSTRACT

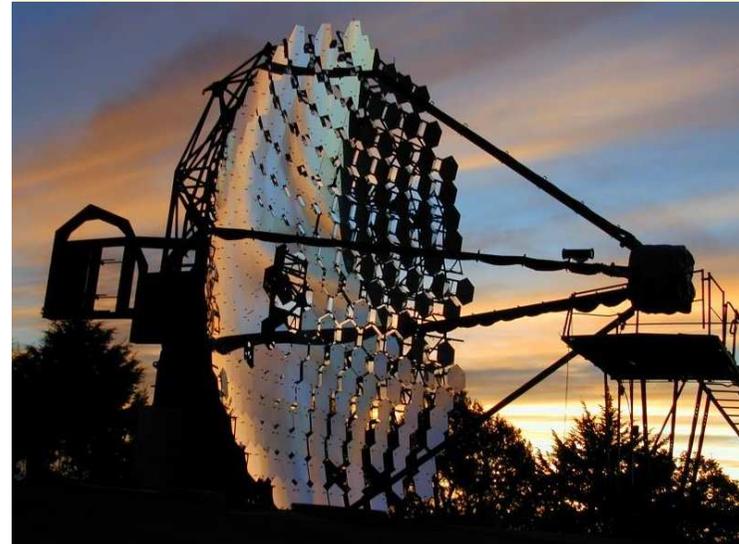
The Whipple Observatory 10 m reflector, operating as a 37 pixel camera, has been used to observe the Crab Nebula in TeV gamma rays. By selecting gamma-ray images based on their predicted properties, more than 98% of the background is rejected; a detection is reported at the  $9.0\sigma$  level, corresponding to a flux of  $1.8 \times 10^{-11}$  photons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  above 0.7 TeV (with a factor of 1.5 uncertainty in both flux and energy). Less than 25% of the observed flux is pulsed at the period of PSR 0531. There is no evidence for variability on time scales from months to years. Although continuum emission from the pulsar cannot be ruled out, it seems more likely that the observed flux comes from the hard Compton synchrotron spectrum of the nebula.

*Subject headings:* gamma rays: general — nebulae: Crab Nebula — pulsars — radiation mechanisms

### I. INTRODUCTION

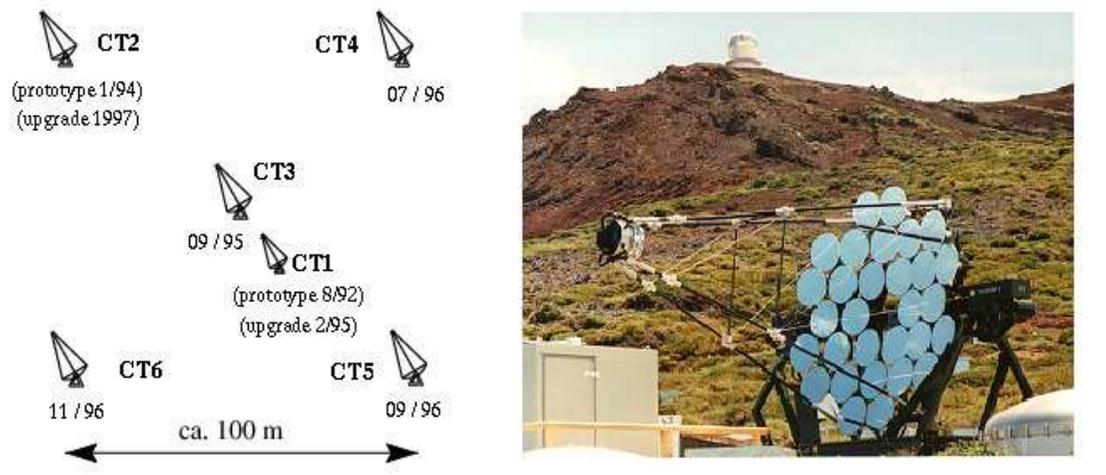
The observation of polarization in the radio, optical, and X-ray emission from the Crab Nebula is usually taken as confirmation of the synchrotron origin of the radiation and is a strong indication of the presence in the nebula of a reservoir of relativistic electrons with energies up to 1 TeV. The presence of the radio pulsar, PSR 0531, near the center of the nebula pro-

Subsequent to the discovery of PSR 0531 in the nebula, TeV gamma-ray observations concentrated on the pulsar because greater sensitivity could be achieved by the assumption of synchronization of the gamma-ray emission with the periodic radio emission. Several detections were reported at very high energies (Grindlay 1972; Jennings *et al.* 1974; Grindlay, Helmken, and Weekes 1976; Porter *et al.* 1976; Erickson, Fickle, and Lamb 1976; Vishwanath 1982; Vishwanath *et al.*



- Principe de l'imagerie Tcherenkov A.M. Hillas, 1985, 19th ICRC, La Jolla, USA permet de réduire considérablement le fond de rayons cosmiques chargés (gerbes hadroniques)
- Succès en 1989 de la technique d'imagerie Tcherenkov mise en œuvre à l'Observatoire Whipple (Arizona, USA) avec un télescope de 10 m de diamètre équipé d'une caméra de 37 pixels : T.C. Weekes, et al. ApJ 342 (1989) 379
- Puis en 1992, découverte du blazar Mkn 421, première source extra-galactique au TeV M. Punch, et al. Nature 358 (1992) 477.

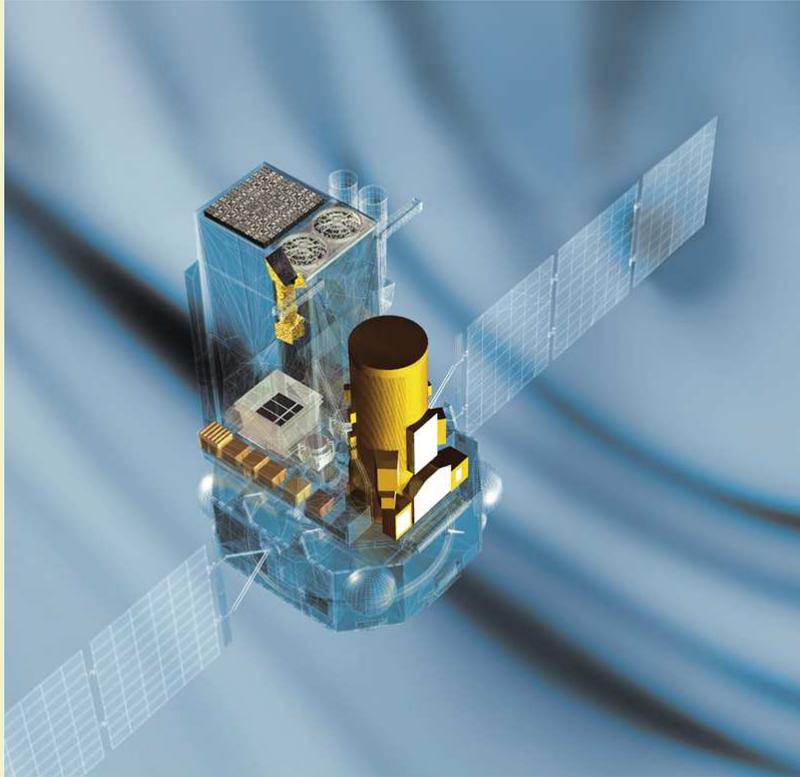
## Progrès dans l'imagerie Tcherenkov atmosphérique



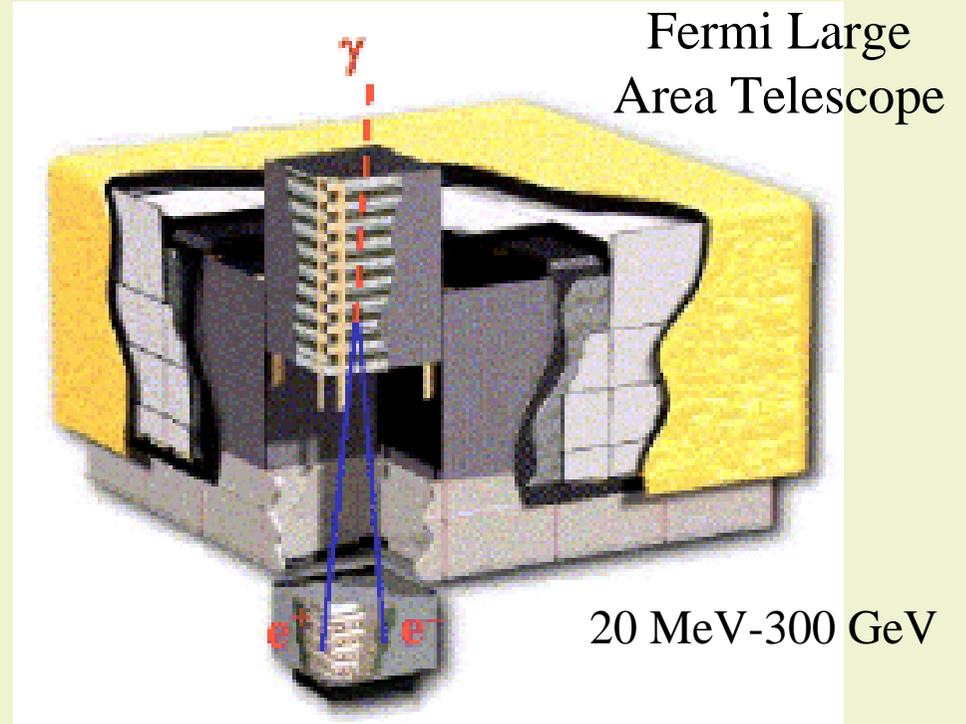
- **1995 HEGRA (Canaries)**  
premier réseau  
**stéréoscopique** de  
5 télescopes à effet  
Tcherenkov atmosphérique.
- **1996 CAT (Pyrénées Or.)**  
**caméra à haute définition**  
(546 pixels + anneau de  
garde), **électronique de  
déclenchement rapide**  
**intégrée à la caméra** → seuil  
de 250 GeV avec un miroir  
de 16 m<sup>2</sup>.

## 1.c La maturité (depuis ~2000)

- Nouvelle génération de satellites gamma :
  - ◆ INTEGRAL (15 keV-10 MeV, depuis 2002)  
catalogue de **1951 sources**
  - ◆ AGILE (30 MeV-50 GeV, depuis 2007)
  - ◆ Fermi Gamma-ray Space Telescope (depuis 2008)
    - Fermi Large Area Telescope (Fermi LAT, 30 MeV-300 GeV)  
**1451 sources** dans le premier catalogue (ApJ Supp. **188** (2010) 405)
    - Gamma-ray Burst Monitor (GBM, 8 keV-30 MeV)
- Nouvelle génération de télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique → catalogue d'environ **100 sources  $E > 100$  GeV** (<http://tevcat.uchicago.edu>)
  - ◆ H.E.S.S. (4 télescopes, Namibie, depuis 2003) → H.E.S.S. II (2012)
  - ◆ MAGIC (Canaries, depuis 2004) → MAGIC II (2 télescopes, 2010)
  - ◆ VERITAS (4 télescopes, Arizona, depuis 2007)

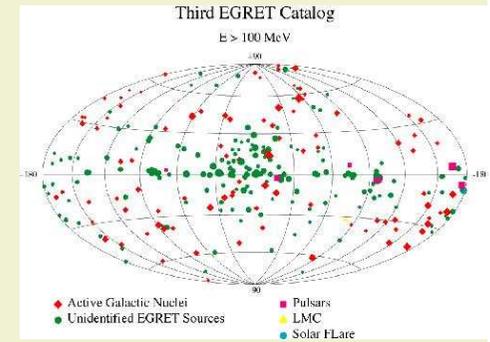
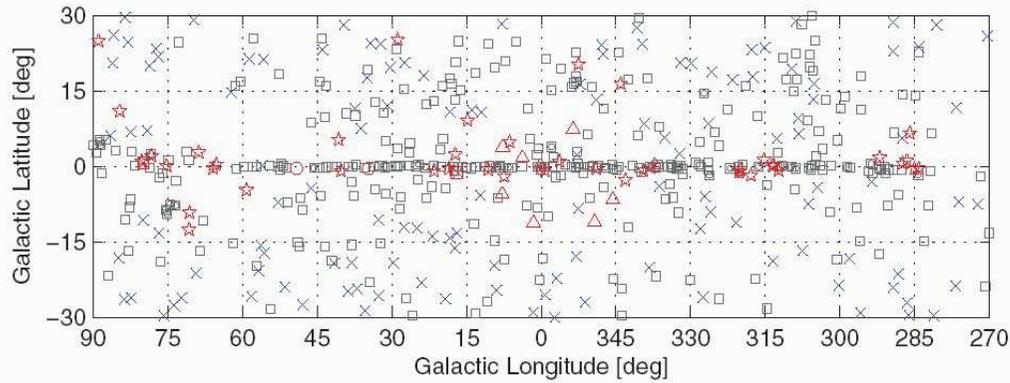


Le satellite INTEGRAL  
(15 keV-10 MeV) avec ses deux  
instruments : l'imageur IBIS et le  
spectromètre SPI



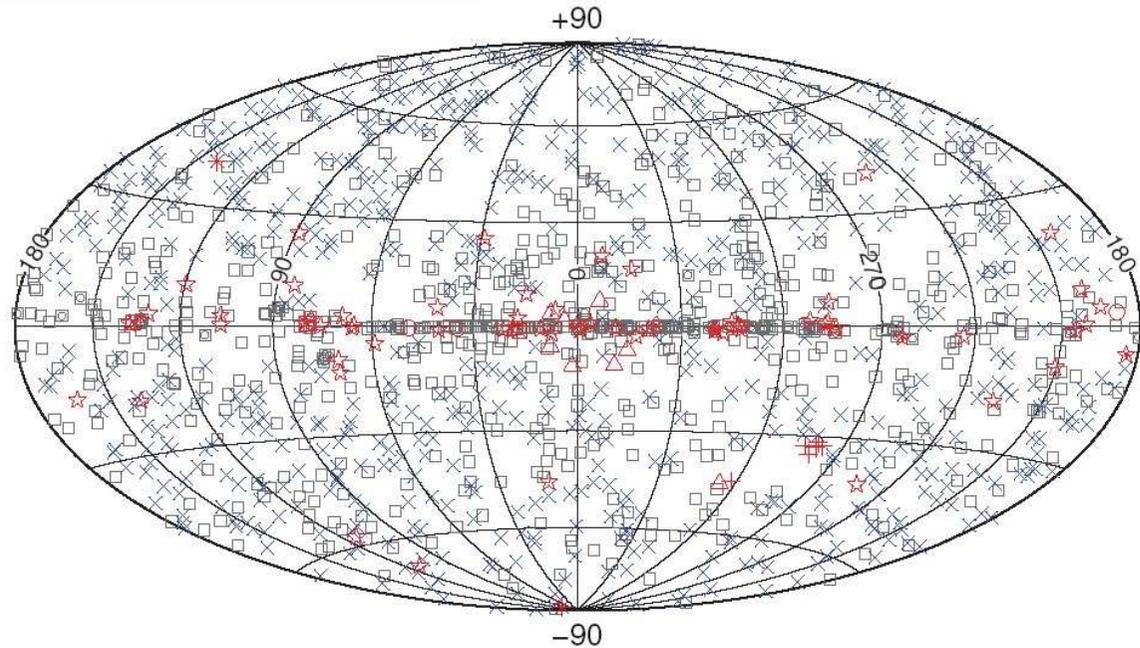
Gamma-ray  
Burst Monitor  
(Fermi)  
10 keV-20 MeV

# D'EGRET...



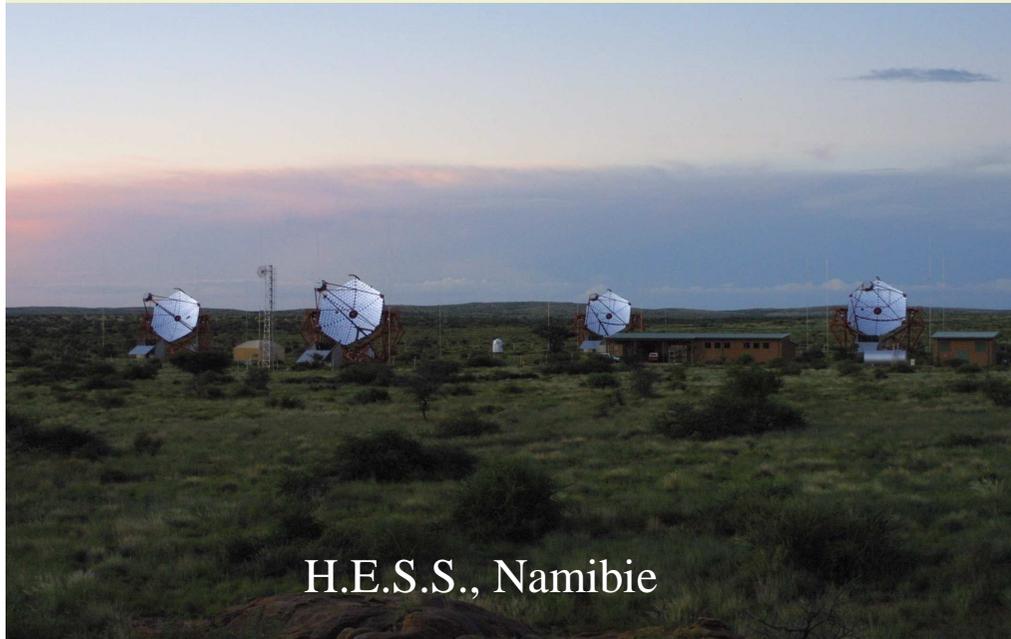
à Fermi LAT :  
1451 sources dans  
le premier  
catalogue

B. Degrange

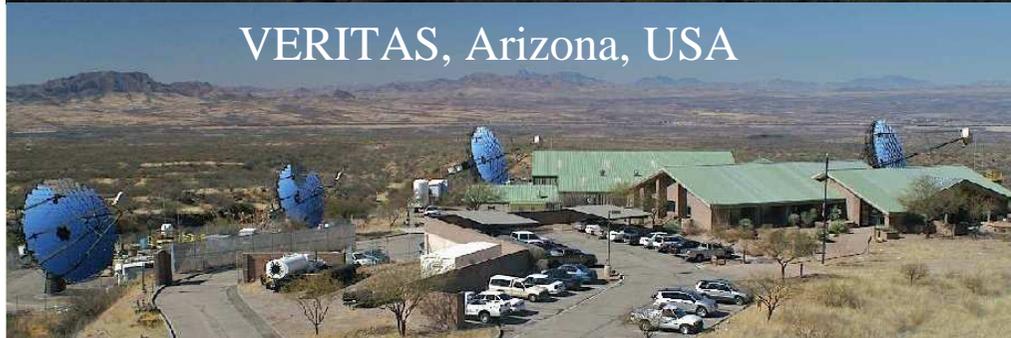


- |                  |  |                    |
|------------------|--|--------------------|
| □ No association | ◻ Possible association with SNR or PWN | ☆ Pulsar w/PWN     |
| × AGN            | ☆ Pulsar                               | △ Globular cluster |
| * Starburst Gal  | ◇ PWN                                  | ⊠ XRB or MQO       |
| + Galaxy         | ○ SNR                                  |                    |

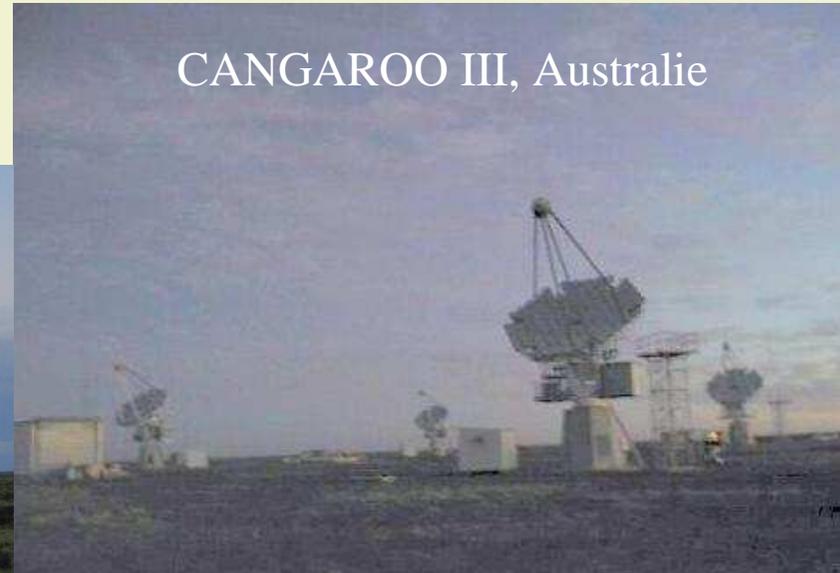
# Principaux réseaux de télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique



H.E.S.S., Namibie



VERITAS, Arizona, USA

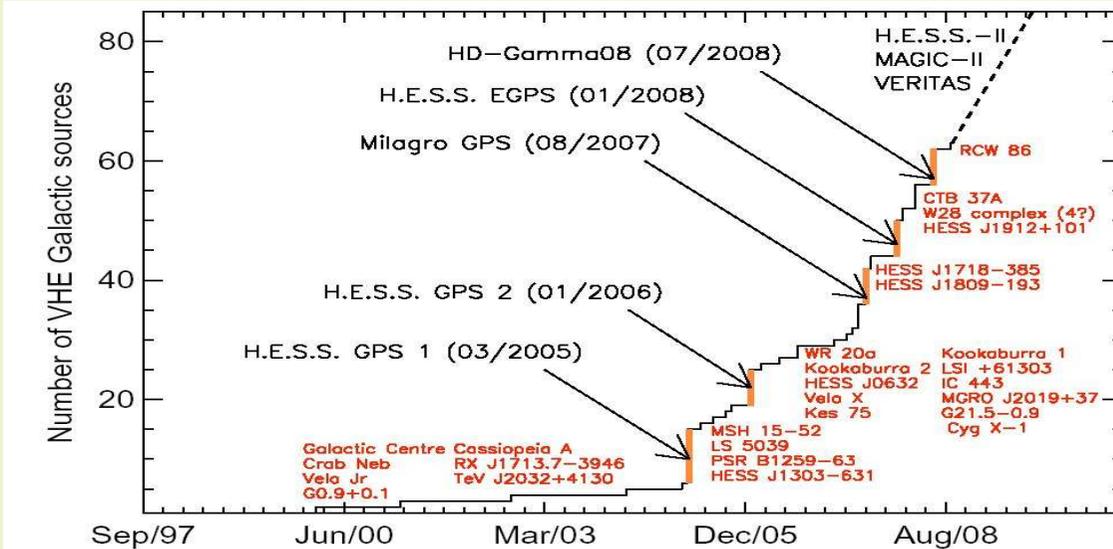


CANGAROO III, Australie

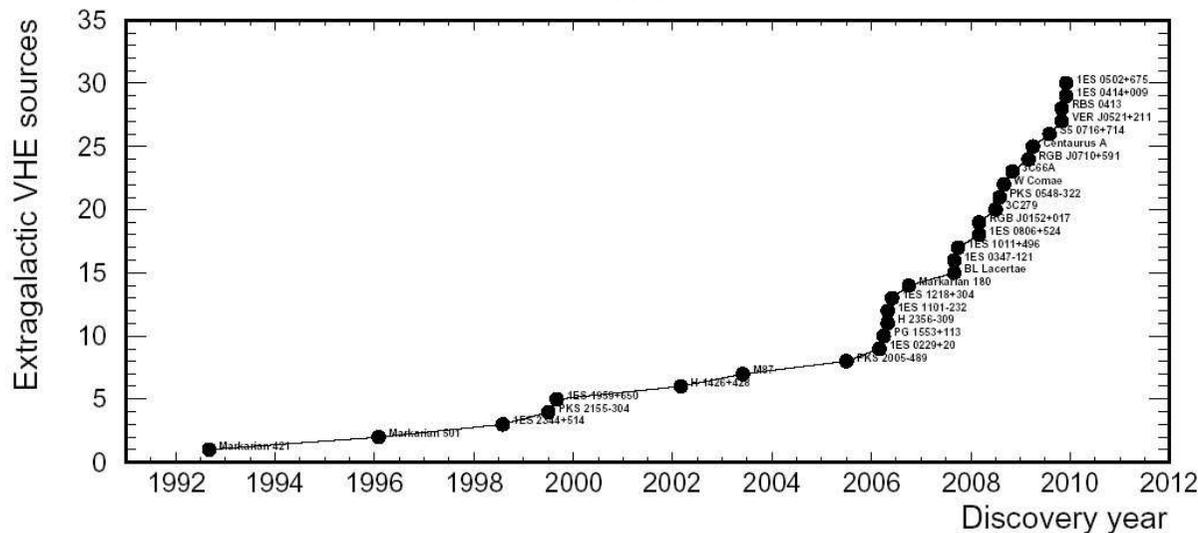


MAGIC II,  
Canaries  
Espagne

# Nombre de sources détectées au TeV en fonction du temps de 1990 à 2010



Sources galactiques  
(M. Renaud 2009,  
arXiv 0905.1287)



Sources extra-galactiques  
(B. Giebels et al. 2010,  
arXiv 1005.2330)

## 2. Les enjeux astrophysiques

- L'origine des rayons cosmiques
  - ◆ Nécessité de messagers neutres et stables : photons  $\gamma$  et neutrinos
  - ◆ Localiser les protons et noyaux cosmiques par les  $\gamma$
  - ◆ Localiser les électrons cosmiques par les  $\gamma$
- Les sources  $\gamma$  : des laboratoires de physique sans équivalent terrestre
  - ◆ Études spectrales : électrons ou protons ?
  - ◆ Études morphologiques des sources étendues
  - ◆ Analyse temporelle des sources variables
- Les aspects cosmologiques
  - ◆ Quand l'Univers est-il transparent aux photons  $\gamma$  de haute énergie ?
  - ◆ L'invariance de Lorentz testée à l'échelle cosmologique
  - ◆ À la recherche de la matière noire

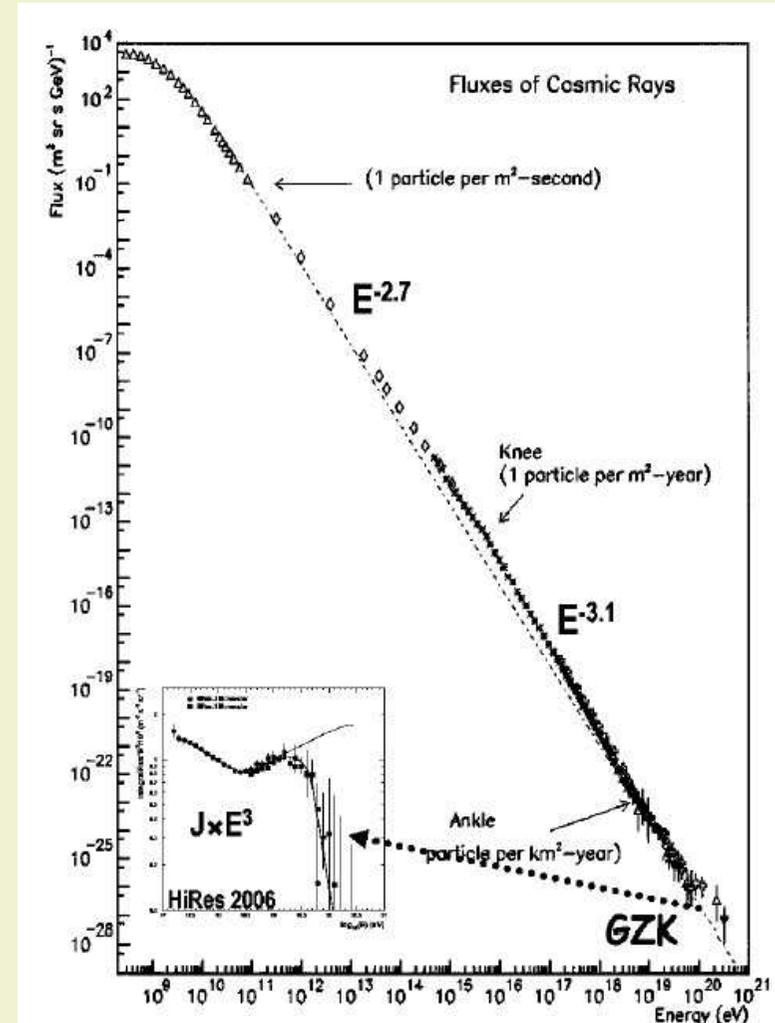
## 2.a L'origine des rayons cosmiques

- Bien que les rayons cosmiques soient connus depuis un siècle (V. Hess 1912), leur origine n'est pas encore clairement établie.
- Les rayons cosmiques sont pour l'essentiel des particules **chargées** (87% de p, 12% d'hélium, 1% d'éléments lourds et 2% d'électrons) qui se propagent dans le milieu interstellaire constitué par un plasma **porteur d'un champ magnétique turbulent**.
- Les rayons cosmiques **diffusent sur les irrégularités magnétiques** (ondes d'Alfvén) et sont **isotropisés** sauf peut-être aux énergies les plus élevées  $\sim 10^{19}$  eV  $\rightarrow$  **pas d'astronomie avec les particules chargées, sauf peut-être à  $10^{20}$  eV ?**
- Nécessité d'utiliser **des messagers neutres et stables** (gamma et neutrinos de haute énergie) pour **identifier les accélérateurs cosmiques et comprendre les processus qui y sont à l'œuvre**



## 2.a1 Les rayons cosmiques : insuffisance des données à la Terre

- Le spectre des rayons cosmiques à leur arrivée sur Terre montre l'existence d'accélérateurs très puissants → les particules les plus énergétiques atteignent  $10^{20}$  eV !
- ... mais coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) à  $4 \times 10^{19}$  eV (p + photon micro-onde)
- Les changements de pente du spectre restent mal compris :
  - ◆ le genou à  $4 \times 10^{15}$  eV
  - ◆ la cheville à  $4 \times 10^{18}$  eV
- En effet, le spectre à l'arrivée sur Terre intègre les effets :
  - ◆ de l'accélération des particules
  - ◆ de leur échappement de l'accélérateur
  - ◆ de leur propagation dans la Galaxie
- ... et ceci sur toute l'histoire cosmique



d'après S. Swordy et Abbasi et al. (2008)

## Le spectre fournit cependant une contrainte énergétique pour la production des rayons cosmiques galactiques

- L'essentiel du flux énergétique des rayons cosmiques vient des énergies inférieures à  $4 \times 10^{15}$  eV (genou) où les particules sont d'origine galactique → densité d'énergie  $\sim 10^{-12}$  erg cm<sup>-3</sup>
- Pour maintenir le flux de rayons cosmiques dans la Galaxie (puissance  $3 \times 10^{40}$  erg/s), il suffit de < 10% de l'énergie mécanique libérée par les supernovæ (Blandford & Eichler 1987)
- C'est la seule population d'objets galactiques satisfaisant à cette contrainte, ce qui en fait des candidats privilégiés à l'origine des rayons cosmiques galactiques



Image composite (NASA-ESA) de la supernova 1006 (rayons X Chandra en bleu, optique en jaune, radio en rouge)

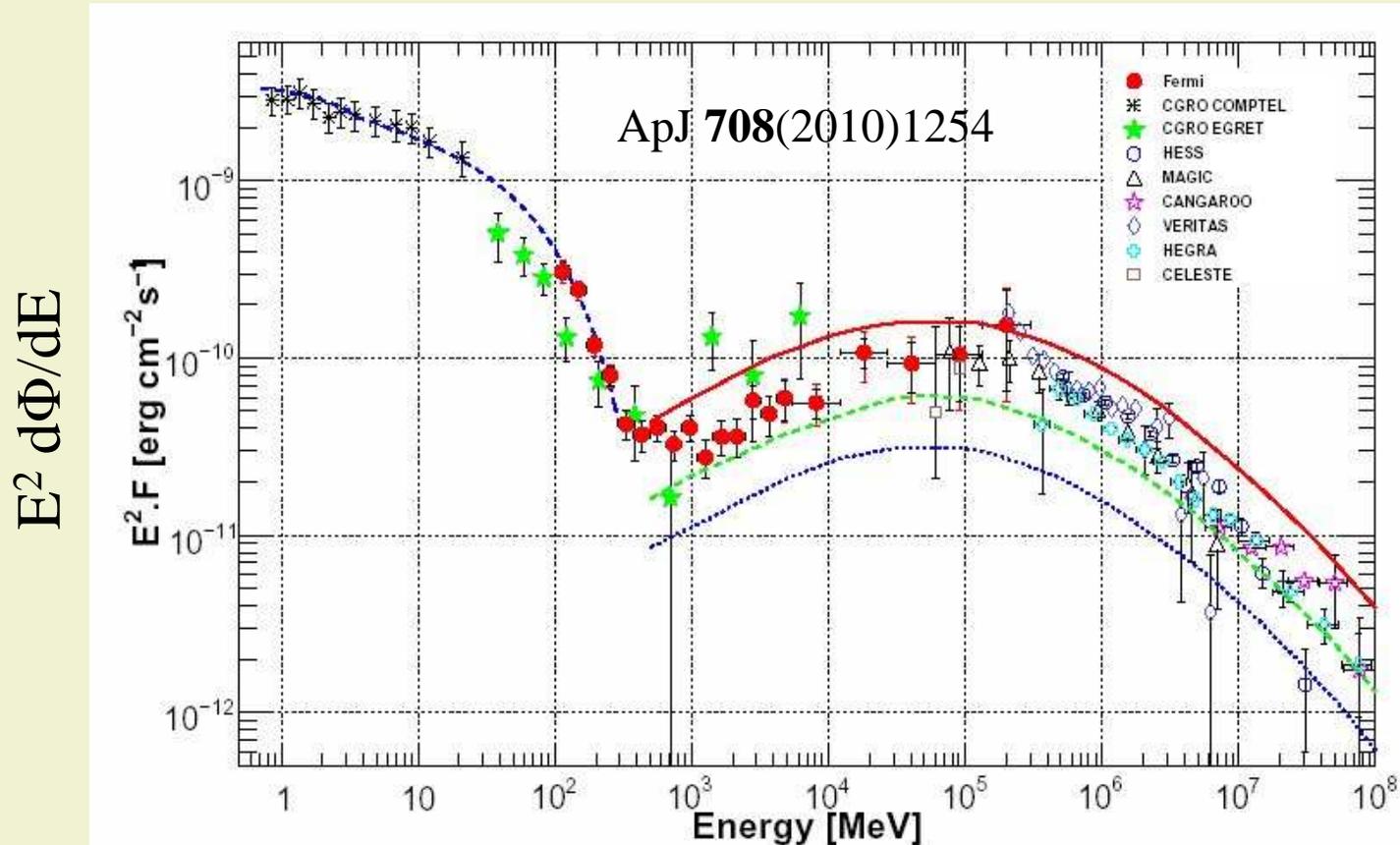
## 2.a2 Localiser les protons et noyaux de haute énergie

- Les protons ou noyaux cosmiques (« hadrons ») peuvent interagir **avec la matière** ou le rayonnement environnants produisant des mésons dont les produits de désintégration « in fine » sont **des photons gamma**, des neutrinos et des électrons secondaires.
- **L'astronomie gamma de haute énergie** détecte les photons de désintégration des  $\pi^0$  (ou autres mésons à désintégration radiative) **dont le flux différentiel  $d\Phi/dE$  est maximal pour  $E=m_\pi c^2/2 = 70 \text{ MeV}$ .**
  - ◆  $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$  suivi de  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- **Aux énergies ultra-hautes**, les protons peuvent interagir avec le rayonnement, mais **le seuil de la réaction est très élevé** (cf. coupure de Greisen-Zatsepin-Kuzmin avec le fond micro-onde)
  - ◆  $p + \text{photon} \rightarrow p + \pi^0$  suivi de  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  ( $E > 10^{17} \text{ eV}$  pour des photons visibles)
- L'interaction peut avoir lieu
  - ◆ soit dans l'objet qui est le siège de l'accélération
  - ◆ soit au cours de sa propagation dans la Galaxie  $\rightarrow$  rayonnement diffus
  - ◆ quand les particules traversent des régions plus denses comme les nuages moléculaires qui apparaissent comme des révélateurs de rayons cosmiques.

## 2.a3 Localiser les électrons ( $e^-$ et $e^+$ ) de haute énergie est beaucoup plus facile

- Bien que les électrons ( $e^-$  et  $e^+$ ) ne constituent que  $\sim 2\%$  des rayons cosmiques, ils rayonnent beaucoup plus efficacement que les protons dans les milieux de faible densité et ceci sur tout le spectre électromagnétique.
- **Interaction avec le champ magnétique : rayonnement synchrotron**  
 $e + B \rightarrow e + B + \text{photon}$  : un précieux indicateur du champ magnétique local
  - ◆ spectre continu de photons pour des électrons relativistes
  - ◆ polarisation perpendiculaire à la projection de  $B$  sur le plan du ciel
  - ◆ Si  $B=100 \mu\text{G}$  ( $10^{-8}$  T), typique d'une onde de choc de supernova :
    - des électrons de quelques GeV rayonnent dans le domaine radio,
    - des électrons de 100 TeV émettent des rayons X (quelques keV)
    - et des électrons de quelques PeV émettent des  $\gamma$  du MeV
- **Interaction avec le rayonnement ambiant : effet Compton inverse**
  - ◆  $e + \text{photon} \rightarrow \gamma + e$  : indicateur de rayonnement autour de l'accélérateur
  - ◆ spectre continu pouvant atteindre les plus hautes énergies des électrons
- **Interaction avec la matière :**
  - ◆ bremsstrahlung  $e + \text{champ coulombien d'un noyau} \rightarrow \gamma + e$
  - ◆ pour les  $e^+$  de basse énergie, annihilation  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$

## La nébuleuse du Crabe est un « Pevatron »



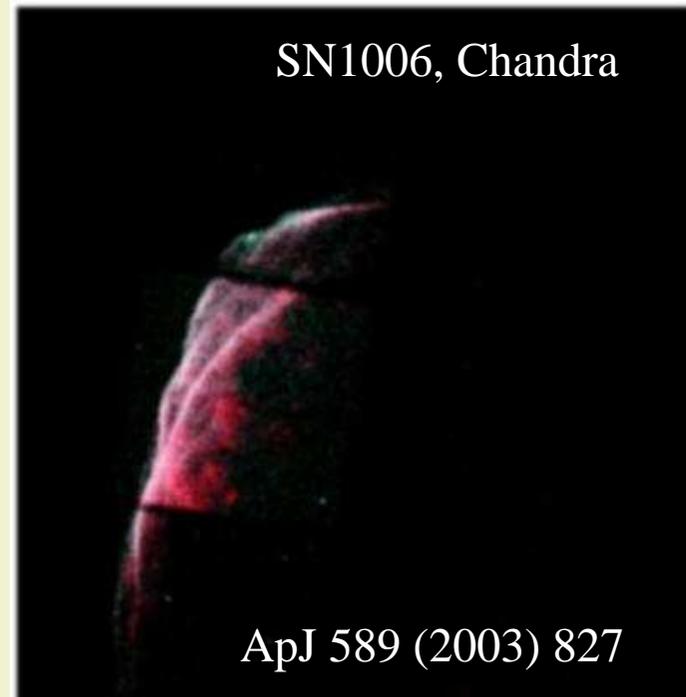
- Jusqu'à quelques 100 MeV, le rayonnement synchrotron domine → les électrons sont accélérés au PeV. **Le Crabe est un pevatron !**
- Au-delà, c'est la diffusion Compton inverse des électrons sur le très intense rayonnement synchrotron qui rend compte du spectre.

## Les rayons X, révélateurs de sites d'accélération d'électrons

Les fins filaments observés dans la partie non thermique ( $E > 2 \text{ keV}$ ) du spectre en rayons X (synchrotron) indiquent la position du choc et montrent :

- que les électrons sont accélérés jusqu'à  $100 \text{ TeV}$  dans le vestige de supernova SN 1006
- que leur refroidissement est très rapide, ce qui implique l'amplification du champ magnétique

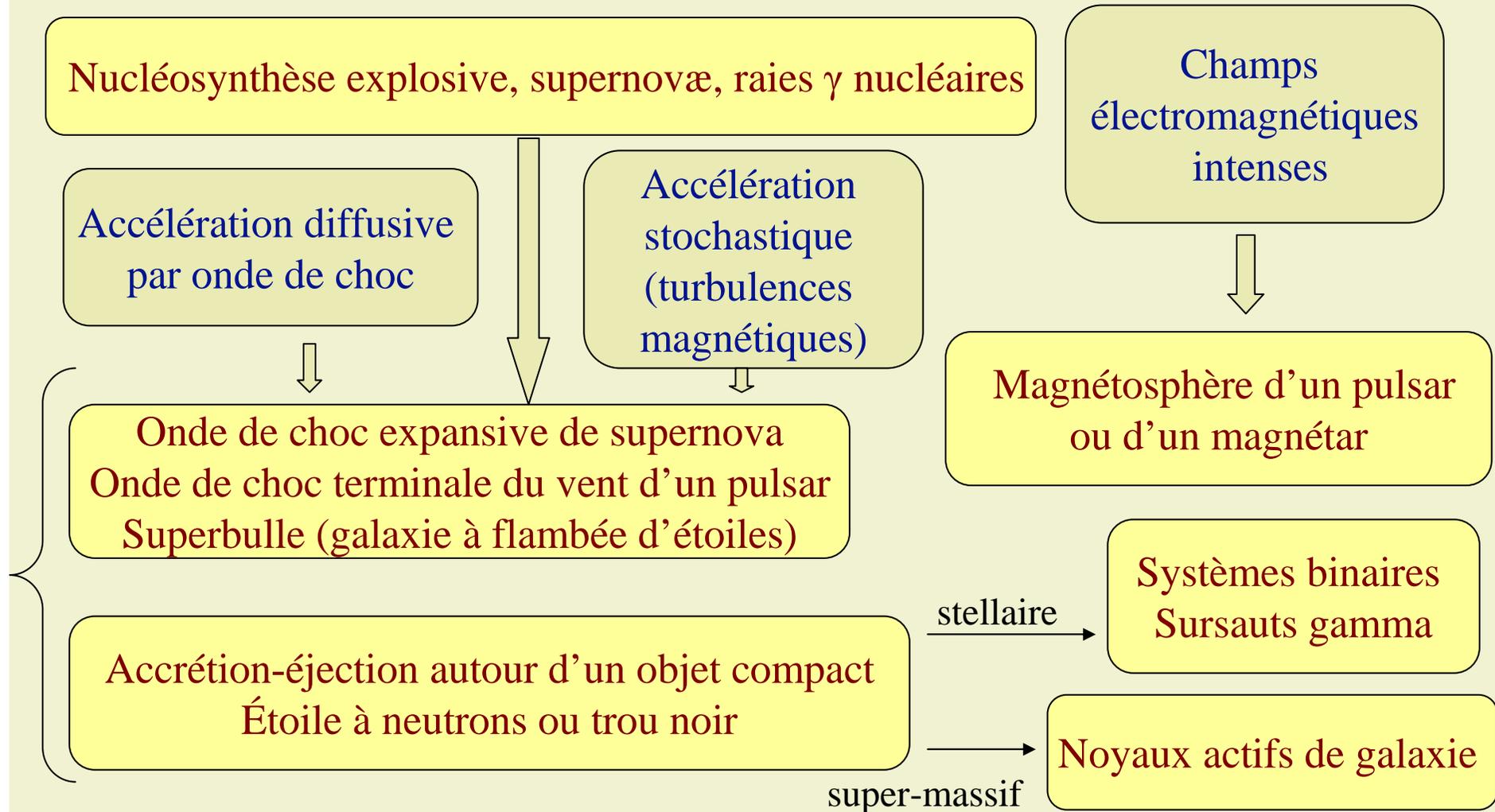
... mais qu'en est-il des protons et des noyaux ?



En astronomie X, on dispose d'indices de présence de protons ou noyaux accélérés ou de leur capacité à produire des  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

- modification de la dynamique du choc
- l'émission thermique du plasma proportionnelle au carré de la densité de matière

## 2b Les sources $\gamma$ : des laboratoires de physique sans équivalent terrestre

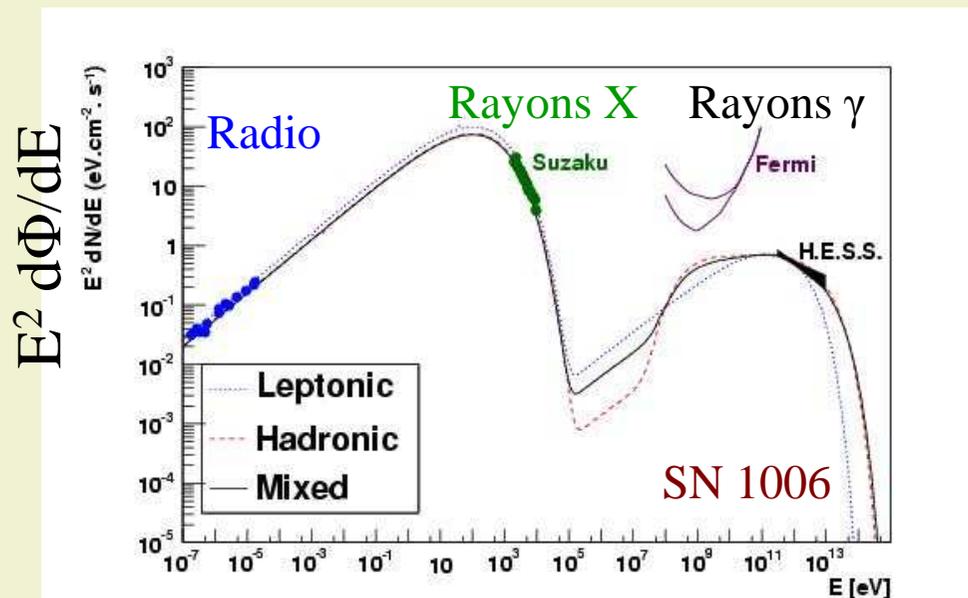


## L'apport de l'astronomie gamma à la modélisation des sources

- Études spectrales : électrons ou protons ?
- Études morphologiques des sources étendues
- Analyse temporelle des sources variables
- Polarisation (encore peu de mesures en  $\gamma$ )

## 2.b1 Études spectrales : électrons ou protons ?

- Discrimination par la forme des spectres à bande large (du domaine radio à celui du TeV), qui diffèrent selon les modèles ... mais ceux-ci dépendent de nombreux paramètres.
- La spectroscopie spatialement résolue peut être déterminante pour mettre en évidence le refroidissement des électrons dont les pertes (synchrotron ou Compton varient comme  $E^2$ ).



B. Degrange

École des Astroparticules OHP 2011

Si  $d\Phi/dE = dN_\gamma/(dS dt dE)$  est le flux différentiel de photons, on construit la distribution spectrale en énergie (SED)  
 $E^2 d\Phi/dE$  ( $\equiv \nu F(\nu)$  de la radio-astronomie) = puissance reçue par unité de surface et par intervalle logarithmique d'énergie .

25

# Électrons ou protons ?

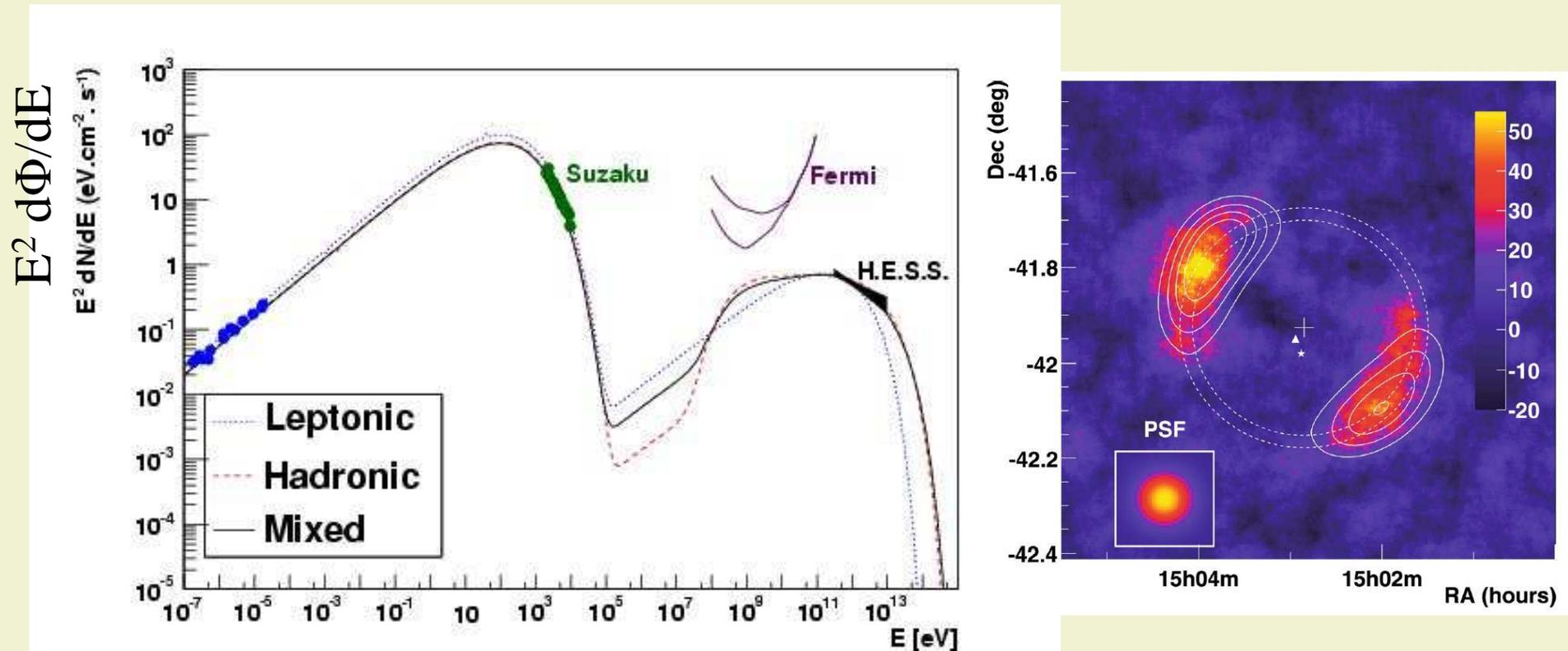
## Nécessité de couvrir tous les domaines spectraux

### Exemple du vestige de la supernova SN 1006

où, en l'absence de données au GeV, on ne peut pas trancher clairement entre 3 modèles :

Leptonique = Compton inverse / Hadronique =  $\pi^0$  / Modèle mixte

Acero et al. (HESS) A&A 516(2010)62

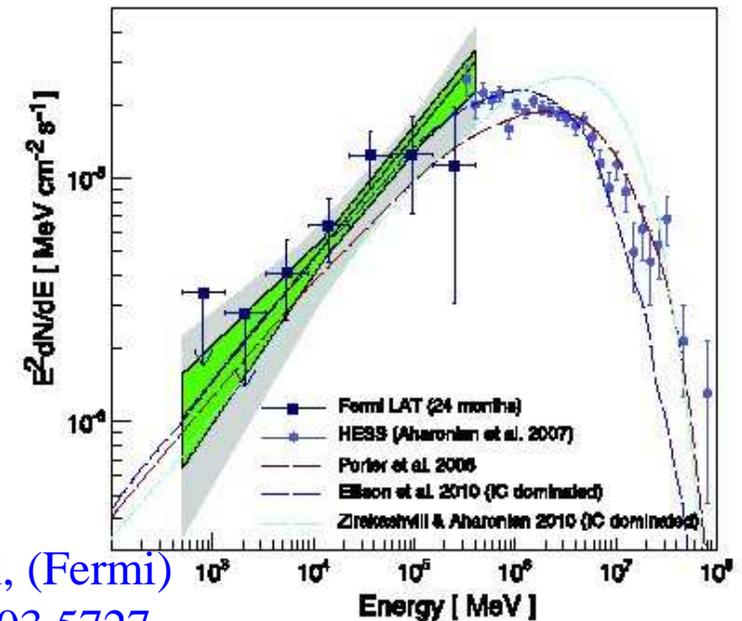
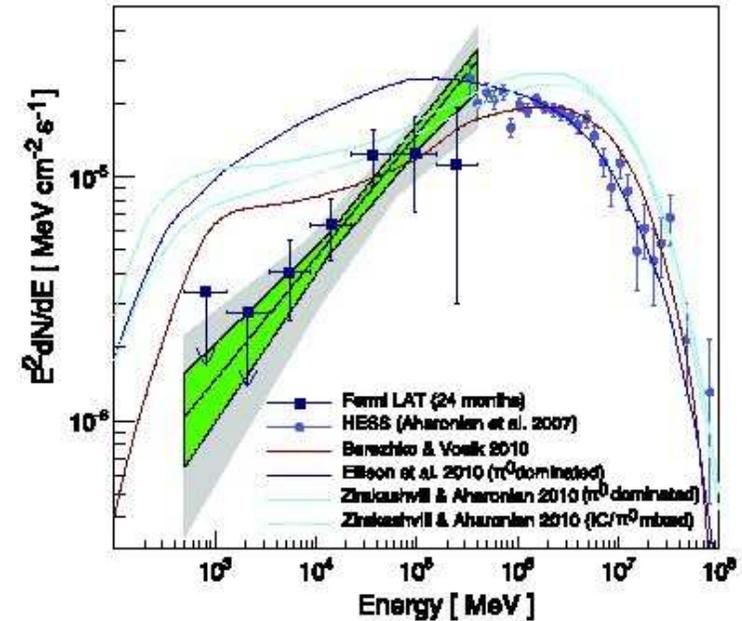


# Électrons ou hadrons ?

## L'exemple du vestige de supernova RX J1713-3946 (âge ~ 1600 ans)

- Les données au-dessus de 200 GeV (H.E.S.S., Aharonian et al. 2006 & 2007) ne permettaient pas de trancher entre les scénarios électronique et hadronique.
- Les résultats récents obtenus par le **télescope spatial Fermi-LAT** entre 0,5 et 400 GeV tranchent **en faveur de l'effet Compton inverse dominant**.
- ... la faible contribution de protons à l'émission  $\gamma$  est corroborée par l'**absence de raie X thermique dans cet objet** (D.C. Ellison et al., ApJ 712 (2010)287)
- ... mais **ne signifie nullement l'absence de protons** qui peuvent même porter plus d'énergie que les électrons

Abdo et al, (Fermi)  
arXiv:1103.5727

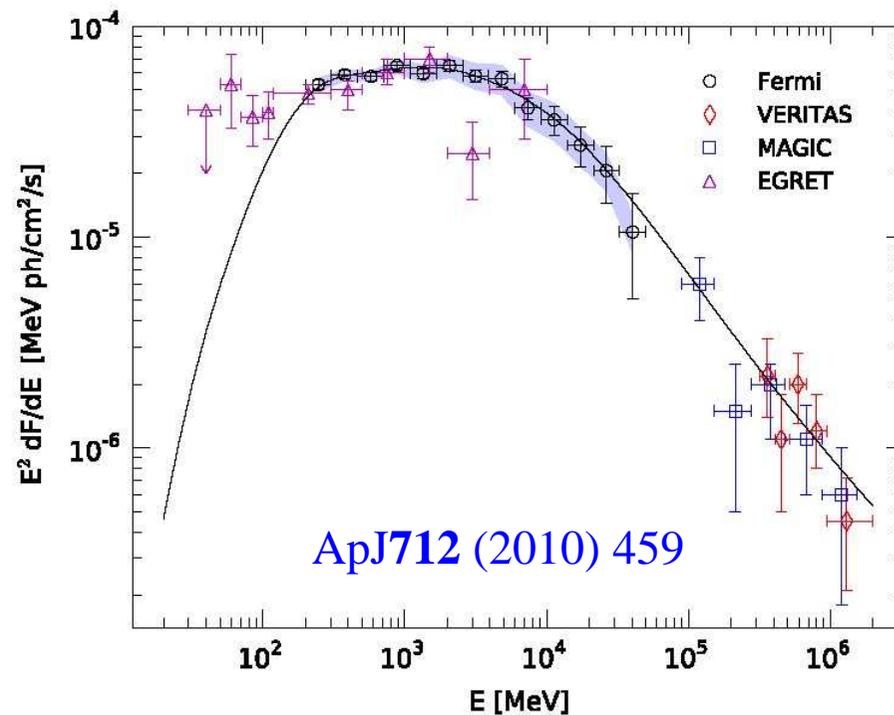
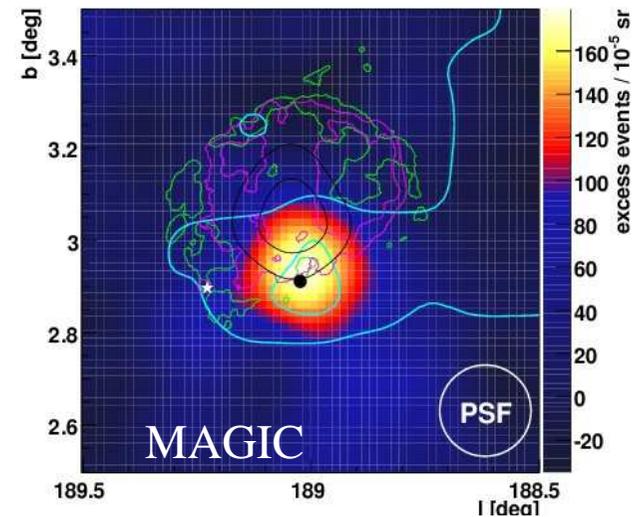


# Électrons ou protons ?

## L'exemple du vestige de supernova IC 443

(âge ~ 20000 à 30000 ans)

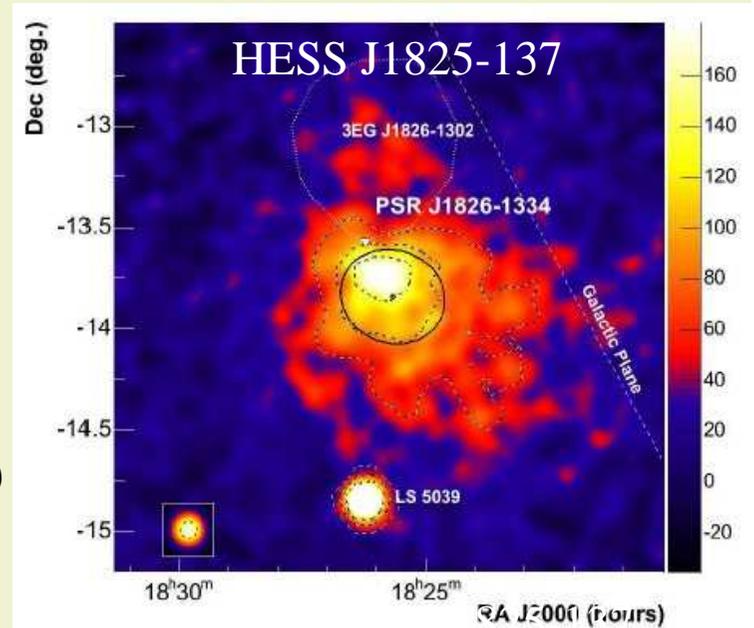
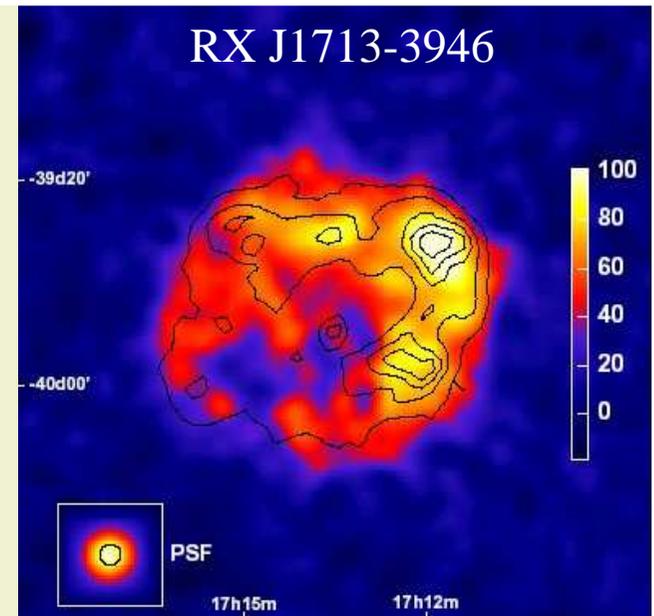
- Vestige de supernova **en interaction avec un nuage moléculaire**
- L'émission  $\gamma$  ne vient pas de la coquille radio G189.1+3.0
- Détecté par MAGIC [ApJ 664\(2007\)87](#) puis par VERITAS [ApJ 698\(2009\)L133](#) au-dessus de 100 GeV
- Détecté par Fermi-LAT de 200 MeV à 50 GeV [ApJ 712\(2010\)459](#)
- Le spectre à bande large (Fermi-LAT + MAGIC + VERITAS) est mieux interprété par des **interactions de hadrons produisant des  $\pi^0$** .



## 2b.2 Études morphologiques des sources étendues

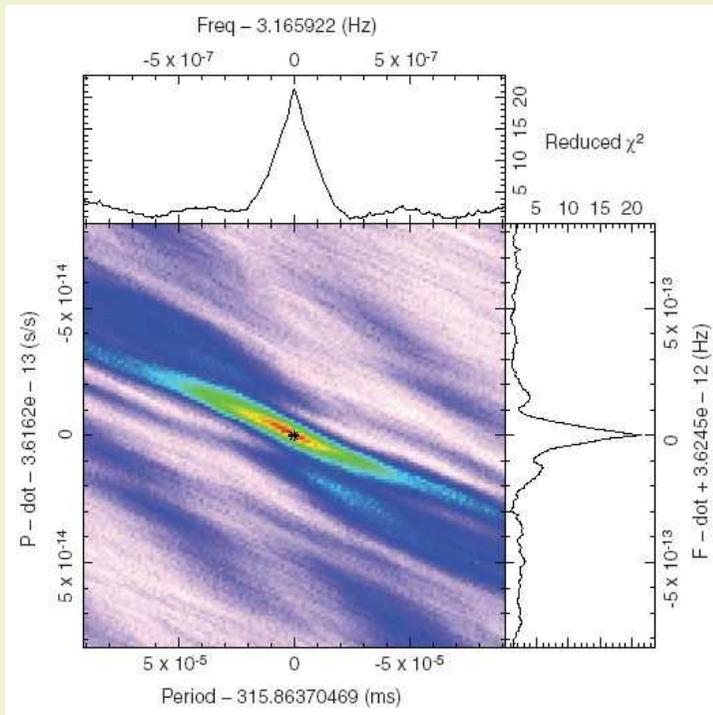
permettent une comparaison morphologique radio-X- $\gamma$  et éventuellement une analyse spectrale spatialement résolue

- Vestiges de supernovæ en coquille : exemple de RX J1713-3946 observé par H.E.S.S.  
*A&A* **464** (2007) 235
- Nébuleuses de vent de pulsars, les sources galactiques les plus fréquentes au TeV : exemple de HESS J1825-137, identifiée comme telle par des spectres  $\gamma$  de plus en plus “mous” au fur et à mesure qu’on s’écarte du pulsar PSR J1826-1334  
*A&A* **460** (2006) 365
- Régions de formation d’étoiles (vents stellaires ?) exemples de Westerlund I et II,
- mais aussi souvent des objets non identifiés



## 2b.3 Analyse temporelle des sources variables

### Émissions périodiques

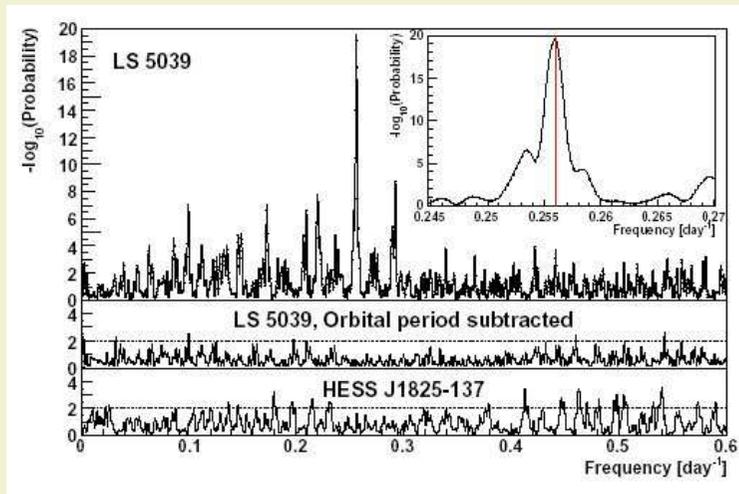


- Pulsars → période de rotation  
Exemple de CTA1 dont le télescope Fermi a pu déterminer la périodicité (**P et dP/dt**) par une méthode de différentiation temporelle **Science 322(2008)1218**

- ◆  $P = 316 \text{ ms}$ ,  $dP/dt = 3.6 \times 10^{-13}$

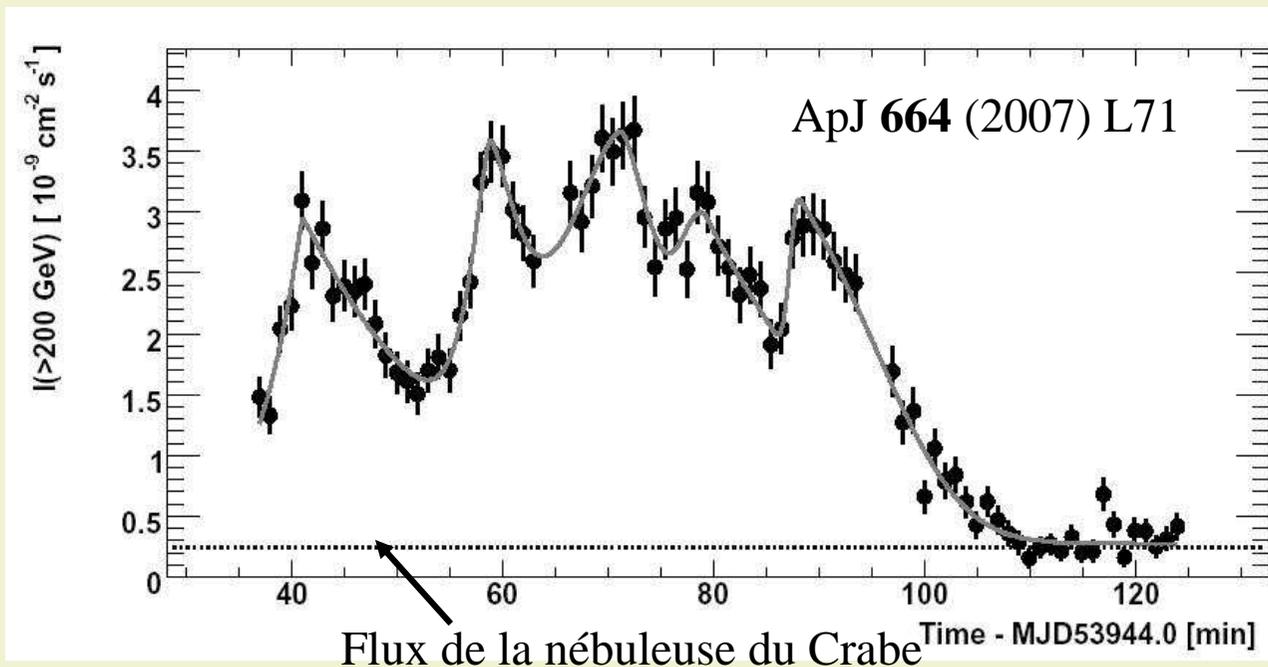
- ◆ Âge caractéristique : 14000 ans

- Systèmes binaires → période orbitale  
Exemple de LS 5039 détecté par H.E.S.S. : le périodogramme de Lomb-Scargle montre clairement la période de **(3,9078±0,00017 jours)**  
**A&A 460 (2006) 743**



## Émissions intermittentes et/ou chaotiques

- À basse énergie : les “répéteurs gamma mous” (Soft Gamma Repeaters ou **SGR**) probablement liés au réarrangement de la structure d’un magnétar
- À haute énergie : les phases éruptives des **noyaux actifs de galaxie de type “blazar”**. L’exemple le plus spectaculaire : le comportement de PKS 2155-304 observé par H.E.S.S. le 28 juillet 2006 avec **des variations de l’ordre de la minute !**



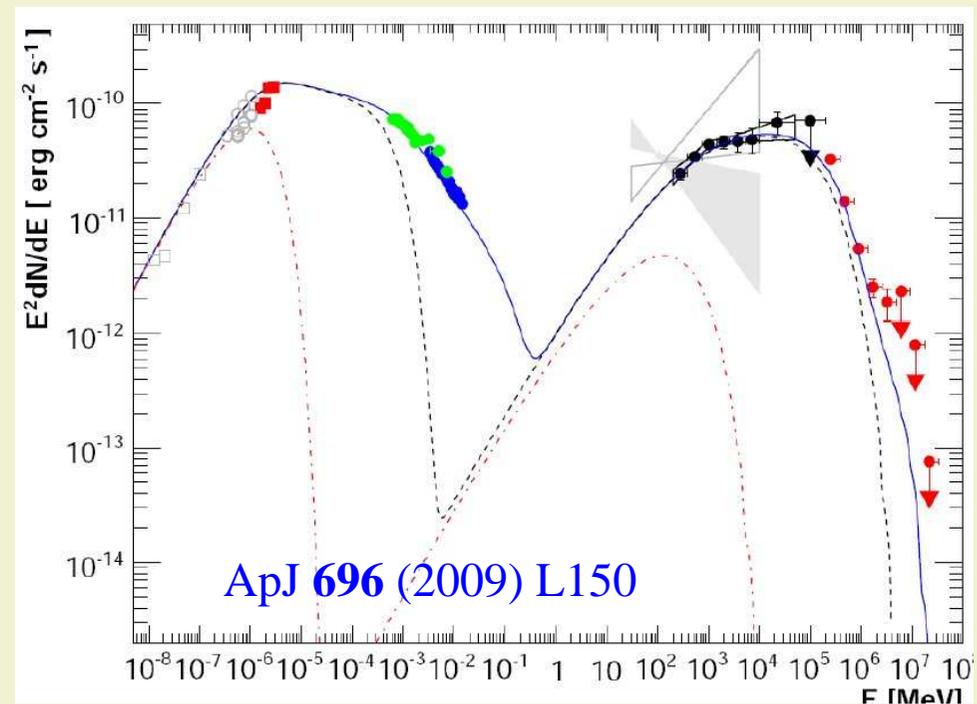
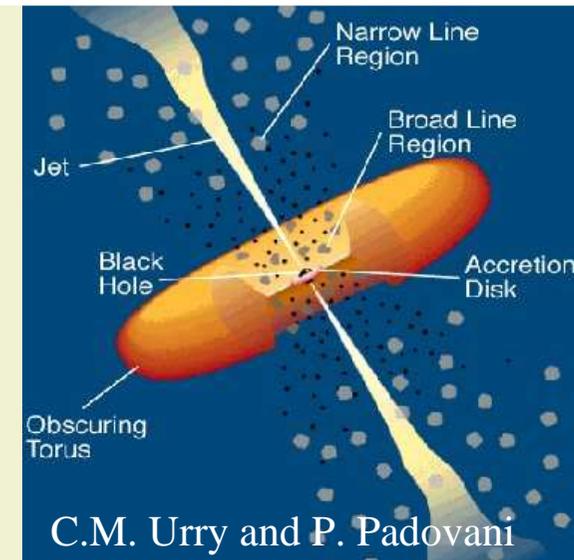
- **Variabilité rapide**  
→ contrainte sur la taille de la région émettrice
- **+ Haute intensité**  
→ contrainte sur le facteur de Lorentz du plasma dans le jet (éviter l’opacité par  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ )

# Les noyaux actifs de galaxie émetteurs gamma

- L'émission gamma aux hautes et très hautes énergies concerne les noyaux actifs de galaxies émettant de puissants jets de plasma relativiste qui sont des radio-sources fortes, principalement :

- ◆ quelques radio-galaxies relativement proches (M87, Cen A, NGC1275)
- ◆ les blazars : radio-galaxies dont le jet est émis à faible angle de la ligne de visée.

- La modélisation nécessite la mesure du spectre à bande large (de la radio aux gamma), par des campagnes si possible simultanées à plusieurs longueurs d'onde (Ex. de PKS2155-304 ( $z=0,117$ ) en 2008 : **Optique (ATOM)-Rayons X (Swift, RXTE)-Fermi LAT-H.E.S.S**)

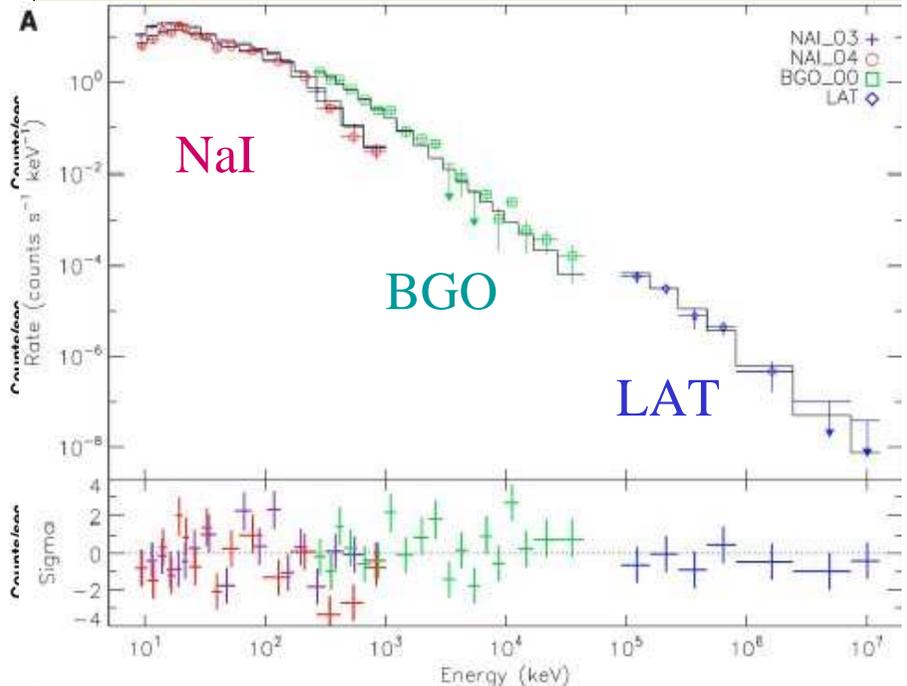
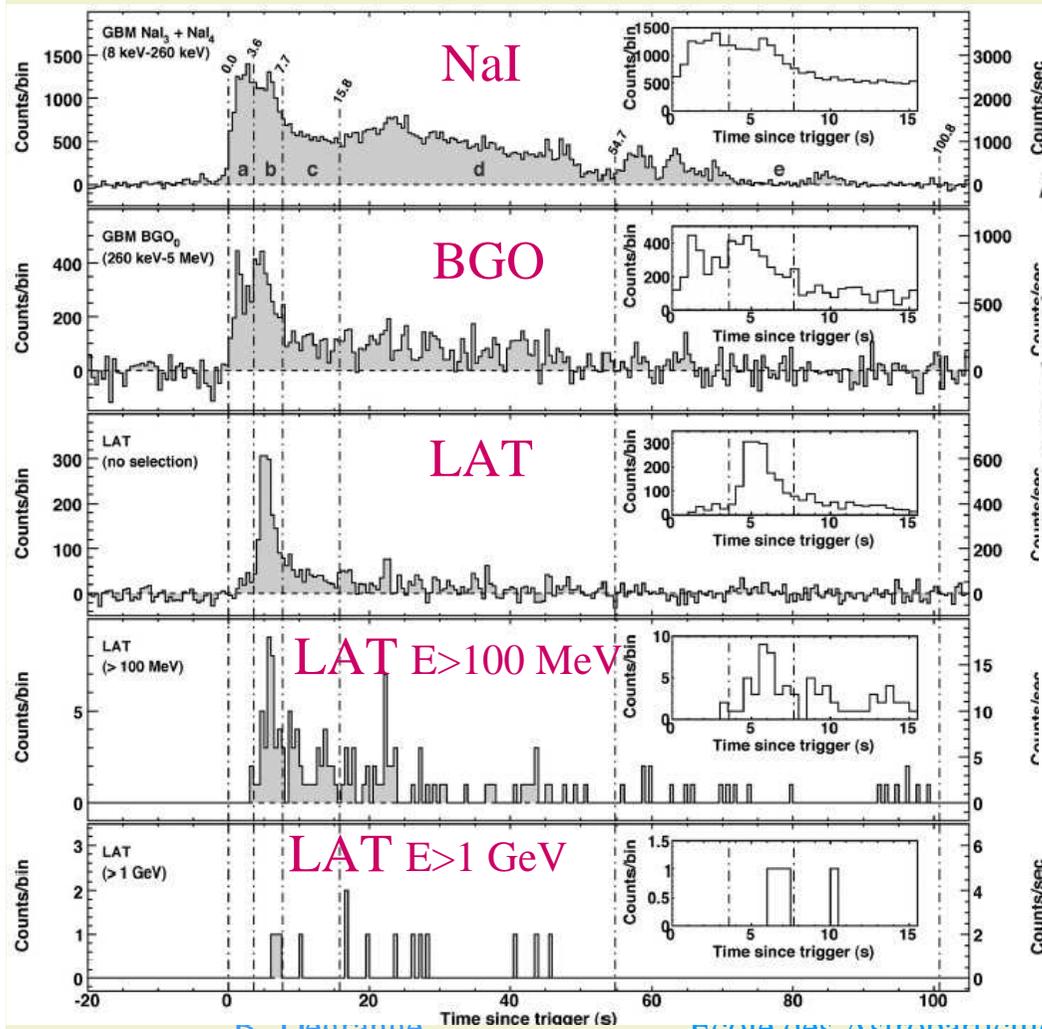


# Sursauts gamma

Courbes de lumière en différentes bandes d'énergie

GRB 080916C détecté par le satellite Fermi  
Science **323** (2009)1688

Spectre de 10 keV à 10 GeV



Décalage spectral  $z = 4,35 \pm 0,15$

## 2c Les aspects cosmologiques

### 2c.1 Quand l'Univers est-il transparent aux photons $\gamma$ ?

- L'Univers est transparent au rayonnement  $\gamma$  de basse énergie d'où l'intérêt des sursauts gamma (détectés jusqu'à  $z=6$ ) pour la Cosmologie.
- À plus haute énergie, la lumière de fond extra-galactique peut interagir avec des  $\gamma$  de très haute énergie pour créer des paires  $e^+e^-$ .
- La section efficace est maximale un peu au-dessus du seuil  $\rightarrow$

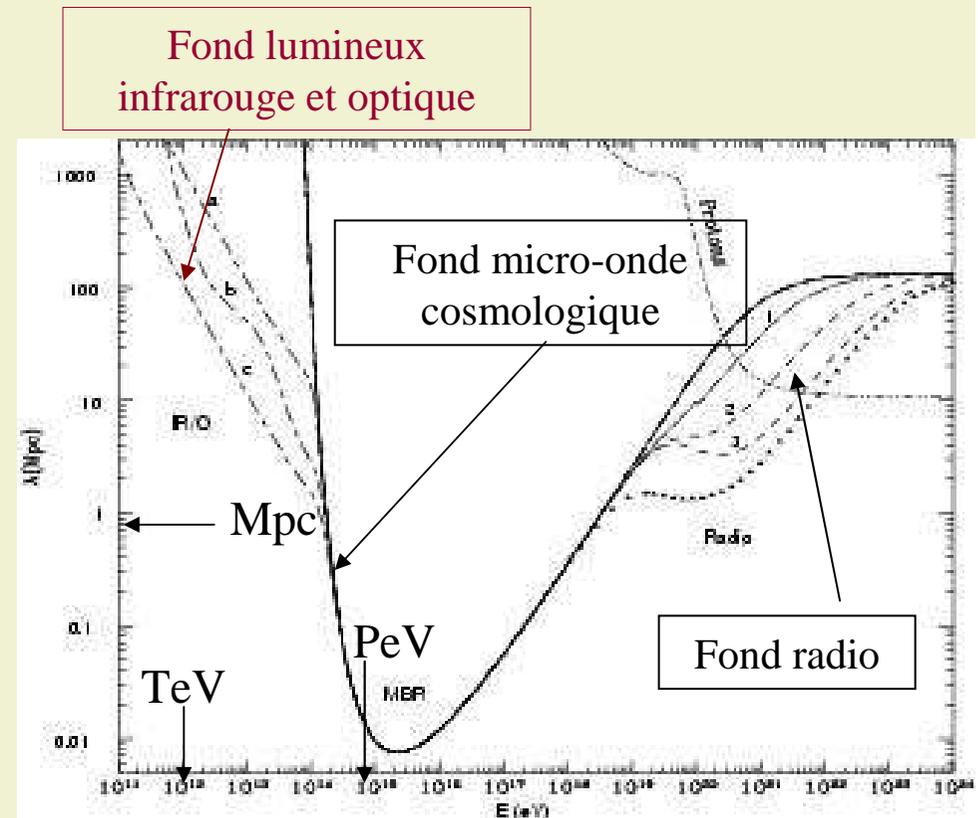
$$\varepsilon_0 > \frac{(m_e c^2)^2}{E_0 (1+z_s)} \Rightarrow \lambda_0 < 5.4 \mu m \left( \frac{E_0}{1 \text{ TeV}} \right) (1+z_s)$$

- ◆  $\gamma$  du GeV + photon optique ou UV
- ◆  $\gamma$  du TeV + photon infrarouge
- ◆  $\gamma$  du PeV + photon micro-onde (2,7 K)  $\rightarrow$  opacité de l'Univers extragalactique

Les fonds IR/optique sont très difficiles à mesurer directement en raison des avant-plans (système solaire et Galaxie)

## Une information précieuse sur le fond extragalactique infrarouge, optique et UV

- D'où viennent ces photons de fond ? c'est la lumière émise par les galaxies depuis leur formation, ré-émise par les poussières et décalée vers le rouge par l'expansion de l'Univers : une donnée importante pour comprendre l'évolution des galaxies.
- Les spectres  $\gamma$  des blazars et sursauts  $\gamma$  les plus lointains détectés au GeV ou au TeV ont permis de mettre des bornes supérieures sur le spectre des photons de fond : *Nature* **440** (2006) 1018 pour HESS, *ApJ* **723**(2010)1082 pour Fermi
- Dans l'infrarouge, ces bornes sont très proches des bornes inférieures fournies par le simple comptage des galaxies.



**Longueur moyenne d'absorption (Mpc)  
en fonction de l'énergie du  $\gamma$**

## 2c.2 L'invariance de Lorentz testée à l'échelle cosmologique

- Certaines théories de gravitation quantique prédisent une violation de l'invariance de Lorentz à l'échelle de la masse de Planck en raison d'une **modification des relations de dispersion** pour  $E \sim E_{\text{Planck}}$

- La vitesse des photons dépend-elle de leur énergie ?

$$v = \frac{dE}{dp} = c \left( 1 + \frac{\xi E}{E_{\text{Planck}}} \right) = c \left( 1 + \frac{E}{E_{\text{QG}}} \right)$$

- On se sert des phénomènes transitoires produits à des distances cosmologiques
  - ◆ Sursauts gamma (Ex. 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.
- En l'absence d'effet observé de ce type, l'énergie caractéristique de la gravité quantique  $E_{\text{QG}}$  doit être **supérieure à environ  $10^{18}$  GeV**.

## 2c.3 Recherche indirecte de matière noire

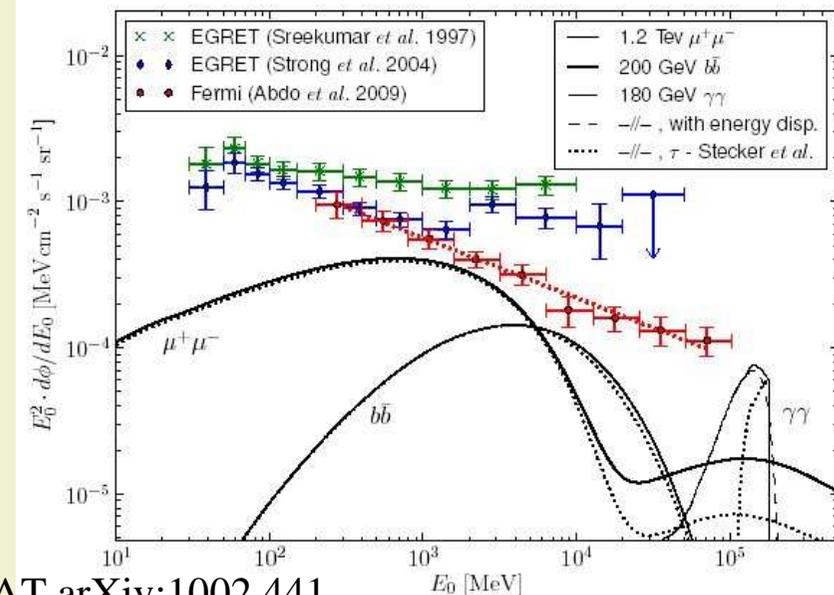
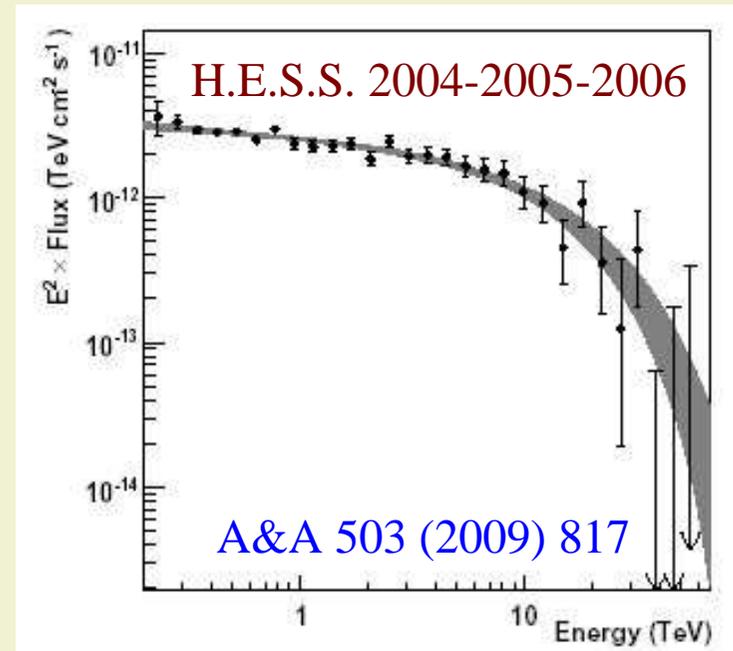
$\gamma$  issus d'annihilation de particules massives à interaction faible

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

- Les courbes de rotation des galaxies s'expliquent si celles-ci sont incluses dans des halos de matière noire de densité  $\rho(r)$ .
- Cette matière est censée être composée de particules de Majorana  $\chi$ , 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
  - ◆ La source doit être stable.
  - ◆ Le spectre des  $\gamma$  s'arrête à la masse de la particule.
  - ◆ Possibilité d'une « raie » à la masse de la particule ( $\chi+\chi \rightarrow \gamma+\gamma$  ou  $Z+\gamma$ ), raie fortement élargie par la résolution en énergie.
- Difficulté à distinguer le spectre de celui d'une source astrophysique classique.

## Recherches infructueuses dans notre Galaxie

- Le Centre Galactique :  
la source centrale **HESS J1745-290** compatible
  - ◆ avec le trou noir central Sgr A\*
  - ◆ avec la nébuleuse de pulsar G359.95-0.04.
 a un 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.
- Le halo galactique:
  - ◆ le flux de  $\gamma$  diffus mesuré par le télescope spatial Fermi s'explique bien par les interactions de rayons cosmiques dans le milieu interstellaire
  - ◆ l'excès d'EGRET à haute énergie n'est pas confirmé
  - ◆ nouvelle borne supérieure de HESS



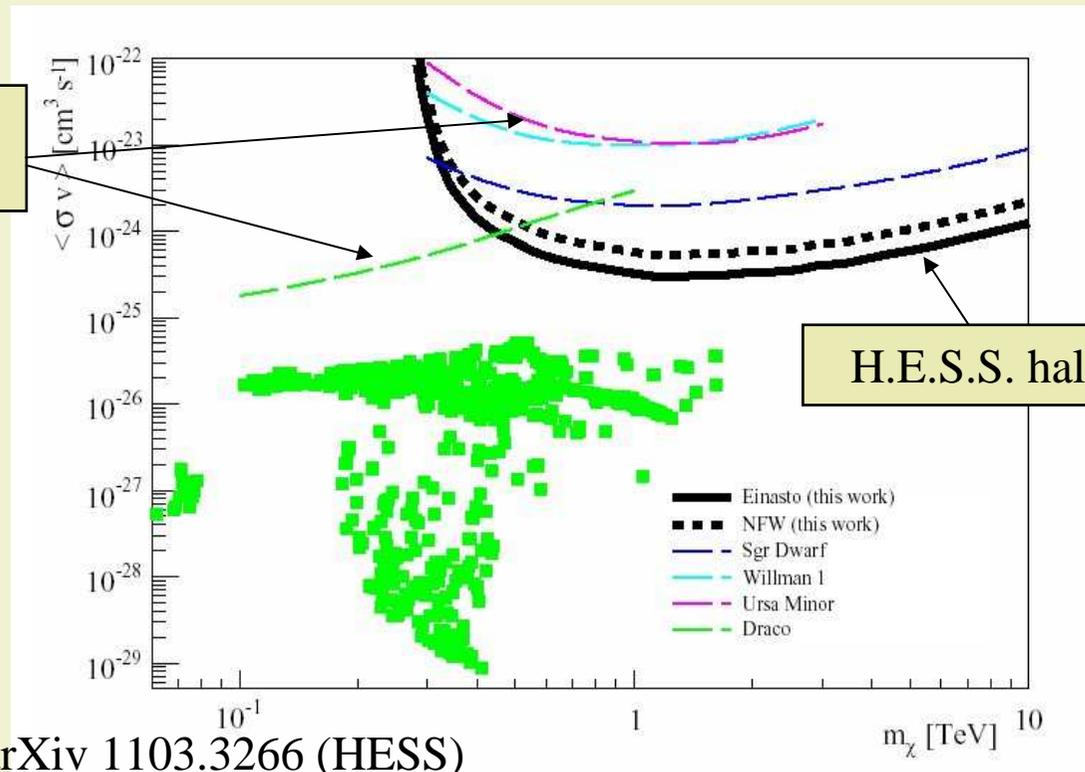
Fermi-LAT arXiv:1002.441

# Recherches infructueuses sur les galaxies naines sphéroïdales

- Les galaxies naines sphéroïdales sont aussi de bons candidats :
  - ◆ rapport Masse/Luminosité élevé → présence de matière noire
  - ◆ peu de gaz et de poussières → signal  $\gamma$  « classique » peu probable
  - ◆ Limites supérieures données par le télescope spatial Fermi et les télescopes à effet Tcherenkov

Limites en couleur = galaxies naines

Les zones d'exclusion dans le plan  $\langle\sigma v\rangle$  fonction de  $M(\chi)$  ne menacent pas la plupart des modèles se supersymétrie



arXiv 1103.3266 (HESS)

## 3. Les défis instrumentaux

- Les phénomènes de base de la détection
  - ◆ Peut-on focaliser des  $\gamma$  ?
  - ◆ Les interactions photon-matière
- Panorama des différentes techniques
  - ◆ Détecteurs spatiaux (100 keV-300 GeV)
  - ◆ Détecteurs au sol aux très hautes énergies ( $E > 100$  GeV)
- Les performances actuelles
  - ◆ Sensibilité
  - ◆ Résolution angulaire

## 3a Les phénomènes de base de la détection

### 3a.1 Peut-on focaliser les $\gamma$ ?

- La focalisation, quand elle est possible, permet de concilier une grande surface de collection des photons avec un détecteur de petite taille → moindre proportion d'événements de fond dus à la traversée du détecteurs par des rayons cosmiques.
- Dans le domaine des rayons X :
  - ◆ on utilise des miroirs en réflexion totale à très faible angle
  - ◆ ceci nécessite aussi une rugosité < quelques 0,1 nm
  - ◆ cette technique est aujourd'hui limitée aux rayons X « mous » ( $E < 10$  keV)
  - ◆ extension possible avec de longues focales et miroirs multi-couches (projets NuSTAR  $f=10$  m, IXO  $f=20$  m)
- ... mais peut-on envisager de focaliser au-delà de 100 keV ?

$$\sin \theta < \frac{0,029}{(E_\gamma / \text{keV})} \sqrt{\frac{Z}{A} \frac{\rho}{\text{g cm}^{-3}}}$$

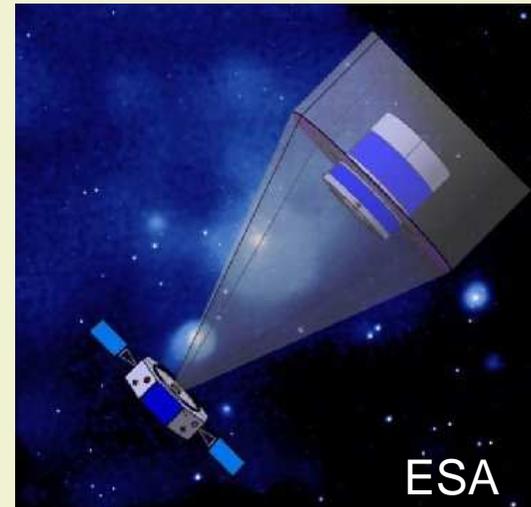
$$\lambda = \frac{1,24 \text{ nm}}{(E_\gamma / \text{keV})}$$

## 3a.1 Peut-on focaliser les $\gamma$ ?

- Le concept de « lentille Laue » pour l'astronomie gamma repose sur la diffraction par des cristaux et sur la **formule de Bragg** :
- Une série de cristaux disposés en anneaux et convenablement orientés peuvent concentrer les  $\gamma$  vers un détecteur focal sur l'axe du système.
- Le concept, adapté aux X durs et  $\gamma$  de basse énergie a été validé par le prototype CLAIRE (P. von Ballmoos et al. ExA 20(2005)253)
- mais la focalisation est **restreinte à une bande d'énergie limitée** (rayon des anneaux entre  $r_{\min}$  et  $r_{\max}$ , et focale  $f$ ).
- Un vol en formation de deux satellites, l'un portant la lentille, l'autre le détecteur permettra d'avoir une très longue focale.

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

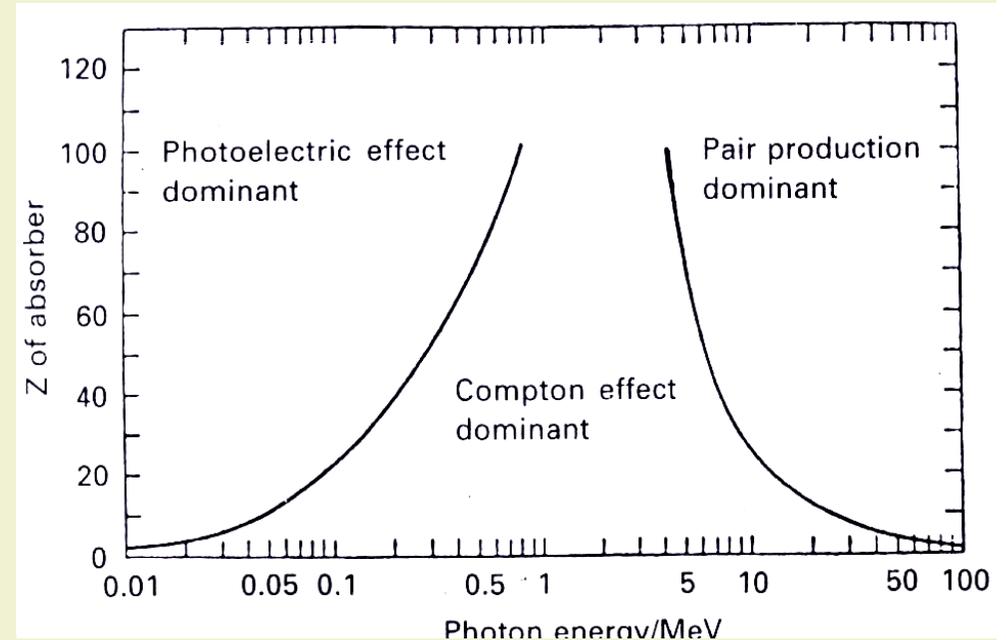
$$\theta = 3,55^\circ \left( \frac{100 \text{ keV}}{E} \right) \left( \frac{0,1 \text{ nm}}{d} \right)$$



$$\frac{hc f}{d r_{\max}} < E < \frac{hc f}{d r_{\min}}$$

## 3a.2 Les interactions photon-matière

- Effet photo-électrique ou production de paires électron-trou dans un semi-conducteur (à basse énergie) : le photon est absorbé.
- Effet Compton (surtout autour du MeV) : le photon est seulement diffusé et peut faire plusieurs diffusions Compton avant d'être absorbé par effet photo-électrique (mesure d'énergie délicate)
- Production de paire  $e^+e^-$  (à haute énergie):



- La direction incidente est donnée par la mesure des traces des électrons
- La mesure d'énergie nécessite un calorimètre absorbant la gerbe électromagnétique créée par les électrons et les  $\gamma$  secondaires.

# Un défi instrumental : mesurer la polarisation du photon $\gamma$

Étudier la distribution azimuthale de l'électron ou du plan de la paire par rapport à la direction incidente

## ■ Effet photo-électrique :

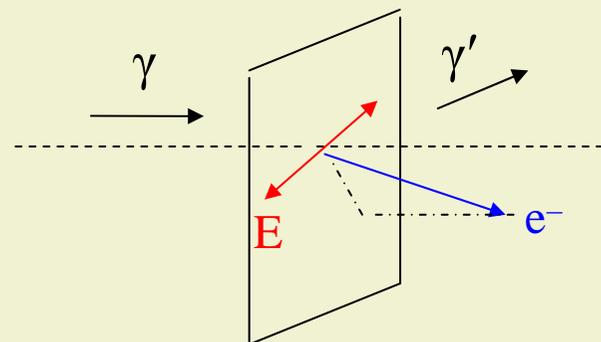
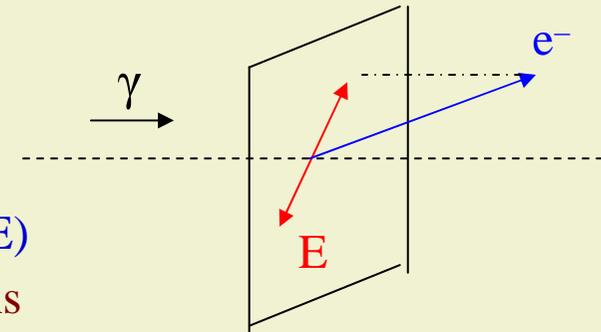
- ◆ l'électron atomique est éjecté préférentiellement dans la direction de la polarisation (vecteur champ  $E$ )
- ◆ mesures réalisées surtout dans le domaine des rayons X (détecteurs à gaz à micro-pixels)

## ■ Effet Compton

- ◆ l'électron est diffusé préférentiellement dans la direction perpendiculaire à la polarisation (vecteur champ  $E$ ) .

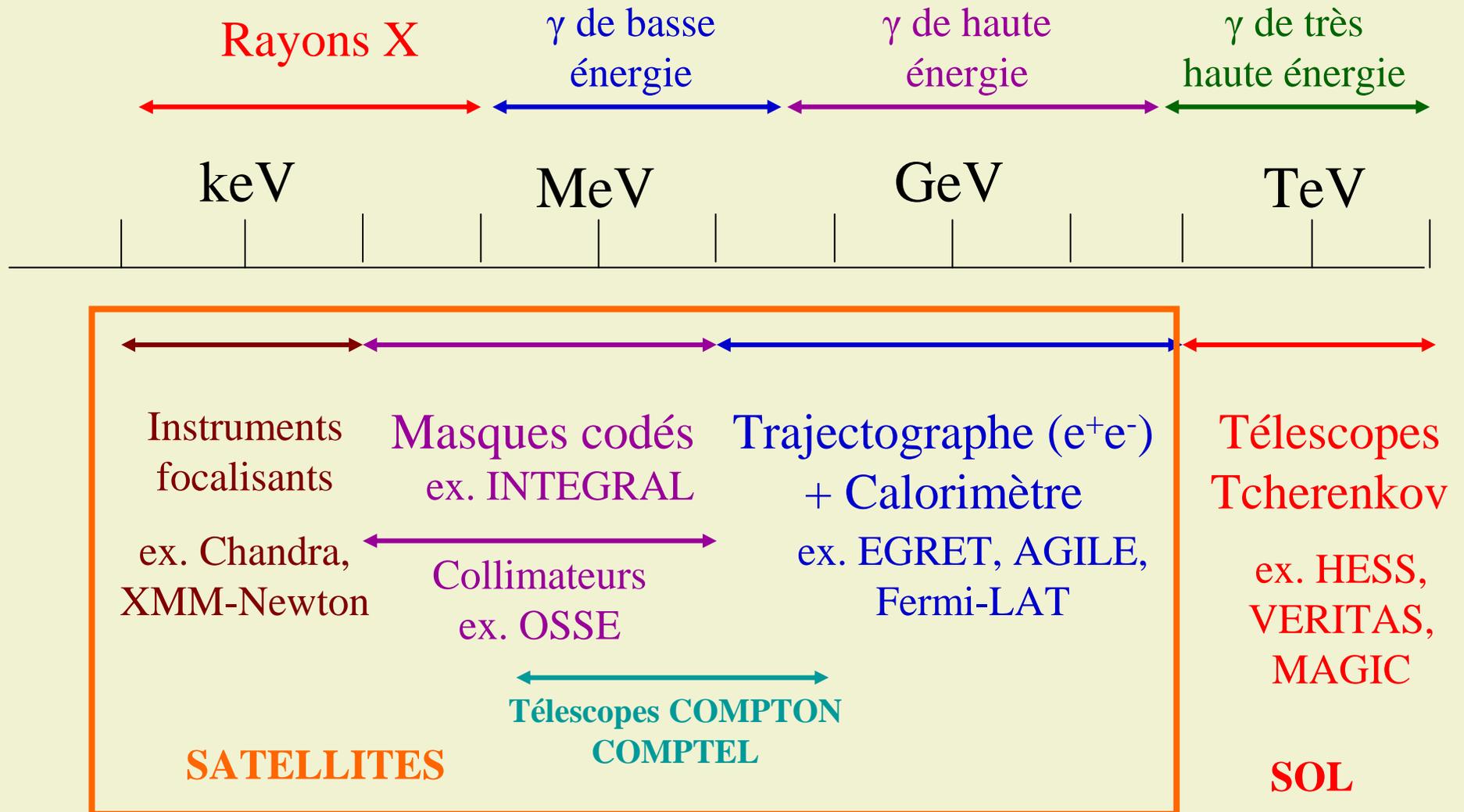
## ■ Production de paire $e^+e^-$

- ◆ le plan de la paire est préférentiellement dans la direction perpendiculaire à la polarisation (vecteur champ  $E$ ) .



2 mesures seulement dans le domaine  $\gamma$  (INTEGRAL, nébuleuse du Crabe)

## 3b Panorama des différentes techniques

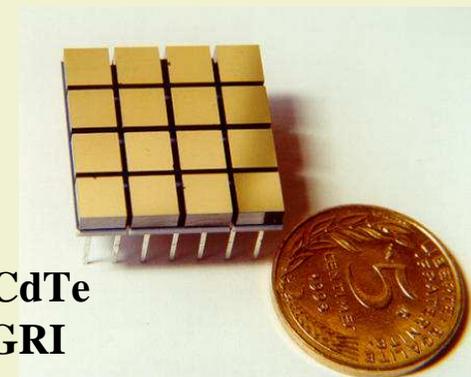
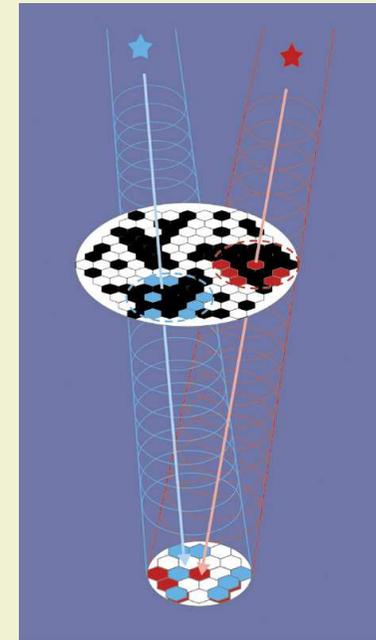


## 3b.1 Détecteurs spatiaux

- En l'absence d'instrument focalisant, la surface de collection des photons se réduit à la surface effective du détecteur → **limitation de la sensibilité**
- Comment réduire le fond dû aux rayons cosmiques traversant le détecteur ?
  - ◆ **choix de l'orbite du satellite** (éviter les ceintures de radiation et profiter de la coupure géomagnétique → **faible inclinaison par rapport à l'équateur**).
  - ◆ **détecteur de particules chargées en anticoincidence (veto) ou blindage actif**
  - ◆ **signature par la détection** (ex. impulsion due à une particule chargée traversant tout le volume  $\neq$  celle due à un dépôt local par effet photo-électrique).
  - ◆ **fond résiduel :**
    - **basse énergie** : les  $\gamma$  d'activation des matériaux du satellite
    - **haute énergie** : les  $\gamma$  des  $\pi^0$  produits dans la couverture thermique etc.
- En l'absence de focalisation → **dégradation de la résolution angulaire**.  
de quelques secondes d'arc si  $E < 10$  keV (rayons X « mous »), on passe à des valeurs  $> 0,2^\circ$  pour les gamma de basse énergie.

## Les détecteurs à basse énergie (< quelques MeV)

- On utilise la propagation rectiligne des  $\gamma$ , d'où deux solutions :
  - ◆ Les **collimateurs** qui limitent le champ de vue à typiquement  $1^\circ$ .
  - ◆ Les **masques à ouverture codée** qui utilisent le principe de la chambre noire avec de trous judicieusement disposés.
- Détecteurs pixellisés : dans **INTEGRAL** semi-conducteurs Ge (SPI), CdTe (IBIS/ISGRI), scintillateurs CsI (IBIS/PiCsIT) placés à distance derrière l'ouverture.
- On peut aussi utiliser la cinématique (télescope Compton adapté aux énergies de l'ordre du MeV)



Détecteurs CdTe  
d'IBIS-ISGRI

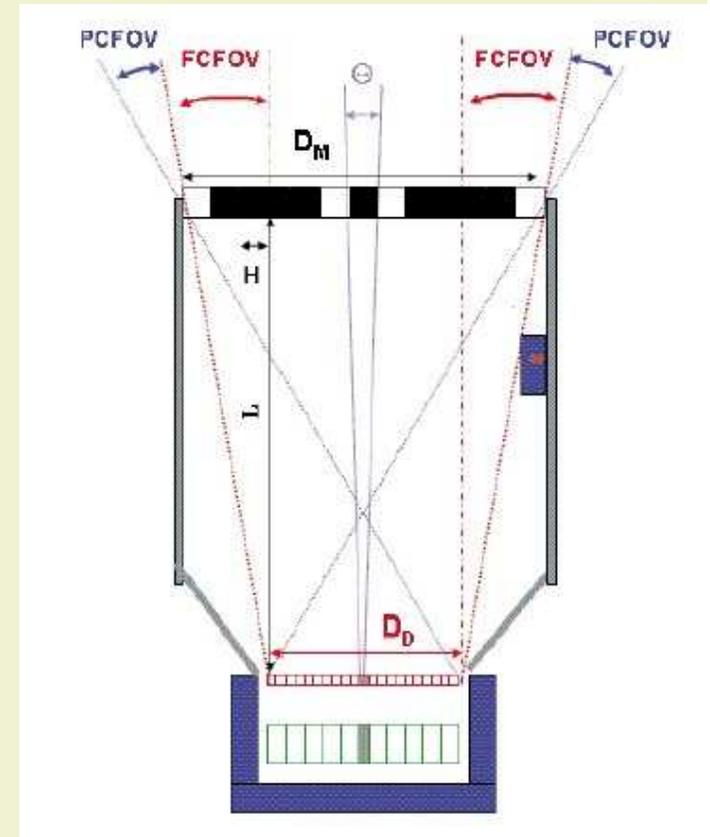
## Technique du masque à ouverture codée (INTEGRAL)

- **Surface efficace** : dépend du nombre des éléments transparents du masque.
- **Résolution angulaire** : angle sous-tendu par un trou vu du détecteur (si celui-ci mesure la position de l'impact parfaitement)
- **Champ de vue** :
  - ◆ **totalemment codé (FCFOV sur la figure)** : l'ensemble du détecteur reçoit le rayonnement de la source modulé par le masque.
  - ◆ **partiellement codé (PCFOV sur la figure)**.



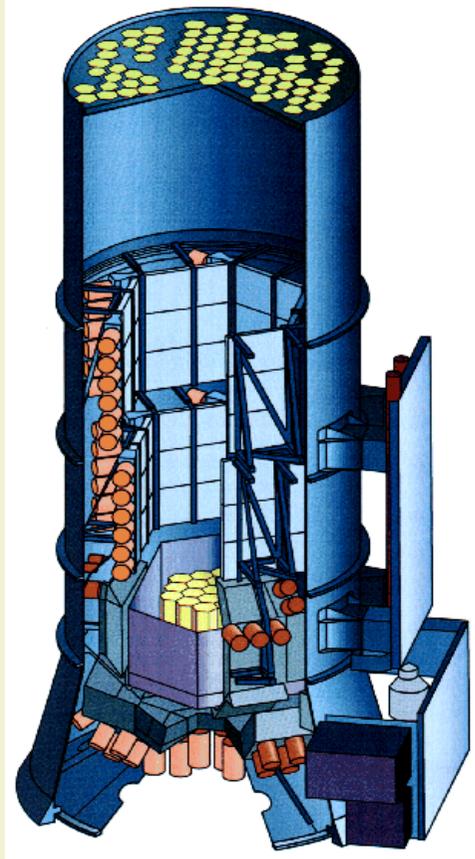
Masque d'IBIS à bord d'INTEGRAL

B. Degrange



École des Astroparticules OHP 2011

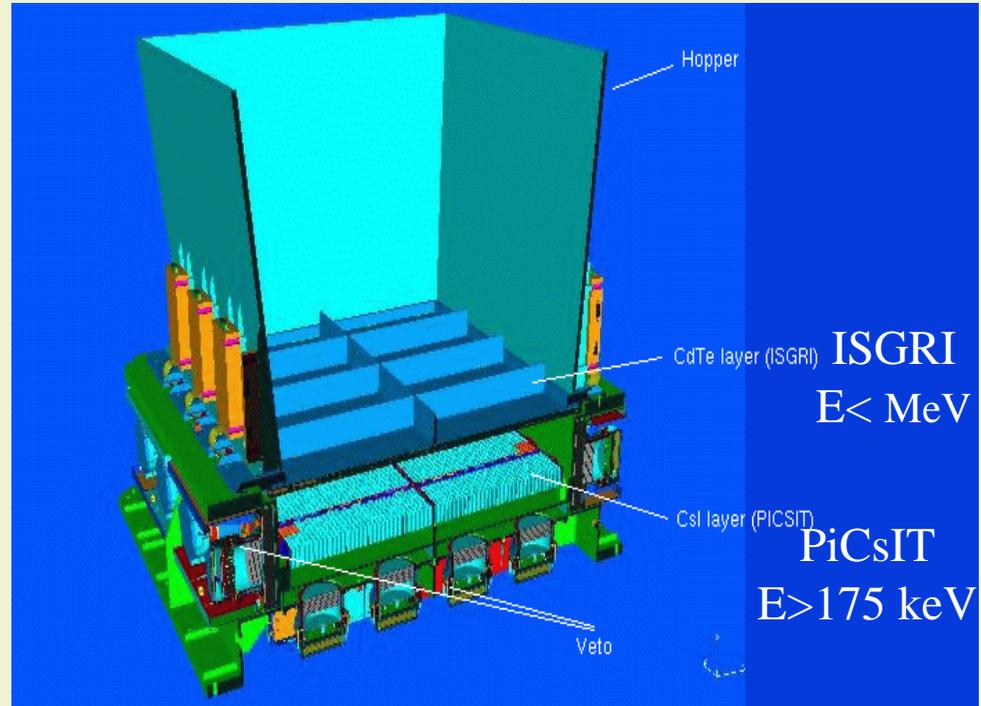
## Deux instruments à masque codé à bord d'INTEGRAL



**Spectromètre SPI (15 keV-8 MeV)**

Champ de vue  $9^\circ \times 9^\circ$

$\Delta E/E \approx 0.2\%$  à 1 MeV

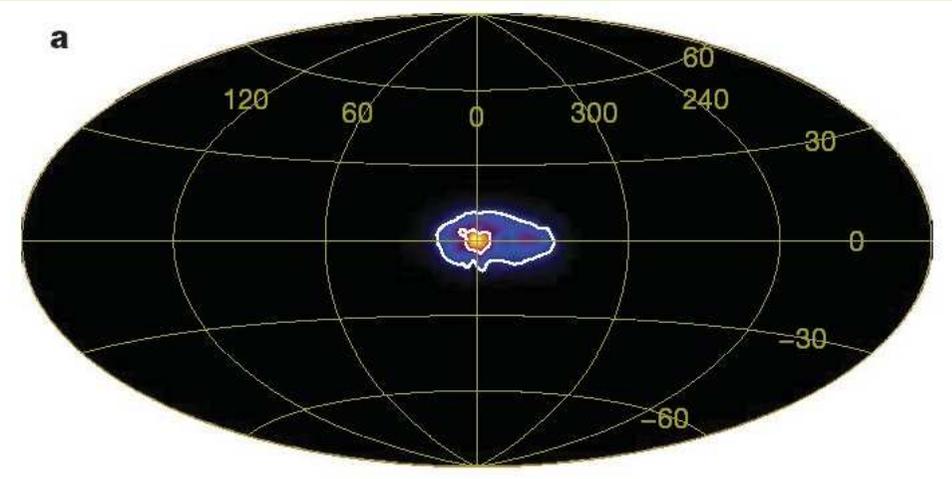
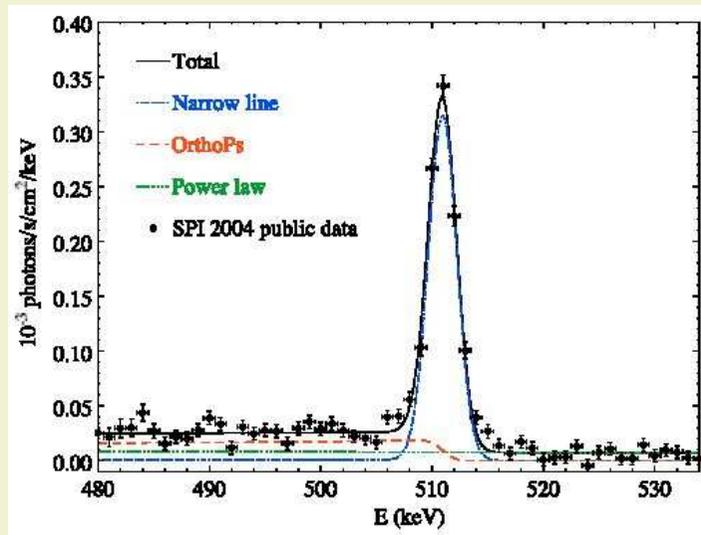


**Imageur IBIS (12 keV-20 MeV)**

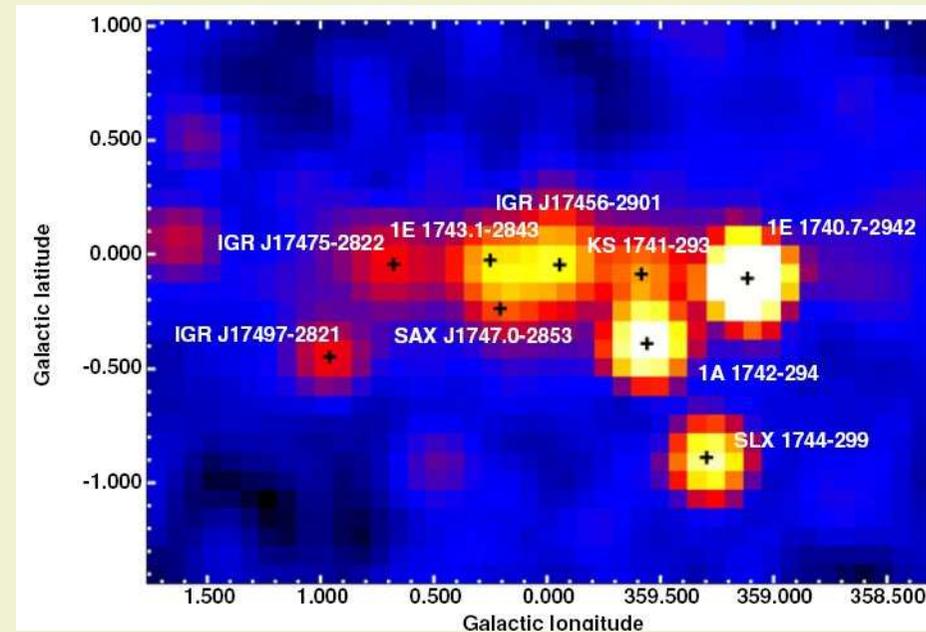
Champ de vue  $9^\circ \times 9^\circ$

Résolution angulaire :  $12'$

Localisation de la source :  $< 1'$

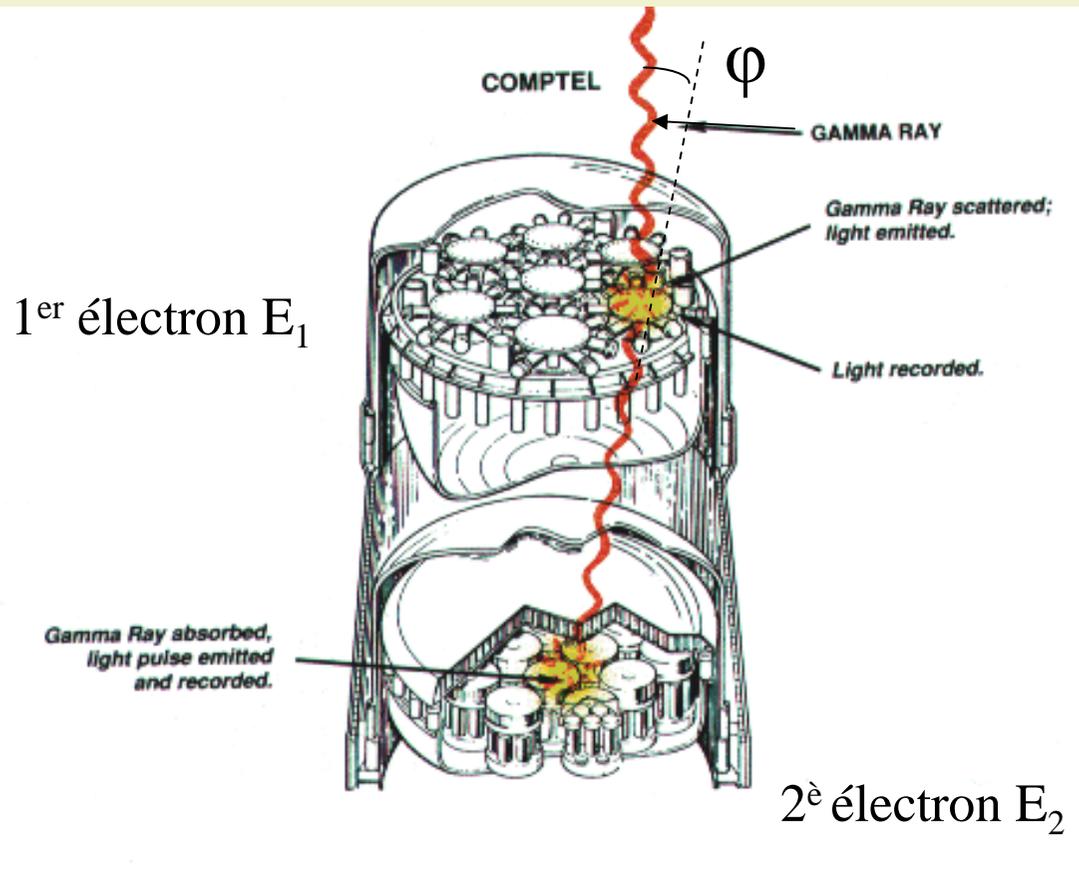


- En haut : **INTEGRAL/SPI** : la raie d'annihilation  $e^+e^-$  à 511 keV et cartographie correspondante (bulbe surtout, mais aussi une composante plus faible dans le disque)
- En bas : **INTEGRAL/IBIS-ISGRI** : la région centrale de la Galaxie cartographiée à partir des données obtenues de 2003 à 2009  
Terrier et al., ApJ **719** (2010) 143



# Technique du télescope Compton

(COMPTEL à bord de C-GRO, mais aussi INTEGRAL)



La cinématique ne fournit qu'un angle sur la direction incidente :  $\varphi$  = angle entre le  $\gamma$  et la droite joignant les impacts  $\rightarrow$  « anneau » d'erreur

Énergies autour du MeV

2 plans de détection

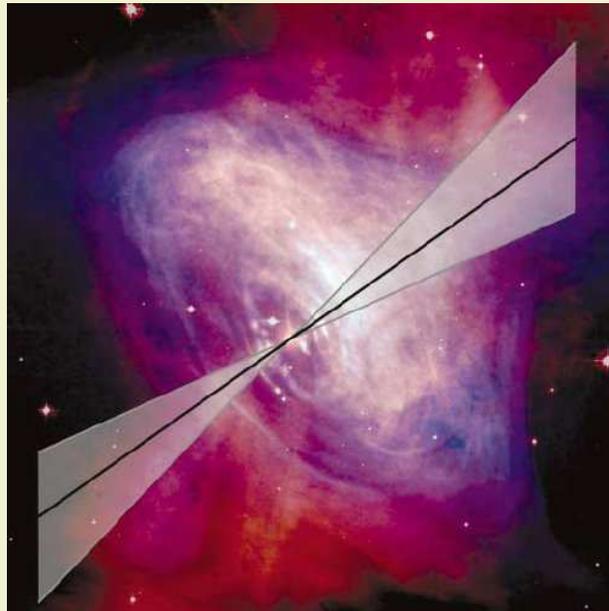
- **Plan 1** : favorise l'effet Compton (matériau à faible Z, ex. scintillateur liquide)
- **Plan 2** : favorise l'effet photo-électrique (matériau à grand Z, ex. NaI)

$$\sin^2 \frac{\varphi}{2} = \frac{m_e E_1}{2E_1(E_1 + E_2)}$$

# INTEGRAL utilisé comme télescope Compton pour mesurer la polarisation de l'émission de la nébuleuse du Crabe

## Asymétrie azimuthale de la diffusion Compton

- Avec SPI : ( $100 \text{ keV} < E < 1 \text{ MeV}$ ) : diffusion Compton dans un détecteur et absorption dans un autre. [A. J. Dean, et al. Science 321 \(2008\) 1183](#)
- Avec IBIS ( $200 \text{ keV} < E < 800 \text{ keV}$ ) : diffusion Compton dans ISGRI et absorption dans PiCsIT [M. Forot, et al. ApJ 688 \(2008\)L29](#)



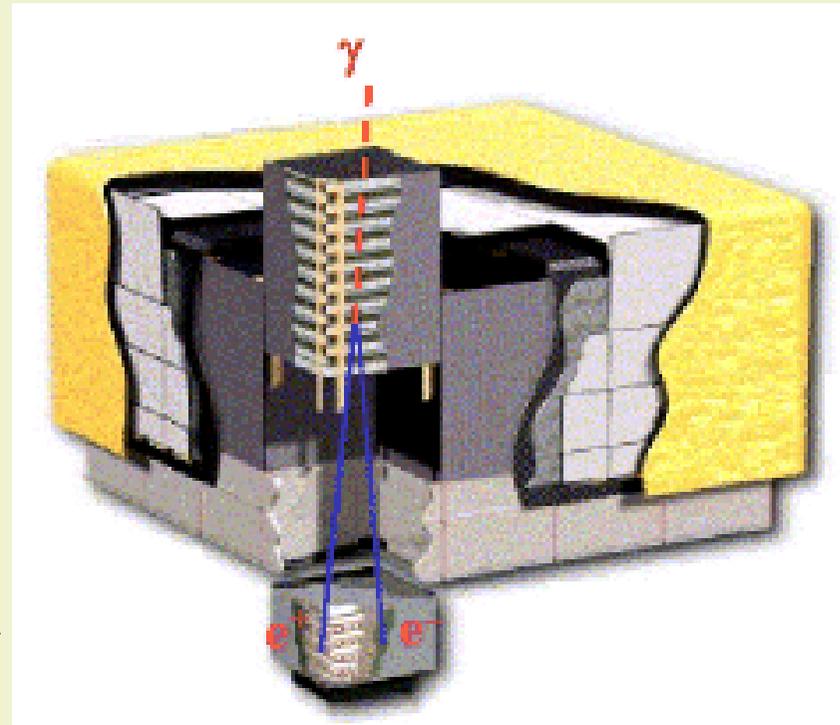
Direction de la polarisation  
([Dean et al. 2008](#))  
superposée à  
l'image en rayons X  
(Chandra)

# Les détecteurs spatiaux à haute énergie (Fermi et AGILE)

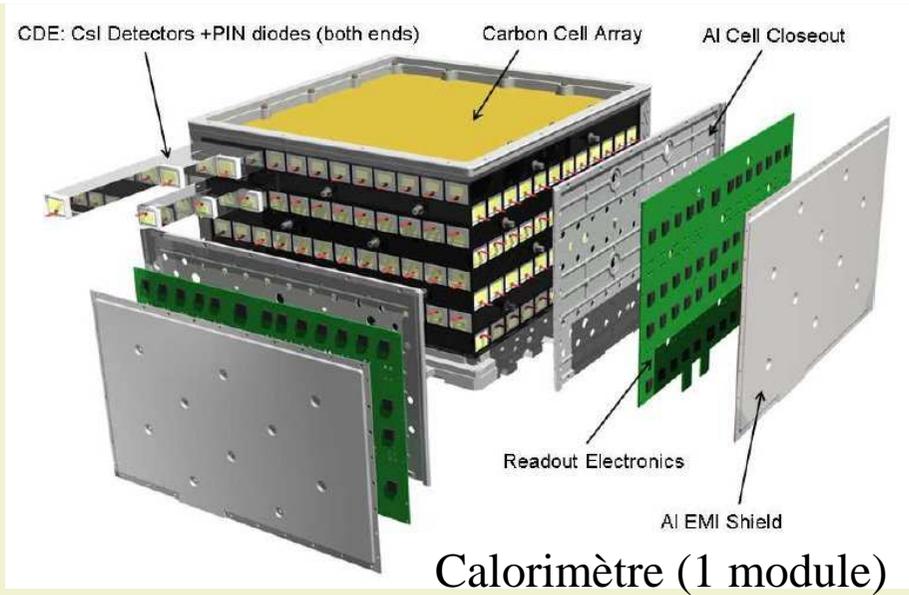
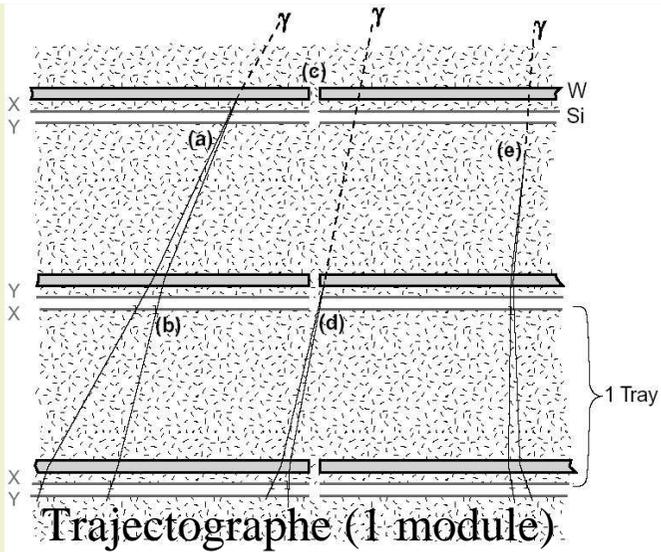
( $20 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$ )

## Trois composantes dans l'instrument

- **Dôme antikoïncidence**  
→ élimine les particules incidentes chargées
- **Trajectographe** : empilement de plaques de matériau (W, Pb) pour la conversion du  $\gamma$  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 Fermi ex GLAST (NASA)  
lancé en Juin 2008



B. Degrange

## Fermi Large Area Telescope

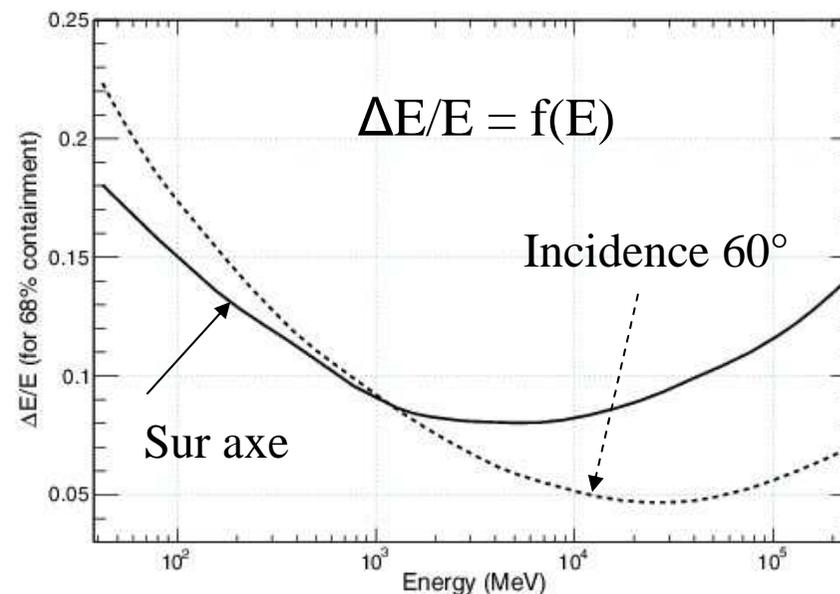
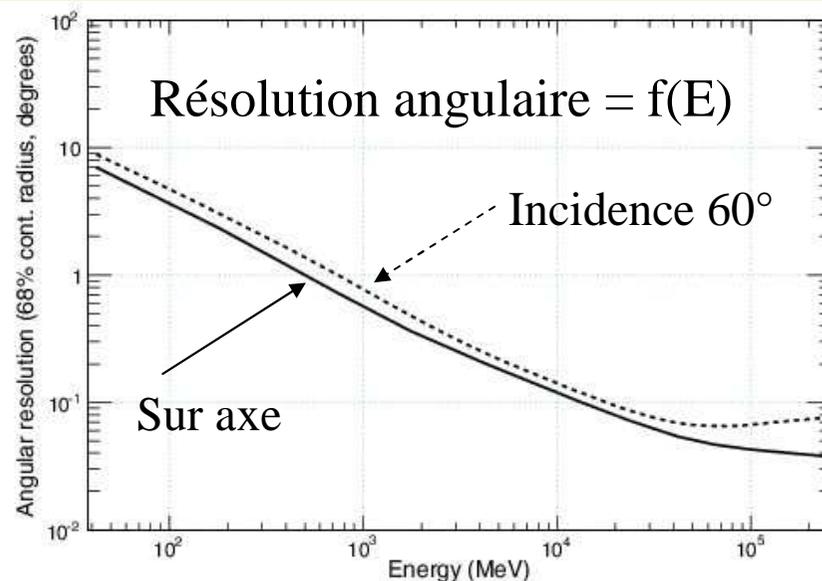
ApJ 697  
(2009)1071



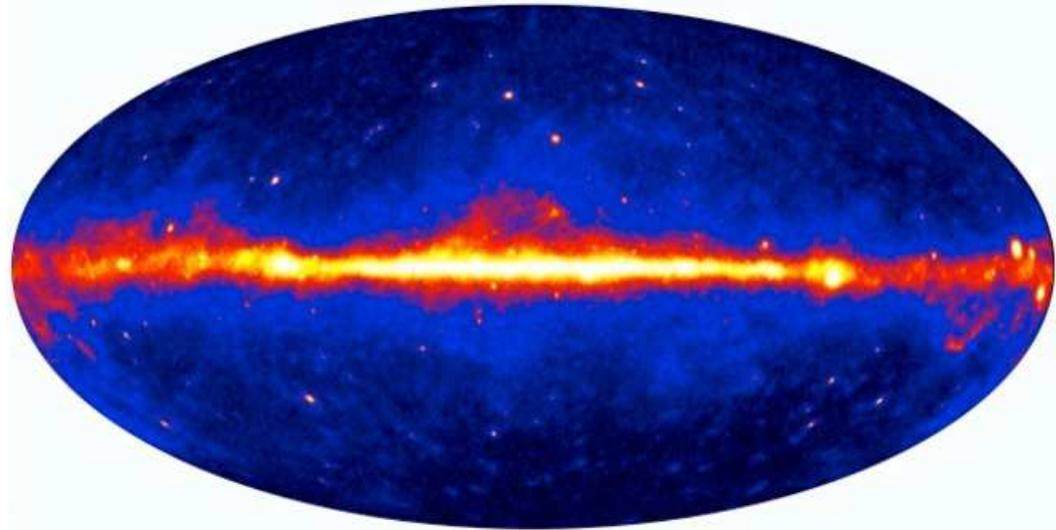
# Fermi-LAT

ApJ **697** (2009)1071

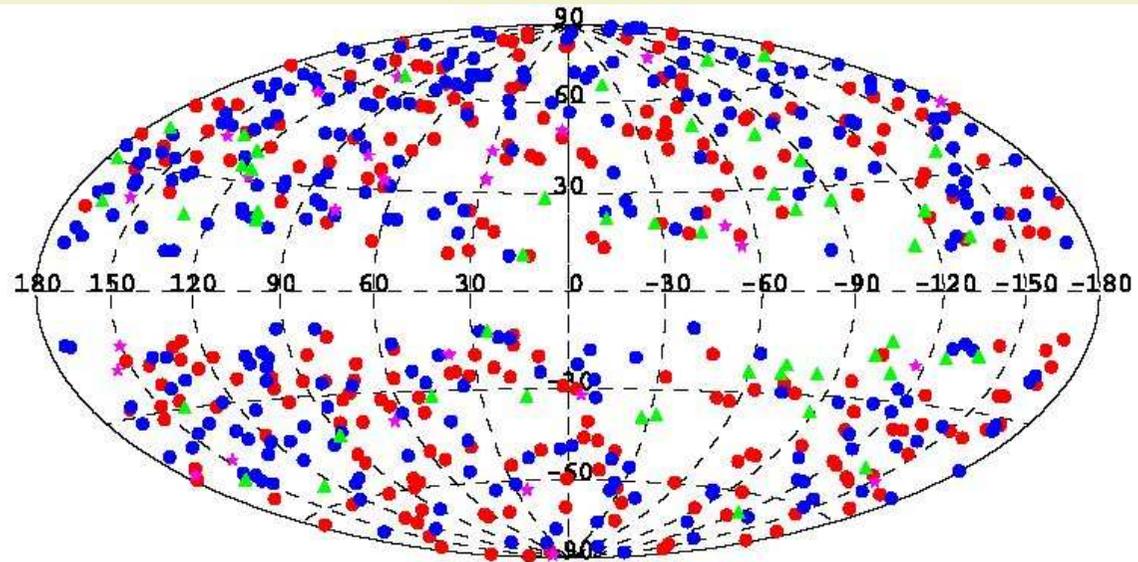
- **Résolution angulaire**  
(trajectographe) limitée par l'angle entre  $e^+$  et  $e^-$  et la diffusion multiple dans le convertisseur. Sur axe (68%) :
  - ◆  $3,5^\circ$  à 100 MeV
  - ◆  $0,6^\circ$  à 1 GeV
  - ◆  $\leq 0,15^\circ$  à 10 GeV
- **Résolution en énergie**  
(calorimètre) 10-15%, se dégrade aux plus hautes énergies où la gerbe n'est plus contenue entièrement dans le calorimètre.
- **Champ de vue : 2,4 stéradians**  
Exposition du ciel ~ uniforme au bout de 2 orbites !



Carte du ciel  $E > 200$  MeV  
avec un an de données du  
télescope spatial Fermi :  
importance du fond diffus  
galactique dans ce domaine  
d'énergie



Premier catalogue de  
noyaux actifs de galaxies  
du télescope spatial  
Fermi : *ApJ* **715** (2010) 429



## 3b.2 Détecteurs au sol

- La limitation en surface effective ( $\sim 1 \text{ m}^2$ ) des détecteurs spatiaux actuels fixe la borne supérieure du domaine d'énergie accessible car les flux de  $\gamma$  décroissent très vite avec l'énergie.
- Pour l'une des sources les plus intenses de l'astronomie  $\gamma$ , la nébuleuse du Crabe :
  - ◆  $E > 100 \text{ GeV}$  : environ un  $\gamma$  par  $\text{m}^2$  tous les 2 jours
  - ◆  $E > 1 \text{ TeV}$  : environ un  $\gamma$  par  $\text{m}^2$  tous les 2 mois  $\rightarrow$  nécessité de revenir à une détection à partir du sol avec de grandes surfaces effectives ( $\sim 10^5 \text{ m}^2$ )
- Aux énergies supérieures à quelques dizaines de GeV, les photons  $\gamma$  créent dans l'atmosphère **une grande gerbe électromagnétique** détectable depuis le sol  $\rightarrow$  **l'atmosphère comme calorimètre**
- ... mais les rayons cosmiques chargés (p et noyaux) créent aussi de grandes gerbes, hadroniques celles-là, qui constituent un fond énorme.
- Il faut **réduire ce fond de plusieurs ordres de grandeur** pour accéder aux émissions  $\gamma$  et **c'est la performance en matière de rejet du fond qui fixe la sensibilité, au moins en-dessous de 100 TeV.**

## Deux types de détecteurs au sol

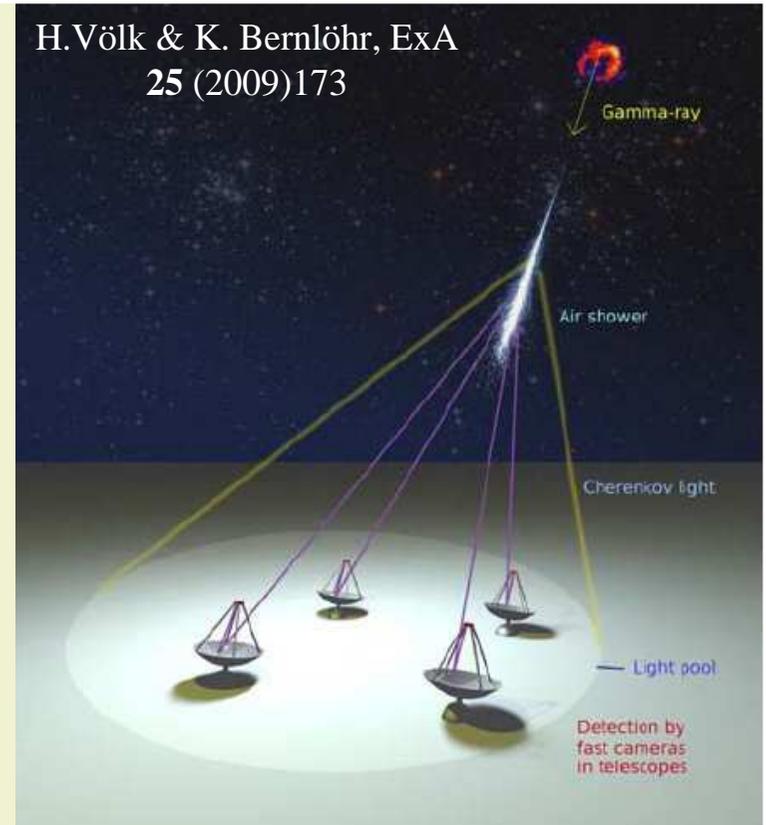
### ■ Télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique

- ◆ Instruments à champ de vue limité ( $5^\circ$  de diamètre pour H.E.S.S.), donc devant suivre une source dans son mouvement apparent sur le ciel.
- ◆ Ne fonctionnent que la nuit, par beau temps, en l'absence de lune.
- ◆ Tache de lumière au sol  $\rightarrow$  S effective  $\sim 10^5 \text{ m}^2$
- ◆ Grand pouvoir de discrimination « gamma-hadron »  $\rightarrow$  ont produit l'essentiel du catalogue de sources au TeV (près de 100 en 2011).

### ■ Détecteurs synoptiques (particules chargées et $\gamma$ secondaires au sol)

- ◆ Instrument à grand champ de vue (près d'un stéradian) : relevé systématique de sources
- ◆ Haute fraction de temps utile
- ◆ Faible pouvoir de discrimination « gamma-hadron »  $\rightarrow$  sensibilité beaucoup plus limitée (25% du Crabe pour le relevé de MILAGRO pour  $E > 20 \text{ TeV}$ )
- ◆ Haute altitude (2600 m MILAGRO, 4300 m TIBET) nécessaire pour que le seuil en énergie ne soit pas trop élevé.: la gerbe doit atteindre le sol.

H.Völk & K. Bernlöhr, ExA  
25 (2009)173



# Observer les images des gerbes en lumière Tcherenkov



H.E.S.S. I  
(960 pixels)

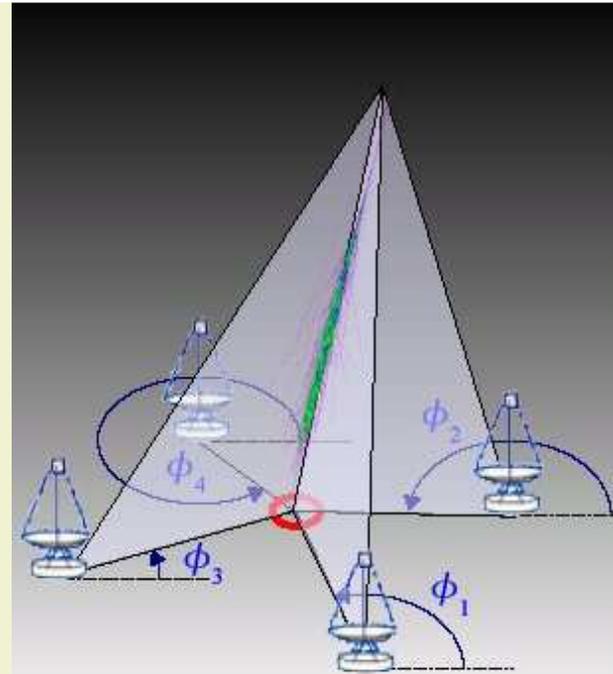
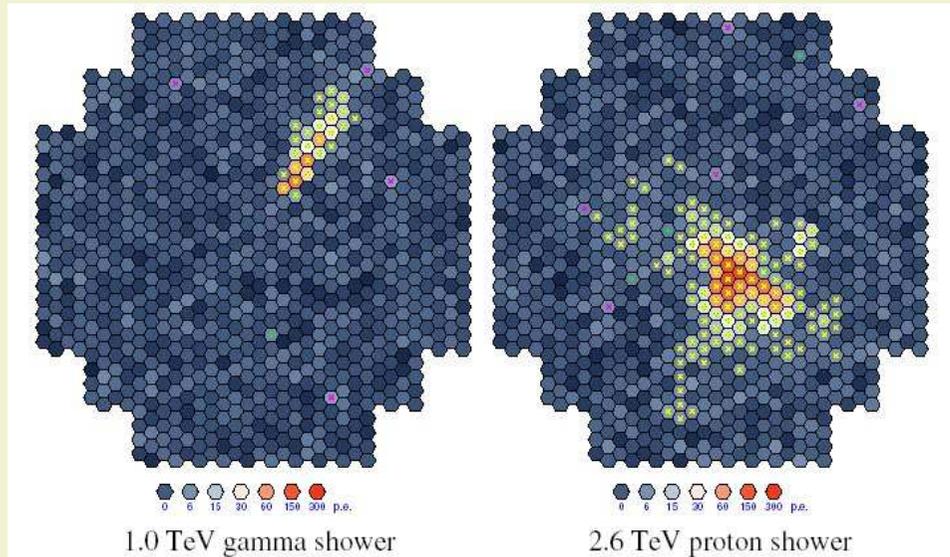


MAGIC  
(396+180 pixels)

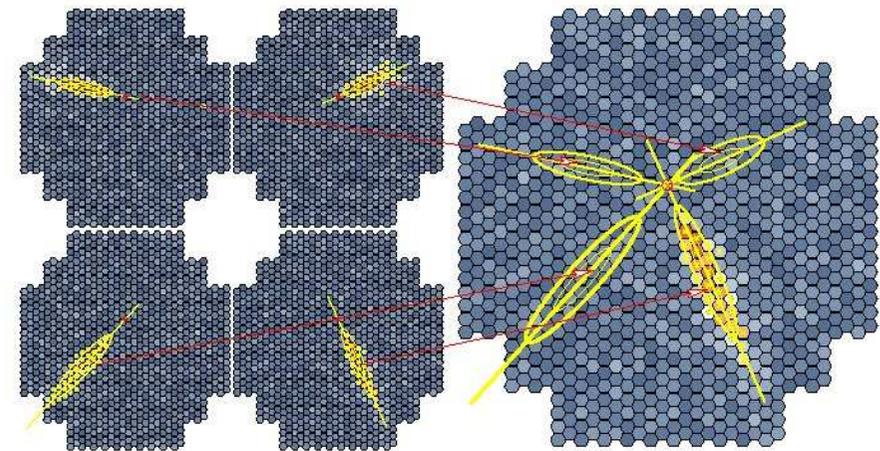
H.E.S.S. II  
(2048 pixels)



## L'imagerie Tcherenkov



- L'atmosphère est le calorimètre
- Caméra à grain fin : sélection des gerbes électromagnétiques par la forme d'image
- Stéréoscopie : affine considérablement la sélection et la résolution angulaire : 4 à 6' → sources étendues, relevés du plan galactique. La reconstruction du point d'impact au sol permet une mesure de l'énergie à ~ 15% par la quantité de lumière reçue par les caméras.

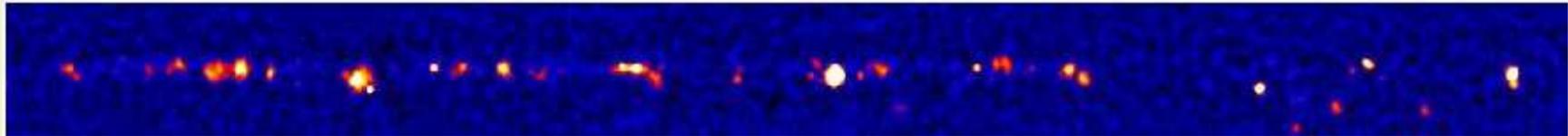


H.Völk & K. Bernlöhr, ExA 25 (2009)173

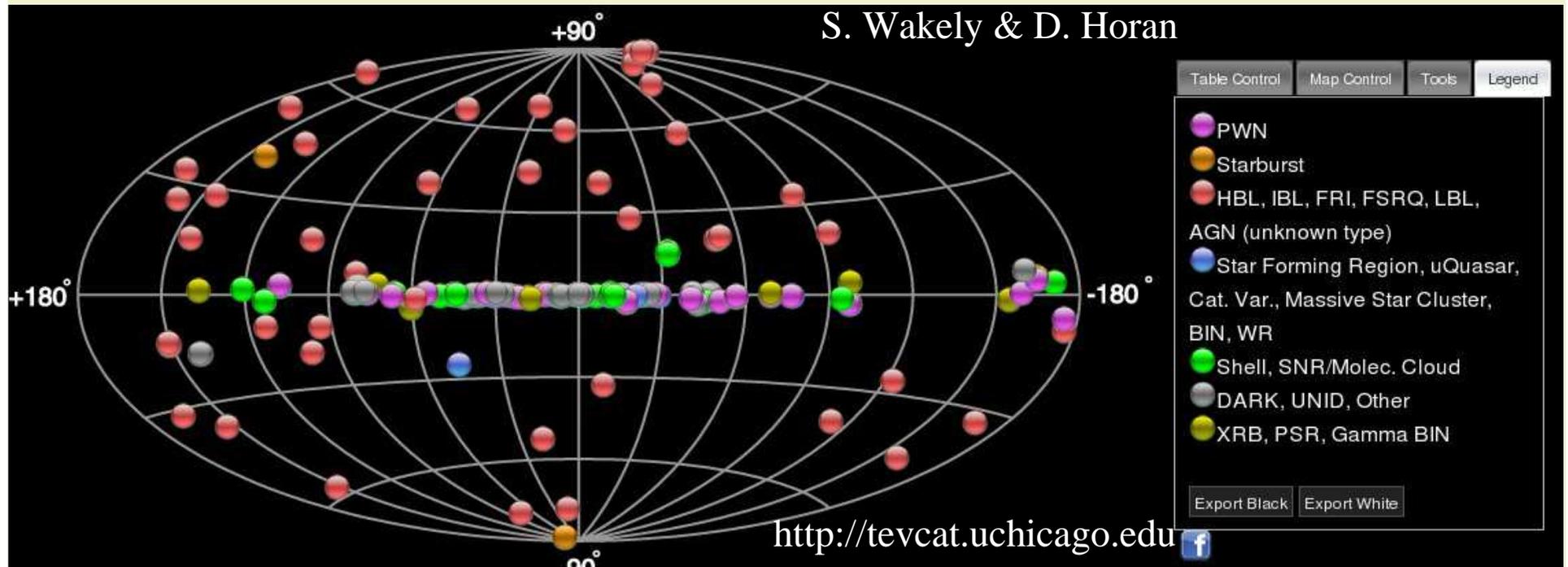
# Sensibilité actuelle de l'imagerie Tcherenkov

~ 1/100 flux de la nébuleuse du Crabe

Relevé du plan galactique par H.E.S.S.

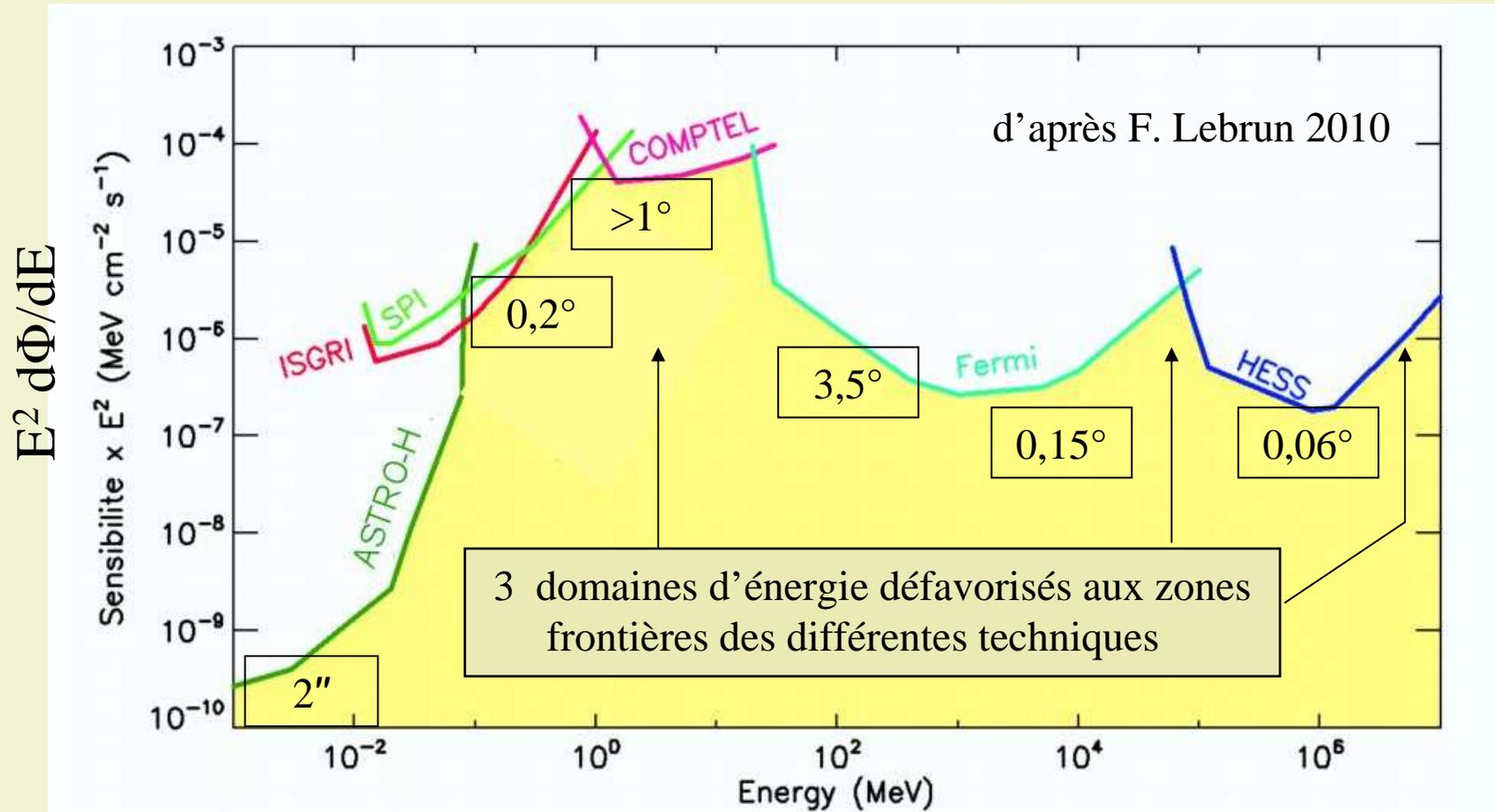


Le fond diffus ne domine plus et les sources individuelles apparaissent clairement



## 3c Performances actuelles

### Sensibilité et résolution angulaire

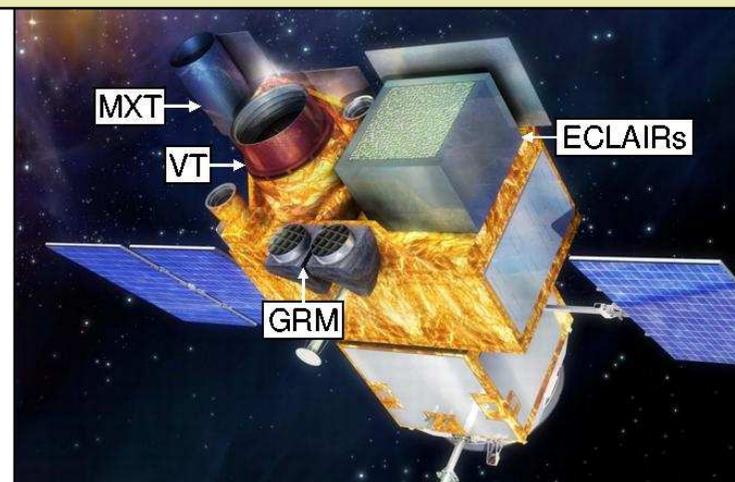


## 4. Perspectives

### Les prochaines années

- Aux basses énergies, une seule mission programmée **SVOM** (Space-based multi-band Variable Objects Monitor, 4 keV-5MeV) (France+Chine, 2013 ?), essentiellement consacrée aux sursauts gamma, particulièrement ceux de grand décalage spectral
- Entre 10 GeV et 500 GeV, un meilleur recouvrement entre le satellite Fermi-LAT et les télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique grâce à la mise en service de, **MAGIC II** (2010,  $E > 50$  GeV) et de **H.E.S.S. II** (2012,  $E > 30$  GeV), mettant à profit, pour les objets variables (blazars surtout), la complémentarité :
  - grand champ de vue (Fermi) → alerte en cas d'éruption
  - grande surface de détection (télescopes Tcherenkov) → suivi temporel sur de courtes échelles de temps (minutes)

SVOM: seuil très bas de ECLAIRs (déclenchement 4 keV-250 keV), complété par le Gamma-Ray Monitor (50 keV-5 MeV) et 2 télescopes (X et visible)  
+ suivi par des télescopes optiques à partir du sol



H.E.S.S. II : un grand télescope de 28 m de diamètre au milieu des 4 télescopes actuels → seuil 30 GeV  
80 GeV en stéréo (grand télescope + un des 4 autres)

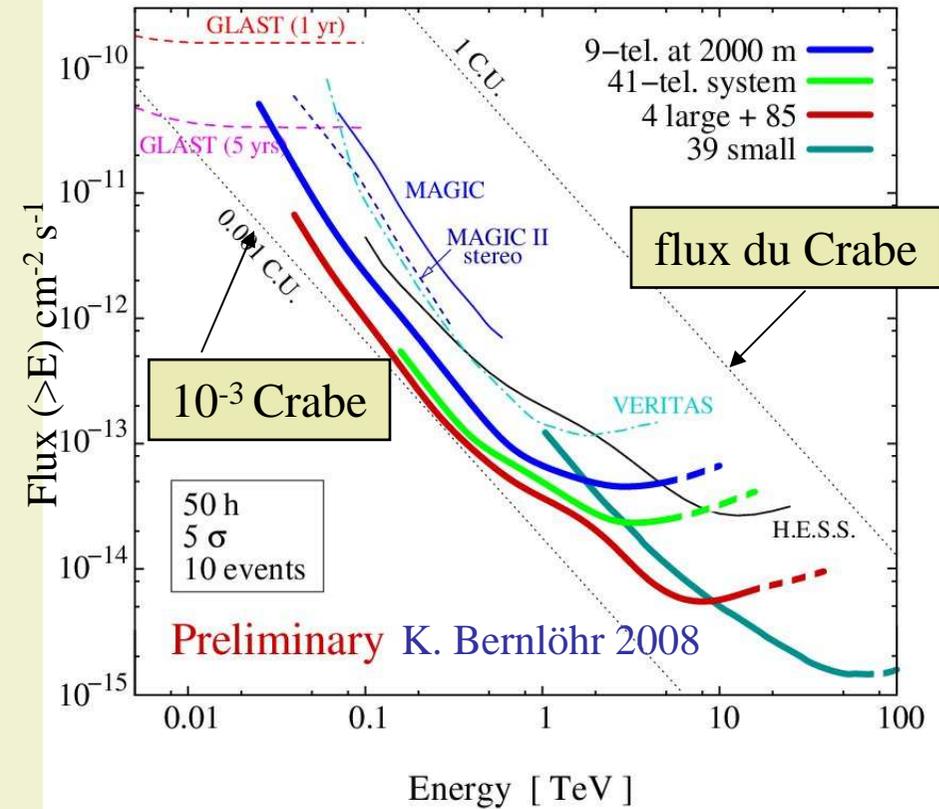
## À plus long terme

### ■ Réseau de télescopes à effet Tcherenkov atmosphérique CTA (Cherenkov Telescope Array) avec 3 types d'instruments:

- ◆ quelques très grands télescopes pour couvrir le domaine 30 GeV – 100 GeV
- ◆ environ 40 télescopes (type HESS I) répartis sur  $\sim 1 \text{ km}^2$  → sensibilité du milli-Crabe au TeV
- ◆ environ 25 petits télescopes à grand champ de vue répartis sur  $\sim 10 \text{ km}^2$  pour explorer le domaine  $E > 10 \text{ TeV}$
- ◆ Résolution angulaires  $\sim 2$  minutes d'arc

### ■ Projet américain HAWC (High Altitude Water Cherenkov Experiment) de détecteur synoptique :

- ◆ 300 détecteurs Tcherenkov à eau (900 phototubes) répartis sur  $150 \times 135 \text{ m}^2$  à 4100 m d'altitude (Sierra Negra, Mexique)
- ◆ sensibilité  $10 \times \text{MILAGRO}$  pour un relevé de 1 TeV à 100 TeV



# Une discipline en plein essor

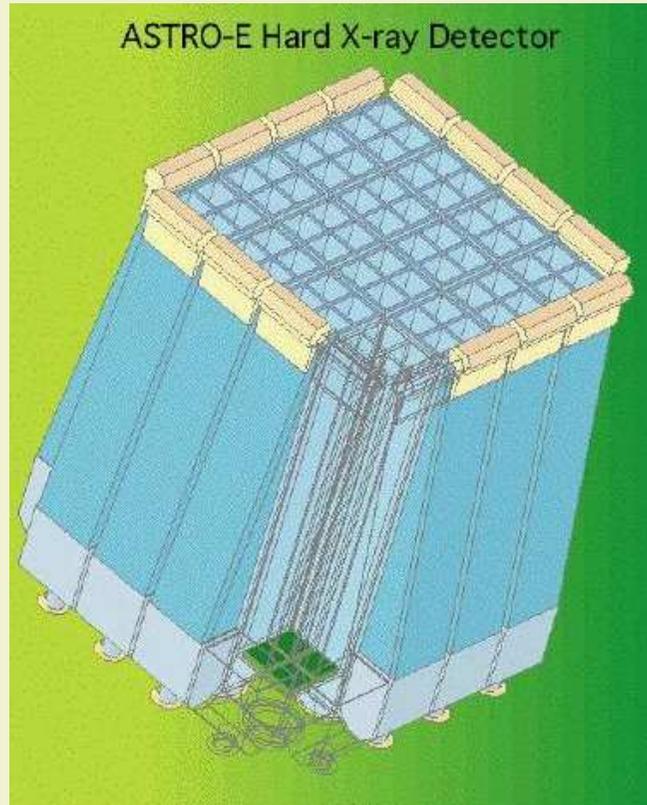
- Des types d'émetteurs  $\gamma$  de plus en plus variés :
  - ◆ dans la Galaxie : vestiges de supernovæ, pulsars, nébuleuses de vent de pulsars, systèmes binaires, régions de formation d'étoiles, nuages moléculaires, amas globulaires, sources diffuses (raie à 511 keV, raies  $\gamma$  nucléaires traçant les éléments de nucléosynthèse explosive, émission due aux interactions des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire).
  - ◆ hors de la galaxie : sursauts gamma, galaxies à flambée d'étoiles, galaxies actives (radio-galaxies, blazars).
- Des contraintes significatives apportées aux modèles des différents objets
- Des sources potentielles (amas de galaxies, matière noire ?) peut-être accessibles aux instruments de la prochaine génération
- De nombreuses énigmes à résoudre :
  - ◆ nature des sources non identifiées ?
  - ◆ l'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques ? Sursauts gamma ? noyaux actifs de galaxie, amas de galaxies ?
  - ◆ des surprises, par exemple les sursauts du Crabe (18-22 sept. 2010 et 9-11 avril 2011) détectés par AGILE et Fermi-LAT (Science **331**(2011)739, Atel#3276)

# Compléments

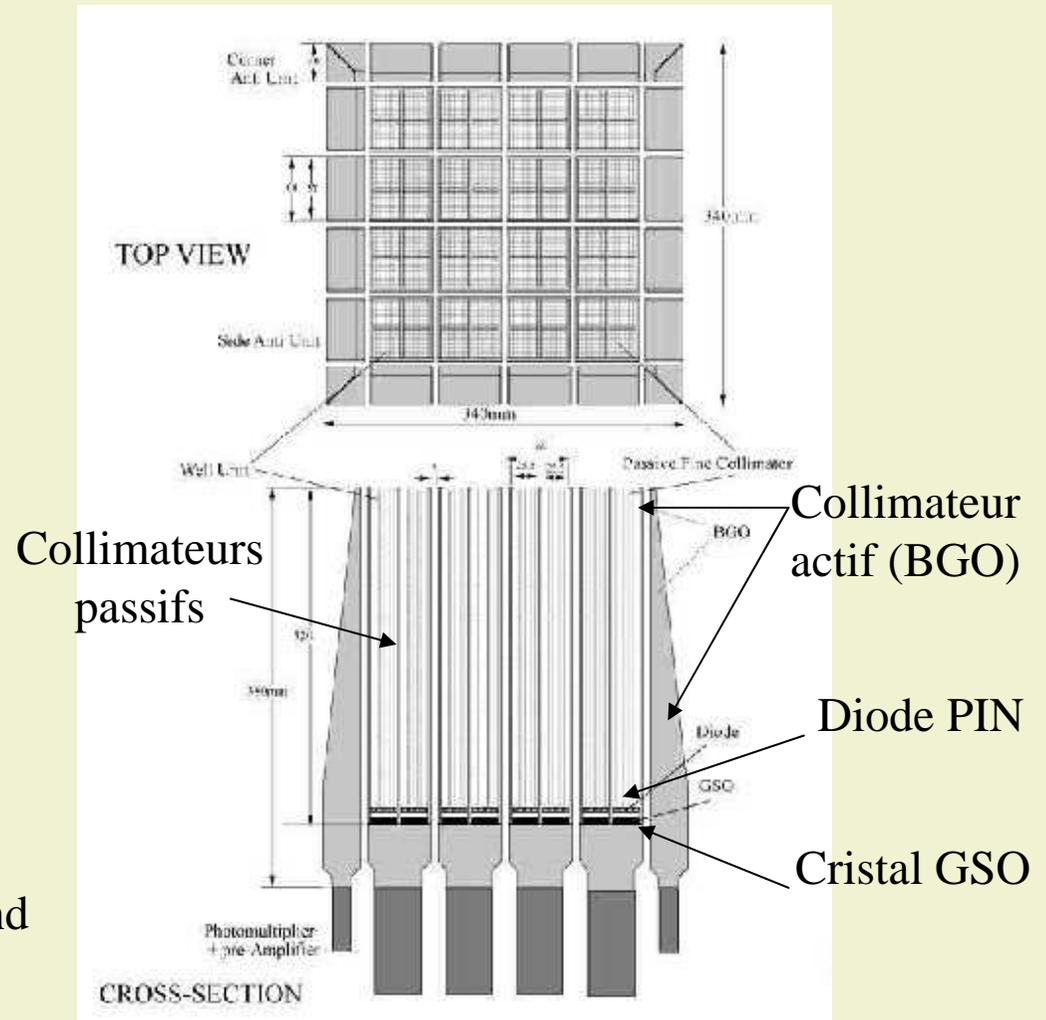
## Les raies gamma nucléaires

- Raie d'annihilation (511 keV)  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma \gamma$  renseigne sur la présence de positons de basse énergie (radioactivité  $\beta^+$ , production de paires dans certains objets)
- Raies liées à la nucléosynthèse explosive dans les supernovæ
  - ◆  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$  ( $\gamma$  de 847 keV et de 1258 keV)  
 $\tau=111,5$  jours  $\rightarrow$  observation d'une supernova
  - ◆  $^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}^* \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \gamma$  (1,809 MeV)  
 $\tau = 10^6$  ans  $\rightarrow$  trace les anciennes supernovæ
  - ◆  $^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc}^* \rightarrow ^{44}\text{Sc} + \gamma$  (67,9 keV, 78,4 keV)  $\rightarrow ^{44}\text{Ca}^* \rightarrow ^{44}\text{Ca} + \gamma$  (1,156 MeV)  
 $\tau = 85$  ans  $\rightarrow$  trace les supernovæ récentes
- Éventuellement raies d'excitations dues aux collisions des rayons cosmiques dans le milieu interstellaire

## Technique de collimateurs : l'exemple du détecteur HXD de Suzaku



Les collimateurs forment **un puits** au fond duquel se trouvent les détecteurs



Gerbe créée par un  $\gamma$  de 300 GeV

En moyenne  
symétrie de  
révolution

Petites impulsions  
transverses

(Presque) jamais de  
muons ...

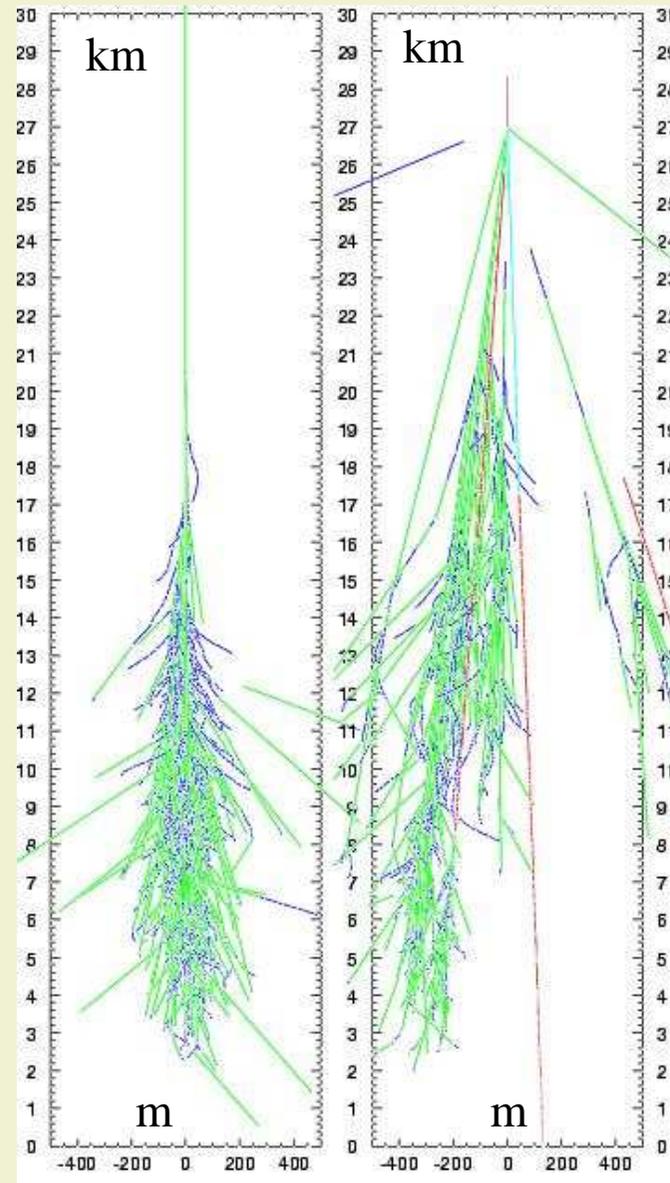
(sauf si  $E_0 > 1$  PeV)

Essentiellement

$e^+ e^-$  et  $\gamma$   
secondaires

B. Degrange

Simulations de M. de Naurois



École des Astroparticules OHP 2011

Gerbe créée par un  
proton de 300  
GeV

Impulsions transverses  
plus grandes

Présence de muons  
(désintégration des  
mésons)

Une gerbe hadronique  
peut comporter des  
sous-gerbes  
électromagnétiques

69