

# H.E.S.S. : recherche de matière noire

Emmanuel Moulin  
DSM/DAPNIA/SPP  
CEA Saclay

- **Astronomie  $\gamma$**
- **Le détecteur H.E.S.S.**
- **Sources du plan galactique**
- **Recherche de matière noire**
- **Le futur de H.E.S.S.**



# High Energy Stereoscopic System

Système de 4 télescopes Cherenkov atmosphériques  
pour l'astronomie  $\gamma$  de très hautes énergies ( $E_\gamma > 100$  GeV)

~ 25 instituts

~ 100 physiciens et astrophysiciens

MPI Kernphysik, Heidelberg

Humboldt Univ. Berlin

Ruhr-Univ. Bochum

Univ. Hamburg

LSW Heidelberg

Univ. Tübingen

Univ. Erlangen

Ecole Polytechnique, Palaiseau

APC Paris

Univ. Paris VI-VII

Paris Observatory, Meudon

LAPP Annecy

LAOG Grenoble

LPTA Montpellier

DAPNIA Saclay

CESR Toulouse

Durham Univ.

Dublin Inst. for Adv. Studies

Charles Univ., Prague

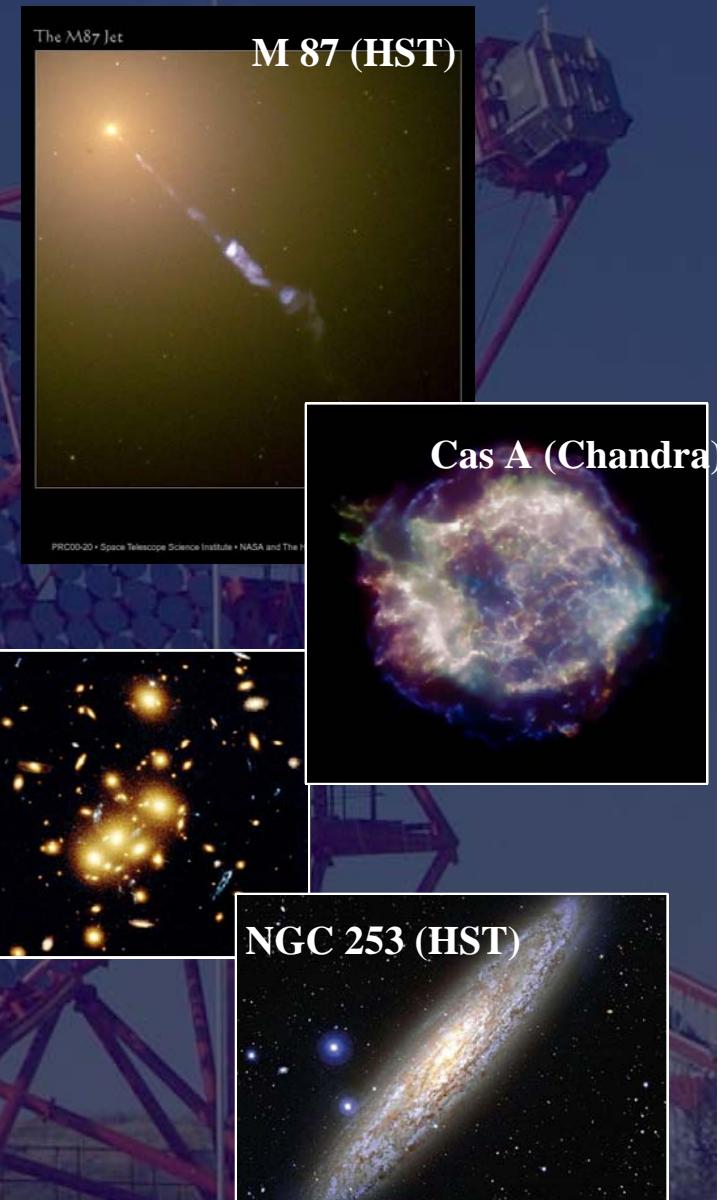
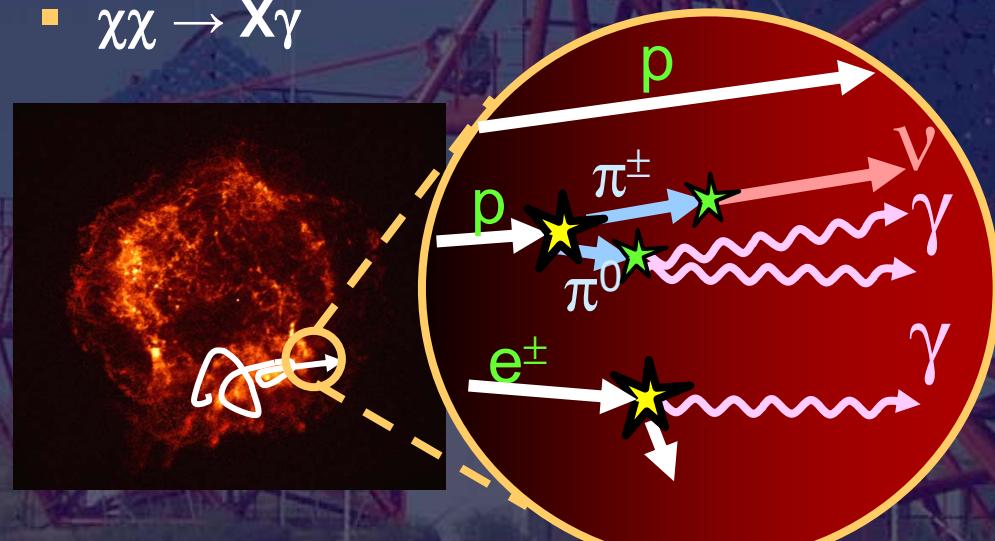
Yerevan Physics Inst.

North-West Univ., Potchefstroom

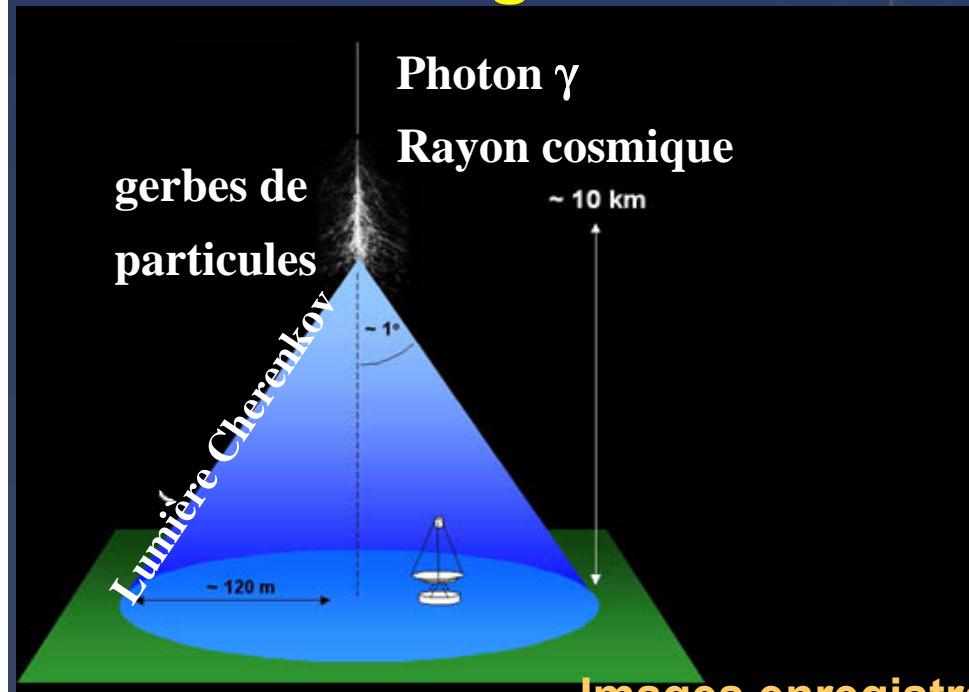
Univ. of Namibia, Windhoek

# Origine du rayonnement $\gamma$

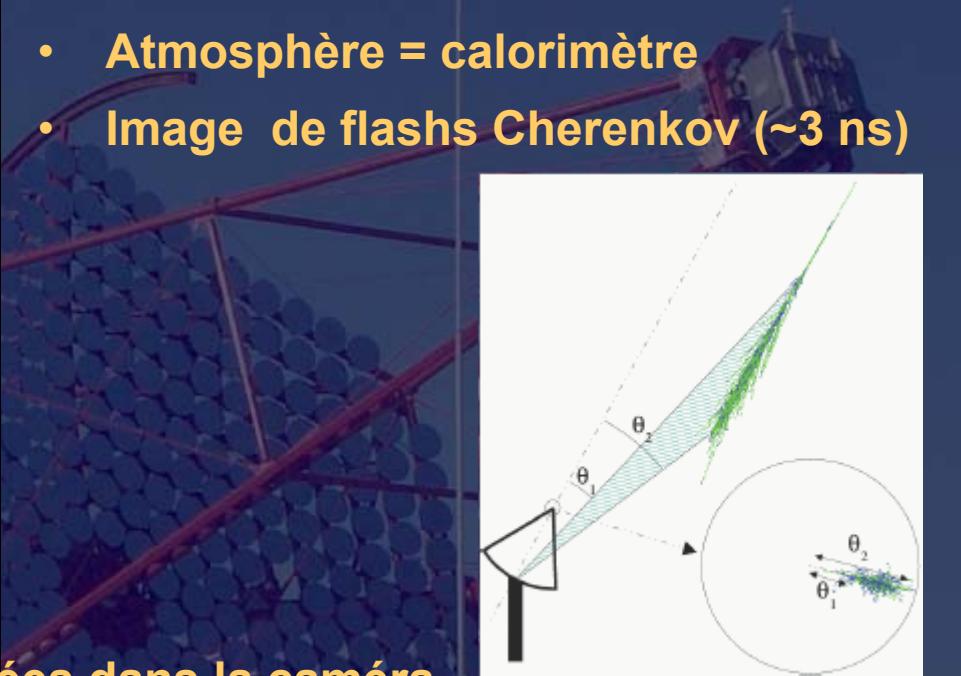
- Protons ou hadrons de hautes énergies
  - $p + \text{noyau} \rightarrow X\pi^0 \rightarrow X\gamma\gamma$
- Electrons de hautes énergies
  - Pertes synchrotron
  - Bremsstrahlung
  - Diffusion Inverse Compton
- Annihilation de Matière Noire
  - $\chi\chi \rightarrow X\gamma$



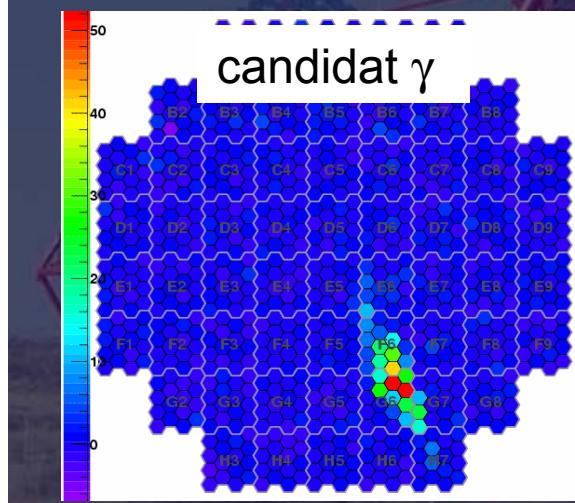
# L'imagerie Cherenkov atmosphérique



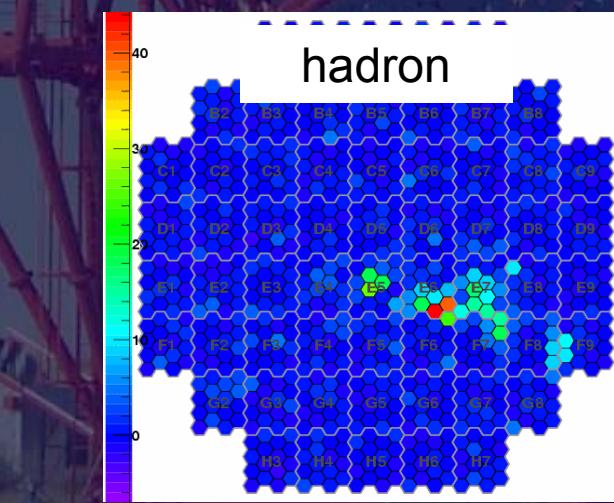
- Atmosphère = calorimètre
- Image de flashes Cherenkov ( $\sim 3$  ns)



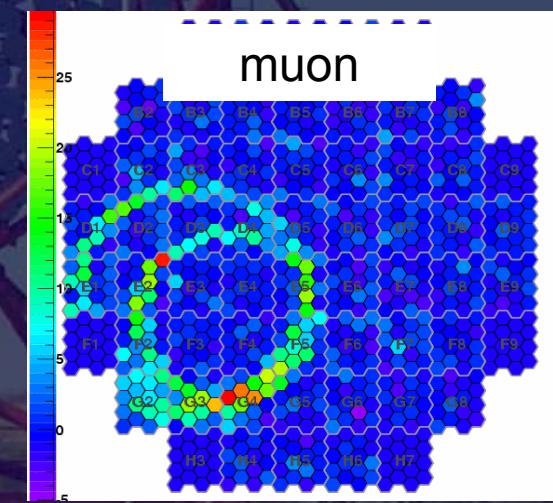
Images enregistrées dans la caméra



Emmanuel Moulin



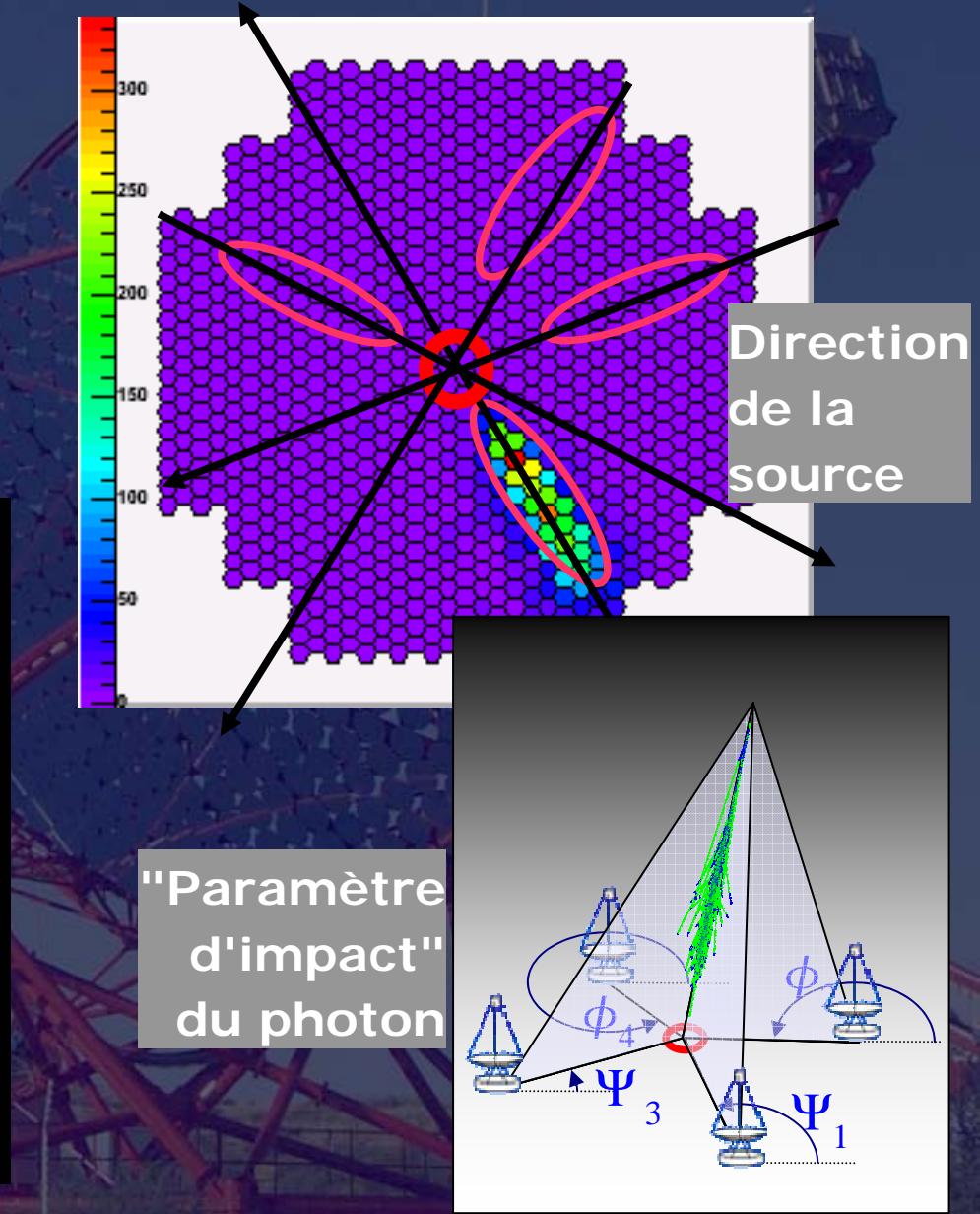
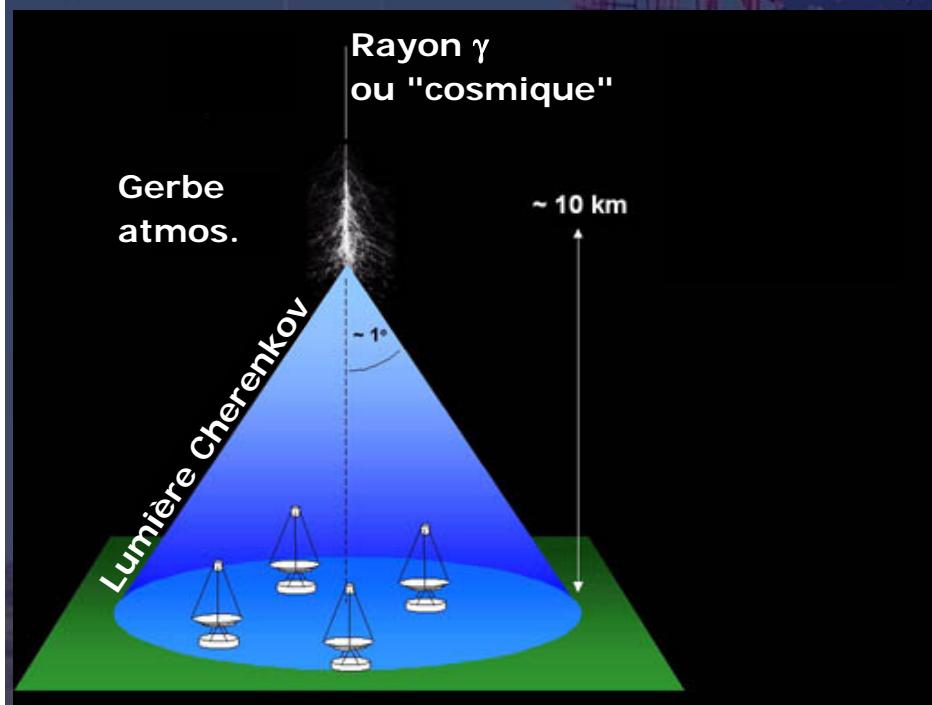
Séminaire LPSC, 8 Mars 2007

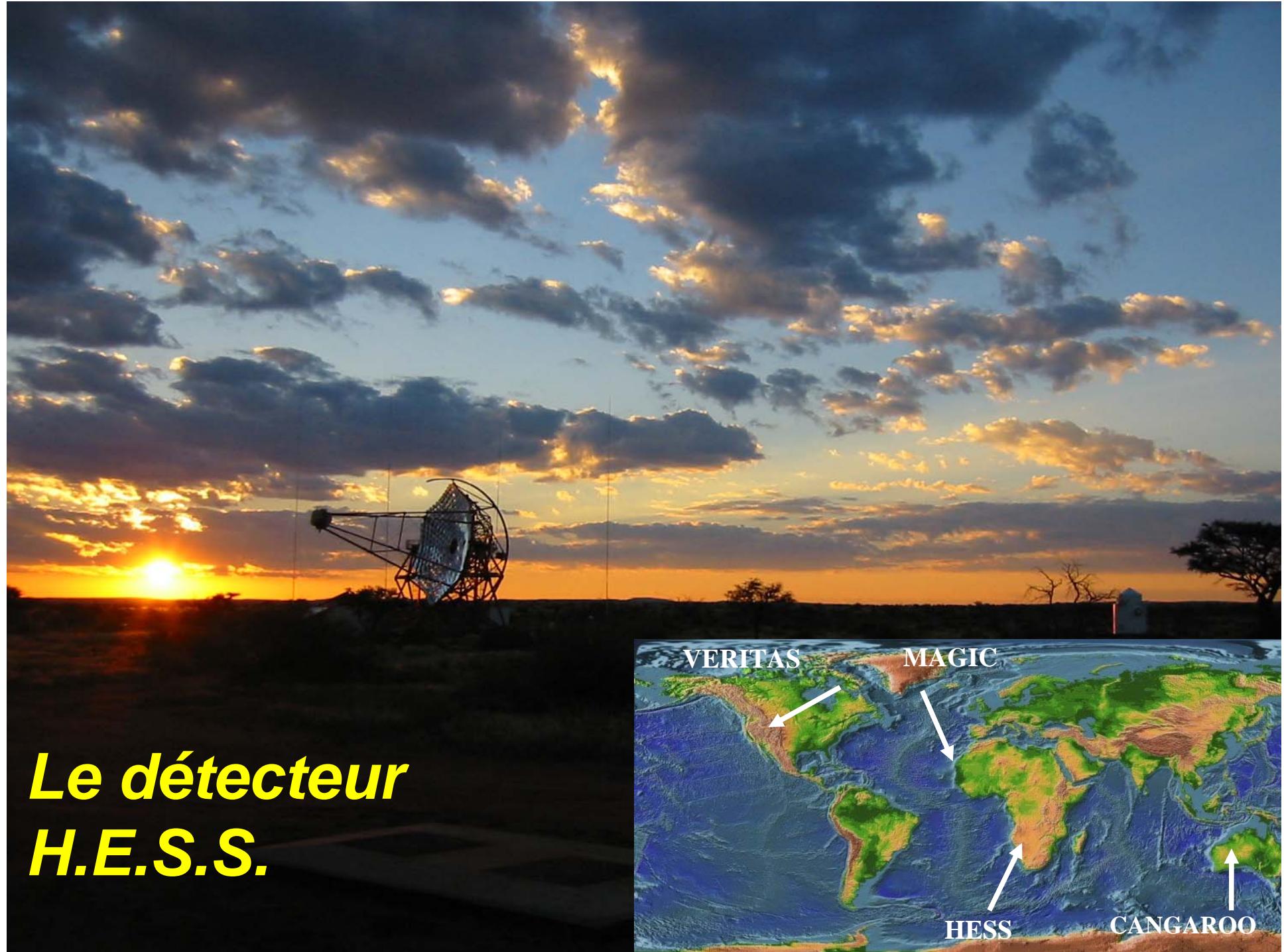


DAPNIA/SPP

# La stéréoscopie avec les télescopes Cherenkov

- Augmenter le pouvoir de rejet des hadrons
- Améliorer la reconstruction des  $\gamma$
- Eliminer les muons isolés (trigger)
- Abaisser le seuil en énergie

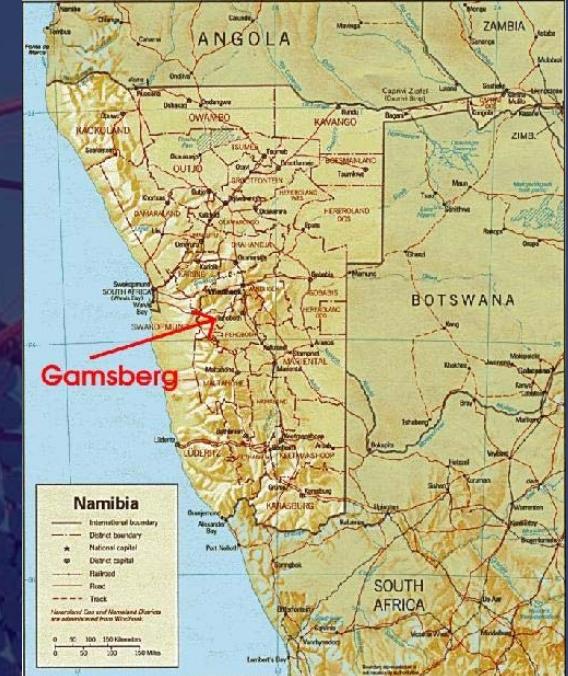




# H.E.S.S. : un instrument de 3<sup>ème</sup> génération

Site : Namibie, 23°16'' S, 16°30'' E, altitude 1800 m

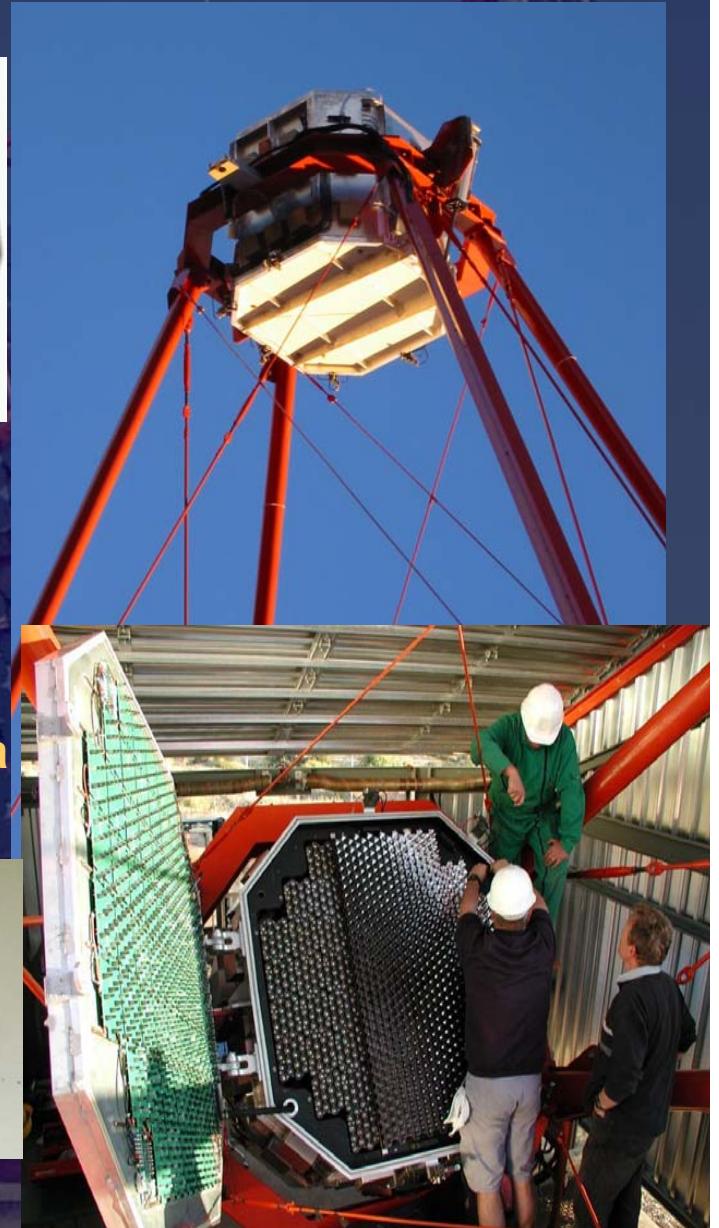
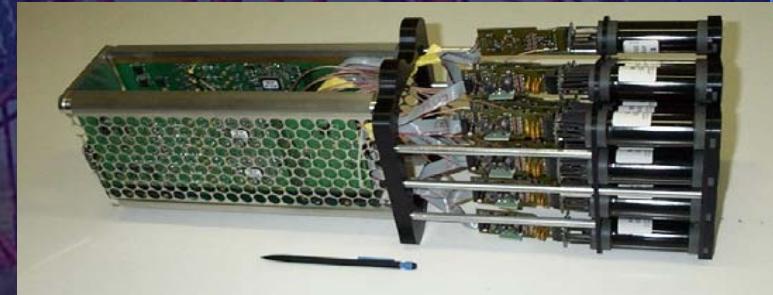
- Réflecteur Davies-Cotton segmenté, 13 m de diamètre, 107 m<sup>2</sup>
- Focale : 15 m
- Précision de pointé : 8''



# Caméras de H.E.S.S.



- **960 photomultiplicateurs avec guides de lumière (cônes de Winston)**
- **Champ de vue : 5°**
- **Pixels de diamètre 0.16°**
- **Electronique rapide :**
  - échantillonnage à 1 GHz
  - fenêtre de lecture 16 ns (ADC)
  - décision de déclenchement ~ 70 ns
- **Electronique embarquée : Trigger dans la caméra**
- **1 tonne**





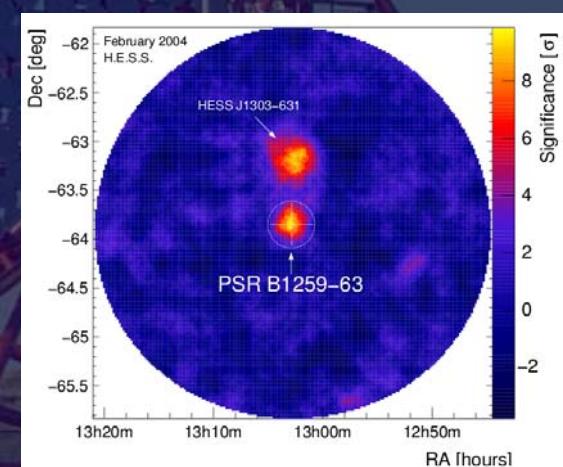
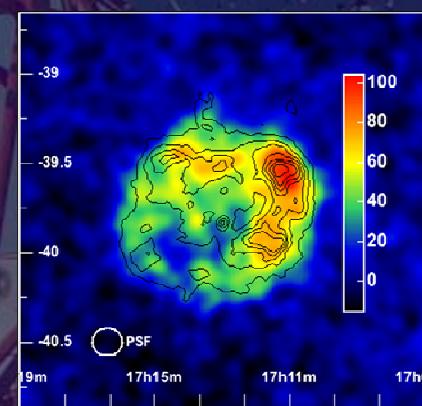
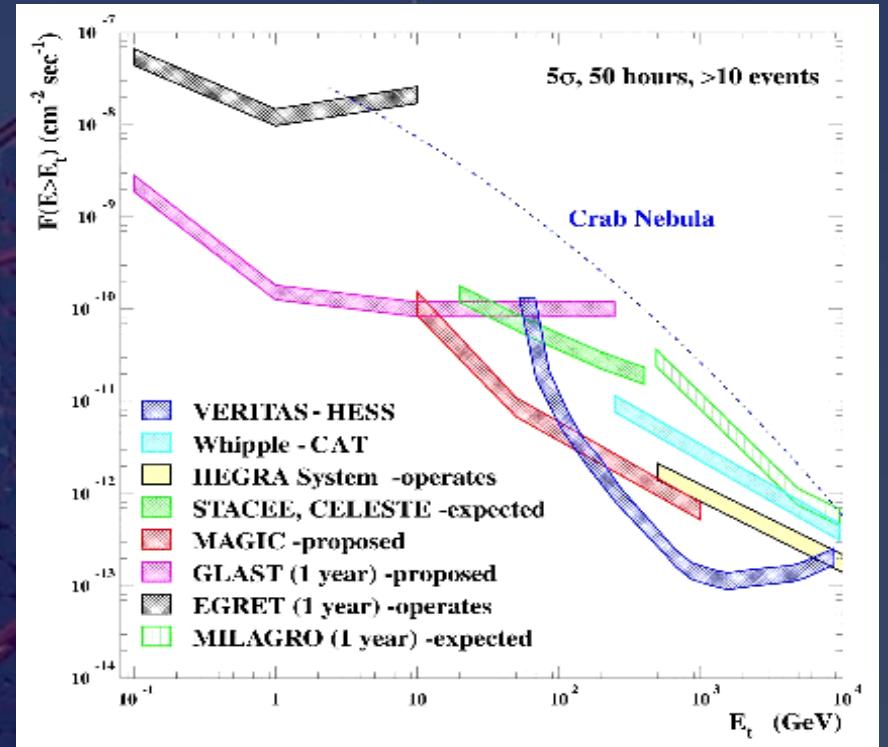
# Le détecteur H.E.S.S.

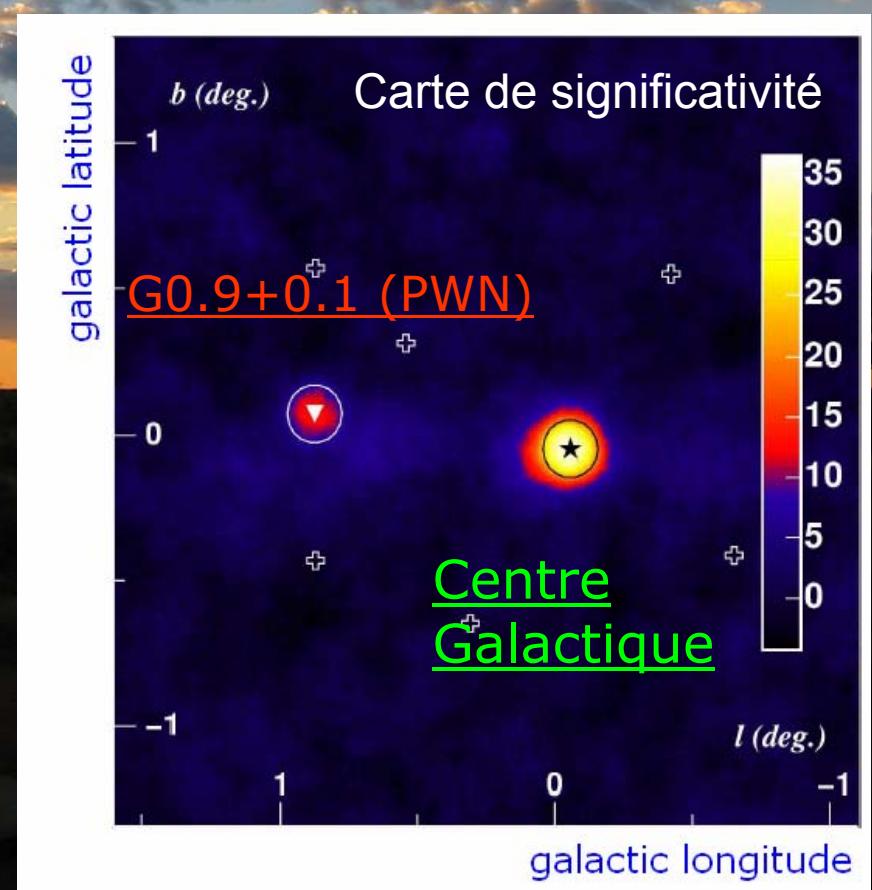
## Les performances de H.E.S.S.

- Taux de déclenchement  $\sim 400$  Hz
- Temps mort  $\sim 10\%$
- Résolution angulaire  $< 0.06^\circ/\gamma$  ( $4'/\gamma$ )
- Pointé  $\sim 10''$
- Seuil en énergie  $\sim 100$  GeV au zénith
- Résolution en énergie  $\sim 15\%$

Détection de la nébuleuse  
du Crabe au zénith :

- 0,01 Crabe :  $\sim 25$  h
- 0,05 Crabe :  $\sim 1$  h
- 0,10 Crabe :  $\sim 15$  min
- 1,00 Crabe :  $\sim 30$  s



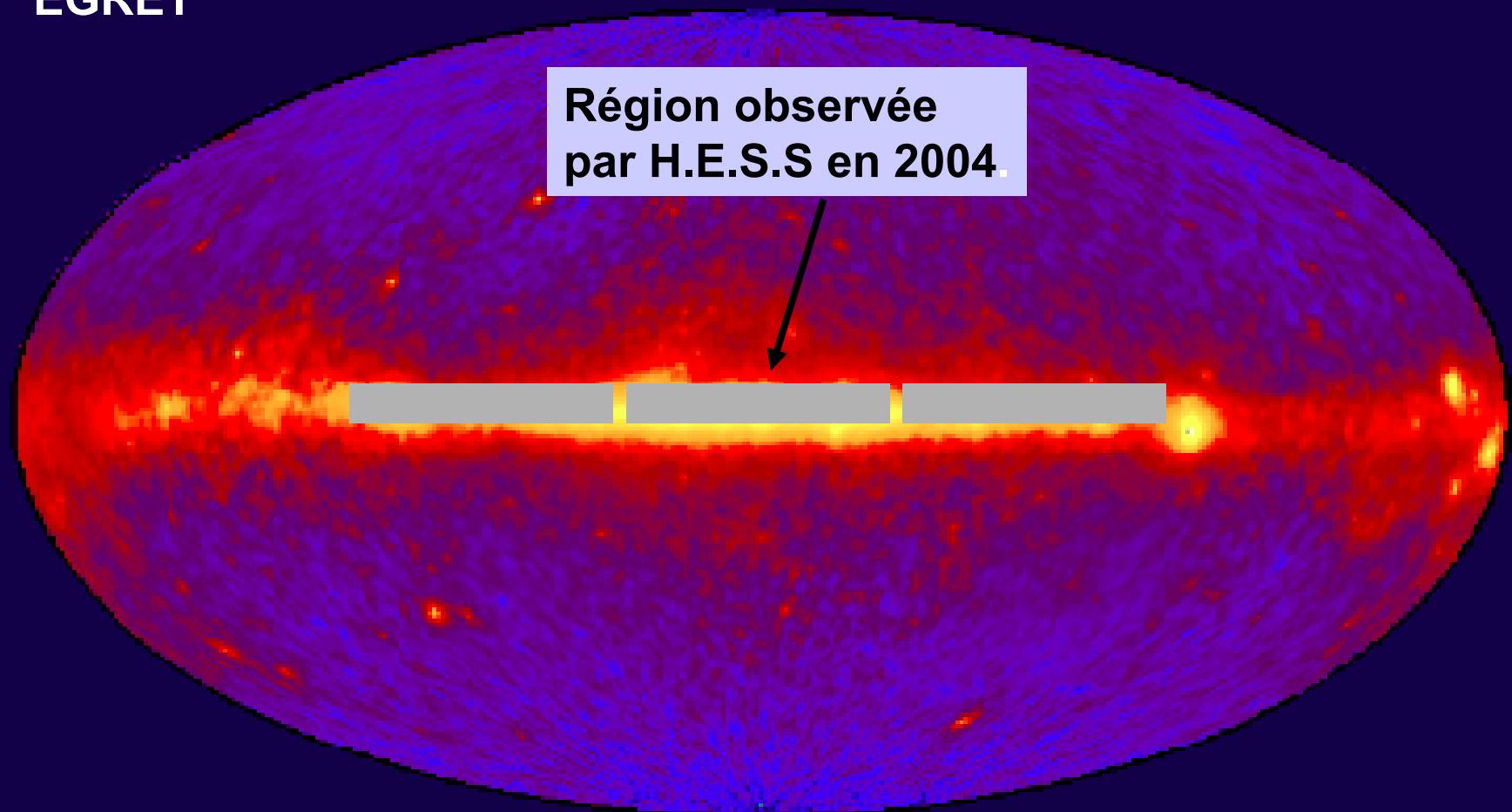


# Observations du plan galactique

- Plan galactique :  $|b| < 3^\circ$
- Mosaïque 2004 : 230h en 500 pointés ,  $|\ell| < 30^\circ$

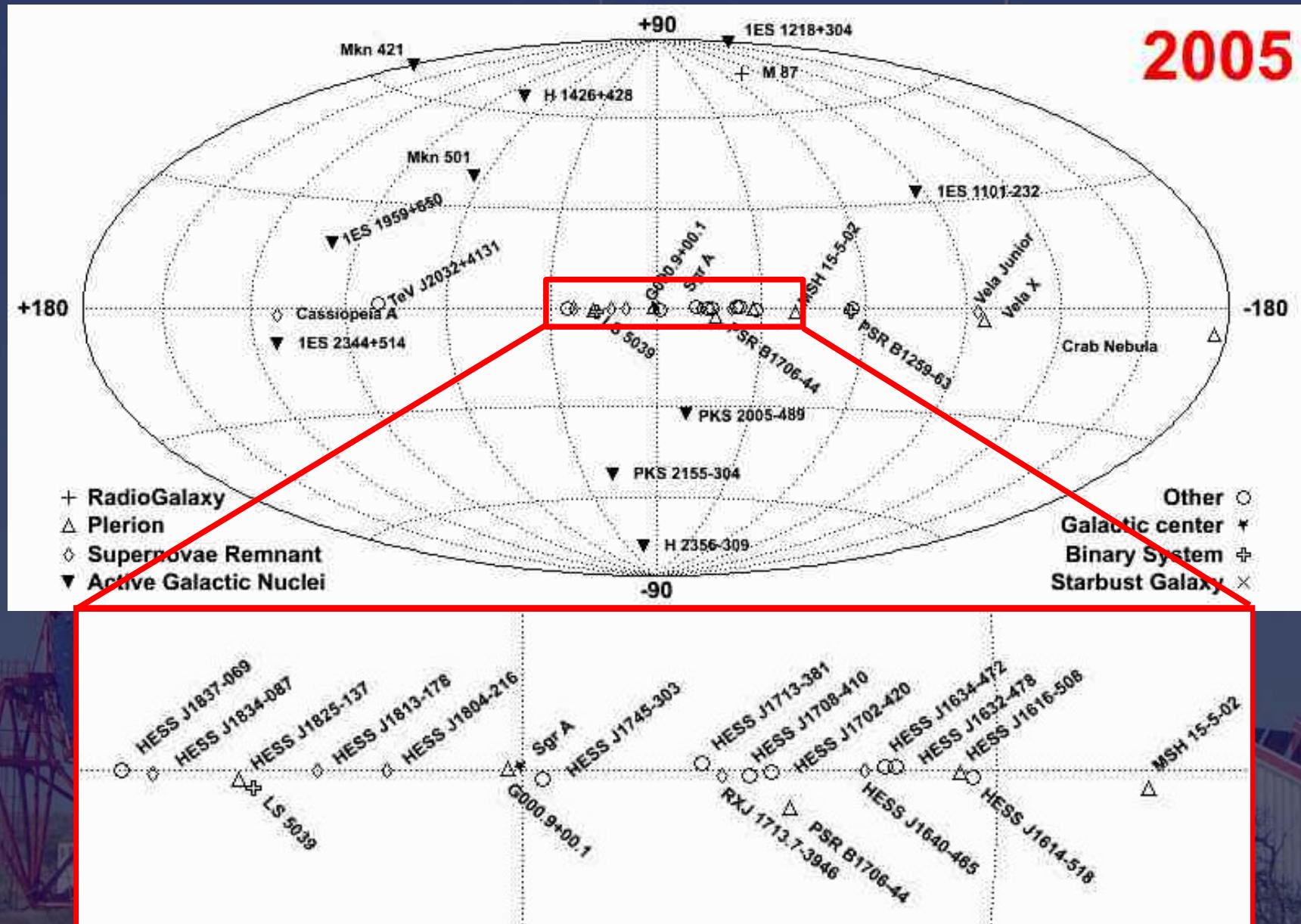
EGRET

Région observée  
par H.E.S.S en 2004.

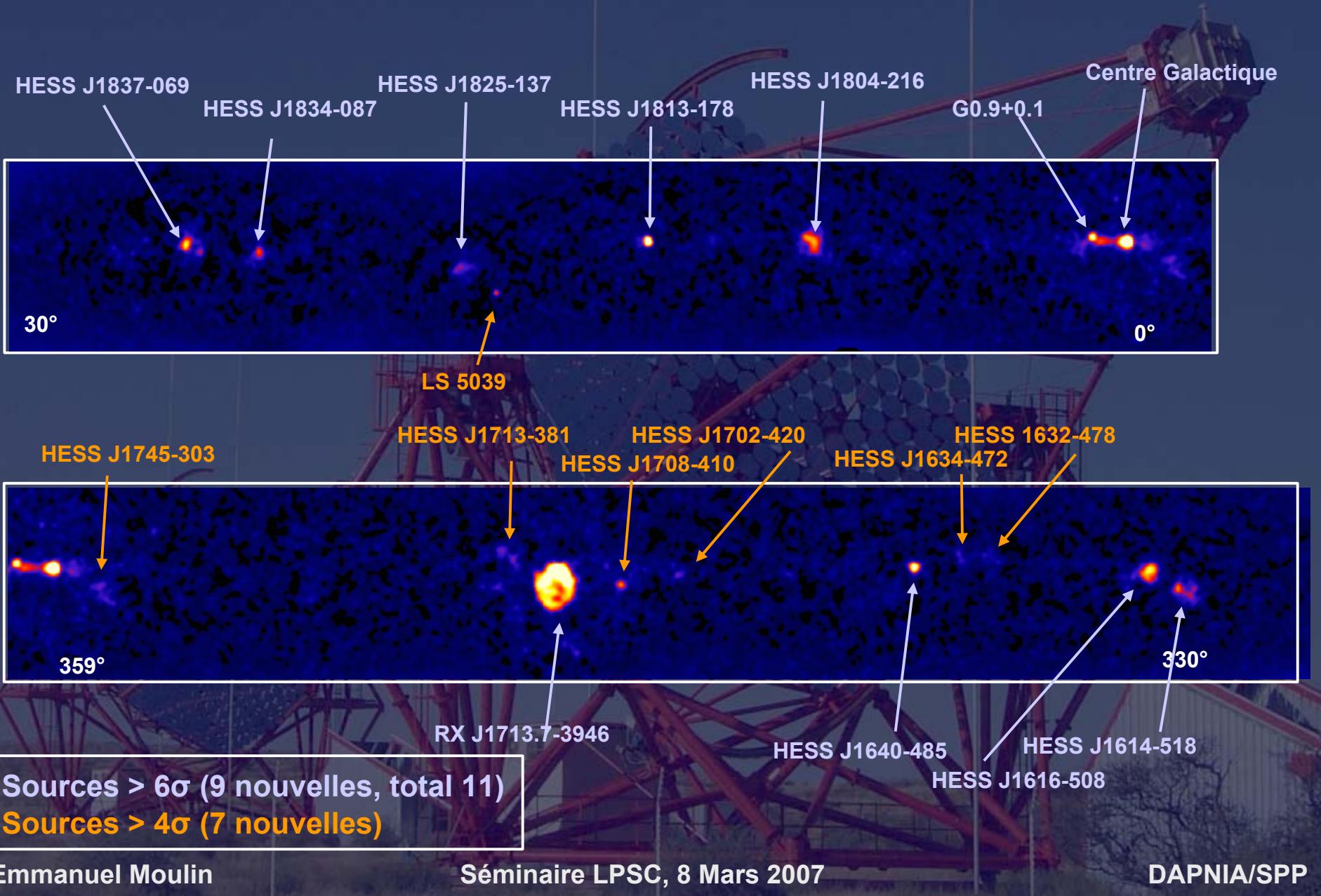


# Une nouvelle astronomie

**2005**

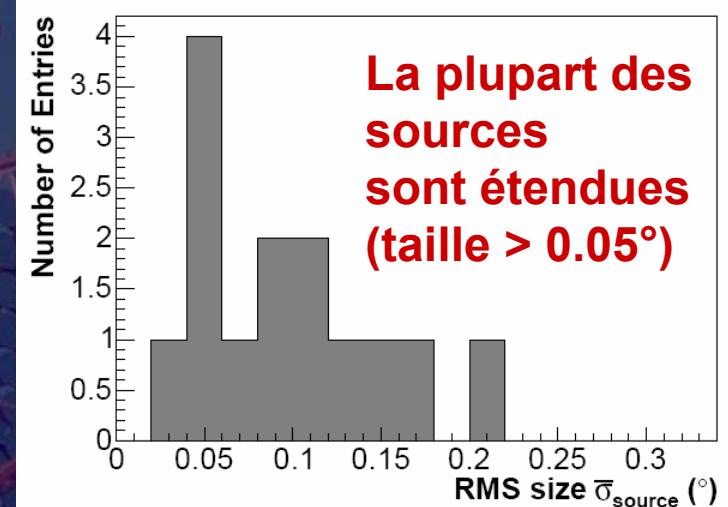


# Plan galactique : nouvelles sources

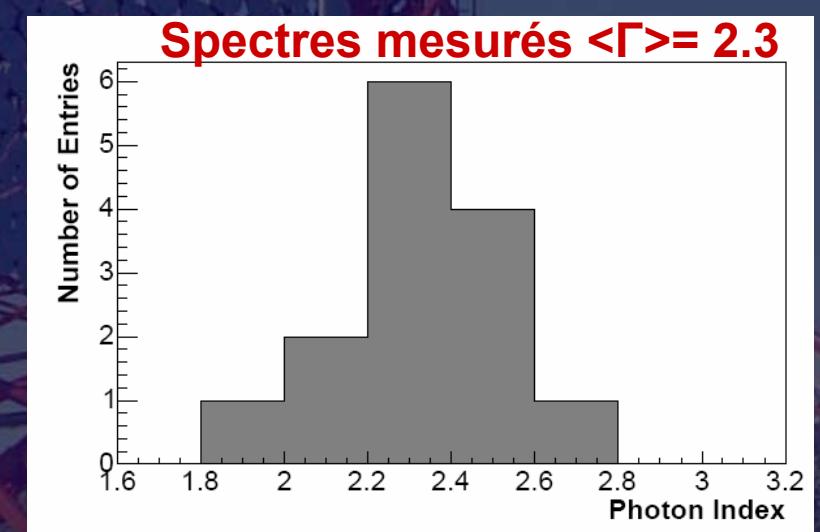


# Caractéristiques générales des sources détectées

Nom	Indice spectral	Flux > 200 GeV ( $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
HESS J1614-518	$2.46 \pm 0.20$	$57.8 \pm 7.7$
HESS J1616-508	$2.35 \pm 0.06$	$43.3 \pm 2.0$
HESS J1632-478	$2.12 \pm 0.20$	$28.7 \pm 5.3$
HESS J1634-472	$2.38 \pm 0.27$	$13.4 \pm 2.6$
HESS J1640-465	$2.42 \pm 0.15$	$20.9 \pm 2.2$
HESS J1702-420	$2.31 \pm 0.15$	$15.9 \pm 1.8$
HESS J1708-410	$2.34 \pm 0.11$	$8.8 \pm 0.7$
HESS J1713-381	$2.27 \pm 0.48$	$4.2 \pm 1.5$
HESS J1745-303	$1.82 \pm 0.29$	$11.2 \pm 4.0$
HESS J1804-216	$2.72 \pm 0.06$	$53.2 \pm 2.0$
HESS J1813-178	$2.09 \pm 0.08$	$14.2 \pm 1.1$
HESS J1825-137	$2.46 \pm 0.08$	$39.4 \pm 2.2$
HESS J1834-087	$2.45 \pm 0.16$	$18.7 \pm 2.0$
HESS J1837-069	$2.27 \pm 0.06$	$30.4 \pm 1.6$



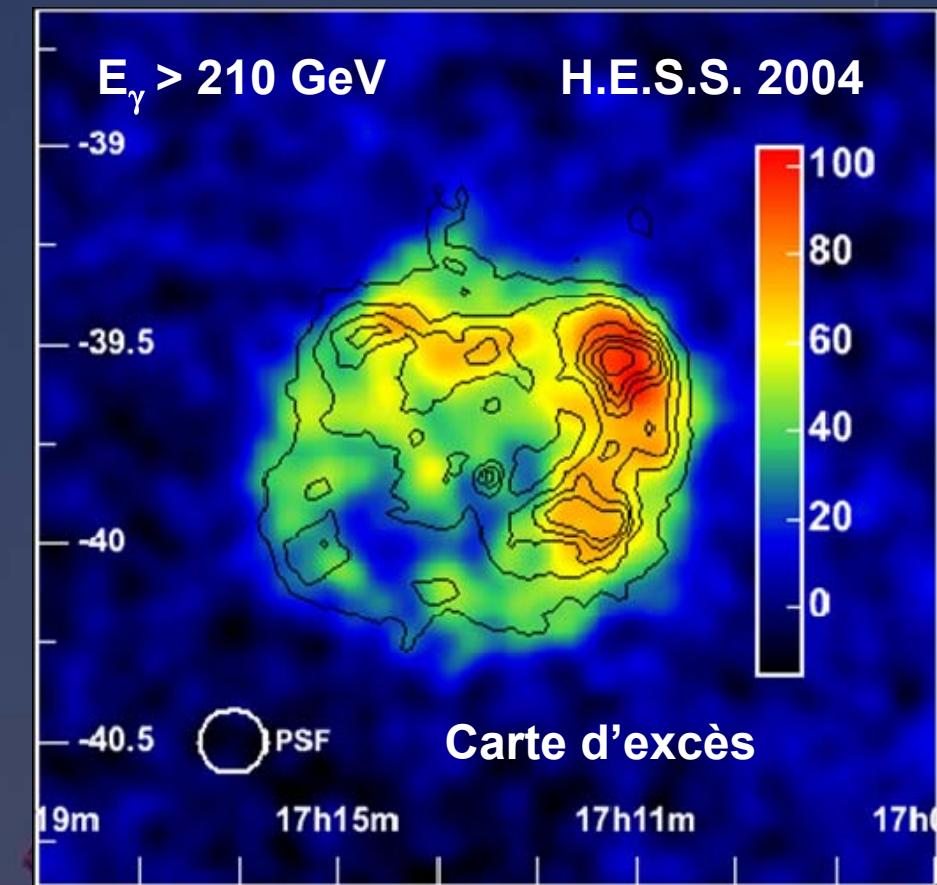
La plupart des sources sont étendues (taille > 0.05°)



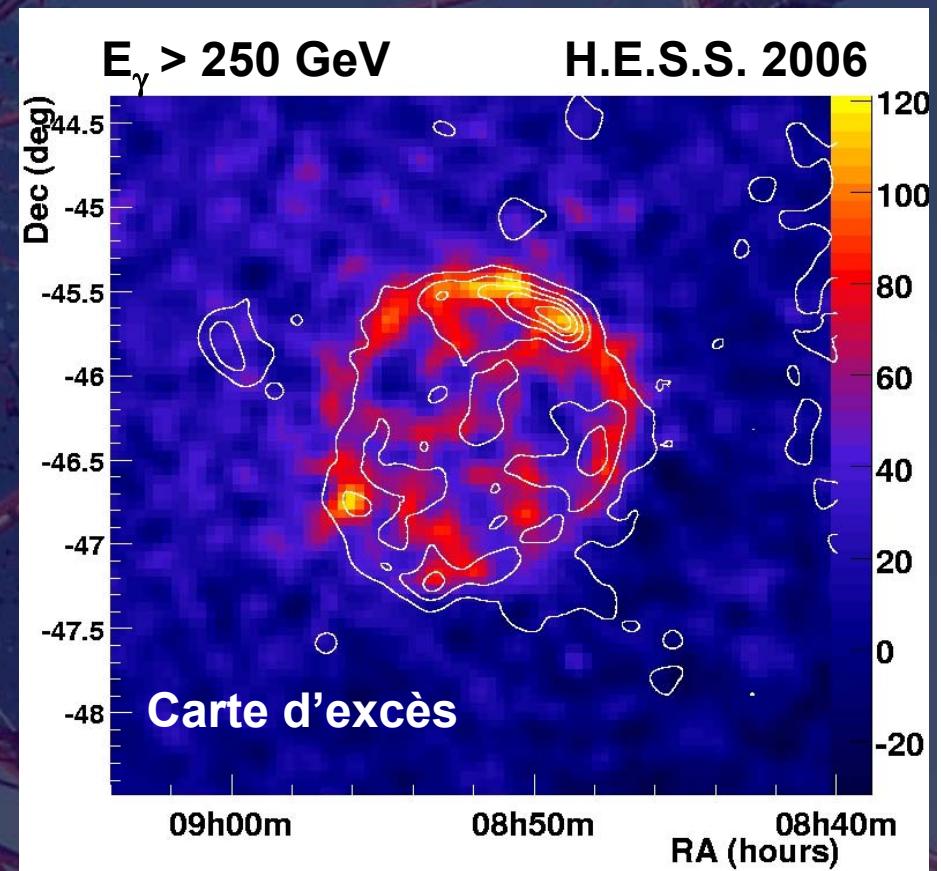
Spectres mesurés  $\langle \Gamma \rangle = 2.3$

# Restes de supernovae en coquille

RX J1713.7-3946



RX J0852.0-4622

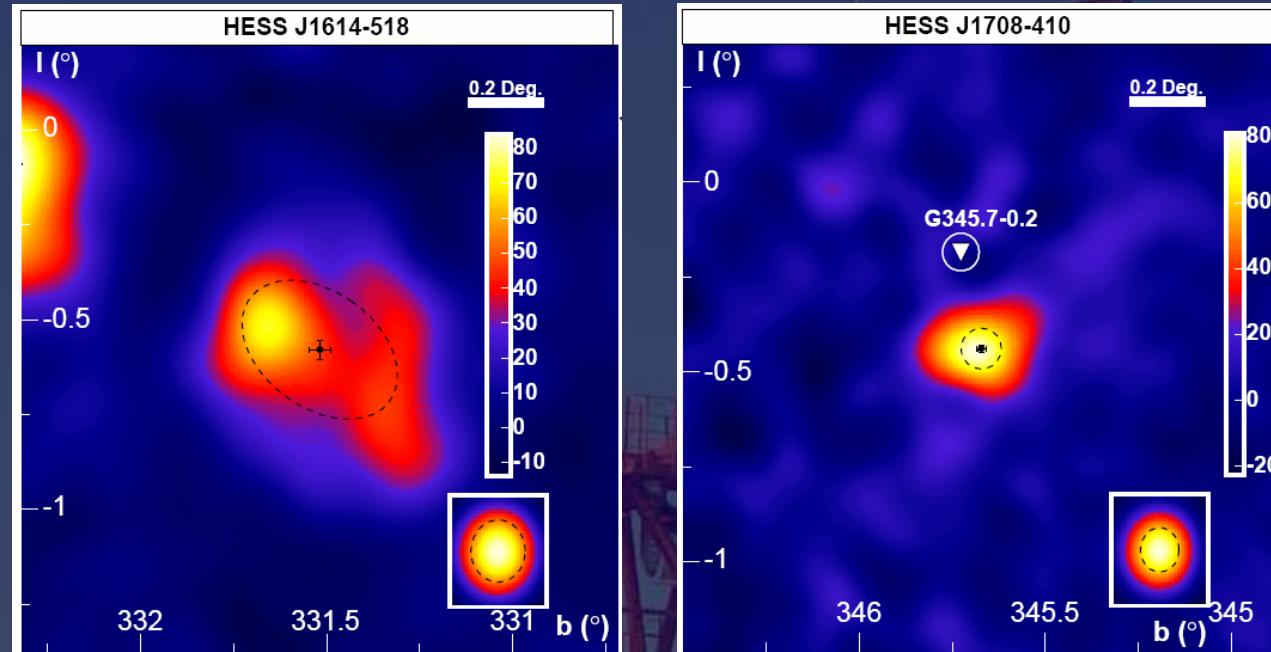


**Forte corrélation X - gamma**

**Particules accélérées jusqu'à au moins 100 TeV dans les coquilles**

# Sources étendues sans contreparties

## Cartes d'événements



- étendues :  $\sigma > 0.12^\circ$
- spectre dur :  $\Gamma \approx 2.2$
- émission stable

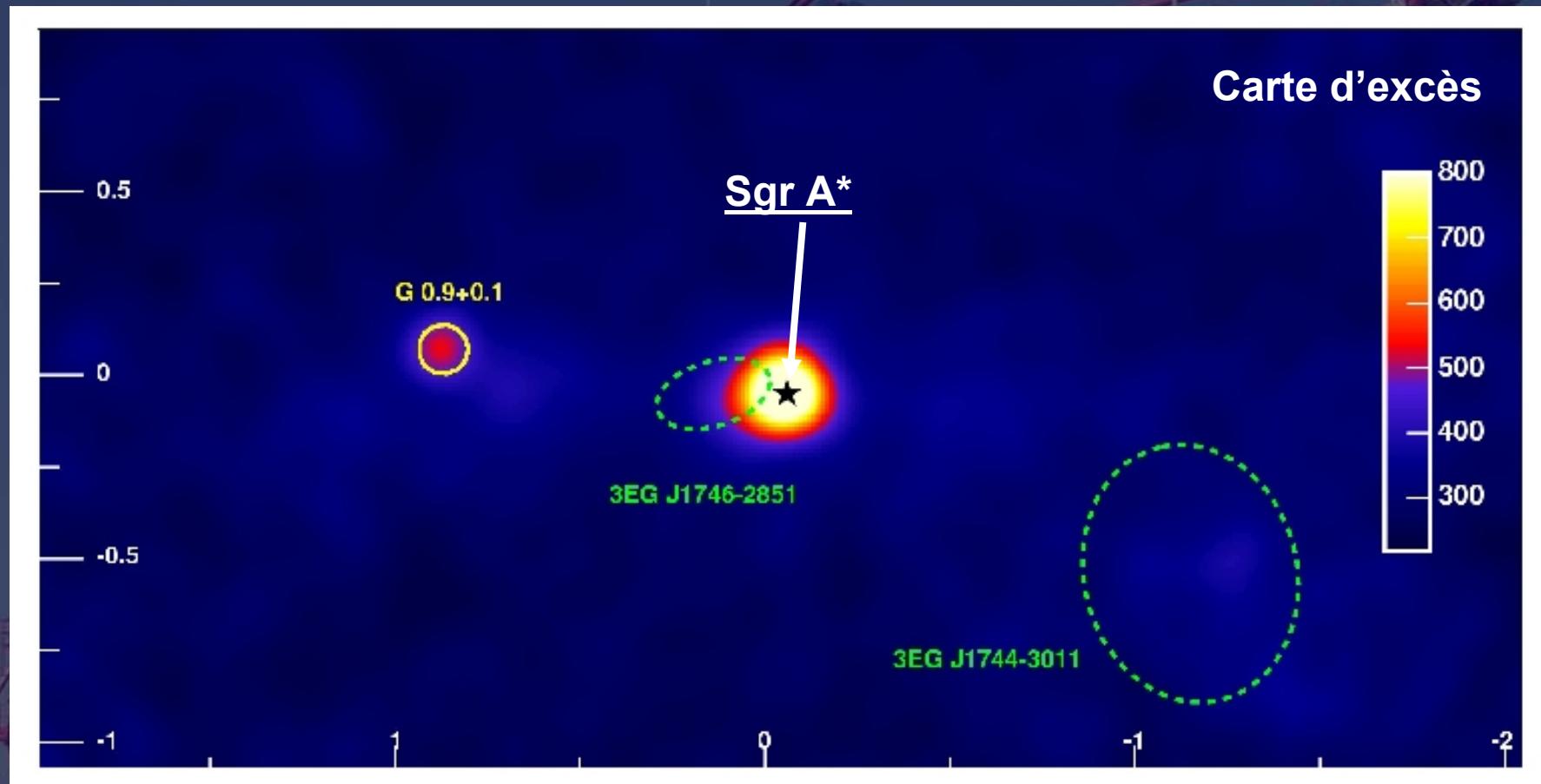
Quatre sources : HESS J1303-631, HESS J1616-508  
HESS J1708-410, HESS J1702-420

D'autres à venir...

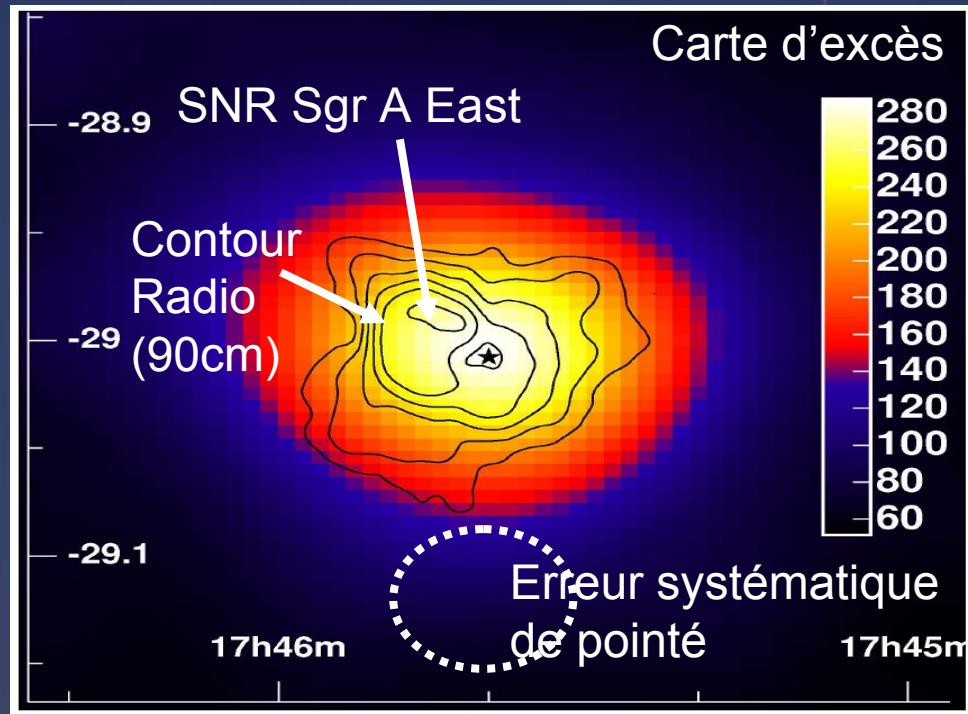
Sources non identifiées ...

Quelle est leur nature? Accélèrent-elles des électrons ou des hadrons ?

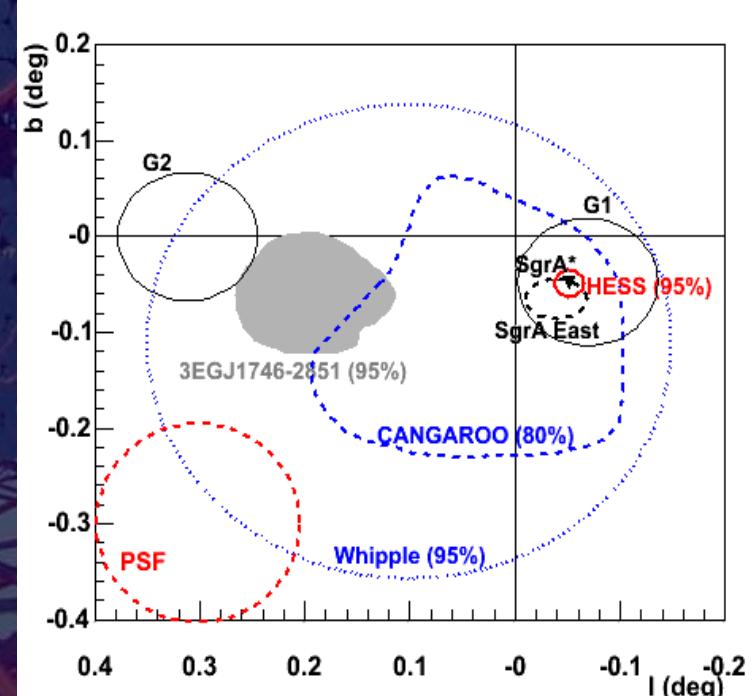
# La région du Centre Galactique vue par H.E.S.S.



# La source centrale : HESS J1745-290



12h (2003, 2 télescopes)  
+ 50h (2004, 4 télescopes)

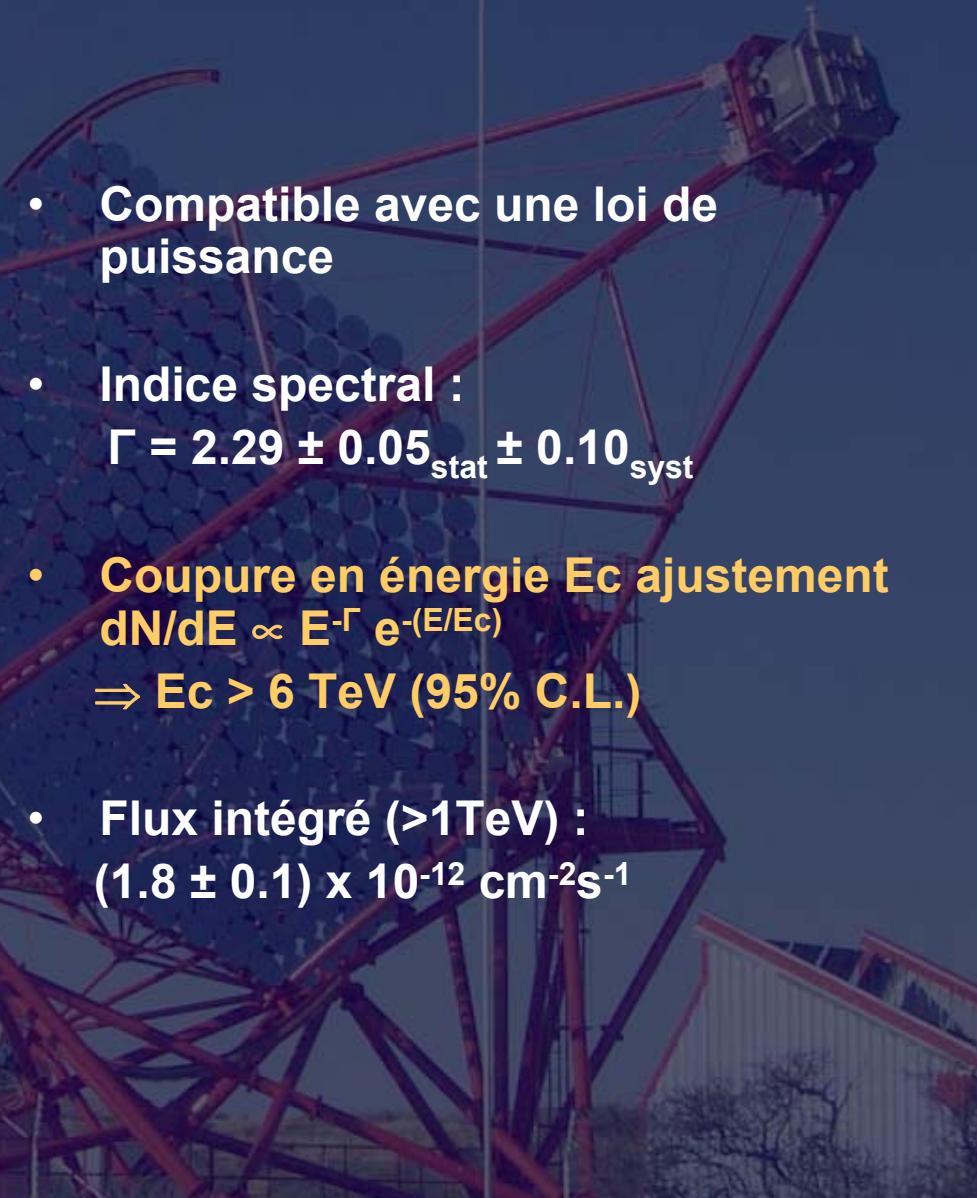
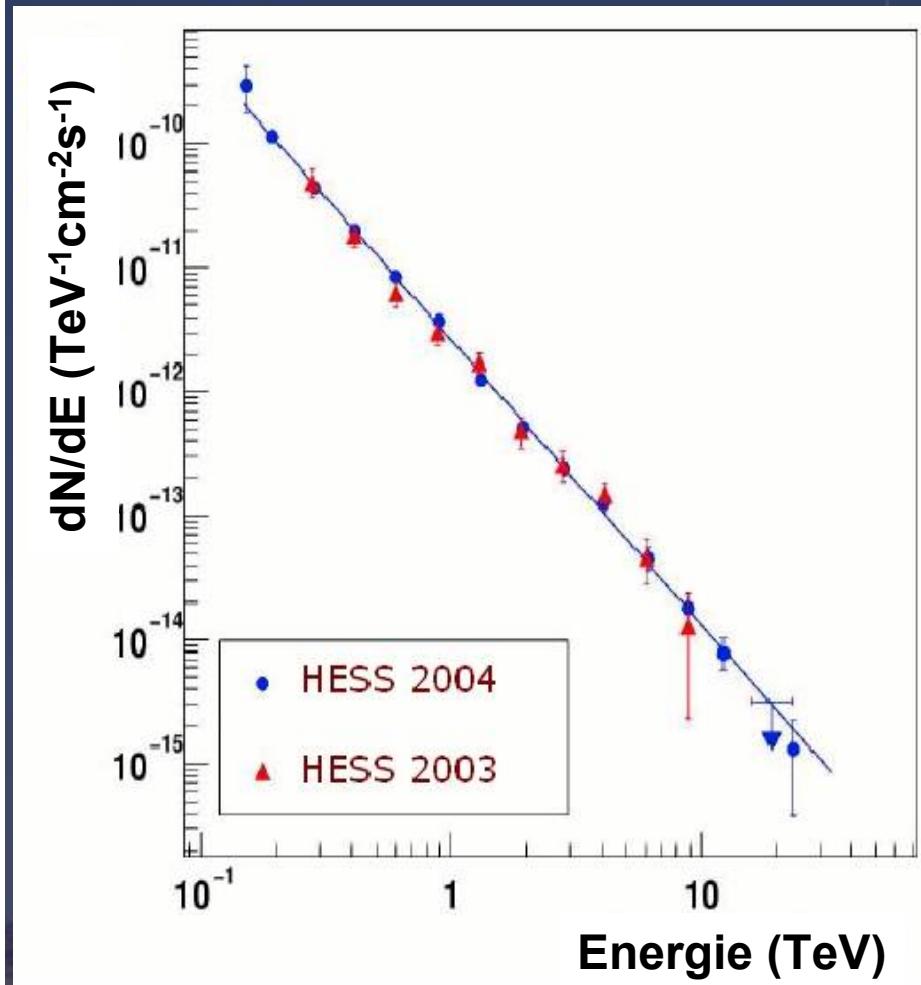


## Candidats astrophysiques :

- Trou noir Sgr A\* ( $3 \times 10^6$  MSun)
  - chocs dans le disque d'accréation
- Vestige de supernova Sgr A East
  - ondes de chocs en expansion
  - découverte d'un plérion

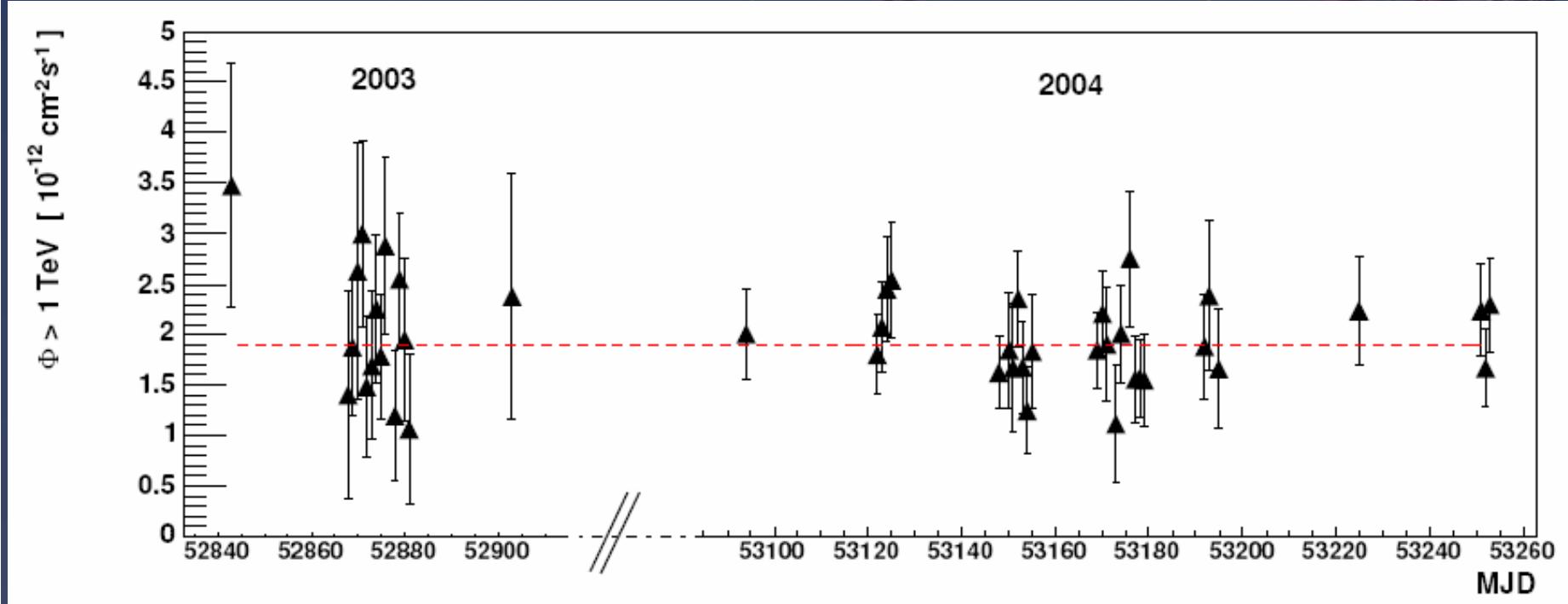
## Annihilation de Matière Noire?

# HESS J1745-290 : spectre en énergie



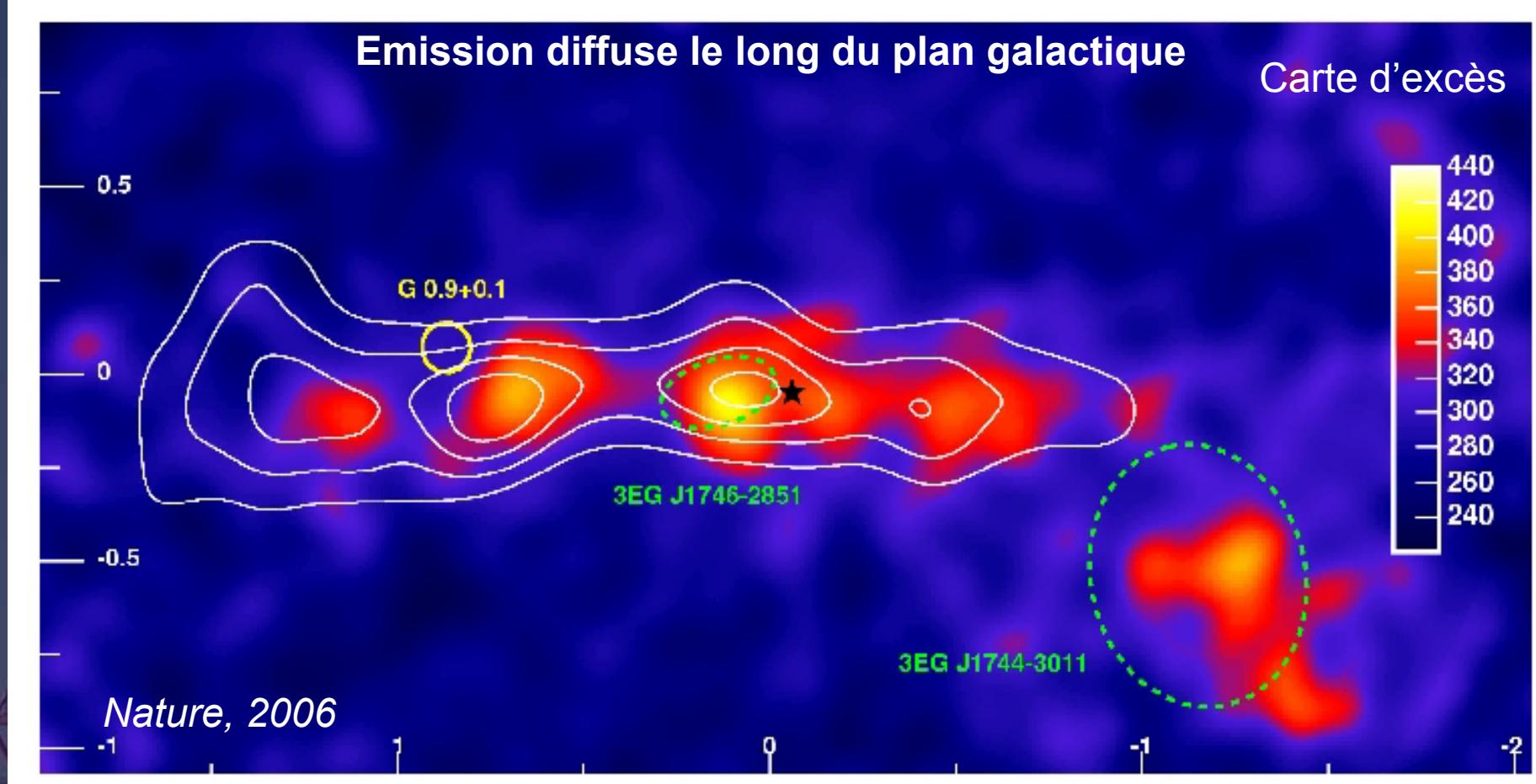
- Compatible avec une loi de puissance
- Indice spectral :  
 $\Gamma = 2.29 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}}$
- Coupure en énergie  $E_c$  ajustement  
 $dN/dE \propto E^{-\Gamma} e^{-(E/E_c)}$   
 $\Rightarrow E_c > 6 \text{ TeV (95\% C.L.)}$
- Flux intégré ( $> 1 \text{ TeV}$ ) :  
 $(1.8 \pm 0.1) \times 10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

# Variabilité de HESS J1745-290 ?

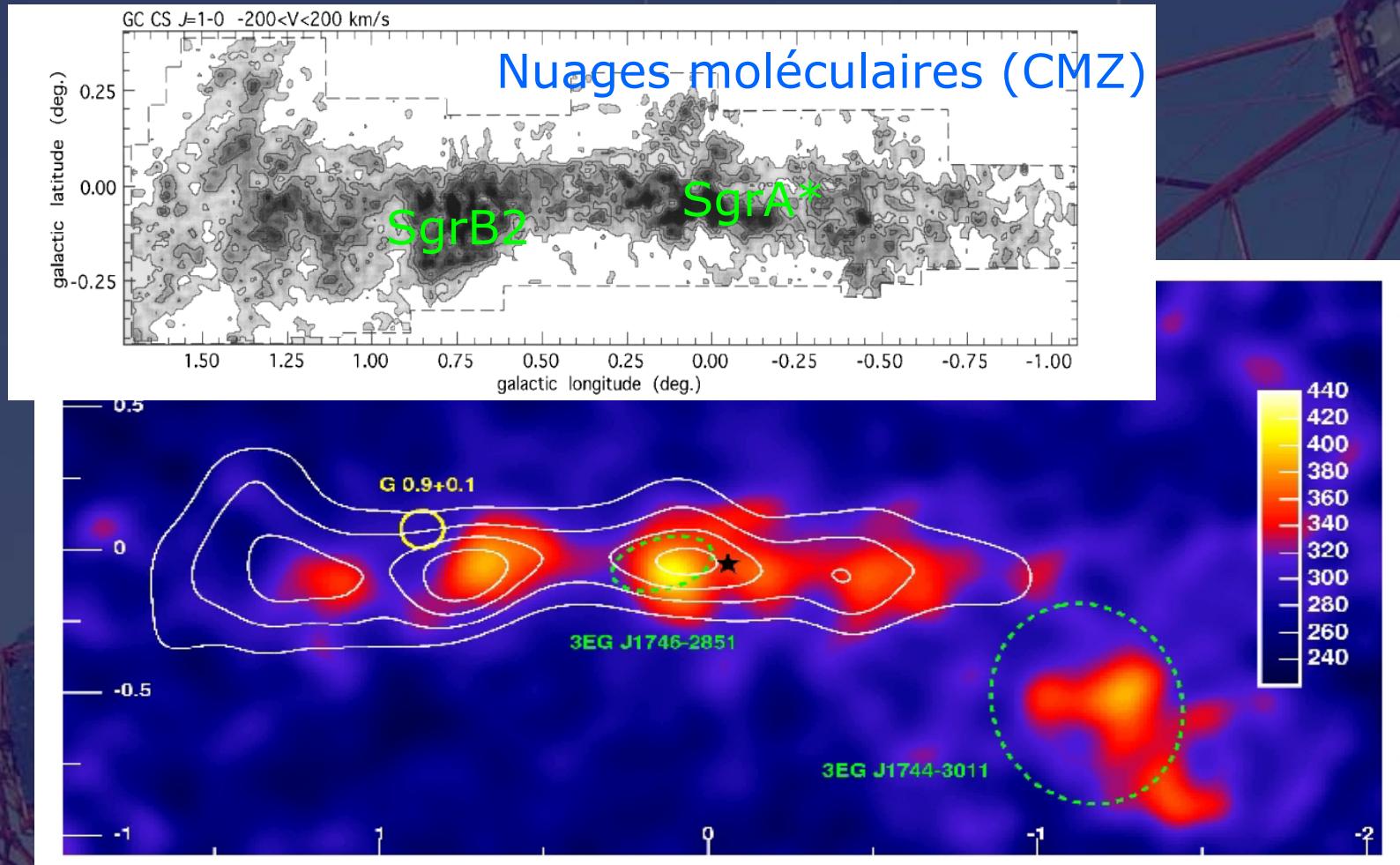


- flux  $\sim 1$  photon/mn
- pas de variabilité significative (10 mn  $\rightarrow$  1 an)

# Emission diffuse dans la région du CG

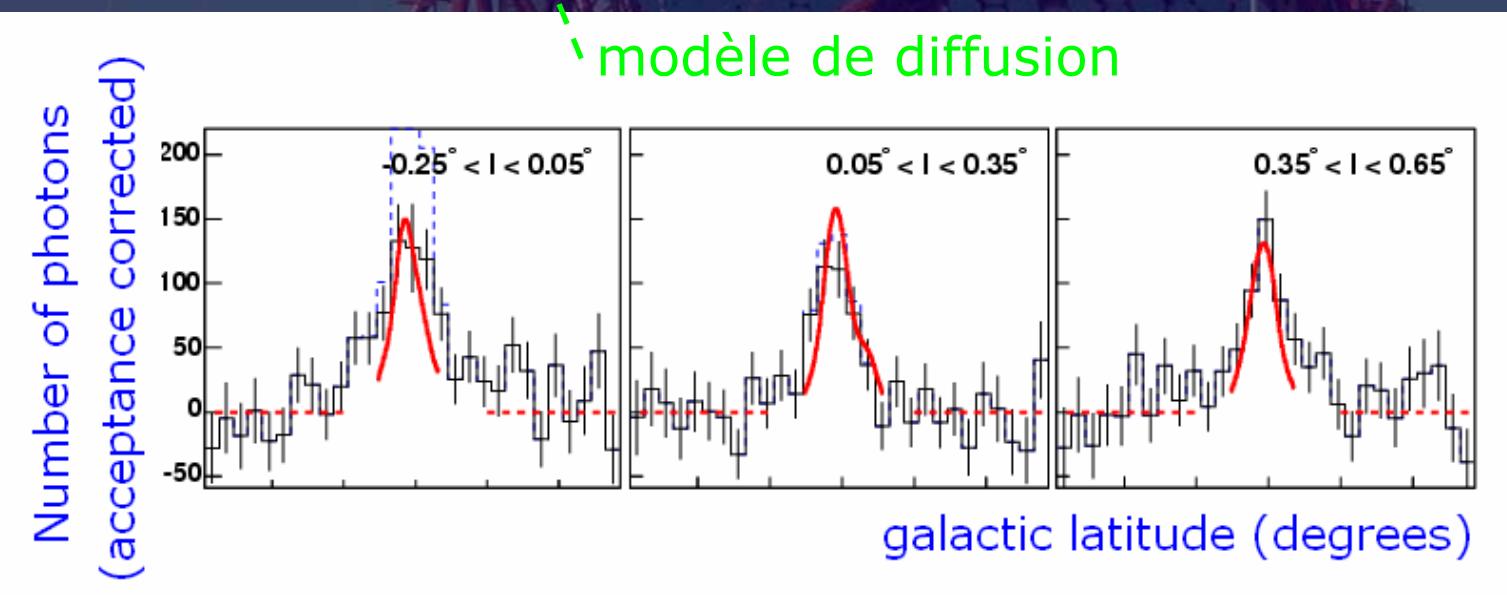
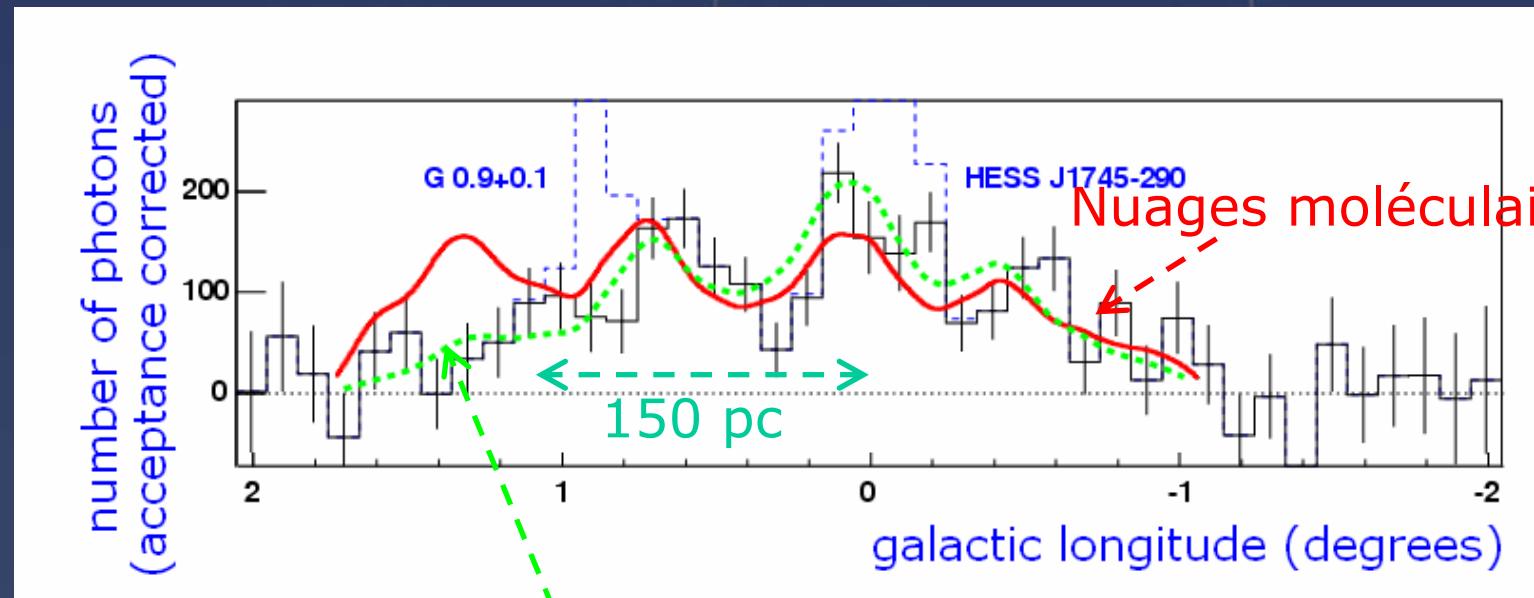


# Corrélation avec les nuages moléculaires

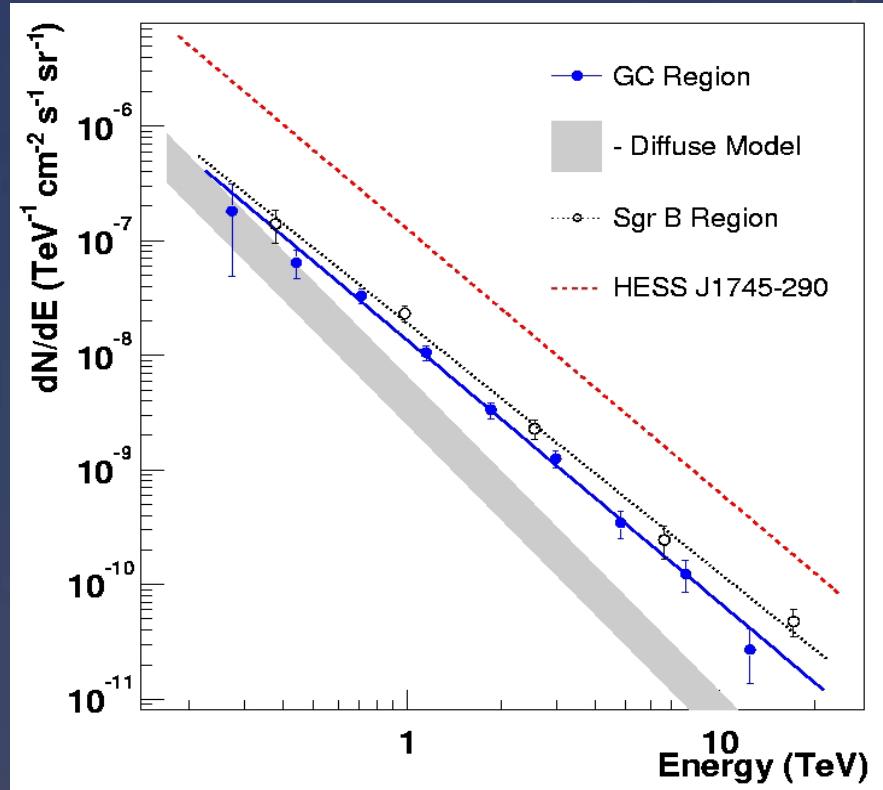


- Corrélation avec la densité de nuages moléculaires sur  $\sim 2^\circ$  ( $\sim 150$  pc)  
 $\Rightarrow$  Trace la présence de RCs hadroniques !

# Corrélation avec les nuages moléculaires



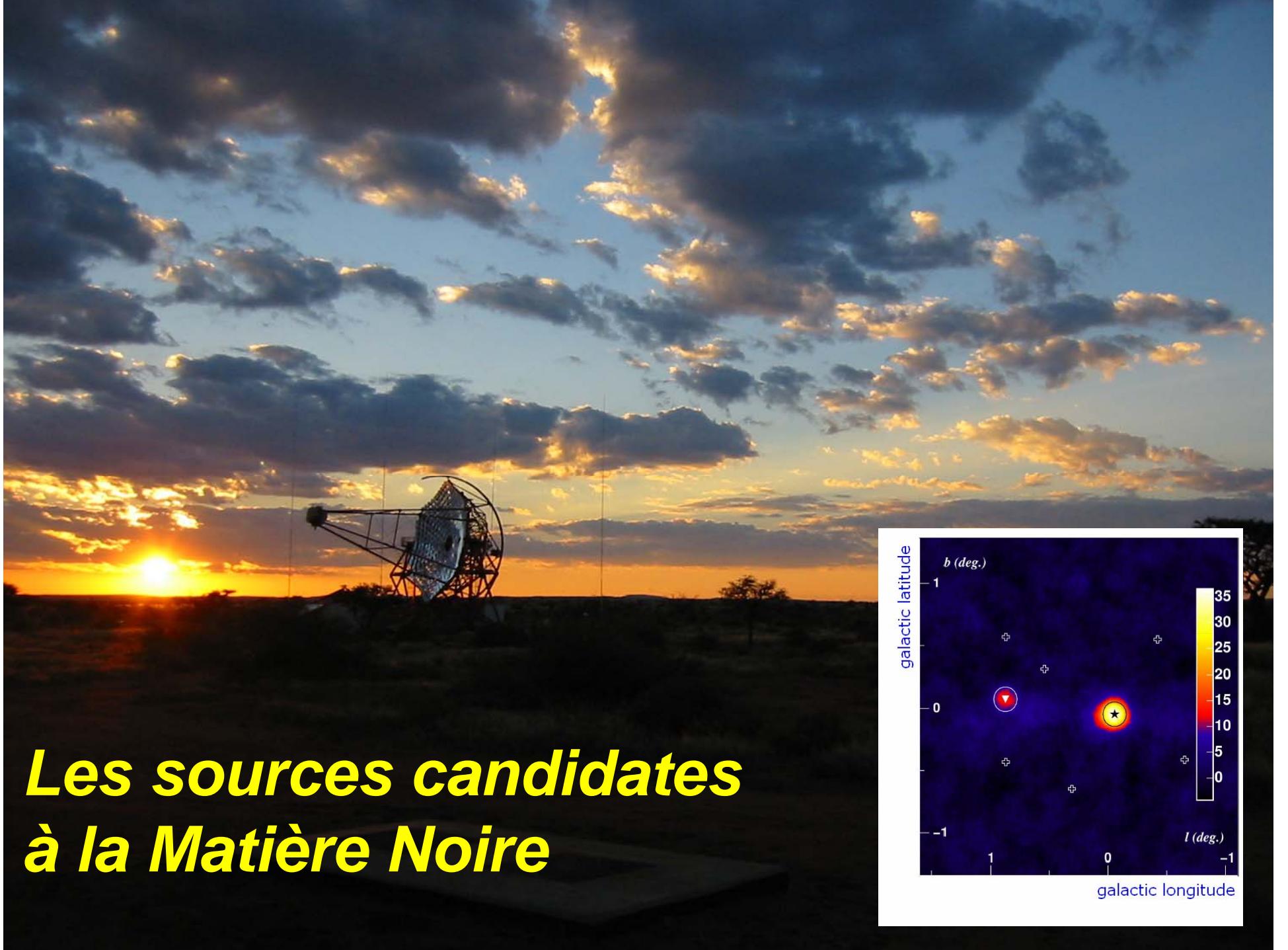
# Spectre de l'émission diffuse



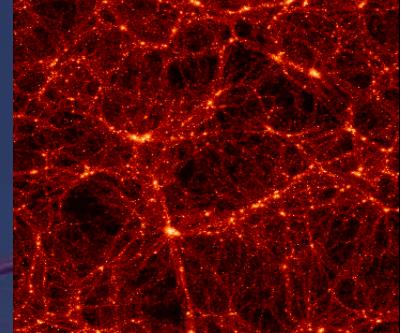
## Discussion

- **Interaction de protons diffus ?**
  - spectre des protons plus dur que le spectre local  
⇒ source de RCs proche
  - temps de diffusion sur 150 pc  $\sim$  10 000 ans  
⇒ âge du reste de supernova Sgr A East
- **Somme de sources d'électrons ?**
  - taille typique des plérions :  $\sim$  5'  
⇒  $\sim$  100 plérions
  - non détectés en X  
⇒ improbable!





# Interprétation Matière Noire



Flux gamma prédict par l'annihilation de WIMPs :

$$\frac{d\Phi_\gamma(\Delta\Omega, E)}{dE} = F_0 \frac{dN_\gamma}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{\langle \sigma v \rangle_{ref}} \left( \frac{1 \text{ TeV}}{m_{DM}} \right)^2 \frac{1}{\Delta\Omega} \int_{\Delta\Omega} d\Omega \int_{l.o.s} \rho^2(r[s]) ds$$

Acceptance angulaire

Résolution angulaire de HESS :  $\Delta\Omega = 2 \times 10^{-5} \text{ sr}$

## Physique des particules :

- spectre d'annihilation de neutralinos :
  - lignes gamma supprimées
  - continuum provenant de l'hadronisation des  $W^\pm, Z, b, \bar{b}$
- annihilation de LKP (Kaluza-Klein) :  
continuum provenant des leptons chargés et quarks (Servant & Tait, 2003)

Emmanuel Moulin

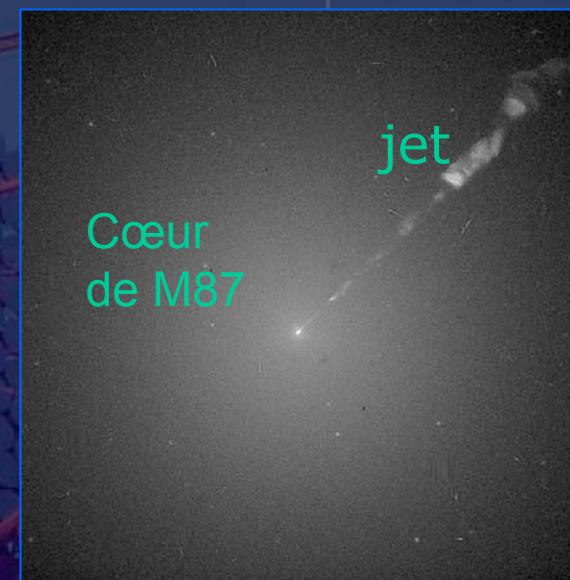
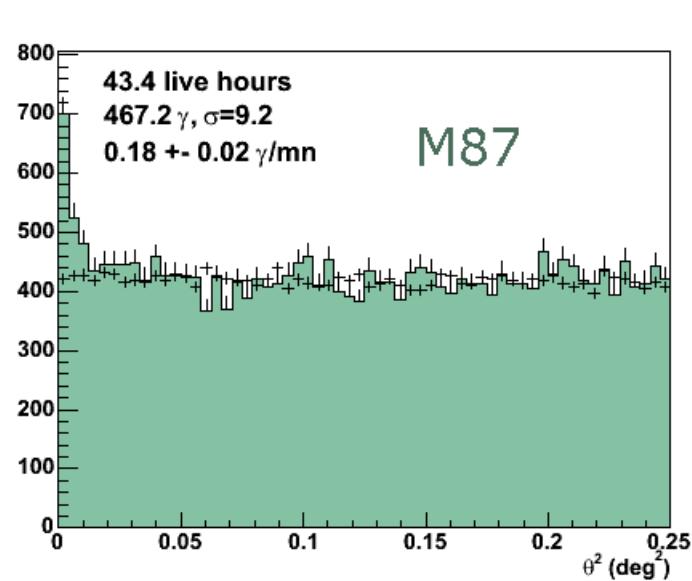
## Astrophysique :

Halo de MN  
profile de densité

Séminaire LPSC, 8 Mars 2007

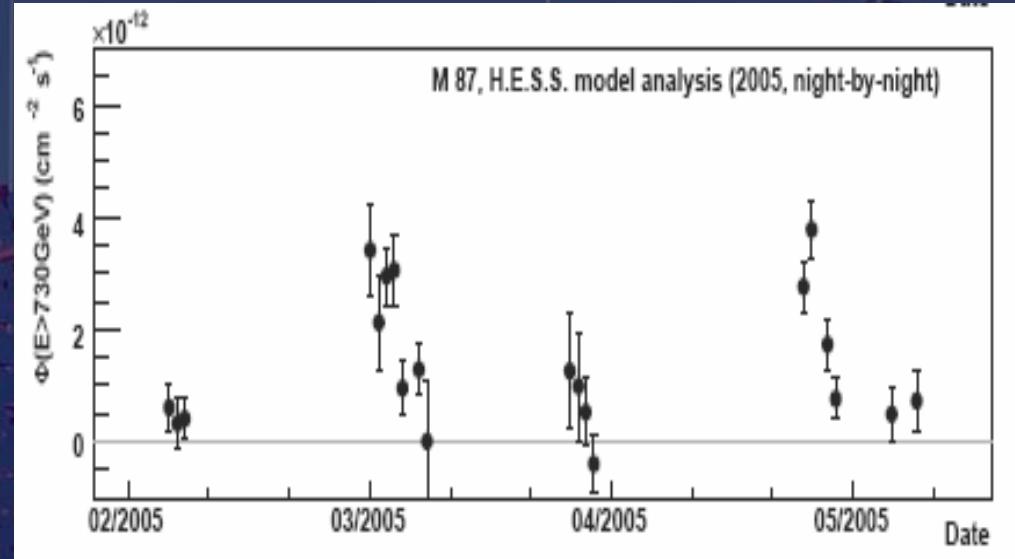
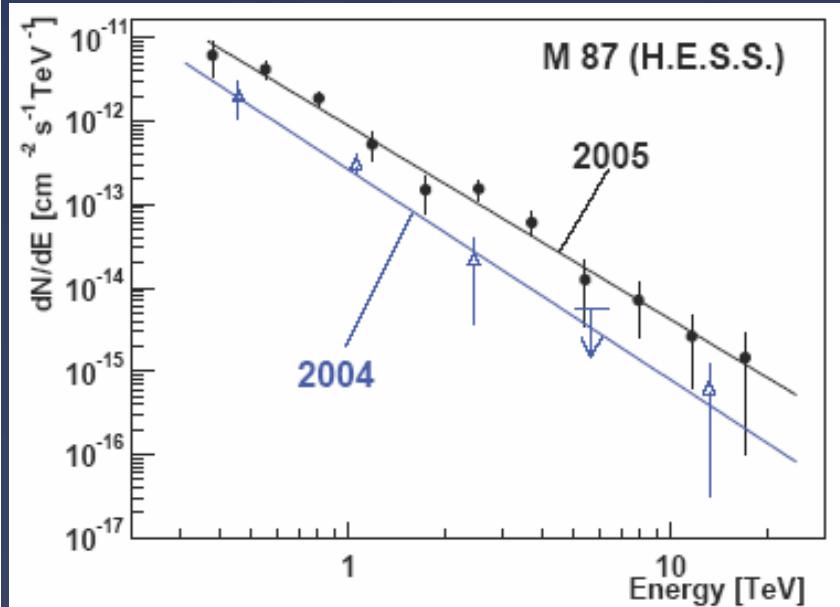
DAPNIA/SPP

# M 87 (Virgo)



- Axe du jet (20-40 deg) de la ligne de vue
- Emission au TeV détectée pour la fois par HEGRA (2003).
- Position compatible avec la position du coeur
- $F(>730 \text{ GeV}) \sim 2 \cdot 10^{-13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

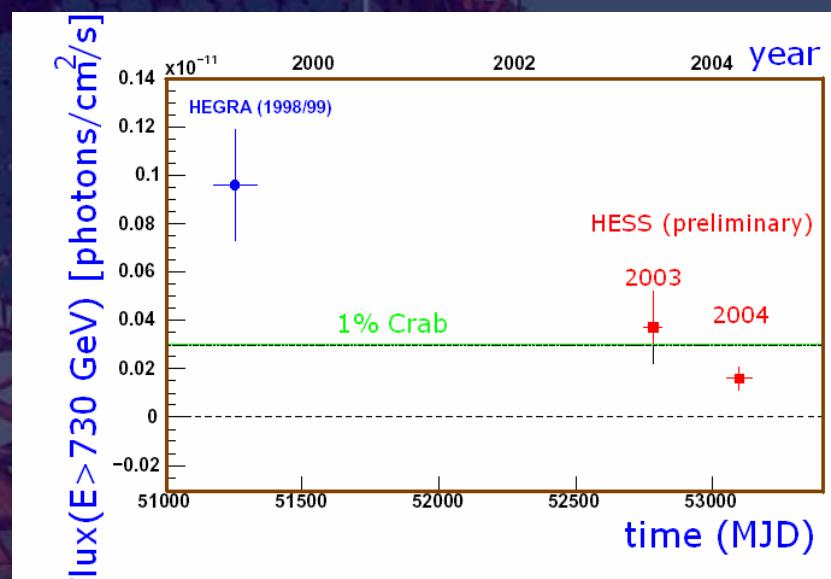
# Matière noire au TeV en provenance de M87 ?



- Prédictions Matière Noire :  
 $F(E > 730 \text{ GeV}) \sim 10^{-16} \text{ ph/cm}^2/\text{s}$   
 (avec  $M_c = 1 \text{ TeV}$ ,  $cc \rightarrow W/H$ ,  
 $\langle \sigma v \rangle = 2 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$   
 et profil de Moore optimiste  
*(Fornengo et al 2004)*) ,  
**1000 fois plus faible que le signal observé!**
- Indication de variabilité à grande/courte période

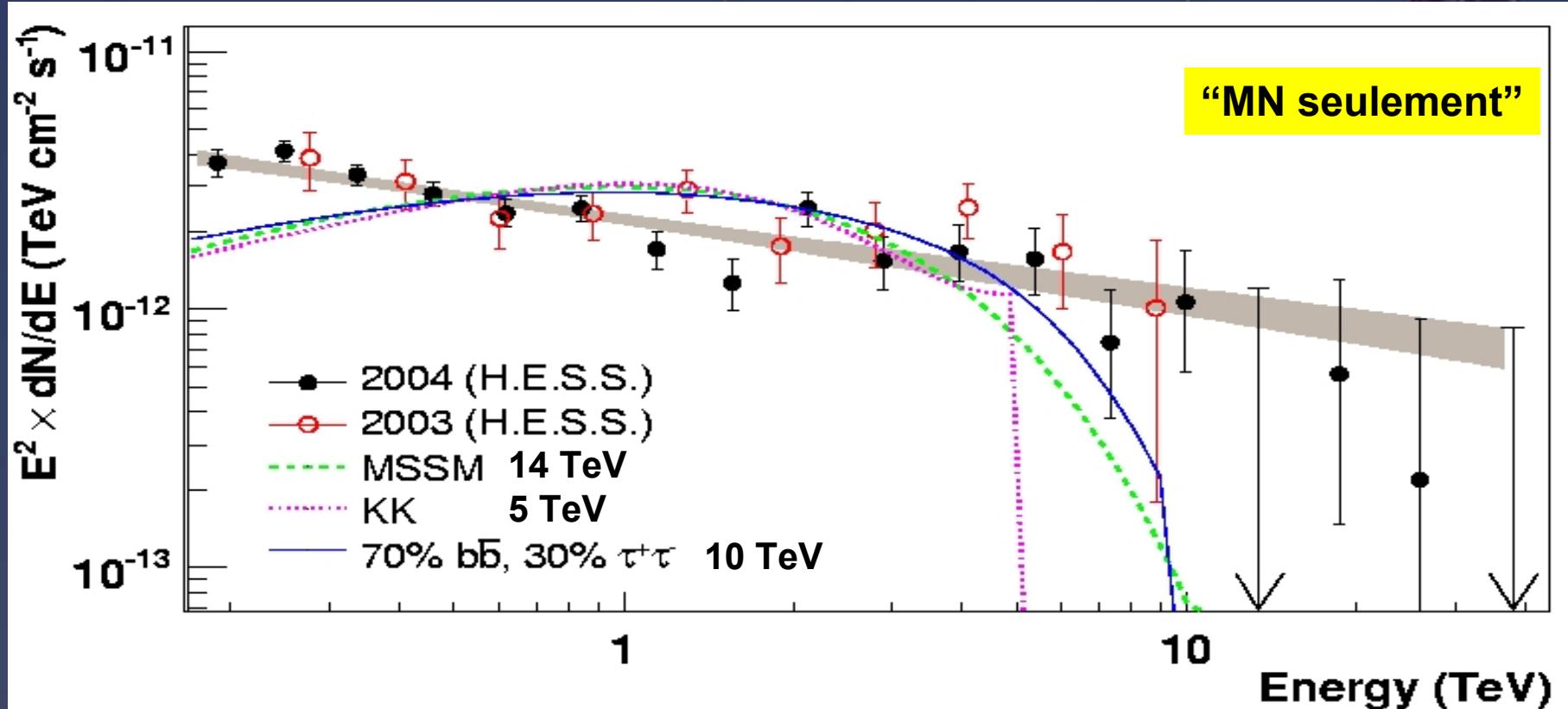
Emmanuel Moulin

Séminaire LPSC, 8 Mars 2007



DAPNIA/SPP

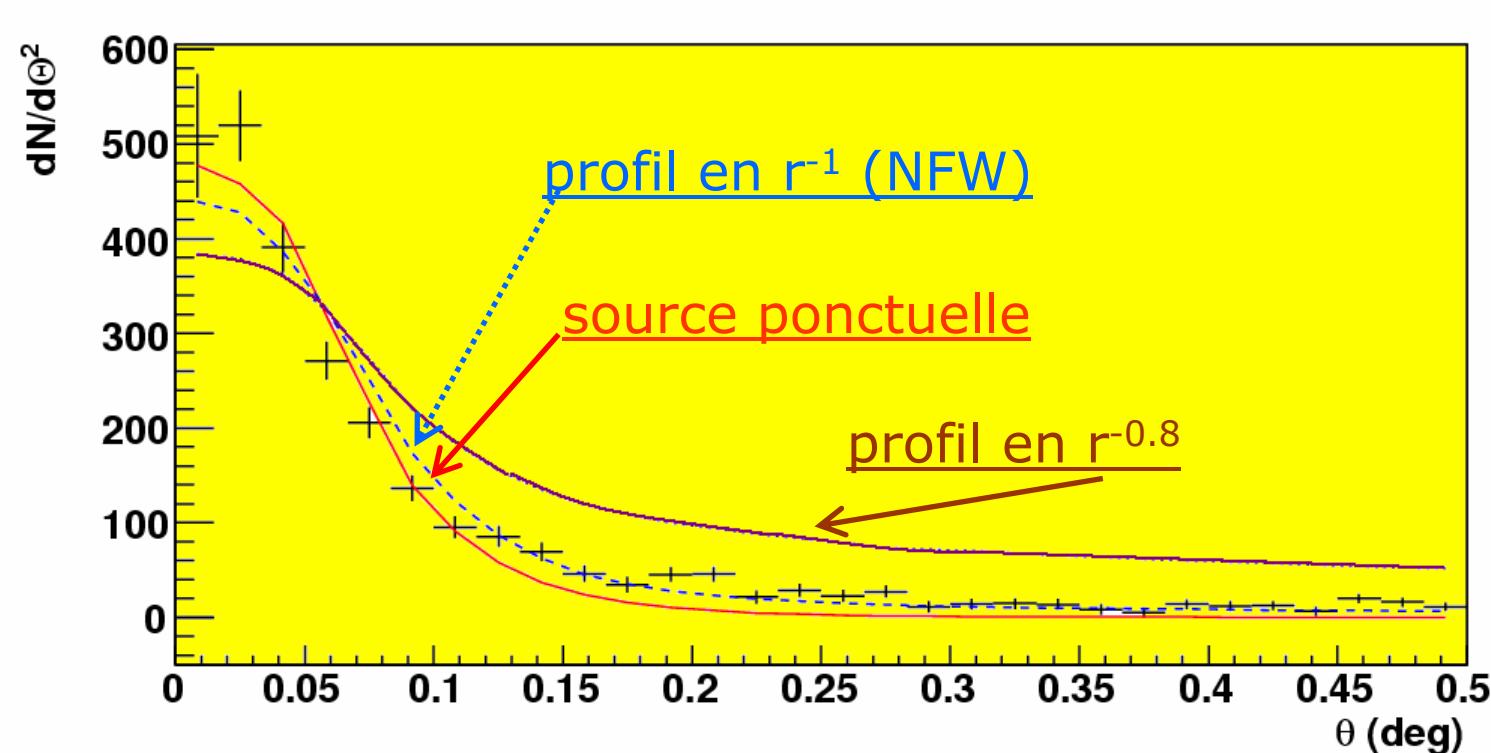
# Matière noire en provenance de HESS J1745-290 ?



## Données 2004 :

- Spectre en loi de puissance :  $\Gamma = 2.29 \pm 0.09 \pm 0.15$
- Limite sur la coupure exponentielle :  $E_{\text{cut}} > 6 \text{TeV}$  (95% C.L.)
- ⇒ WIMPs lourds nécessaires, difficile à prédire théoriquement
- ⇒ Données à basses énergies mal ajustées

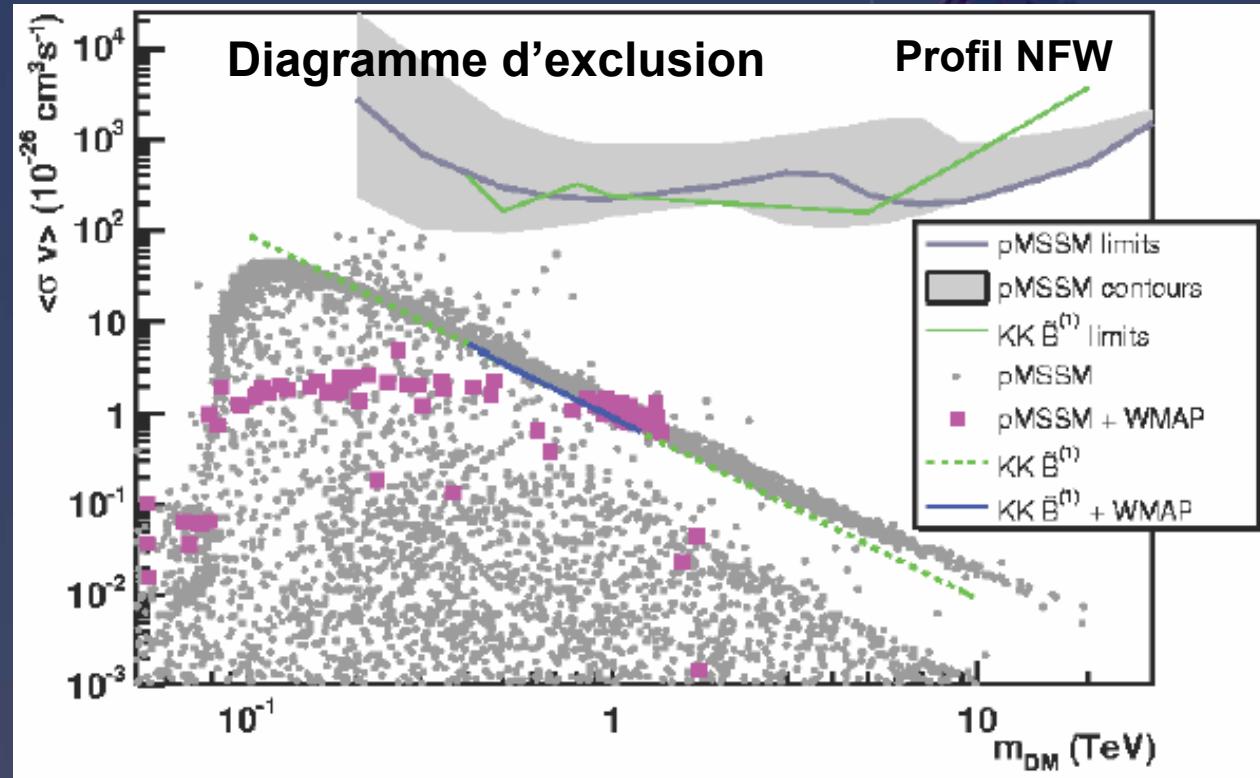
# Morphologie de HESS J1745-290



- HESS J1745-290 apparemment non ponctuelle
- meilleur ajustement: profil NFW (convolué par la PSF de H.E.S.S.)
- contamination du fond diffus ?

# HESS J1745-290 : contraintes sur la matière noire

Spectre compatible avec une loi de puissance  $\Rightarrow$  limite sur  $\langle\sigma v\rangle$



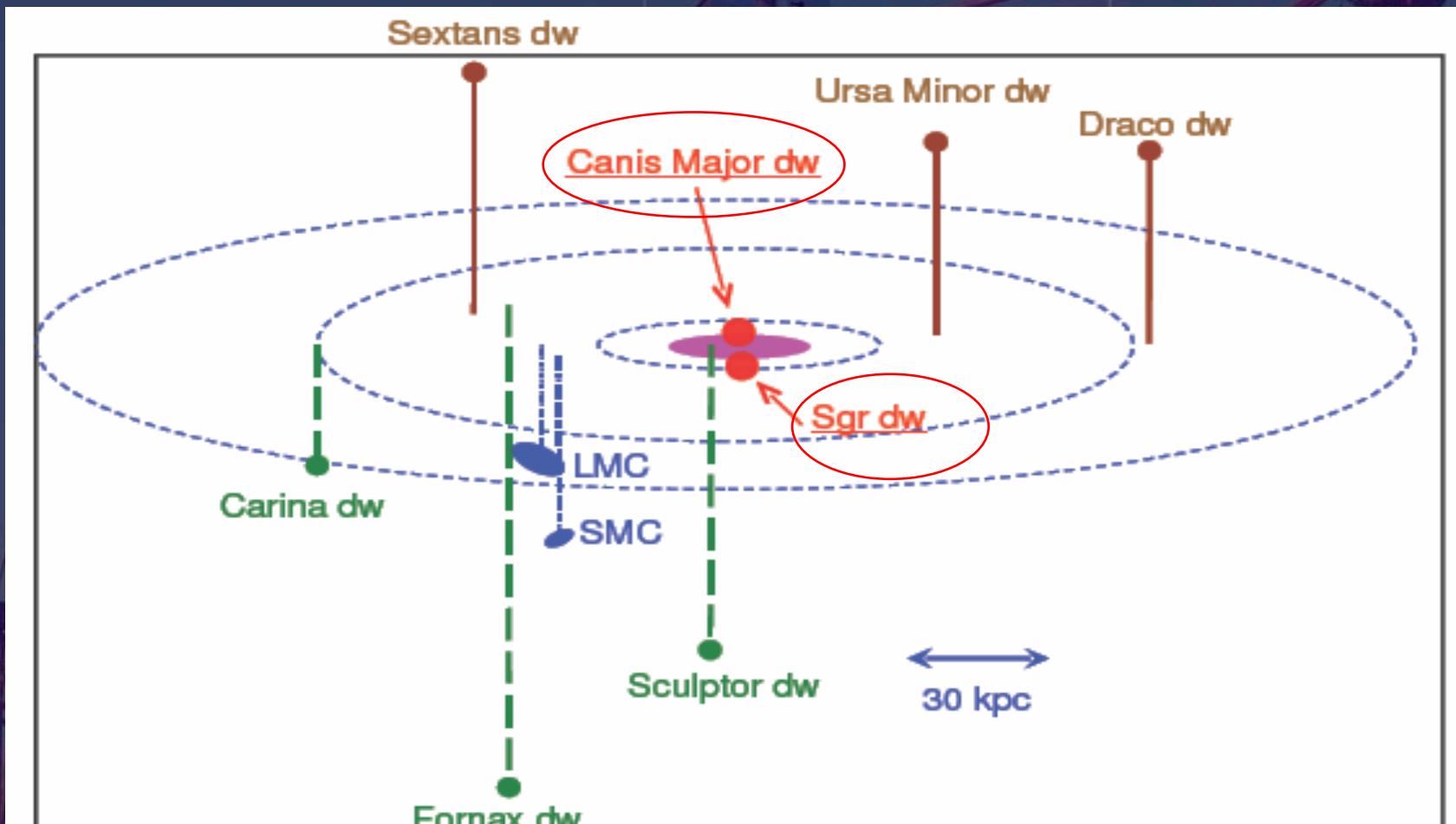
prédictions pMSSM DarkSUSY4.1

- Annihilation MN seulement  $\Rightarrow \Phi_{GC}^{DM} \sim 38 \text{ g/hr}$
- Ann. MN + fond astrophysique  $\Rightarrow \Phi_{GC}^{DM} < 2-4 \text{ g/hr}$

- Temps d'observation  
48.7 hr  
 $\sim 1860 \gamma$   
 $\sim 1700$  fond
- Bruit de fond diffus autour de la source  $\Rightarrow$  pas de contrainte sur la forme du halo
- Limite pMSSM :  
 $\langle\sigma v\rangle \leq (1-10) 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$
- Limite KK:  
 $\langle\sigma v\rangle \leq 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{s}^{-1}$

# Autres sources potentielles ?

Galaxies satellites de la Voie Lactée



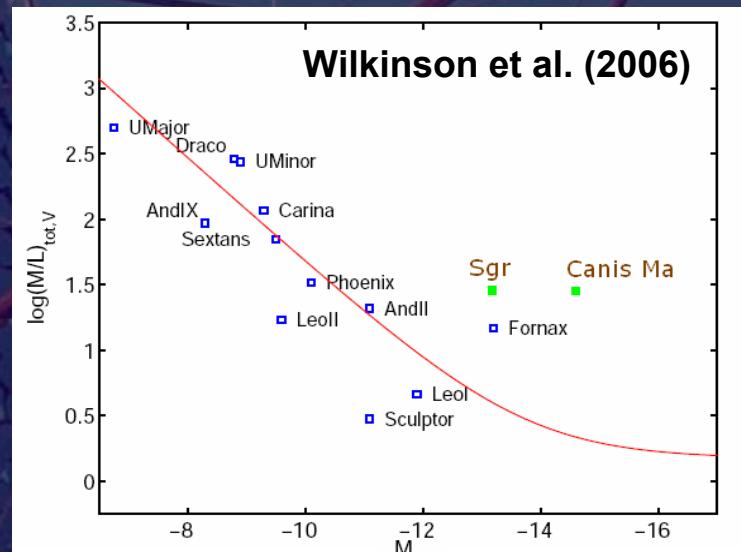
# Les galaxies naines sphéroïdales

- Grand rapport M/L
- Environnement dominé par la matière noire (contrairement au CG)
- Quantités faibles de gaz stellaire et de poussières
- Pas de fond astrophysique  
⇒ fond réduit

Candidats possibles pour H.E.S.S. :

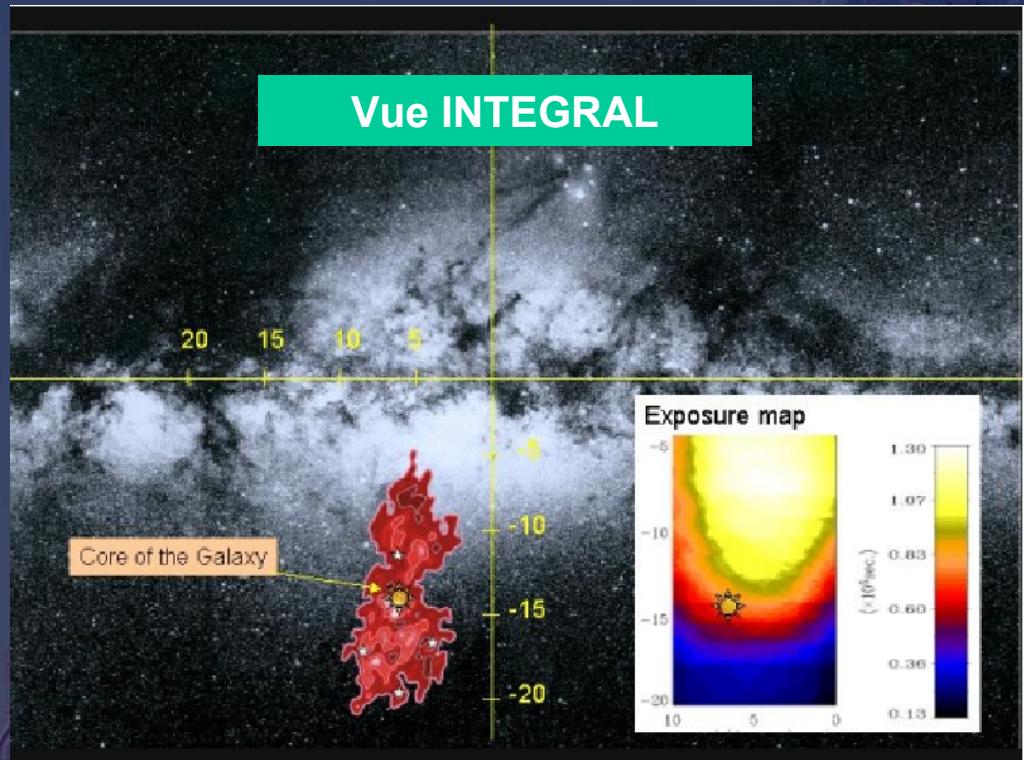
- Sagittarius
- Canis Major
- Fornax

Rapport luminosité sur masse versus magnitudes absolues pour les galaxies naines du Groupe Local



- $\Phi_\gamma \propto M_{\text{dark}}/d^2$
- $M_{\text{dark}} \sim 10^7 M_{\text{solar}}$
- Pour les dSph, d est le paramètre important

# La galaxie naine sphéroïdale du Sagittaire



Observée par H.E.S.S. en Juin 2006 !!

- Masse :  $4.9 \times 10^8 M_{\text{solar}}$
- Position :  $l = 5.6^\circ$   $b = -14.0^\circ$
- Taille :  $3^\circ \times 8^\circ$
- Distance : 25 kpc

- Galaxie sphéroïdale avec noyaux
- Coïncidence en position avec l'amas globulaire M54
- Fort effet de marée
- $M/L > 50$  au moins dans le bord de la galaxie

# Modélisation du halo de matière noire de Sgr

2 composantes dans la partie lumineuse :

- composante compacte : «cusp»

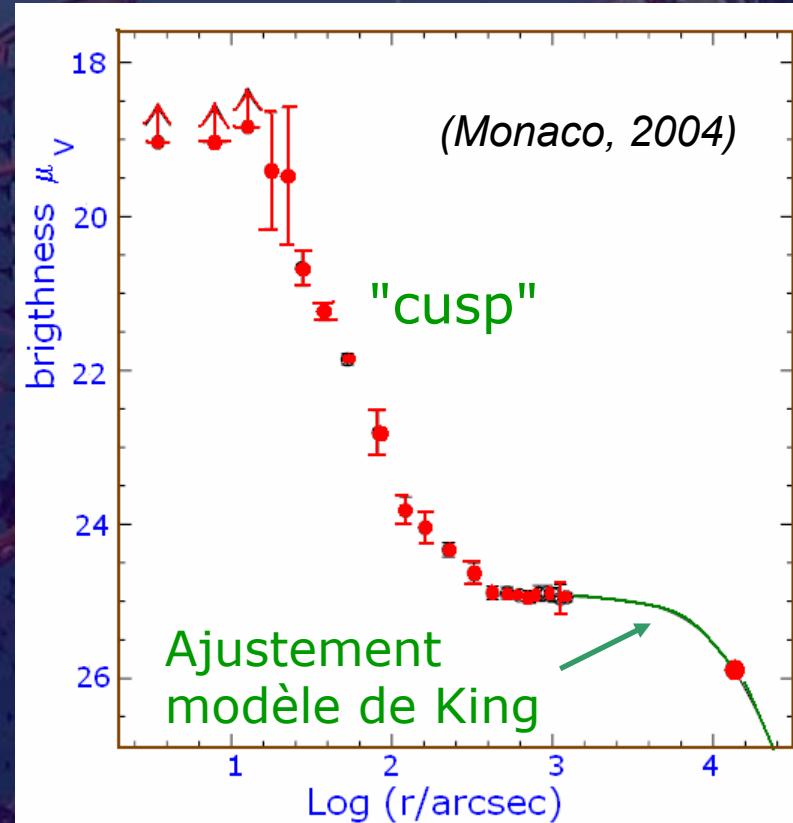
coeur :  $r_c = 1.5$  pc

pente du cusp : 2.68

- composante diffuse :

modèle de King  $r_K = 1.6$  kpc

- dispersion en vitesse plate sur plus de 1°
- $\langle v_r^2 \rangle = (11.4 \text{ km/s})^2$  au centre
- mesure récente  $\langle v_r^2 \rangle = (8 \text{ km/s})^2$  (Saggia, 2005)





*Le futur de  
H.E.S.S.*



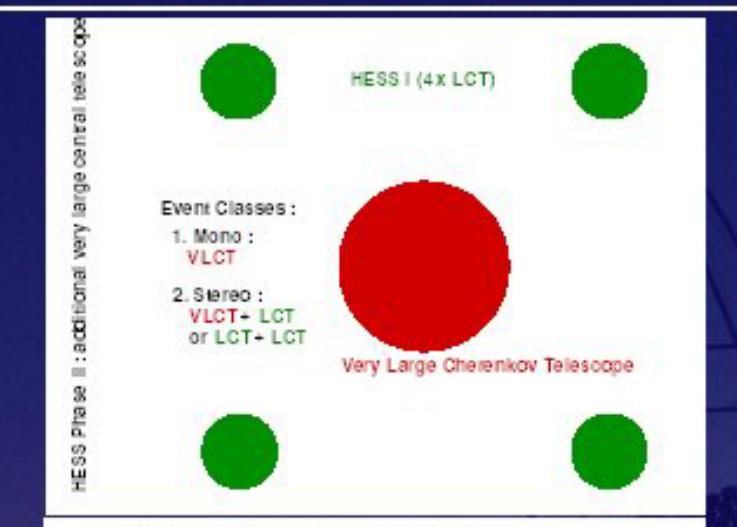
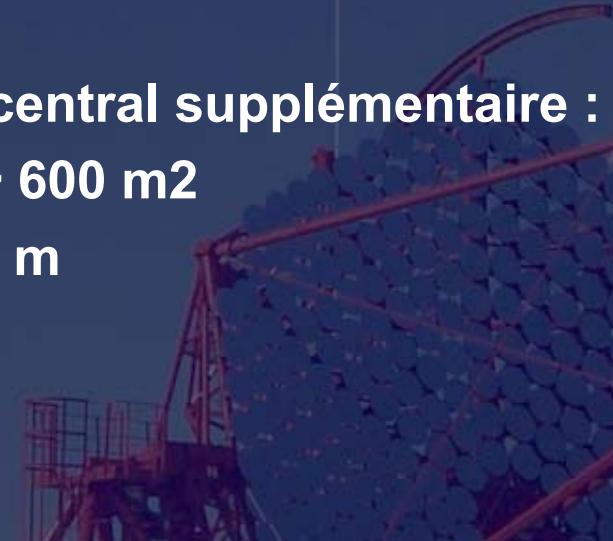
# Le futur de H.E.S.S.

H.E.S.S. II

## Vers un seuil en énergie à ~ 20 GeV...

Un grand télescope central supplémentaire :

- 28 m de diamètre, ~ 600 m<sup>2</sup>
- distance focale : 35 m
- 2048 PMTs
- champ de vue : 3°



# H.E.S.S. II : performances

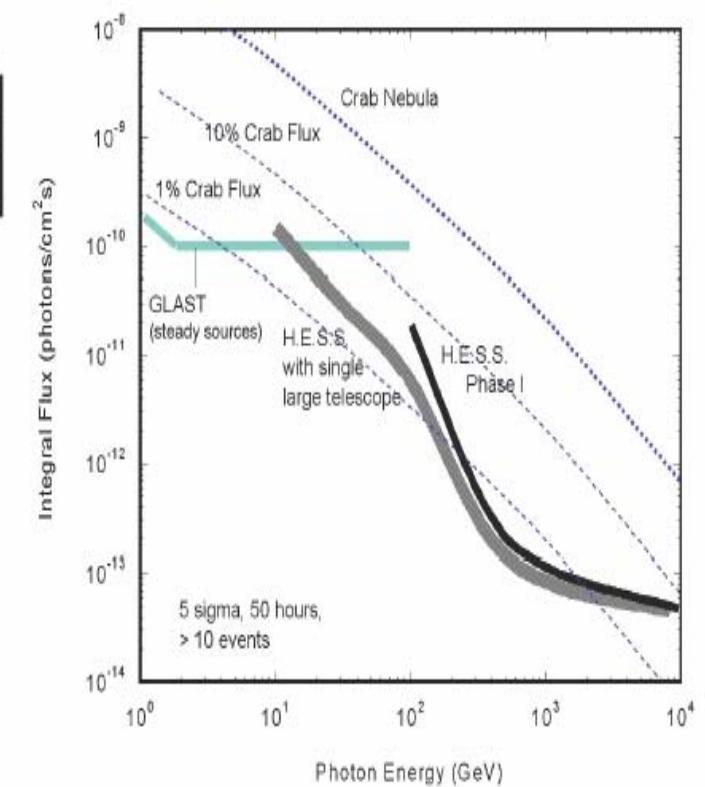
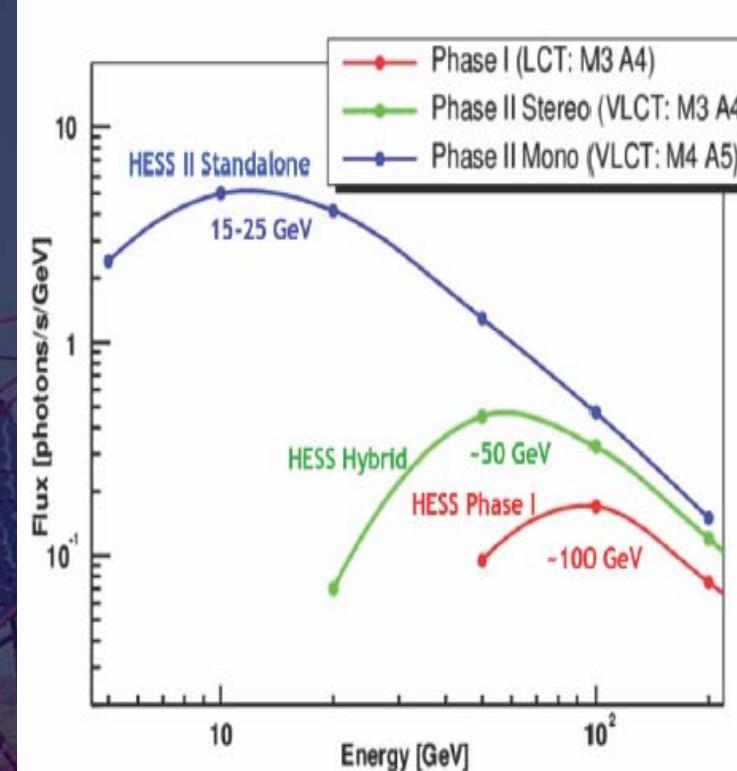
- Abaisser le seuil en énergie jusqu'à ~20 GeV
- Augmenter la sensibilité

Accéder à de nouvelles sources

2 modes de fonctionnement :

- mode mono
- mode hybride

Plage 20–50 GeV :  
 - pouvoir de rejet faible  
 - résolution énergétique et angulaire dégradée

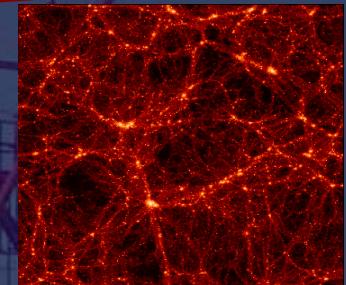


# Conclusions

H.E.S.S. : détecteur le plus sensible actuellement !  
nombreuses sources détectées, nouveaux types de sources

Emission diffuse au TeV le long du plan galactique  
⇒ bruit de fond astrophysique...

Pas de contraintes sur la matière noire  
au Centre Galactique



D'autres candidats à l'étude : les galaxies naines Sgr et Canis Major

H.E.S.S. II : démarrage en 2008  
⇒ seuil en énergie ~ 20 GeV