

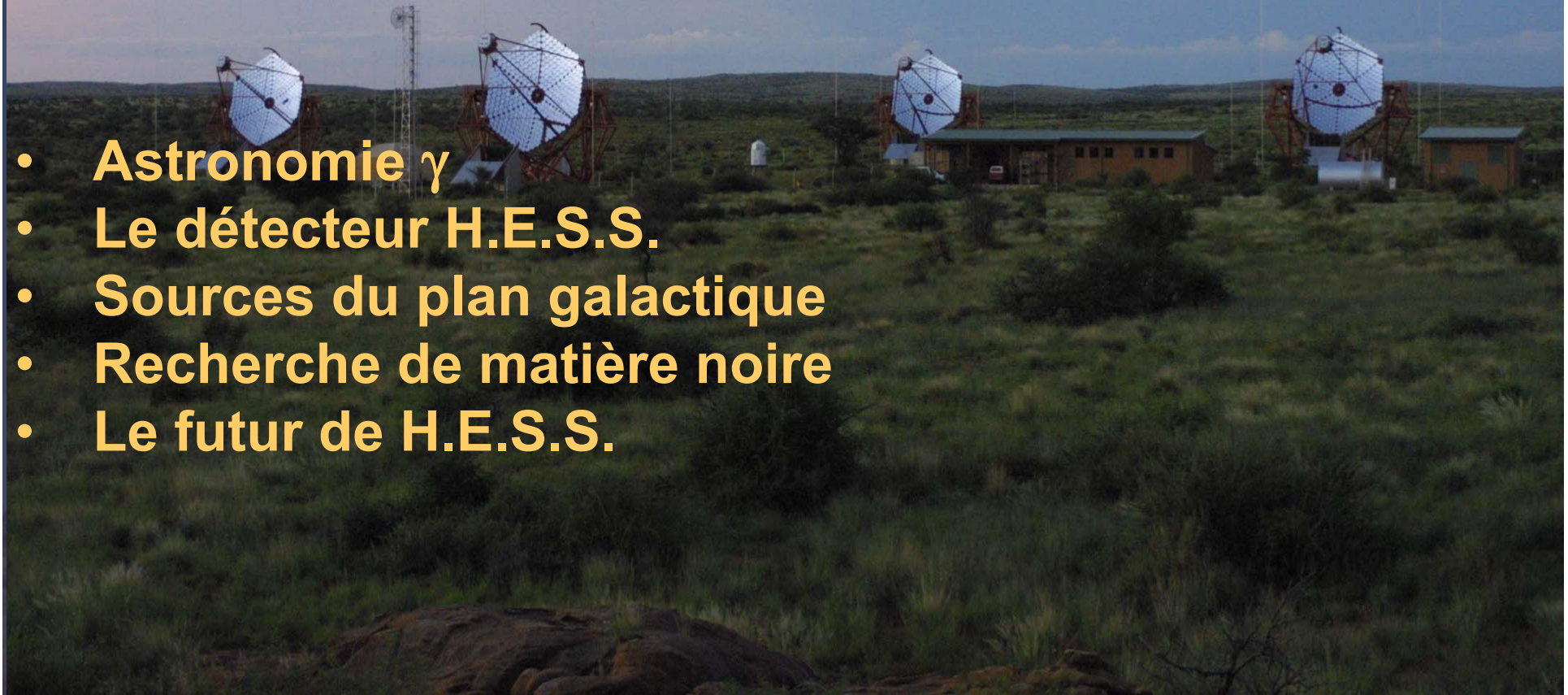
H.E.S.S. : recherche de matière noire

Emmanuel Moulin

DSM/DAPNIA/SPP

CEA Saclay

- **Astronomie γ**
- **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 γ de très hautes énergies ($E_\gamma > 100$ GeV)

~ 25 instituts

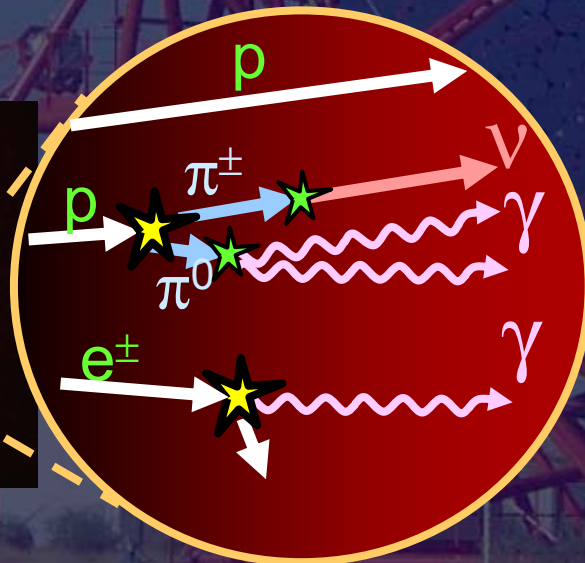
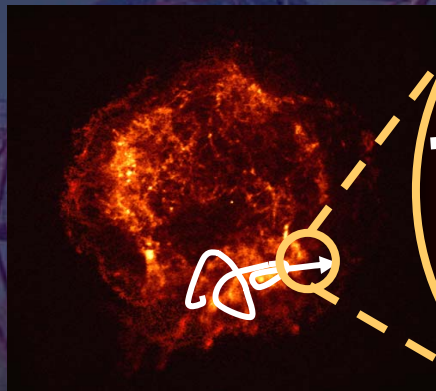
~ 100 physiciens et astrophysiciens

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

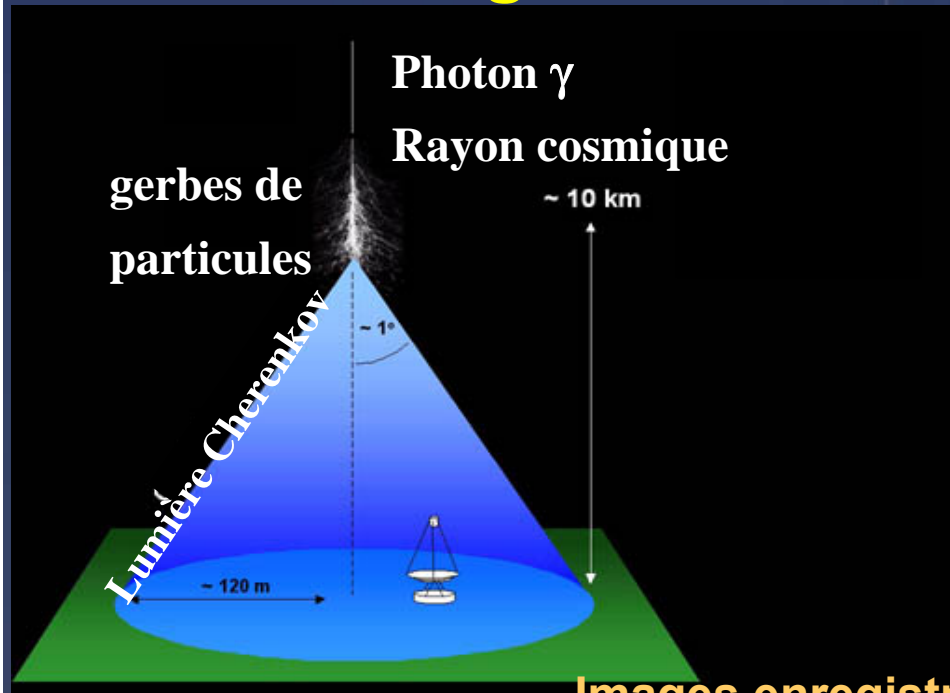
LPTA Montpellier
DAPNIA Saclay
CESR Toulouse
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies
Charles Univ., Prague
Yerewan Physics Inst.
North-West Univ., Potchefstroom
Univ. of Namibia, Windhoek

Origine du rayonnement γ

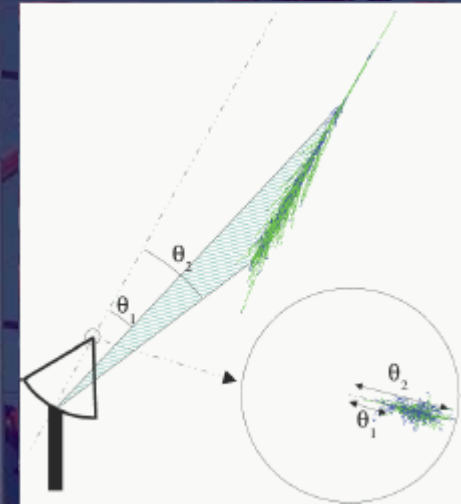
- Protons ou hadrons de hautes énergies
 - $p + \text{noyau} \rightarrow X\pi^0 \rightarrow X\gamma\gamma$
- Electrons de hautes énergies
 - Pertes synchrotron
 - Bremsstrahlung
 - Diffusion Inverse Compton
- Annihilation de Matière Noire
 - $\chi\chi \rightarrow X\gamma$



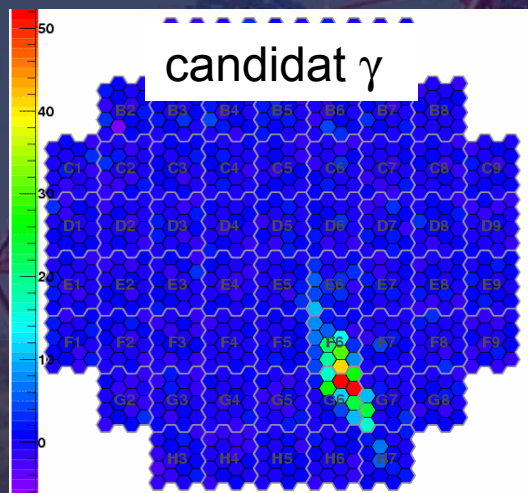
L'imagerie Cherenkov atmosphérique



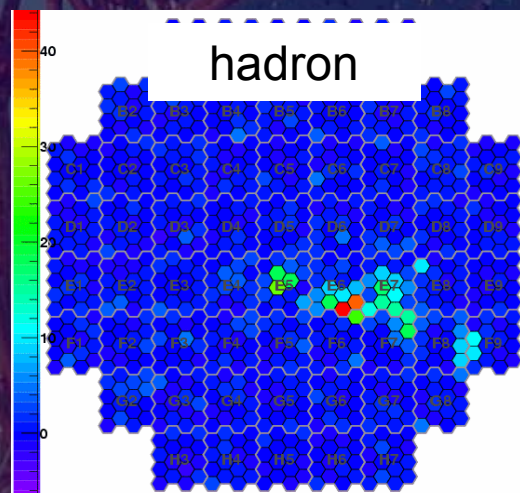
- Atmosphère = calorimètre
- Image de flashes Cherenkov (~3 ns)



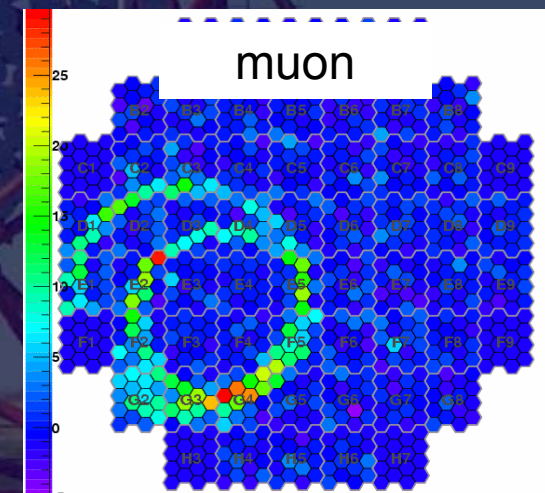
Images enregistrées dans la caméra



Emmanuel Moulin



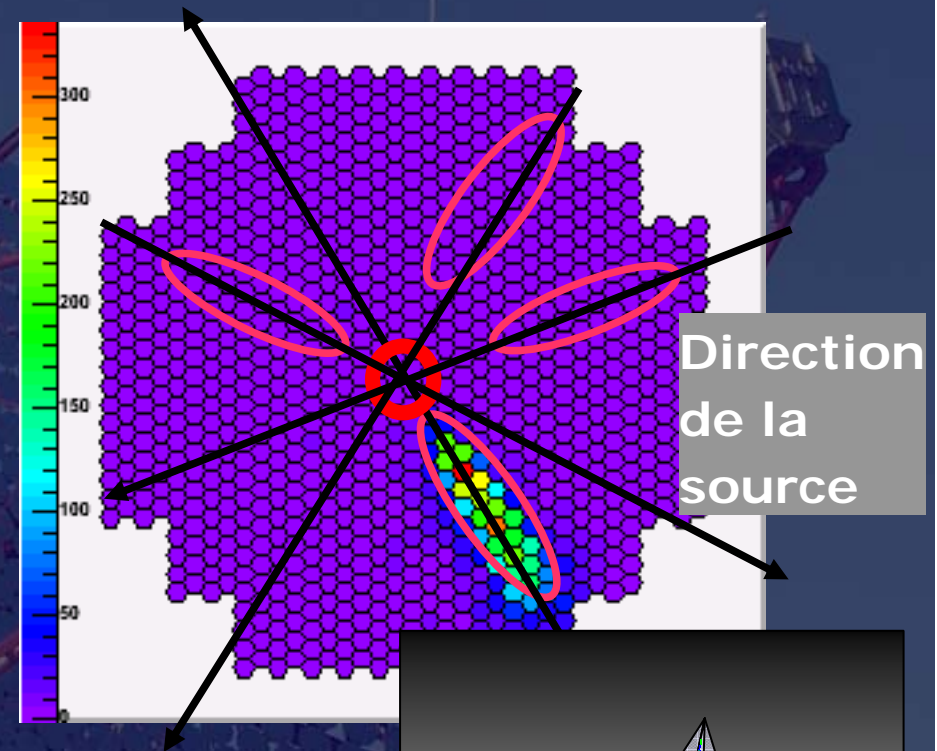
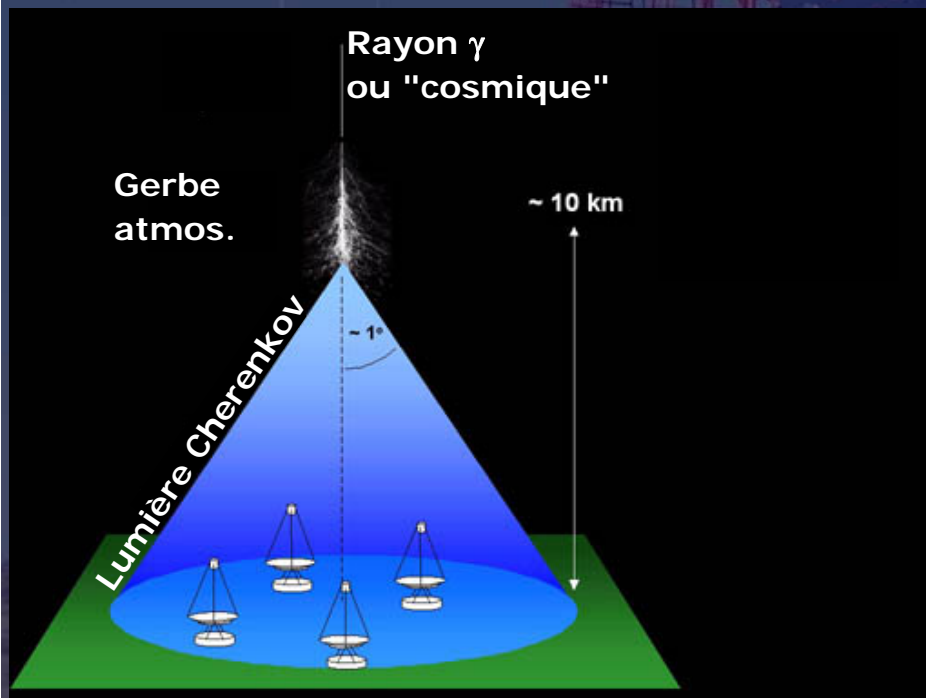
Séminaire LPSC, 8 Mars 2007



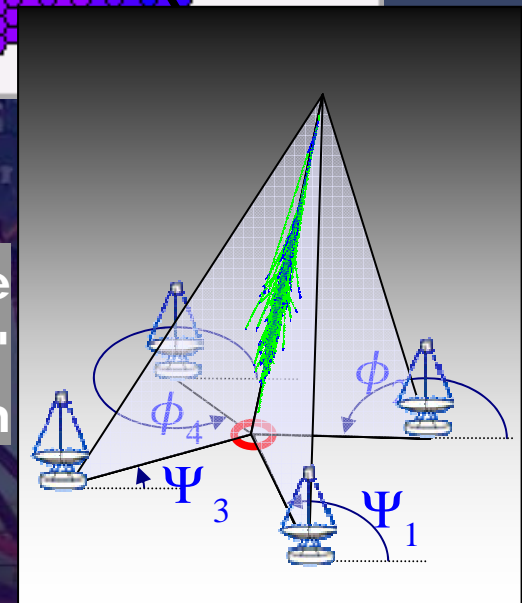
DAPNIA/SPP

La stéréoscopie avec les télescopes Cherenkov

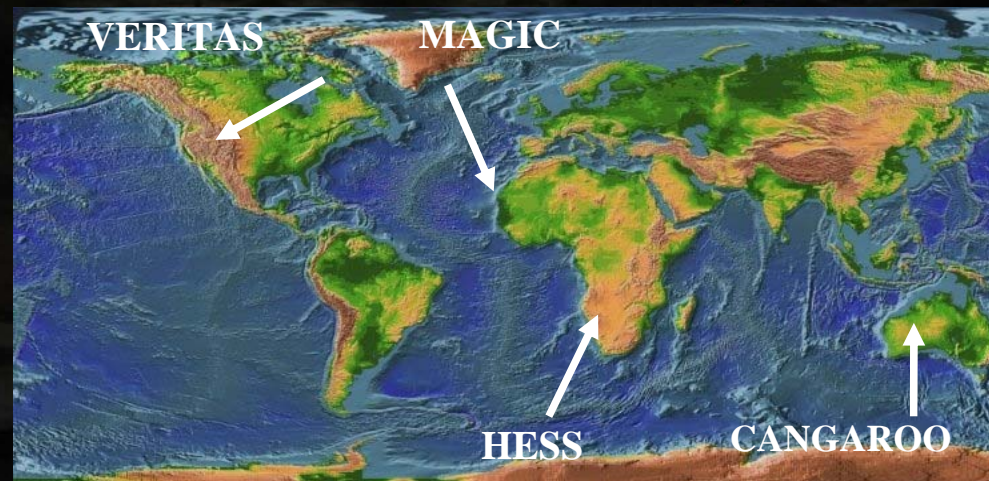
- Augmenter le pouvoir de rejet des hadrons
- Améliorer la reconstruction des γ
- Eliminer les muons isolés (trigger)
- Abaisser le seuil en énergie



"Paramètre d'impact" du photon



Le détecteur H.E.S.S.

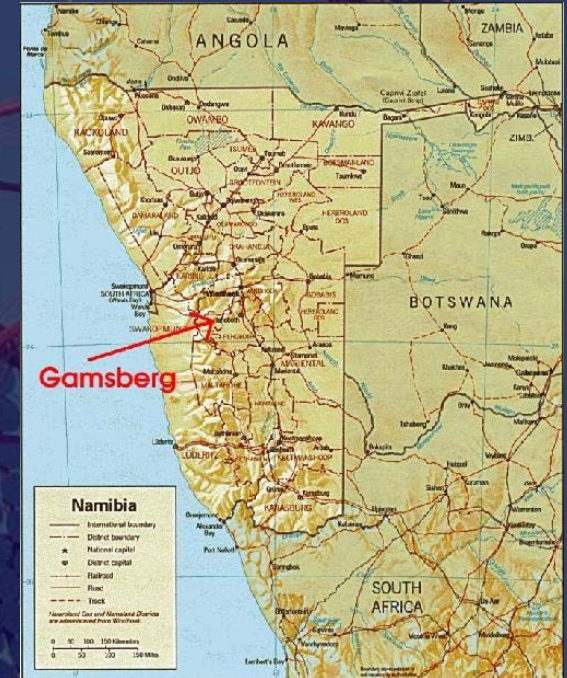


Le détecteur H.E.S.S.

H.E.S.S. : un instrument de 3^{ème} génération

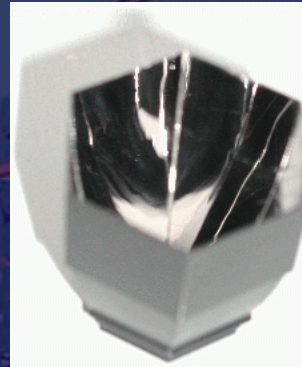
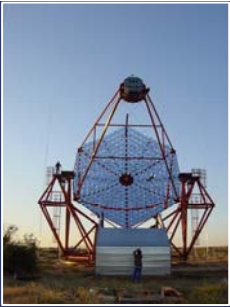
Site : Namibie, $23^{\circ}16''$ S, $16^{\circ}30''$ E, altitude 1800 m

- Réflecteur Davies-Cotton segmenté, 13 m de diamètre, 107 m²
- 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

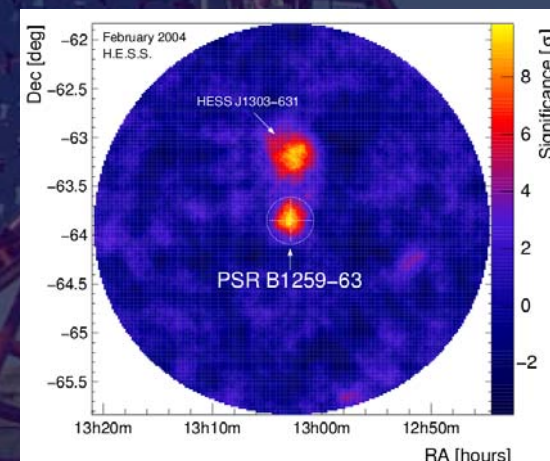
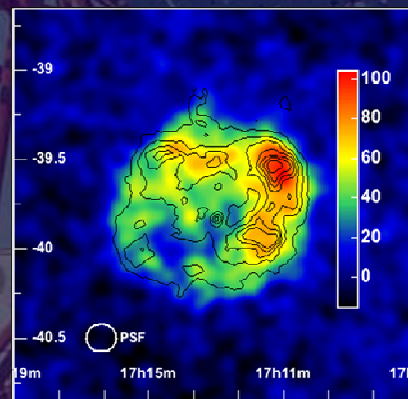
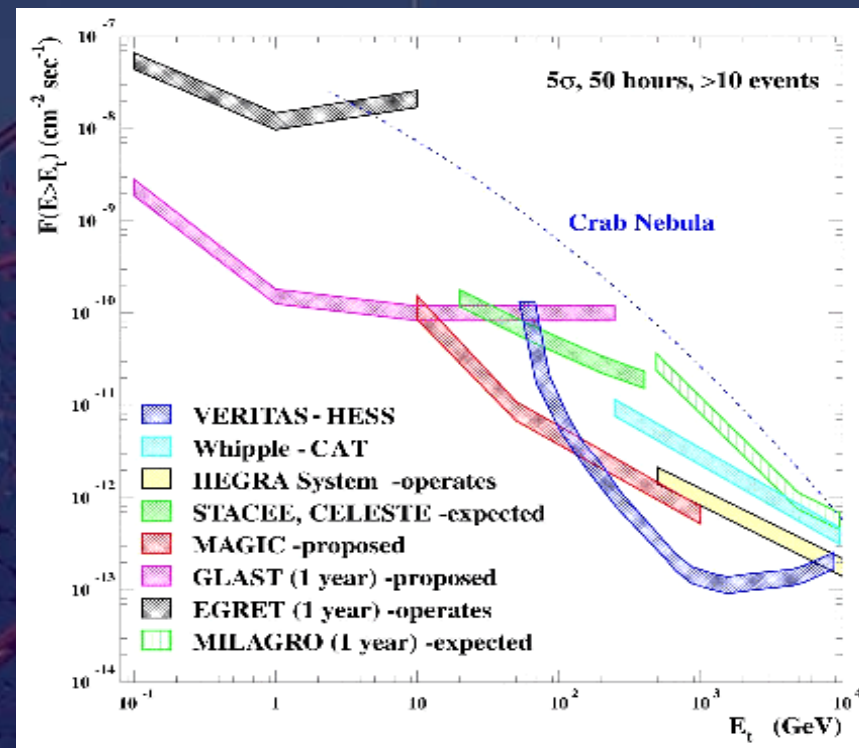


Les performances de H.E.S.S.

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

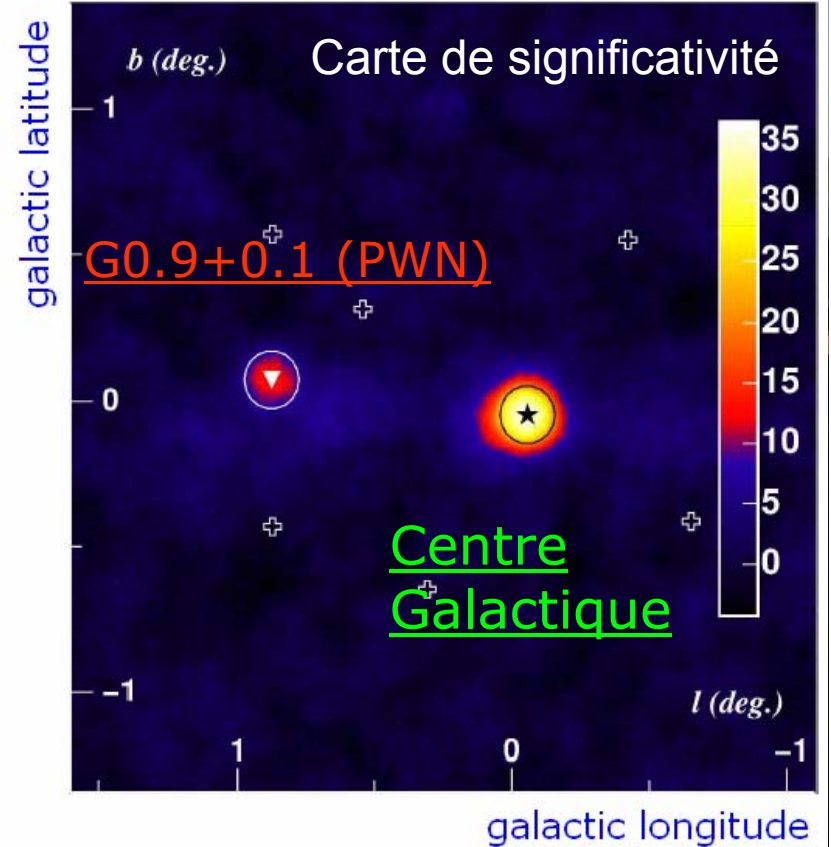
Détection de la nébuleuse du Crabe au zénith :

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





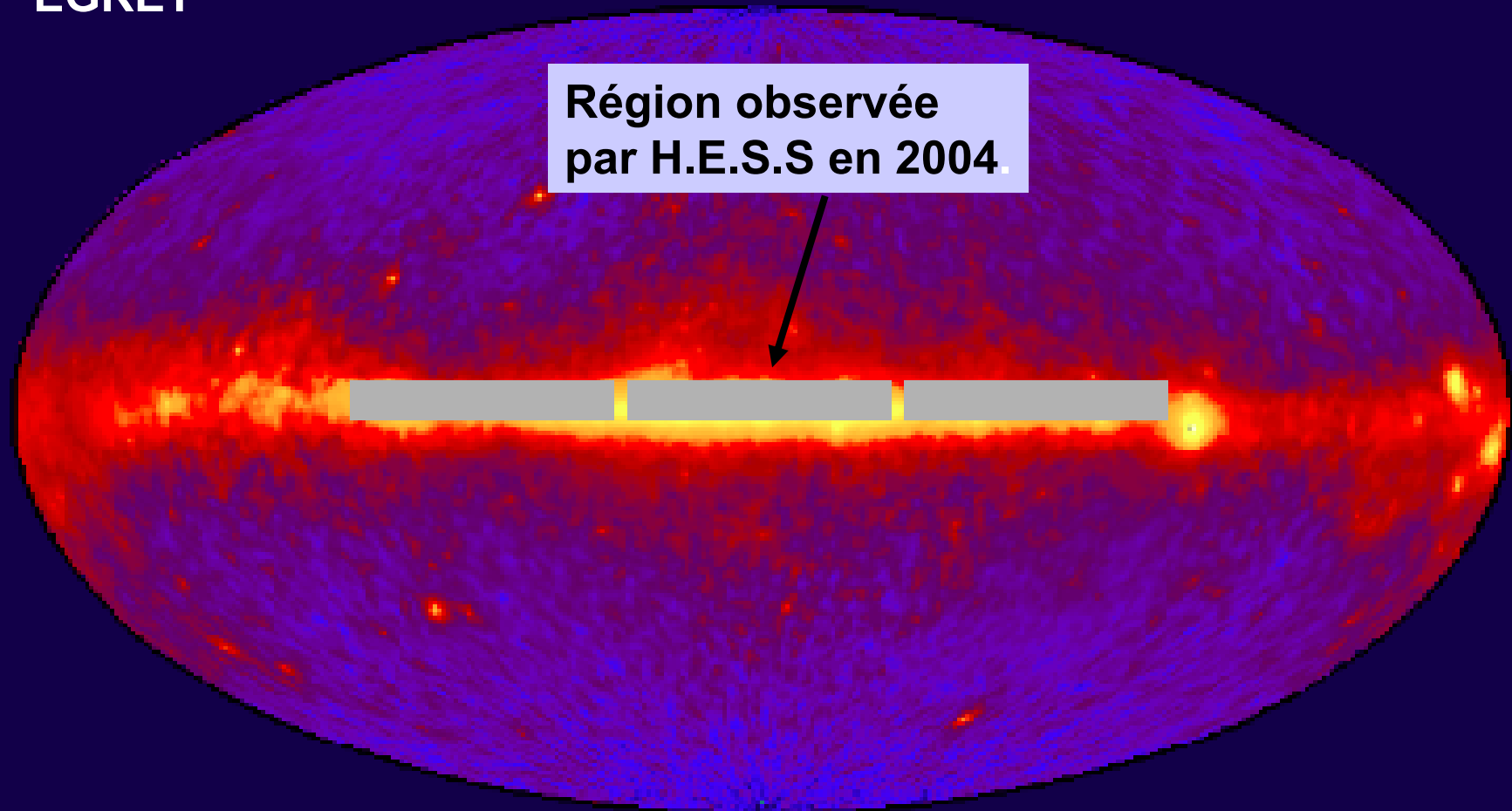
Les sources du plan galactique



Observations du plan galactique

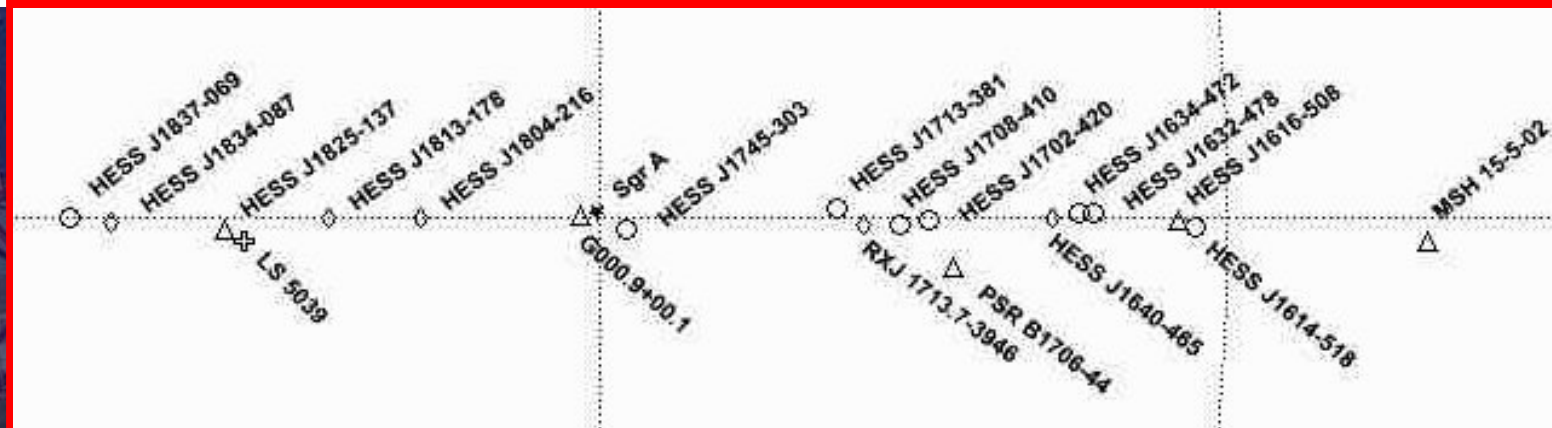
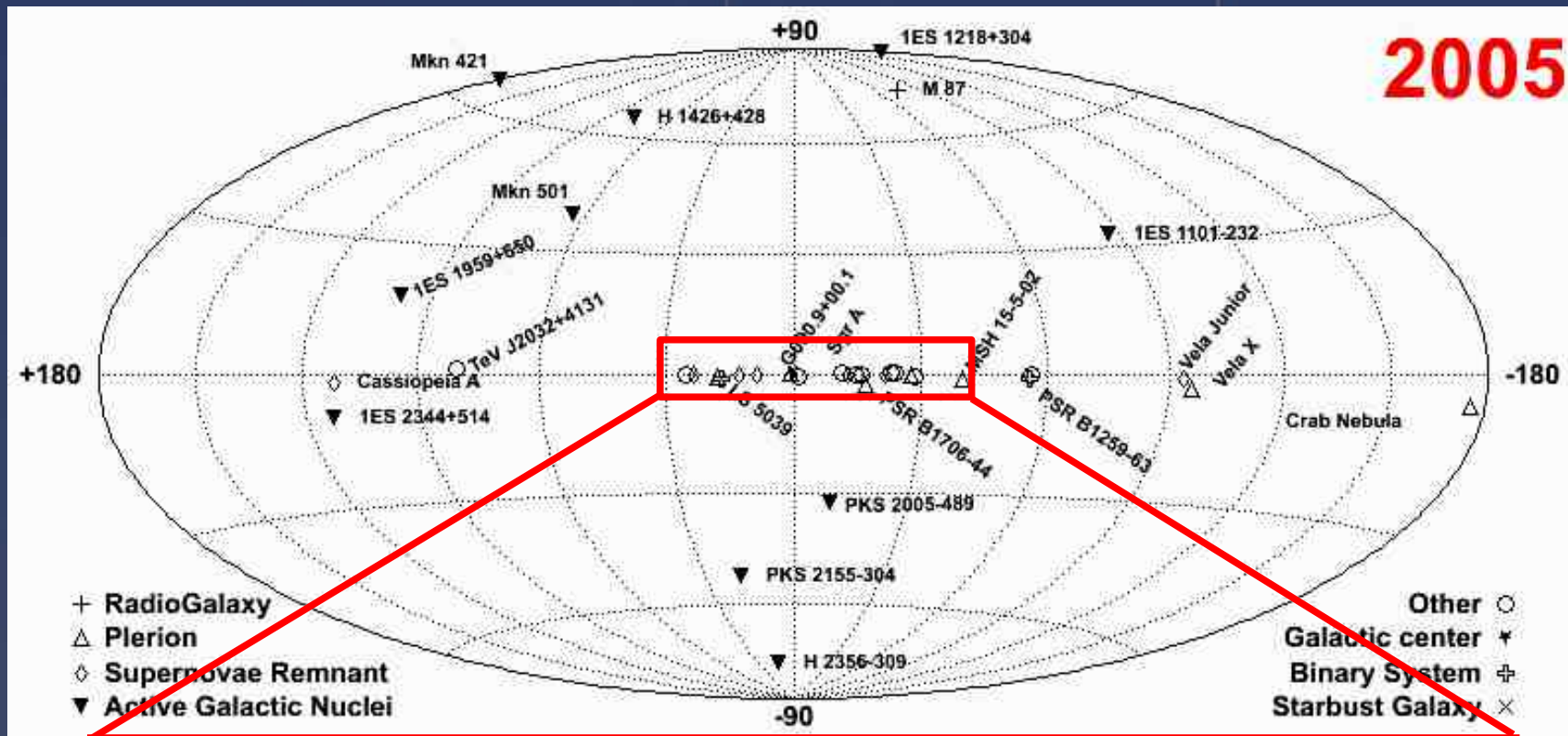
- Plan galactique : $|b| < 3^\circ$
- Mosaïque 2004 : 230h en 500 pointés , $||l| < 30^\circ$

EGRET

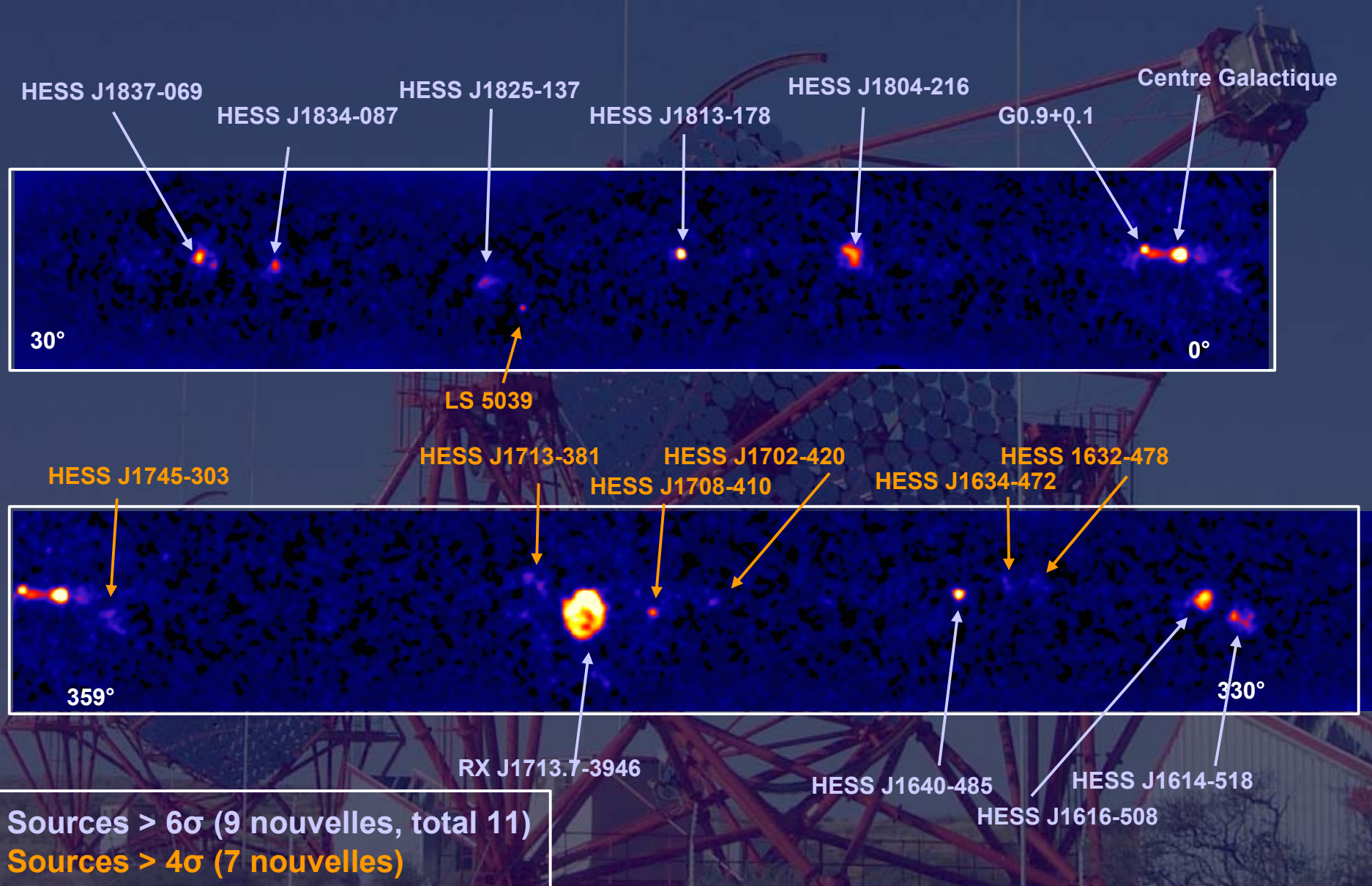


Une nouvelle astronomie

2005

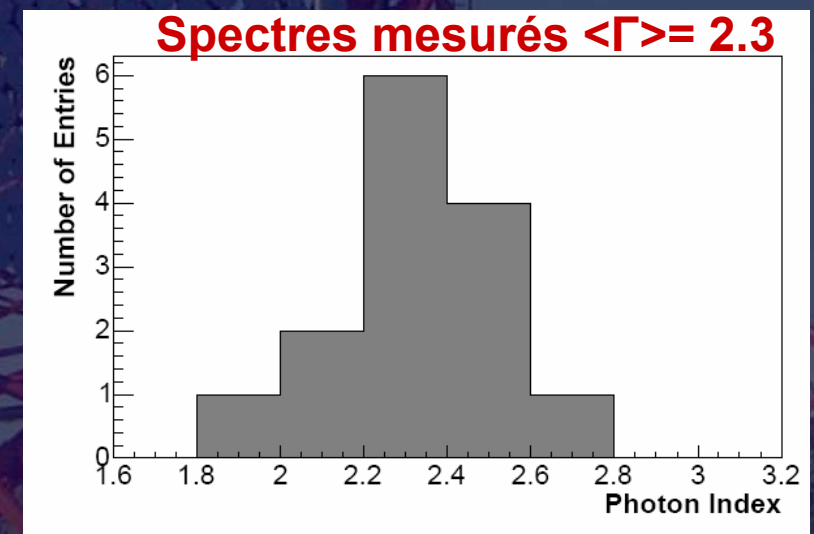
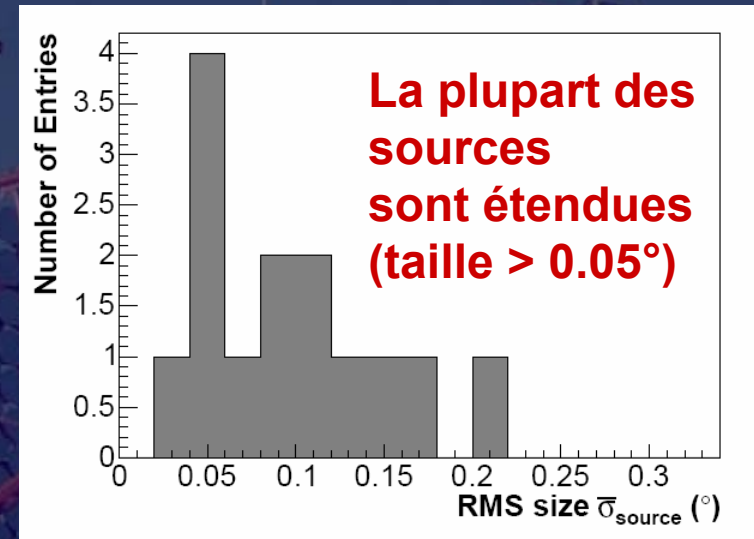


Plan galactique : nouvelles sources



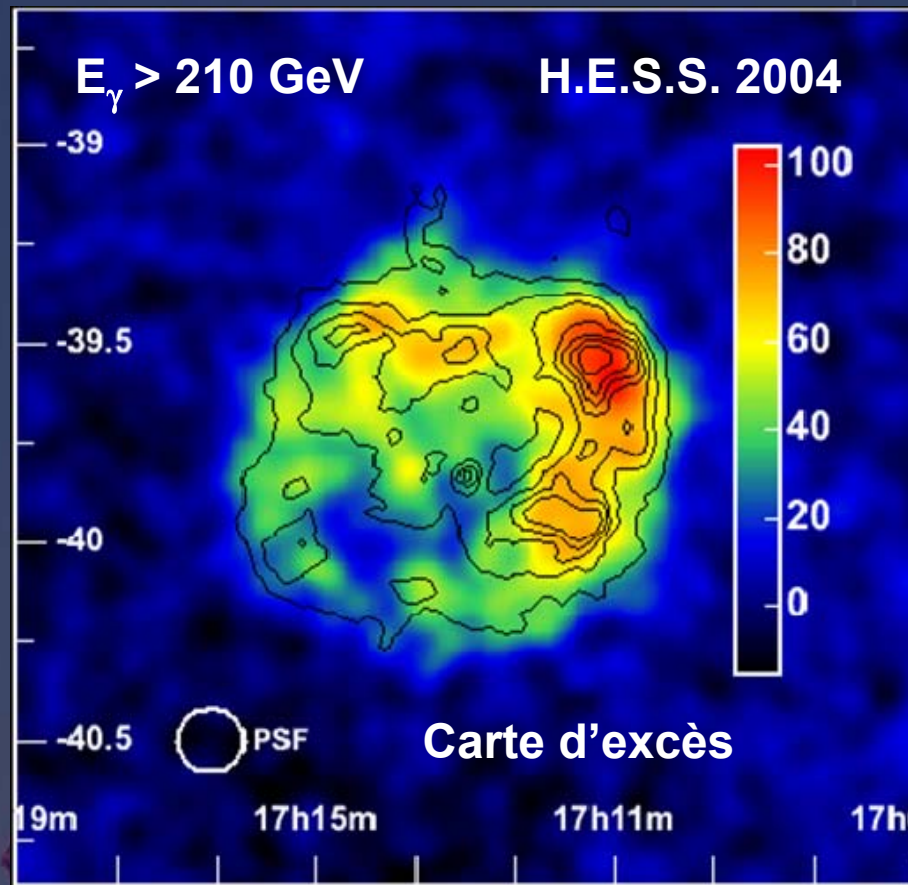
Caractéristiques générales des sources détectées

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

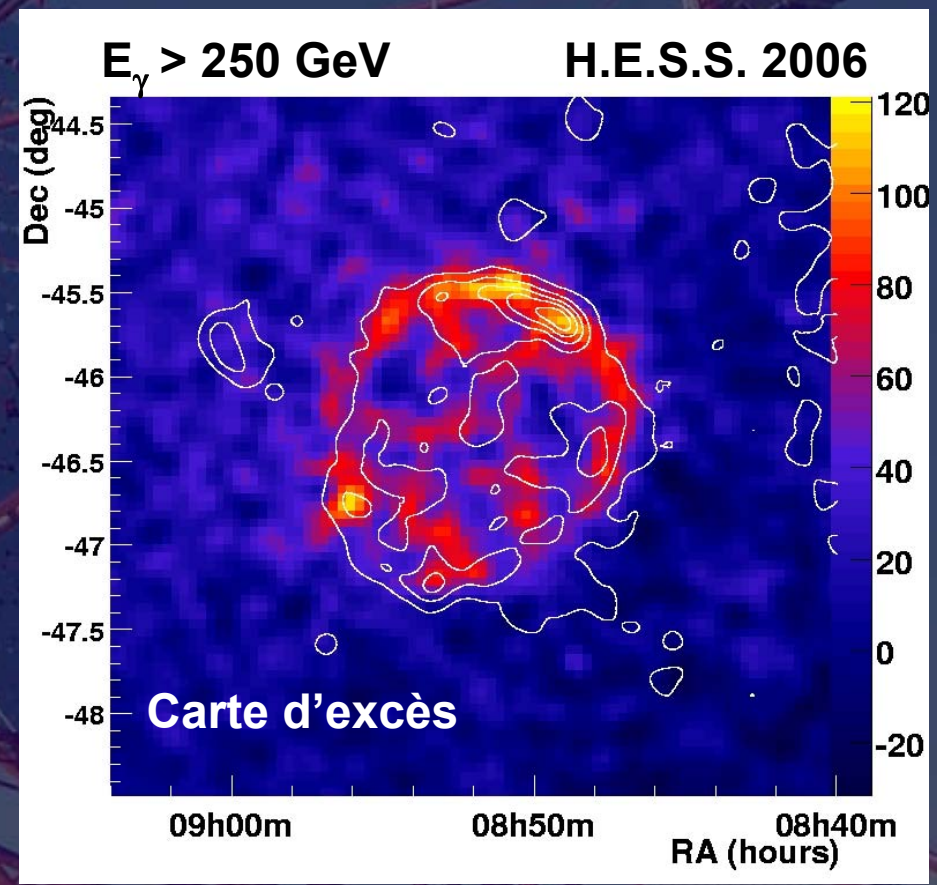


Restes de supernovae en coquille

RX J1713.7-3946



RX J0852.0-4622

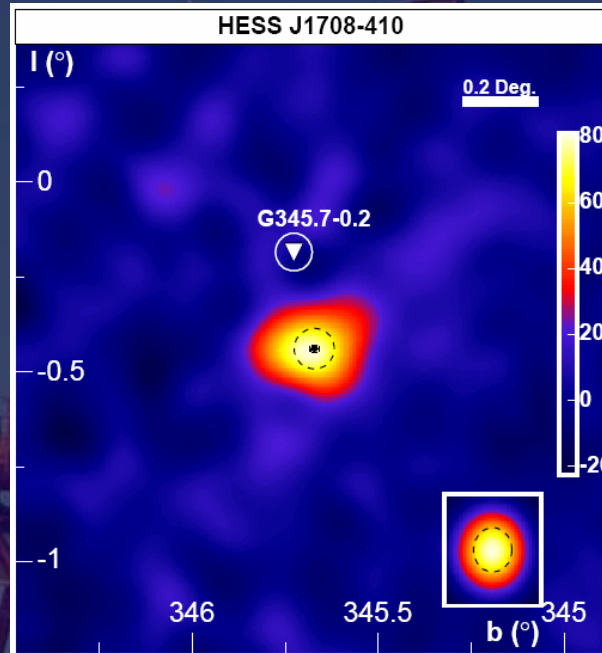
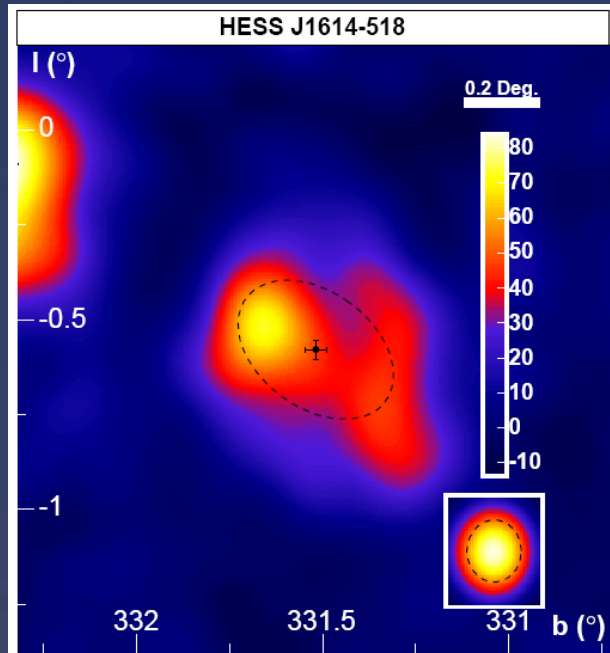


Forte corrélation X - gamma

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

Sources étendues sans contreparties

Cartes d'événements



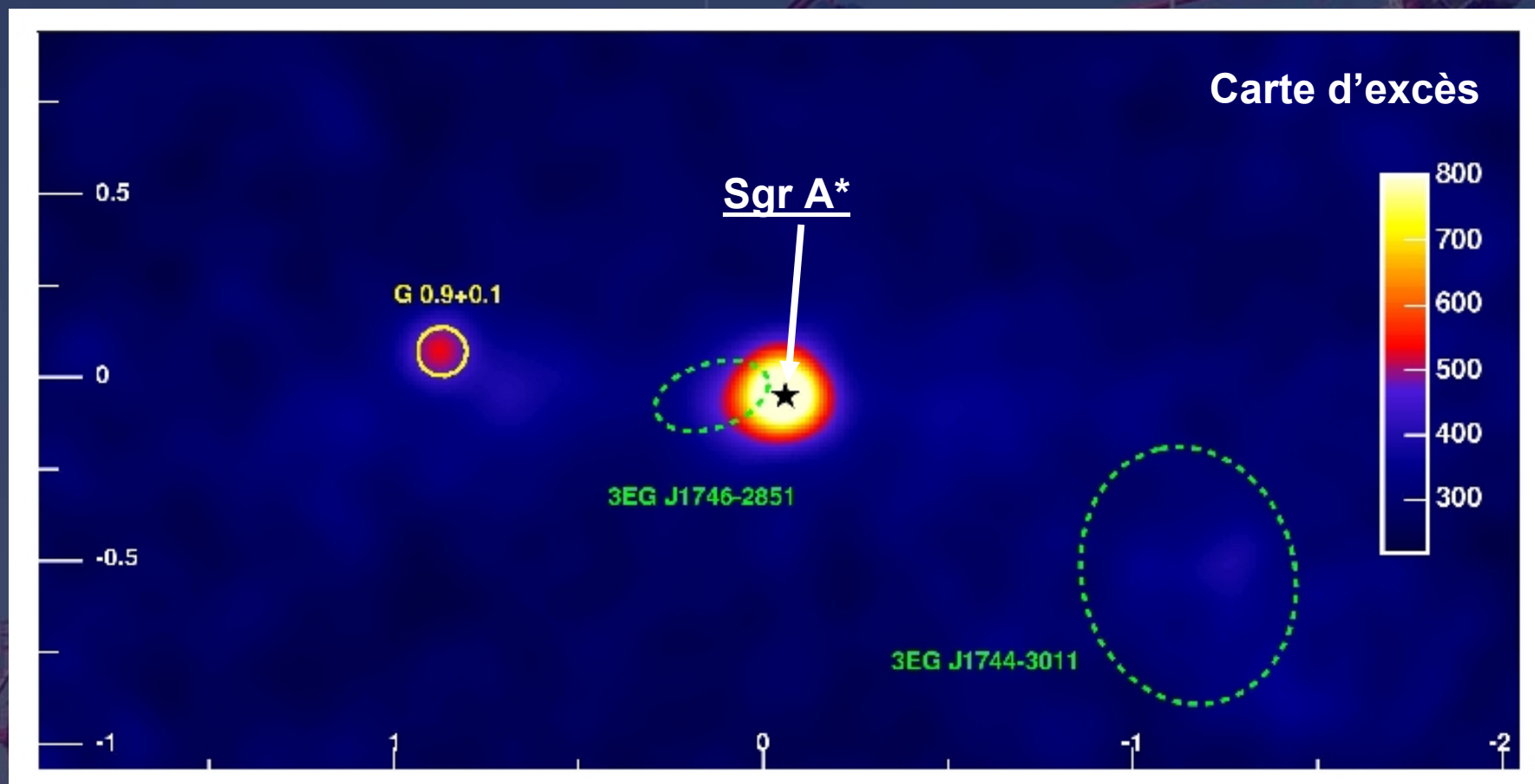
- étendues : $\sigma > 0.12^\circ$
- spectre dur : $\Gamma \approx 2.2$
- émission stable

Quatre sources : HESS J1303-631, HESS J1616-508
HESS J708-410, HESS J1702-420
D'autres à venir...

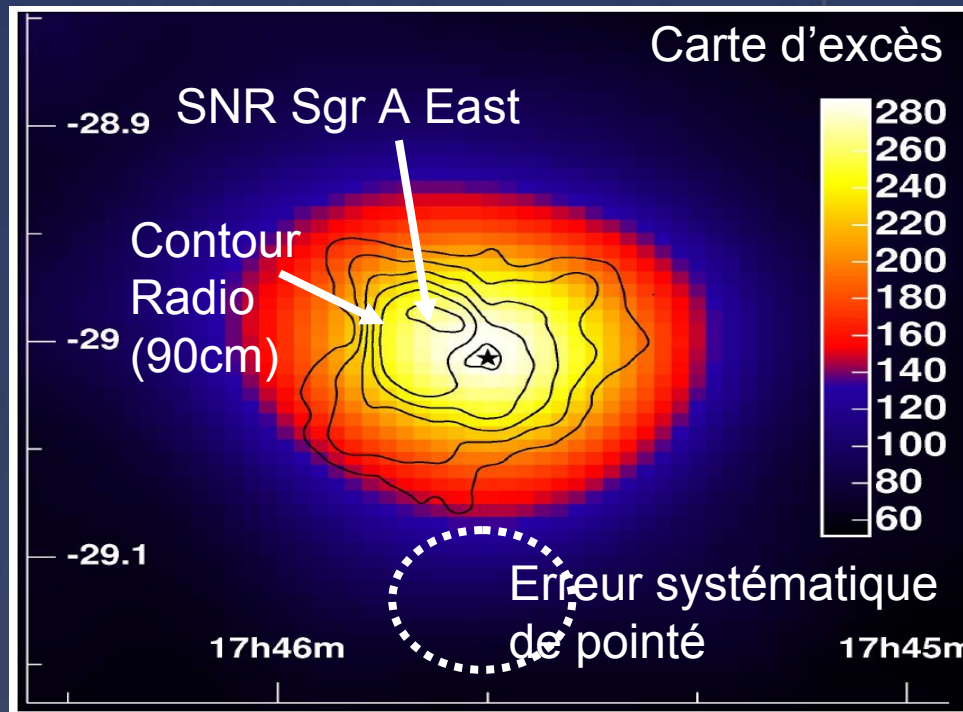
Sources non identifiées ...

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

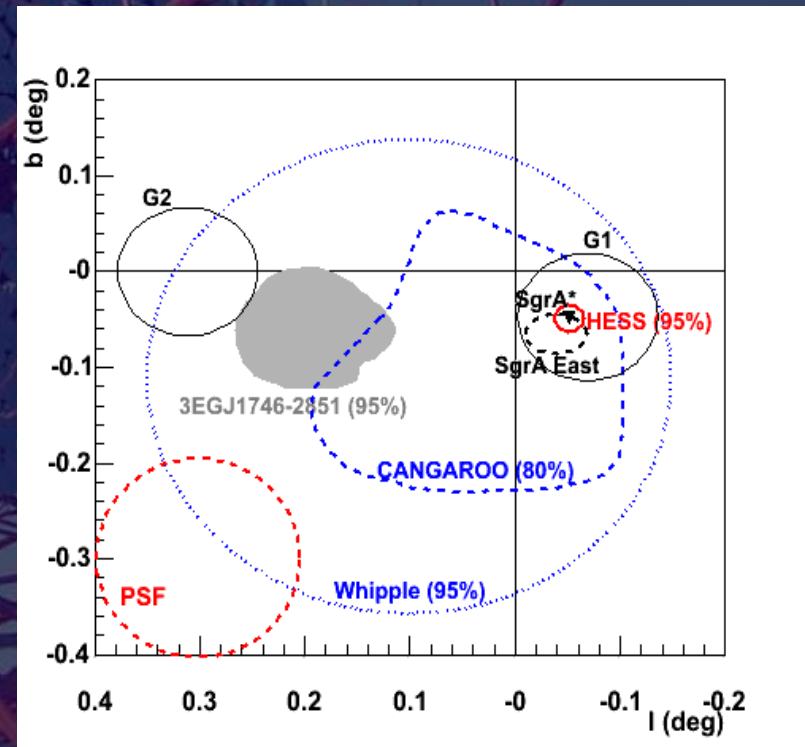


12h (2003, 2 télescopes)
+ 50h (2004, 4 télescopes)

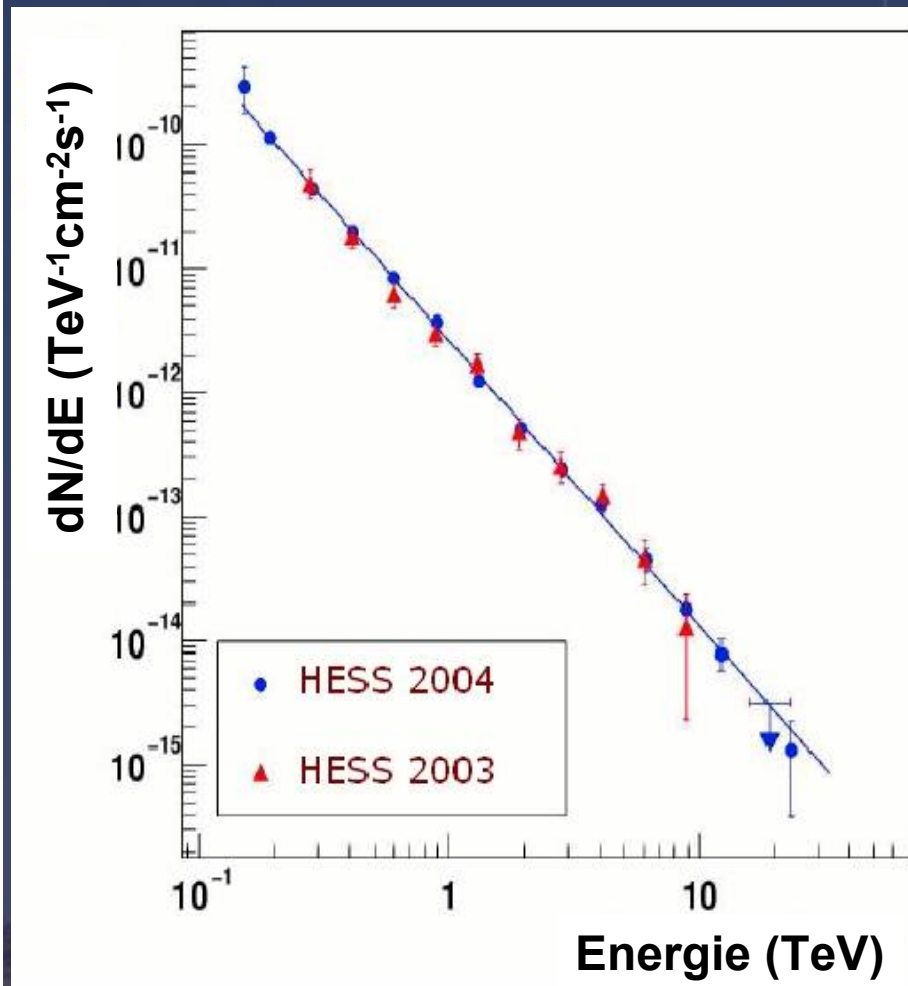
Candidats astrophysiques :

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

Annihilation de Matière Noire?

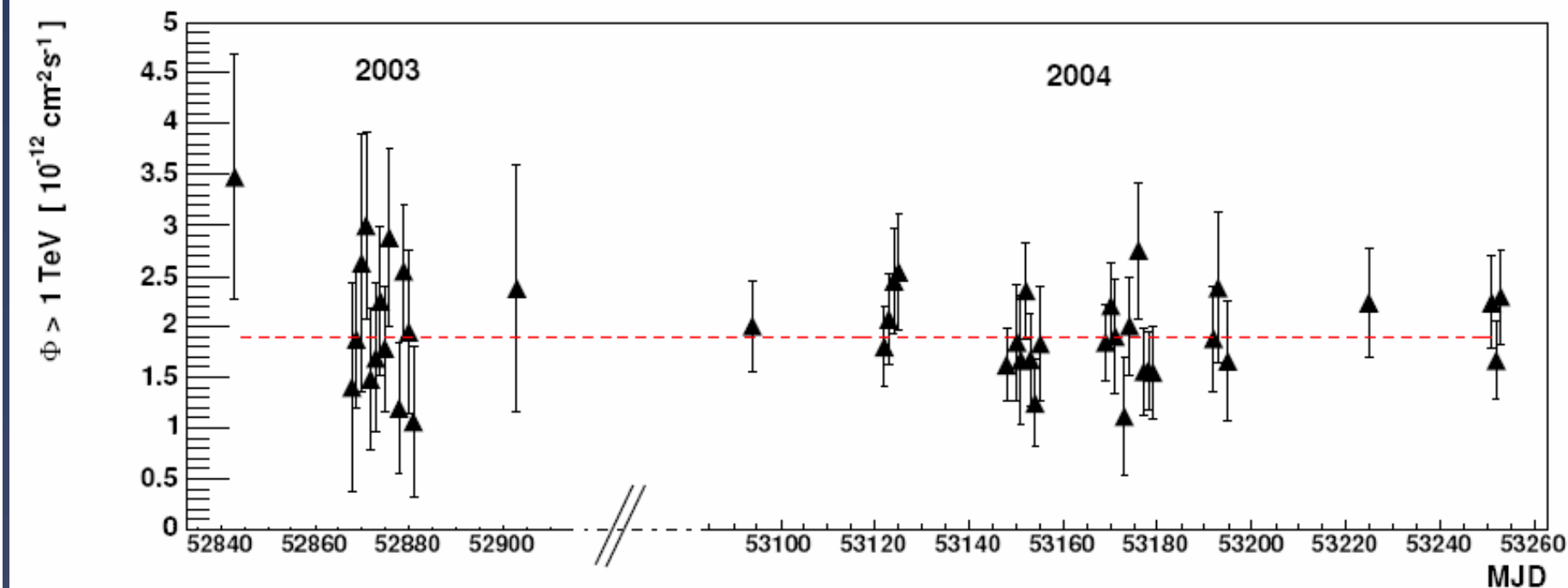


HESS J1745-290 : spectre en énergie



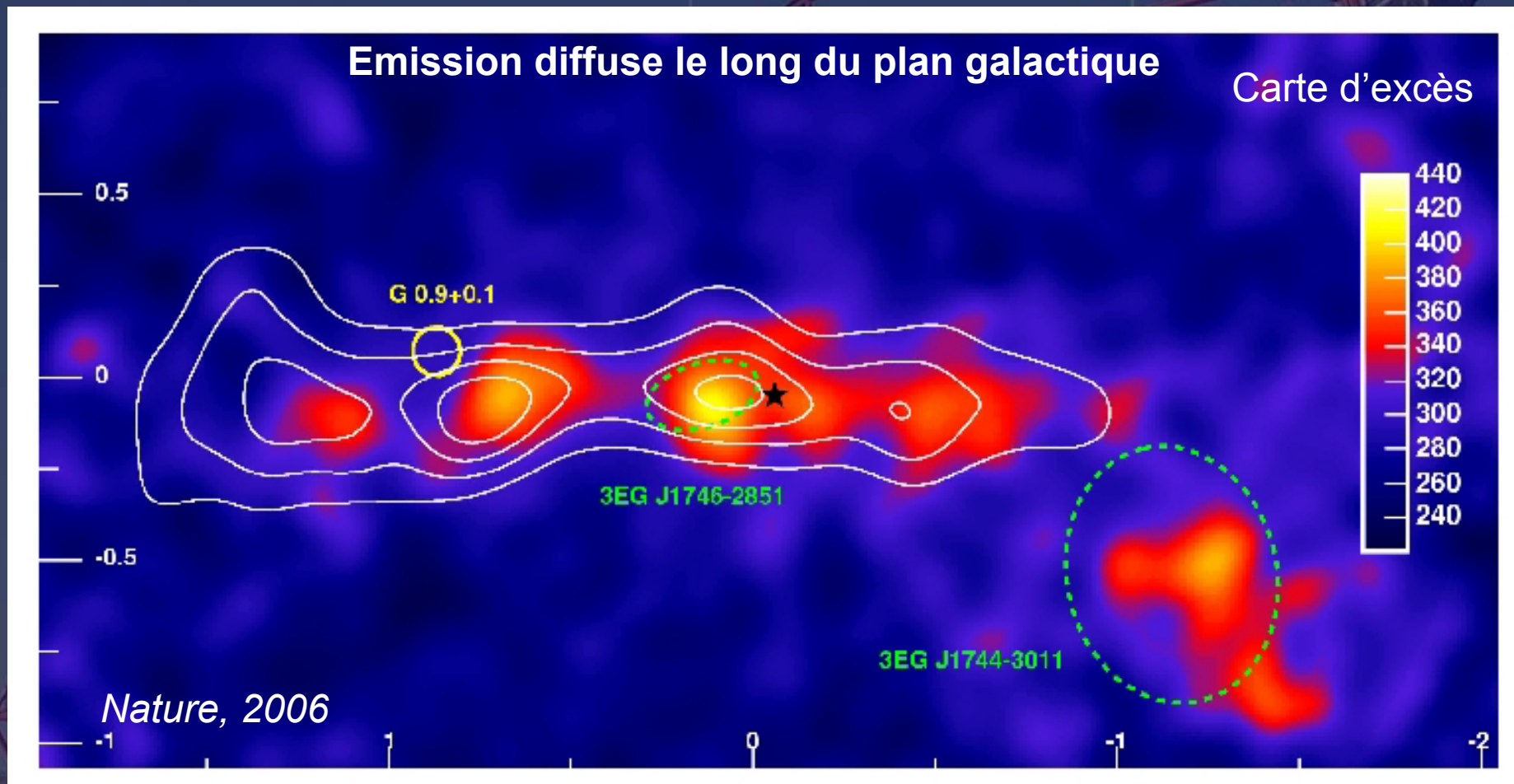
- Compatible avec une loi de puissance
- Indice spectral :
 $\Gamma = 2.29 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}}$
- **Coupure en énergie E_c ajustement**
 $dN/dE \propto E^{-\Gamma} e^{-(E/E_c)}$
 $\Rightarrow E_c > 6 \text{ TeV (95\% C.L.)}$
- Flux intégré ($>1\text{TeV}$) :
 $(1.8 \pm 0.1)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

Variabilité de HESS J1745-290 ?

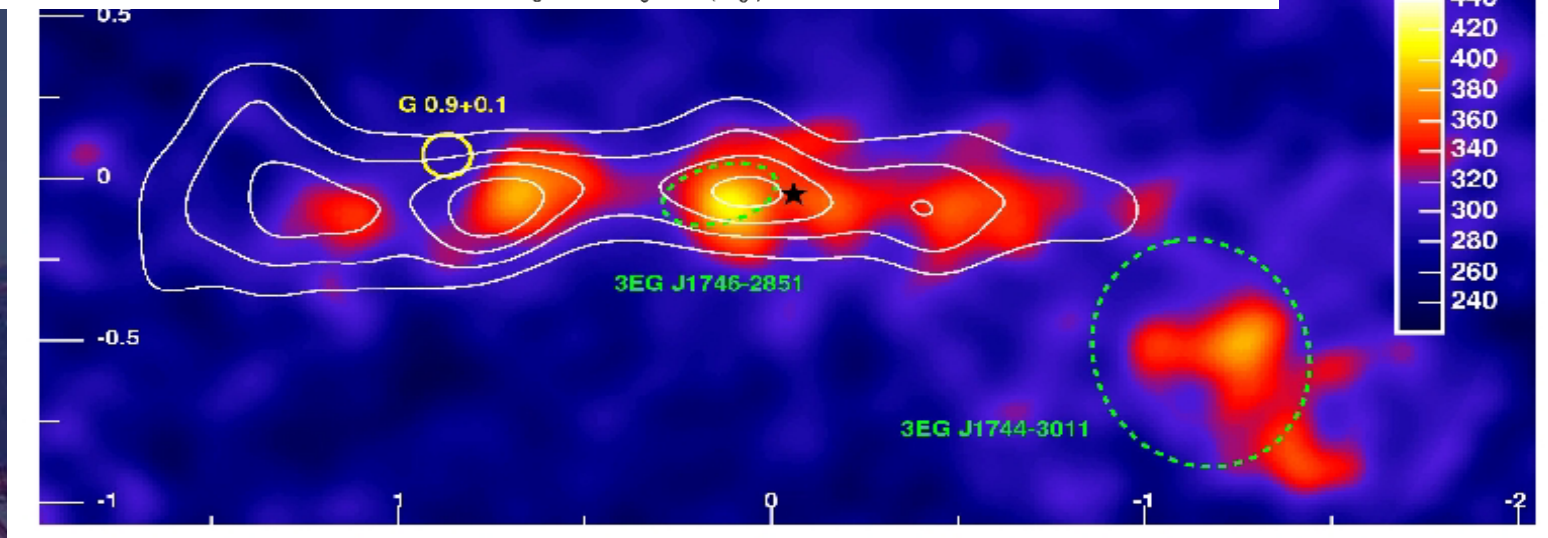
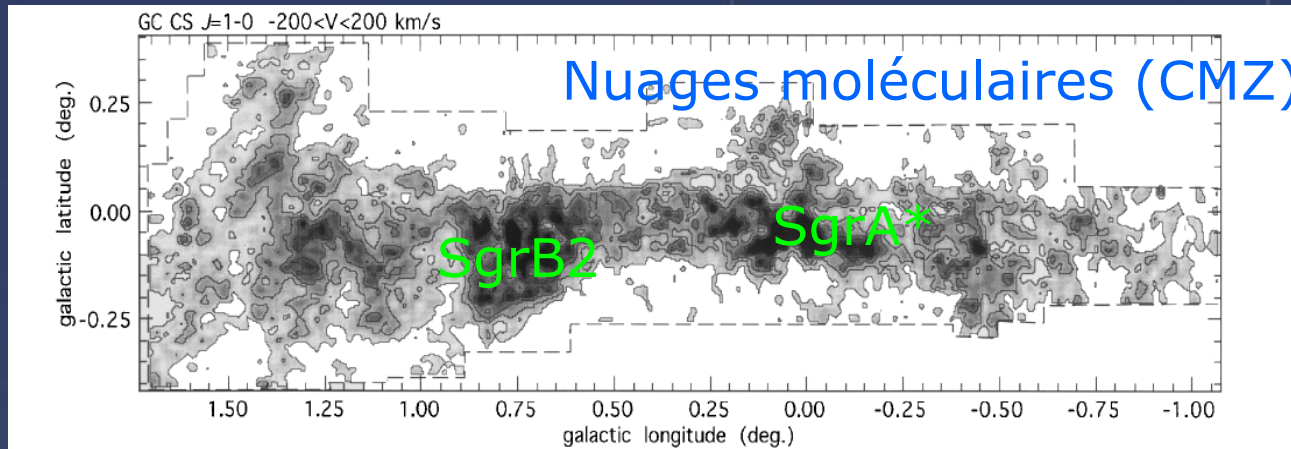


- flux ~ 1 photon/mn
- pas de variabilité significative (10 mn \rightarrow 1 an)

Emission diffuse dans la région du CG

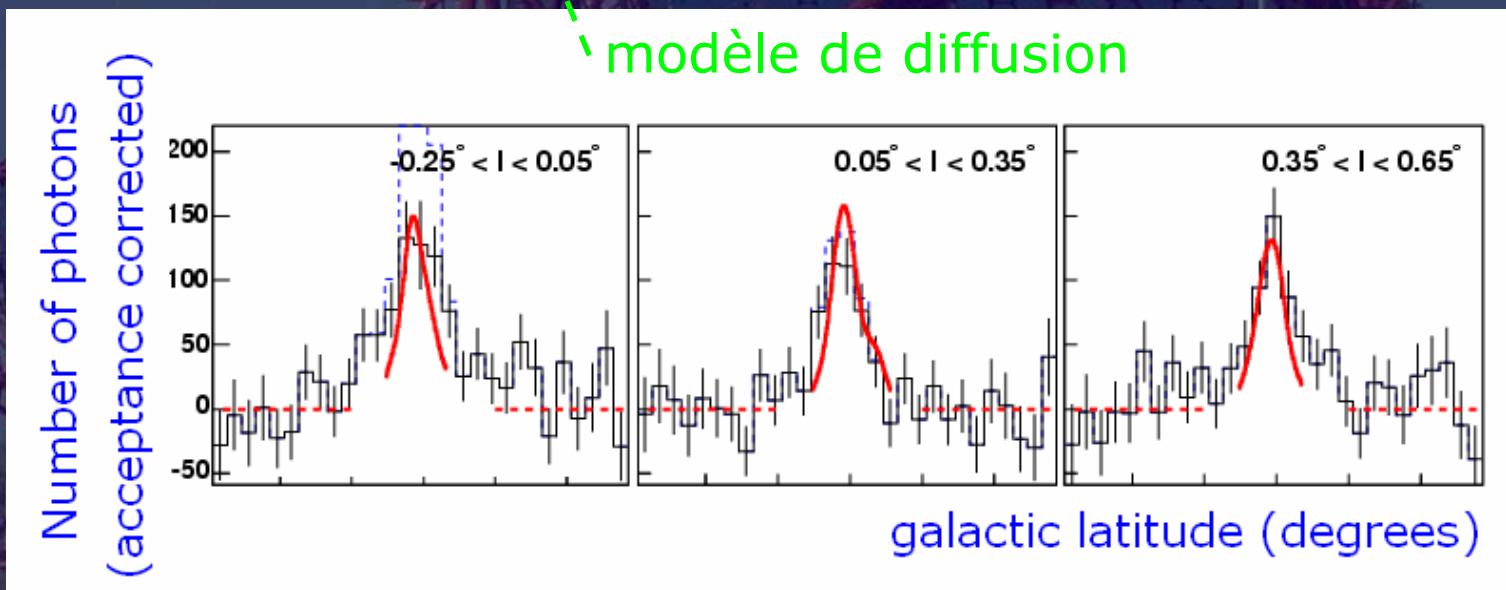
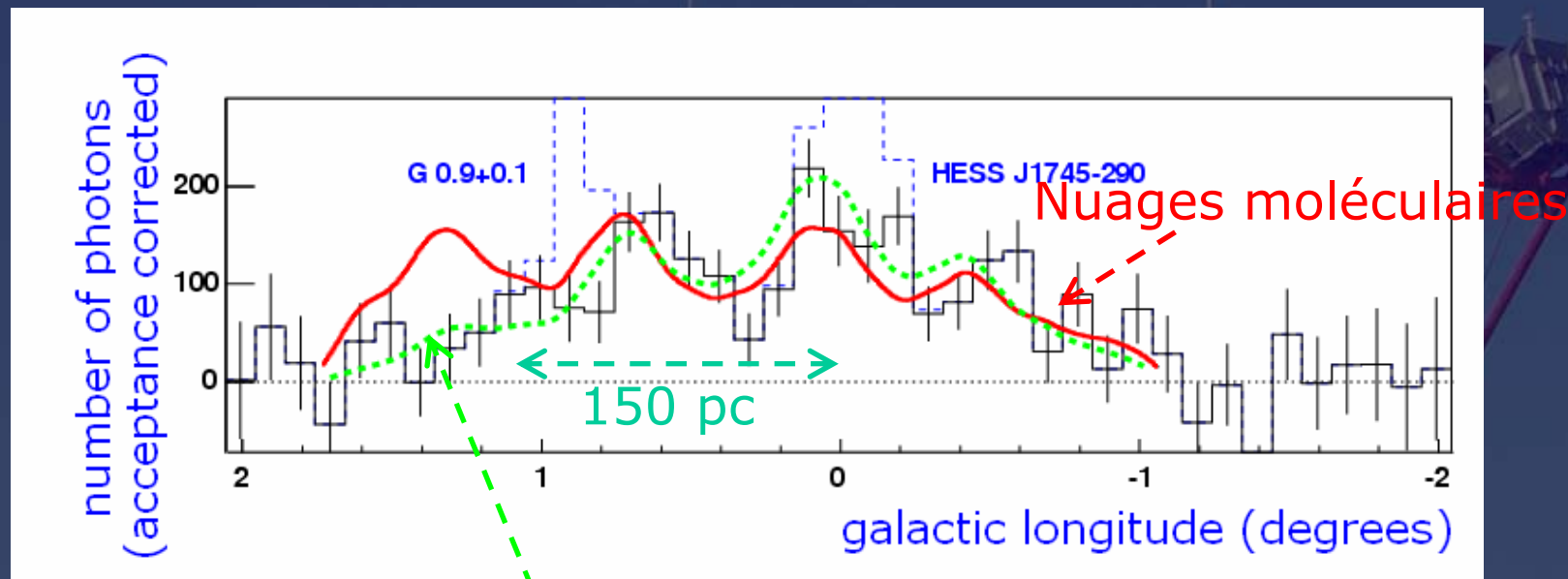


Corrélation avec les nuages moléculaires

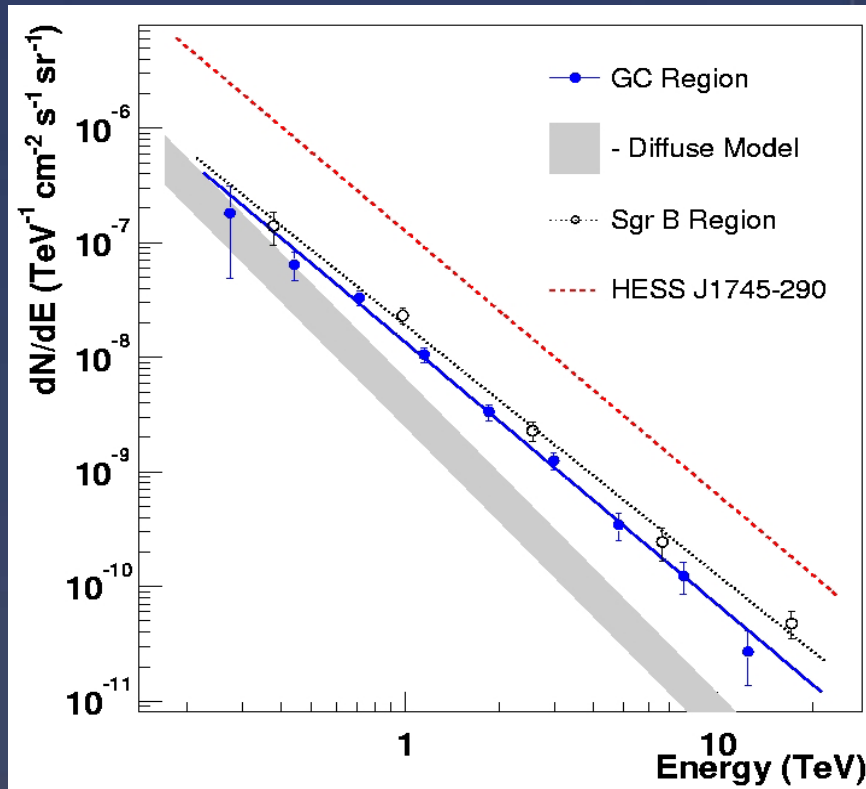


- Corrélation avec la densité de nuages moléculaires sur $\sim 2^\circ$ (~ 150 pc)
 \Rightarrow Trace la présence de RCs hadroniques !

Corrélation avec les nuages moléculaires



Spectre de l'émission diffuse



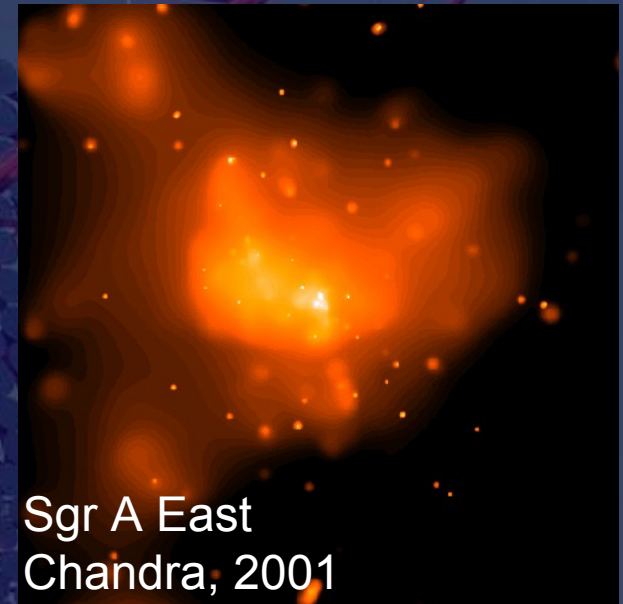
Spectre observé :

- Loi de puissance
- Indice spectral :
 $\Gamma = 2.29 \pm 0.07 \text{ (stat)} \pm 0.20 \text{ (syst)}$
- Indépendant de la position

- **Corrélation émission γ / densité massique**
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$: indice spectral $\gamma \approx$ indice spectral proton
 - spectre des protons plus dur qu'au voisinage du Soleil ($\Gamma \sim 2.7$)

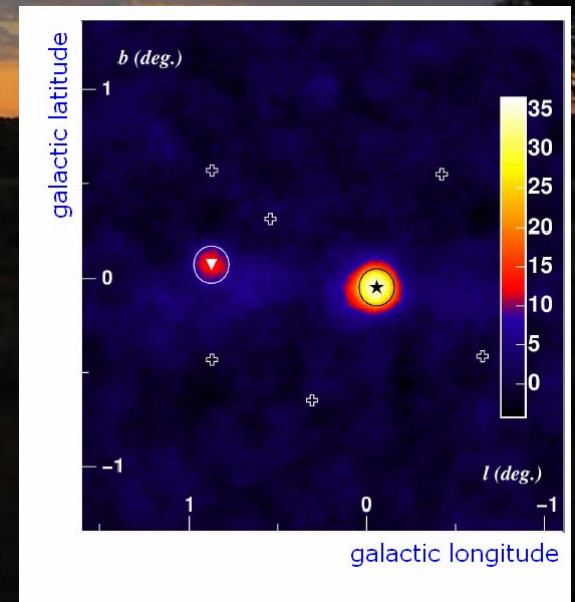
Discussion

- **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 : $\sim 5'$
⇒ ~ 100 plérions
 - non détectés en X
⇒ improbable!

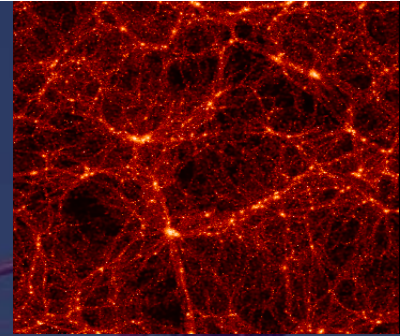


Sgr A East
Chandra, 2001

Les sources candidates à la Matière Noire



Interprétation Matière Noire



Flux gamma prédit 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 : $\Delta\Omega = 2 \times 10^{-5} \text{ sr}$

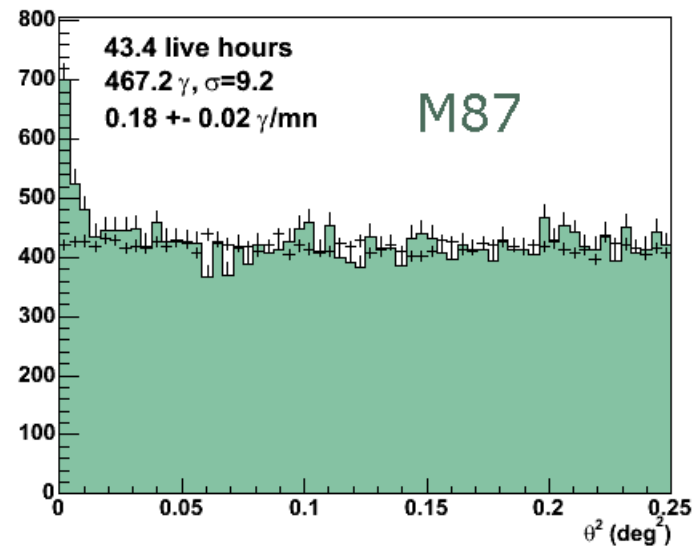
Physique des particules :

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

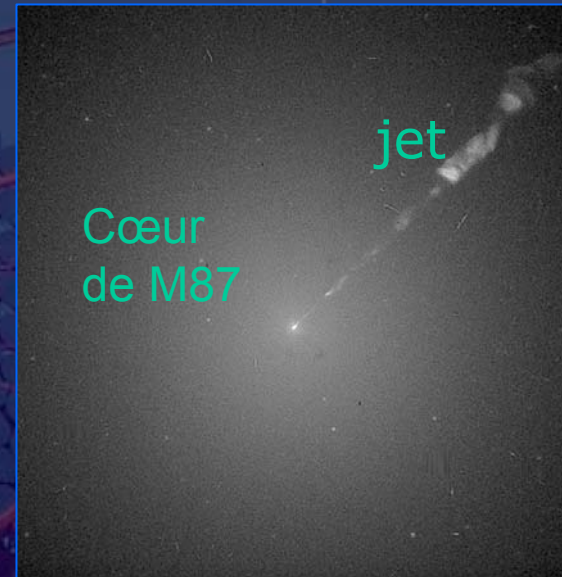
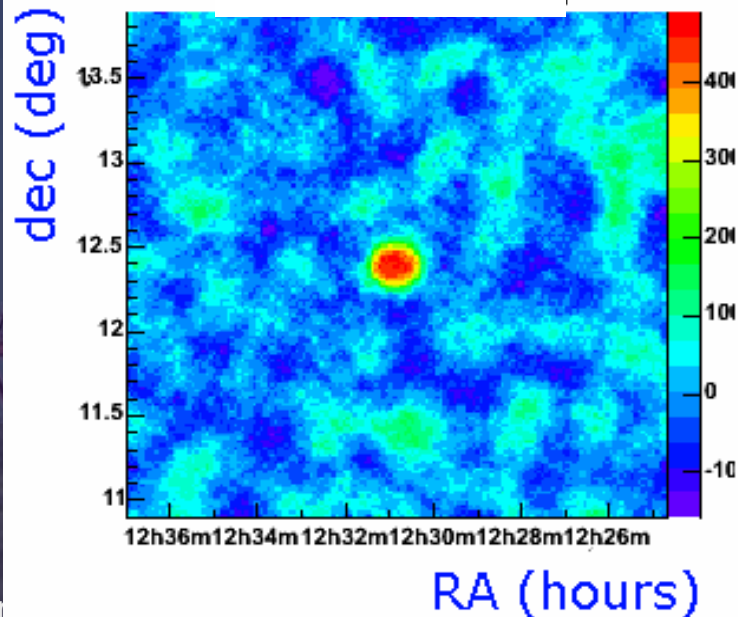
Astrophysique :

Halo de MN
profil de densité

M 87 (Virgo)

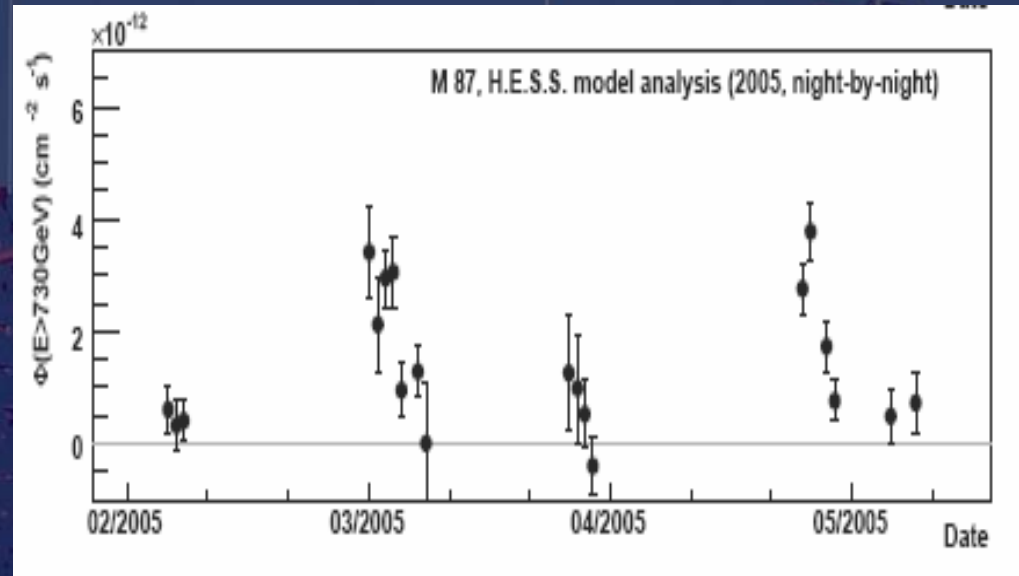
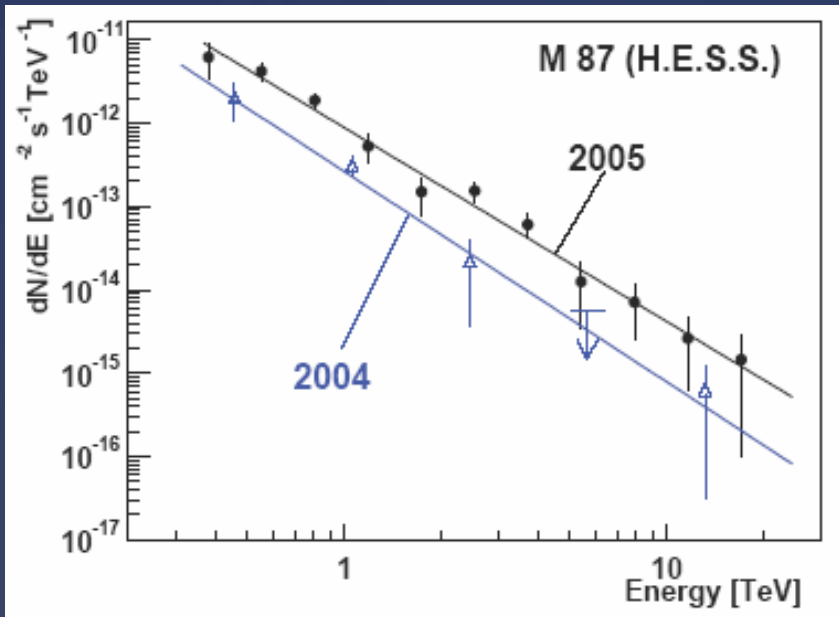


Carte d'excès



- 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 ?



- Prédiction Matière Noire :

$F(E > 730 \text{ GeV}) \sim 10^{-16} \text{ ph/cm}^2/\text{s}$

(avec $M_c = 1 \text{ TeV}$, $cc \rightarrow W/H$,

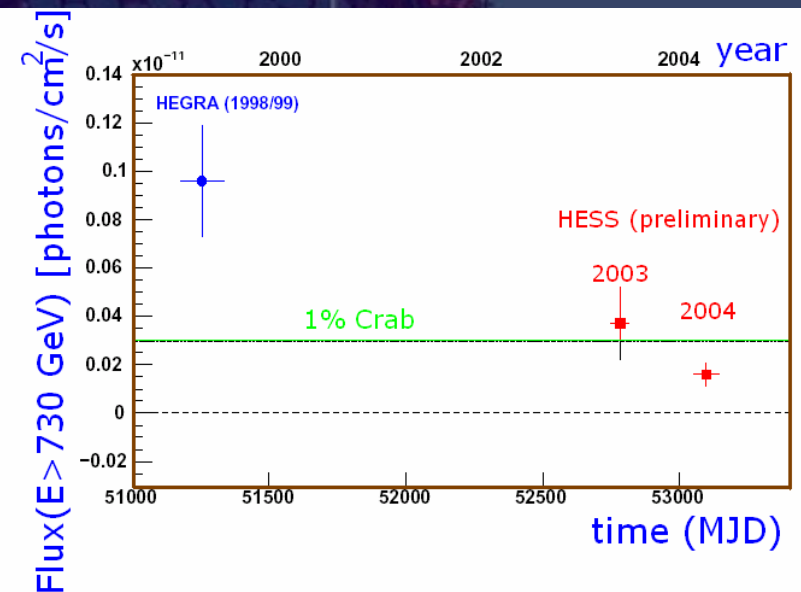
$\langle \sigma v \rangle = 2 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

et profil de Moore optimiste

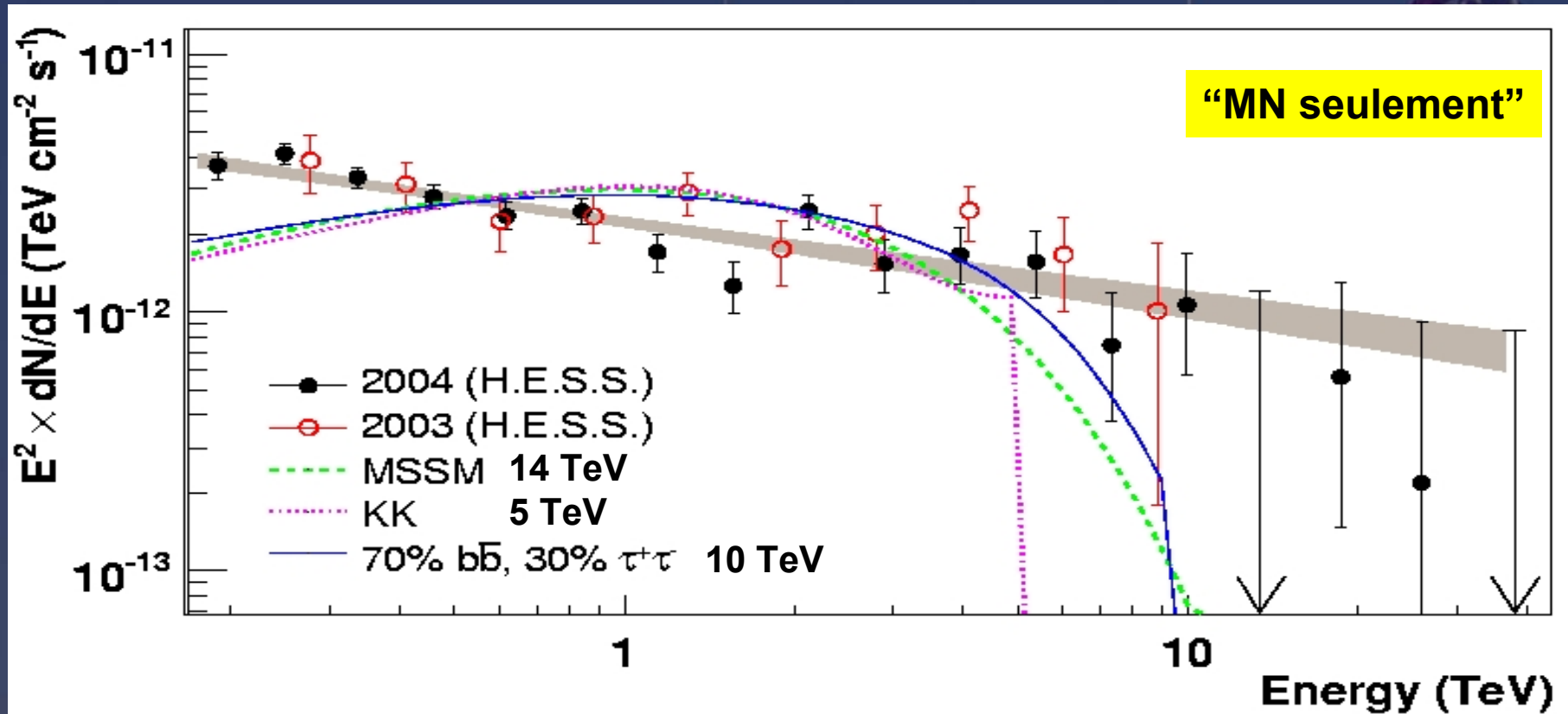
(Fornengo et al 2004))

1000 fois plus faible que le signal observé!

- Indication de variabilité à grande/courte période



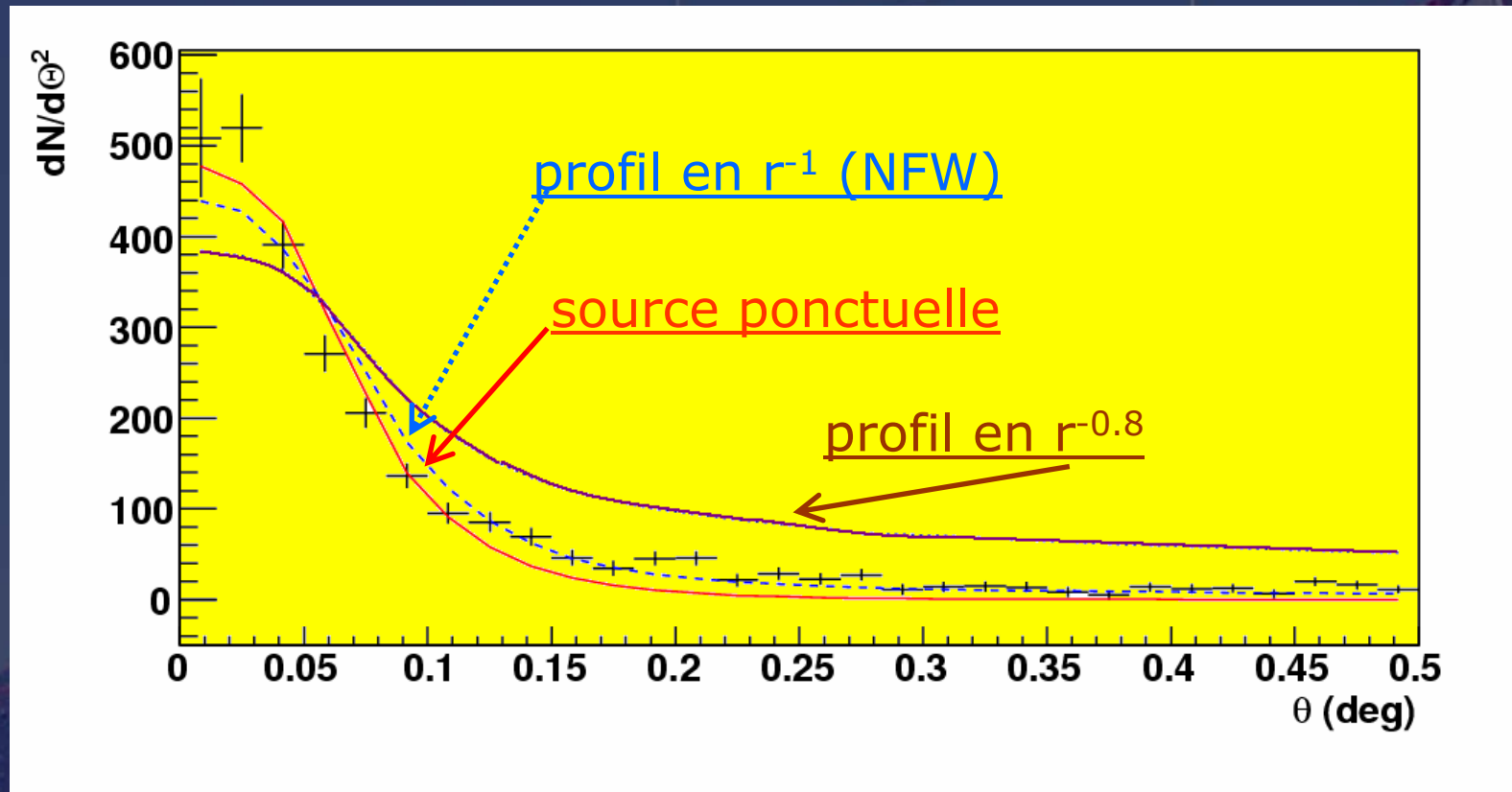
Matière noire en provenance de HESS J1745-290 ?



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**

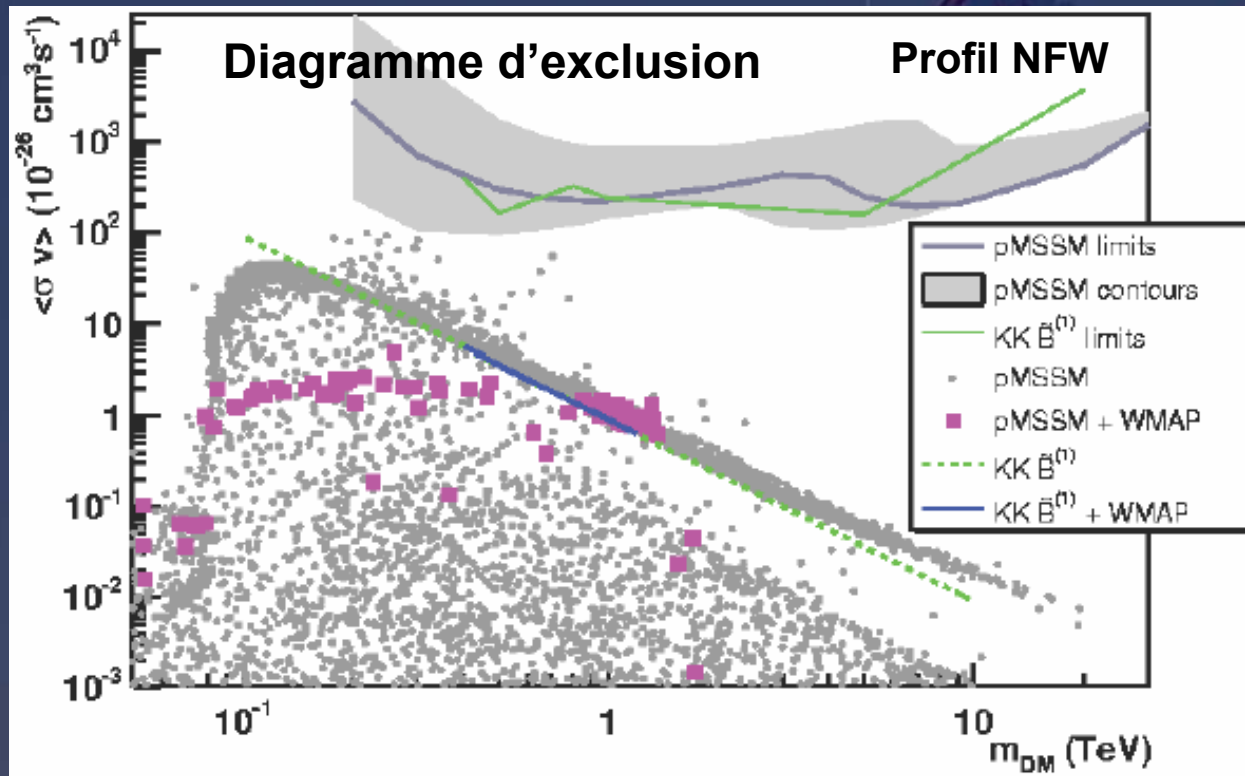
Morphologie de HESS J1745-290



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

- Temps d'observation
48.7 hr
 $\sim 1860 \text{ } \gamma$
 ~ 1700 fond

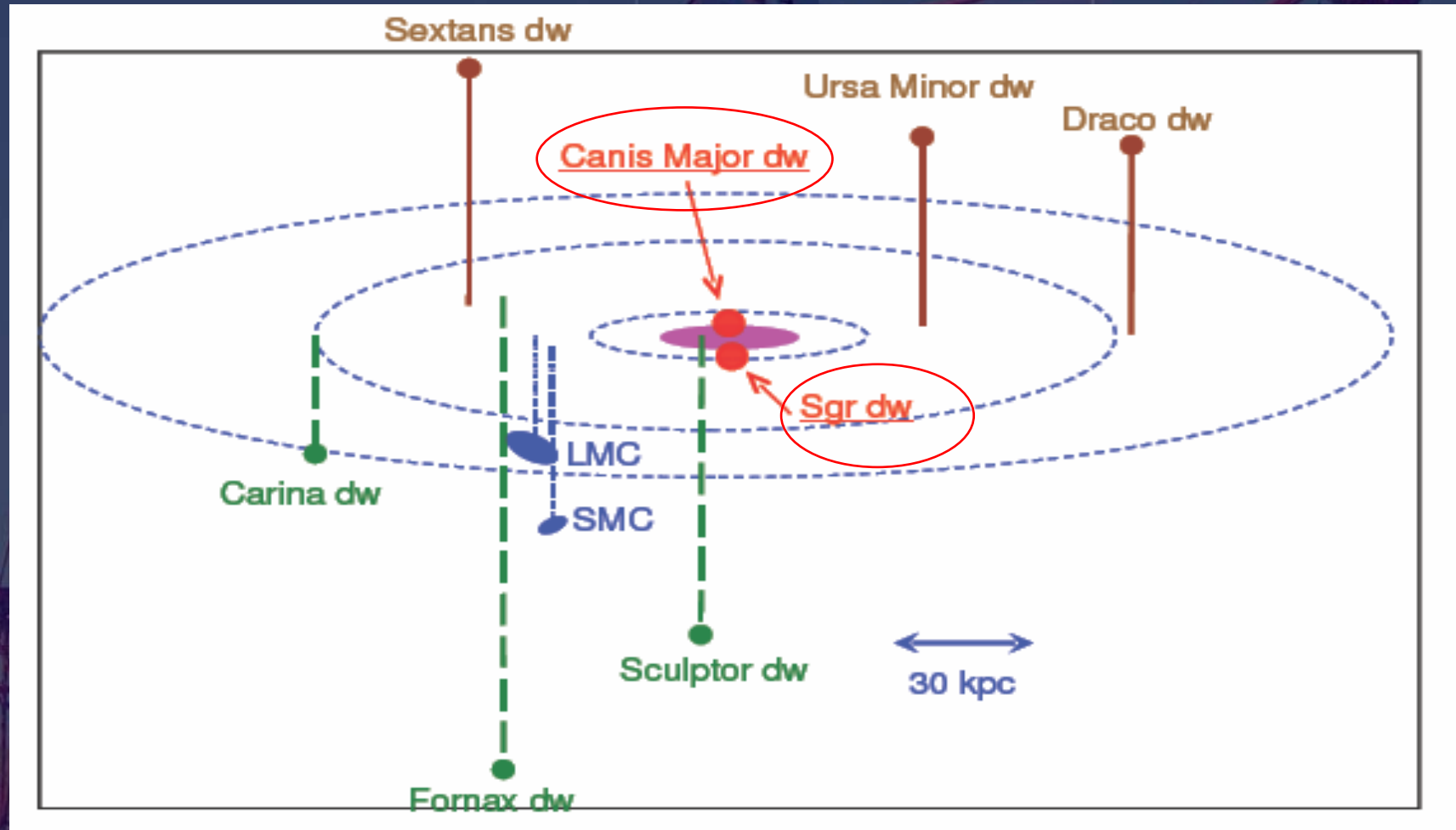
- Bruit de fond diffus autour de la source
 \Rightarrow pas de contrainte sur la forme du halo

- Limite pMSSM :
 $\langle\sigma v\rangle \leq (1\text{-}10) 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

- Limite KK:
 $\langle\sigma v\rangle \leq 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$

Autres sources potentielles ?

Galaxies satellites de la Voie Lactée



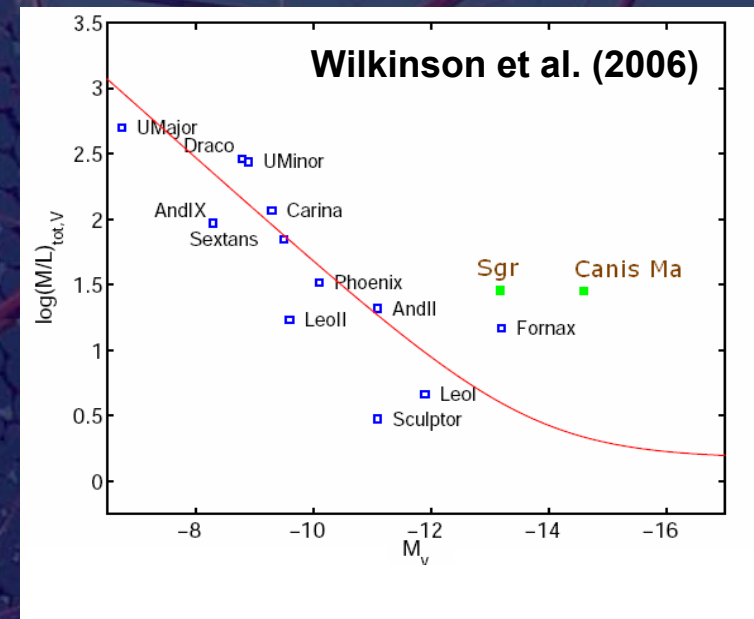
Les galaxies naines sphéroïdales

- 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

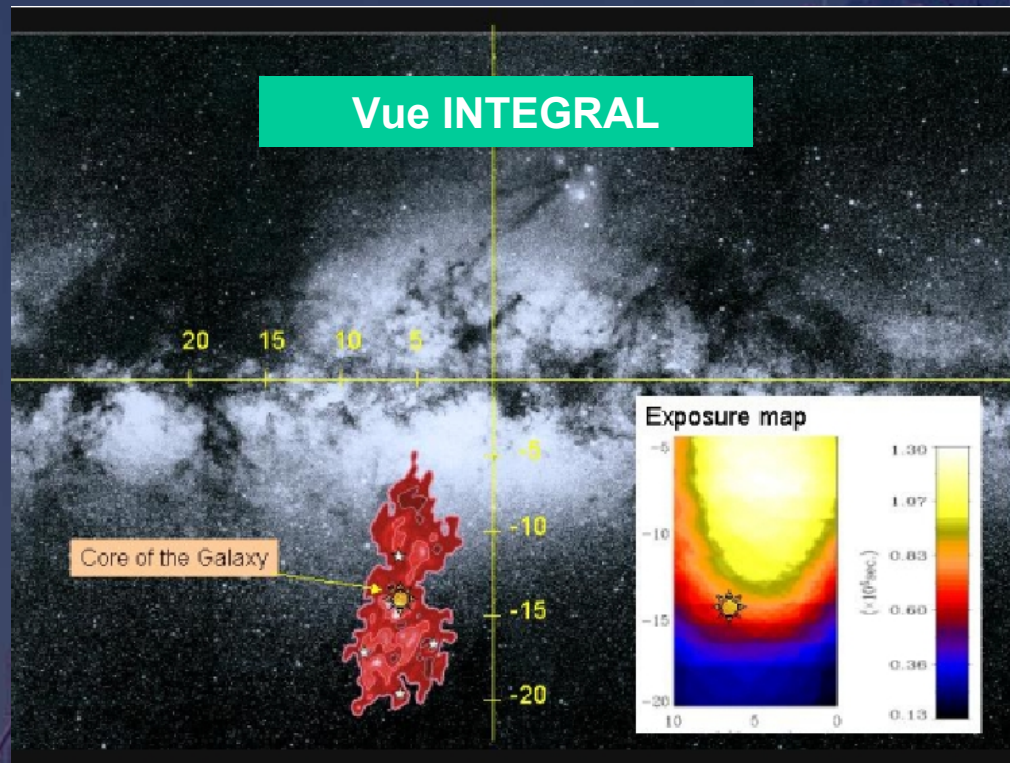


$$\Phi_{\gamma} \propto M_{\text{dark}}/d^2$$

$$M_{\text{dark}} \sim 10^7 M_{\text{solar}}$$

■ Pour les dSph, d est le paramètre important

La galaxie naine sphéroïdale du Sagittaire



- 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

Observée par H.E.S.S. en Juin 2006 !!

Modélisation du halo de matière noire de Sgr

2 composantes dans la partie lumineuse :

- composante compacte : « cusp »

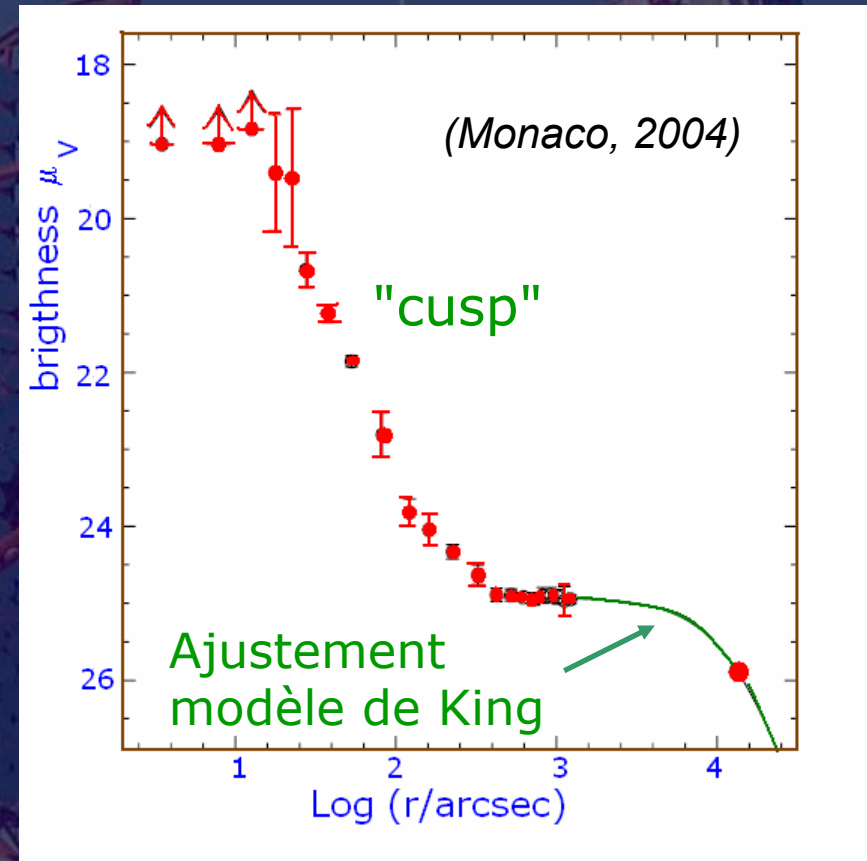
cœur : $r_c = 1.5$ pc

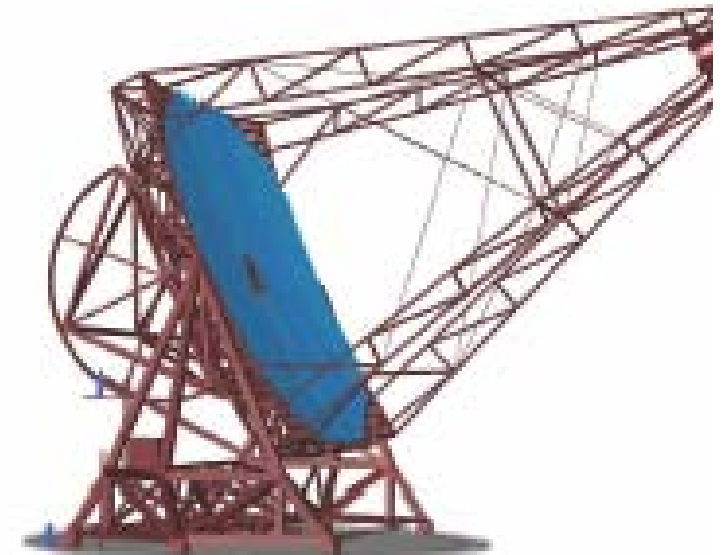
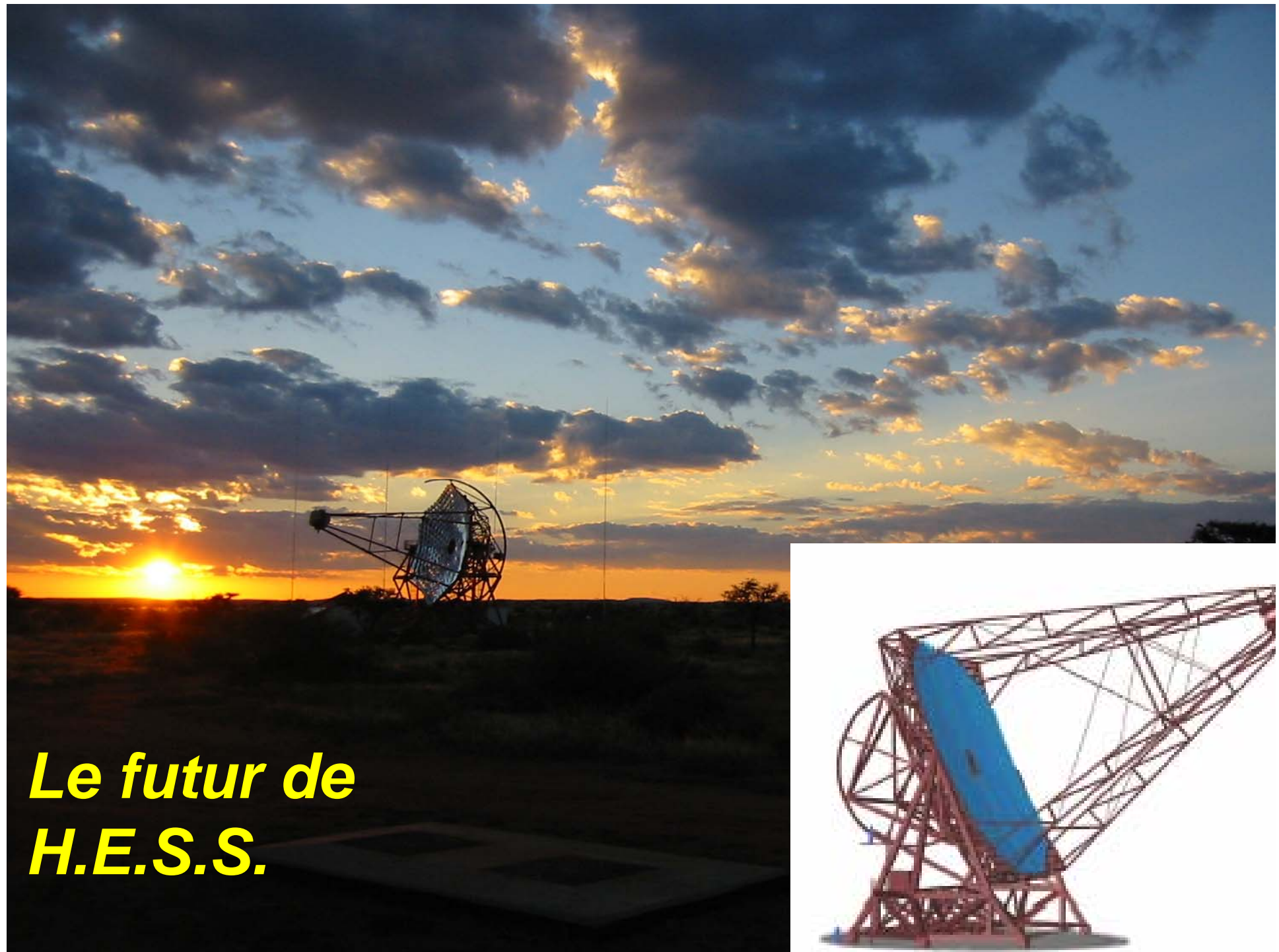
pente du cusp : 2.68

- 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)





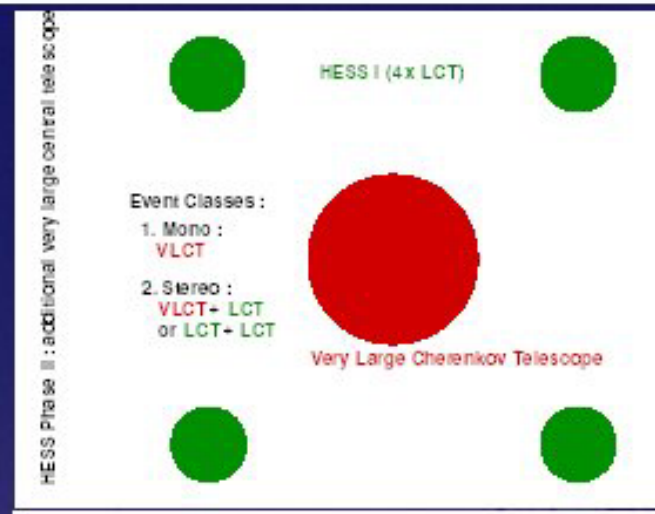
Le futur de H.E.S.S.

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

H.E.S.S. II

Un grand télescope central supplémentaire :

- 28 m de diamètre, ~ 600 m²
- 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

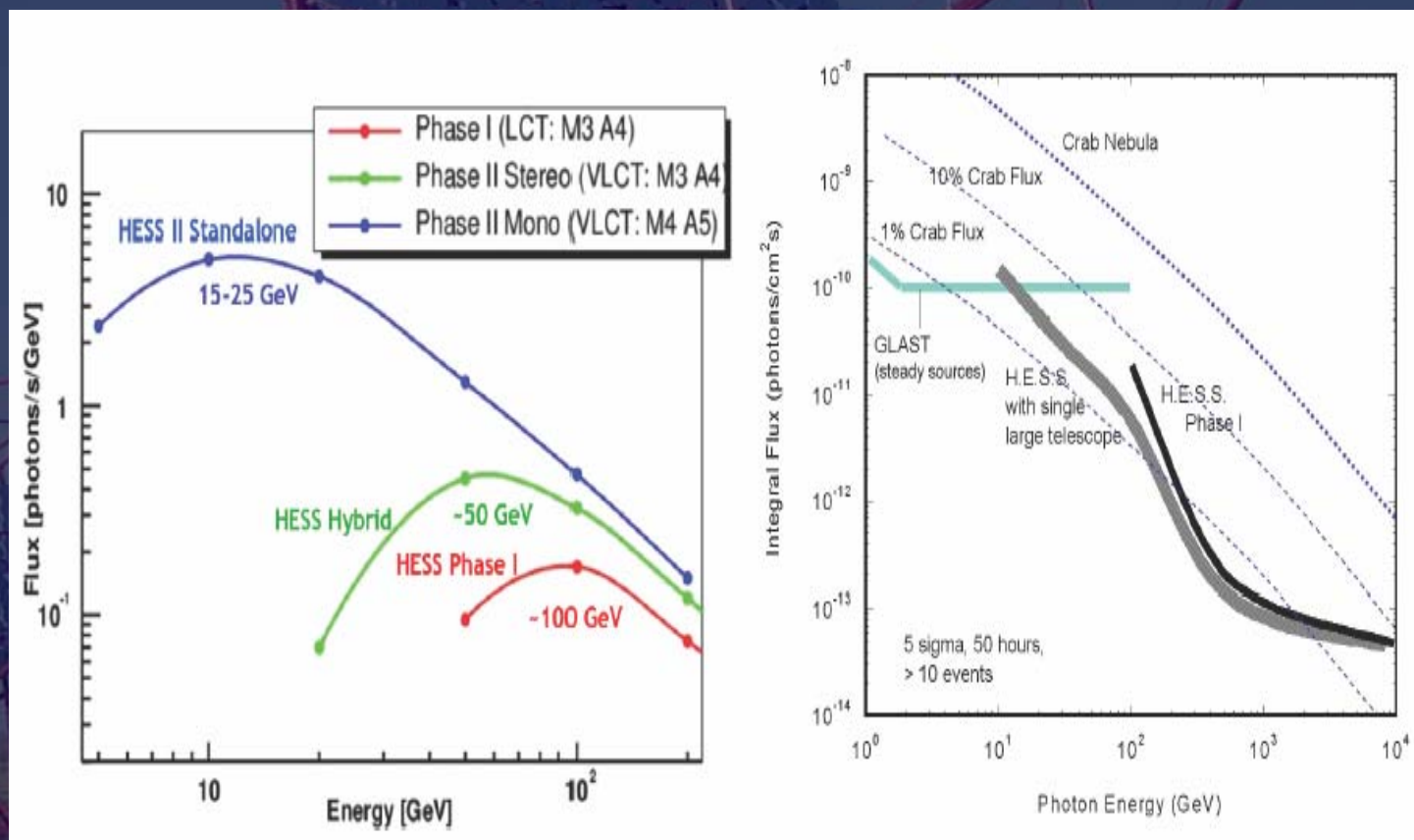
Accéder à de nouvelles sources

2 modes de fonctionnement :

- mode mono
- mode hybride

Plage 20–50 GeV :

- pouvoir de rejet faible
- résolution énergétique et angulaire dégradée

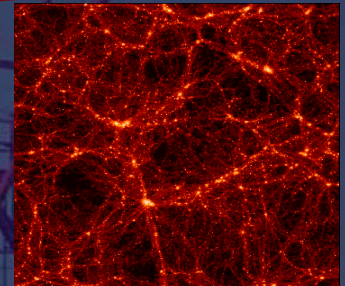


Conclusions

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