

Étalonnage des Caméras de HESS et Observations du Centre Galactique

Loïc Rolland

- L'astronomie γ
- L'expérience HESS
- L'étalonnage
- L'analyse
- Le Centre Galactique



L'astronomie γ , une discipline émergente

Découverte des rayons cosmiques par Victor Hess en 1912

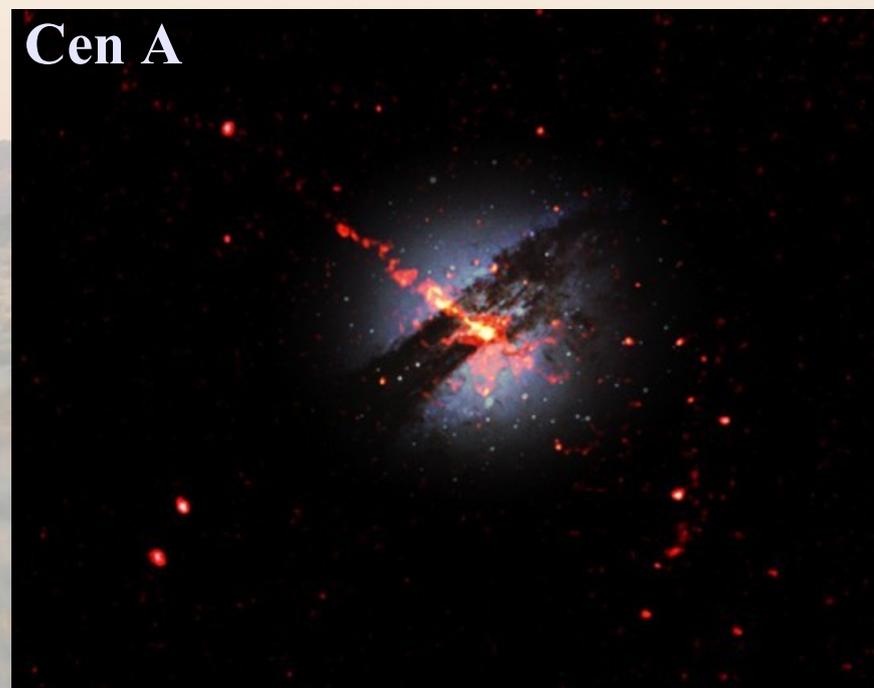
Particules accélérées \rightarrow émission de γ

Naissance de l'astronomie γ \sim 1970

Nébuleuse du Crabe



Cen A



L'origine du rayonnement γ

- **Protons ou hadrons de haute énergie**

- $p + \text{noyau} \rightarrow X \pi^0 \rightarrow X \gamma\gamma$

- **Electrons de haute énergie**

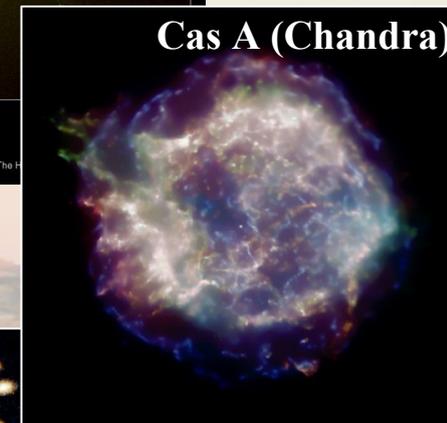
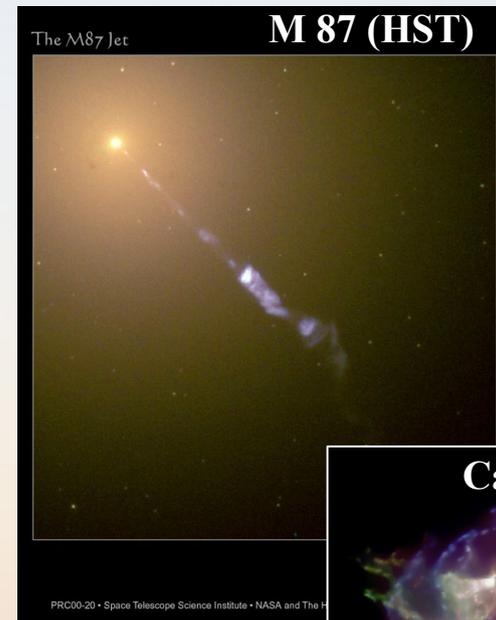
- Pertes synchrotrons

- Bremsstrahlung

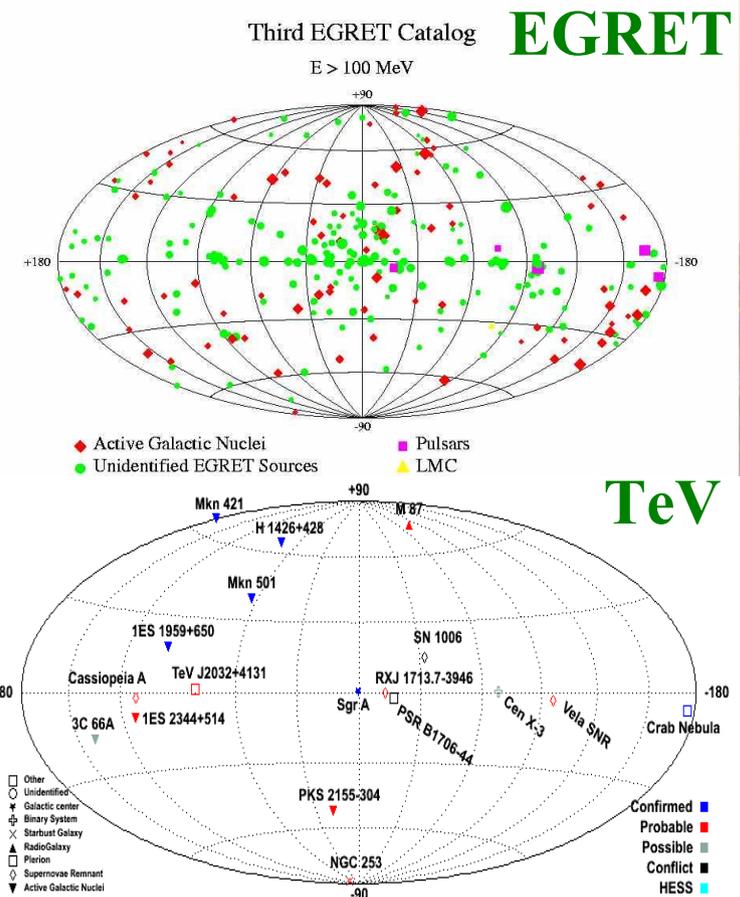
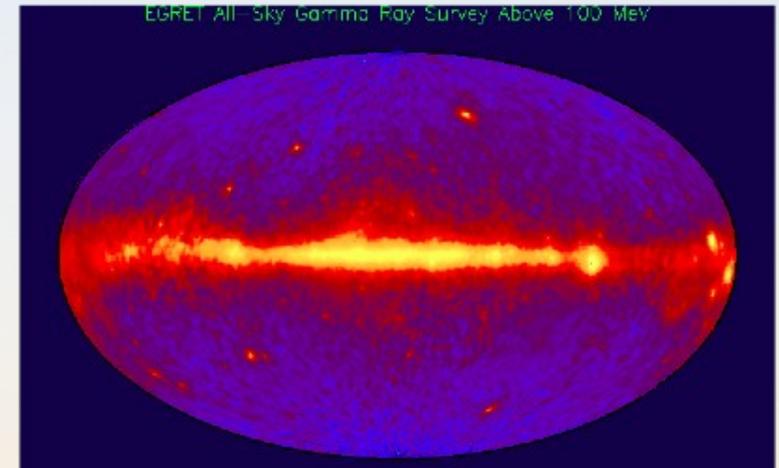
- Diffusion Inverse-Compton

- **Annihilation de matière noire**

- $\chi\chi \rightarrow X \gamma$



Les sources γ détectées

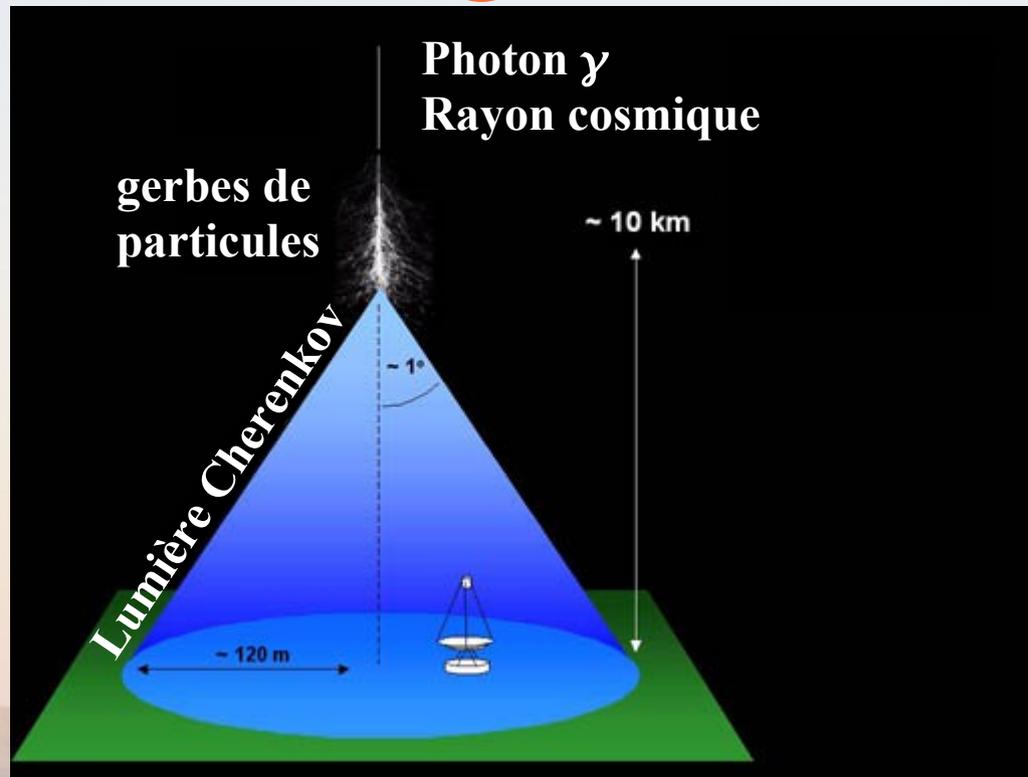


- **EGRET (100 MeV \rightarrow 10 GeV)**
 - **EMISSION DIFFUSE GALACTIQUE**
 - Interactions RC-milieu interstellaire
 - 66(+27) AGNs, 5 pulsars
 - 170 non identifiées

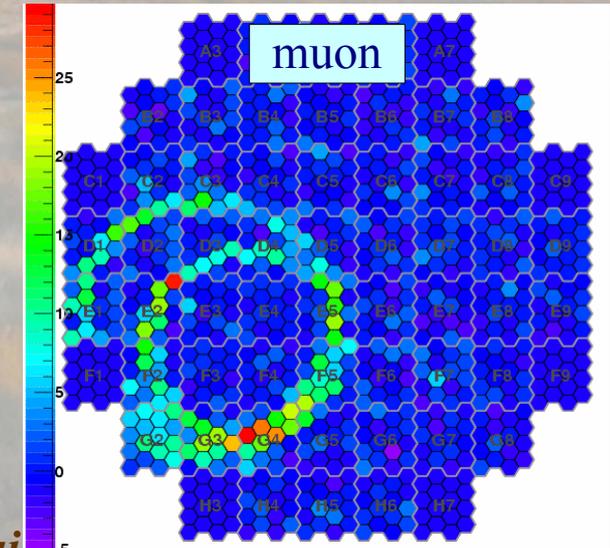
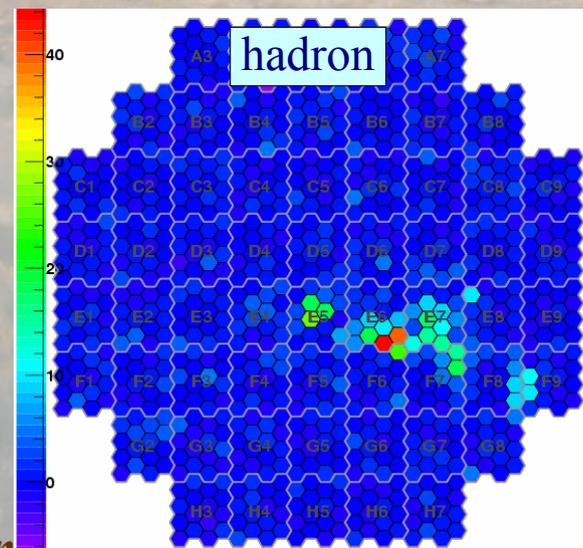
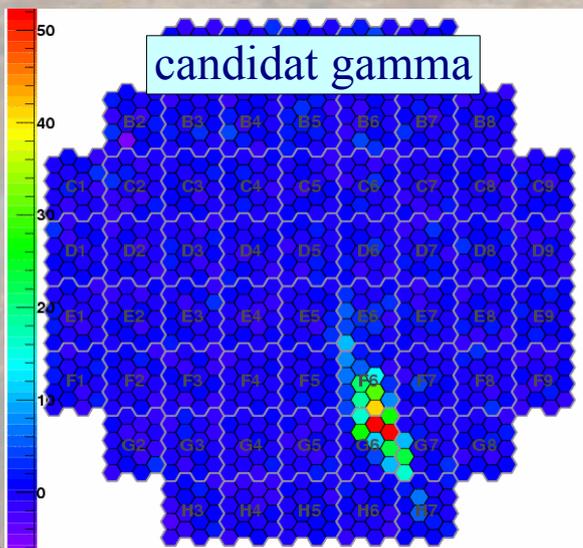
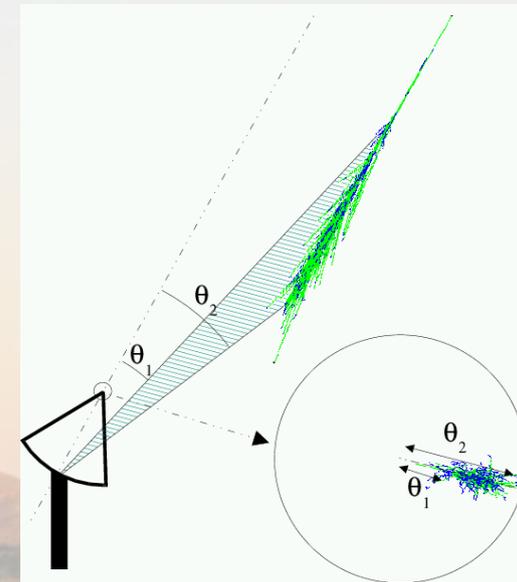
- **Ciel γ avant HESS (~1 TeV)**
 - 3 plérions, 3 SNRs, centre galactique
 - 7 AGNs, 1 galaxie à formation d'étoiles
 - 1 source non identifiée

Seulement 6 sources confirmées

L'imagerie Cherenkov atmosphérique



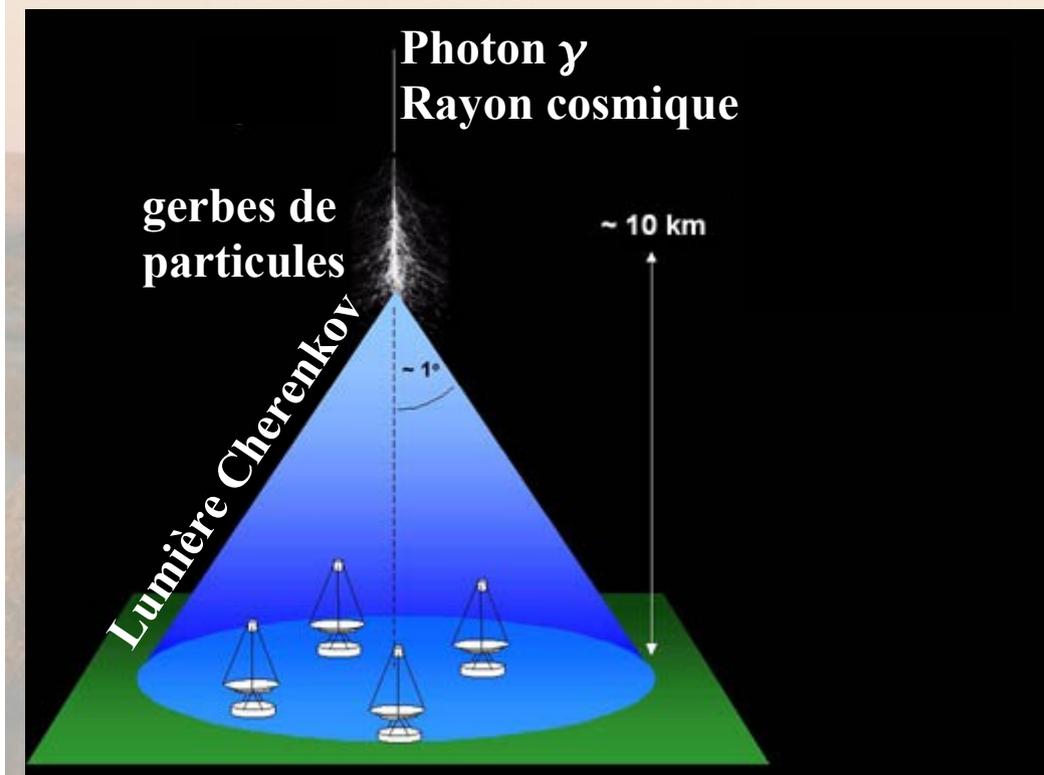
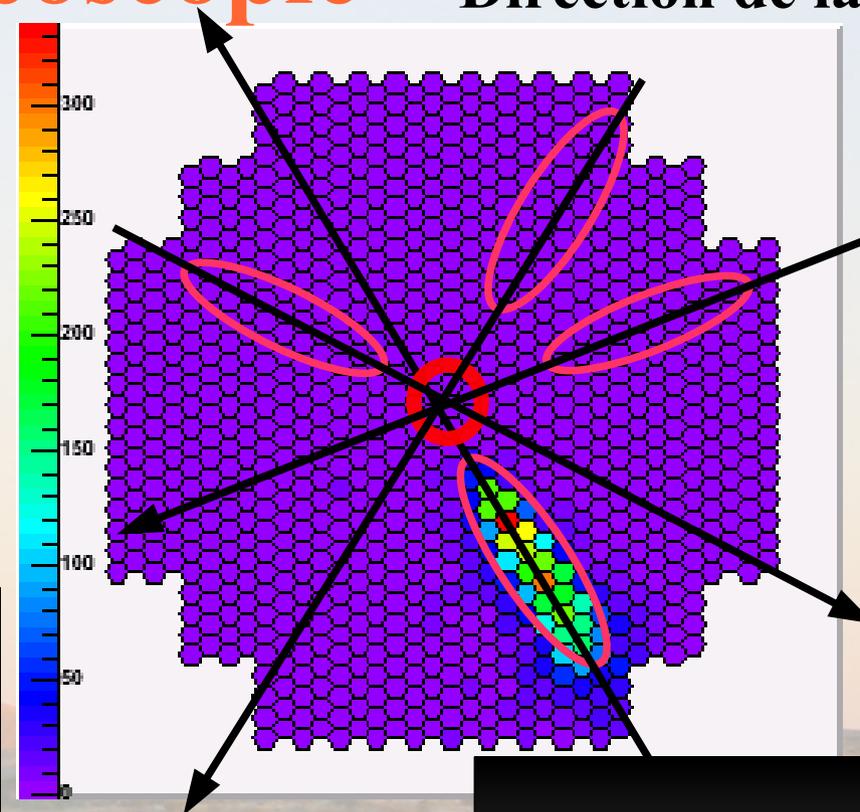
- Atmosphère = calorimètre
- Image des flashes Cherenkov (~ 3 ns)



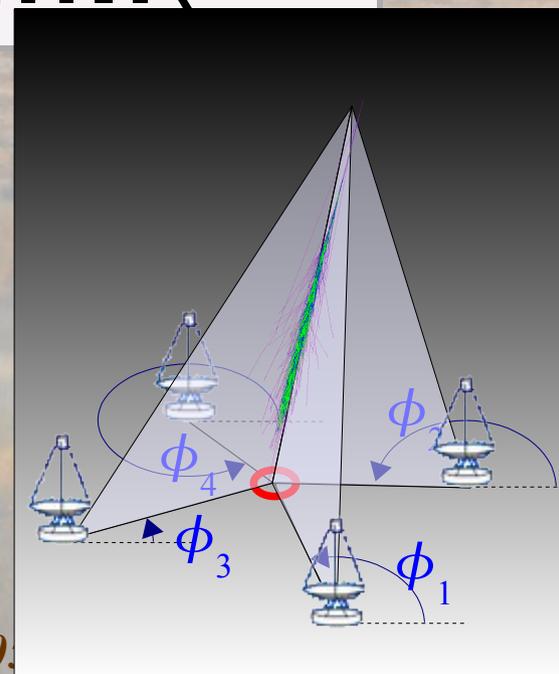
La stéréoscopie

Direction de la source

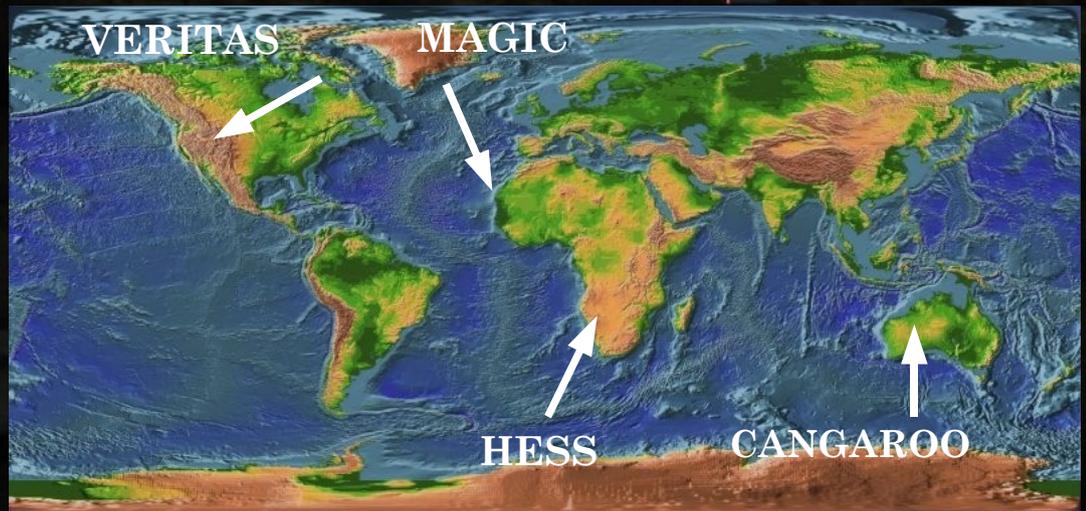
- **Éliminer les muons isolés**
- **Baisser le seuil**
- **Améliorer la réjection hadronique**
- **Améliorer la reconstruction des γ**



Paramètre
d'impact
du γ



LE DETECTEUR HESS



HESS : un instrument de 3ème génération

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



• Télescopes

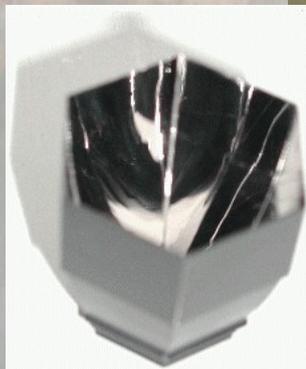
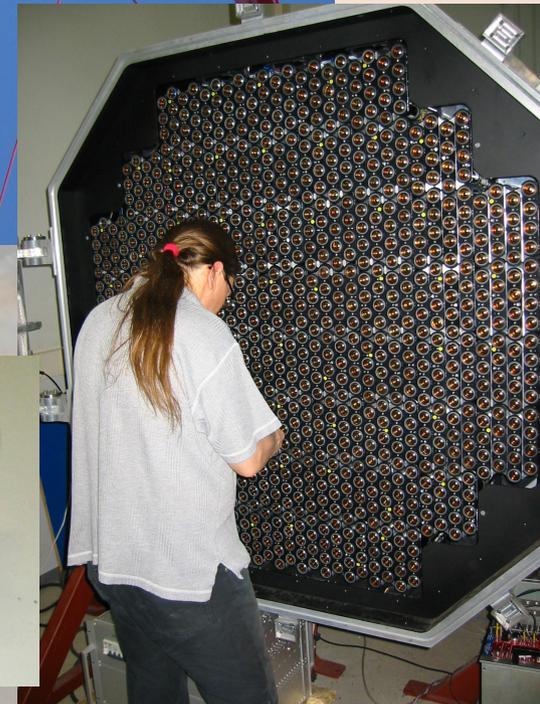
- Réflecteur Davies-Cotton segmenté, 12 m de diamètre
- Focale : 15 m
- PSF du miroir $\sim 9'$ sur axe
- Précision de pointe : $8''$



HESS : un instrument de 3ème génération

• Caméras

- 960 pixels (PMs), diamètre 0,16°
- Champ de vue : 5°
- Electronique rapide
 - Echantillonnage 1 ns
 - Fenêtre de lecture 16 ns
 - Décision de déclenchement ~ 70 ns
- Electronique embarquée
 - (3 câbles vers le sol)
- Modulaire
- ~ 1 tonne



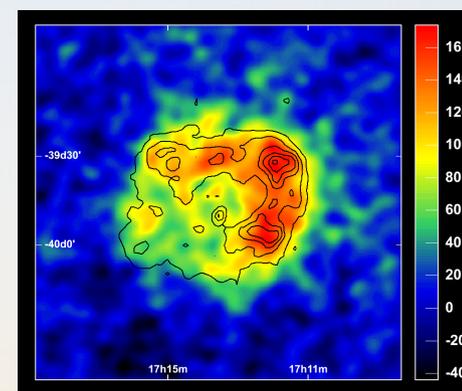
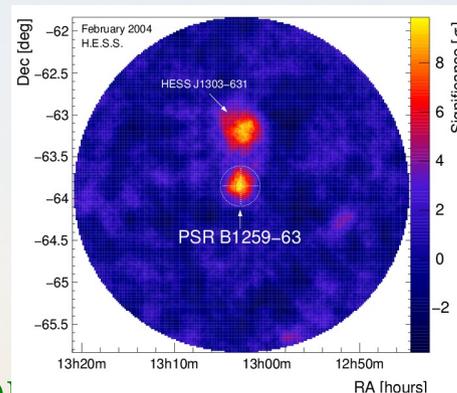
La construction

- **11 juin 2002** : 1ère lumière
- **5 mars 2003** : 2ème télescope
- **juin 2003** : déclenchement central
- **septembre 2003** : 3ème télescope
- **décembre 2003** : 4ème télescope



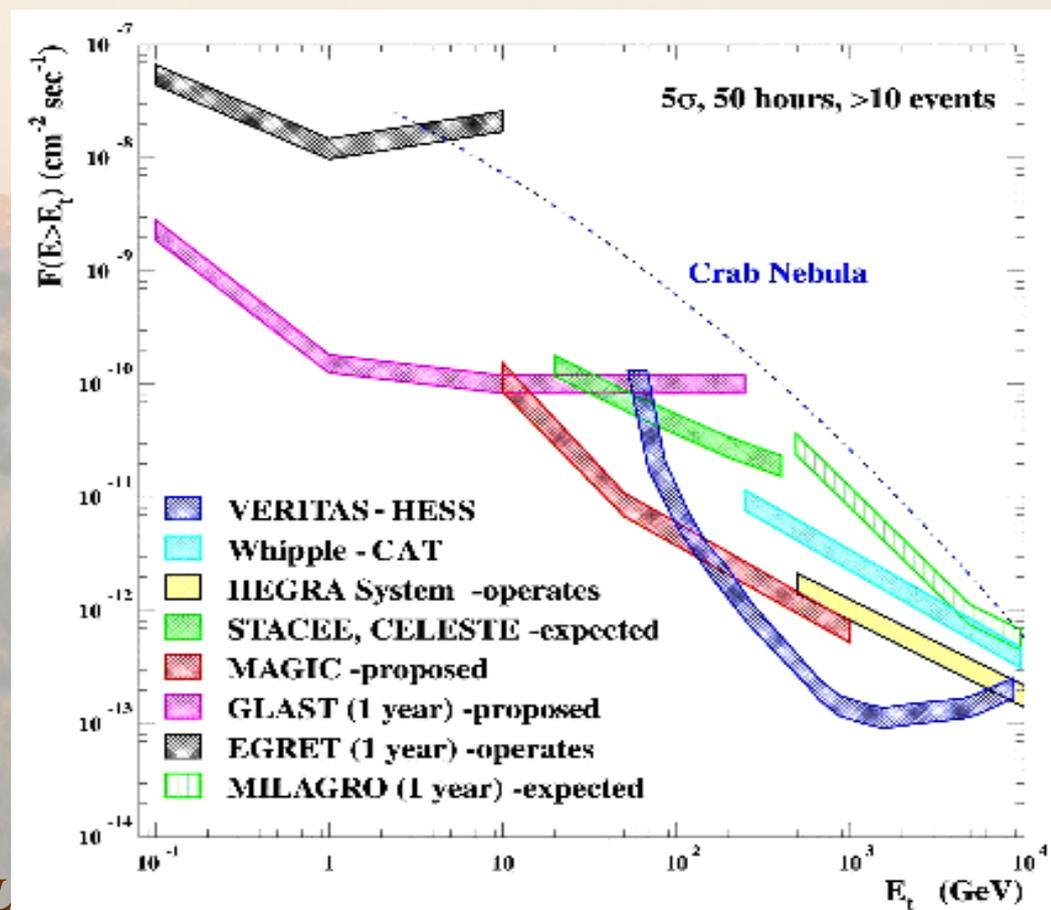
Les performances réelles

- Taux de déclenchement ~ 400 Hz
- Temps mort $\sim 10\%$
- Seuil ~ 100 GeV au zénith
- Résolution angulaire $\sim 6'$ gerbe à gelée
- Résolution en énergie $\sim 15\%$

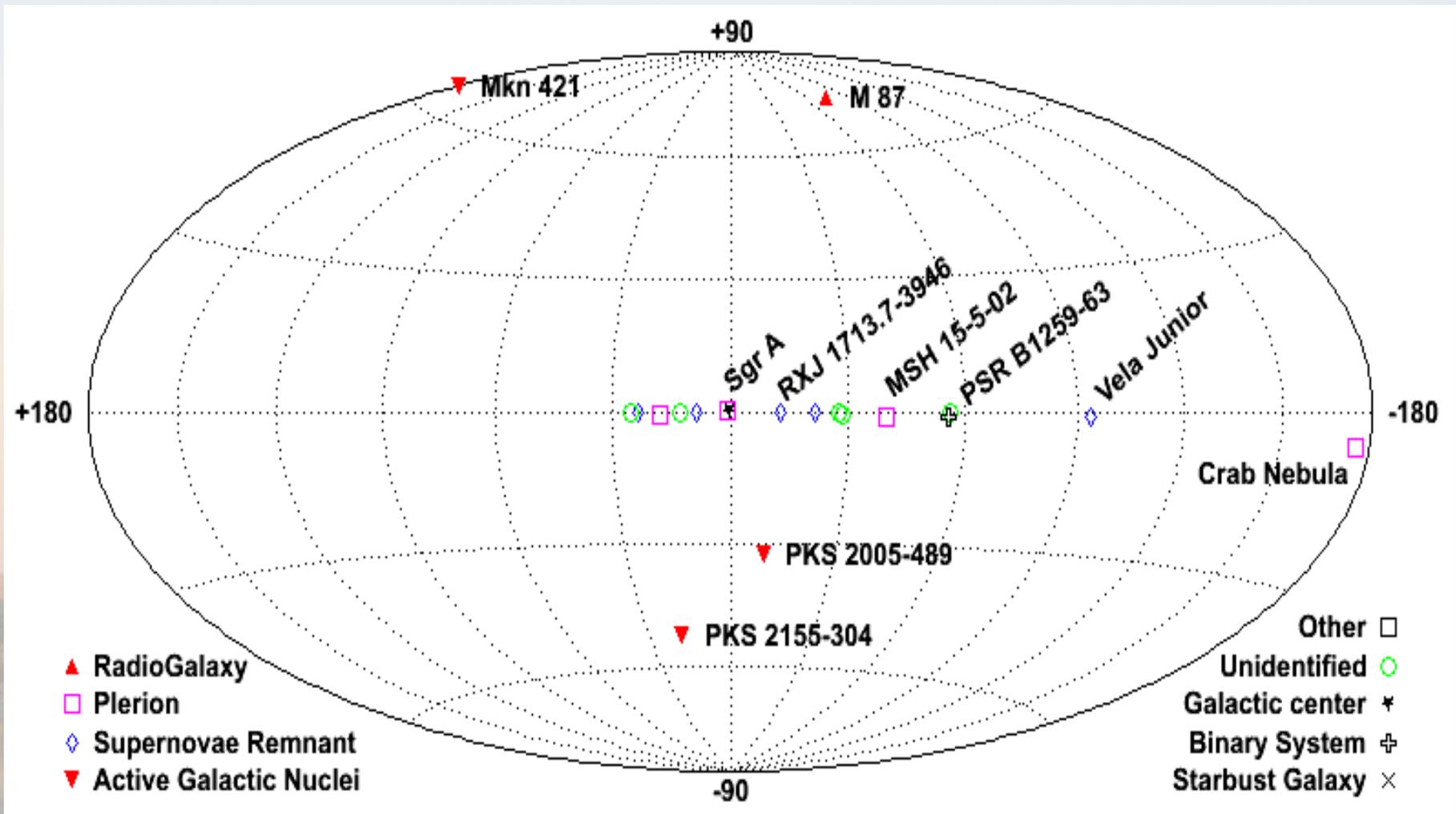


Détection Nébuleuse du Crabe au zénith :

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



Les premières sources vues par HESS



- 16 sources galactiques
- 4 sources extragalactiques

Mes contributions dans la collaboration HESS

Mise en place d'une
chaîne d'étalonnage

Développement d'une méthode
de reconstruction spectrale

Développement d'une méthode
de reconstruction de la
morphologie

Analyse du Centre Galactique

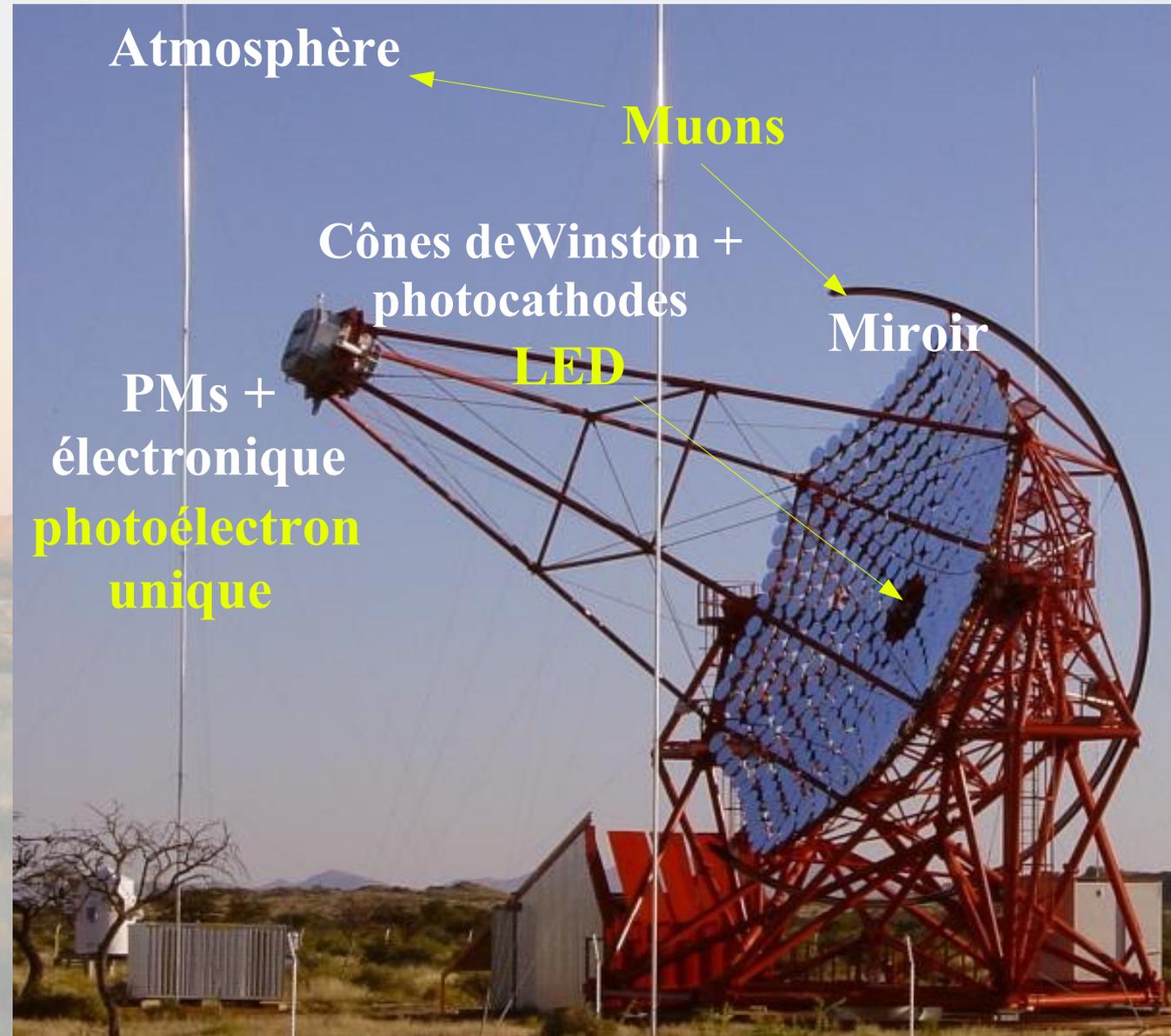


ETALONNAGE DES CAMERAS

Outils dédiés à l'étalonnage

Signal mesuré
en pas d'ADC

Nombre de
photo-électrons



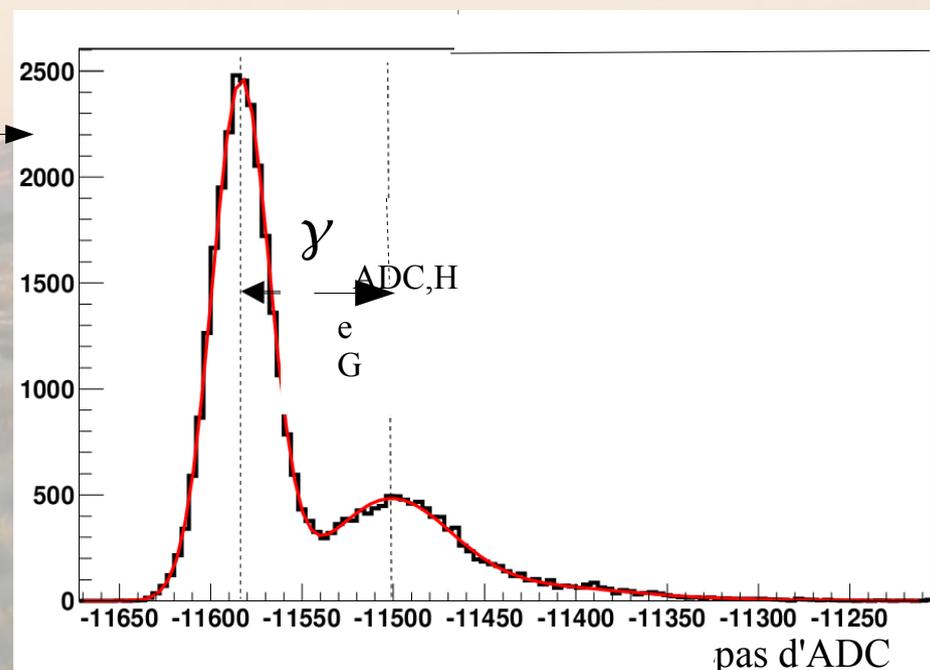
Les paramètres à étalonner

Calcul de l'amplitude du signal :

voie haut gain $A^{HG} = \frac{ADC^{HG} - P^{HG}}{\gamma_e^{ADC,HG}} \times FF$

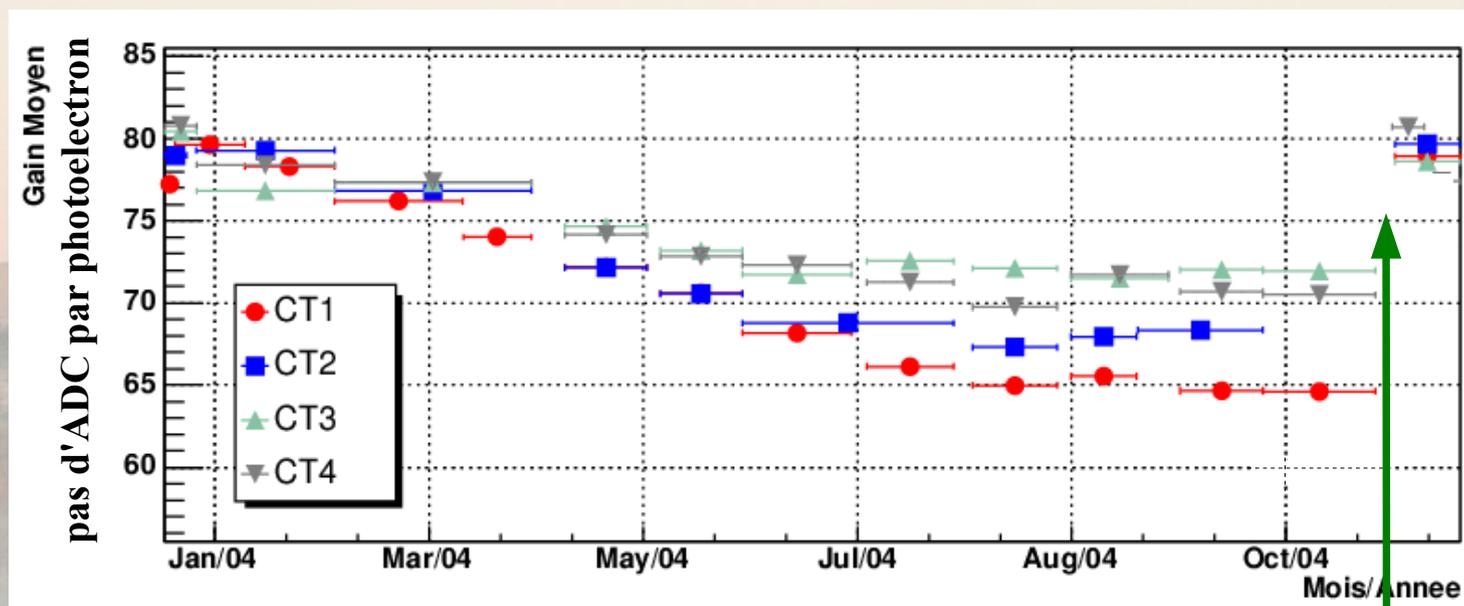
voie bas gain $A^{BG} = \frac{ADC^{BG} - P^{BG}}{\gamma_e^{ADC,HG}} \times (HG/BG) \times FF$

- **Piédestaux** P^{HG} et P^{LG}
 - **Gains des voies d'acquisition** $\gamma_e^{ADC,HG}$ et HG/BG
 - **Corrections d'inhomogénéité de collection de lumière** FF
 - **Pixels non opérationnels** ($<5\%$)
- **Bruit de fond du ciel dans les pixels**



Stabilité des paramètres d'étalonnage

- gain et flat-field : stables avec la température
- gain : diminution de $\sim 10\%$ en un an



réajustement
des hautes tensions

Estimation des erreurs systématiques

- **2 chaînes d'étalonnage indépendantes pour HESS :**
 - **estimation des erreurs systématiques**
 - **erreur sur le piédestal $< 0,1$ photo-électron**

• **erreur sur l'amplitude de l'image $\sim 5\%$**

→ **Publication dans Astroparticle Physics 22, 109-125 (2004) :**
Calibration of cameras of the HESS detector



ANALYSE DES IMAGES

Objectifs de l'analyse

- Sélection des images de gerbes électromagnétiques
- Réjection des images de gerbes hadroniques

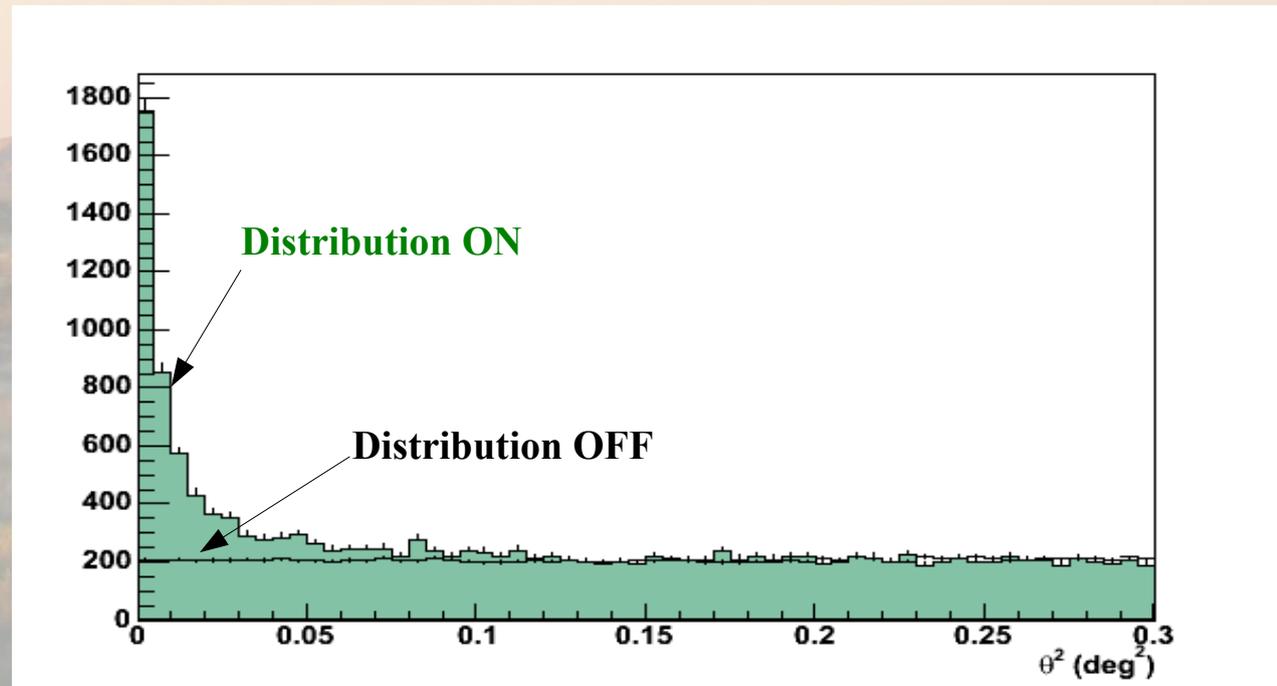
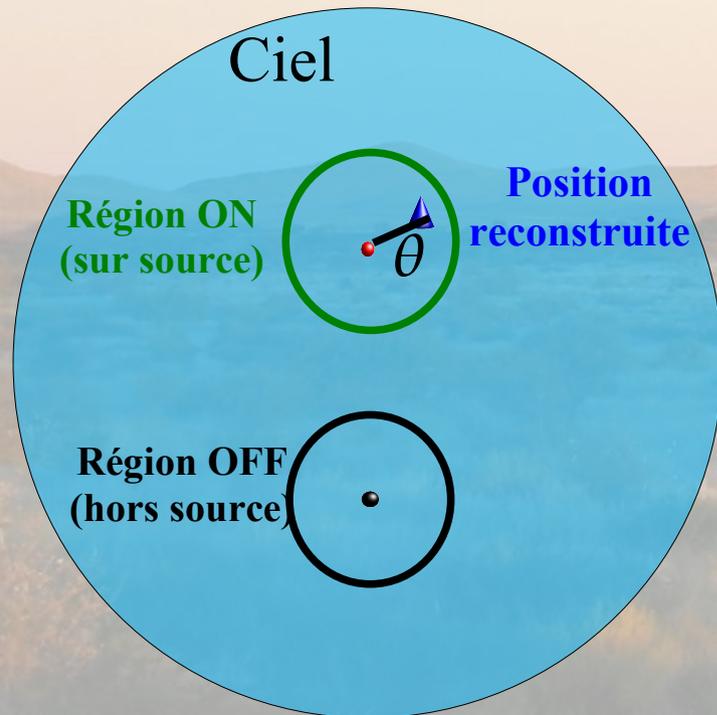
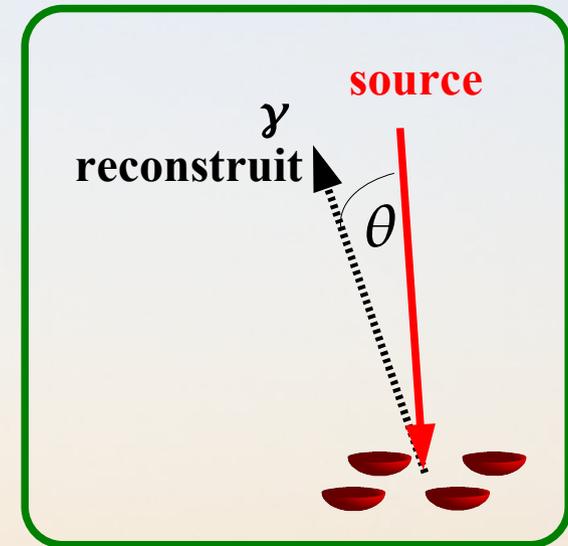
- Reconstruction des γ
:
 - direction
 - énergie



- Résultats :
 - position
 - morphologie
 - spectre

Définition de θ , estimation du fond

- θ : distance angulaire entre la source et la position reconstruite du γ
- Régions de contrôle du fond hadronique



Analyse par modèle semi-analytique d'image

Paramètres : énergie, paramètre d'impact, angle zénithal

• **Modèle** : développement des gerbes électromagnétiques

- évolution du nombre de particules chargées e^+e^-
- distribution en énergie des e^+e^-
- distribution angulaire des e^+e^-
- distribution spatiale des e^+e^-

Développement temporel de l'image dans le plan focal

• **Prise en compte des paramètres du détecteur**

- efficacité de collection de lumière
- système de déclenchement, fenêtre de lecture
- résolution angulaire

Image dans la caméra : amplitude de chaque pixel

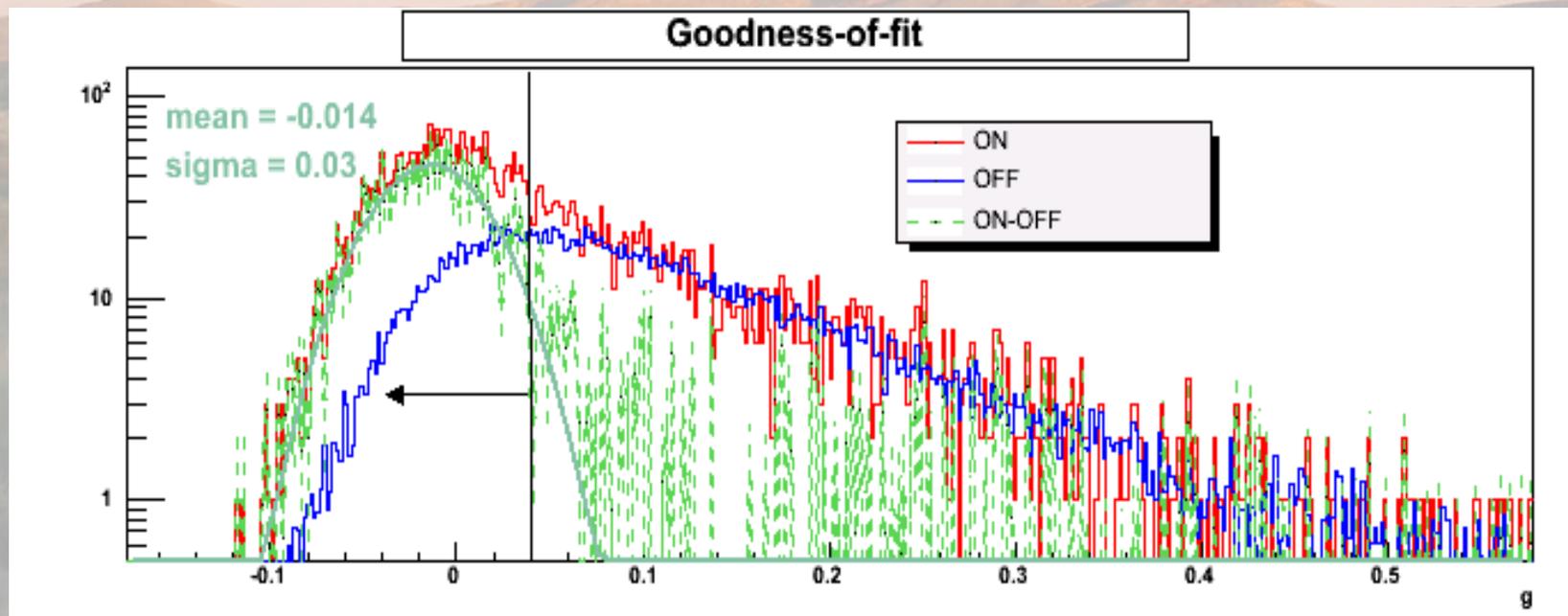
Analyse par modèle semi-analytique d'image

- **Ajustement des images-modèles sur les images réelles**

- Maximum de vraisemblance
- Distribution poissonnienne du nombre de photo-électrons
- Bruit du ciel de chaque pixel pris en compte

- **Paramètre discriminant γ -hadrons**

- Qualité de l'ajustement



Objectifs de l'analyse

- Sélection des images de gerbes électromagnétiques
- Réjection des images de gerbes hadroniques

- Reconstruction des γ :
 - direction
 - énergie

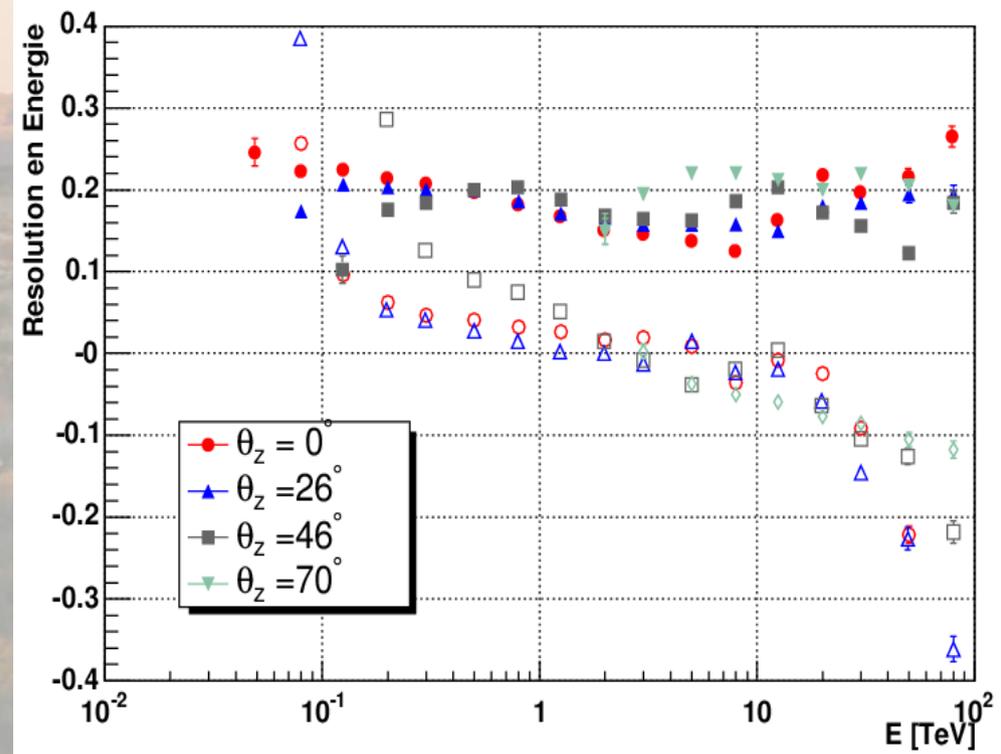
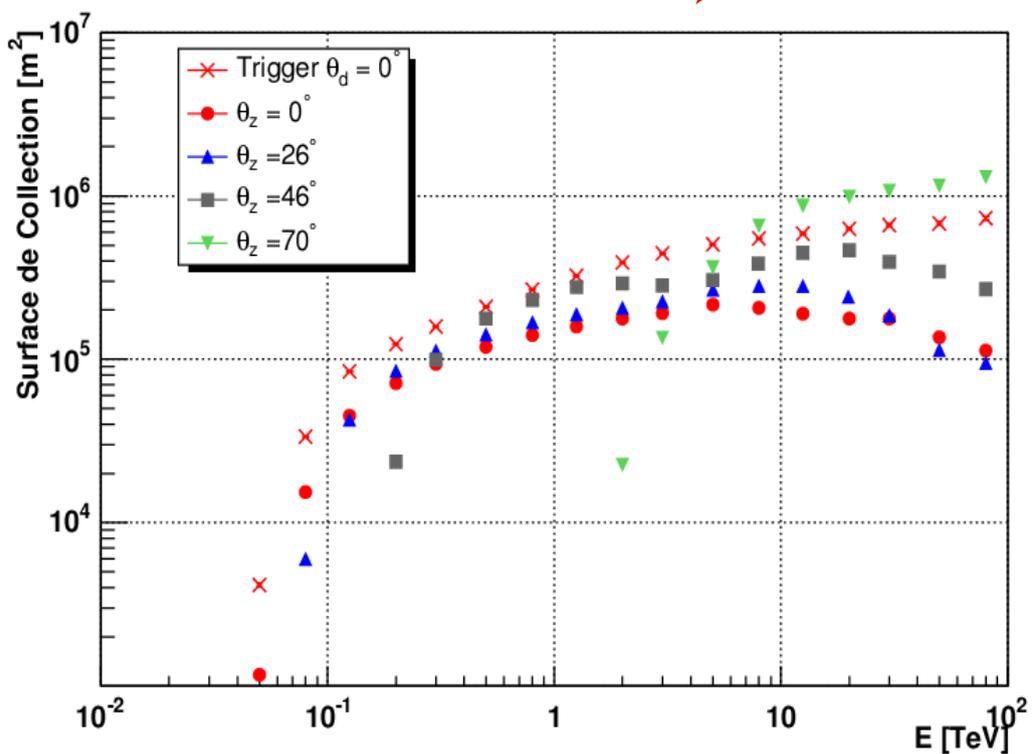
- Résultats :
 - position
 - morphologie
 - spectre

Reconstructions spectrale et morphologique

Réponse du détecteur

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

Forme spectrale

Forme angulaire



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

2 - Convolution

Réponse du
détecteur

Forme spectrale



Surface de collection
Résolution en énergie

Forme angulaire



Résolution angulaire



Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

Forme spectrale

Forme angulaire

2 - Convolution



Réponse du
détecteur

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire

→ Distribution attendue dans les données

Reconstructions spectrale et morphologique

1 - Hypothèse

Forme spectrale

Forme angulaire

2 - Convolution



Réponse du
détecteur

Surface de collection
Résolution en énergie

Résolution angulaire

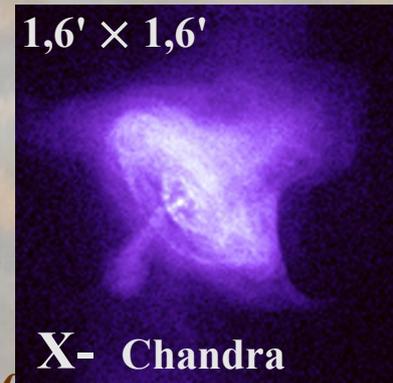
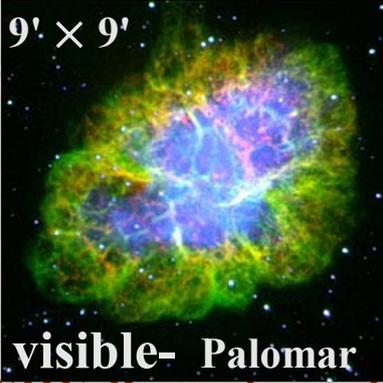
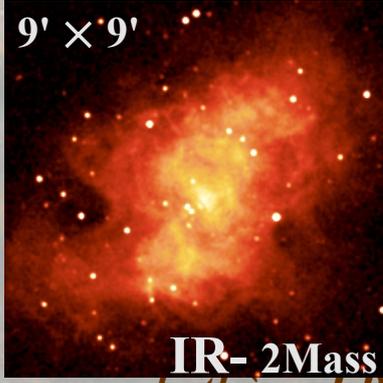
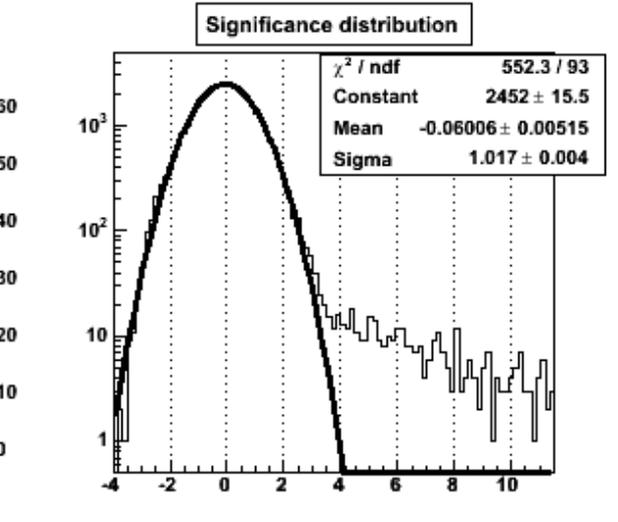
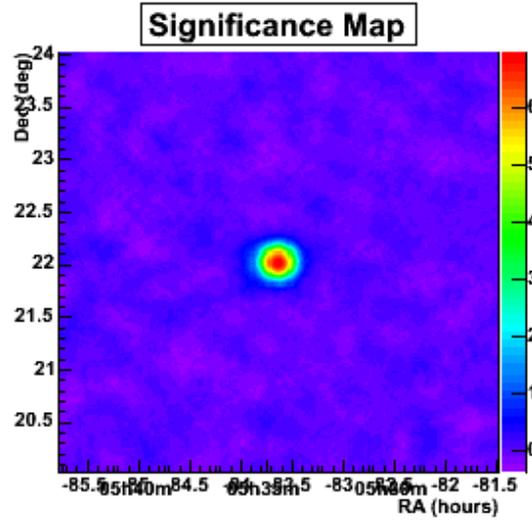
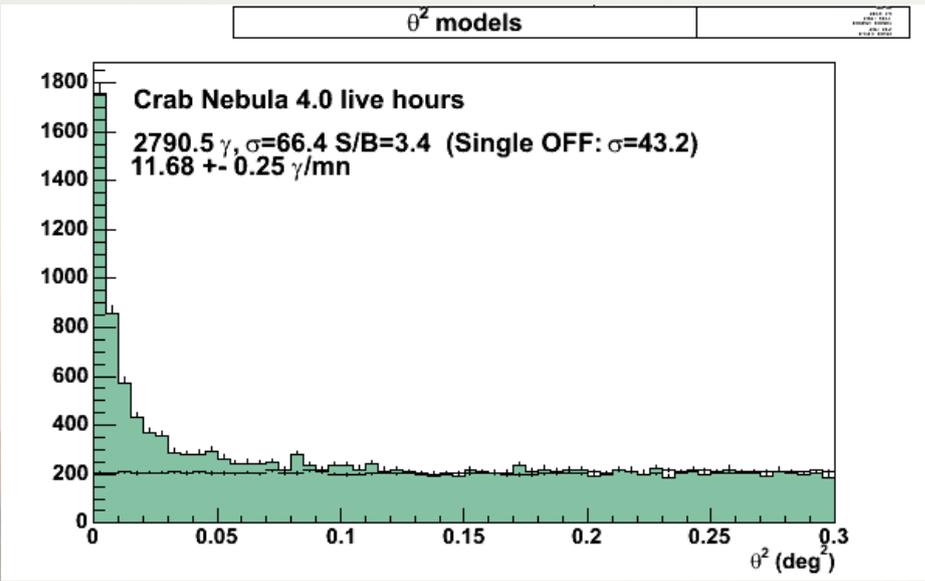
→ Distribution attendue dans les données

3 - Ajustement par maximum de vraisemblance

Observations du Crabe par HESS

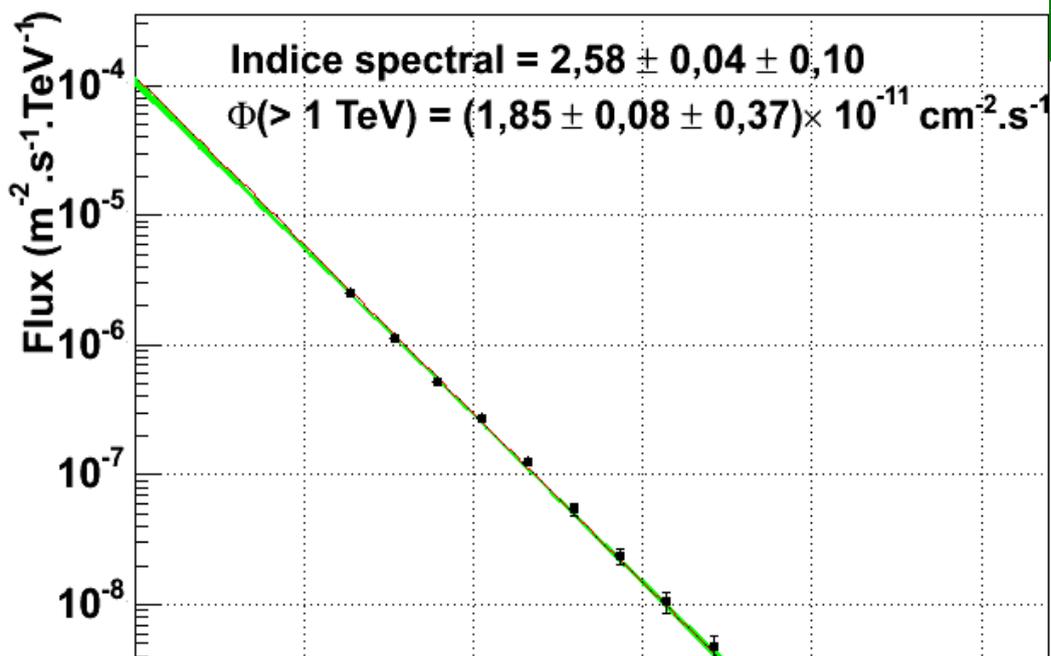
• 4 heures en 2003 avec 3 télescopes

• Signal : 67σ
• 2800 γ

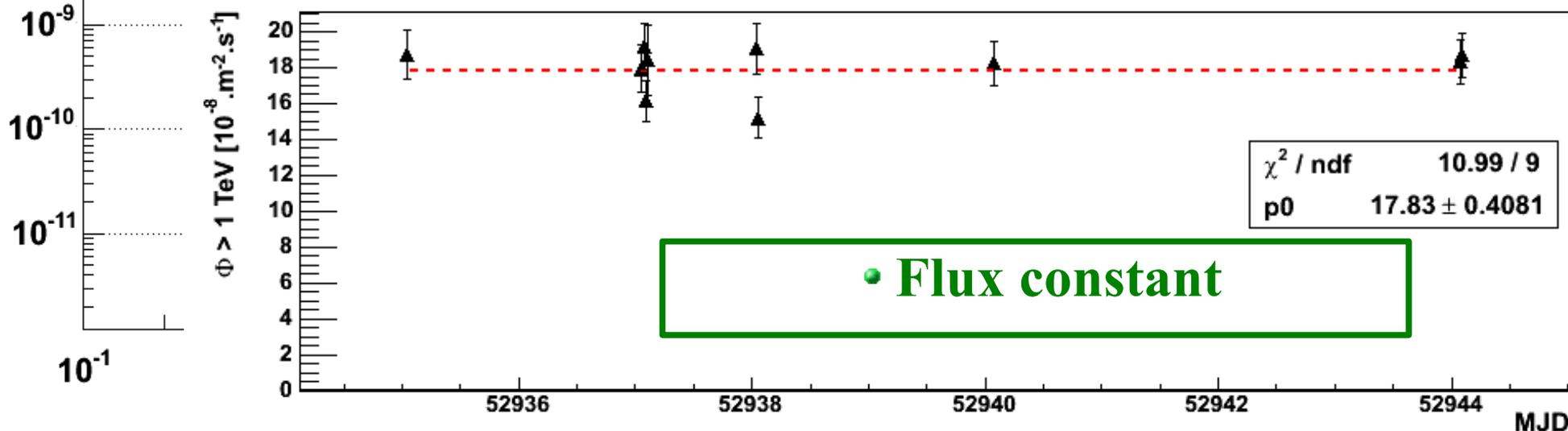


Observations du Crabe par HESS

Spectre en loi de puissance

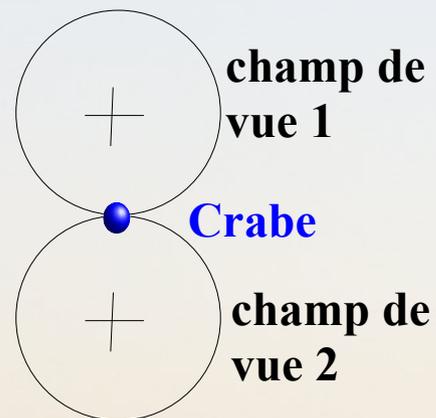


Résultats compatibles avec les autres expériences



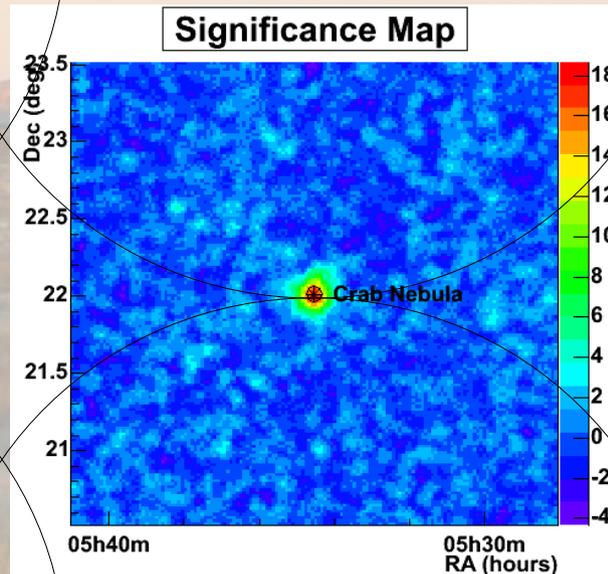
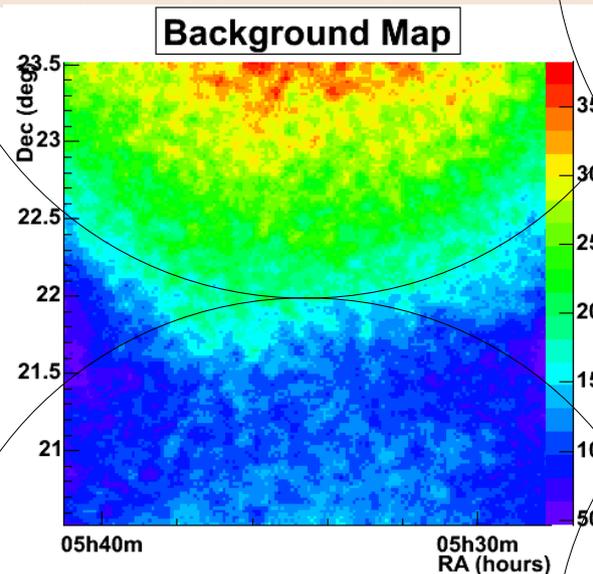
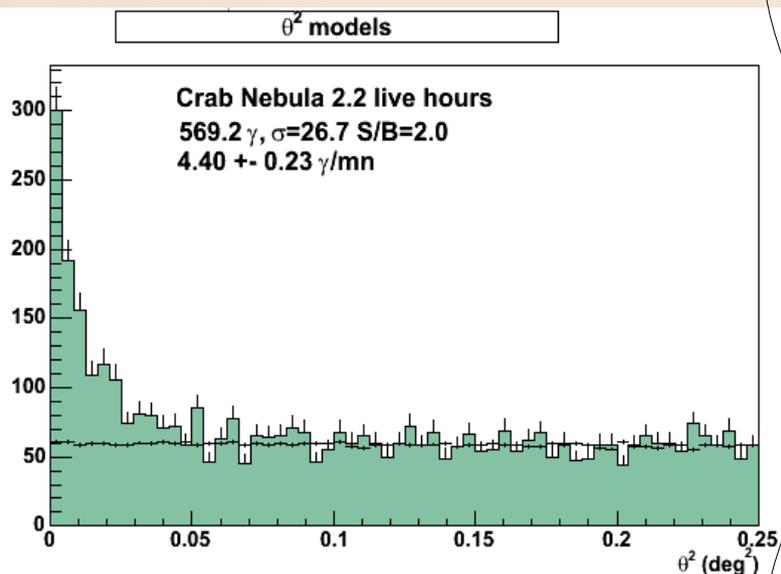
• Flux constant

Observations du Crabe hors-axe optique

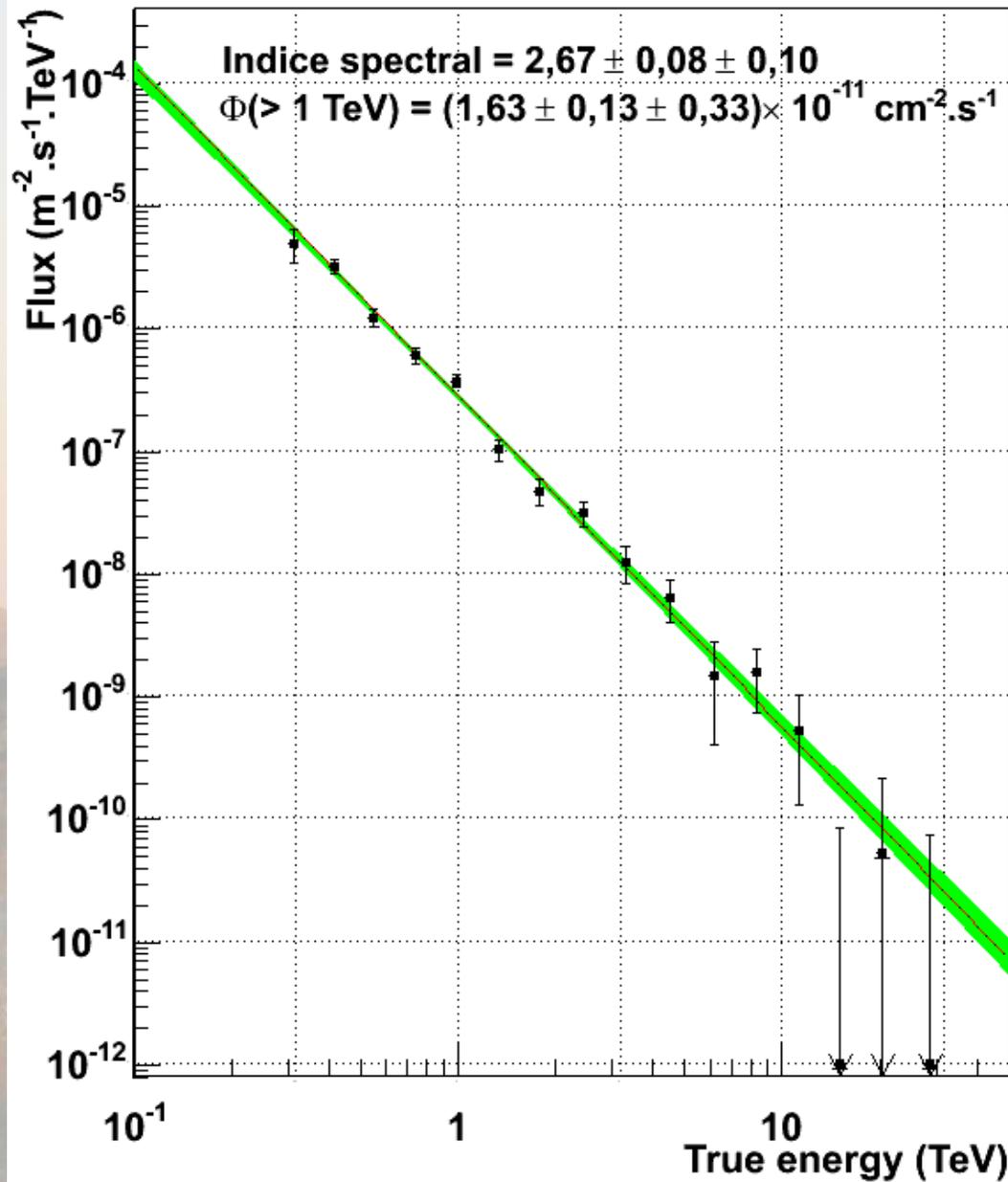


• Crabe observé en bord du champ de vue ($2,5^\circ$)

- 27σ en 2,2 heures
- 570γ
- Carte de significativité plate



Observations du Crabe hors-axe optique



Spectre en loi de puissance

Conclusion sur les méthodes d'analyse

Surface de collection
Résolution en énergie
Résolution angulaire



contrôlées sur tout le champ de vue



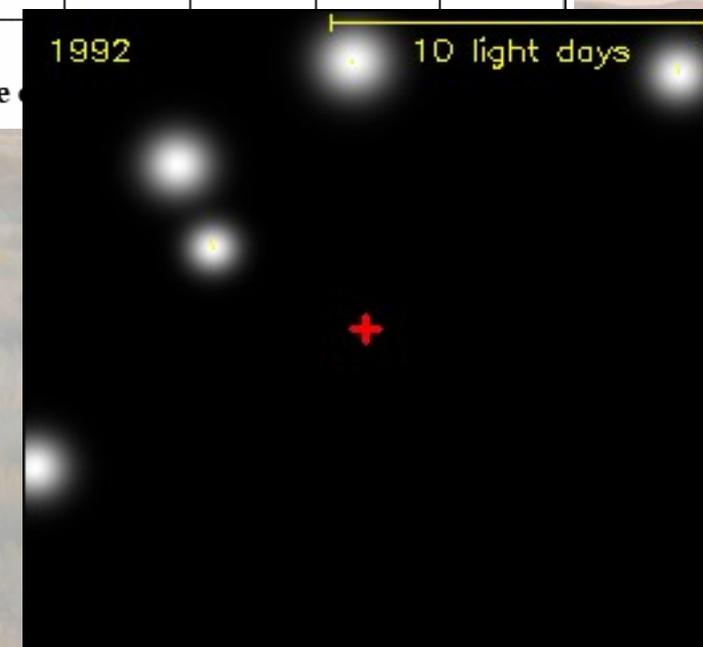
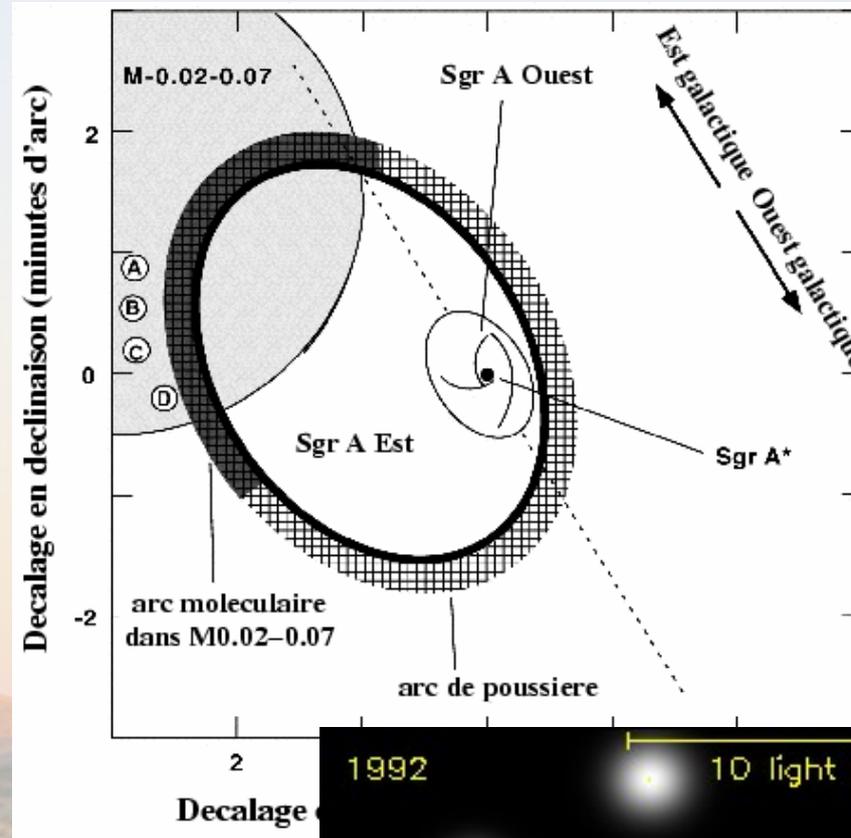
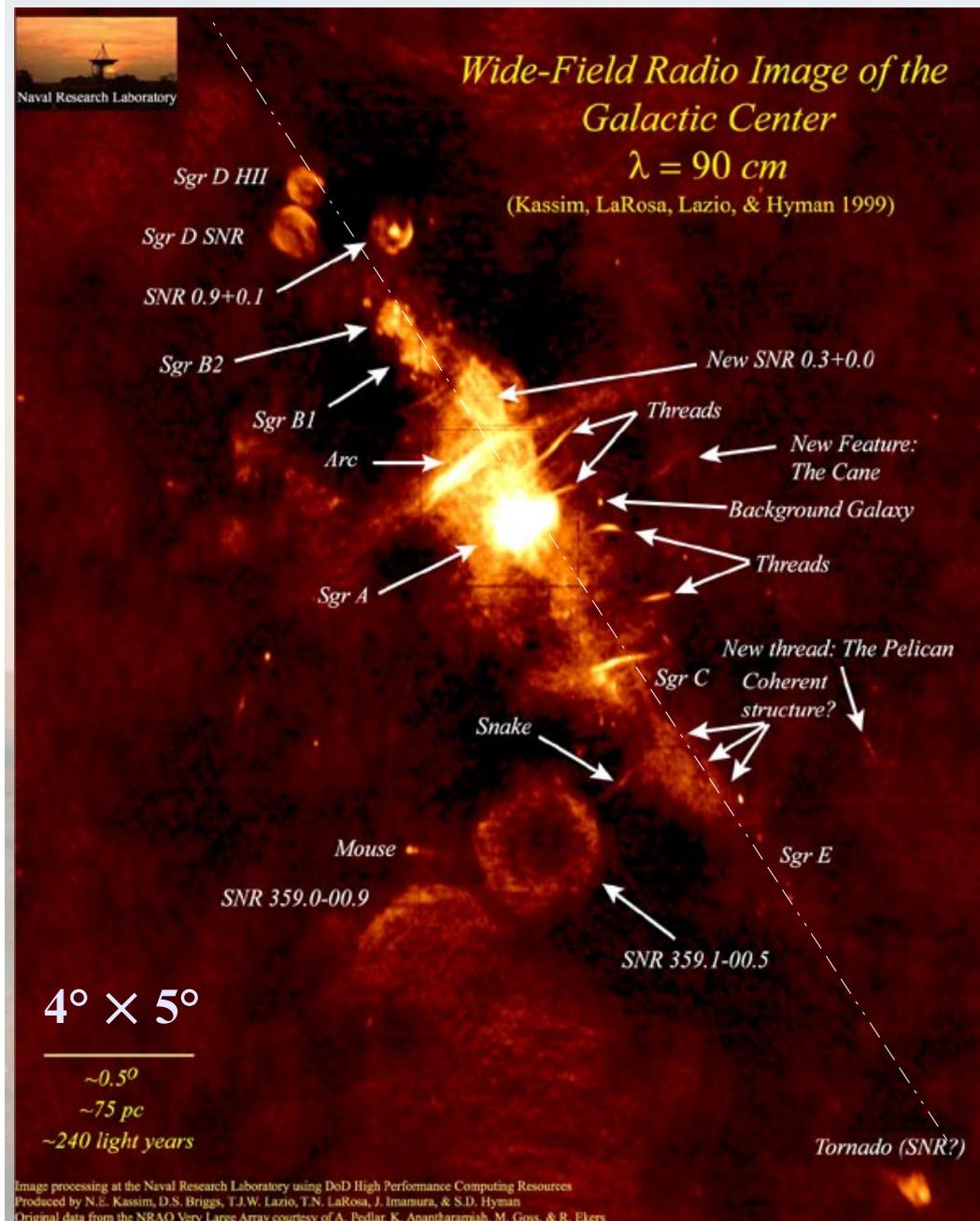
Utilisation de tout le champ de vue de 5° :

- **recherche de sources**
- **reconstruction**



**LE CENTRE GALACTIQUE
vu par HESS**

Candidats au TeV



La région centrale observée par INTEGRAL

$2^\circ \times 2^\circ$



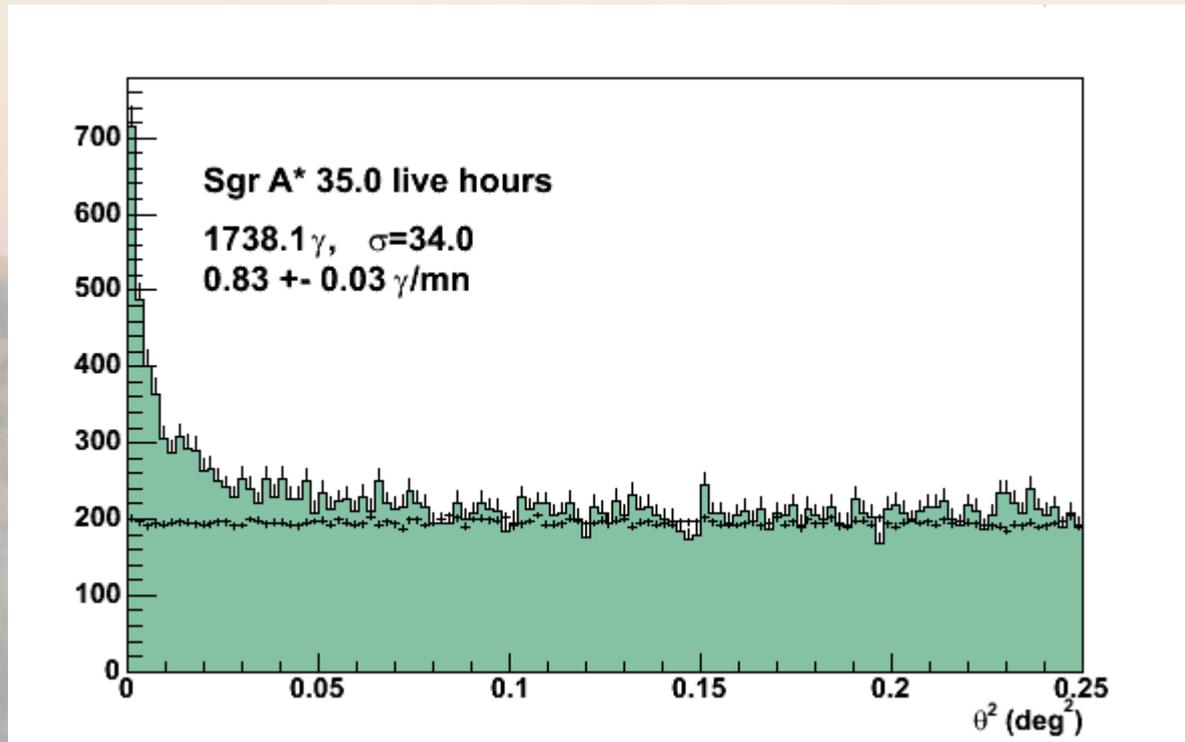
20-40 keV



40-100 keV

Le Signal γ du Centre Galactique

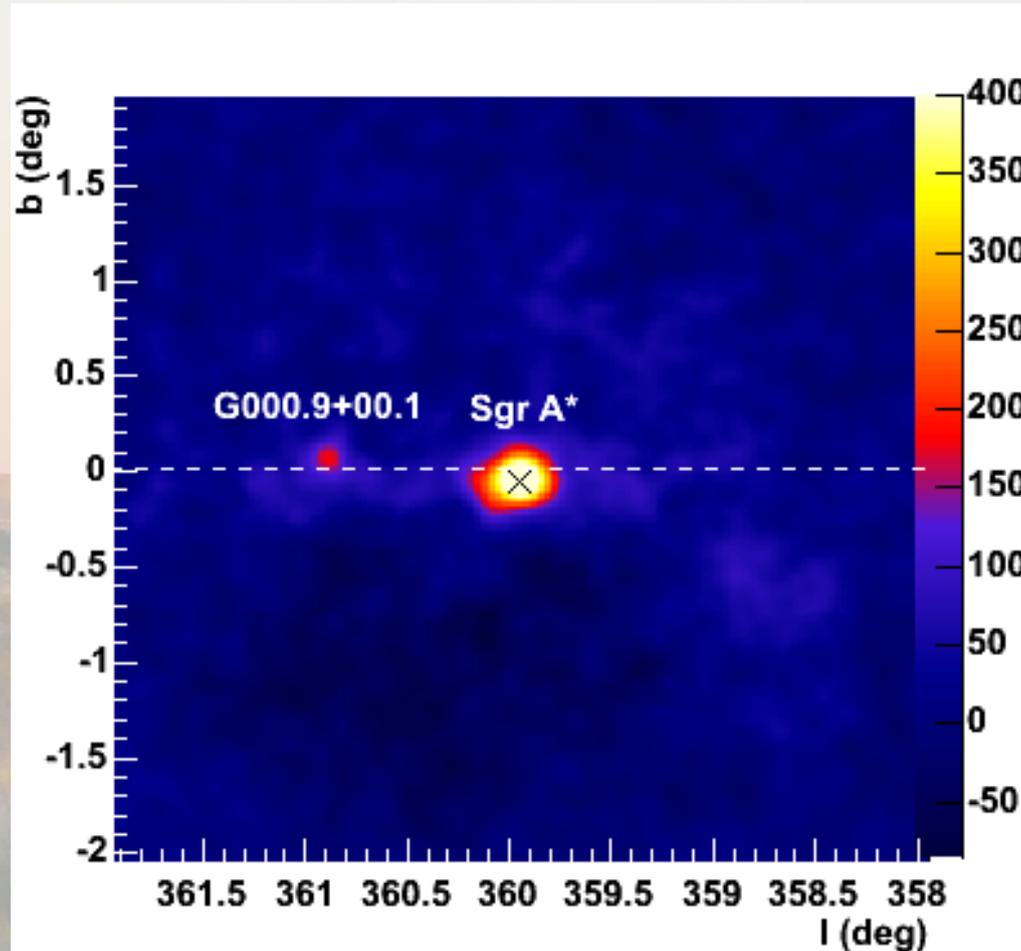
- 2004
 - 4 télescopes
 - 35 heures effectives



- 34 σ
- $\sim 1740 \gamma$

Carte du Centre Galactique

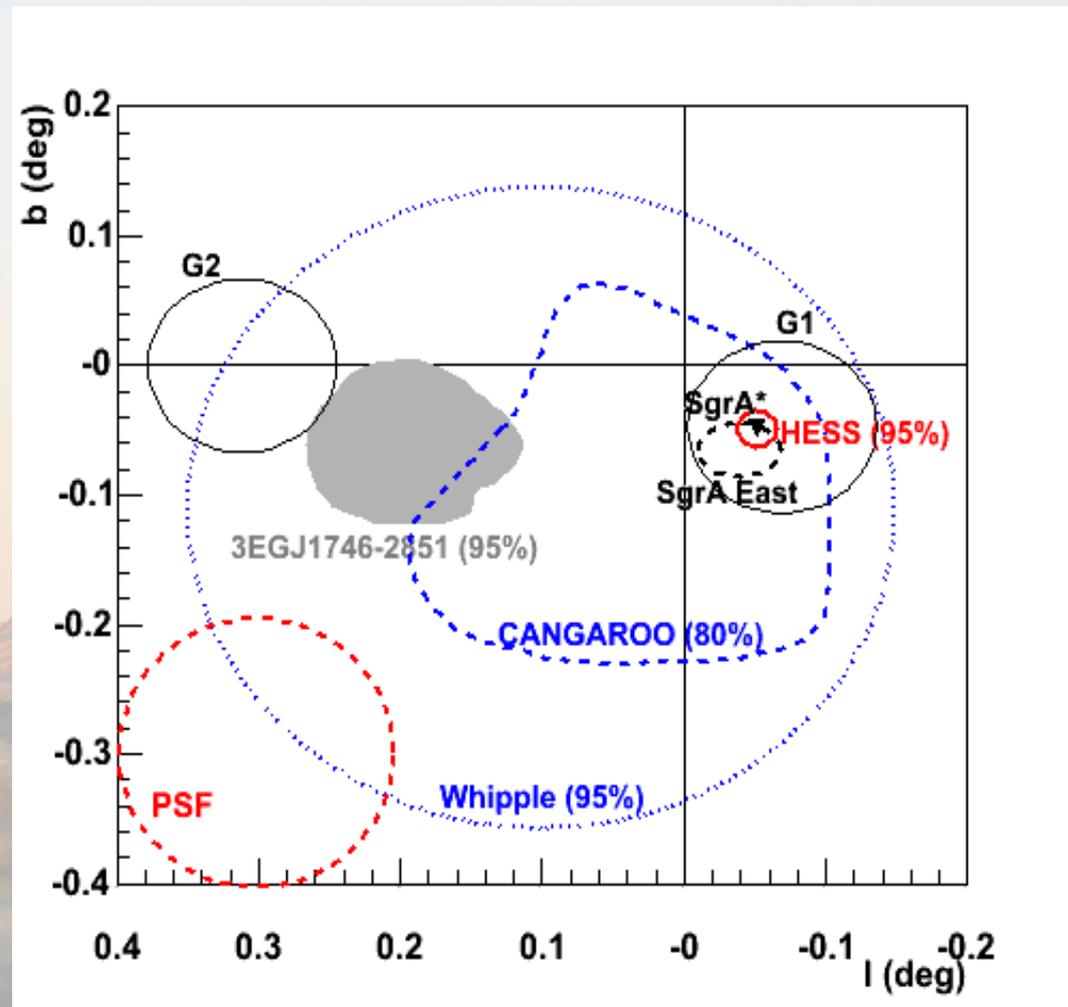
- Carte du Centre Galactique en 2004 : 2 sources



Position du signal du Centre Galactique

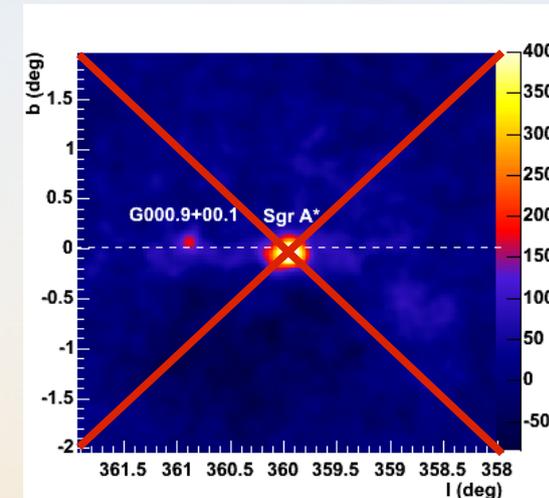
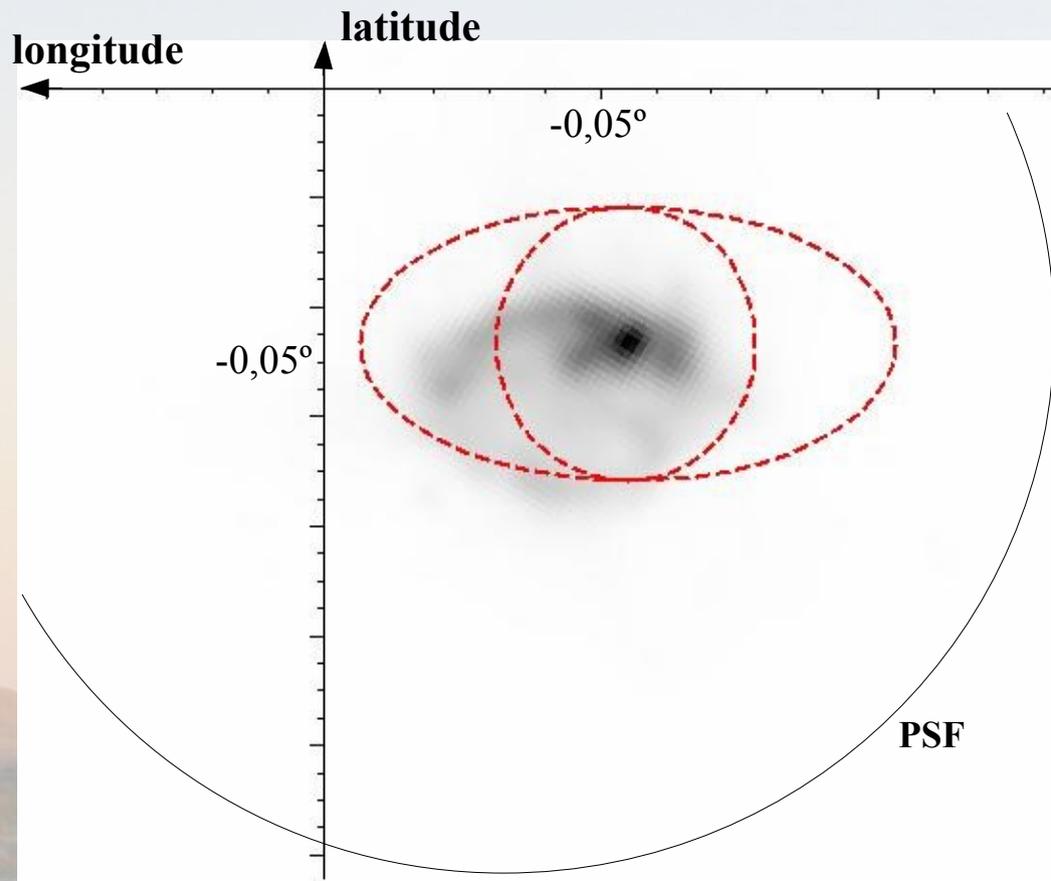
Position

(hypothèse : source ponctuelle)



Incompatible avec la source EGRET non identifiée

Extension du signal du Centre Galactique



Extension intrinsèque

(hypothèse : source centrée sur Sgr A*) :

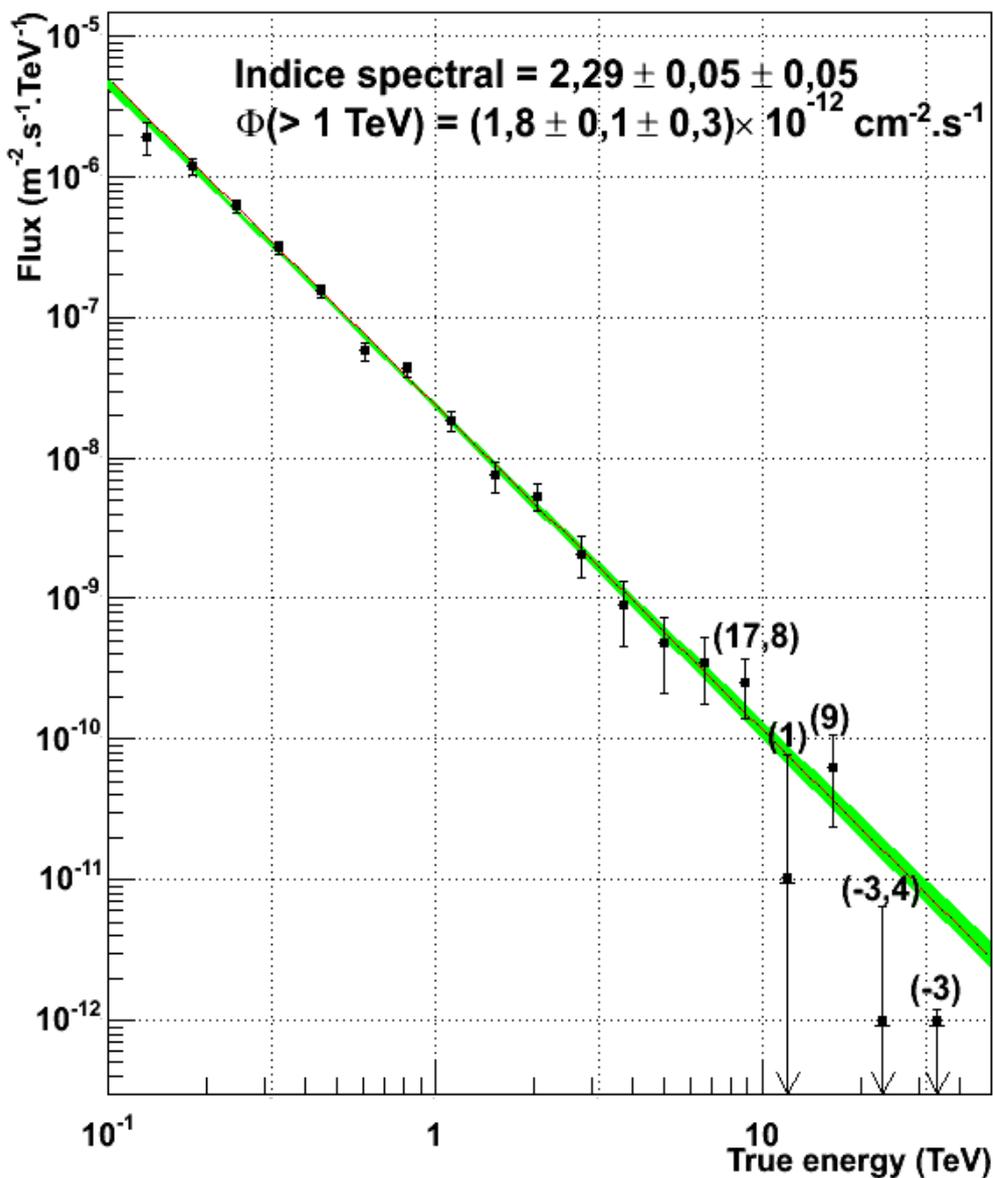
$$\sigma_{\text{latitude}} < 1,5' \text{ (95\% CL)}$$

$$\sigma_{\text{longitude}} = 2,2' + \begin{matrix} 0,7' \\ -0,8' \end{matrix} \text{ (95\% CL)}$$

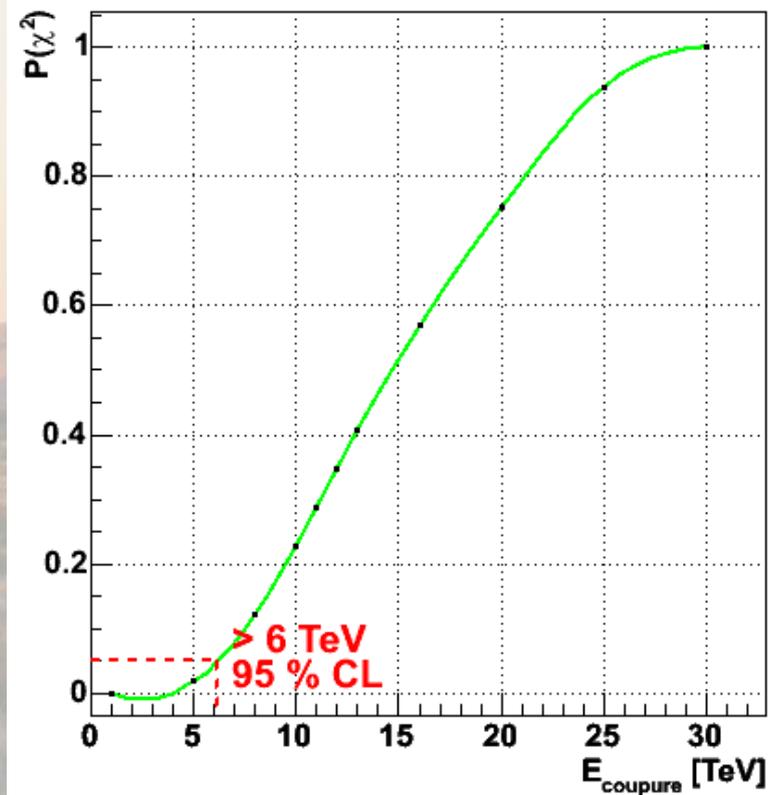
- Compatible avec le trou noir Sgr A* ($14'' \pm 30''$)
- Compatible avec le reste de supernova Sgr A East

Spectre du Centre Galactique

Centre Galactique 2004



$$\frac{dN}{dE} = \Phi_0 \times E^{-\Gamma} \times e^{-\frac{E}{E_{\text{coupure}}}}$$



$E_{\text{coupure}} > 6 \text{ TeV (95\% CL)}$

A large radio telescope dish is silhouetted against a dramatic sunset sky filled with scattered clouds. The sun is low on the horizon, casting a warm glow. The foreground is dark, showing the flat landscape and some sparse vegetation.

Interprétation du signal, recherche de matière noire

Pourquoi chercher la matière noire ?

Paramètres cosmologiques :

$$h = 0,73 \pm 0,05$$

$$\Omega_0 = 1,02 \pm 0,02$$

$$\Omega_m h^2 = 0,13 \pm 0,01$$

$$\Omega_b h^2 = 0,023 \pm 0,001$$

→ 80% de la matière serait de nature inconnue : WIMPs ?

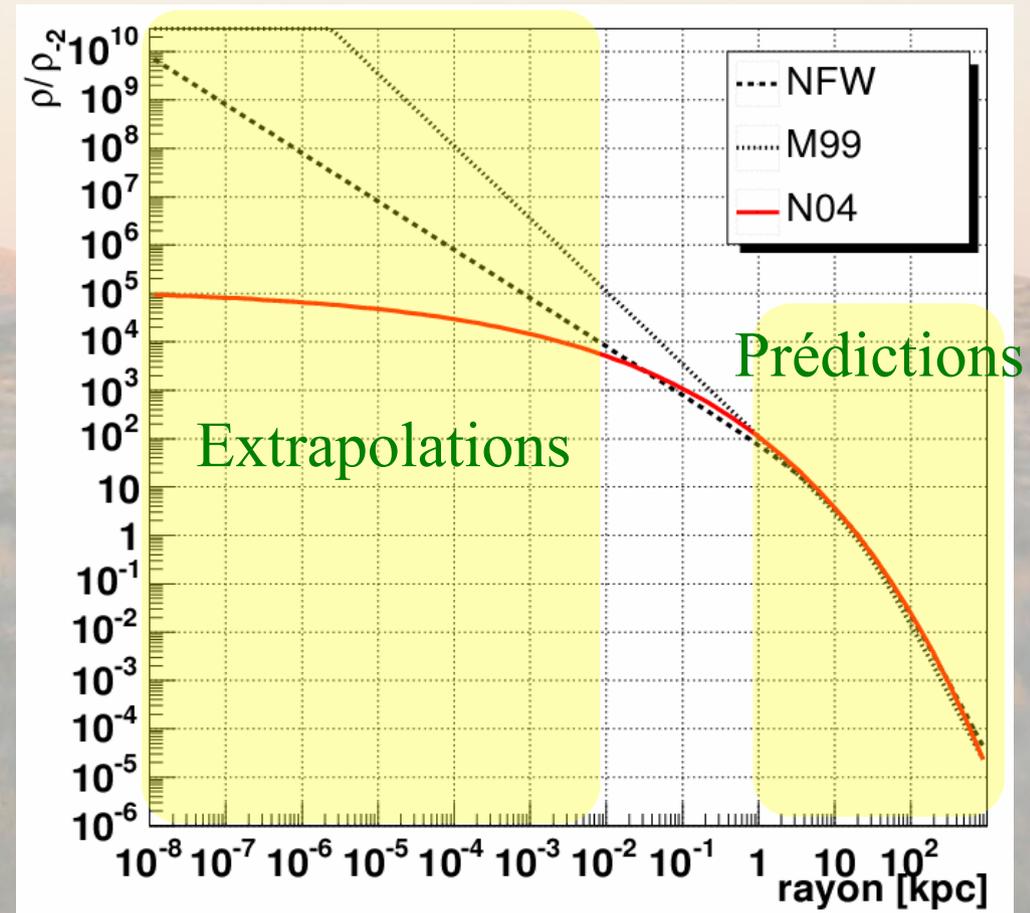
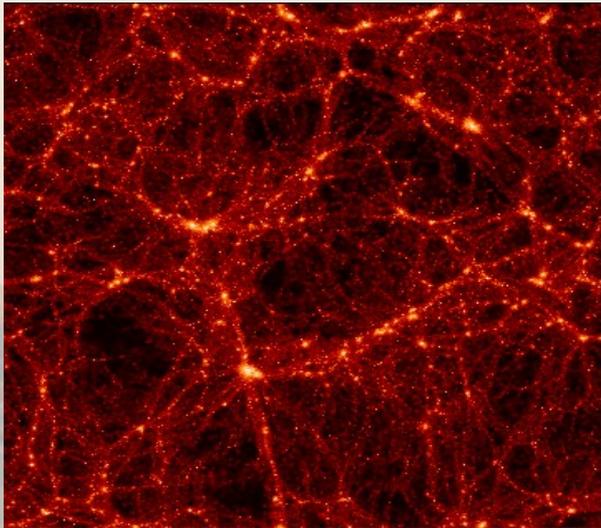
Formation de l'Univers

**Physique au-delà du
modèle standard**

Les halos de matière noire

Modèles de formation des grandes structures

Profil de densité des halos



Détection indirecte de matière noire

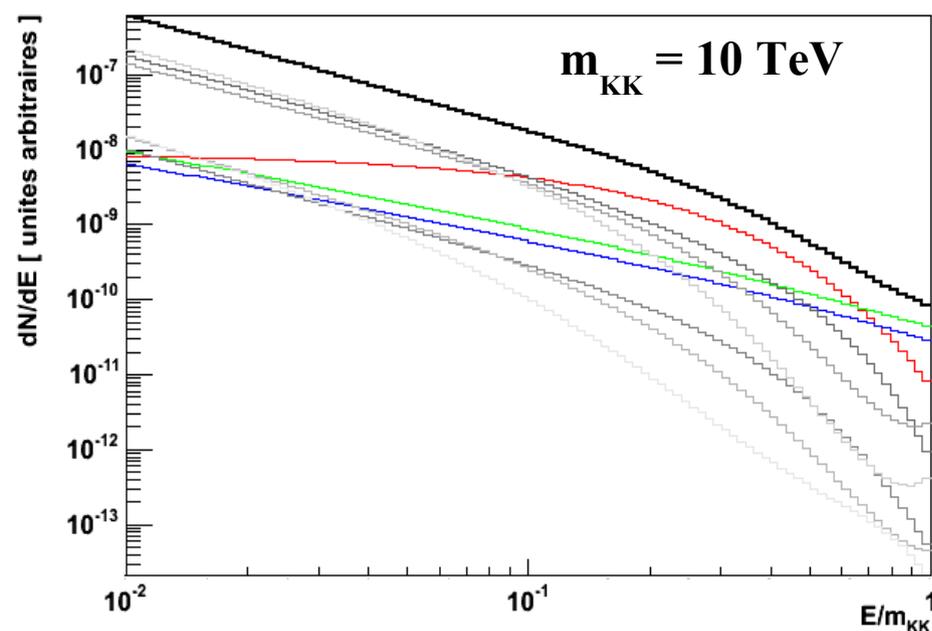
- Flux γ d'annihilation attendu :

$$\frac{d\Phi}{dE}(\Delta\Omega, E) = F_0 \times \frac{dN}{dE} \times \frac{\sigma v}{\sigma v_{ref}} \times \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_{DM}} \right)^2 \times \bar{J}(\Delta\Omega) \times \Delta\Omega$$

Nature des WIMPs

- **Annihilation de neutralinos**
 - raies supprimées
 - hadronisation (W^\pm et Z_0)
- **Annihilations de Kaluza-Klein**
 - leptons chargés et quarks

Halo de matière noire



Détection indirecte de matière noire

- Flux γ d'annihilation attendu :

$$\frac{d\Phi}{dE}(\Delta\Omega, E) = F_0 \times \frac{dN}{dE} \times \frac{\sigma v}{\sigma v_{ref}} \times \left(\frac{1 \text{ TeV}}{m_{DM}}\right)^2 \times \bar{J}(\Delta\Omega) \times \Delta\Omega$$

spectre en énergie

distribution angulaire

Nature des WIMPs

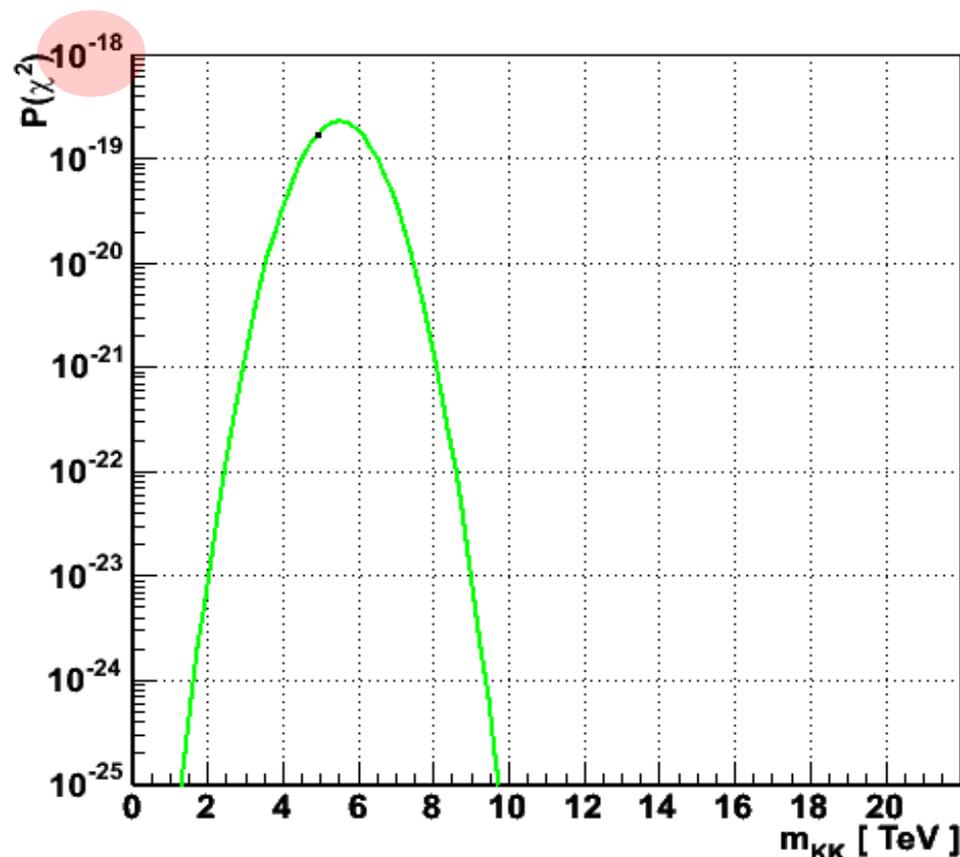
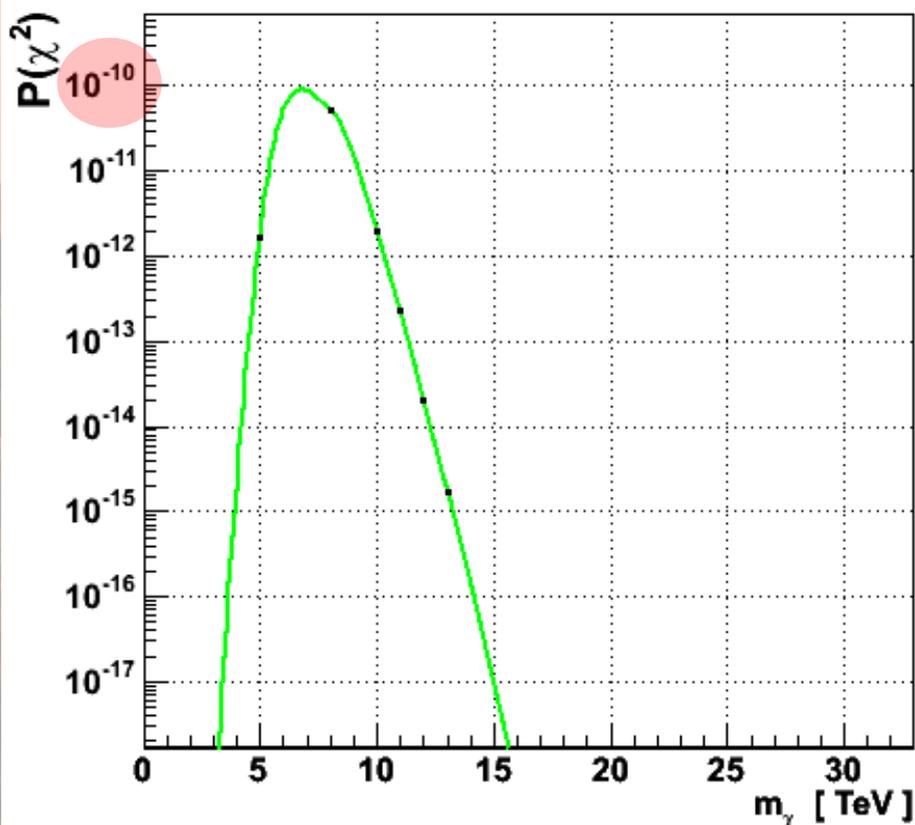
Forme du halo de matière noire

Hypothèse 1 : matière noire uniquement

- annihilations de WIMPs

Spectre MSSM incompatible avec les données ($> 6 \sigma$)

Spectre Kaluza-Klein incompatible ($> 8 \sigma$)



Hypothèse 2 : matière noire et fond astrophysique

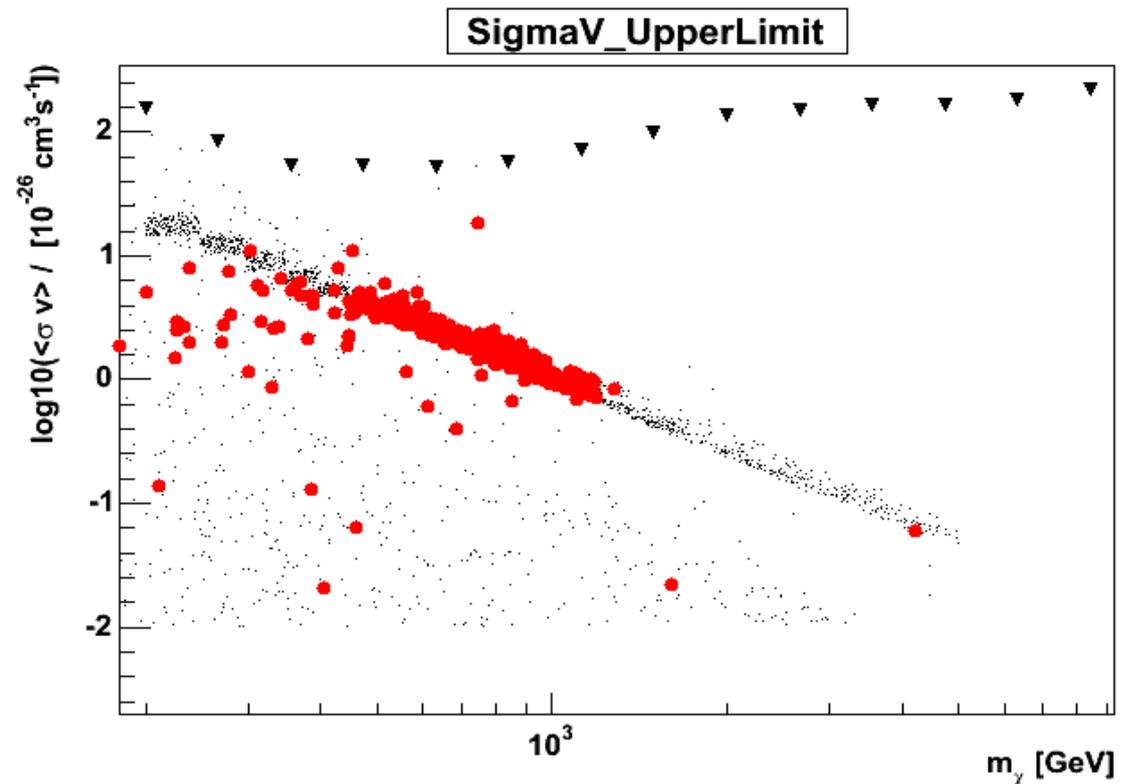
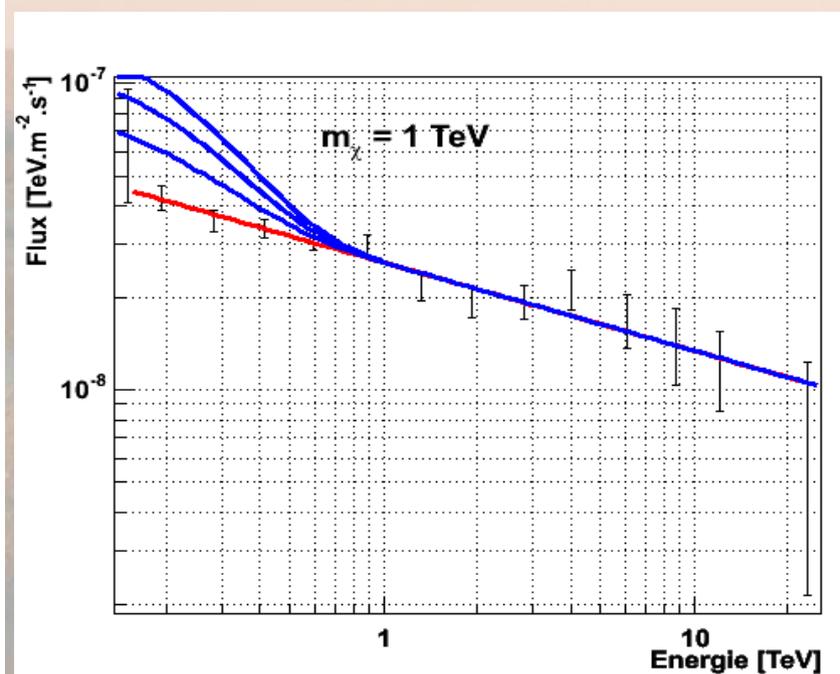
- **Spectre : 2 composantes**

- loi de puissance
- matière noire

- **Forme du halo : NFW**

incertitudes sur la densité $> 10^6$

• **spectre compatible avec loi de puissance \rightarrow limite supérieure sur $\sigma \cdot v$**



Hypothèse 2 : matière noire et fond astrophysique

- **Spectre : 2 composantes**

- loi de puissance
- matière noire

- **Forme du halo : NFW**

incertitudes sur la densité $> 10^6$

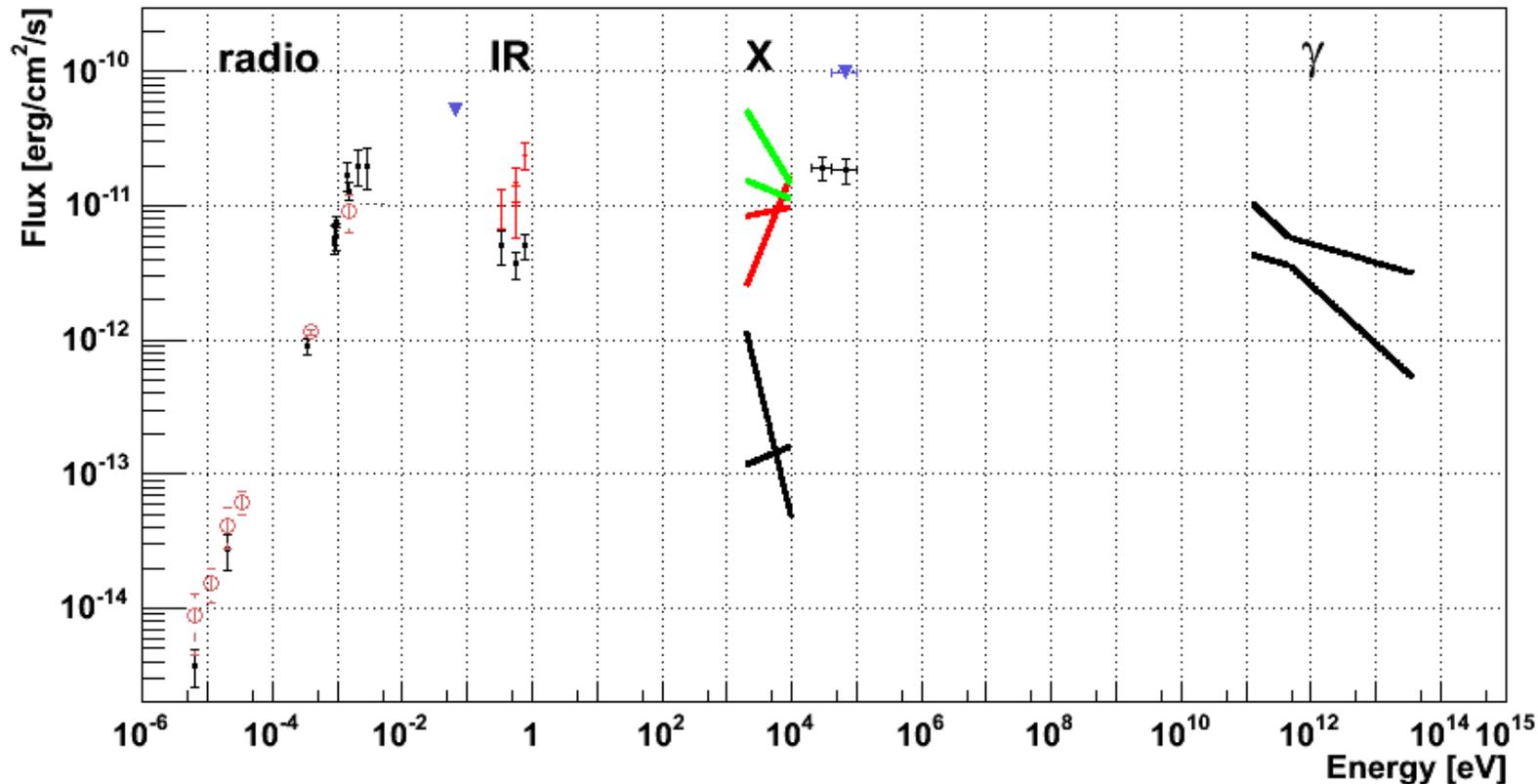
• spectre compatible avec loi de puissance → limite supérieure sur $\sigma.v$

→ Publication dans Physical Review Letters, en préparation

Autres interprétations possibles

Sgr A* : trou noir supermassif

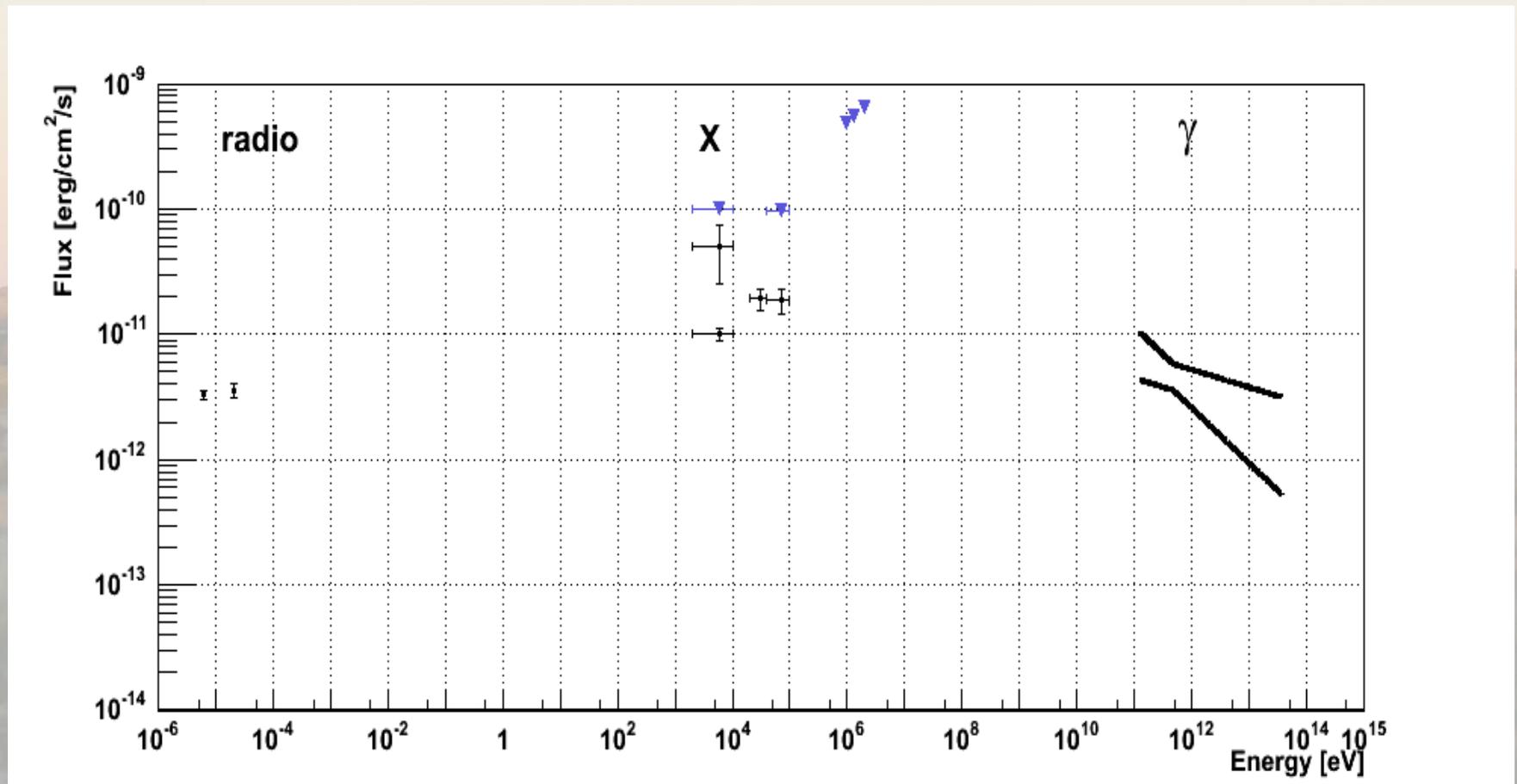
- variabilité
- spectre en énergie



Autres interprétations possibles

Sgr A East : reste de supernova

- extension
- spectre en énergie





CONCLUSIONS

La matière noire

Centre Galactique

- présence d'un fond astrophysique
- incertitudes sur la forme du halo

→ Recherche de sources sans fond astrophysique

Nature des WIMPs

Forme du halo de
matière noire

Perspectives

Futur de l'astronomie gamma

GLAST

HESS-II

Potentiel de détection
Intercalibration

Autres messagers/Autres longueurs d'onde

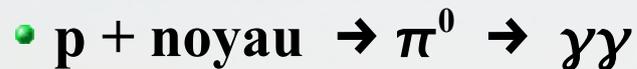
Modélisations
Contraintes

A photograph of a sunset over a dark horizon. The sun is a bright yellow-orange disk just above the horizon line, which is silhouetted against the sky. The sky transitions from a pale yellow near the horizon to a clear blue at the top. The foreground is a dark, silhouetted landscape.

MERCII !!

Production et Propagation des γ

- **Protons ou hadrons de haute énergie**



- **Electrons de haute énergie**

- Pertes synchrotrons dans le champ magnétique local
 - Bremsstrahlung dans le milieu ambiant
 - Diffusion Inverse-Compton sur le champ de photons ambiant

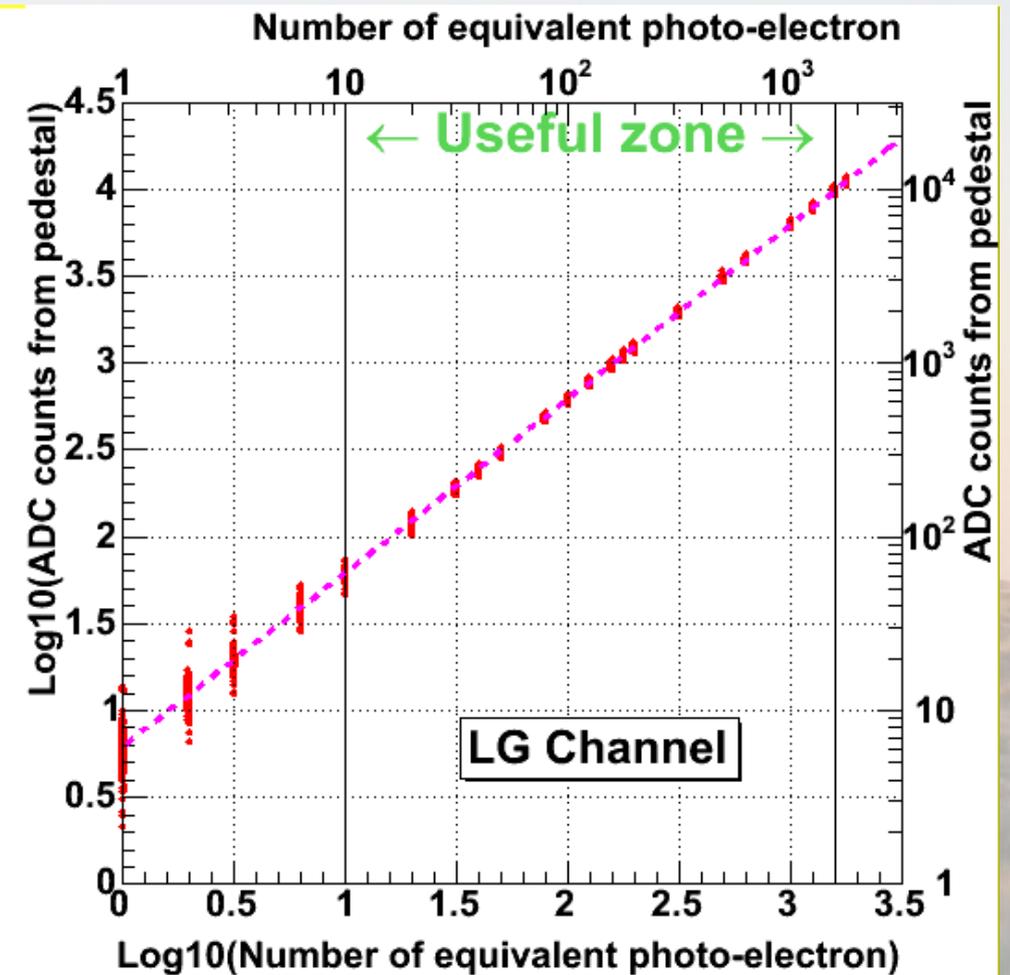
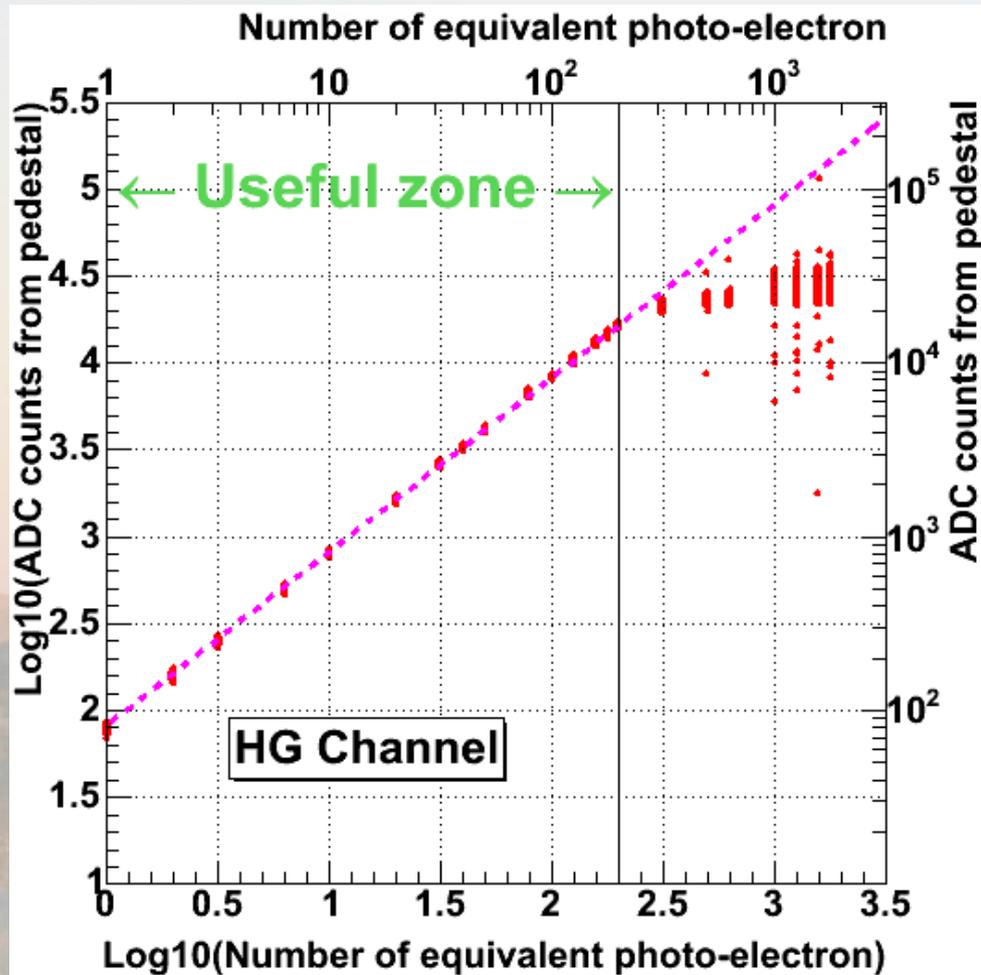
- **Propagation en ligne droite**

- Direction de la source

- **Absorption par le fond infra-rouge**



Linearite des voies d'acquisition



Les Sources de γ au TeV

- **Astrophysique des objets compacts**

- Noyaux actifs de galaxie
- Micro-quasars
- Pulsars et plérions
- Sursauts γ

- **Origine des rayons cosmiques**

- Restes de supernovae (Pevatron)
- Galaxie à formation d'étoiles

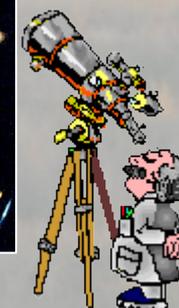
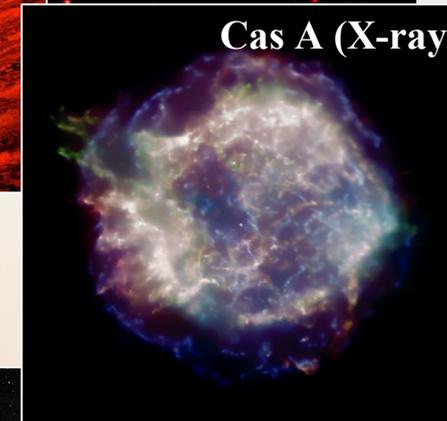
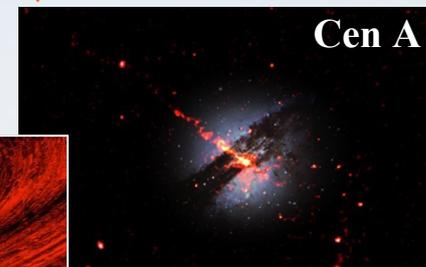
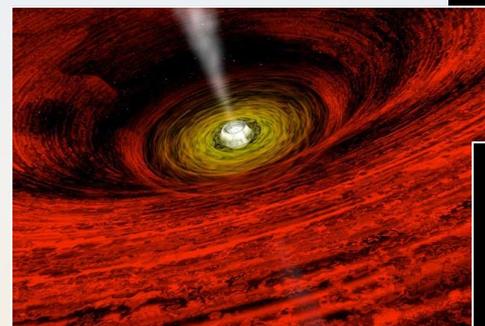
- **Nouvelles sources**

- Nuages moléculaires
- Sources EGRET non identifiées ?

- **Astroparticules**

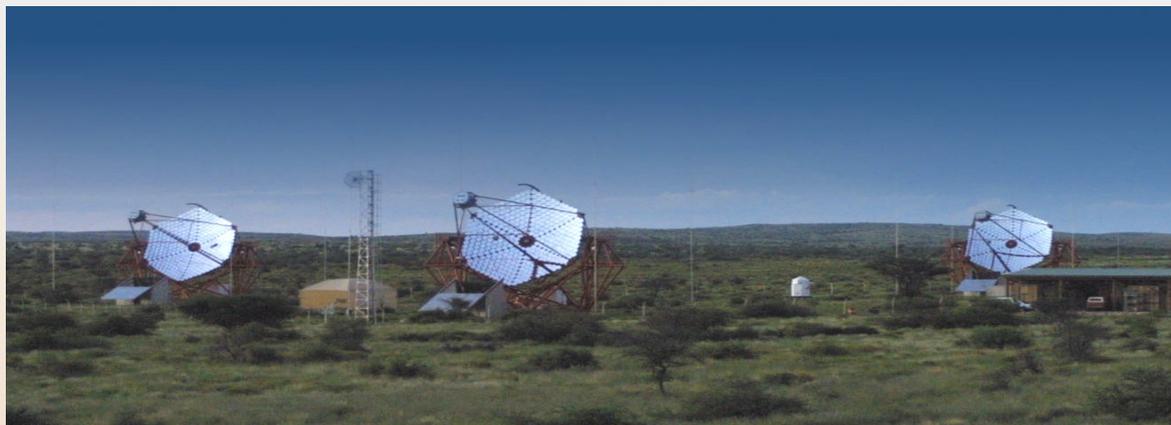
- Fond infra-rouge
- Annihilation de matière noire dans des halos

$$\gamma_{TeV} + \gamma_{IR, vis} \rightarrow e^+ e^-$$



Les Détecteurs γ de 3ème Génération

- 2ème génération : Whipple, HEGRA, CAT
- 4 nouveaux détecteurs : CANGAROO, HESS, MAGIC, VERITAS



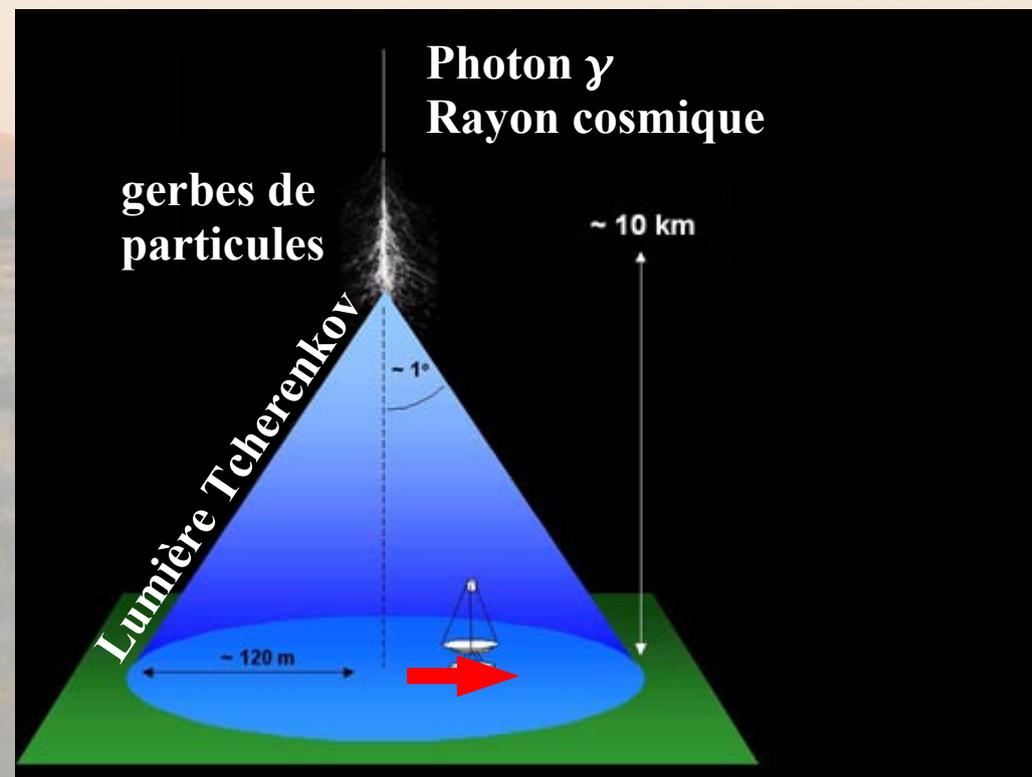
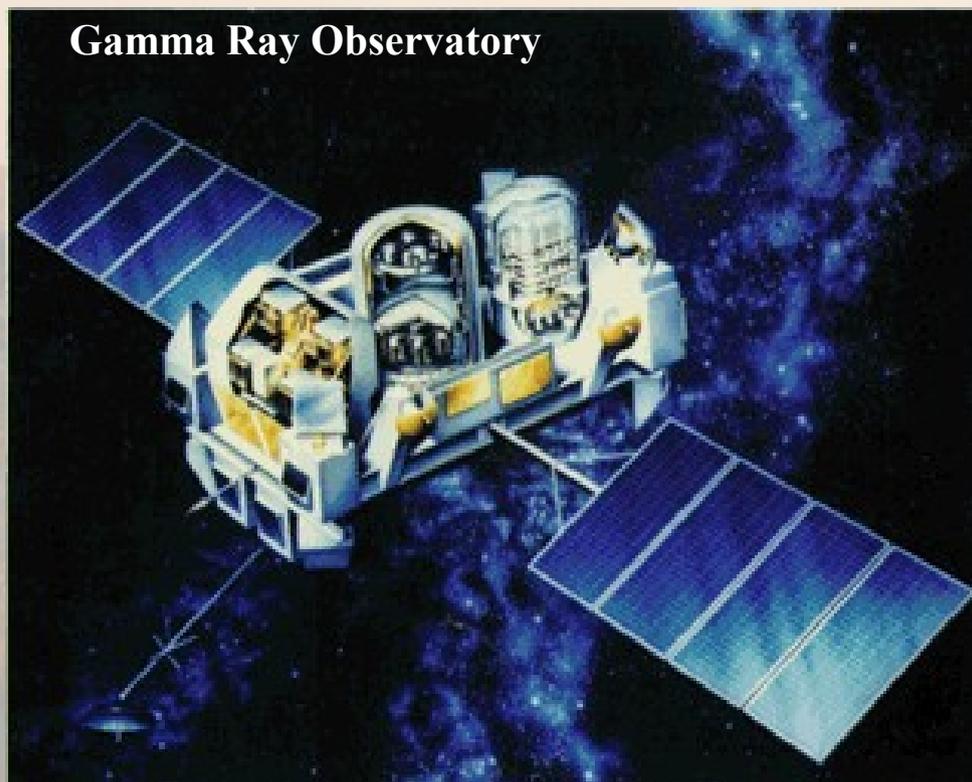
Pourquoi des Détecteurs au Sol ?

• Dans l'espace

- Détection directe des γ
- Petite surface de détection
 $\sim 1\text{m}^2$
- Crabe ($>1\text{ TeV}$) $1\ \gamma/\text{siècle}$

• Au Sol

- Détection indirecte des γ
- Grande surface de détection
 $\sim 10^5\ \text{m}^2$
- Seuil élevé $\sim 100\ \text{GeV}$



Les Sources au TeV Avant HESS

• 3 plérions

- Crabe (Whipple, HEGRA, CAT, CANGAROO)
- PSR B1706 (CANGAROO)
- Vela (CANGAROO)

• 3 SNR

- SN1006 (CANGAROO)
- RXJ1713 (CANGAROO)
- Cas A ??

• 7 AGNs

- Mkn 421, Mkn 501 (Whipple, HEGRA, CAT)
- PKS 2155 (Durham)
- M87 (HEGRA, limite sup de Whipple)
- H1426+428 (Whipple, HEGRA, CAT)
- 1ES 1959+650 (Whipple, HEGRA)
- 1ES 2344+514 (Whipple)

• 1 galaxie à formation d'étoiles

- NGC253 (CANGAROO)

• 1 source non identifiée

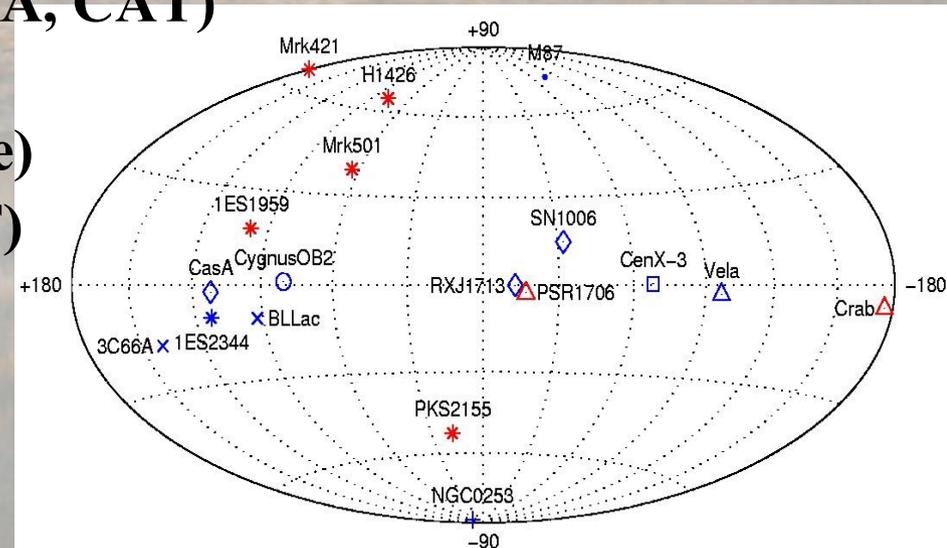
- TEV ????? (HEGRA)

• 1 binaire X

- Cen X-3 (Durham)

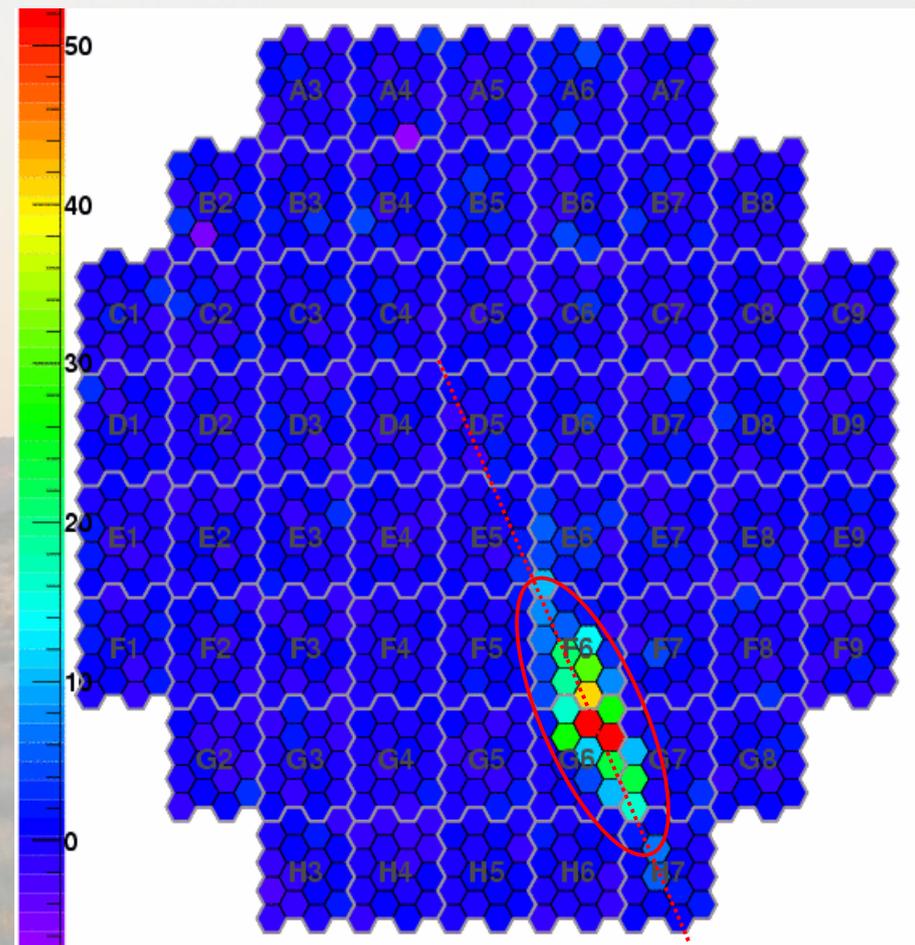
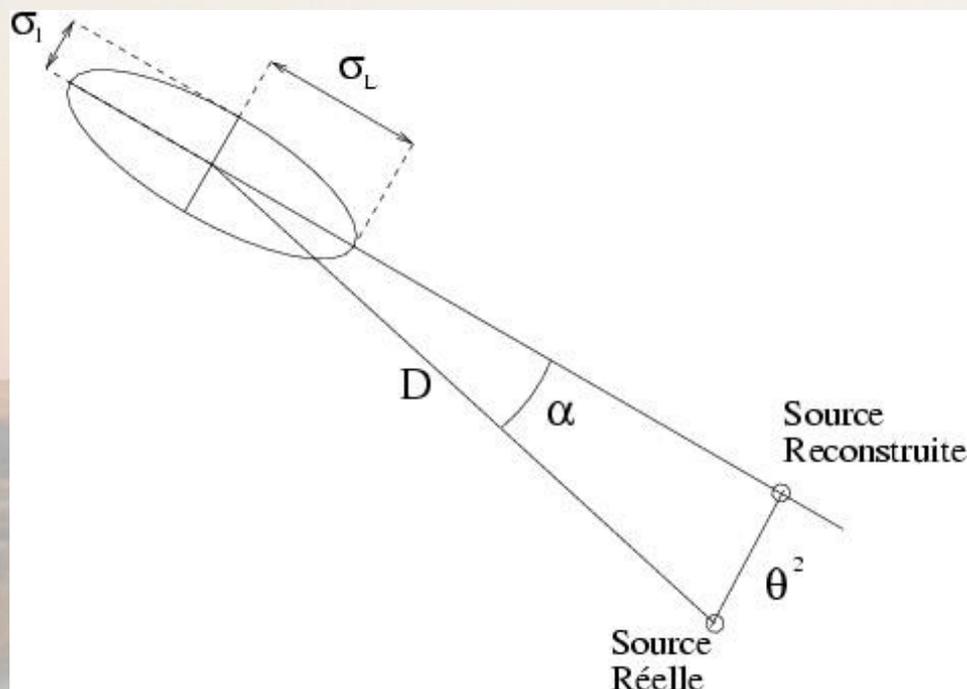
• Centre galactique

- (CANGAROO, Whipple)

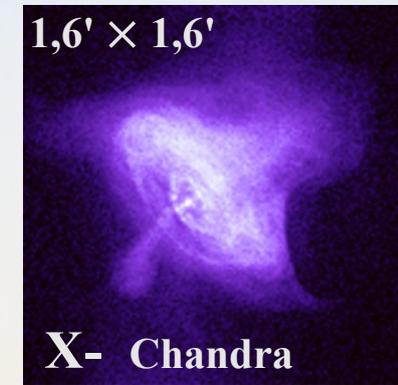
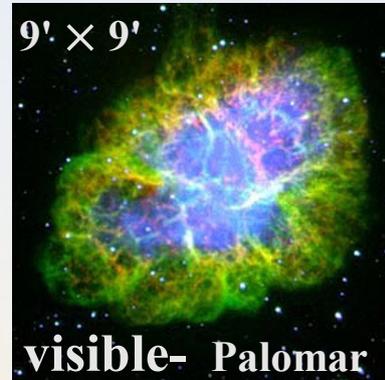
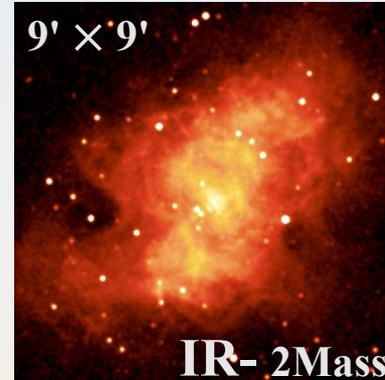


Analyse de Hillas

- Analyse développée pour Whipple par A.M. Hillas
 - Image ajustée par une ellipse



La Nébuleuse du Crabe

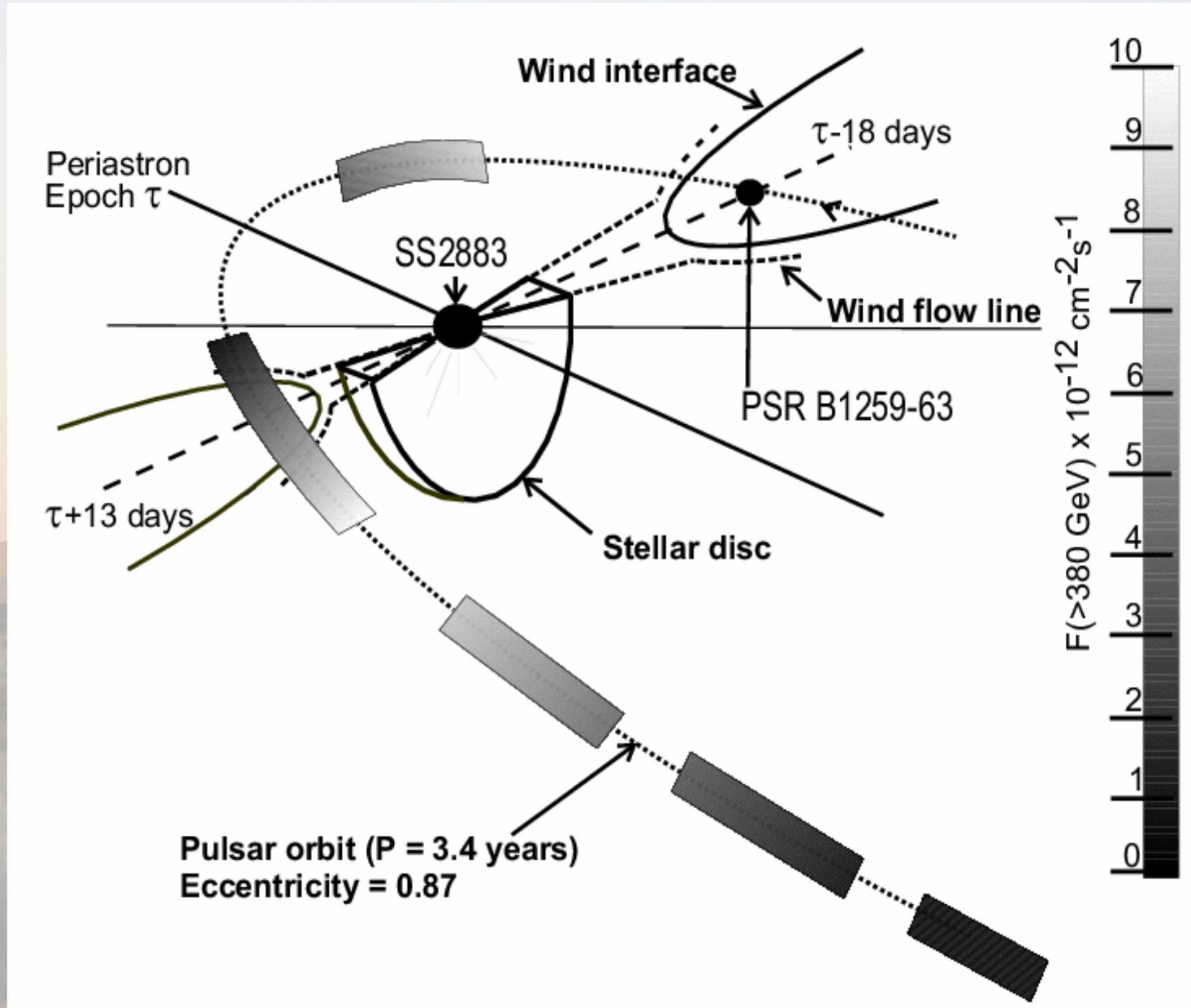


- **Explosion d'une étoile détectée en 1054**
- **Distance 6000 années-lumière**
- **Pulsar de période ~ 33 ms**

• **Plérion**

- **Onde de choc stationnaire entretenue par un pulsar émettant un vent d' e^- relativistes**
- **Flux issu de processus Inverse Compton**

Source Galactique Variable : PSR B1259-63



PSR B 1259-63 : Signal

- Observations autour du périastre en 2004

- février-mars : ~ 7 h

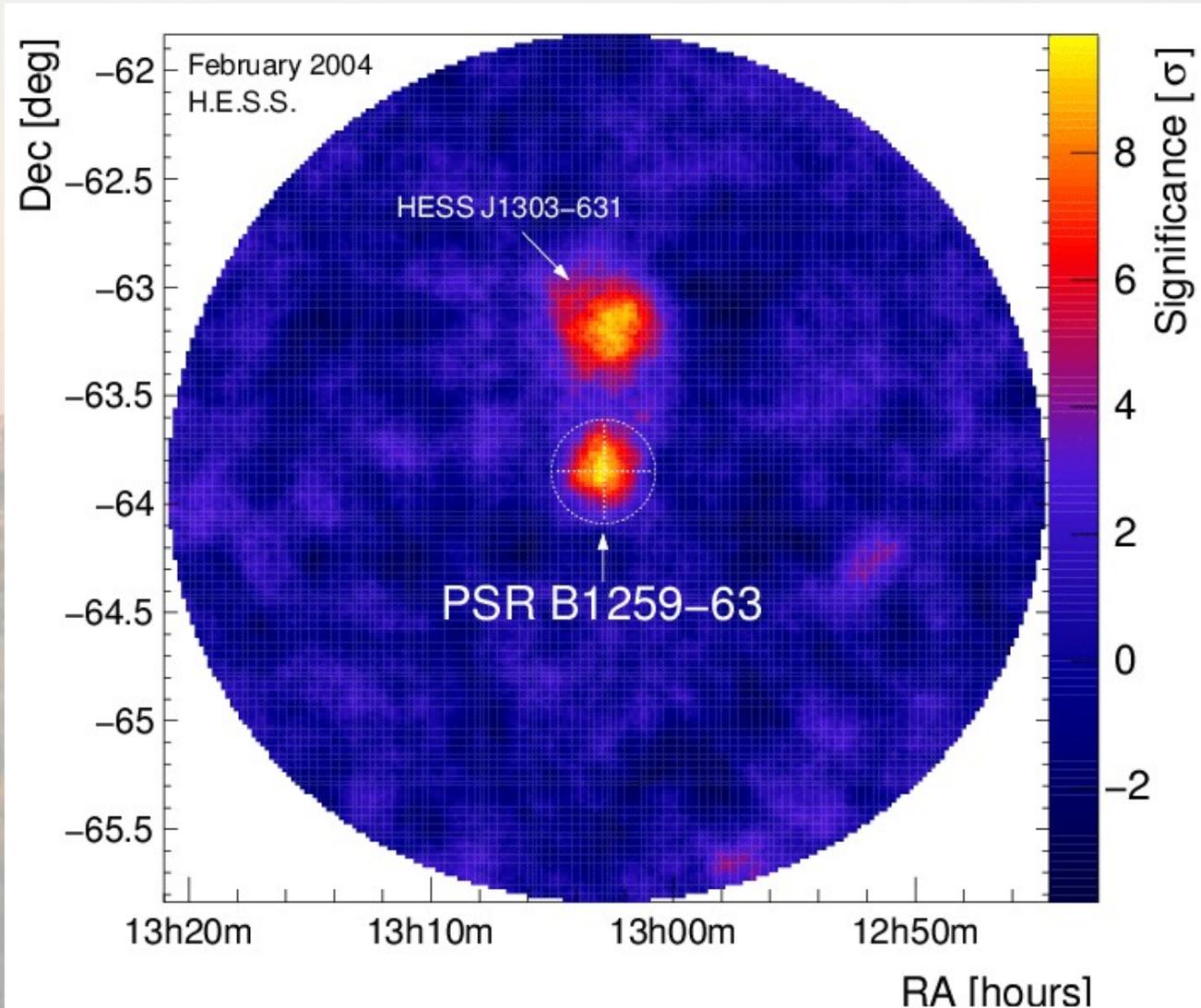
- avril-mai : ~ 40 h

-

- 13 σ , Source Ponctuelle

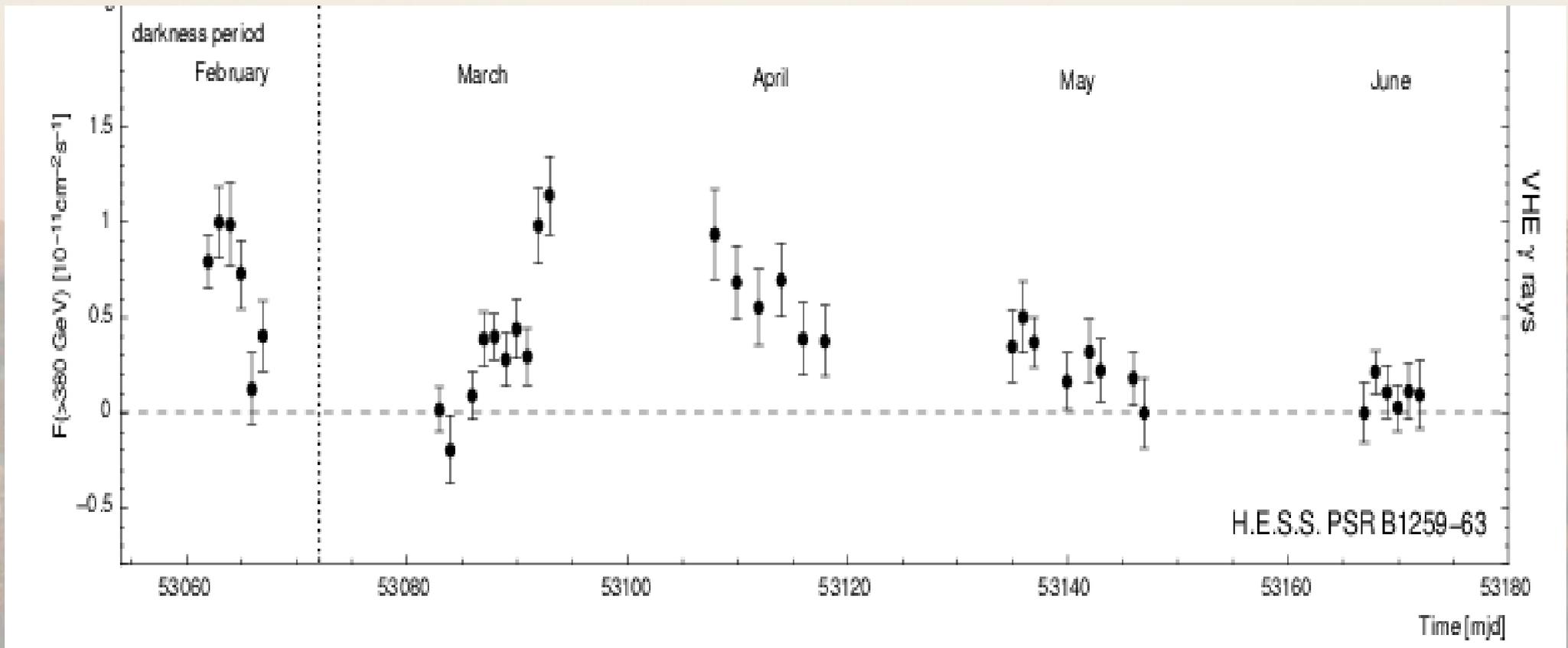
- ~5% flux du Crabe

- spectre mou



PSR B1259-63 : Courbe de Lumière

- 1ère Source au TeV Variable dans notre Galaxie
 - Comparaison avec les courbes de lumière en X
 - Comparaison avec les modèles théoriques en cours

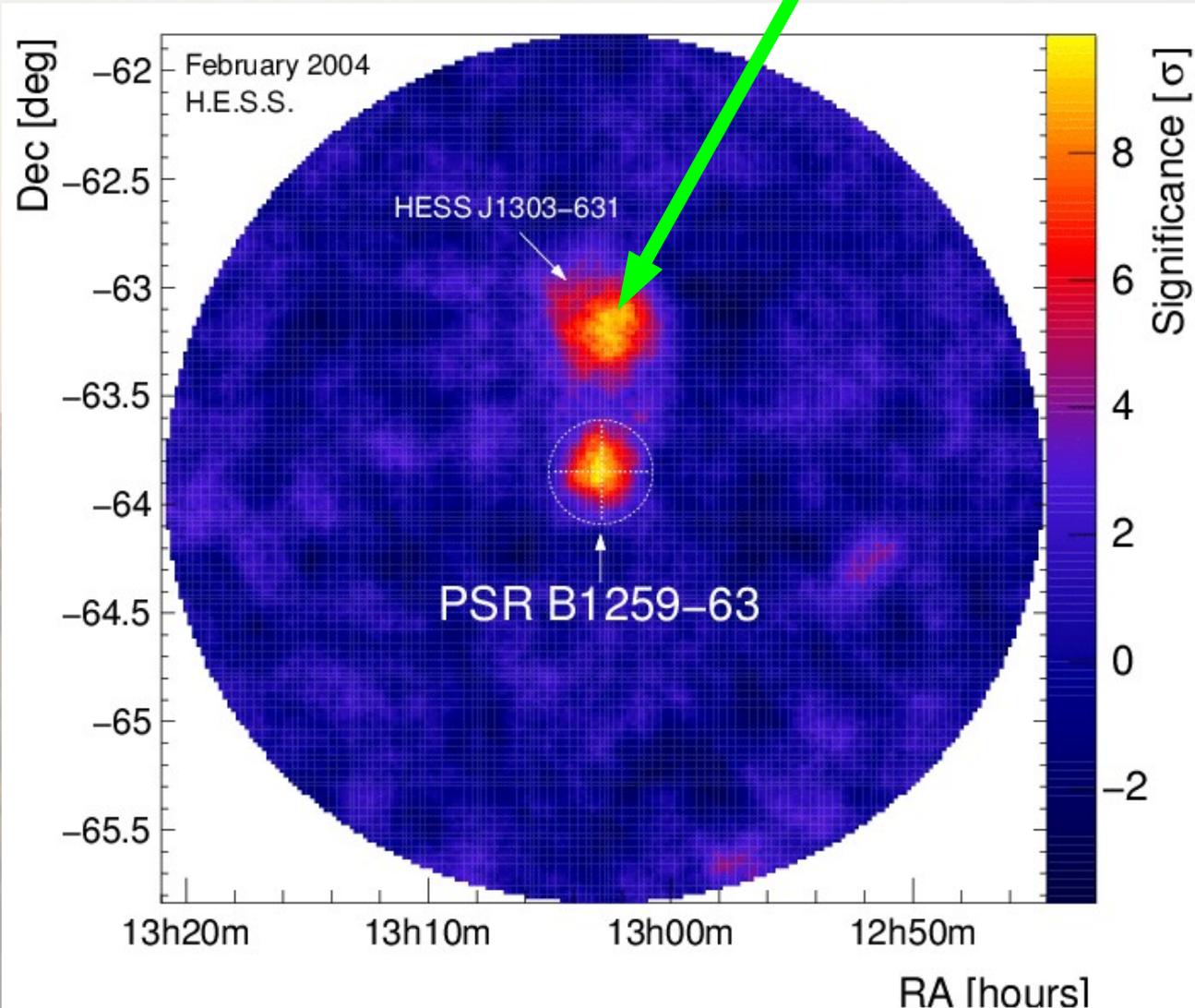


Une Source Non Identifiée : HESS J1303-631

- 2ème Source Non Identifiée au TeV

- flux stable 10% du Crabe
- spectre dur
- source étendue $\sim 0,16^\circ$

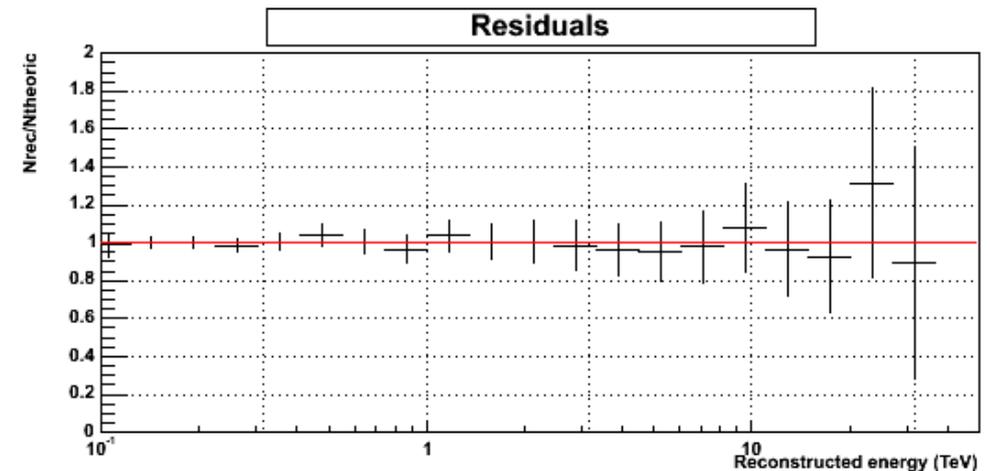
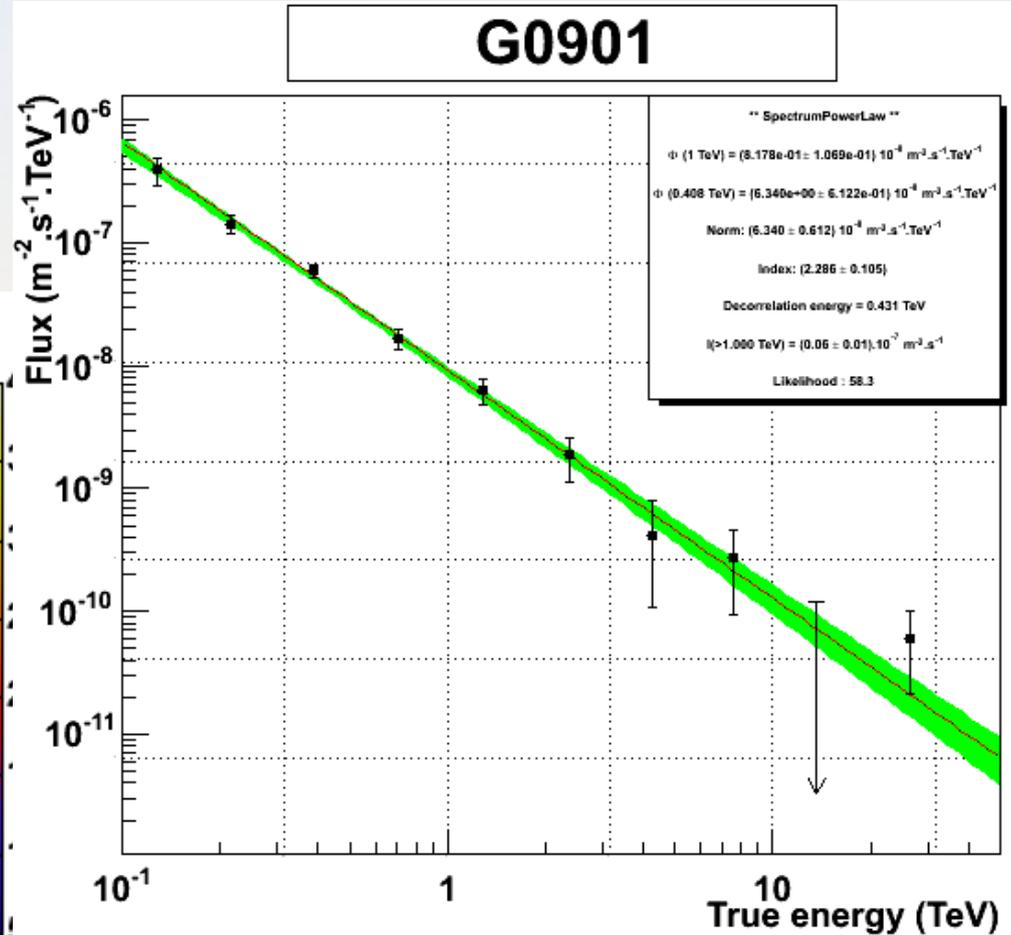
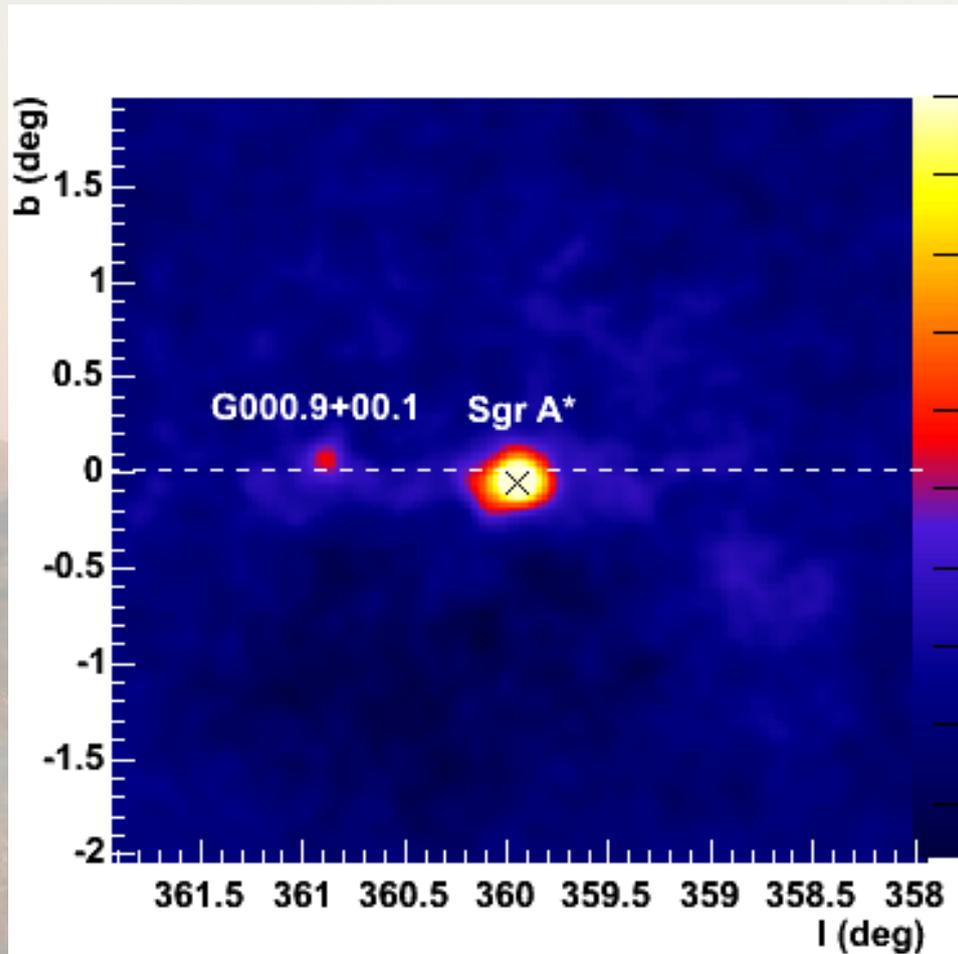
HESS J1303-631



2 Sources γ
dans le Même
Champ de Vue !!!

Un Reste de Supernova : G0.9+0.1

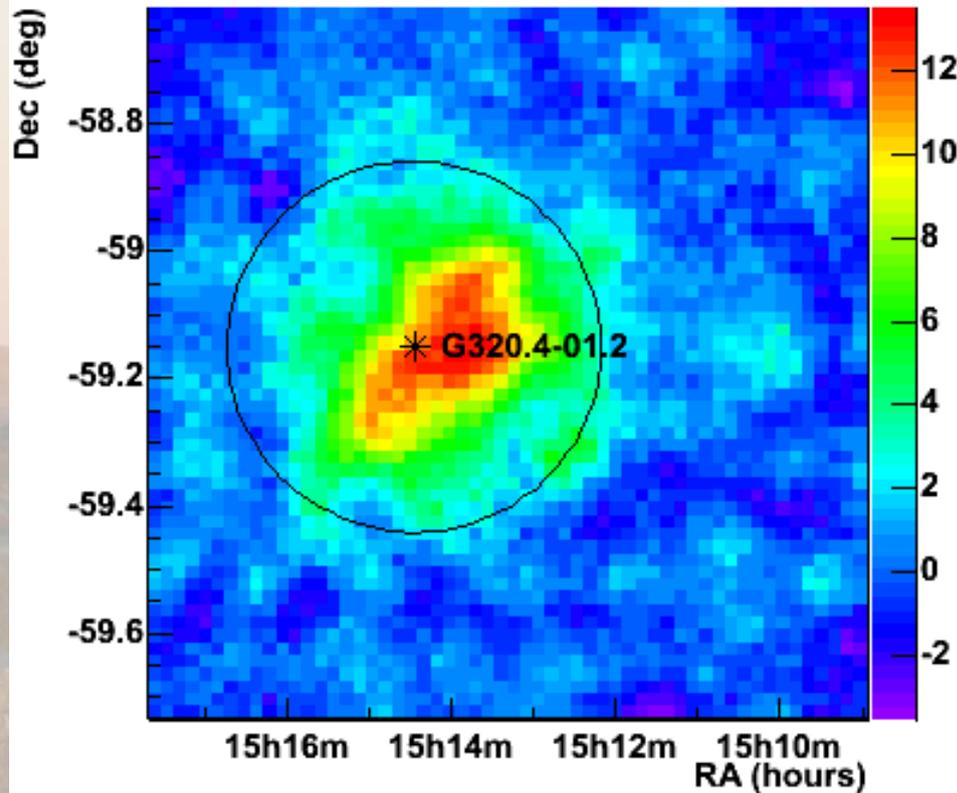
- $\sim 0,7^\circ$ du centre galactique
- 10σ en 35 h



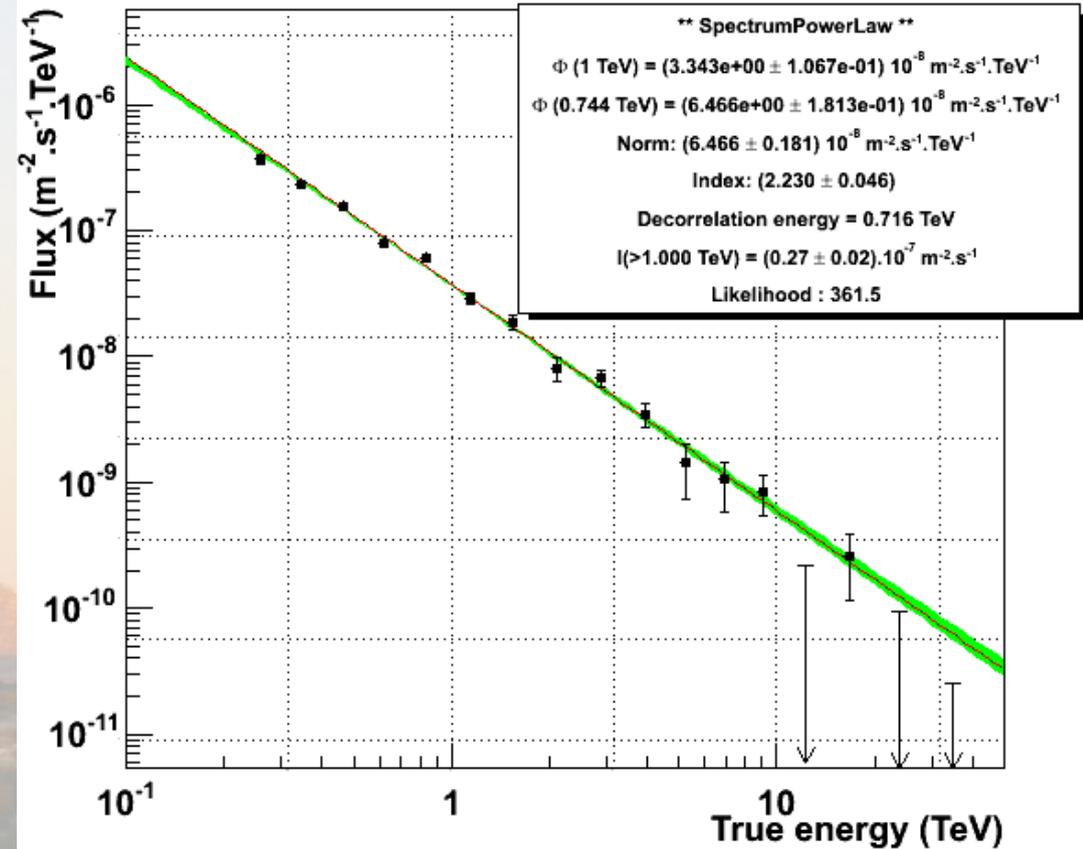
Un Reste de Supernova : MSH15-5-2

- 26 σ en 26,5 h

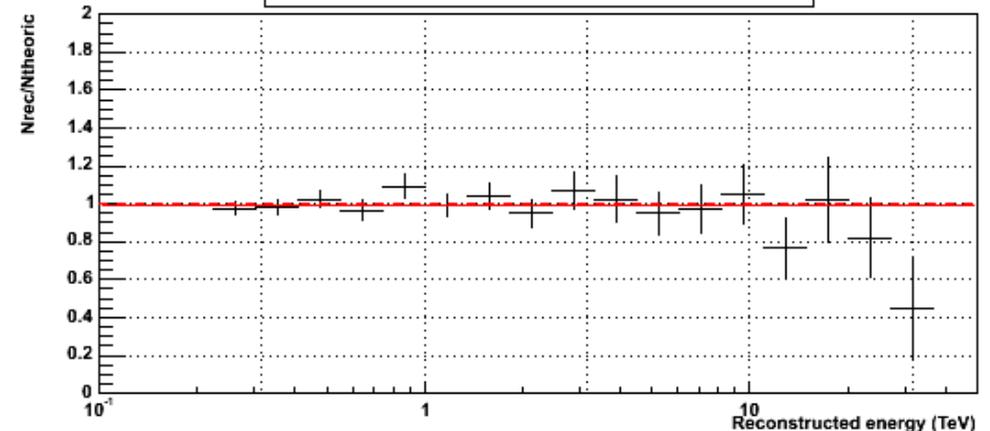
Significance Map



MSH 15-5-2



Residuals



Un Reste de Supernova en Coquille

RXJ 1713.7-3946

- Résolution angulaire $\sim 6'$ \rightarrow morphologie résolue !

Données 2004 :

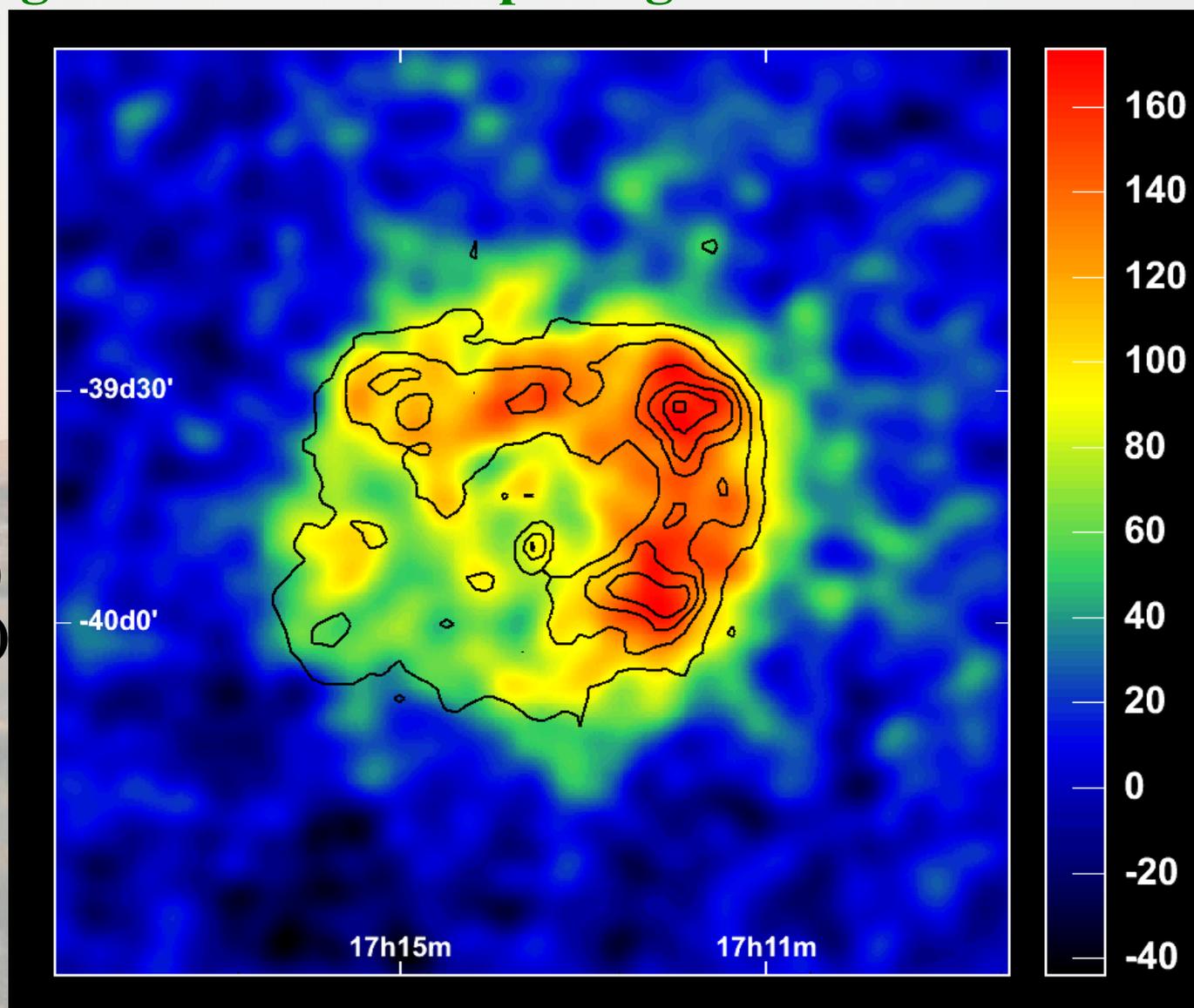
33 heures sur source

angle zénithal : 15 à 60°

Carte d'excès

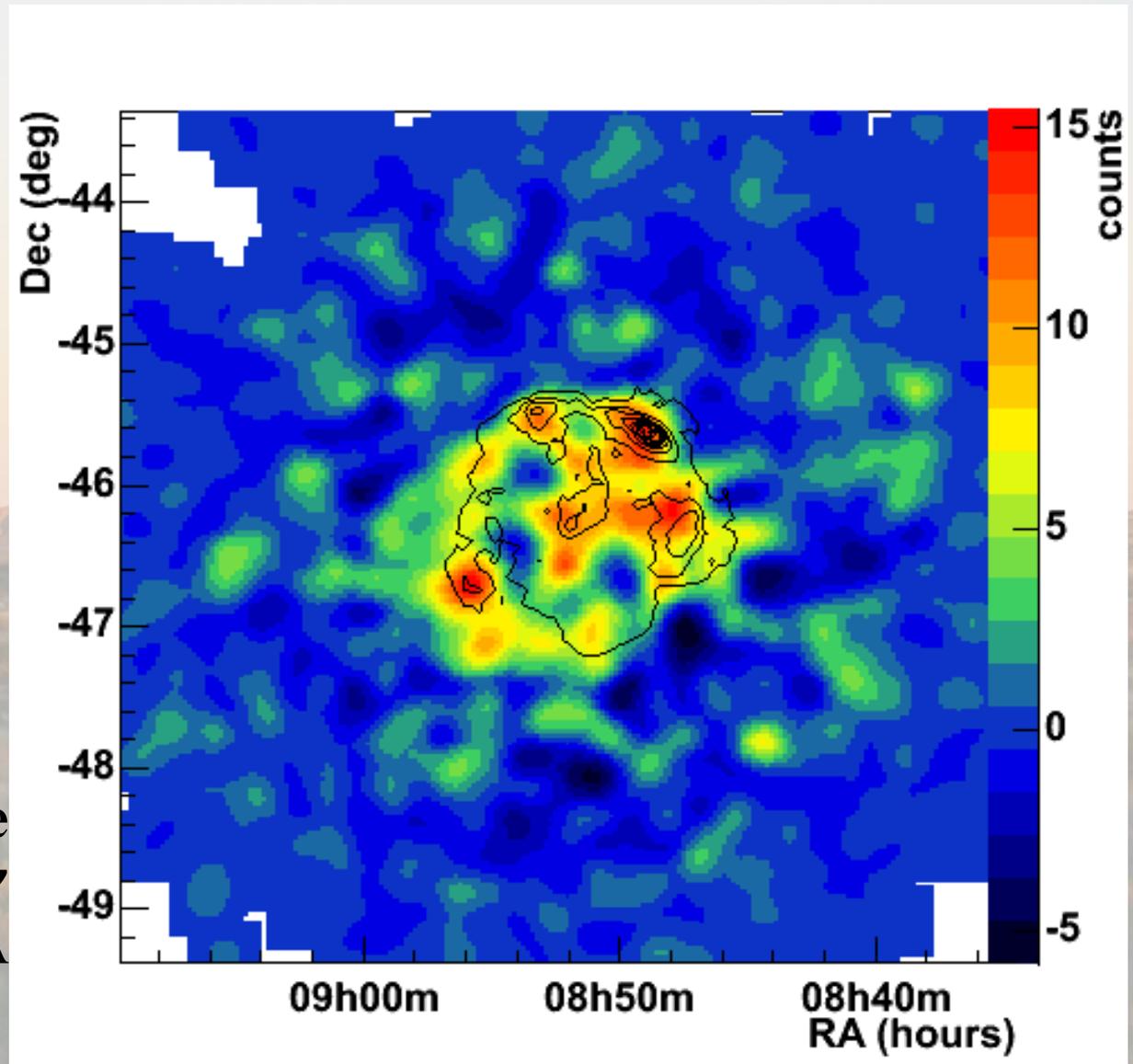
(nombre de γ)

Contours : ASCA (X)



Un Reste de Supernova en Coquille : Vela Junior (RX J0852.0-4622)

- Février 2004
- Angle zénithal $\sim 25^\circ$
- 12σ en 3,2 h ($\theta < 1^\circ$)

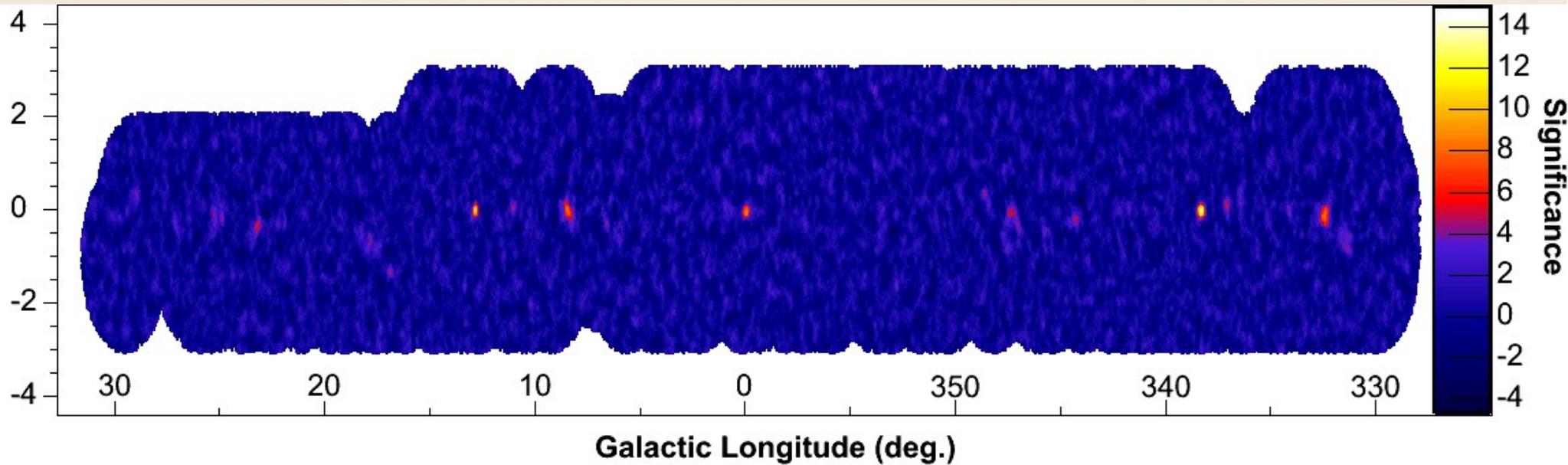


Carte du nombre de γ
Contours X : ASCA

Balayage du plan galactique, $-30^\circ < l < +30^\circ$

- **8 sources**

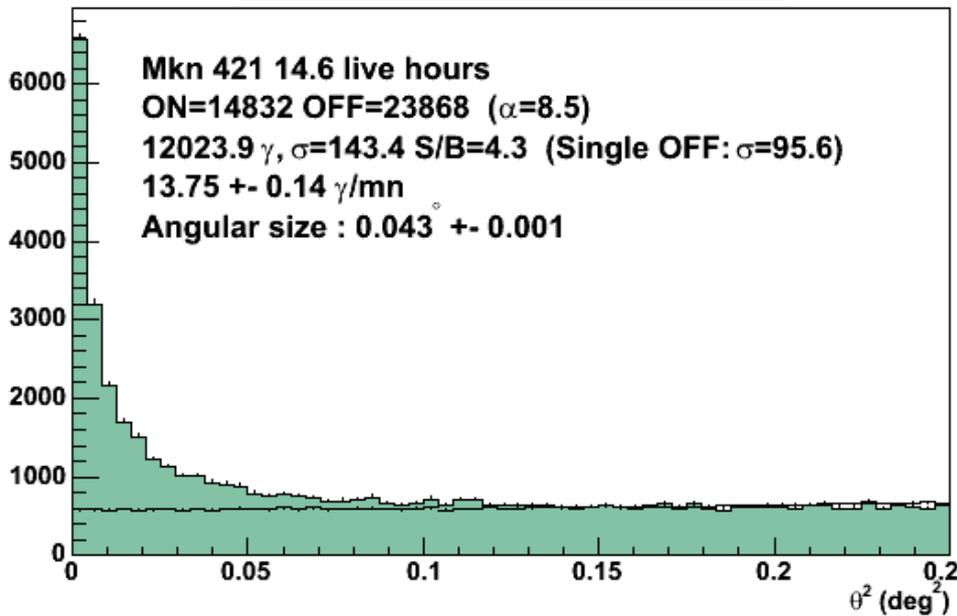
- 4 associées à des SNRs
- 4 non identifiées (2 associées à des sources EGRET ?)



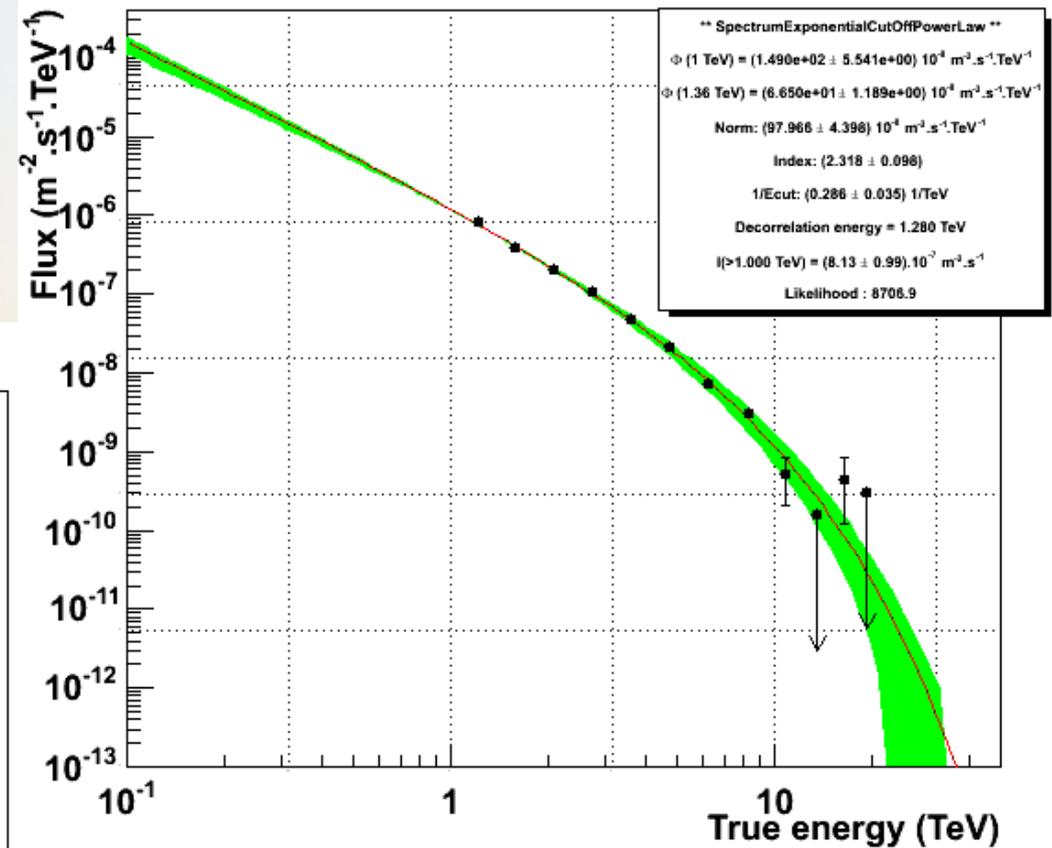
Un AGN : Mkn 421

- Angle zénithal $> 60^\circ$
- Plus de 140σ !!

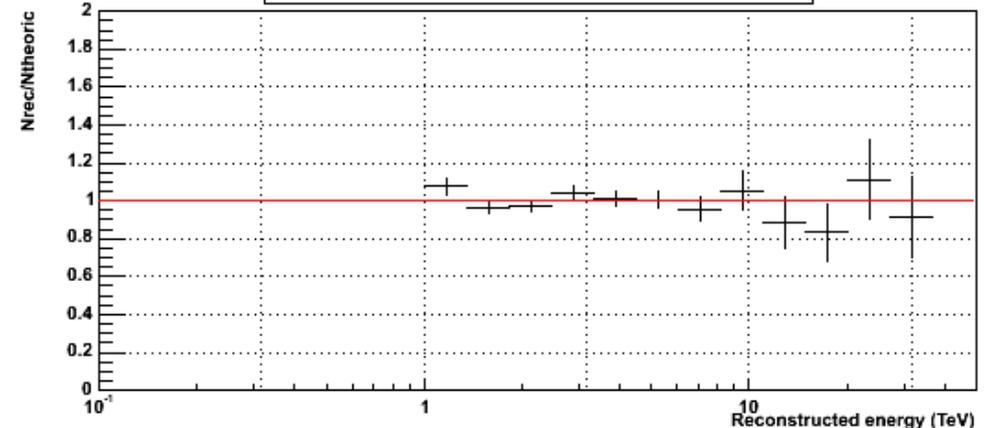
Mkn 421



Mkn 421



Residuals



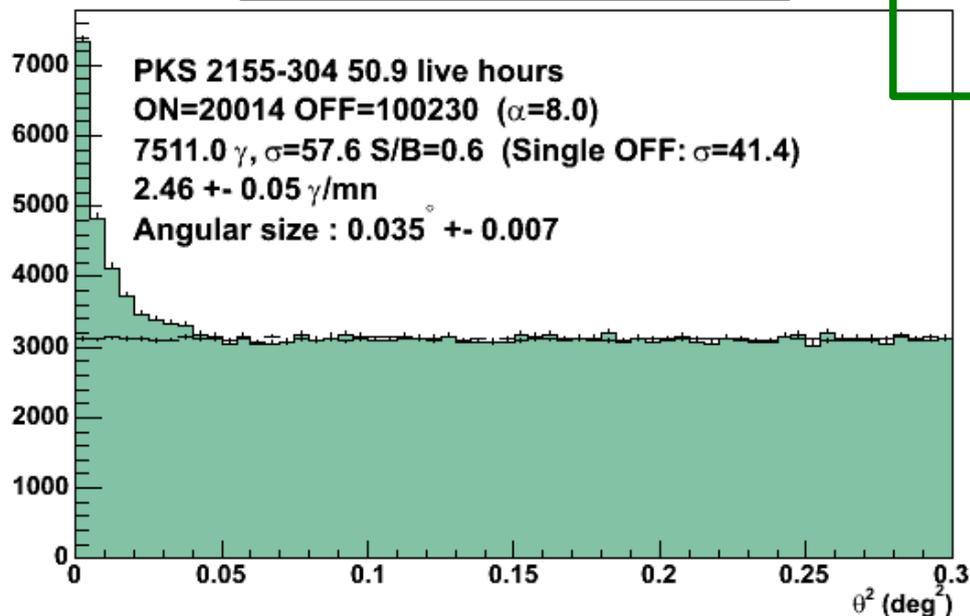
Un AGN : PKS 2155-304

- 1ère source détectée par HESS dès juillet 2002
- Visible à chaque période d'observation
- Visible dans un état bas et stable de la source ?

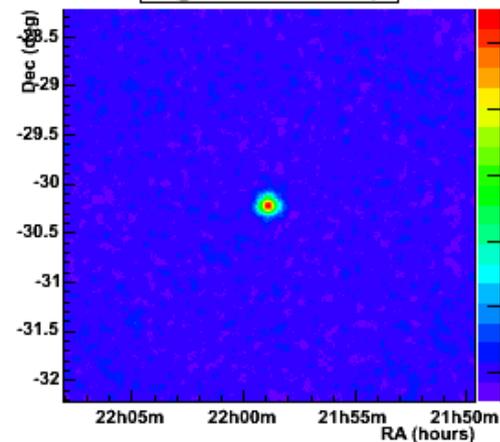
Données 2004

- 51 h
- 58 σ , 7511 γ

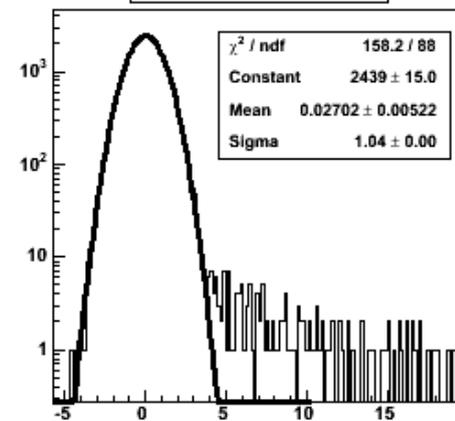
PKS 2155-304 2004



Significance Map



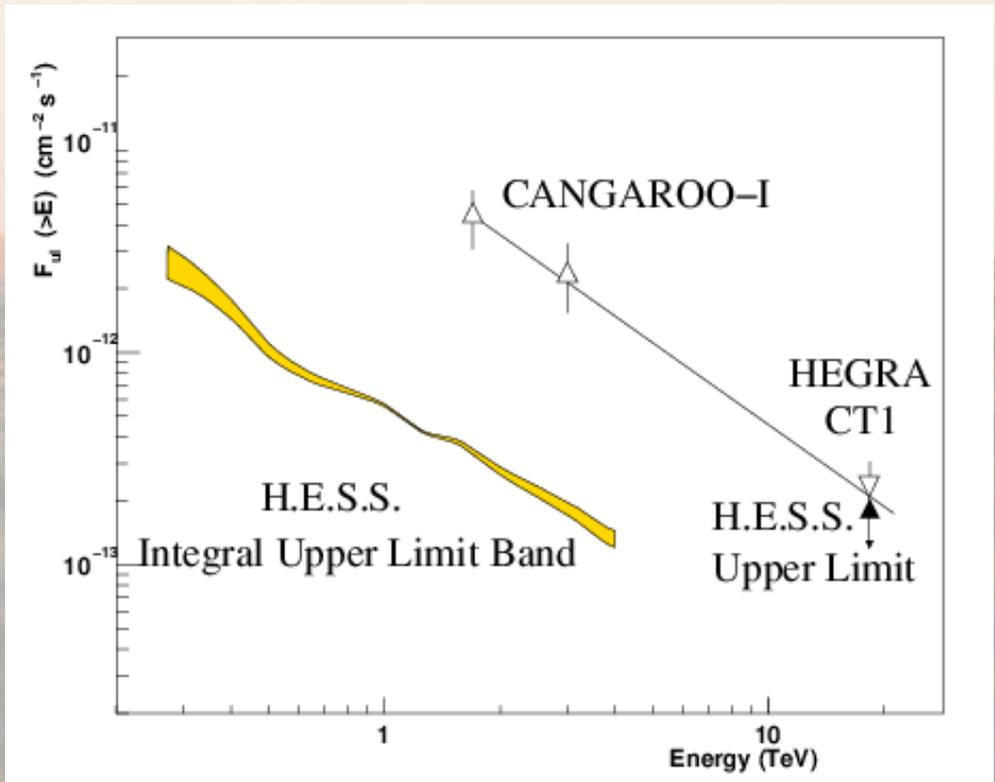
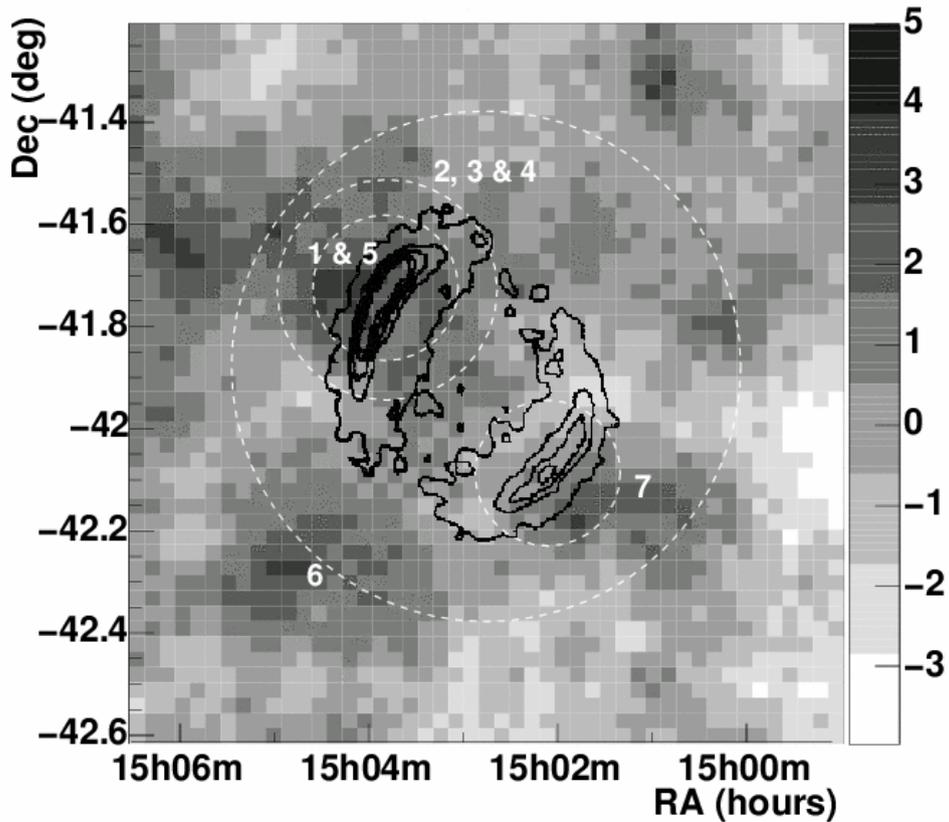
Significance distribution



SN1006 : Non Détection

• Observations

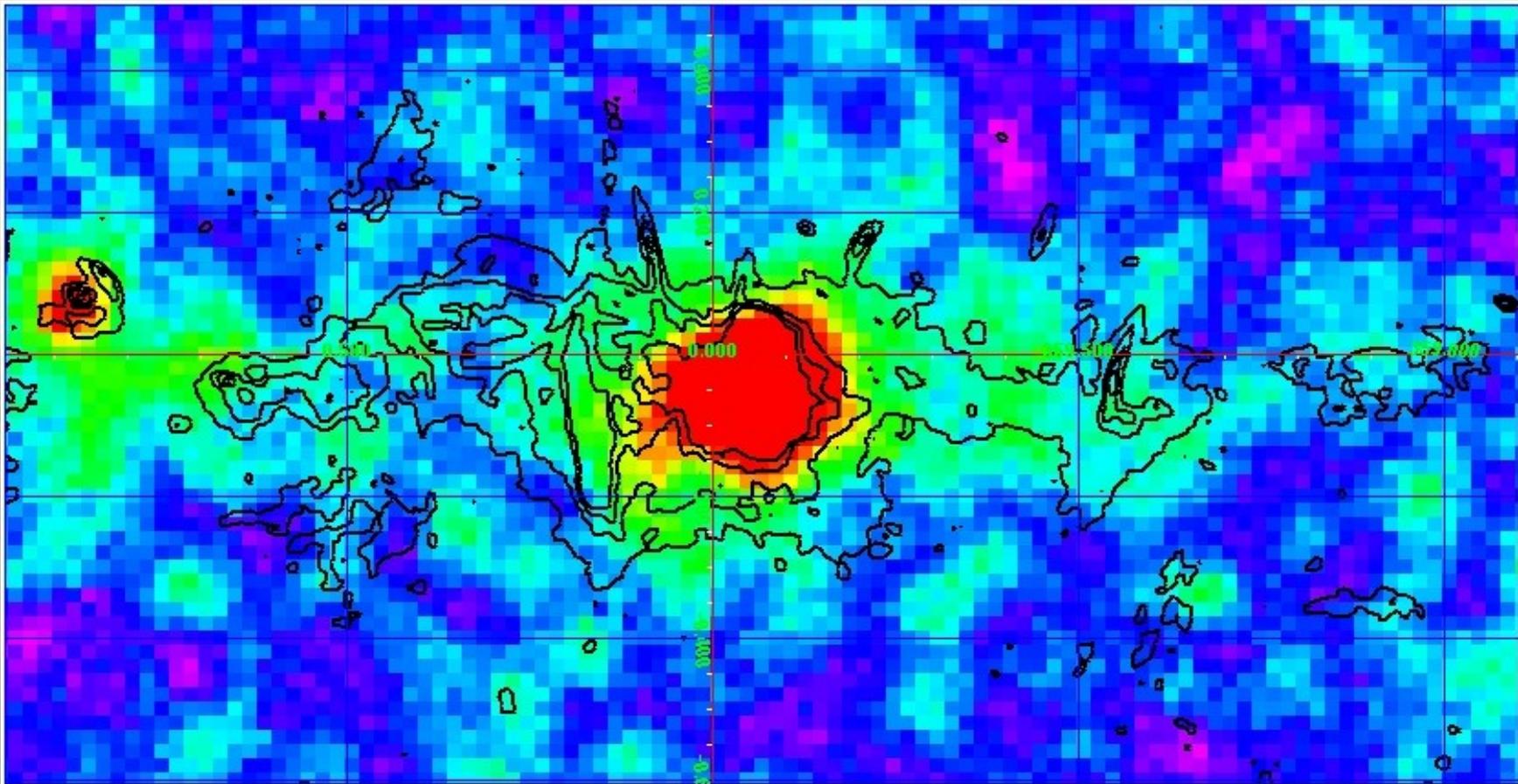
- 2003 : 2 télescopes, 18 h
- 2004 : 4 télescopes, 6h



Carte du Centre Galactique

- Carte du Centre Galactique en 2004 : 2 sources !

Comparaison aux données radio à 90 cm



Profils des Halos de Matière Noire

- Simulations N-corps de la formation des grandes structures

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{R}\right)^\gamma [1 + (r/R)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

	α	β	γ	R (kpc)
Kra	2,0	3,0	0,4	10,0
NFW	1,0	3,0	1,0	20,0
Moore	1,5	3,0	1,5	28,0
Iso	2,0	3,0	0,0	3,5