



# Recherche d'accélérateurs de rayons cosmiques galactiques avec HESS

**Armand Fiasson - LPTA**

# Sommaire

- **Introduction: les rayons cosmiques**
- **Le photon gamma, un messenger des rayons cosmiques**
- **L'expérience HESS**
- **Observations de restes de supernova avec HESS**
- **Intérêt des associations de vestiges de supernova avec des nuages moléculaires**
- **Analyse et interprétation de sources HESS**
- **Perspectives**

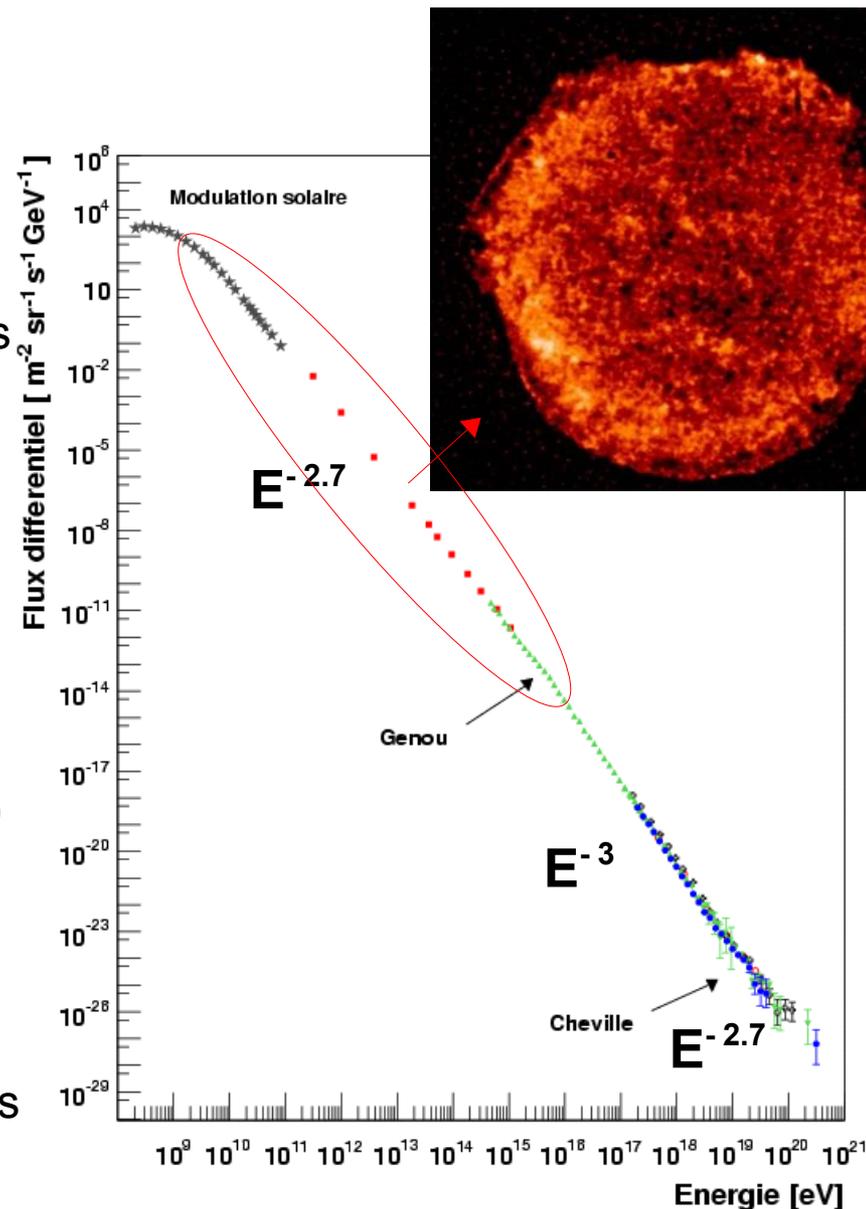
# Les rayons cosmiques

- **Découverte récente: 1912 par Victor HESS**

- Spectre en énergie en loi de puissance
- + de 10 ordres grandeurs en énergie => inédit dans la nature
- Plusieurs populations: galactiques, extra-galactiques
- => Origine mystérieuse!

- **Restes de supernova = lieu supposé d'accélération dans la Galaxie**

- Candidat historique: 1930 (Baade & Zwicky)
- $P_{RC} \approx \epsilon_{RC} \times V_{gal} / t_{échap} \approx 10^{41}$  erg/s
- Supernova  $\approx 10^{42}$  erg/s (1 SN =  $10^{51}$  erg tous les 30 ans)
- Mécanisme de Fermi:
  - Loi de puissance d'indice  $\sim 2$
  - 10-20% efficacité de conversion dans les rayons cosmiques



# L'astronomie gamma

- **Les rayons cosmiques sont déviés par les champs magnétiques**

- Détection de particules neutres
- Produites par l'interaction des particules accélérées dans le milieu environnant

- **Les rayons gamma sont idéaux pour rechercher l'origine des rayons cosmiques galactiques**

- Taux de détection significatif par rapport aux neutrinos  
=>  $\sim$  photon / min / km<sup>2</sup> contre  $\sim$  neutrino / an / km<sup>3</sup>
- Rayons gamma 10 TeV = présence de particules  $E > 10$  TeV

- **$E > \text{TeV} \Rightarrow$  flux trop faibles pour des satellites ou ballons**

- Nébuleuse du Crabe  $> 1$  TeV  $\Rightarrow \sim 6$  photons m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
=> Détection au sol

## Hadrons

$$pp \rightarrow \pi^0 + \dots \rightarrow \gamma\gamma + \dots$$

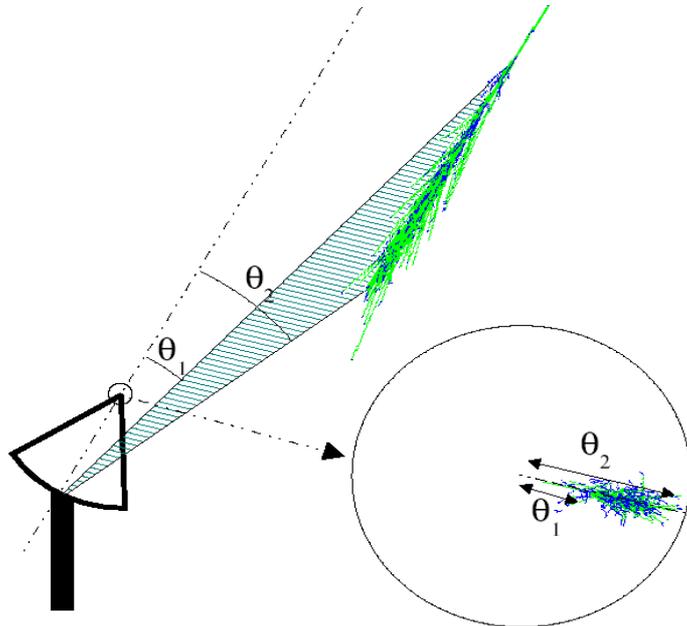
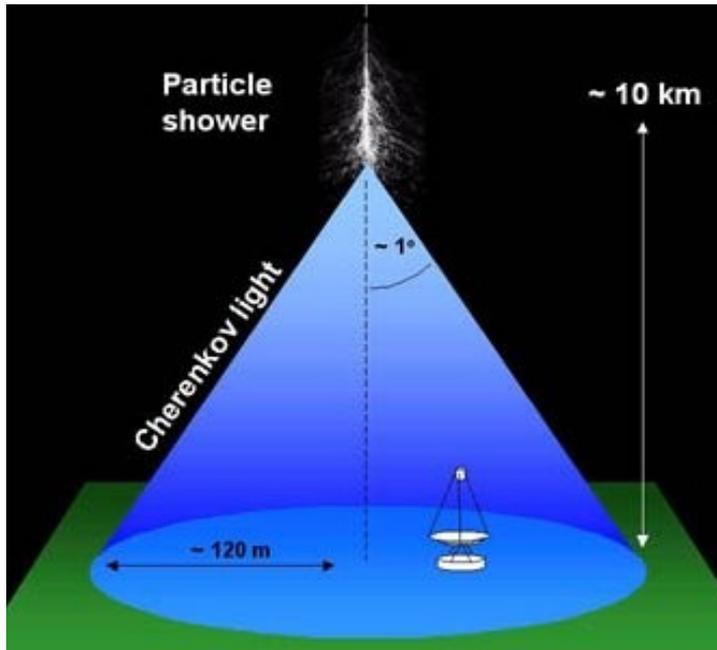
$$pp \rightarrow \pi^\pm + \dots \rightarrow \nu + \dots$$

## Electrons

$$\text{Bremsstrahlung} \rightarrow \gamma$$

$$\text{Compton inverse} \rightarrow \gamma$$

# HESS – Réseau d'imageurs Tcherenkov

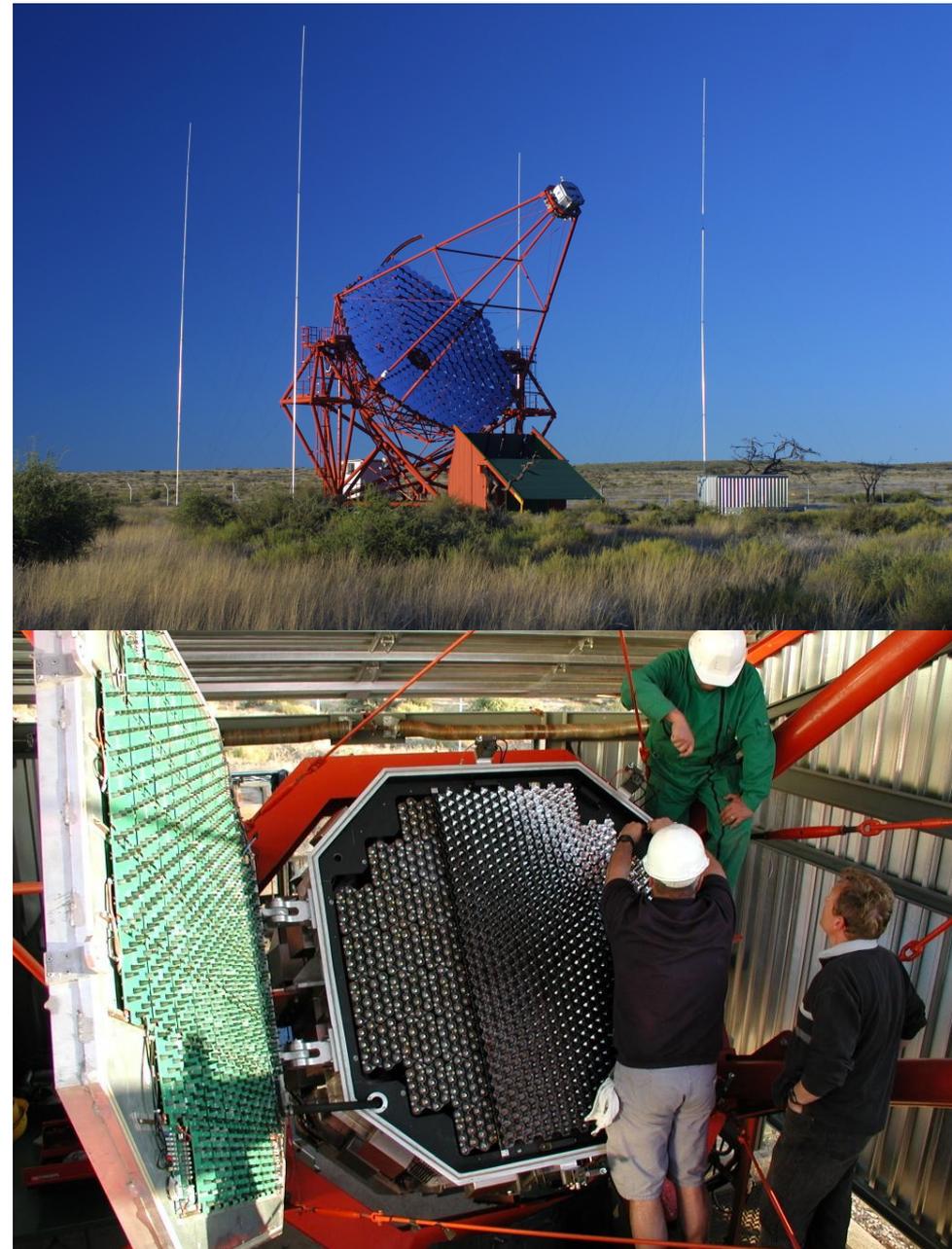


- Observation entre 100 GeV et qqes 10 TeV
- Détection du flash Tcherenkov de la gerbe atmosphérique
  - Image du développement de la gerbe au foyer du réflecteur
  - Observation stéréoscopique des images

=> Gain de précision
- Analyse des images
  - => Direction de propagation
  - => Energie de la particule primaire
- Forme des gerbes
  - => Distinction gamma - hadron

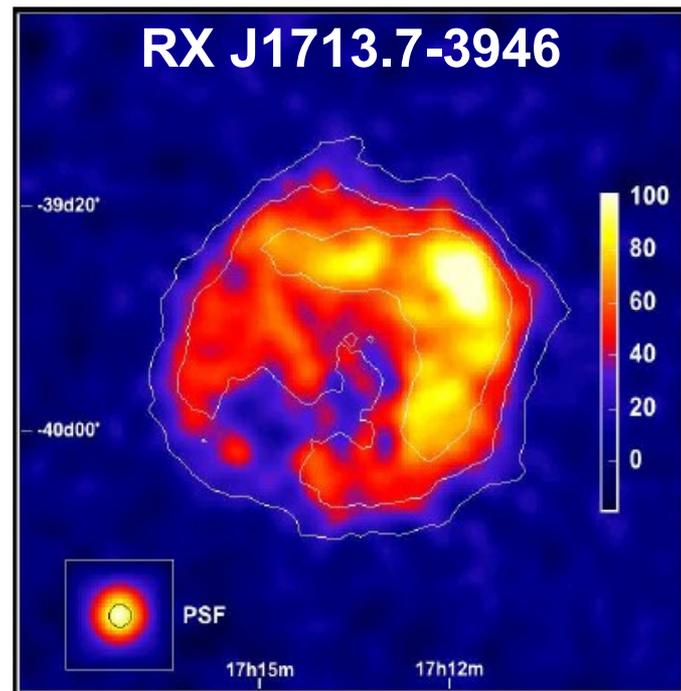
# Les télescopes de HESS

- **4 télescopes de 13 m de diamètre**
  - Répartis sur un carré de 120 m de côté
  - Grande sensibilité
  - Renvoie la lumière Tcherenkov au foyer
- **Caméra composée de 960 pixels**
  - Fine pixellisation
  - Champ de vue total de 5°
- **Toute l'électronique est contenue dans la caméra**
  - Système d'échantillonnage rapide
    - => Réduction du bruit de fond de ciel
    - => Réduction du seuil en énergie
  - Maintenance facilitée

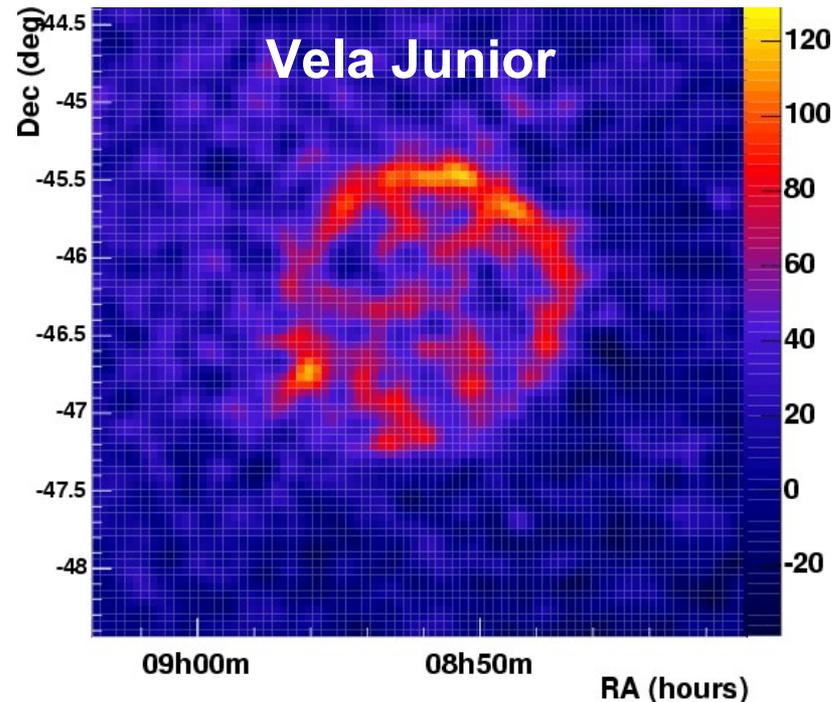


# Observations de vestiges de supernova

- **Détection de vestiges de supernovae en coquille avec HESS**
  - RX J1713.7-3946 & Vela Junior (RX J0852-4622)
    - => Accélération de particules jusqu'à plus de 100 TeV
- **Spectre en énergie en loi de puissance**
  - Indice spectral proche de 2 ( $1.79 \pm 0.06$  &  $2.24 \pm 0.04$ )
    - => Compatible avec une population de protons en  $E^{-2}$

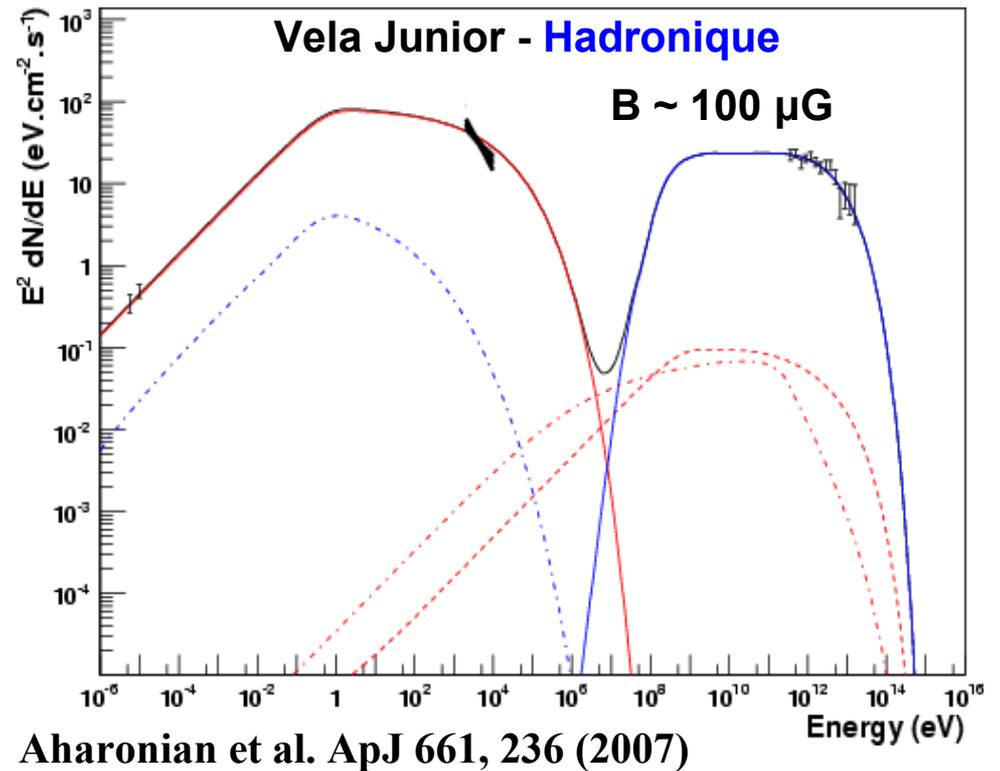
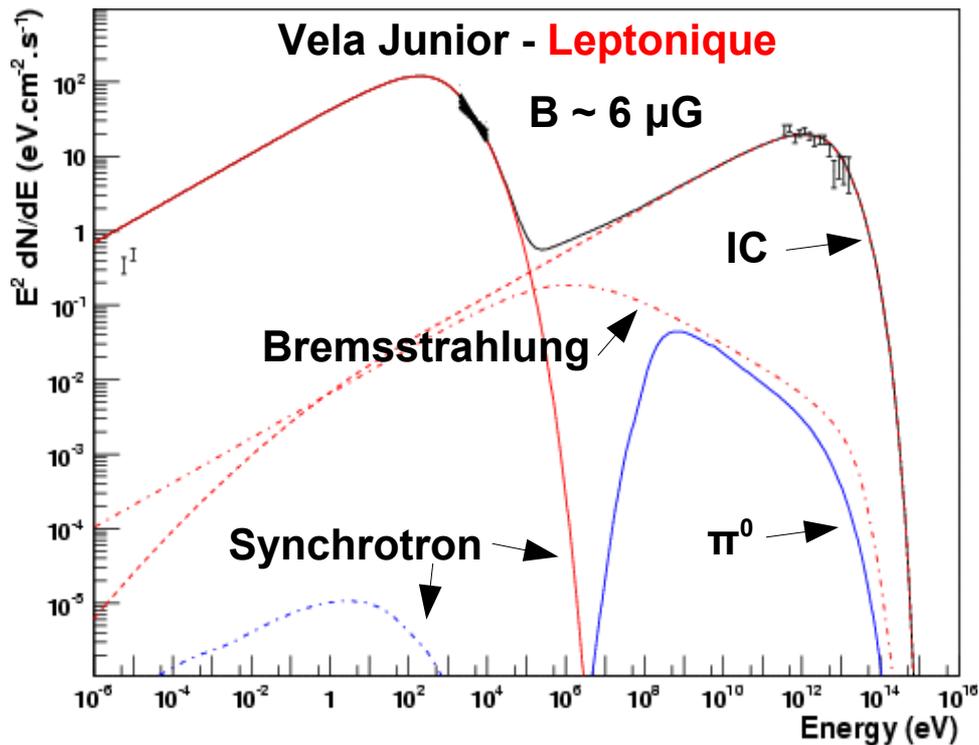


Aharonian et al. A&A 464, 235 (2007)



Aharonian et al. ApJ 661, 236 (2007)

# Comparaison aux modèles



- **Origine de l'émission de rayons gamma ?**

- Compton inverse + émission synchrotron en rayons X => champ magnétique faible ( 3-6  $\mu\text{G}$ )

ou

- Champ magnétique fort ( $\sim 100 \mu\text{G}$ ) =>  $pp \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  + émission synchrotron d'électrons

- => Probablement un mélange des deux

- => Gamme de HESS trop étroite pour conclure

# Intérêt des nuages moléculaires

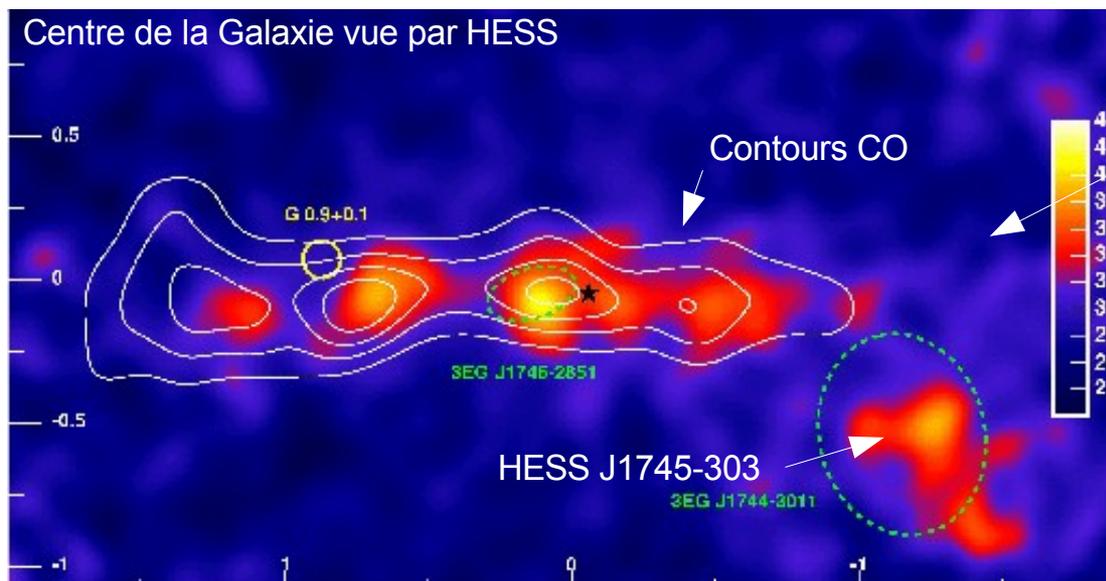
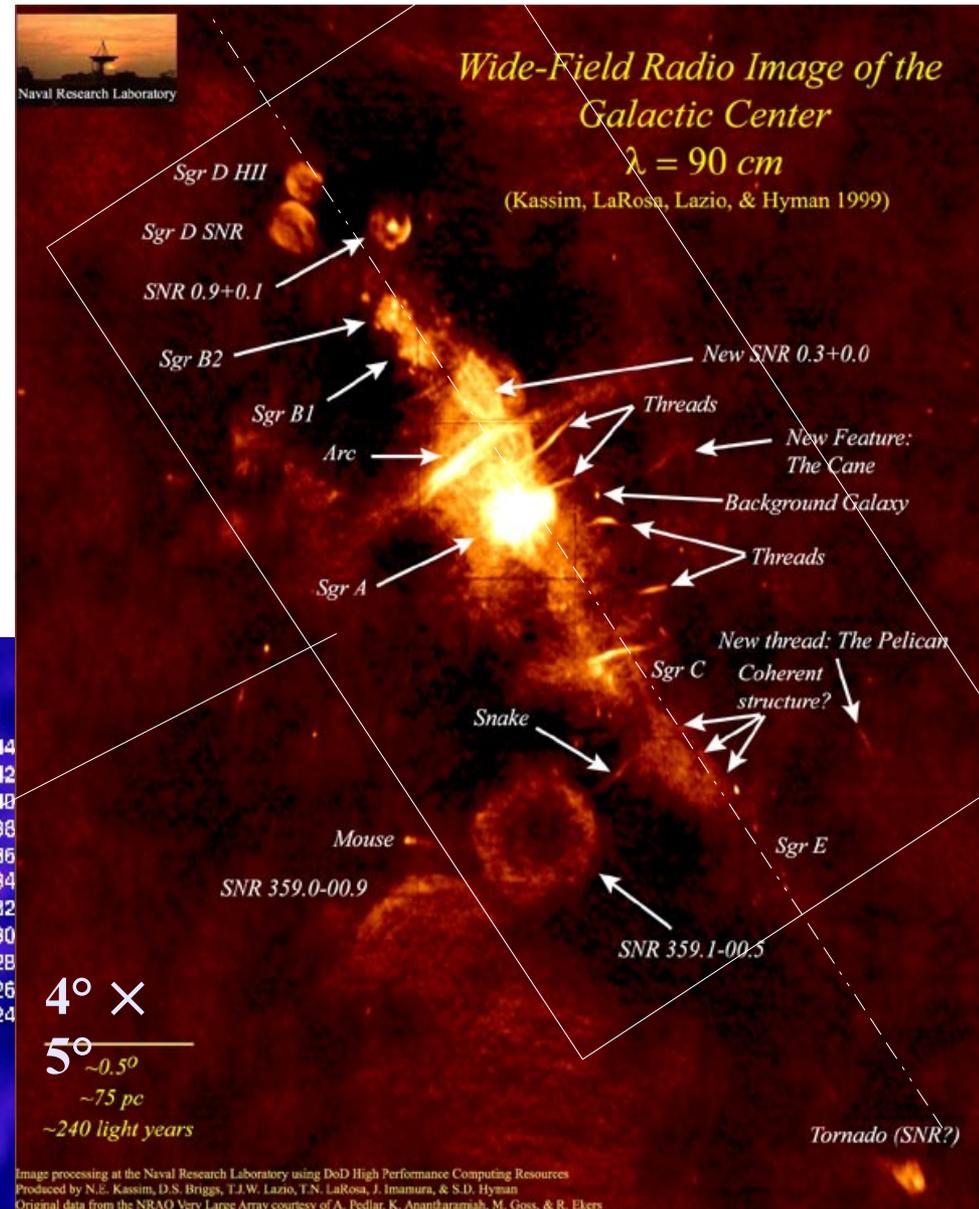
- **Nuages moléculaires à proximité d'un accélérateur = sondes pour les hadrons**
  - => Corrélation entre matière et rayons gamma
    - Compton inverse indépendant de la densité du milieu
    - Nécessité d'une concentration de matière pour la production de pions neutres mais production possible de gamma par Bremsstrahlung (dépendant de la densité du milieu)
- **Champs magnétiques plus intense au sein des nuages**
  - Connaissance du champ magnétique par effet Zeeman
  - Contraintes plus fortes sur la quantité d'électrons
- **Associations naturelles**
  - Nuages moléculaires = régions de formation d'étoiles
  - => à l'origine de supernovae

# Associations accélérateurs - cibles

- **Association effective difficile à mettre en évidence**
    - => Nécessité d'indicateurs fiables d'interaction
  - **Emission maser du radical OH 1720 MHz**
    - Pompage collisionnel à l'origine de l'inversion de population
    - Densité et température nécessaire = typique de nuages choqués
    - Indicateur du passage du choc dans un nuage dense
  - **Densité de radical OH augmentée par le passage du choc**
    - Création d'eau par le choc ( $O_1 + H_2 \rightarrow H_2O, \dots$ )
    - Photo-dissociation derrière le choc
      - => formation de radicaux OH
- => Ces vestiges sont des cibles idéales pour la mise en évidence de l'accélération de hadrons

# Le vestige de supernova G359.1-0.5

- Centre de la Galaxie riche en rayons gamma
- Le vestige G359.1-0.5
  - A quelques 100 pc du centre de la Galaxie
  - Entouré d'une coquille de matière
    - => vents stellaires d'un amas d'étoiles
  - Interaction du vestige avec cette coquille
    - Maser OH autour du vestige
  - A proximité de la source HESS J1745-303



# HESS J1745-303 & G359.1-0.5

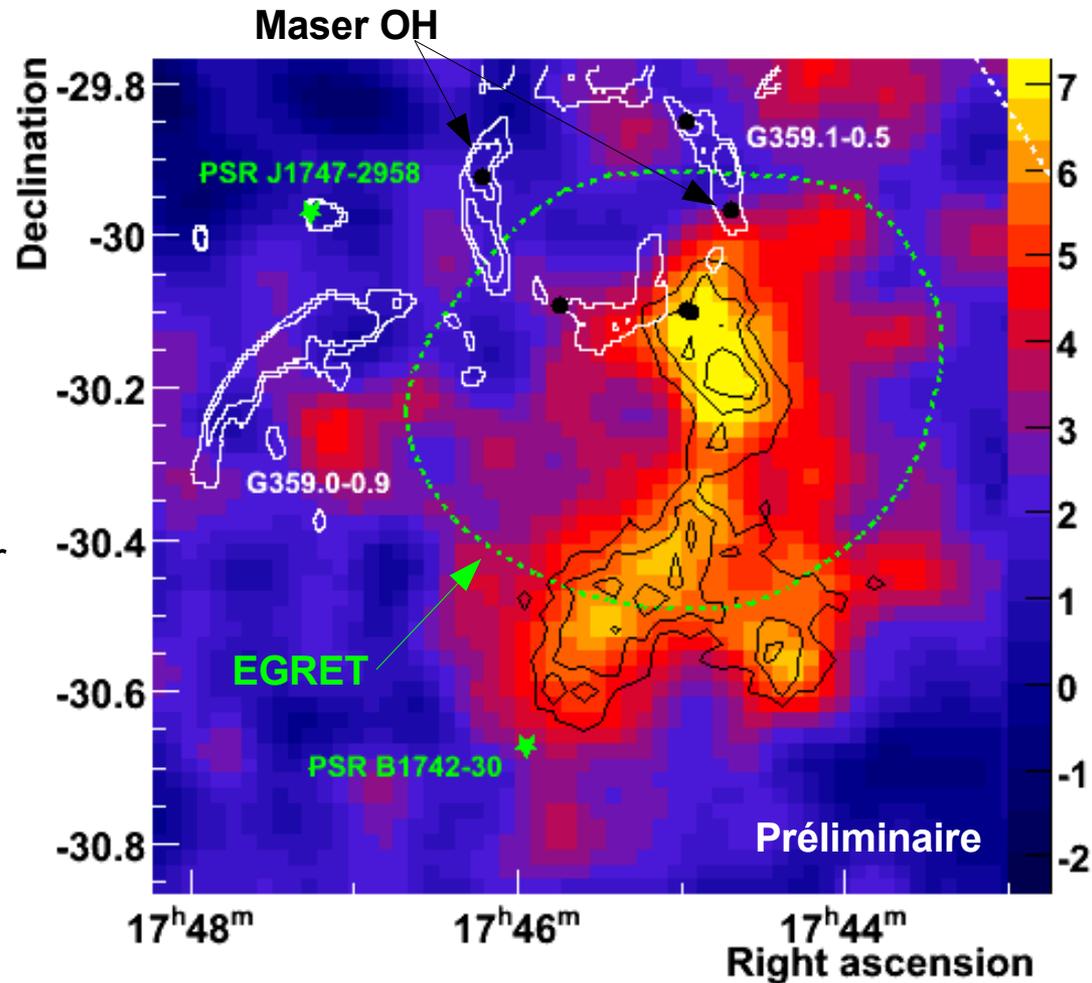
- **HESS J1745-303**

- Morphologie complexe
- Pas d'associations évidentes
- Source EGRET coïncidente

- **Partie nord**

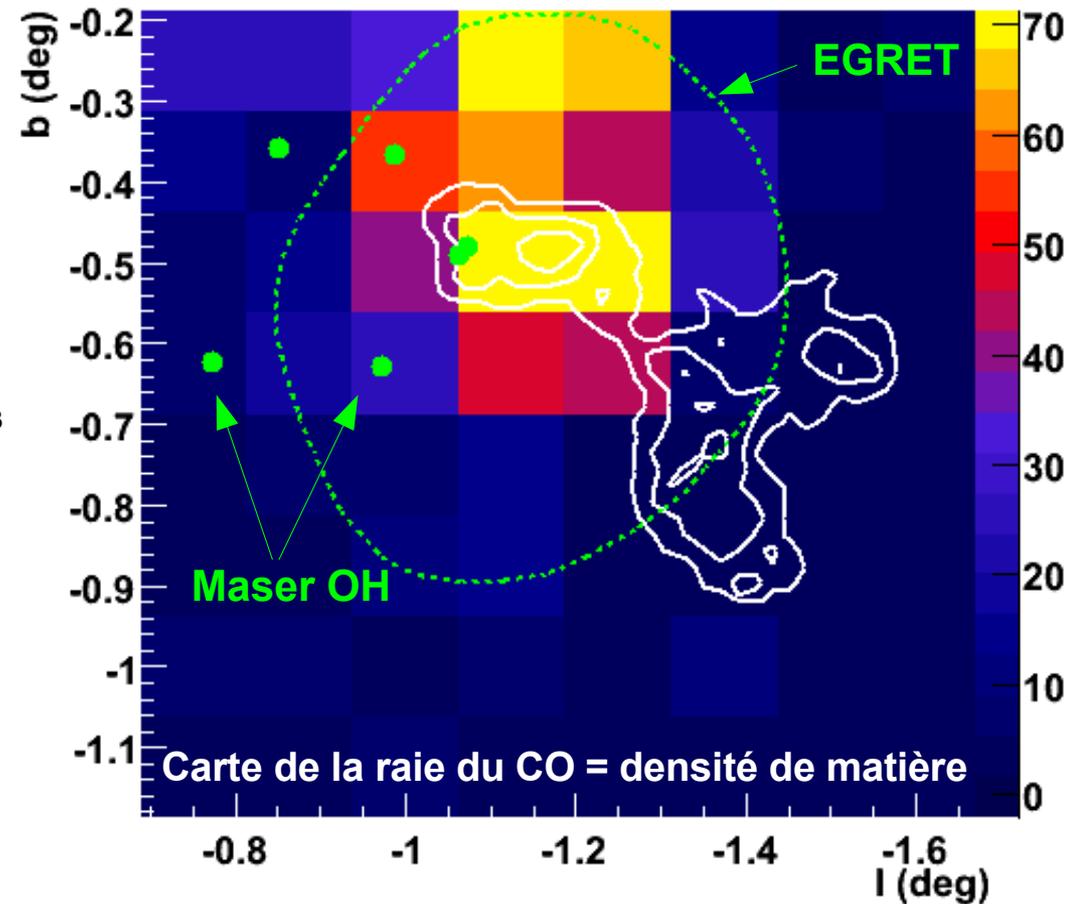
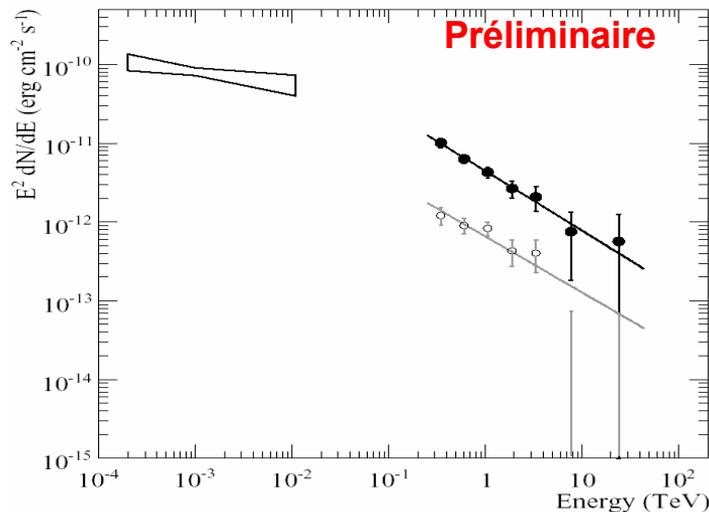
- Proche de la coquille du vestige
- Coïncide avec plusieurs émissions maser
  - => nuages moléculaires choqués
- Pas de rayons X

=> Origine hadronique des rayons gamma possible



# Association avec un nuage moléculaire

- **Analyse des données radio**
  - Une fraction de la coquille de matière coïncide avec la partie nord
  - $5 \times 10^4$  masses solaires ( $\sim 5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ )
- **Point de vue énergétique**
  - Densité d'énergie de protons  $\sim 30 \text{ eV/cm}^3$
  - Conversion de  $\sim 12\%$  de l'énergie d'explosion dans les rayons cosmiques nécessaire
  - $\Rightarrow$  Scénario très vraisemblable



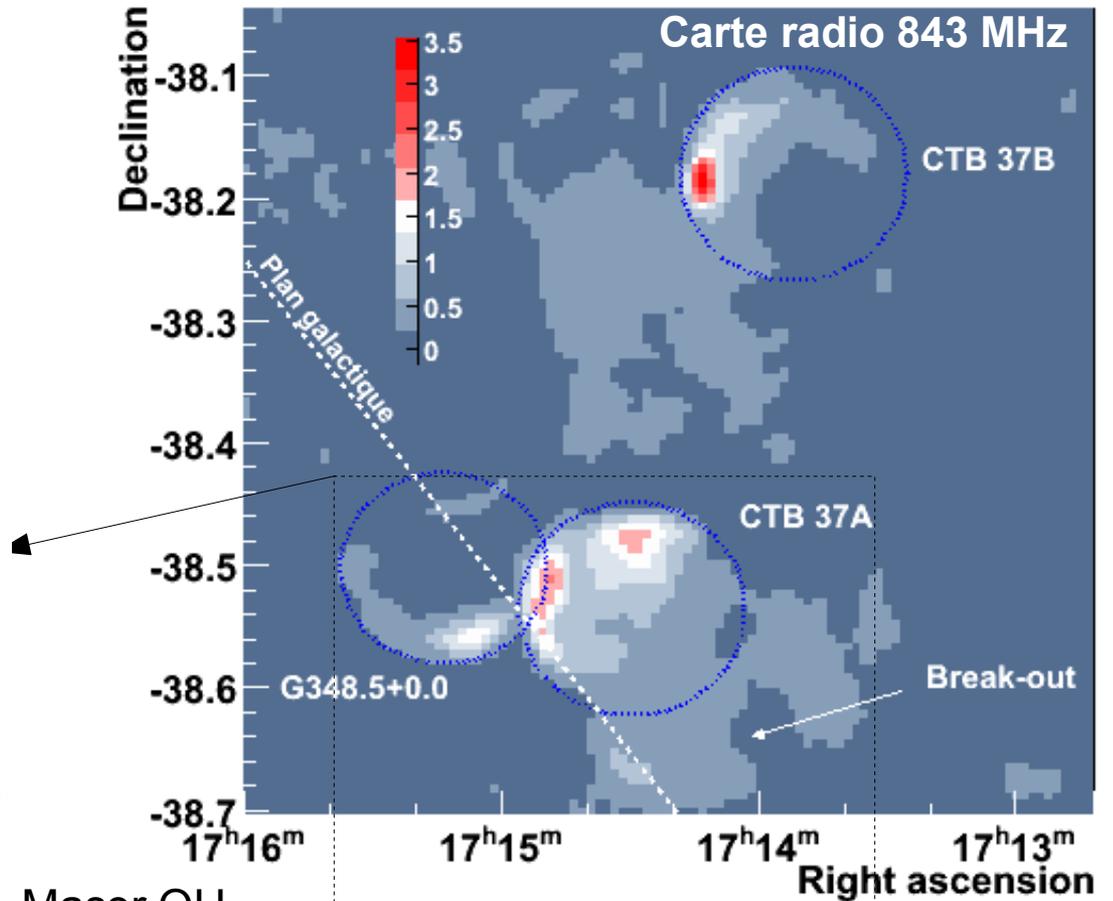
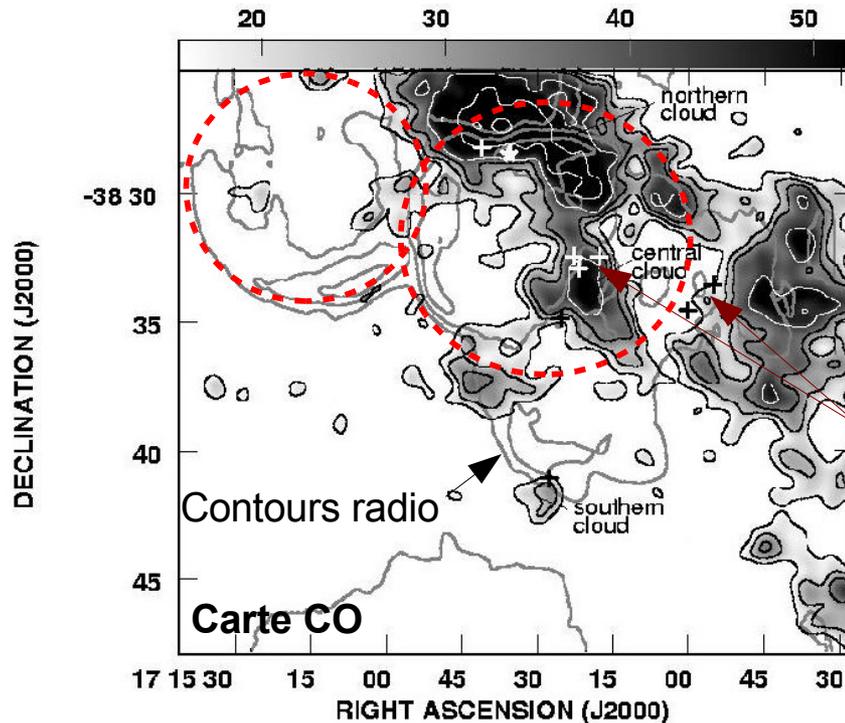
Aharonian et al., accepté par A&A

arXiv:0803.2844

# Le vestige de supernova CTB 37A

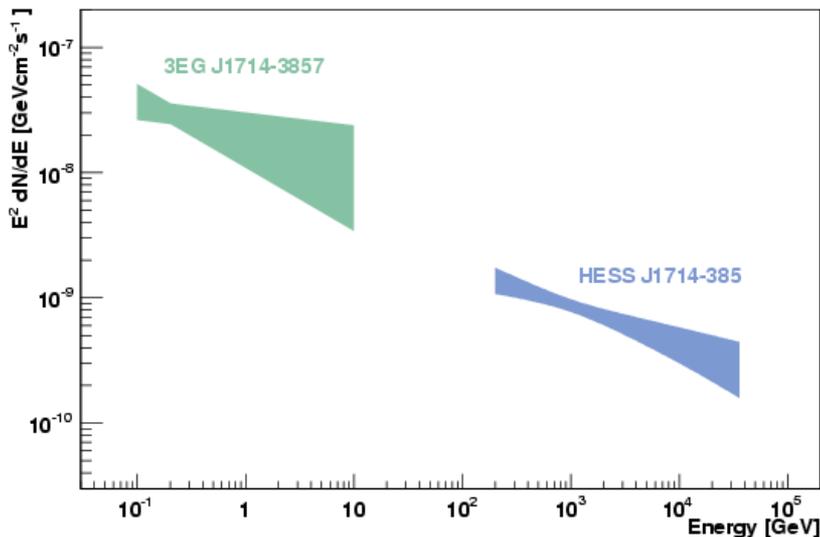
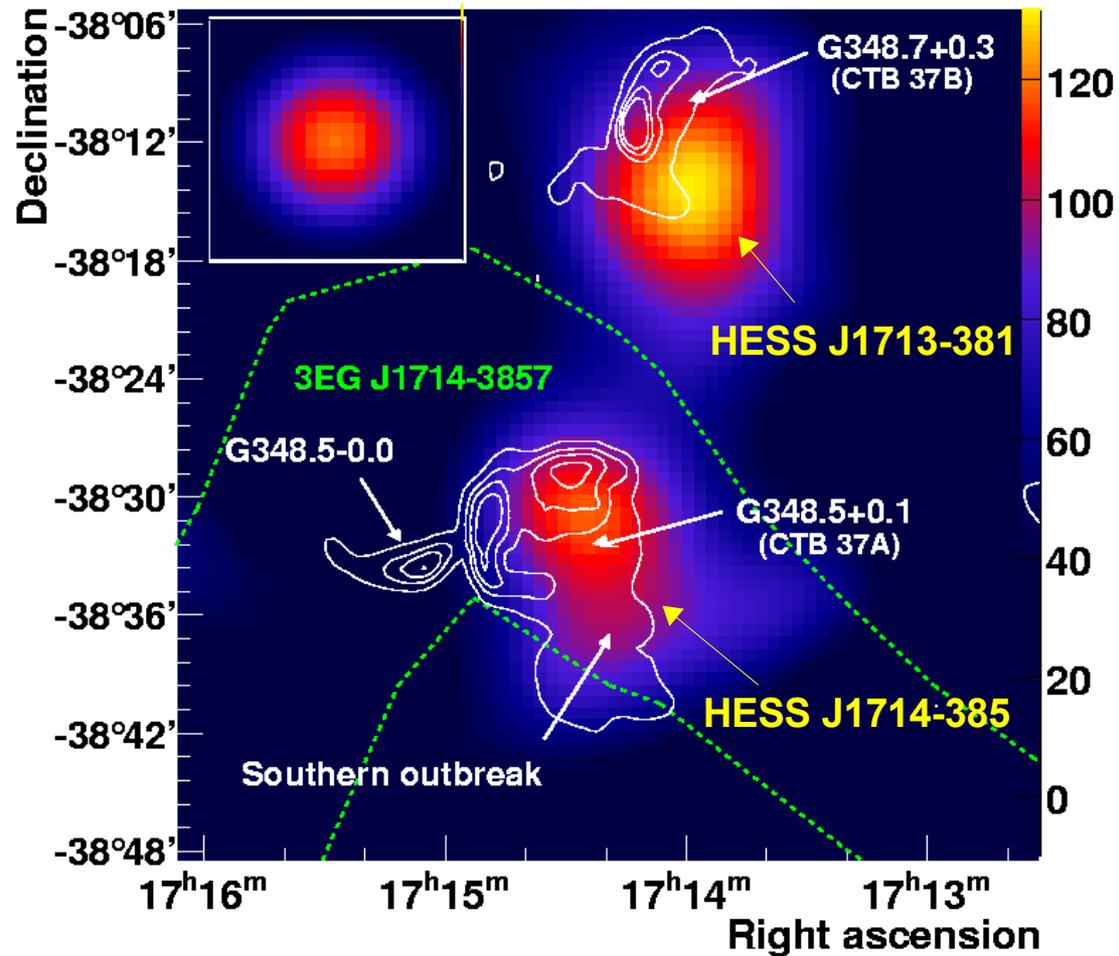
- **Vestige de supernova CTB 37A**

- Complexe de trois vestiges
- Situé à ~11 kpc
- Plusieurs nuages moléculaires
  - => densité  $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$
- Présence de maser OH



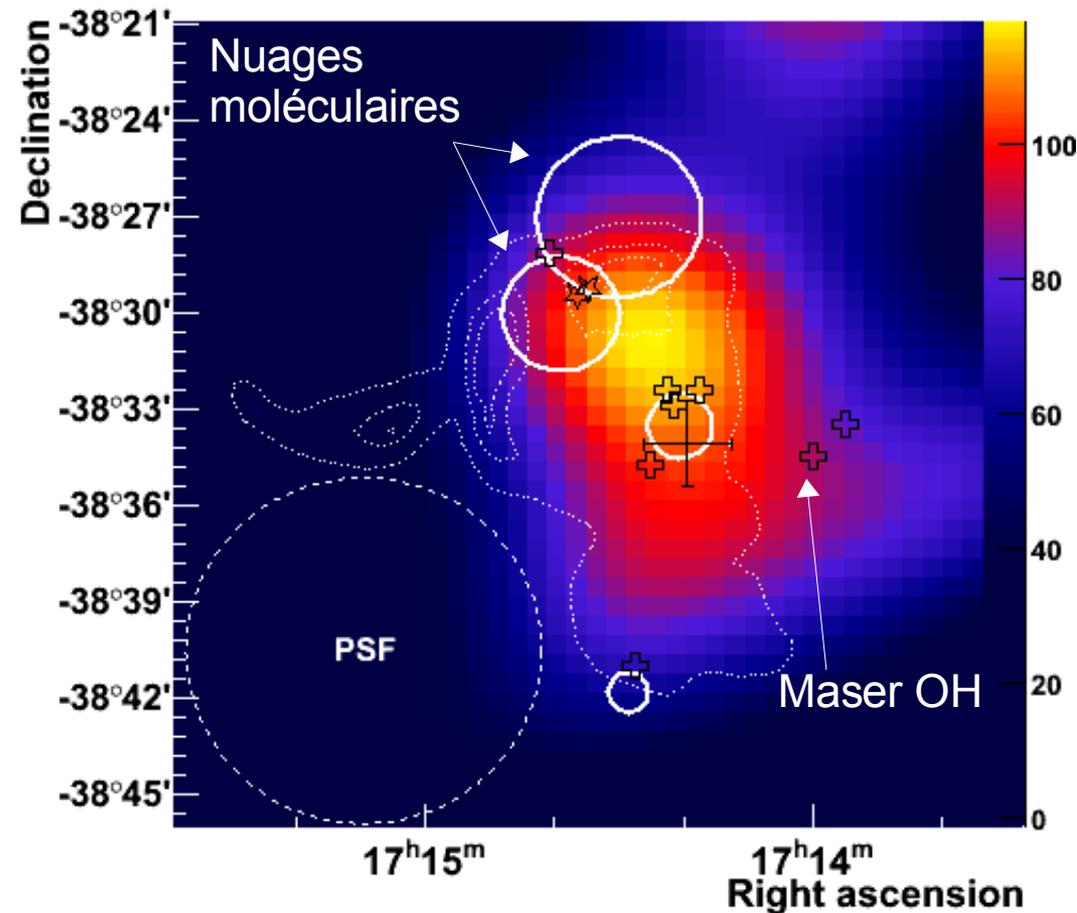
# HESS J1714-385 & CTB 37A

- Deux sources HESS coincidentes aux vestiges
  - HESS J1714-385 => CTB 37A
  - HESS J1713-381 => CTB 37B
- Association possible avec une source EGRET
  - Spectres compatibles



# Scénario hadronique

- **Coincidence avec la distribution de matière**
  - Nuages moléculaires choqués
  - Source EGRET
  - => Scénario hadronique vraisemblable
- **Point de vue énergétique**
  - [5 - 30] % des  $10^{51}$  erg convertis en rayons cosmiques
  - => Scénario vraisemblable



# Scénario leptonique

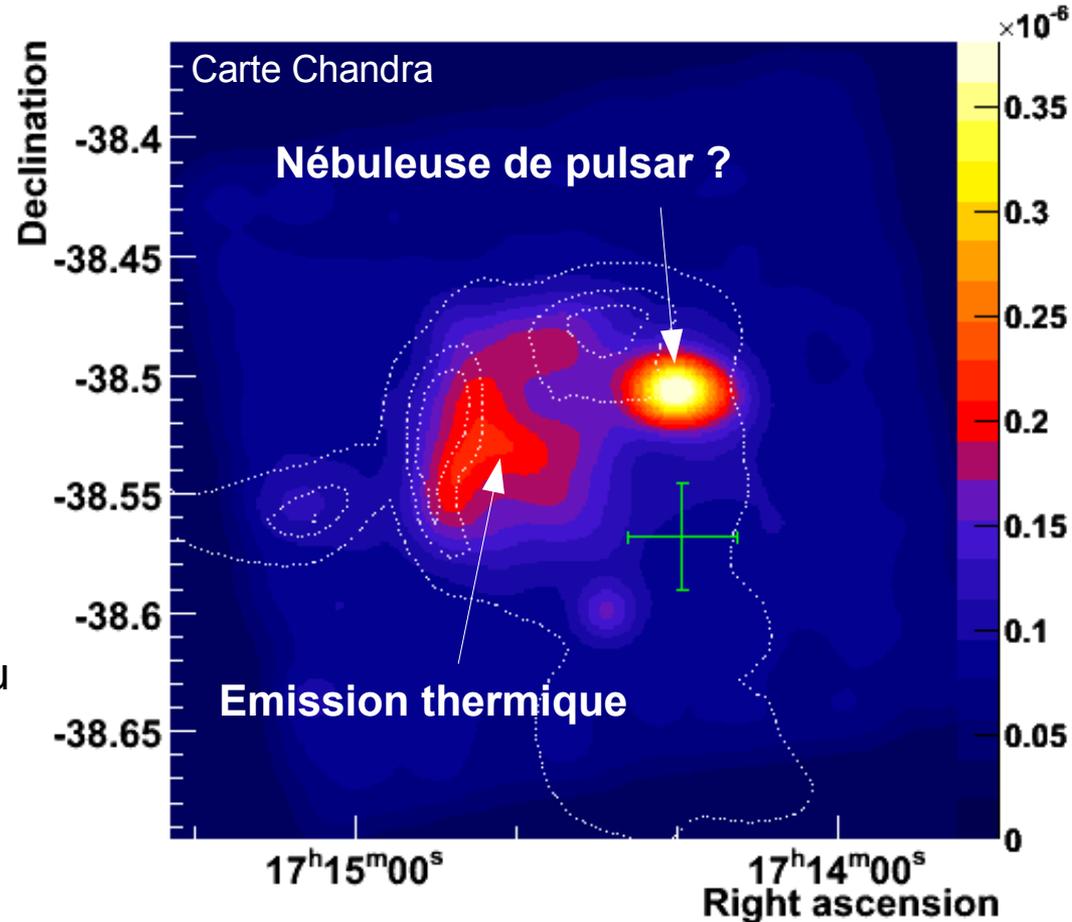
- **Observations en rayons X**

- Emission thermique du reste de supernova  
=> Matière chauffée par le choc
- Emission non thermique  
=> Nébuleuse de pulsar ?

- **Source possible de rayons gamma**

- Accélération d'électrons au choc terminal du vent du pulsar
- Diffusion Compton inverse des électrons

**=> Origine des rayons gamma non clarifiée mais scénario hadronique très vraisemblable**



# Conclusion - perspectives

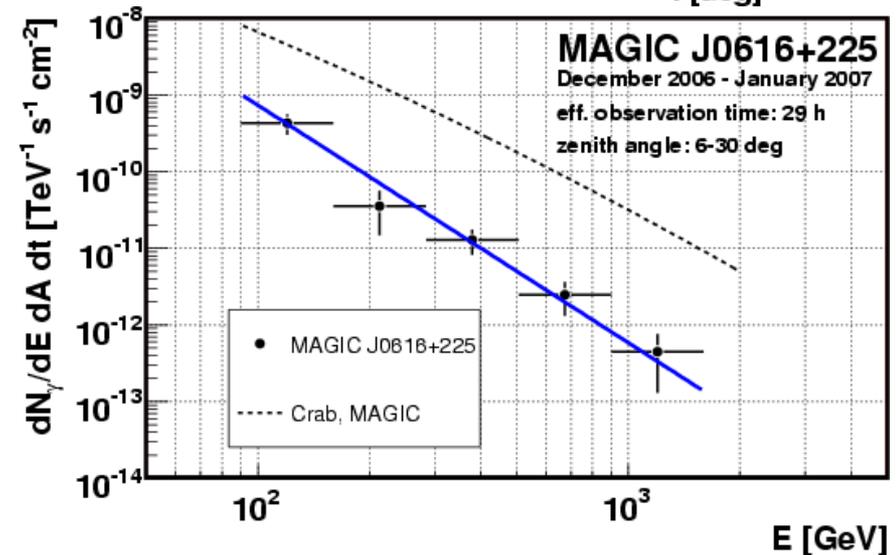
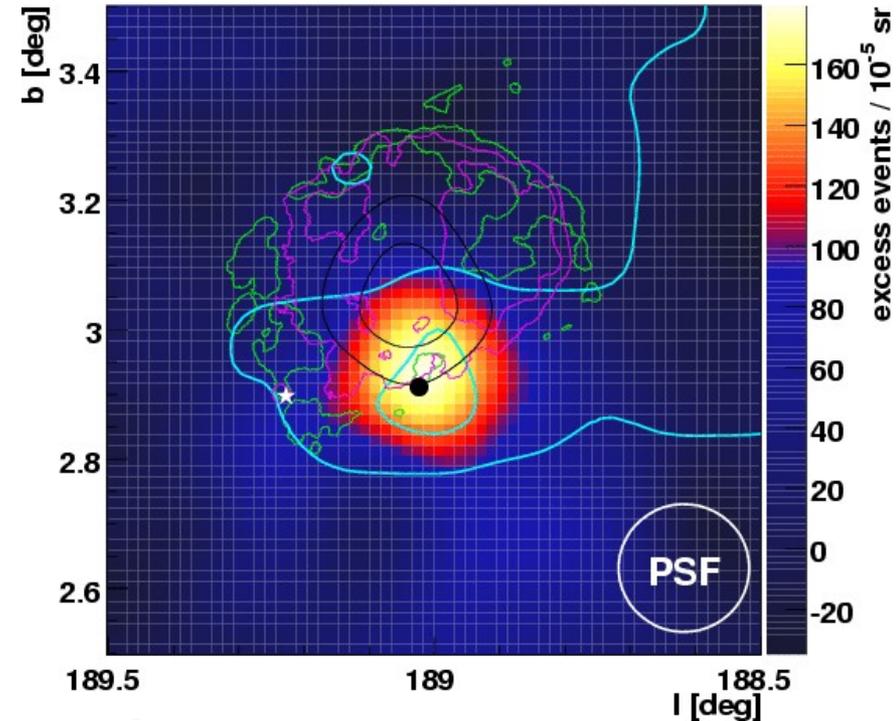
- **Démarche alternative pour mettre en évidence l'accélération de hadrons**
  - Association nuages moléculaires – restes de supernova
  - Près de 20 restes de SN en interaction notoire (maser OH)
- **Observation d'une émission de rayons gamma en direction de plusieurs d'entre eux**
  - Un scénario hadronique dans chacun des cas est possible
  - Densité de rayons cosmiques en accord avec les modèles
  - => Individuellement il est difficile de conclure
  - => S'ajoutent aux autres détections par HESS & MAGIC (W28 – IC 443)
  - => Mais accumulation d'indication que les restes de supernova accélèrent des hadrons
- **Perspectives:**
  - HESS, HESS II & CTA => étude statistique de ces objets
  - GLAST & HESS II => contraintes fortes à plus basse énergie
  - => Vers une réponse claire à l'origine des rayons cosmiques galactiques?

# back-up

- **Texte**

# IC 443

- **IC 443**
    - Un des exemples les plus célèbre d'interaction nuage – SNR
    - Présence de masers OH
    - Corrélation avec la densité de matière
  - **MAGIC (70 GeV – qq 10 TeV)**
    - Excès coïncident avec le nuage et les masers
    - Spectre mou comparé aux prédictions théoriques  $\Gamma = 3.1 \pm 0.3$
  - **Pas de sources de rayons X associées**
- => Interprétation hadronique très vraisemblable**



Albert et al. 2007 [arXiv]0705.3119

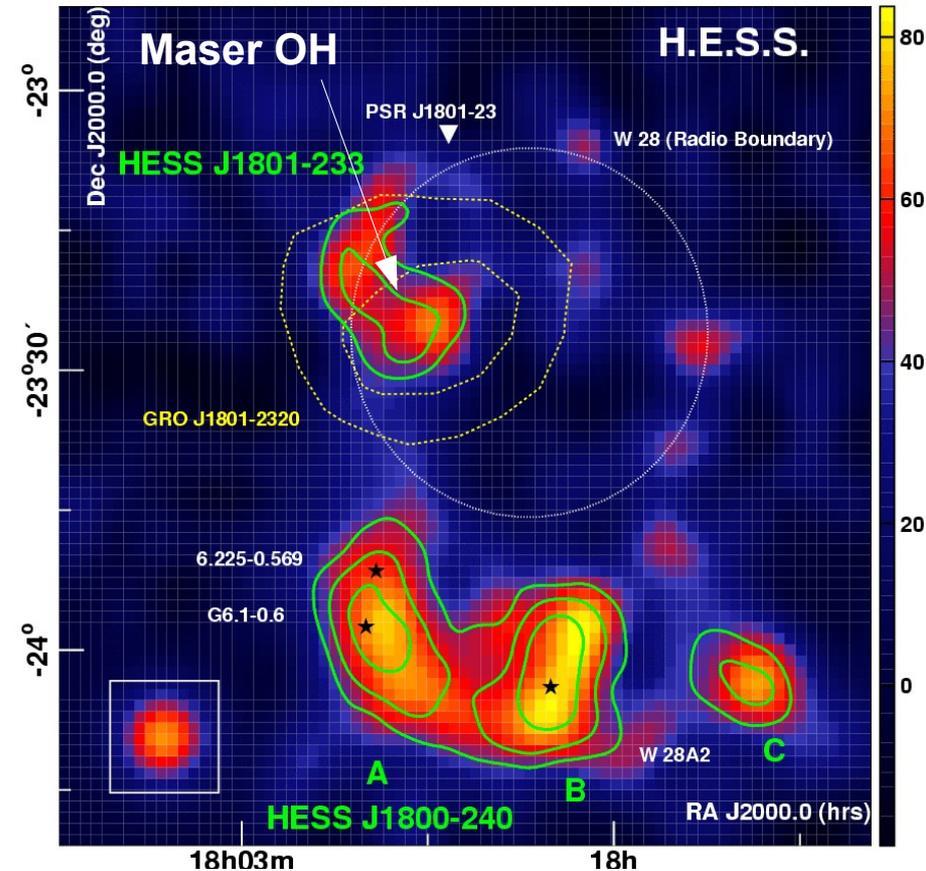
# Région de W28

- **Région complexe**

- Un reste de supernova proche
  - Nuages moléculaires choqués
    - Présence de masers OH
  - Source EGRET (GeV) coïncidente avec ces nuages
- => Un des exemples les plus connus d'interaction

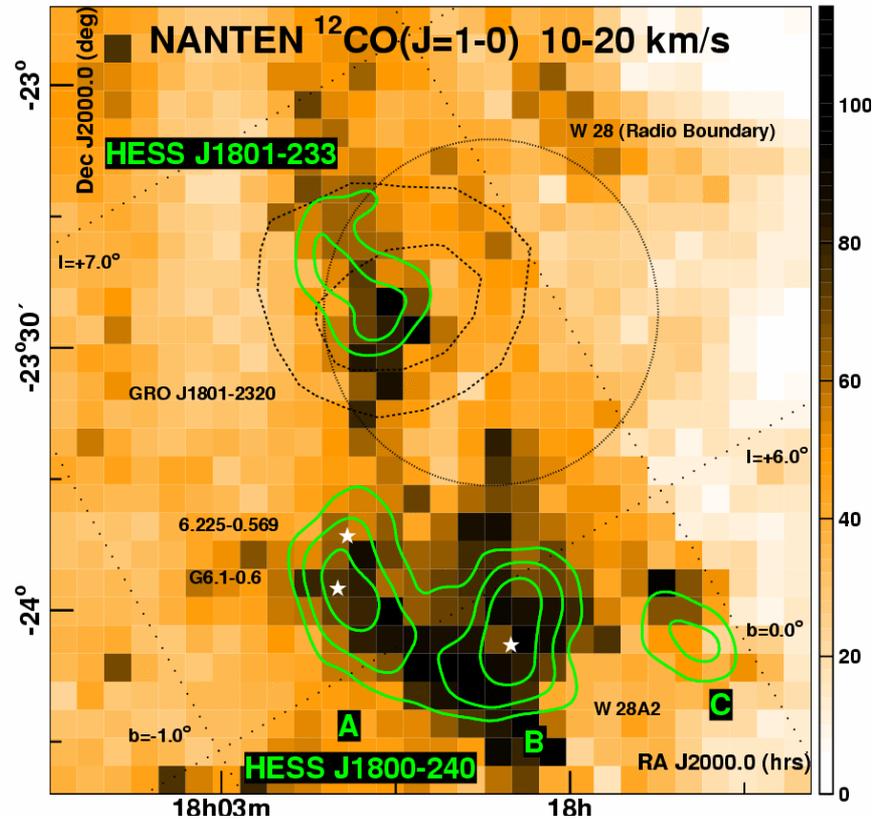
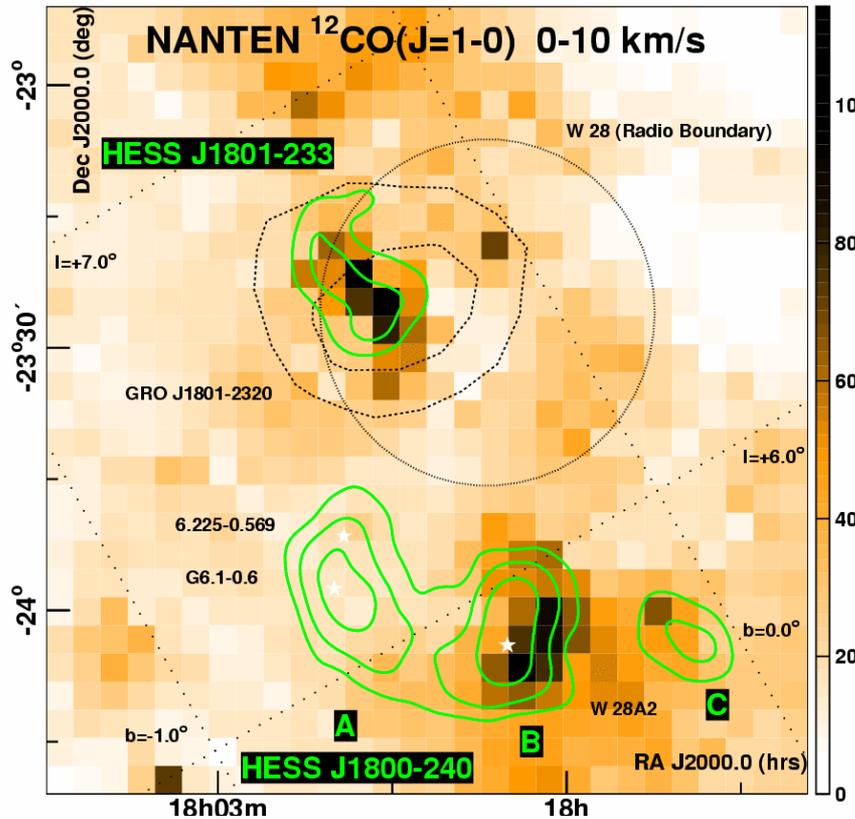
- **Emission gamma complexe**

- Plusieurs sources
- Une partie coïncidente avec le reste de supernova
- Coïncidente avec la source au GeV

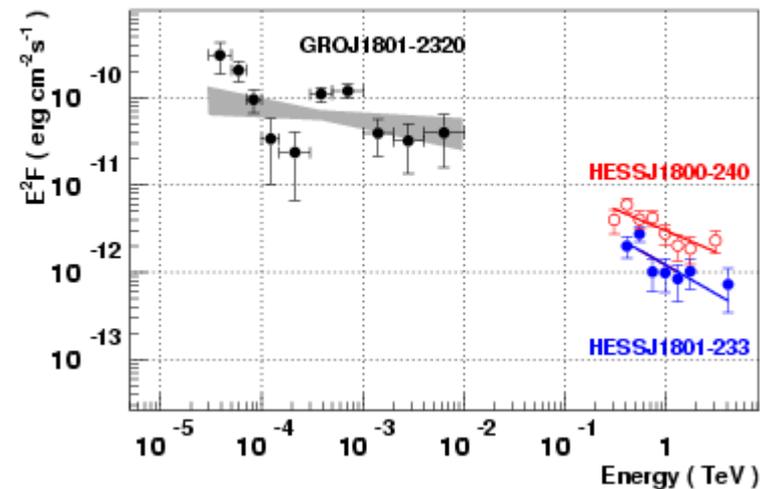


Aharonian et al. [astro-ph] 0801.3555

# Région de W28



- Emission corrélée à la densité de matière
- Scénario hadronique probable
- Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN

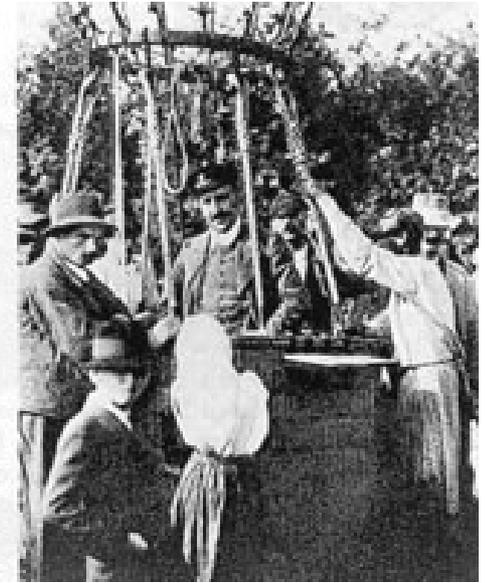


# Rayons cosmiques - Historique

- **Découverts en 1912 par Victor HESS**
  - Mesures en ballon
- **Années 1930**
  - Cartographie terrestre du flux de cosmiques  
=> Ce sont des particules chargées!
- **Prémices de la physique des particules**
  - Longtemps utilisés comme générateurs de particules de haute E
- **Question ouverte**
  - => d'où viennent-ils?



Victor Hess - 1912



DR



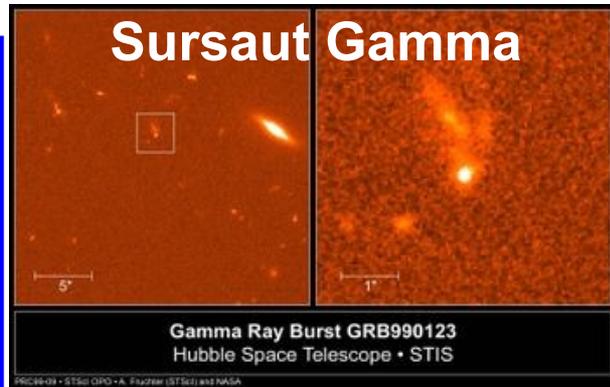
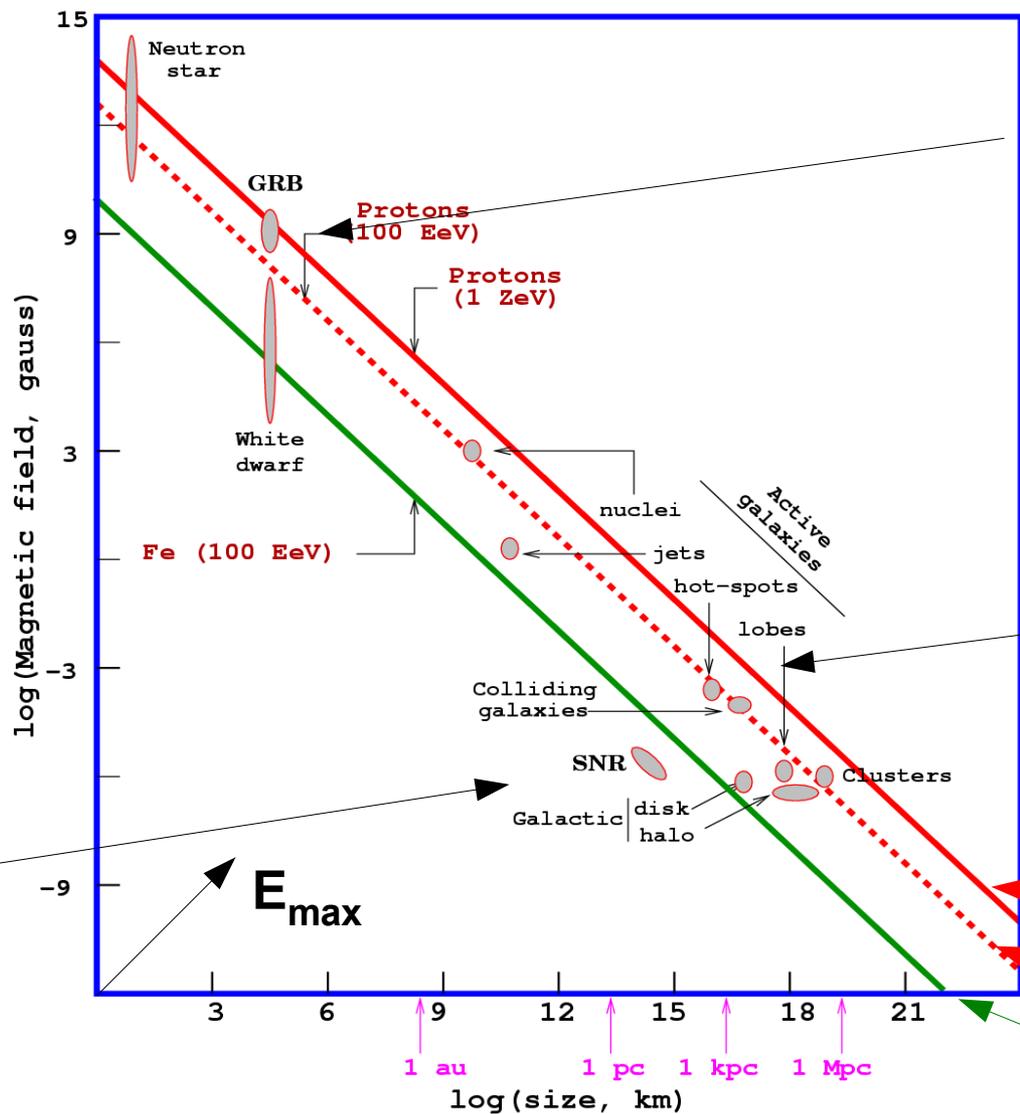
Aiguille des cosmiques

# Candidats potentiels

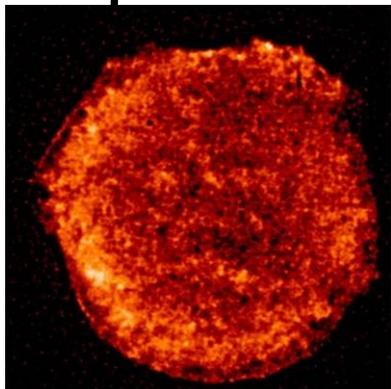
- Argument simple: Confinement dans une zone d'accélération

$\Rightarrow E_{\max} \sim Z.B.L$

**Hillas-plot**  
(candidate sites for  $E=100 \text{ EeV}$  and  $E=1 \text{ ZeV}$ )



Vestige de supernova



Noyau actif galaxie

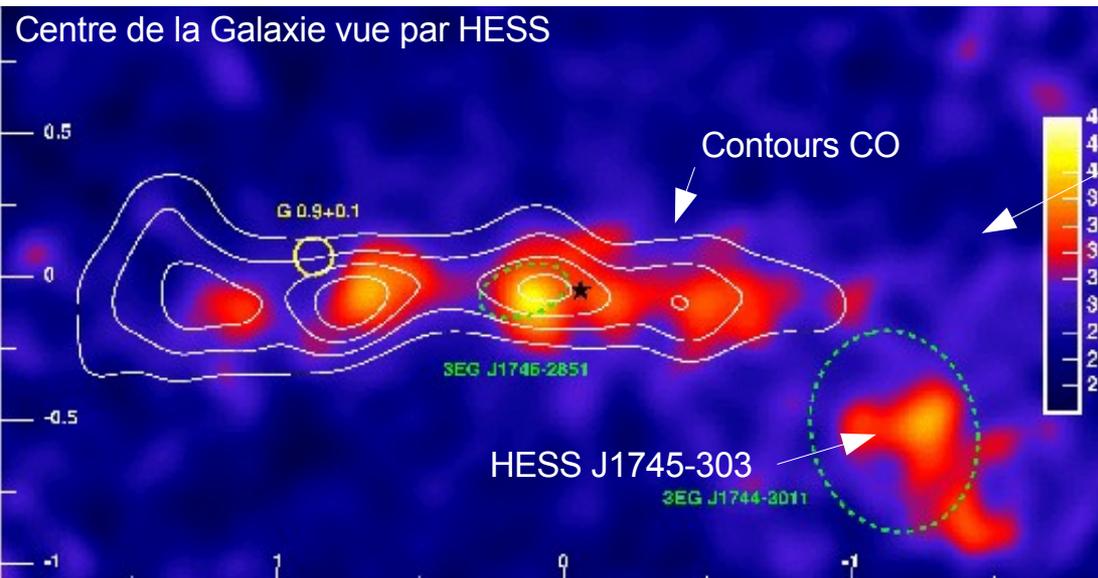
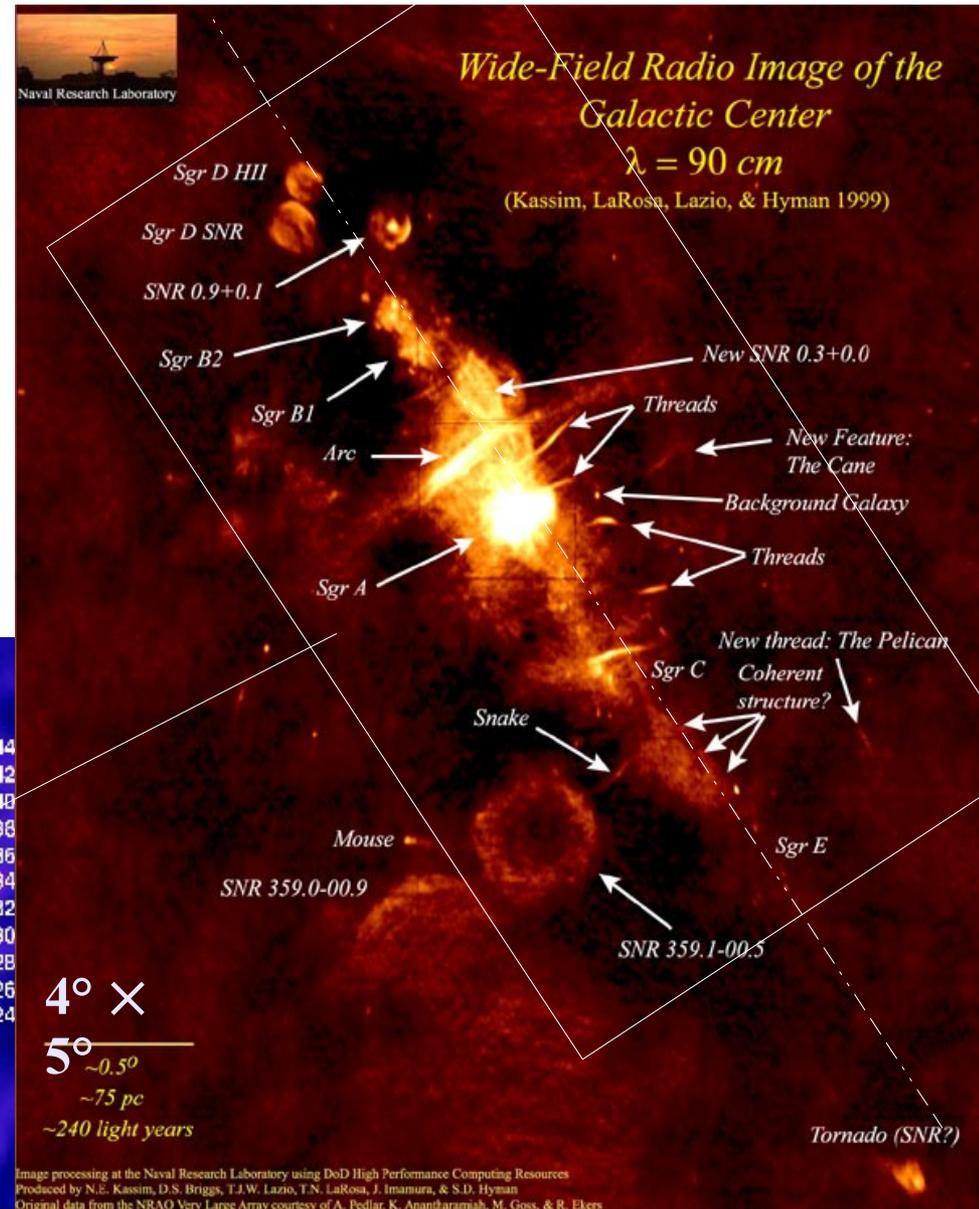


$E_{\max} \sim ZBL$  (Fermi)

$E_{\max} \sim ZBL \Gamma$  (Ultra-relativistic shocks-GRB)

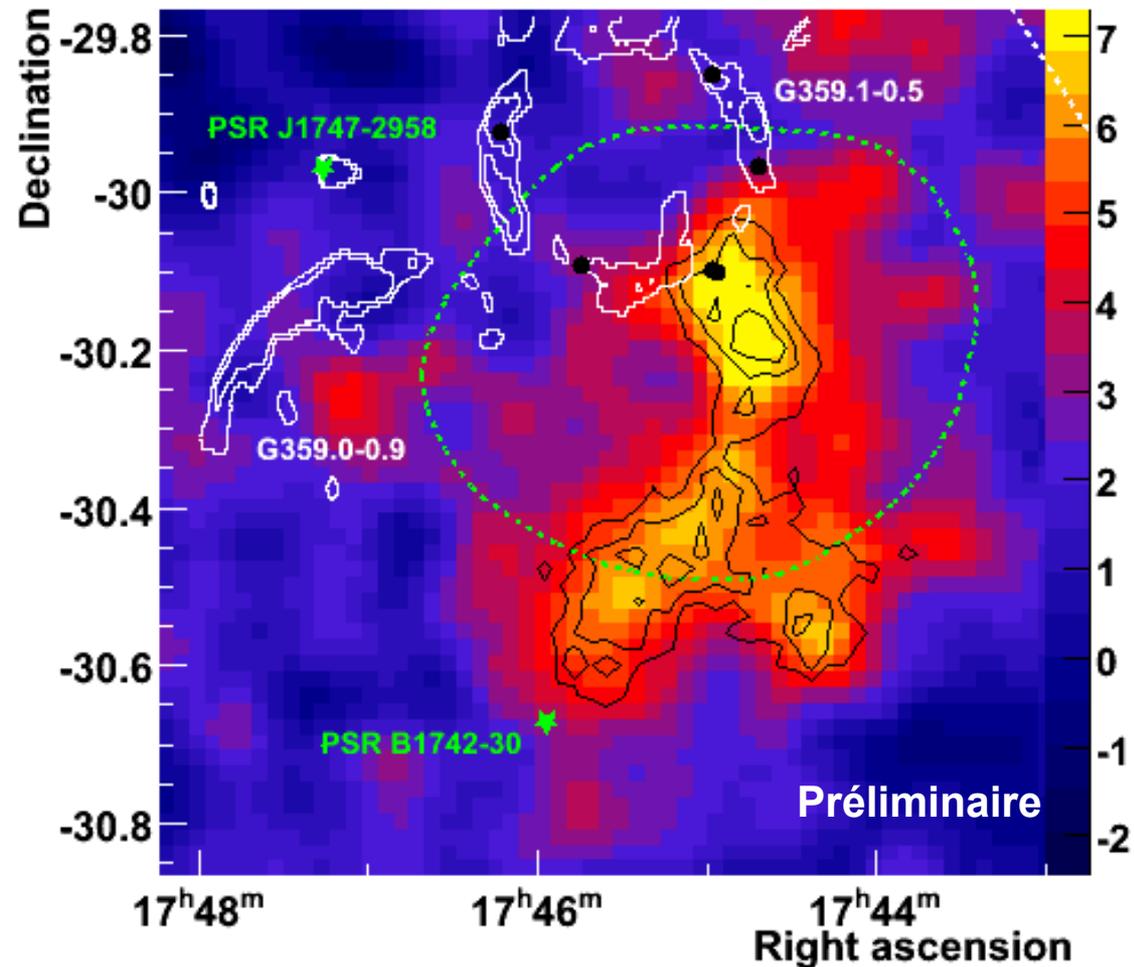
# Le vestige de supernova G359.1-0.5

- Centre de la Galaxie riche en rayons gamma
- Le vestige G359.1-0.5
  - A quelques 100 pc du centre de la Galaxie
  - Entouré d'une coquille de matière
    - => vents stellaires d'un amas d'étoiles
  - Interaction du vestige avec cette coquille
    - Maser OH autour du vestige
  - A proximité de la source HESS J1745-303



# SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- **Supernova en interaction avec des nuages moléculaires**
  - Nuages moléculaires choqués
  - Coquille de matière autour du reste G359.1-0.5
  - Présence de plusieurs masers OH  
=> nuages moléculaires choqués
- **Source HESS non identifiée**
  - Morphologie complexe
  - Partie nord adjacente à G359.1-0.5
  - Spectre en loi de puissance  $\Gamma \sim 2.7$
- **Source EGRET coïncidente**
- **Pas de rayons X non thermiques en direction de la partie nord**



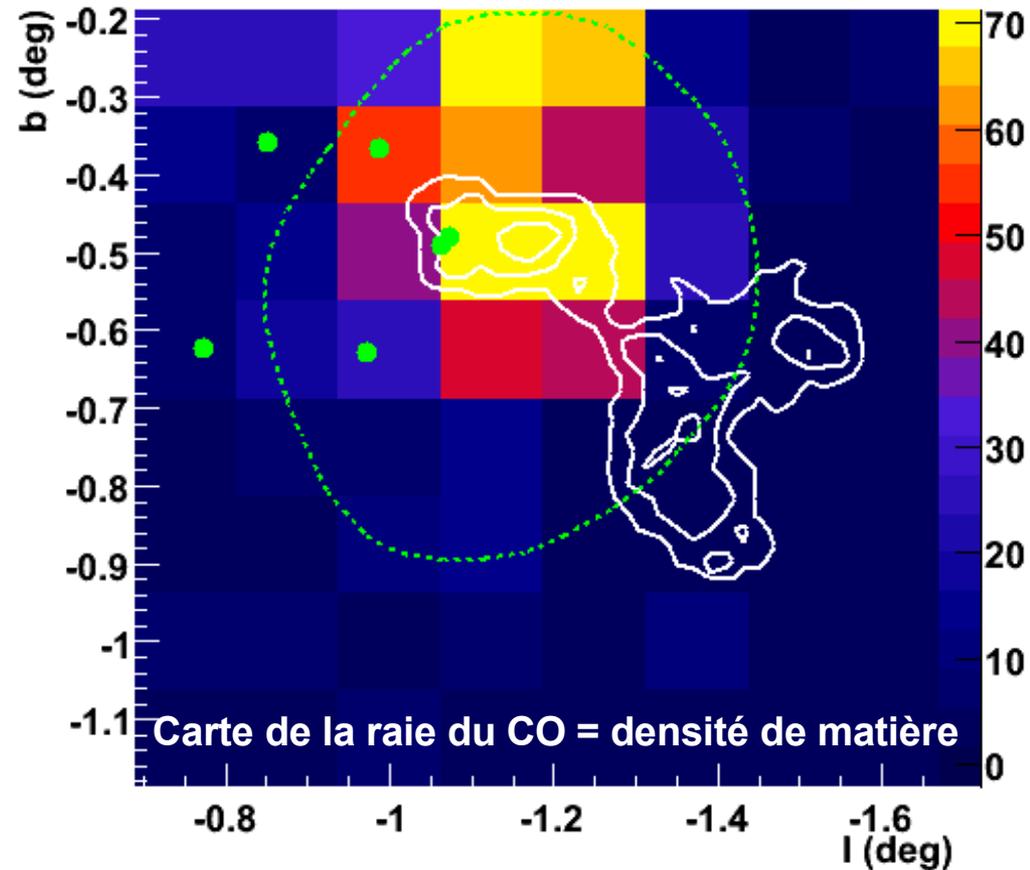
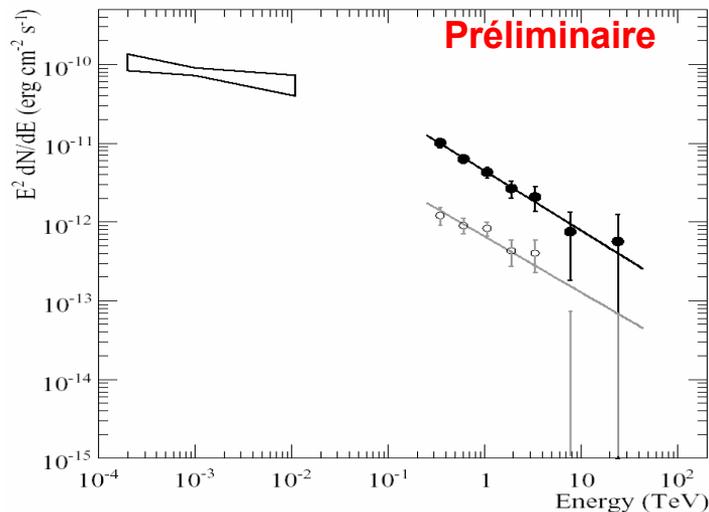
# SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- **Nuages moléculaires choqués**

- Nuage coïncident avec la partie nord de la source HESS
- Sonde poten
- $5 \times 10^4$  masses solaires

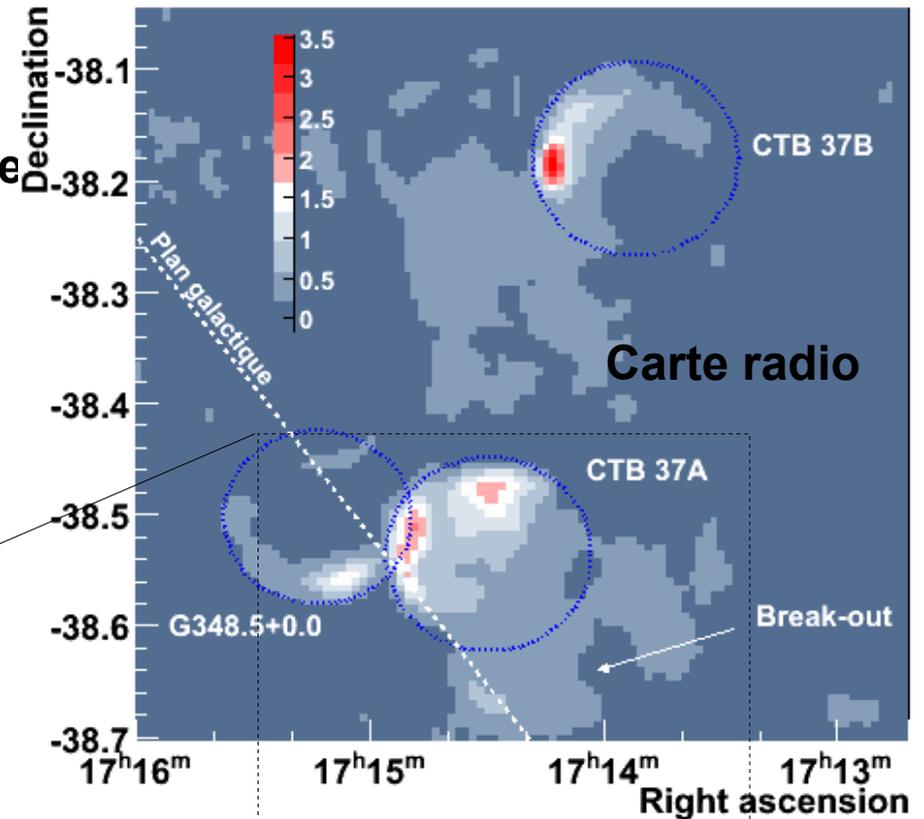
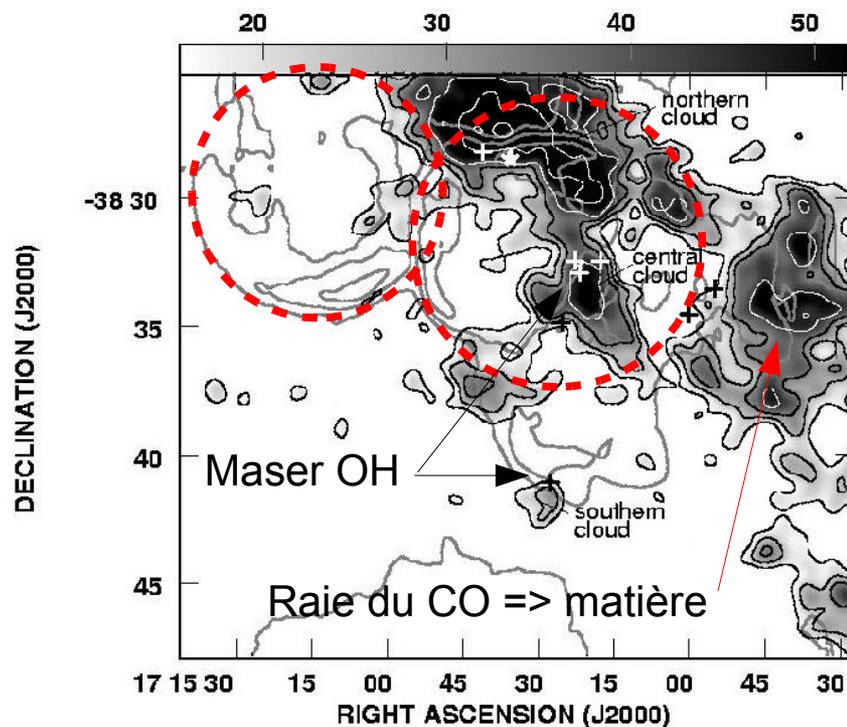
- **Point de vue énergétique**

- $\sim 30\%$  de l'énergie typique d'explosion nécessaire ( $10^{51}$  erg)
- => Interprétation hadronique très probable



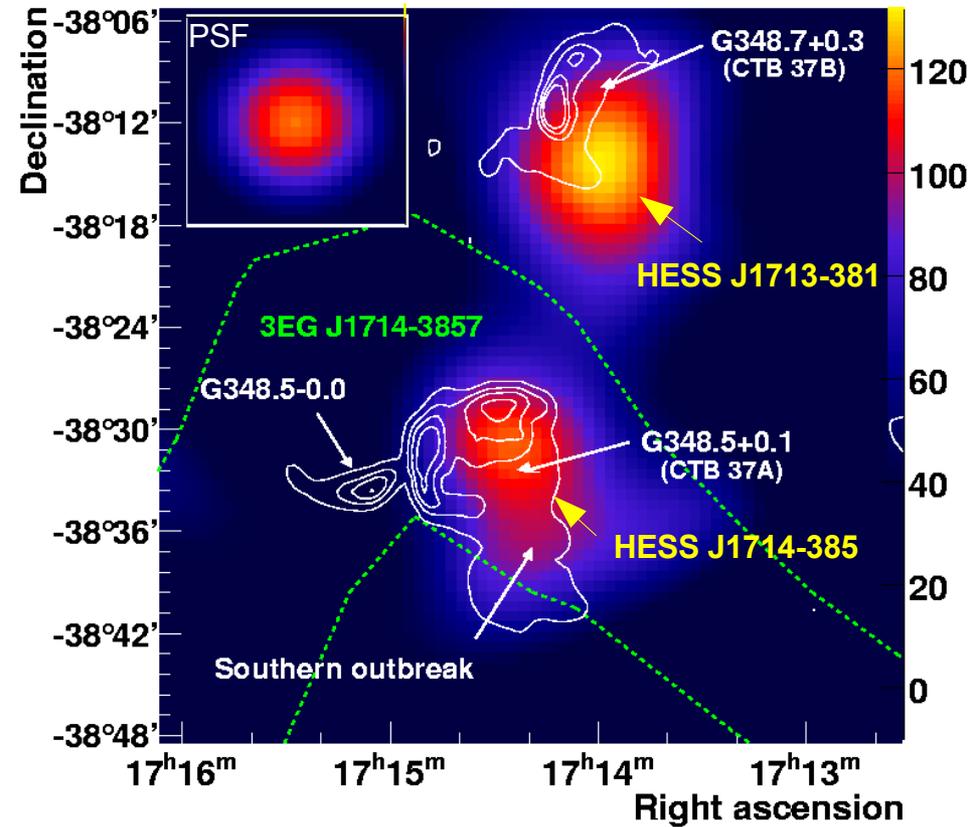
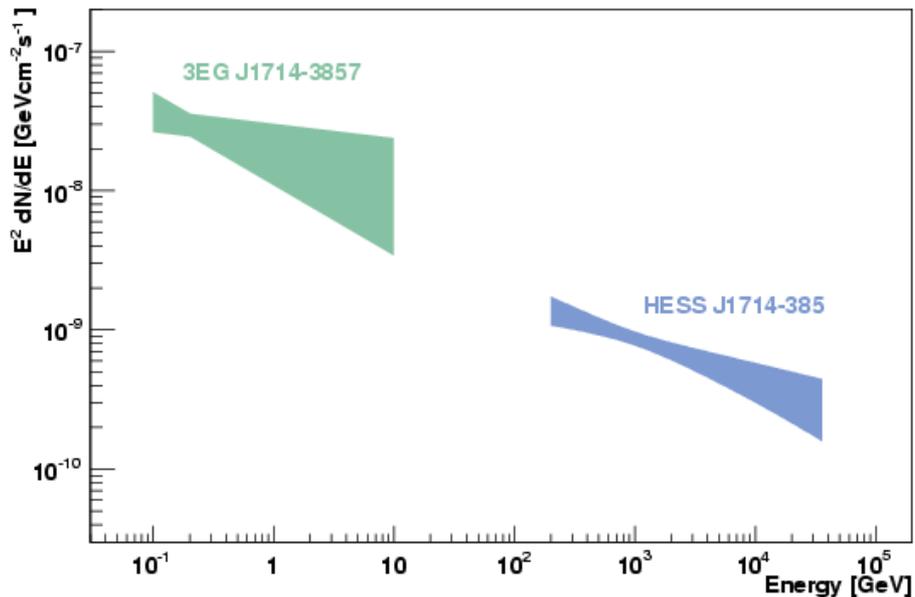
# Complexe de SNR CTB 37

- **Complexe de restes de supernova CTB 37**
  - 3 restes observés en radio
- **CTB 37A associé avec des nuages moléculaire**
  - Plusieurs nuages (qq  $10^3$  masses solaires)
  - Masers OH
  - => nuages moléculaires choqués
- **Source EGRET**



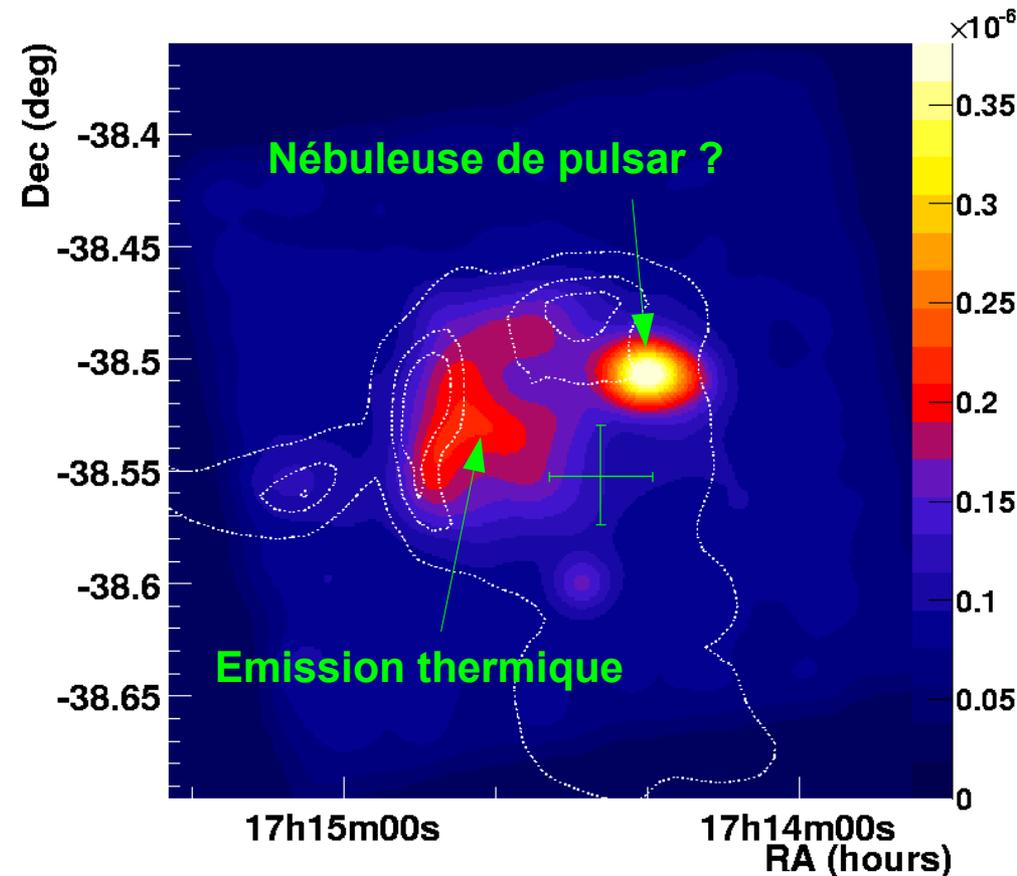
# Deux sources HESS

- Deux sources HESS coincidentes aux vestiges
  - HESS J1714-385 => CTB 37A
  - HESS J1713-381 => CTB 37B
- Compatibilité spectrale de HESS J1714-385 avec une source EGRET
  - Prolongement du spectre à plus basse E



# Une nébuleuse de pulsar ?

- **Observations en rayons X**
  - Emission thermique du reste de supernova  
=> Nuages moléculaires chauffés par le choc
  - Emission non thermique
    - Loi de puissance absorbée  $\Gamma=1.3\pm 0.3$
  - => Nébuleuse de pulsar ?
- **Source possible de rayons gamma**
  - Accélération d'électrons au choc terminal du vent du pulsar
  - Diffusion Compton inverse des électrons



**=> Origine des rayons gamma non clarifiée mais scénario hadronique possible**

# CTB 37A & HESS J1714-385

- **Corrélation entre position des nuages moléculaires et la source HESS**

- Nuages choqués
- => Interaction de hadrons dans la nuage ?
- Pas de rayons X non thermiques à la position des nuages
- => Emission par des leptons peu probable

- **Point de vue énergétique**

- [4 - 30] % des  $10^{51}$  erg convertis en rayons cosmiques
- => Scénario vraisemblable

