

Recherche d'accélérateurs de rayons cosmiques galactiques avec HESS

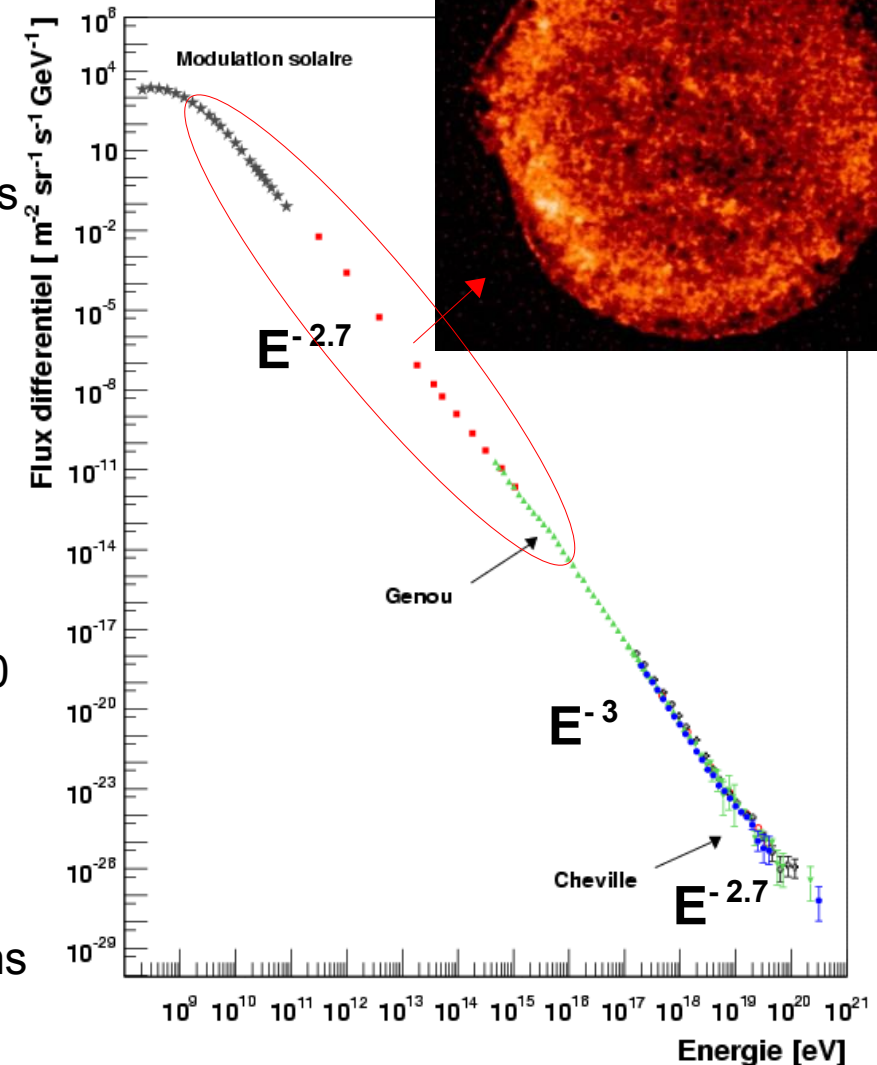
Armand Fiasson - LPTA

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 ~ 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
=> $\sim \text{photon} / \text{min} / \text{km}^2$ contre $\sim \text{neutrino} / \text{an} / \text{km}^3$
- Rayons gamma 10 TeV = présence de particules $E > 10 \text{ TeV}$

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

- Nébuleuse du Crabe $> 1 \text{ TeV} \Rightarrow \sim 6 \text{ photons m}^{-2} \text{ an}^{-1}$
=> Détection au sol

Hadrons

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

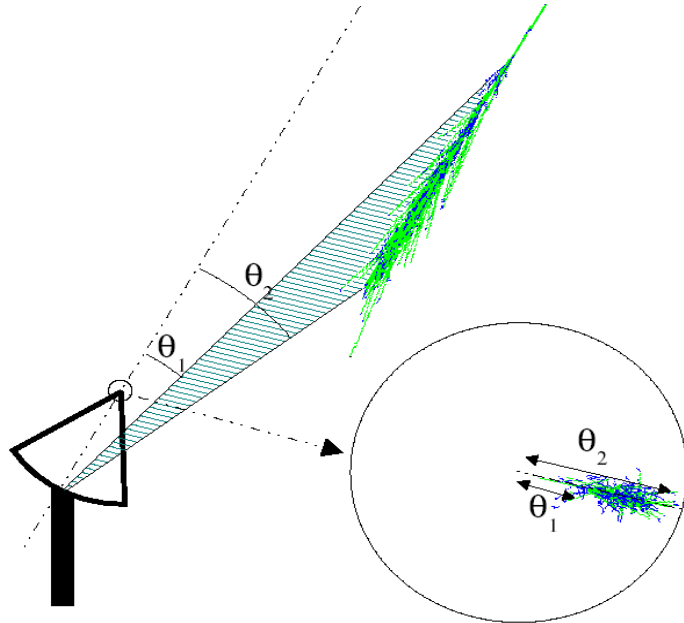
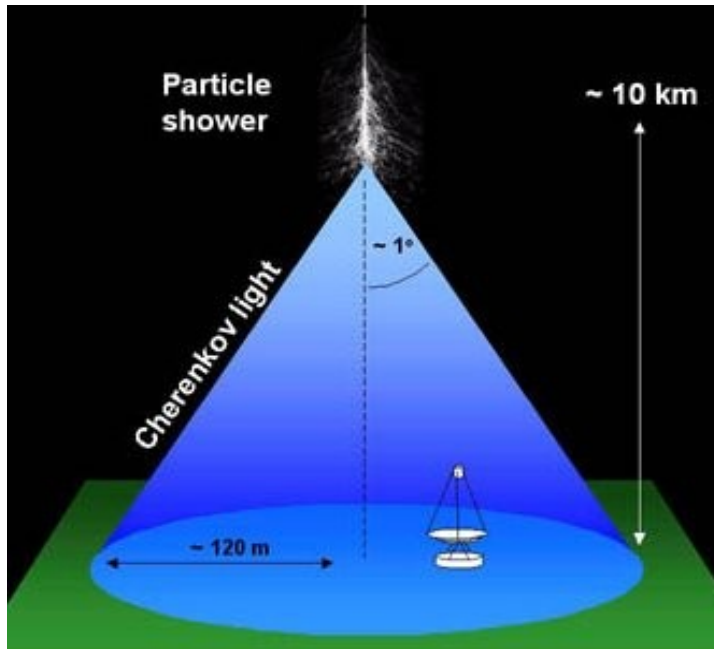
$$pp \rightarrow \pi^\pm + \dots \rightarrow \nu + \dots$$

Electrons

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

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

HESS – Réseau d'imageurs Tcherenkov

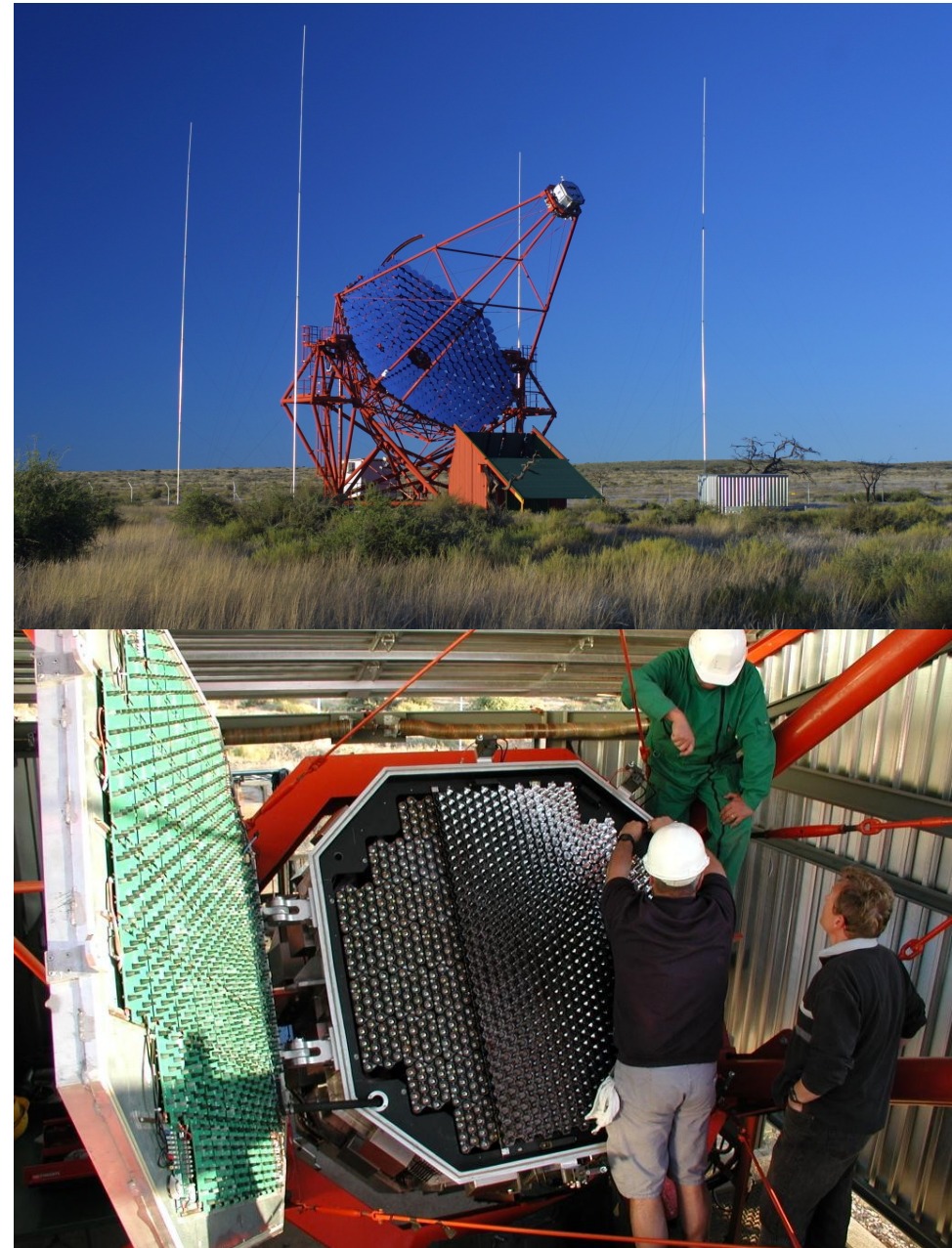


- Observation entre 100 GeV et quelques 10 TeV
- Détection du flash Tcherenkov de la gerbe atmosphérique
 - Image du développement de la gerbe au foyer du réflecteur
 - Observation stéréoscopique des images

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

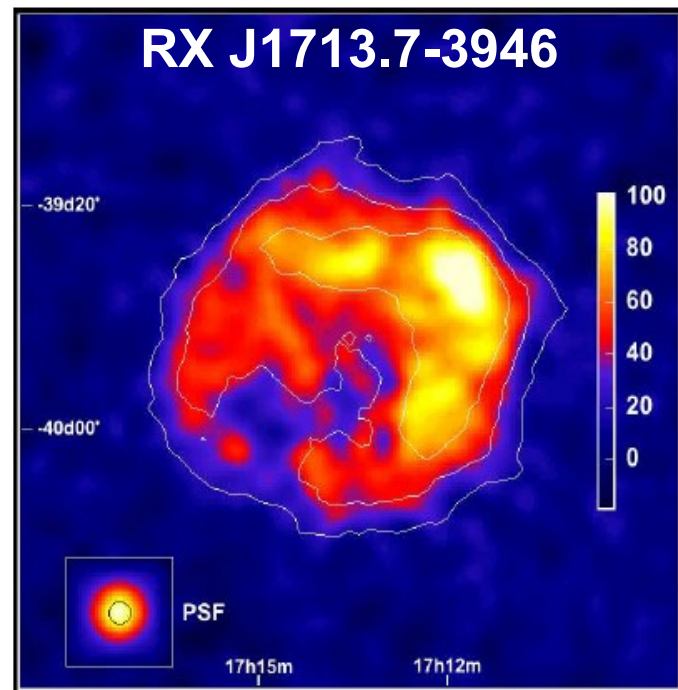
Les télescopes de HESS

- **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

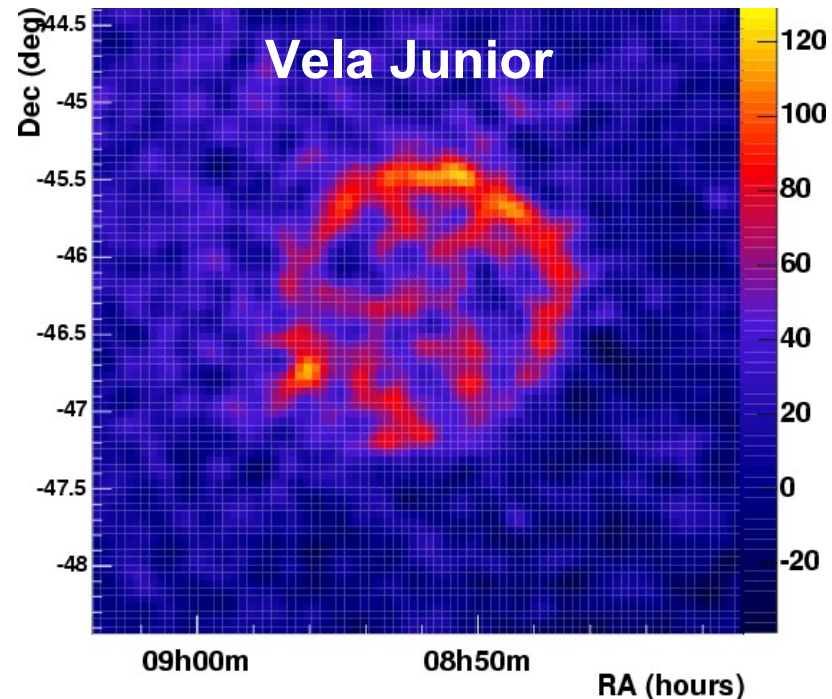


Observations de vestiges de supernova

- **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 ± 0.06 & 2.24 ± 0.04)
 - => Compatible avec une population de protons en E^{-2}

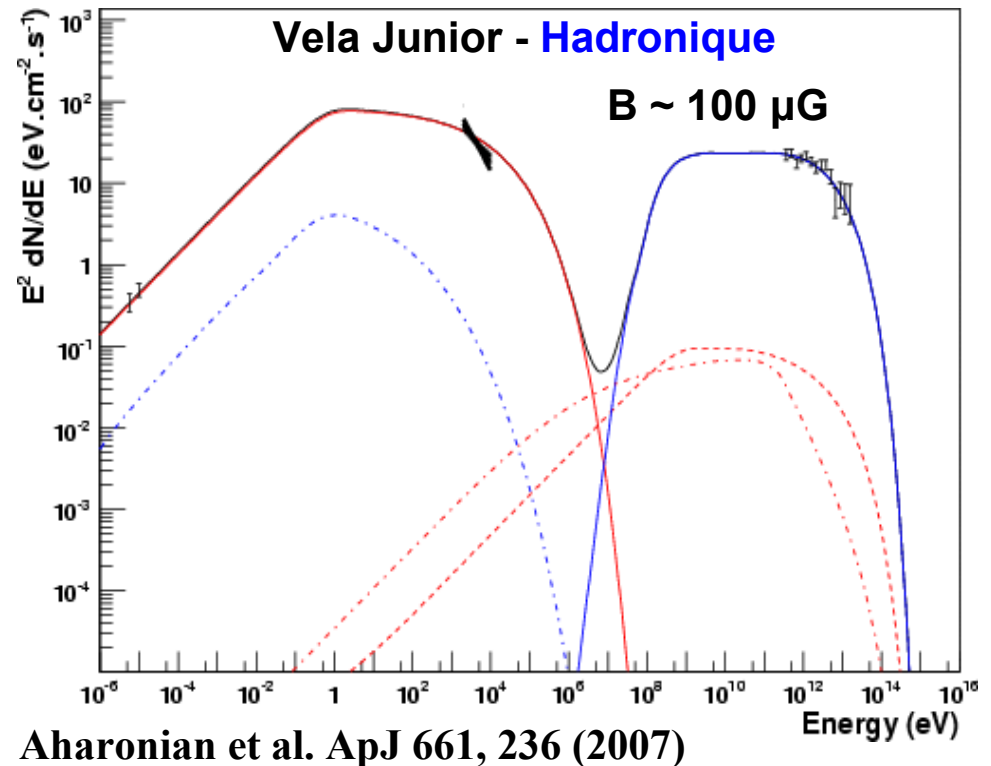
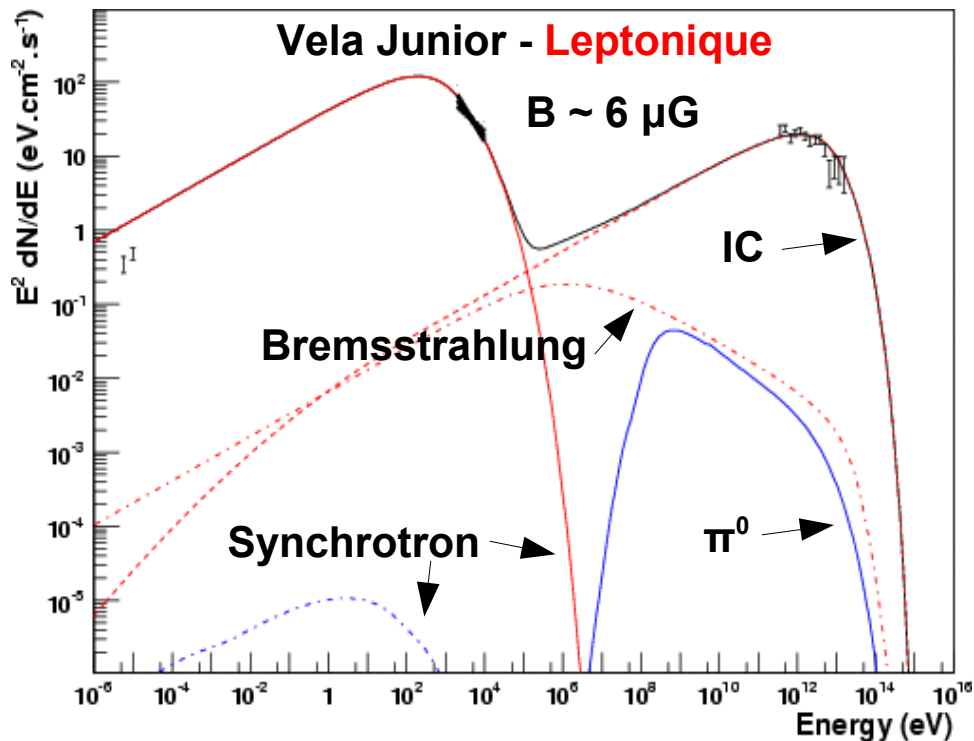


Aharonian et al. A&A 464, 235 (2007)



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 μG)
- 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

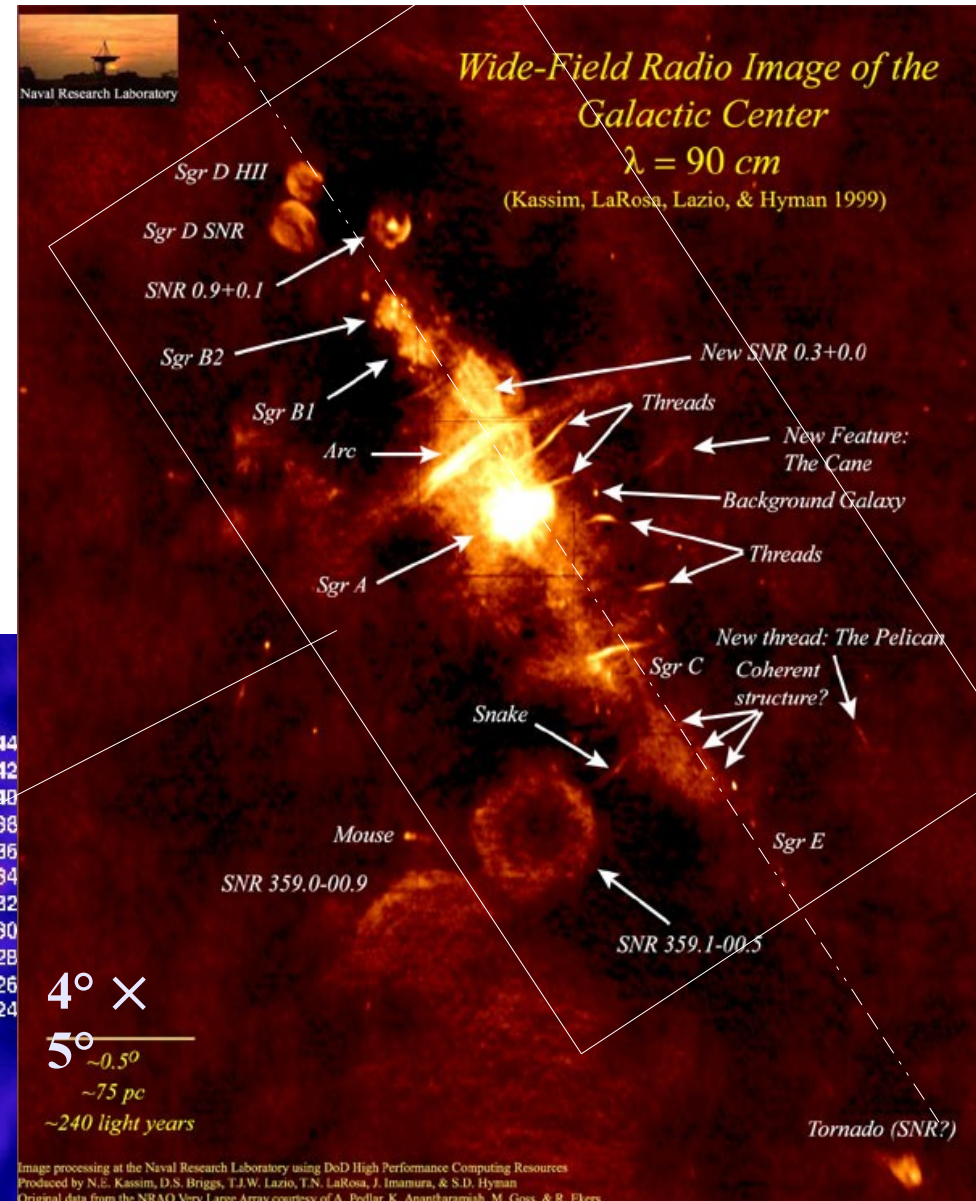
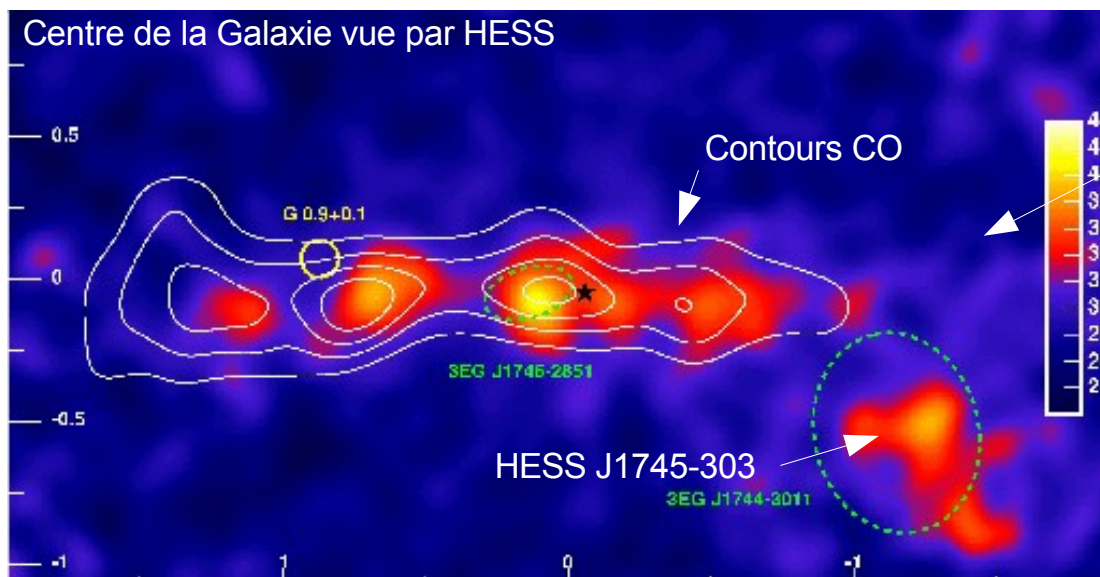
- **Nuages moléculaires à proximité d'un accélérateur = sondes pour les hadrons**
 - => Corrélation entre matière et rayons gamma
 - Compton inverse indépendant de la densité du milieu
 - Nécessité d'une concentration de matière pour la production de pions neutres
mais production possible de gamma par 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

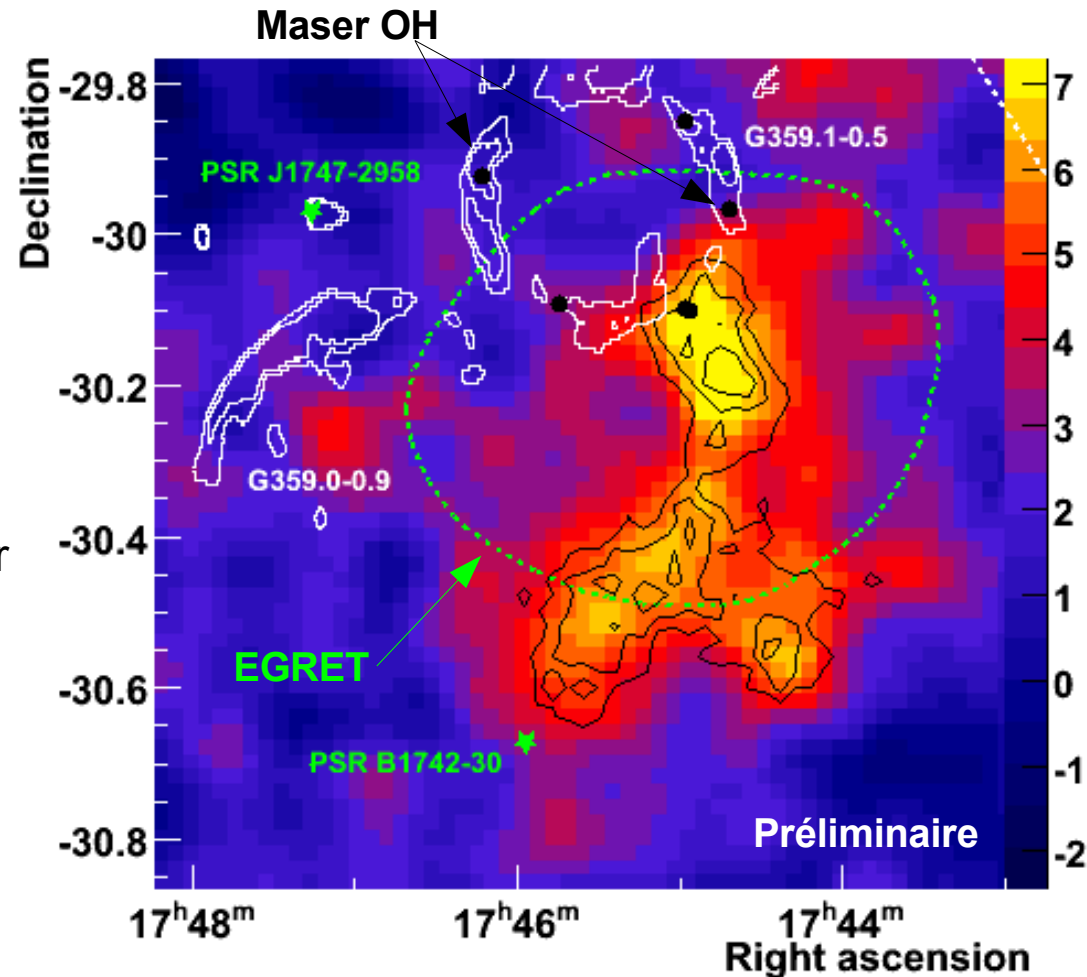
- **HESS J1745-303**

- 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



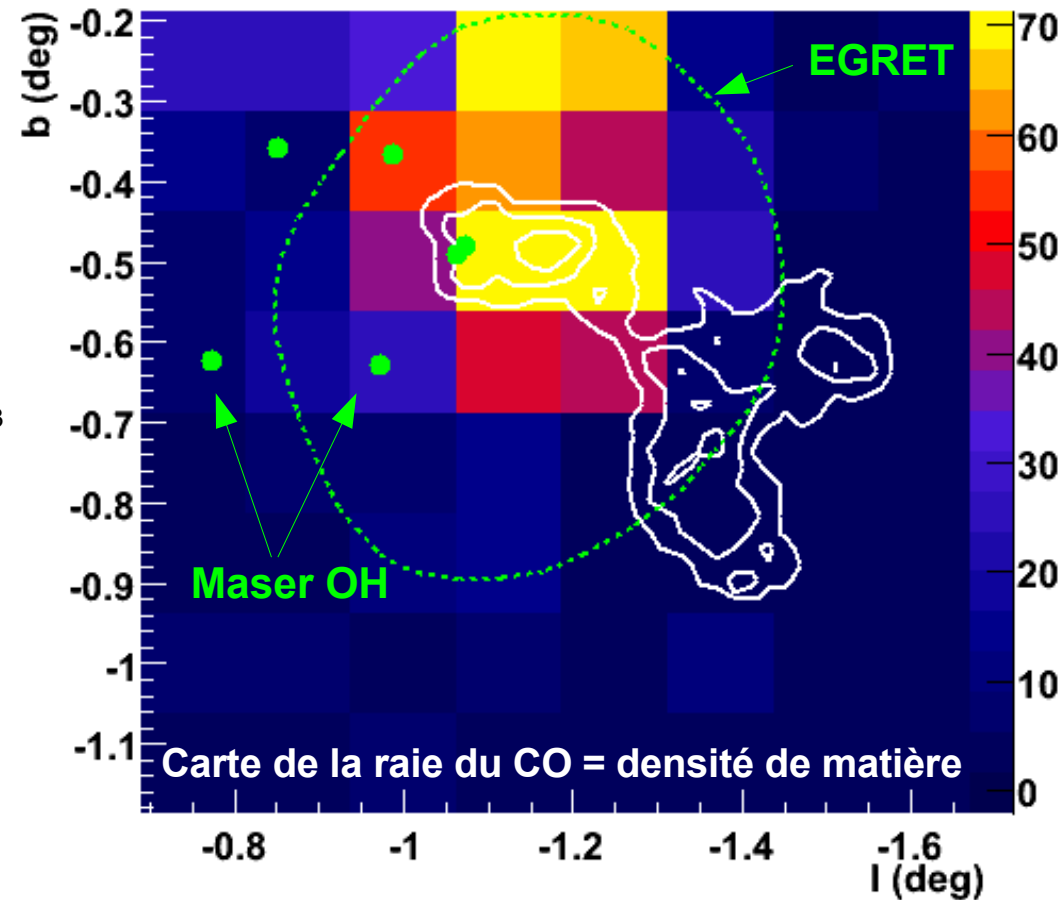
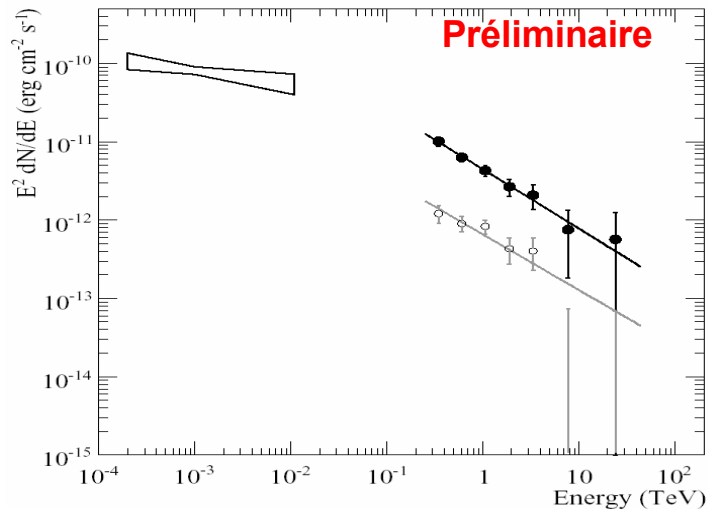
Association avec un nuage moléculaire

- **Analyse des données radio**

- Une fraction de la coquille de matière coïncide avec la partie nord
- 5×10^4 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

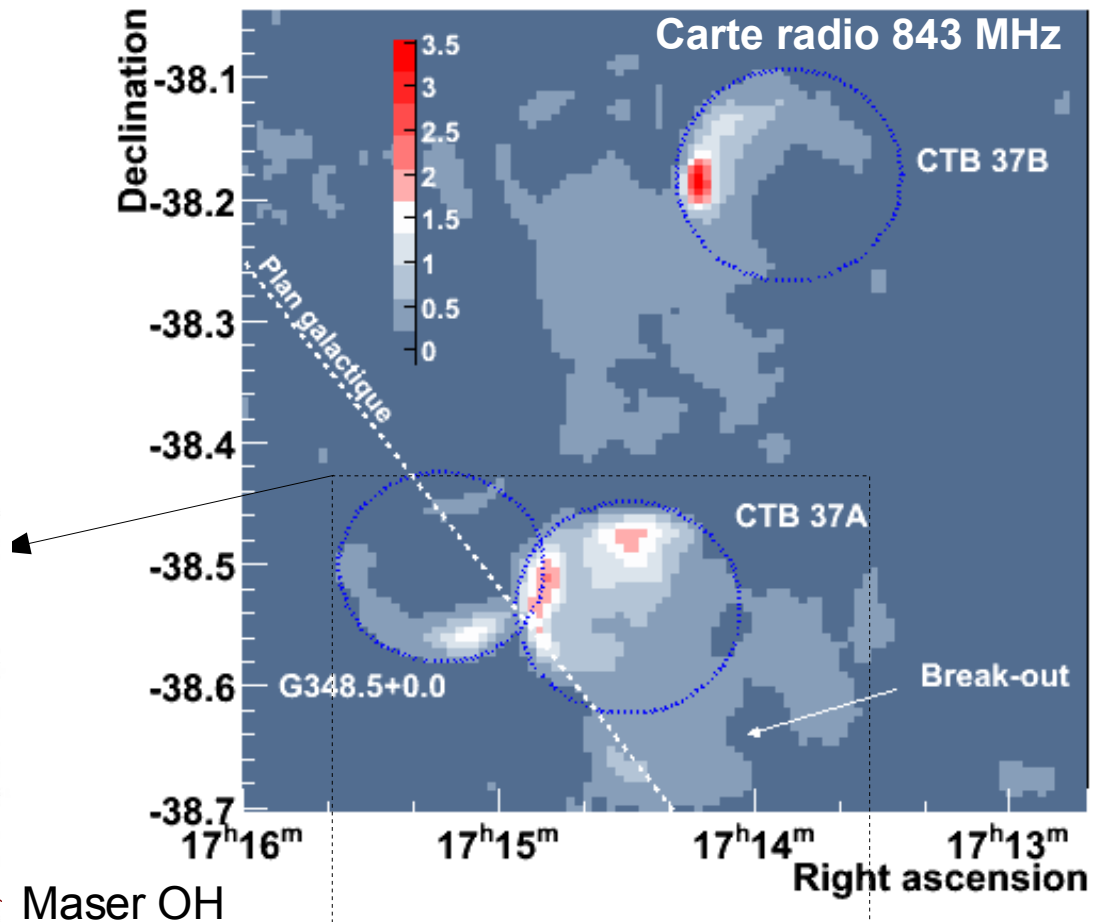
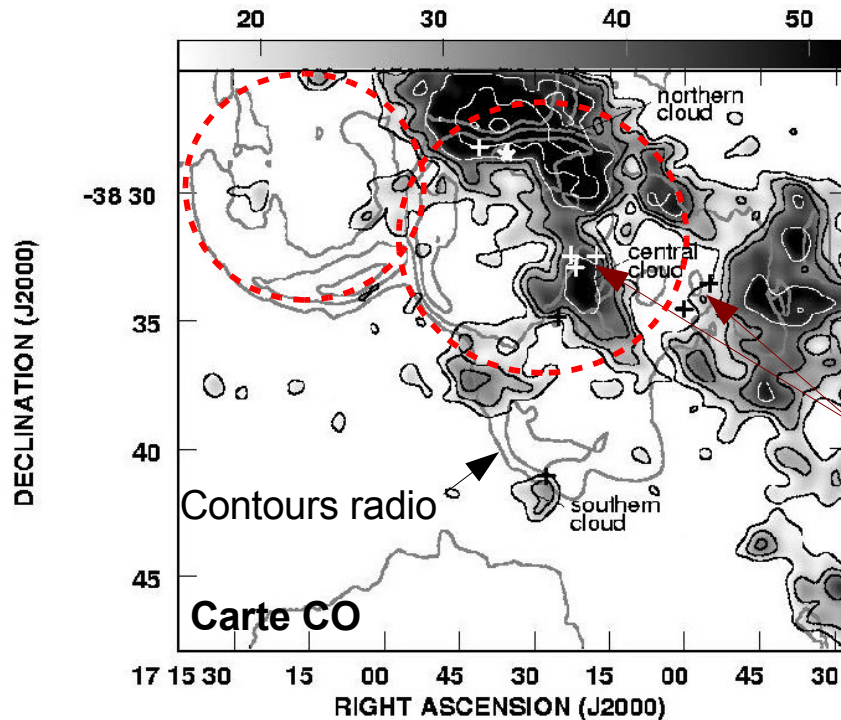


Aharonian et al., accepté par A&A

arXiv:0803.2844

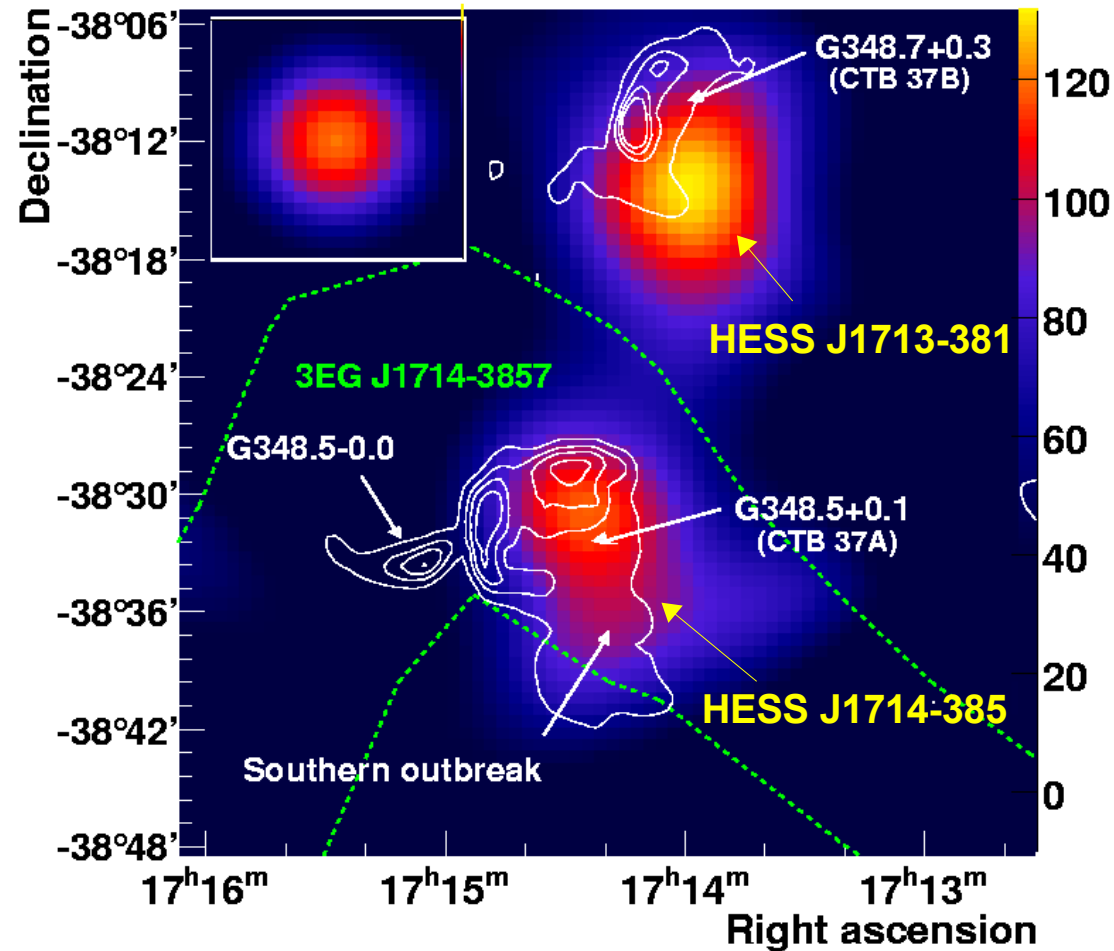
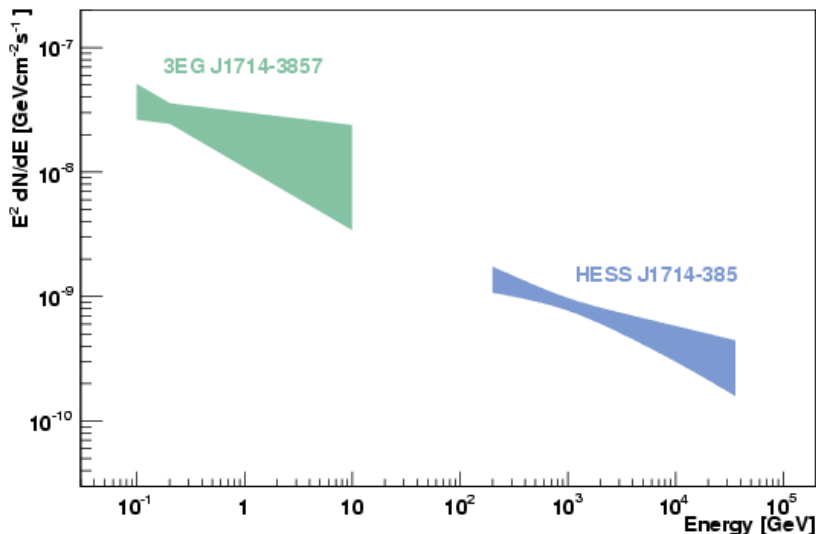
Le vestige de supernova CTB 37A

- **Vestige de supernova CTB 37A**
 - Complexe de trois vestiges
 - Situé à ~ 11 kpc
 - Plusieurs nuages moléculaires
 - $\Rightarrow$ densité $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$
 - Présence de maser OH



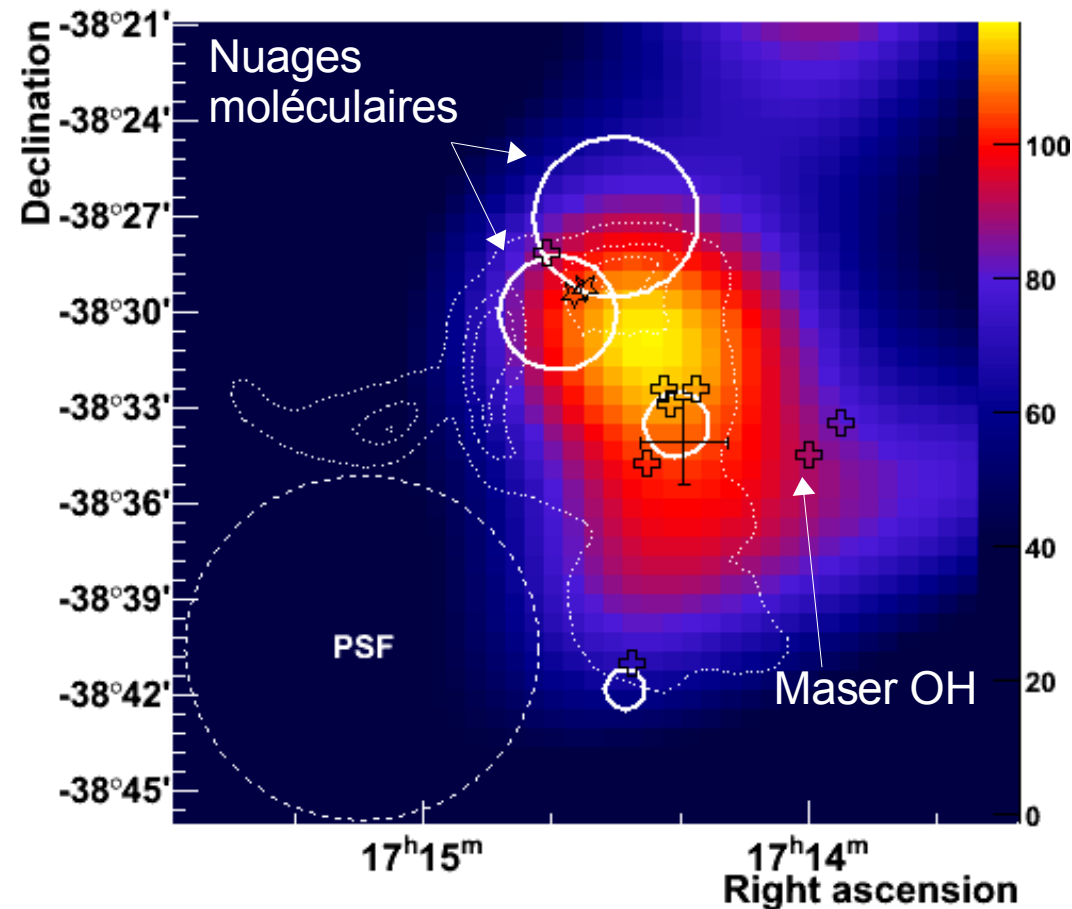
HESS J1714-385 & CTB 37A

- 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

- **Coïncidence 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

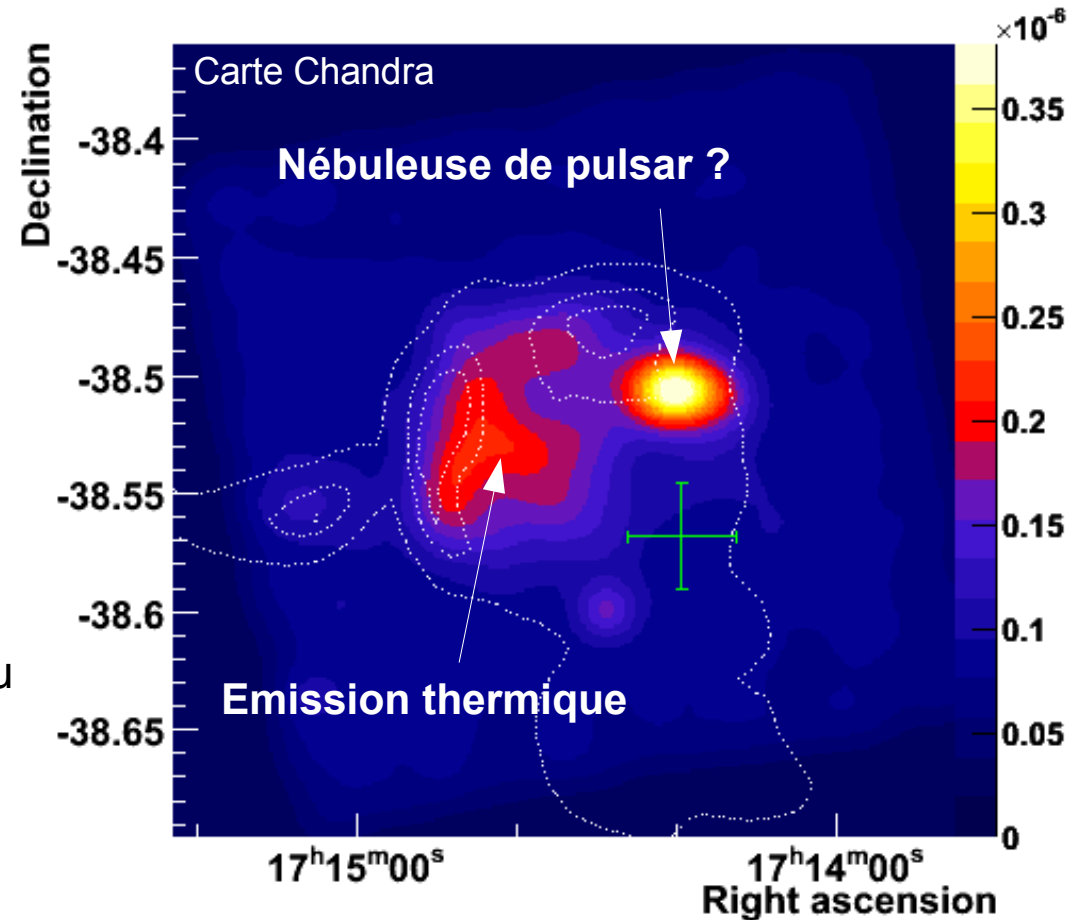
- **Observations en rayons X**

- 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**

back-up

- **Texte**

back-up

- **Texte**

back-up

- **Texte**

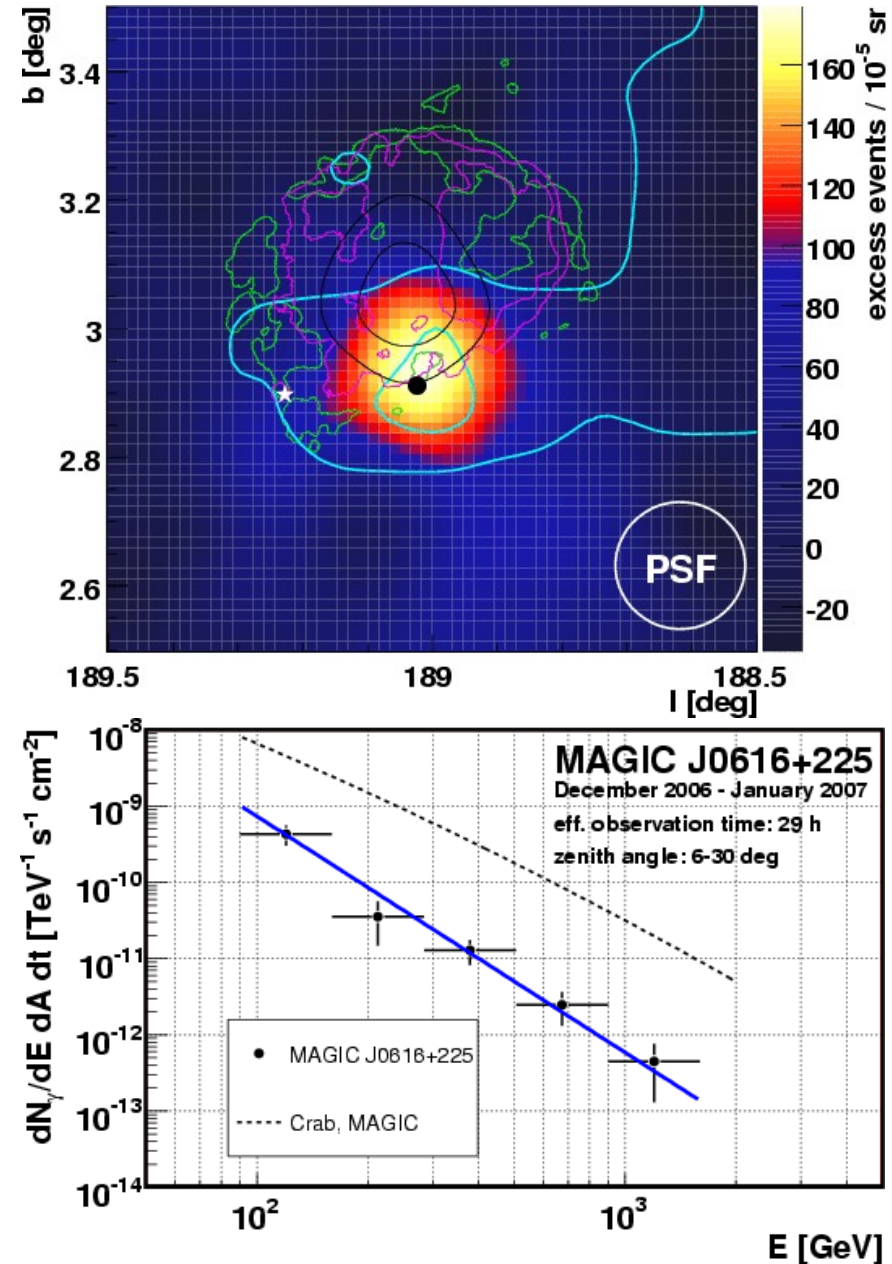
back-up

- **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

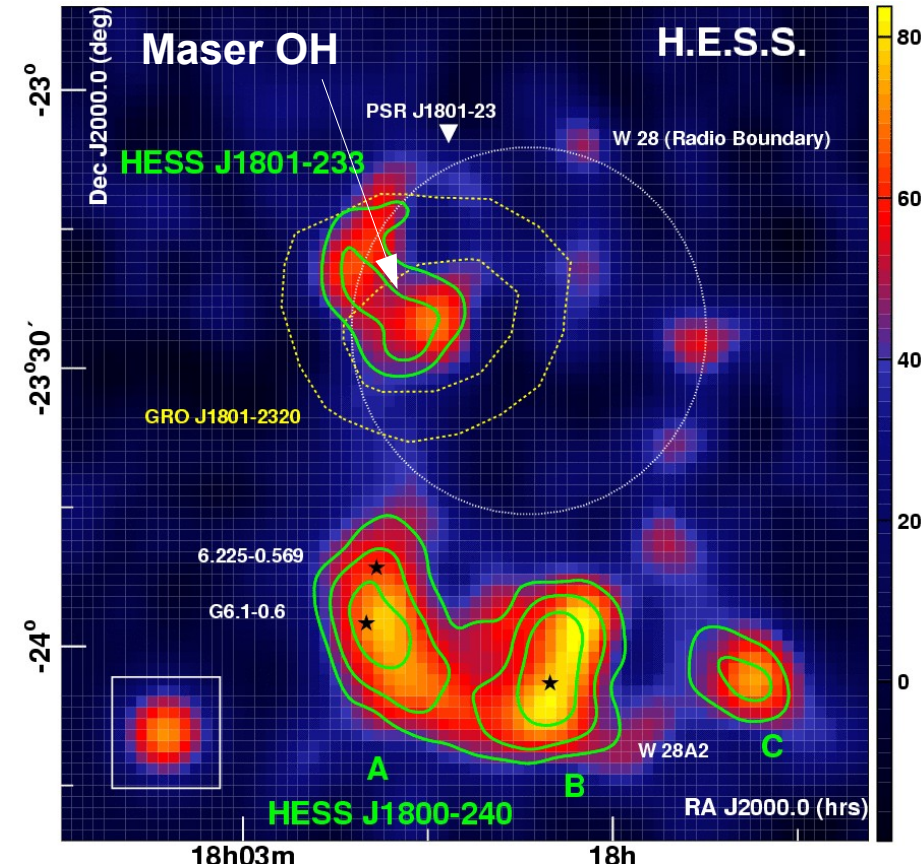
Région de W28

- **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

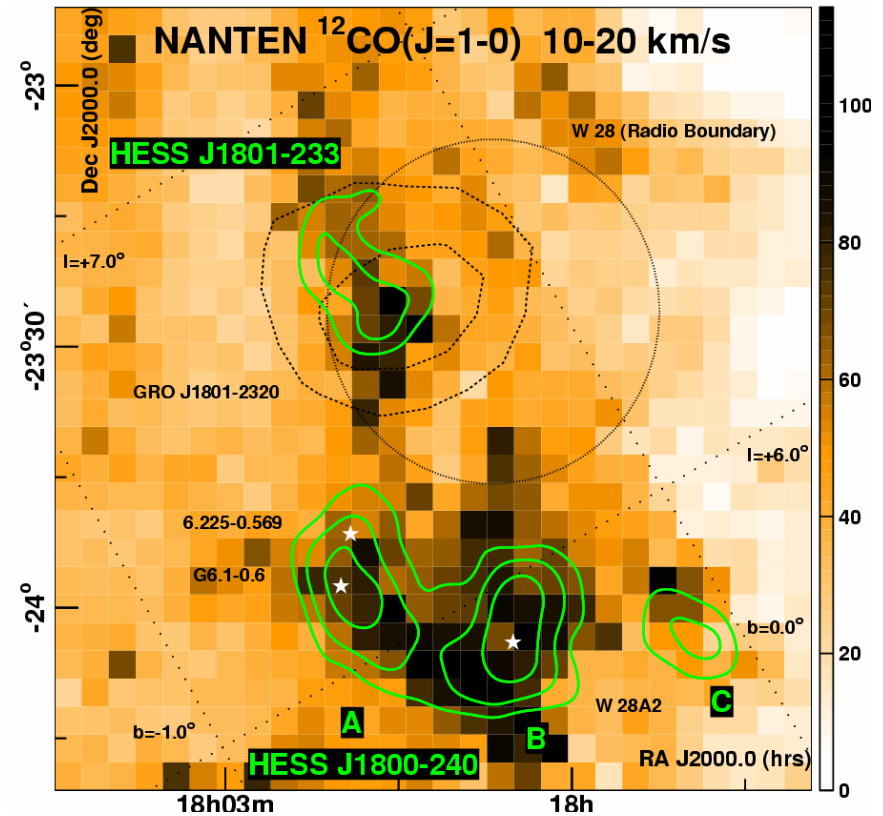
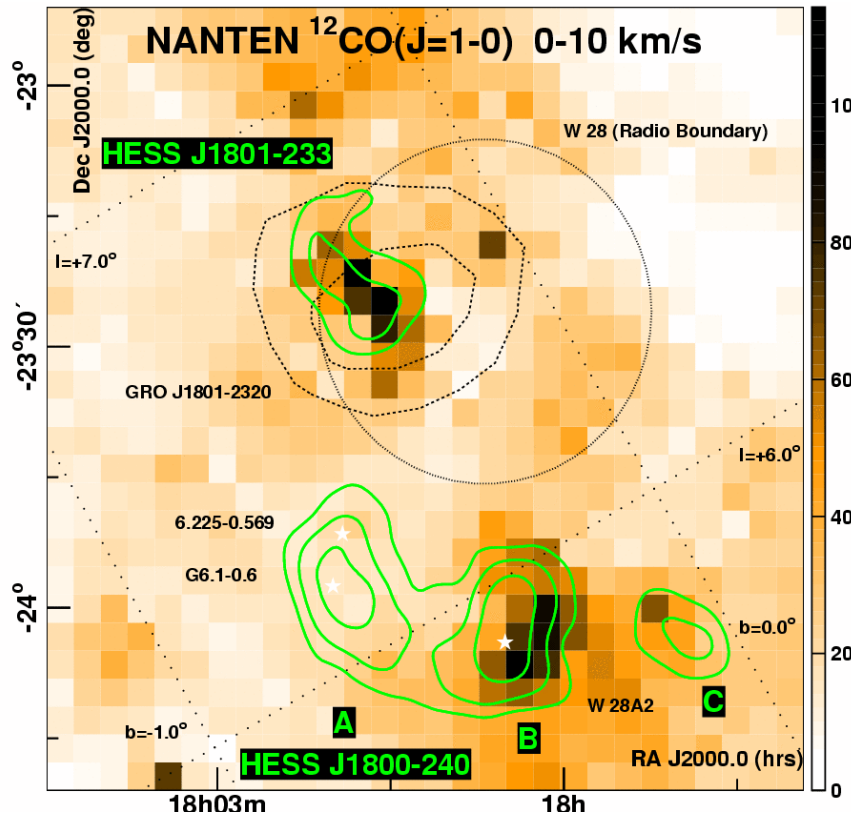
- **Emission gamma complexe**

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

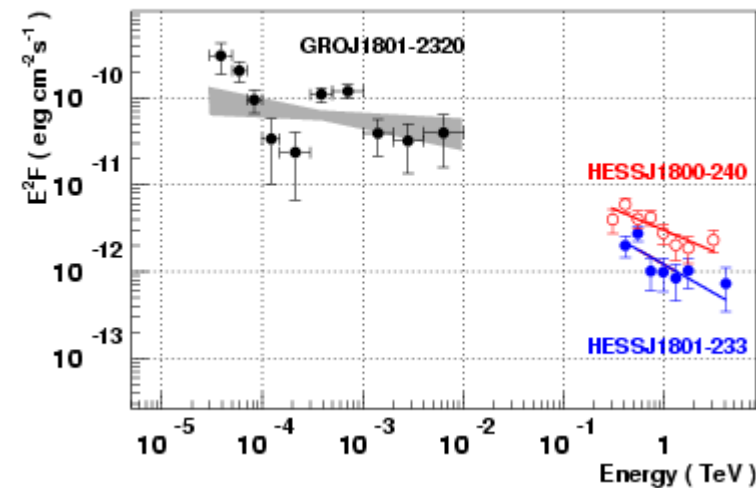


Aharonian et al. [astro-ph] 0801.3555

Région de W28

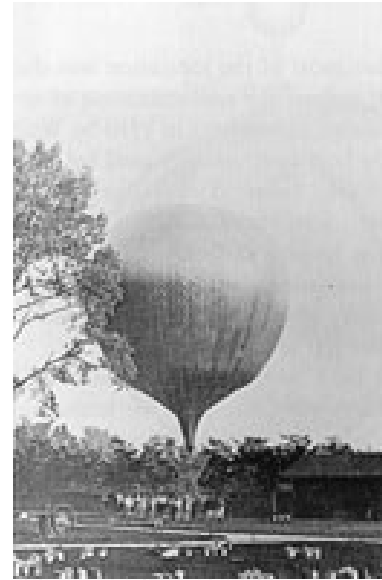


- Emission corrélée à la densité de matière
- Scénario hadronique probable
- Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN

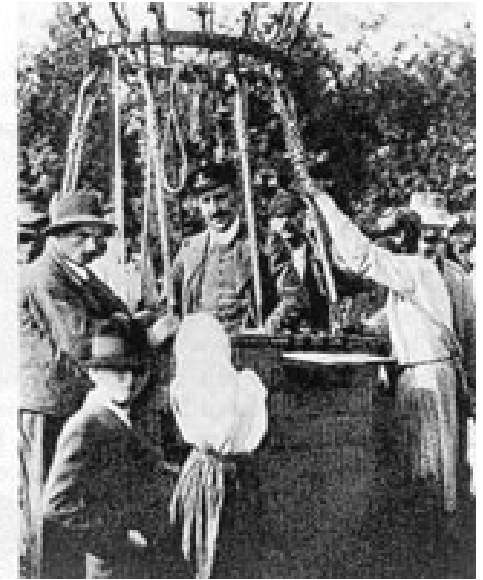


Rayons cosmiques - Historique

- **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

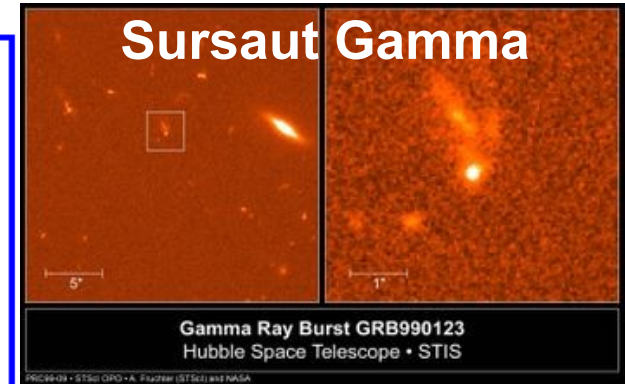
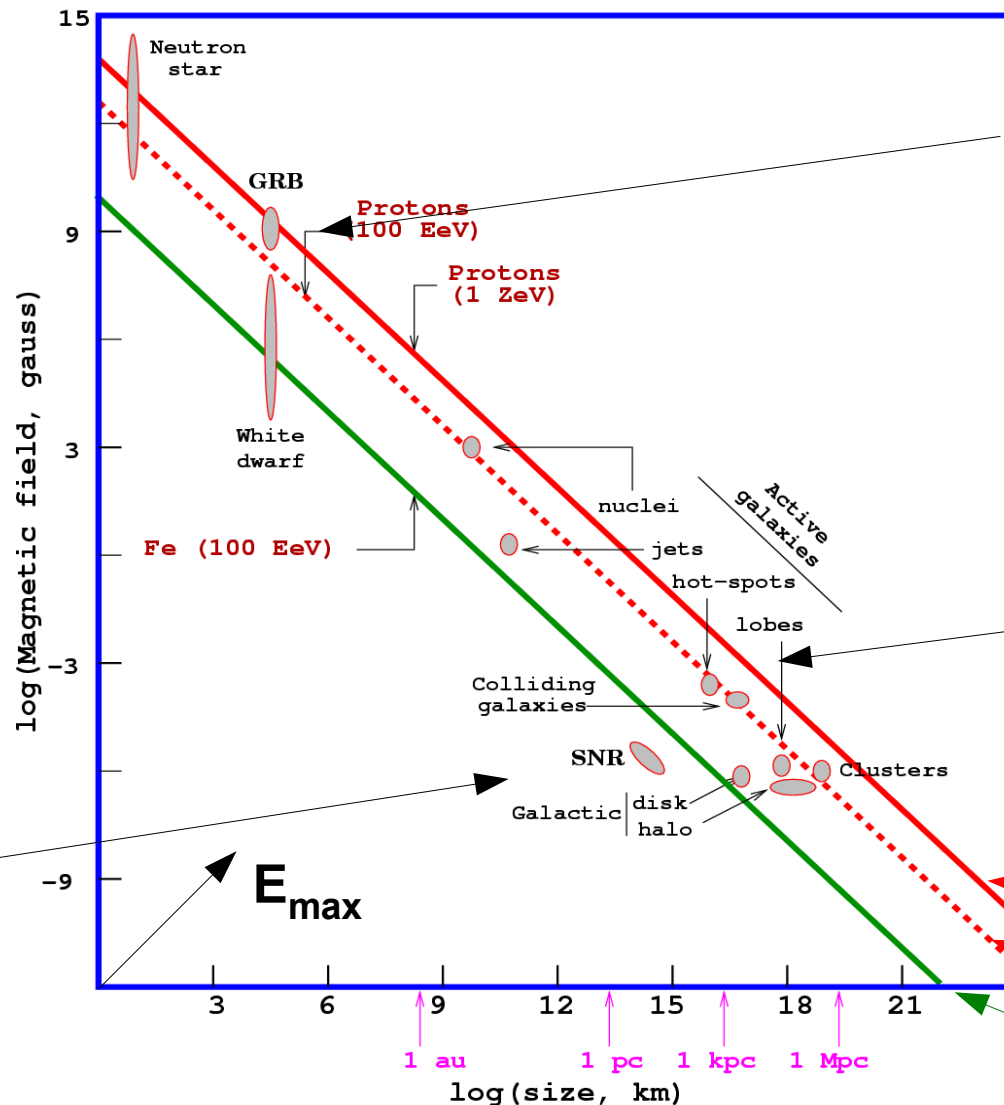
Candidats potentiels

- Argument simple: Confinement dans une zone d'accélération

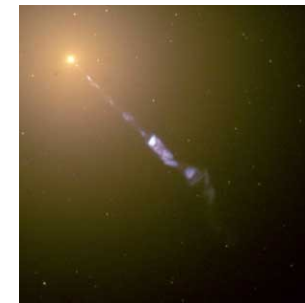
$\Rightarrow E_{\max} \sim Z.B.L$

Hillas-plot

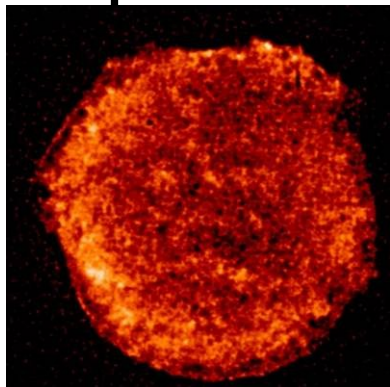
(candidate sites for $E=100$ EeV and $E=1$ ZeV)



Noyau actif galaxie



Vestige de supernova

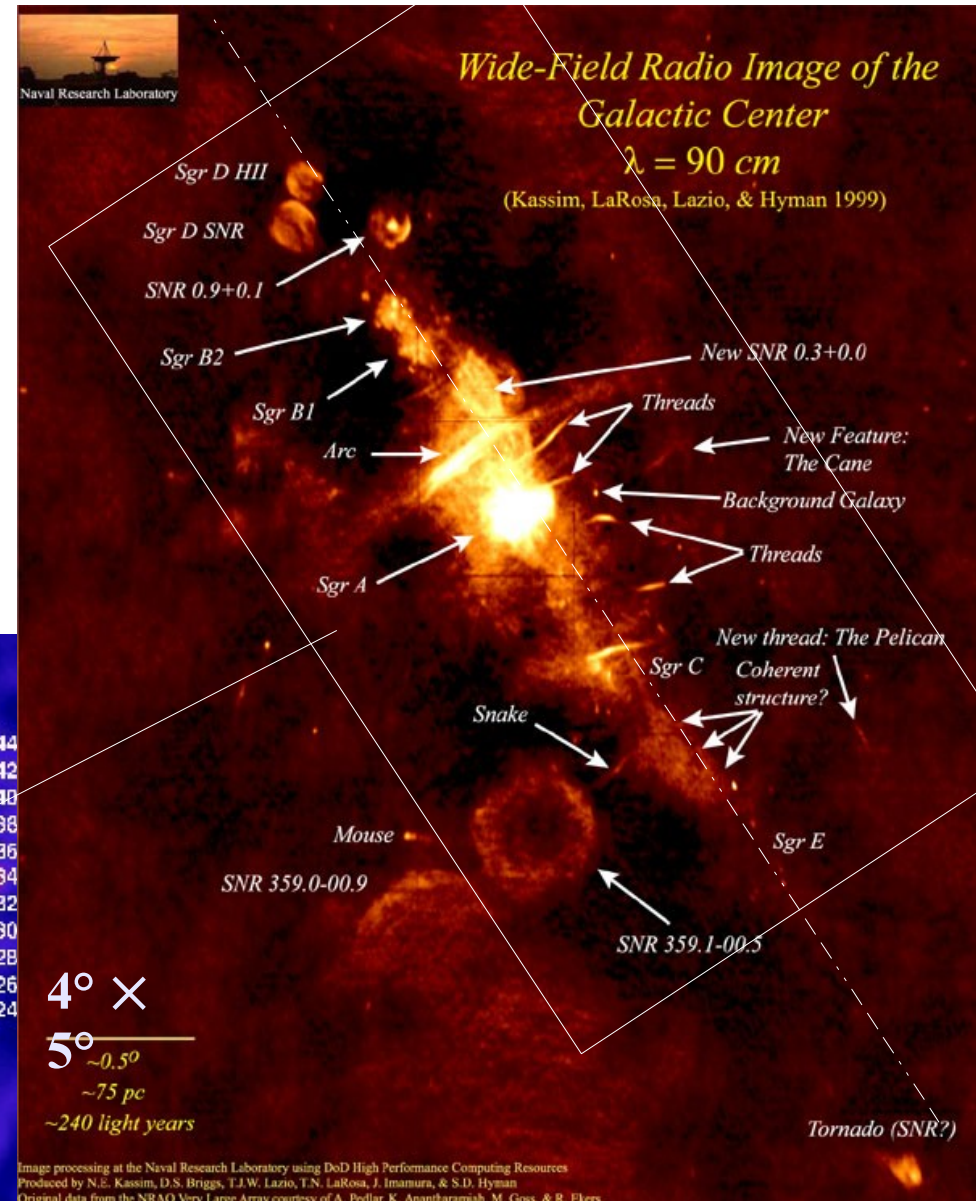
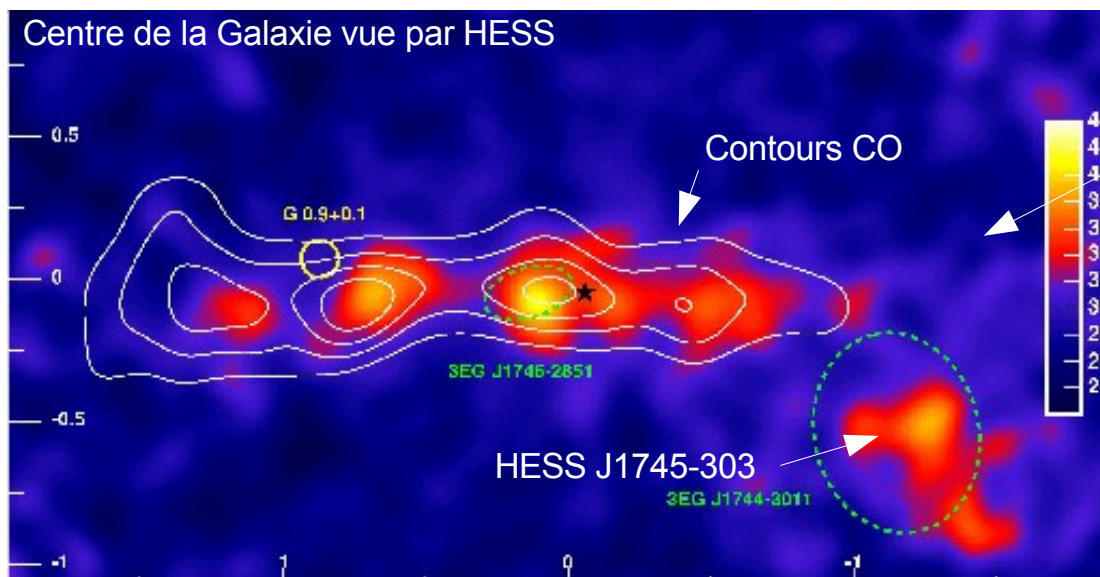


$E_{\max} \sim ZBL$ (Fermi)

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

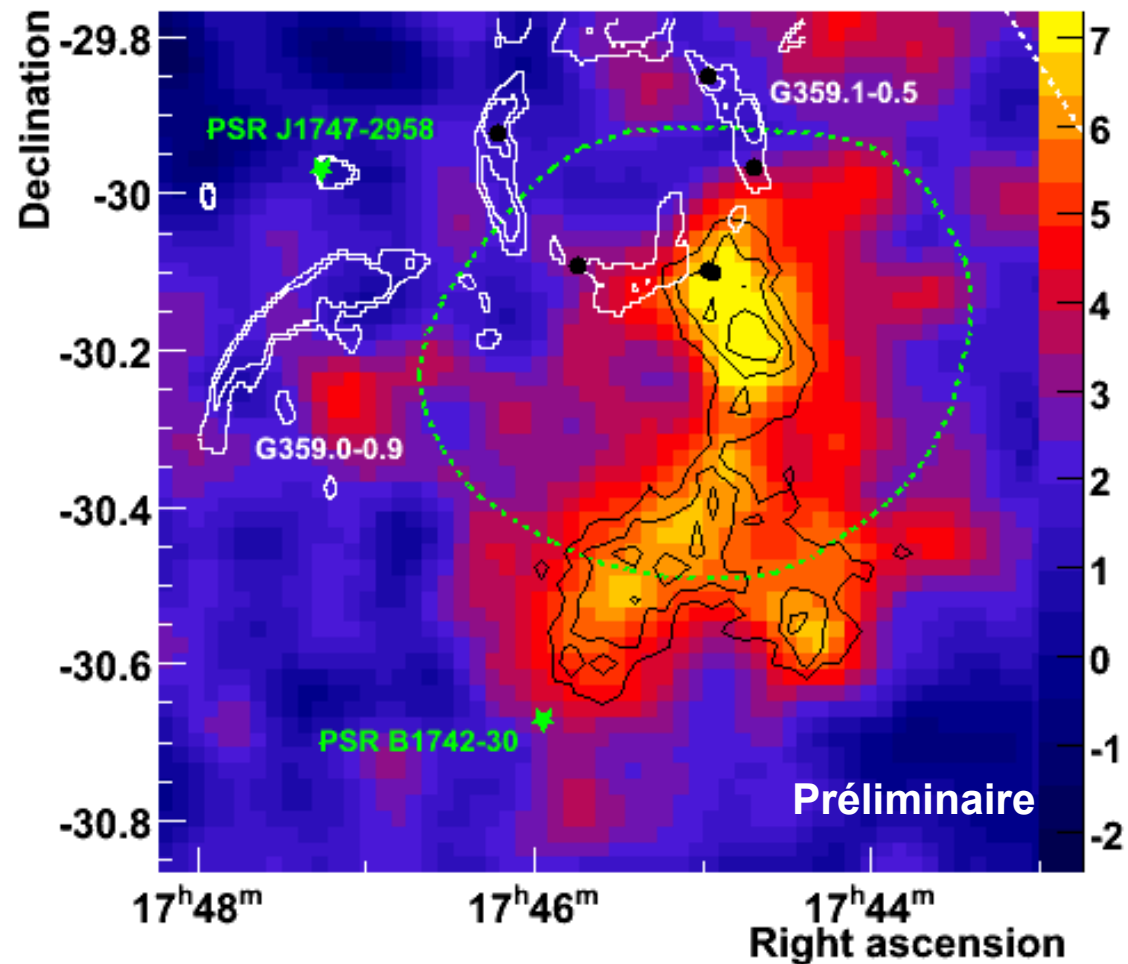
Le vestige de supernova G359.1-0.5

- 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



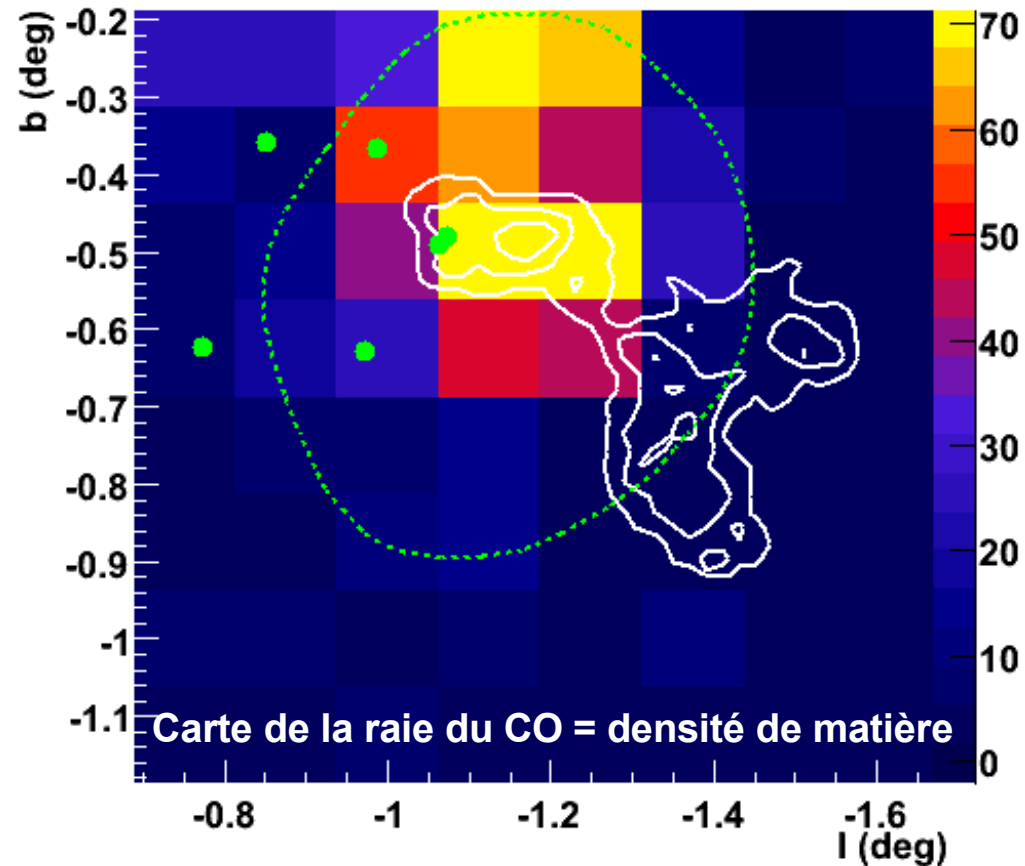
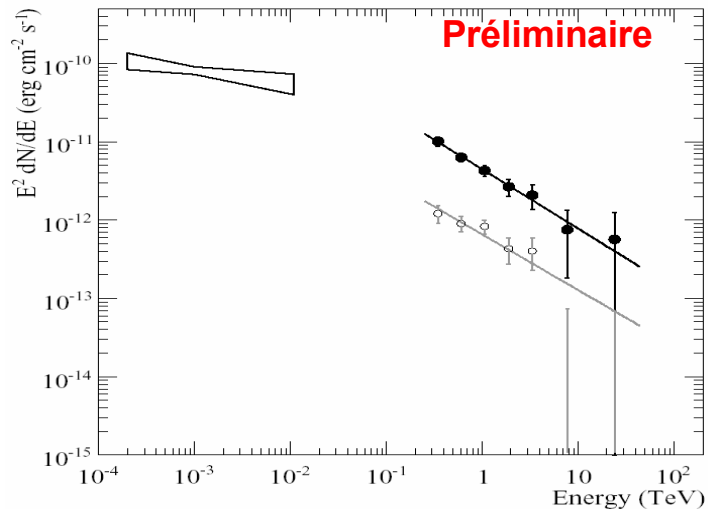
SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- **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**



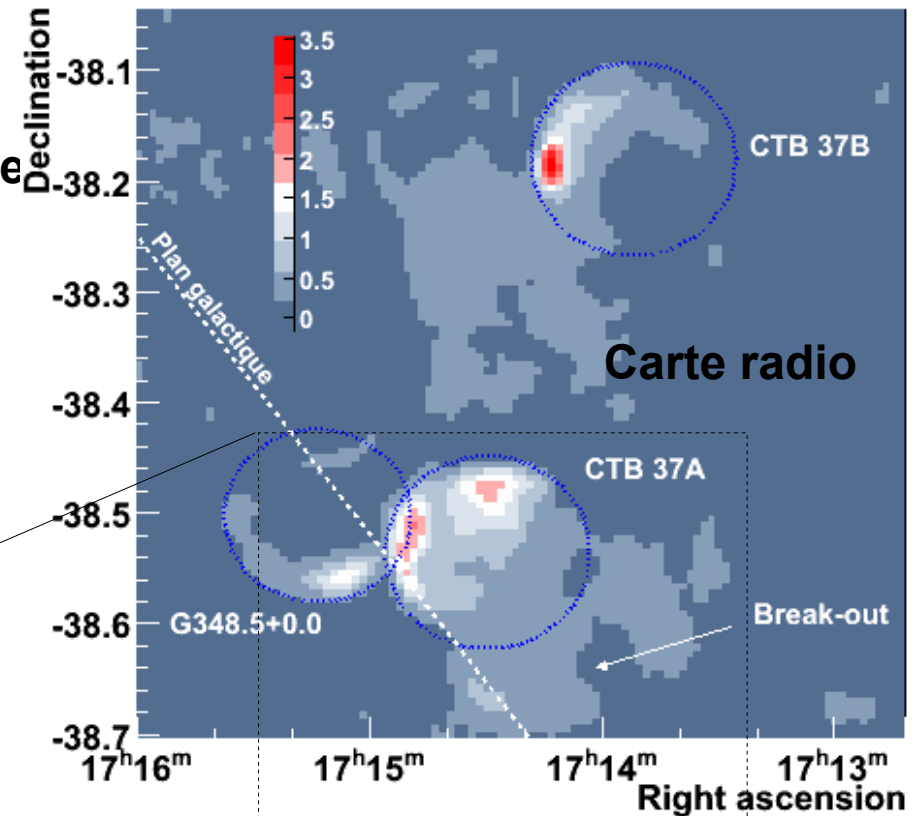
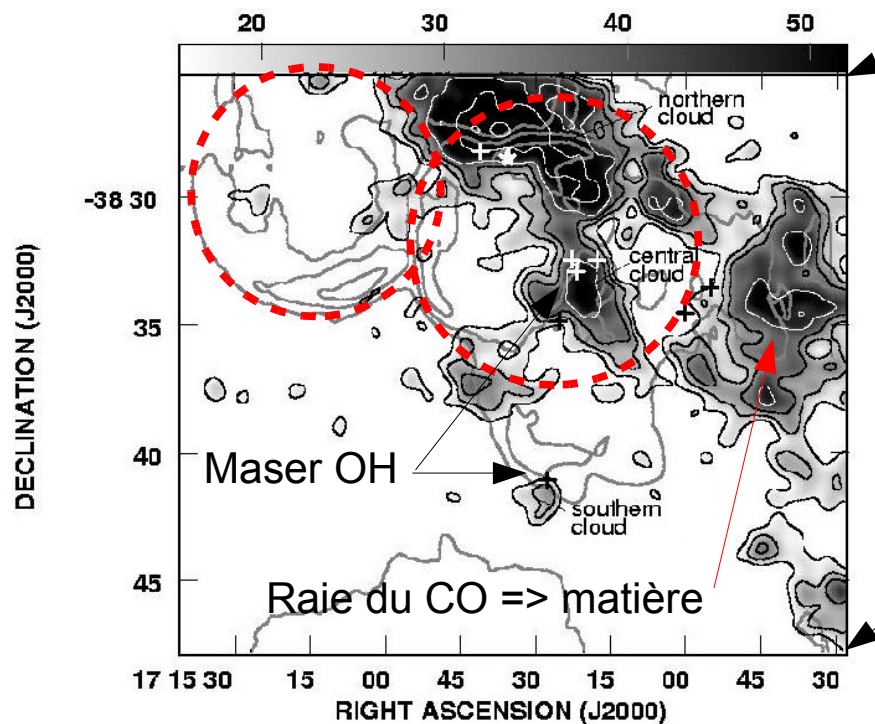
SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- **Nuages moléculaires choqués**
 - Nuage coïncident avec la partie nord de la source HESS
 - Sonde poten
 - 5×10^4 masses solaires
 - **Point de vue énergétique**
 - $\sim 30\%$ de l'énergie typique d'explosion nécessaire (10^{51} erg)
- => Interprétation hadronique très probable



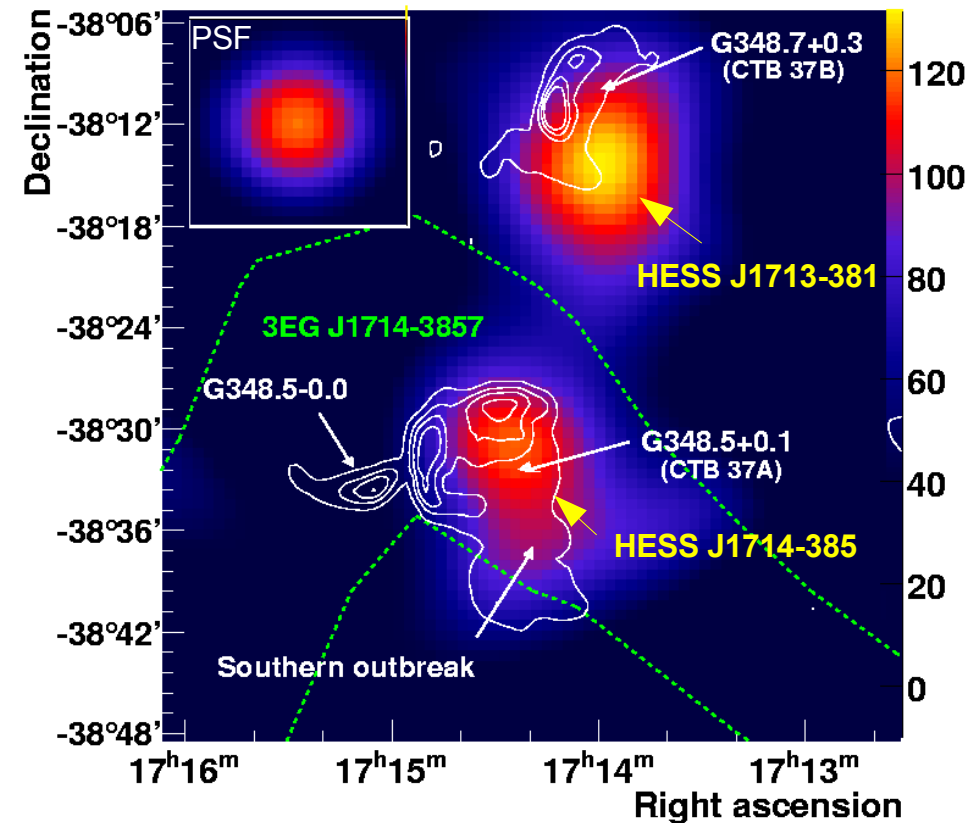
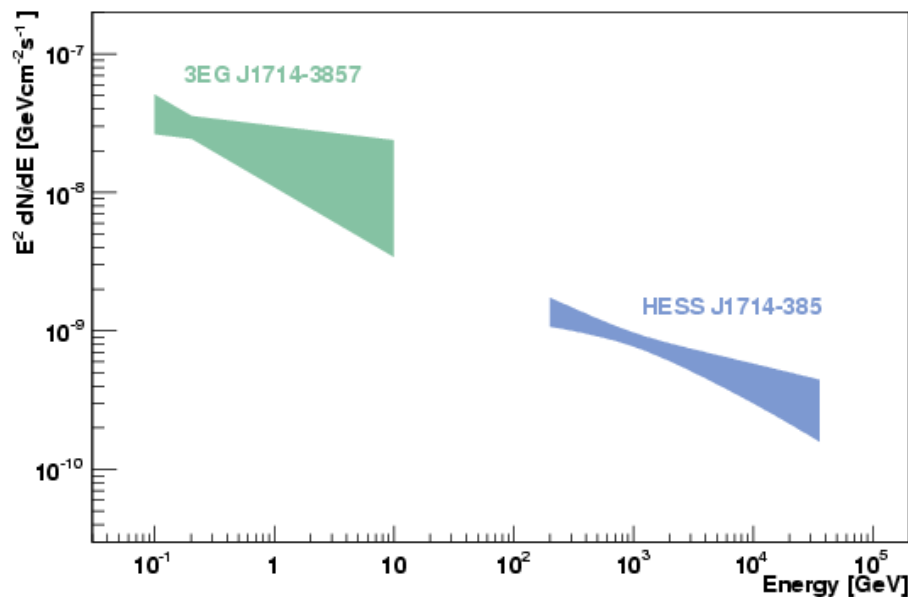
Complexe de SNR CTB 37

- **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 ?

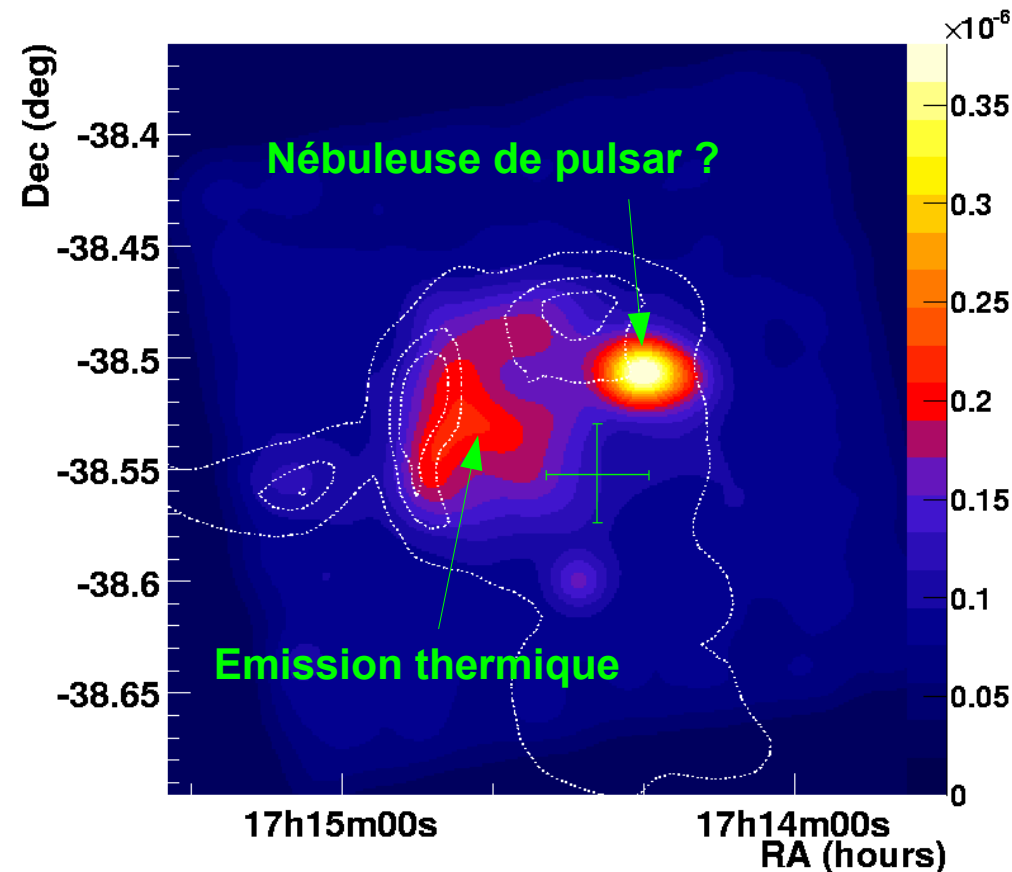
- **Observations en rayons X**

- Emission thermique du reste de supernova
=> Nuages moléculaires chauffés par le choc
- Emission non thermique
 - Loi de puissance absorbée $\Gamma=1.3\pm0.3$
- => 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

