

Recherche d'accélérateurs de rayons cosmiques galactiques avec HESS

Armand Fiasson, LPTA

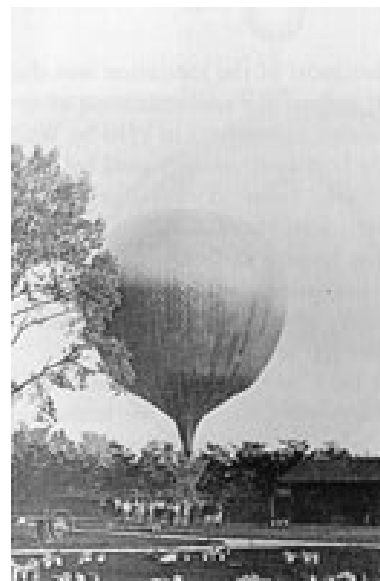


Sommaire

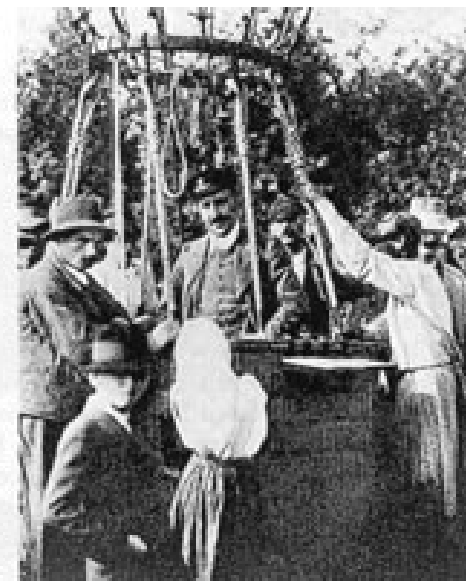
- **Rayons cosmiques: énergie et origine**
- **Le photon gamma, un messenger des rayons cosmiques**
- **L'expérience HESS**
- **Observations de restes de supernova avec HESS**
- **Recherche d'associations accélérateurs/cibles**
- **Perspectives**

Rayons cosmiques - Historique

- Découverts en 1912 par Victor HESS
 - Mesures en ballon
 - => Ils viennent d'en haut!
- 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



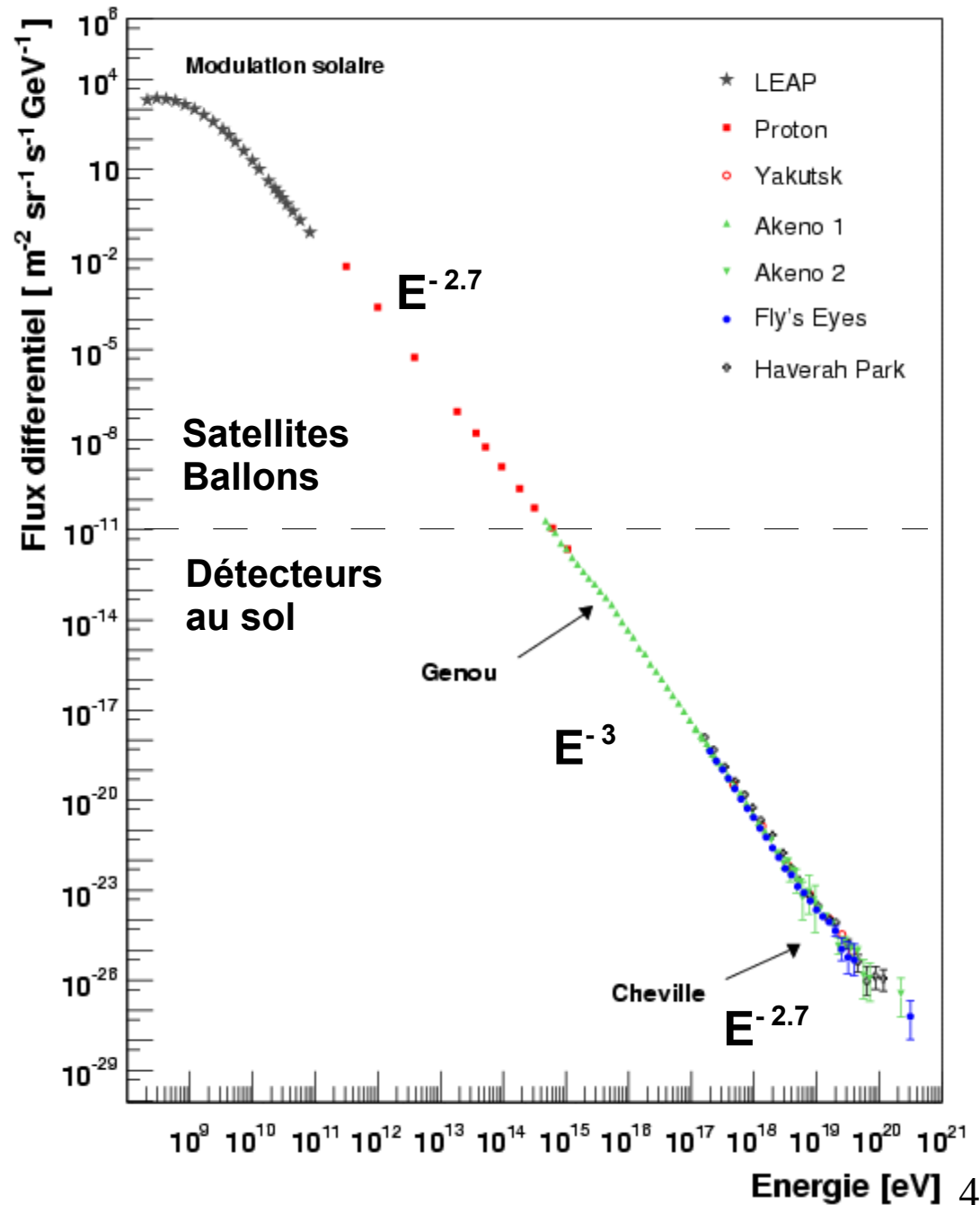
Aiguille des cosmiques

Spectre en énergie

- Différentes méthodes d'observation
 - Satellites & ballons à basse énergie
 - Détection au sol à plus haute énergie (gerbes atmosphériques)
- Spectre en loi de puissance
 - Plusieurs cassures

=> Origine différente

 - Limite de l'accélération
 - Transition entre origine



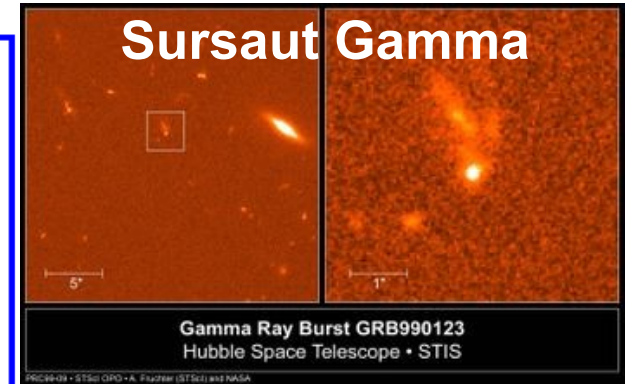
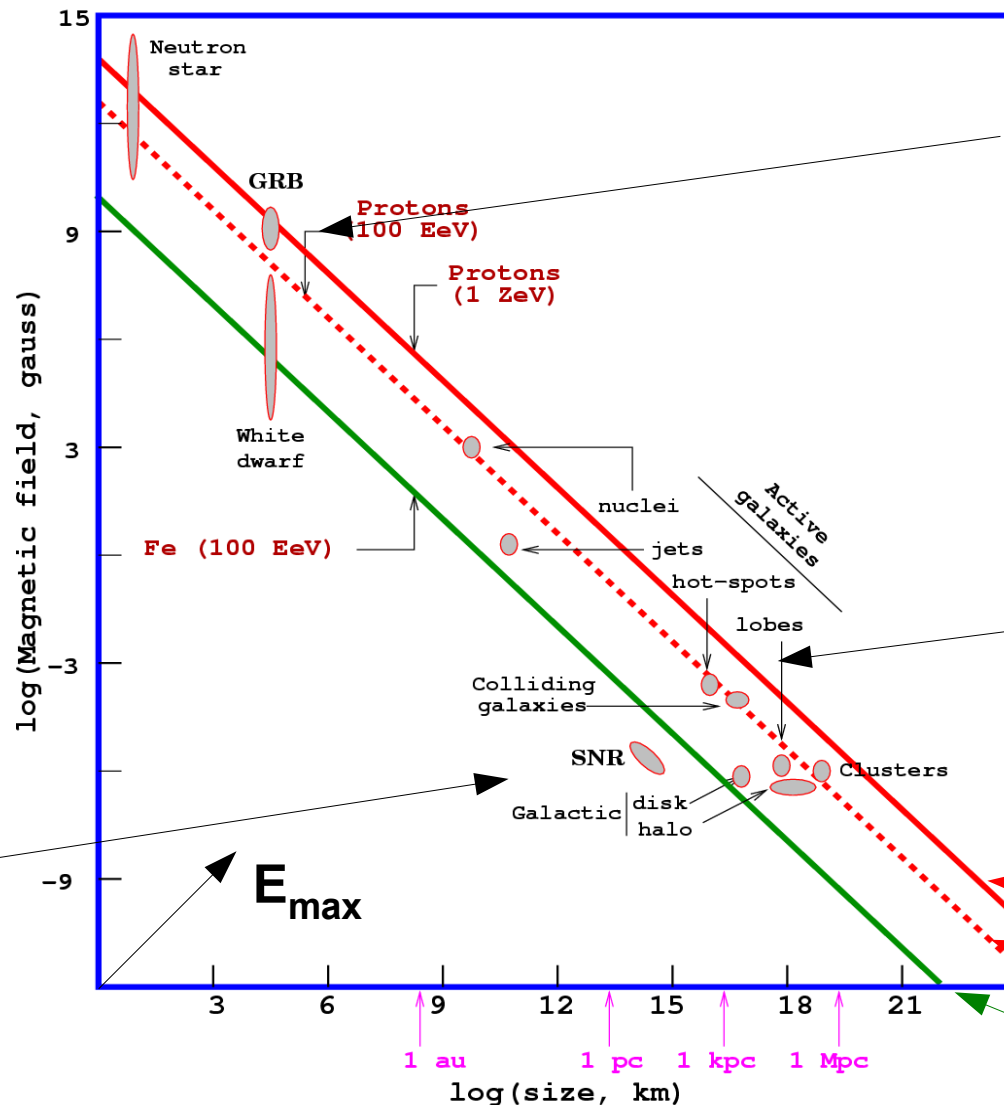
Candidats potentiels

- Argument simple: Confinement dans une zone d'accélération

Hillas-plot

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

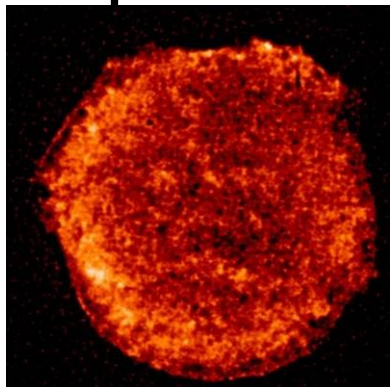
(candidate sites for $E=100$ EeV and $E=1$ ZeV)



Noyau actif galaxie



Vestige de supernova



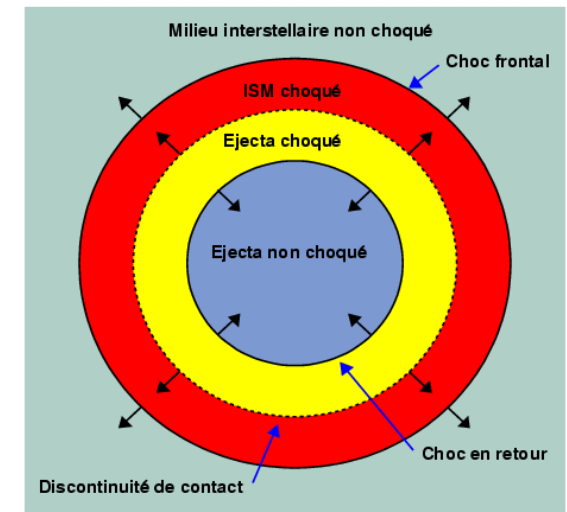
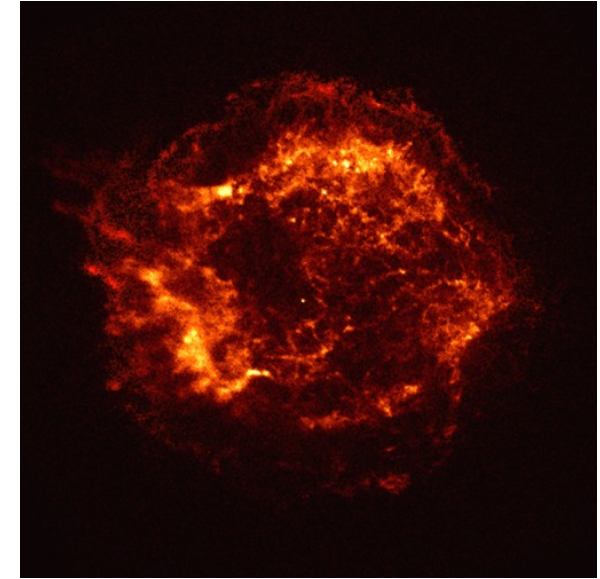
Proton 10^{21} eV

Proton 10^{20} eV

Fer 10^{20} eV

Rayons cosmiques galactiques

- SNe expliquerait le flux de RC au sein de la Galaxie
 - Taux ~ 1 SN / 30 ans
 - $\sim 10\%$ de conversion de l'énergie d'explosion en rayons cosmiques
- Accélération par onde de choc
 - => Passages répétés au niveau du choc
 - => Diffusion par les perturbations magnétiques de part et d'autre du choc
- Mécanisme de Fermi 1er ordre => gain d'énergie à chaque passage
 - => génère une loi de puissance d'indice ~ 2
 - => Compatible avec le flux de RC observé après diffusion
- Accélérerait des particules jusqu'au genou $\sim 10^{15}$ eV



Démarches expérimentales

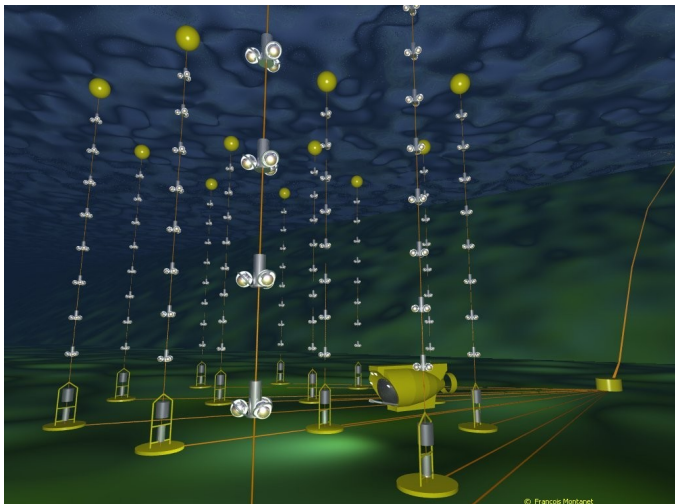
- Pb: rayons cosmiques diffusés par les champs magnétiques
- Plusieurs messagers utilisables

- Neutrinos $p + p \rightarrow \pi^\pm + \dots \rightarrow \nu + \dots$
- Rayons gamma $p + p \rightarrow \pi^0 + \dots \rightarrow 2\gamma + \dots$

→ Produits de l'interaction de particules accélérées

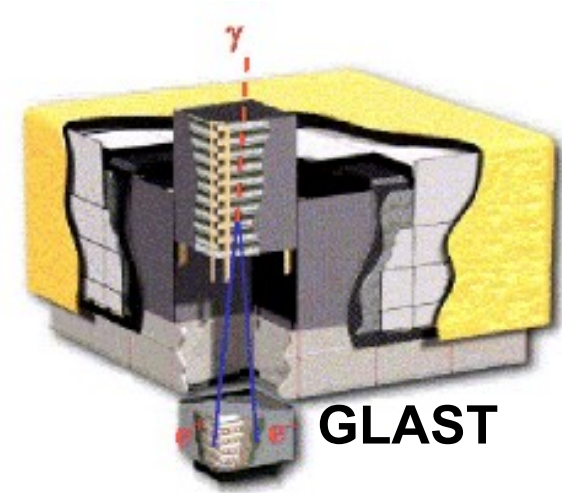
=> Photons au TeV : Indiquent la présence de particules $E > 1$ à 10 TeV

=> Idéal pour détecter les accélérateurs dans la Galaxie



Astronomie gamma

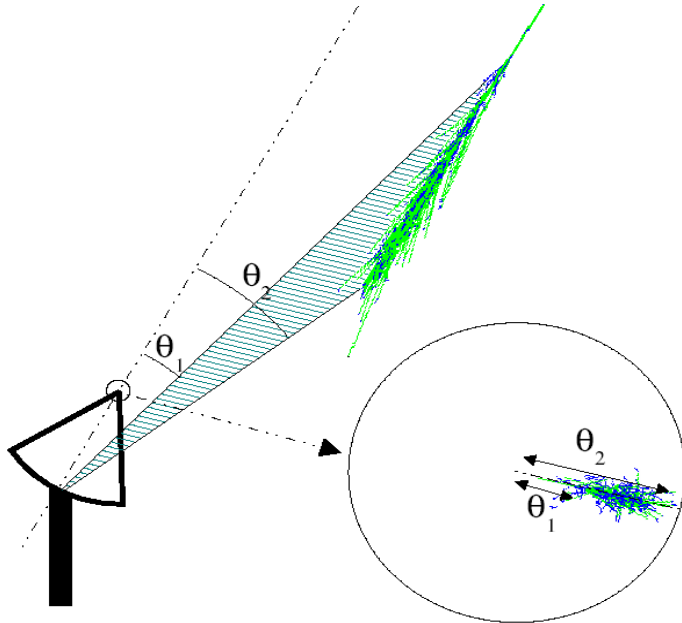
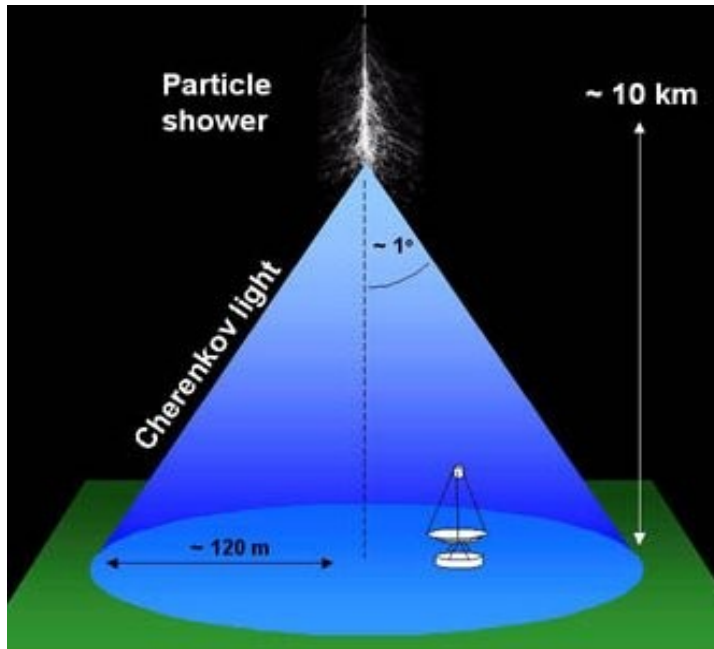
- Techniques d'optique classique inutilisables
 - Techniques de physique des particules
 - Détection de gerbes de particules
 - => Mesure de l'énergie par calorimétrie
 - => Détermination de la direction d'incidence par reconstruction



- Contraintes liées au flux de photons gamma
 - $E \sim \text{GeV} \Rightarrow \sim 10^{-2} \text{ photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - => Mesures directes par satellite (GLAST ...)
 - $E \sim \text{TeV} \Rightarrow \sim 10^{-8} \text{ photons m}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - => Mesures au sol (HESS, MAGIC, VERITAS ...)



HESS – Réseau d'imageurs Tcherenkov

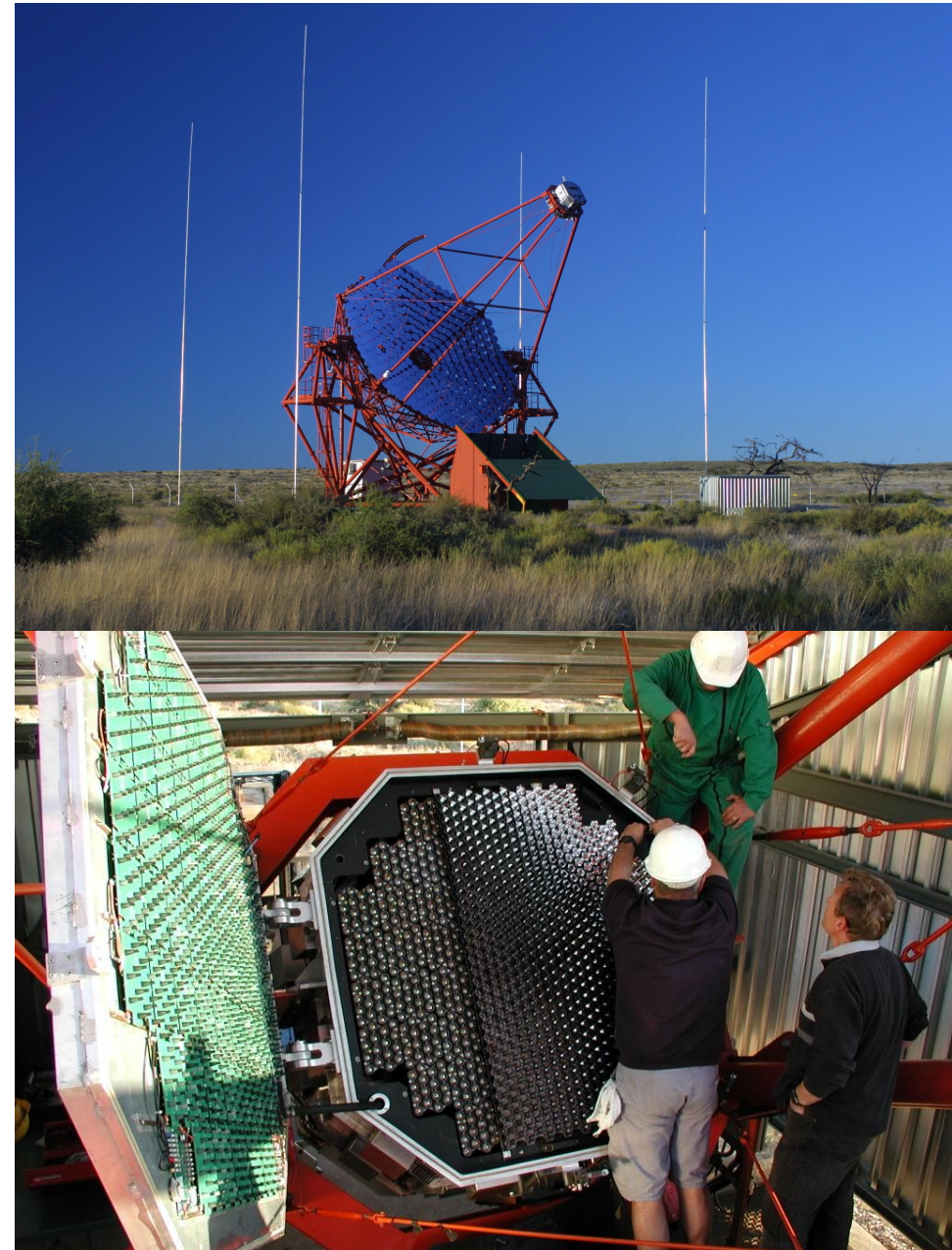


- Observation entre 100 GeV et qqes 10 TeV
- Détection du flash Tcherenkov de la gerbe atmosphérique
 - Image du développement de la gerbe au foyer du réflecteur
 - Observation stéréoscopique des images

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

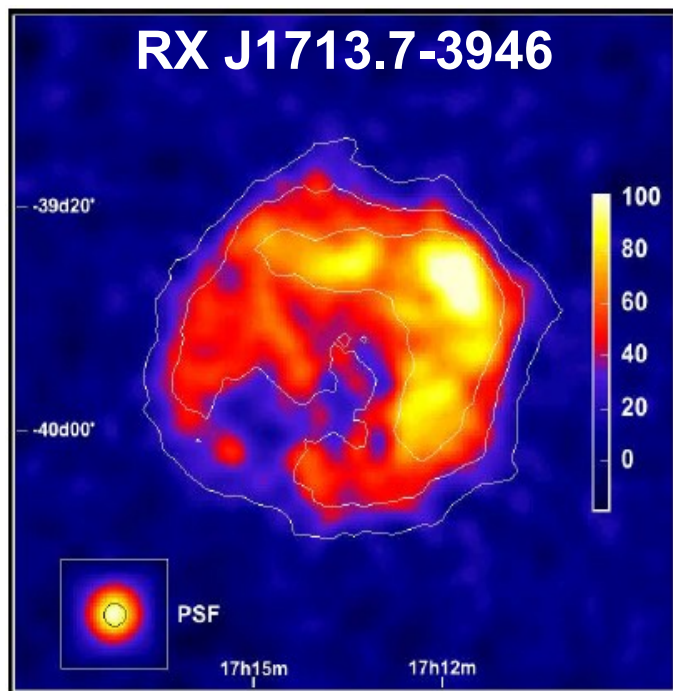
Les télescopes de HESS

- 4 télescopes de 13m de diamètre répartis sur un carré de 120m de côté
 - Grande sensibilité
 - Renvoie la lumière Tcherenkov au foyer
- 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

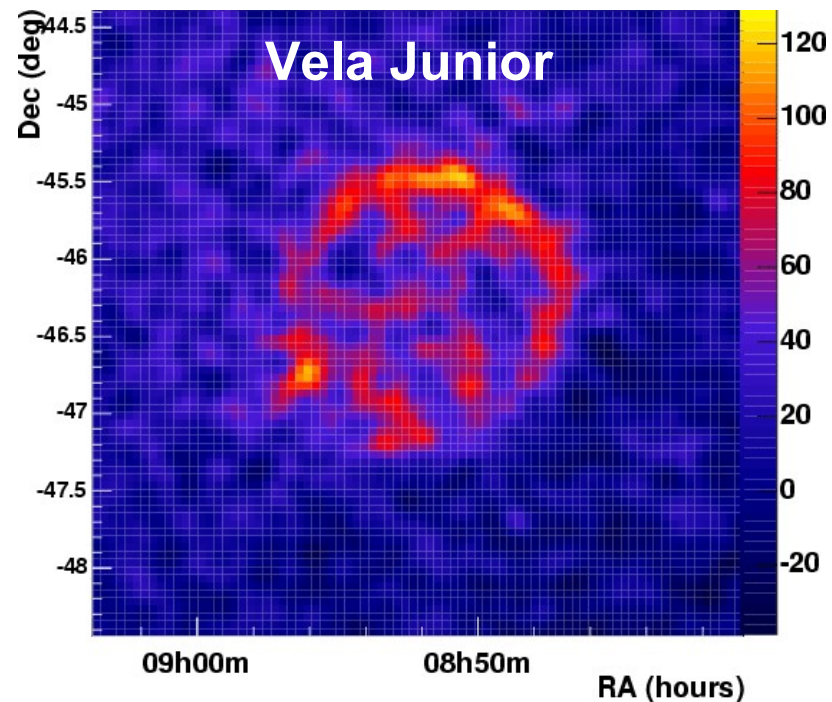


Observations de vestiges de supernova

- 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
 - Index = 1.79 ± 0.06 & 2.24 ± 0.04
 - => Indice spectral proche de 2
 - => Compatible avec une population de protons en E^{-2}



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

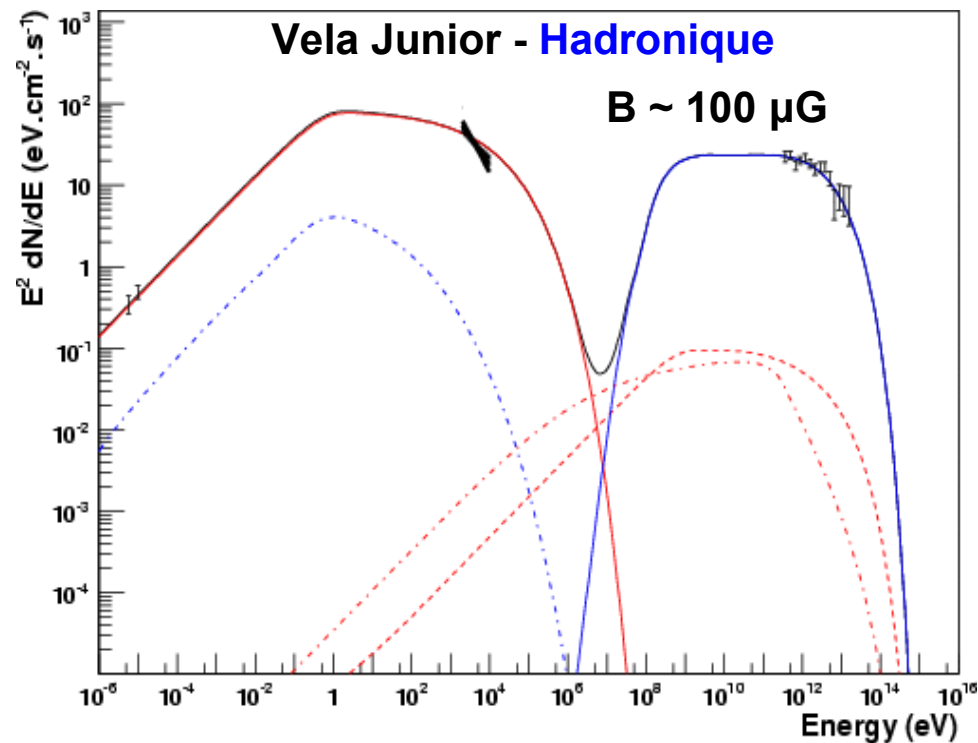
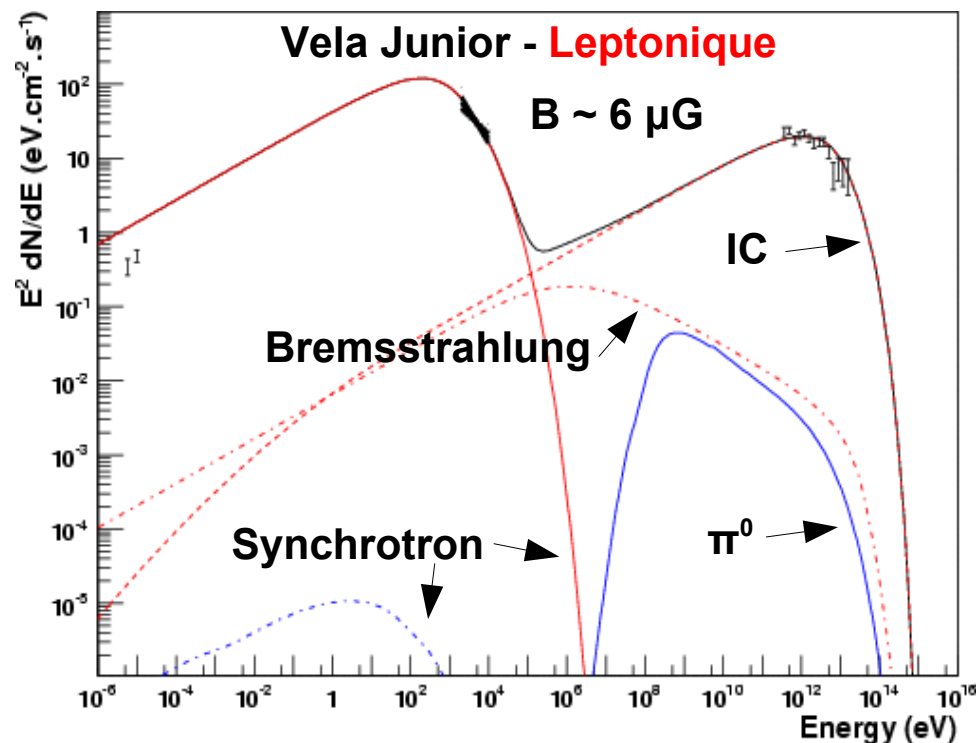


Aharonian et al. ApJ 661, 236 (2007)

Comparaison aux modèles

- Bande en énergie de HESS étroite

=> Utilisation d'autres longueurs d'onde pour contraindre les modèles



Aharonian et al. ApJ 661, 236 (2007)

- Difficulté à discerner la nature des particules

Modèle à dominante leptonique

Modèle à dominante hadronique

} Compatibles avec les données

Autre démarche

- **Comportements différents des deux espèces**
 - **Pertes radiatives plus importantes pour les électrons à haute énergie**
 - **Corrélation densité de matière et rayonnement gamma pour les hadrons**
 - => Rechercher des accélérateurs potentiels proche de cibles denses**
- **Restes de supernova associés à des nuages moléculaires**
 - **Nuages moléculaires en relation étroite avec les restes de supernova**
 - => A l'origine de la formation d'étoiles et de supernovae**
 - => Association naturelle**
 - **Champ magnétique plus intense au sein des nuages**
 - => La présence d'électrons implique une émission de rayons X**

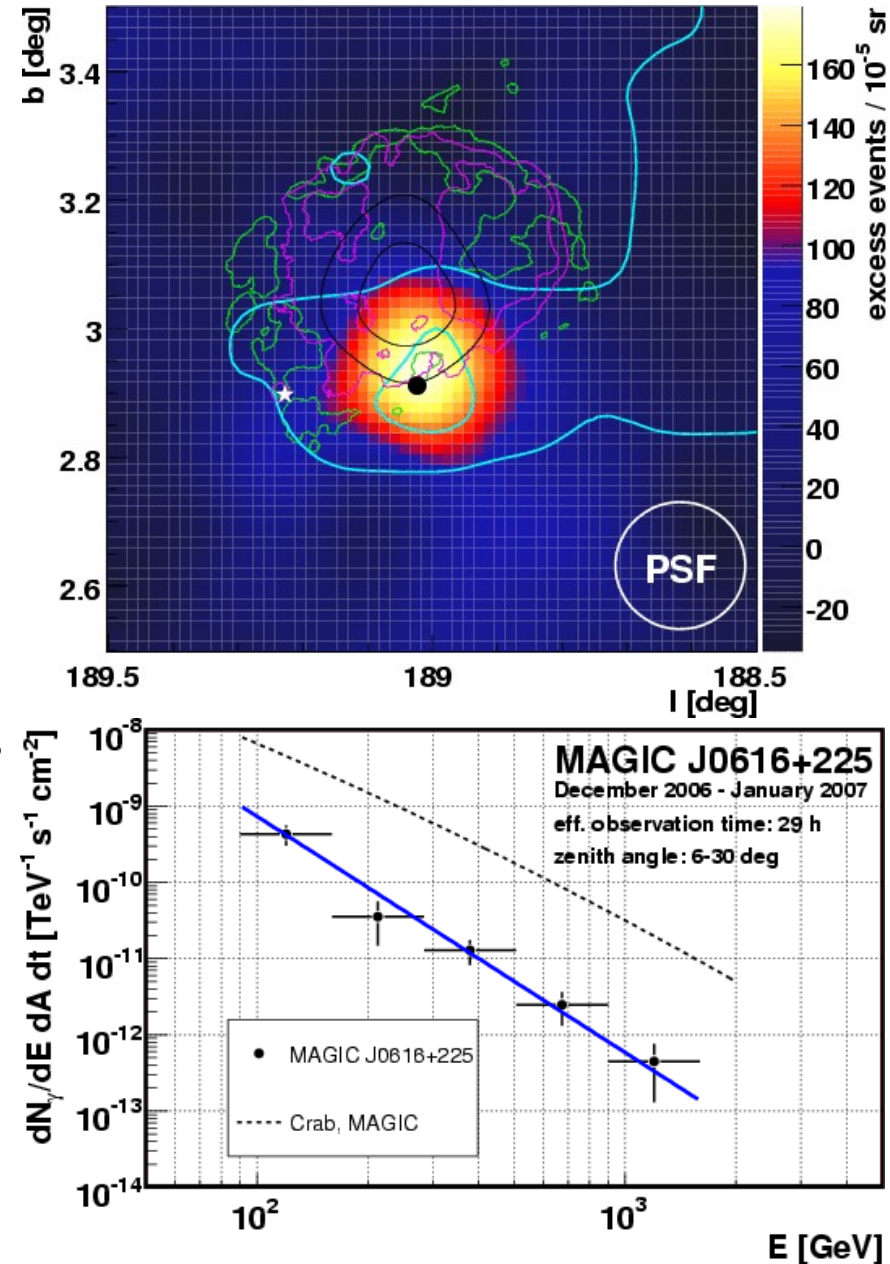
Associations accélérateur - cibles

- Association effective difficile à mettre en évidence
=>Nécessité d'indicateurs fiables d'interaction
 - Emission maser du radical OH
 - Pompage collisionnel à l'origine de l'inversion de population
 - Densité et température nécessaire = typique nuage choqué
 - 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
- => Plus de 20 vestiges de supernova présentent cette émission
- => Cibles idéales pour la mise en évidence de l'accélération de hadrons

IC 443

- IC 443
 - Un des exemples les plus célèbres 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

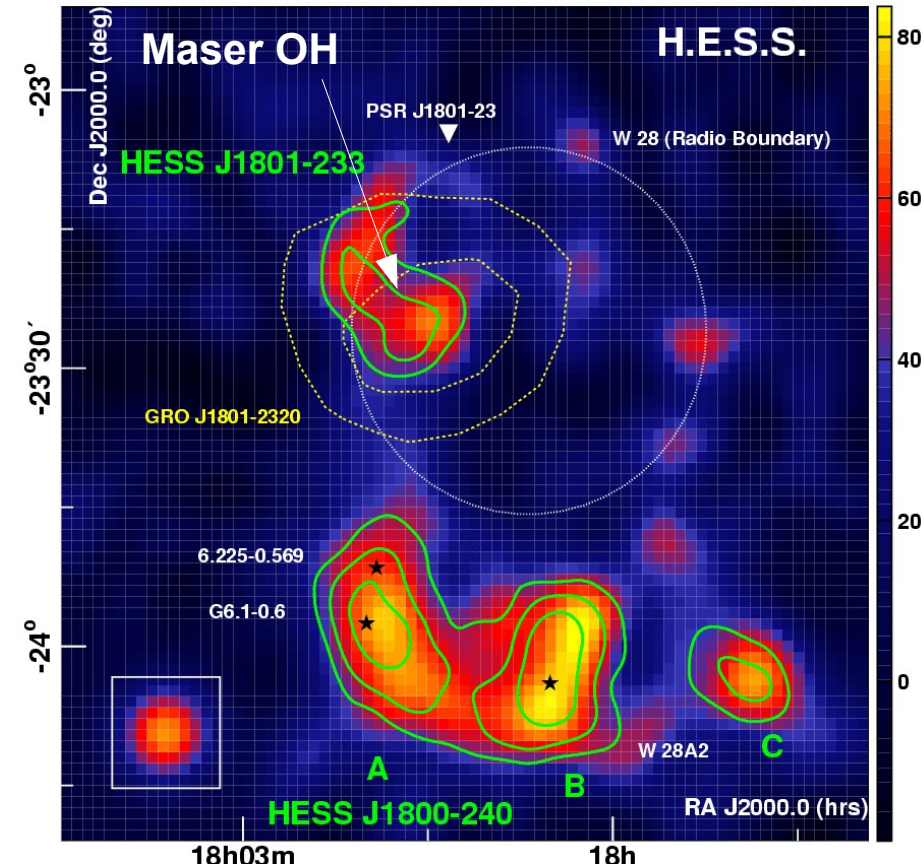


Albert et al. 2007 [arXiv]0705.3119

Région de W28

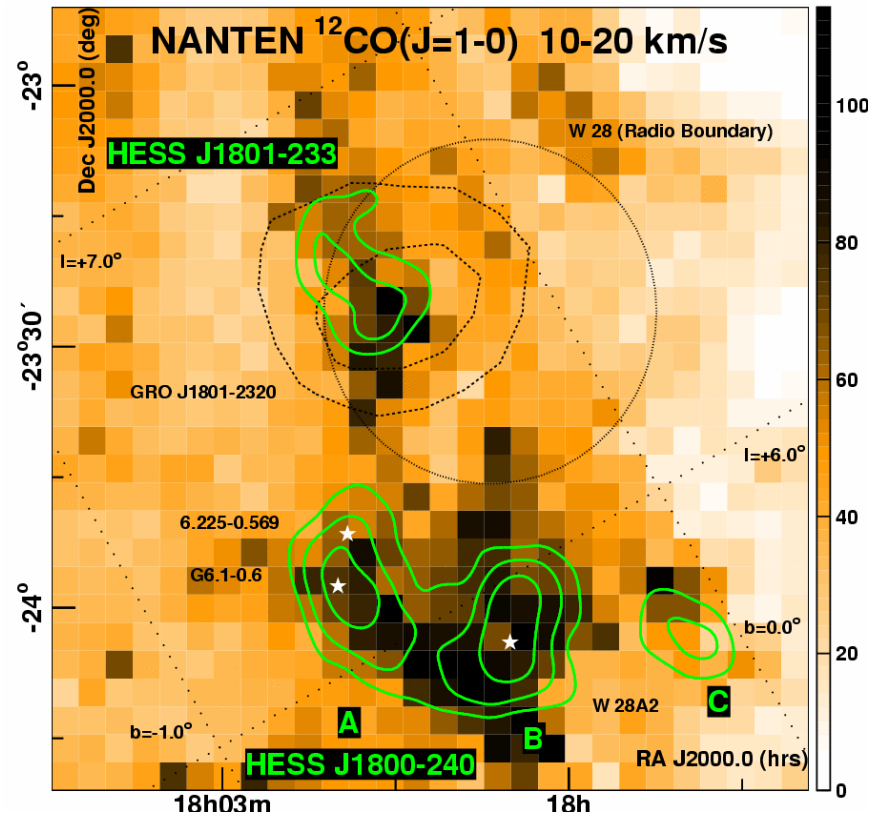
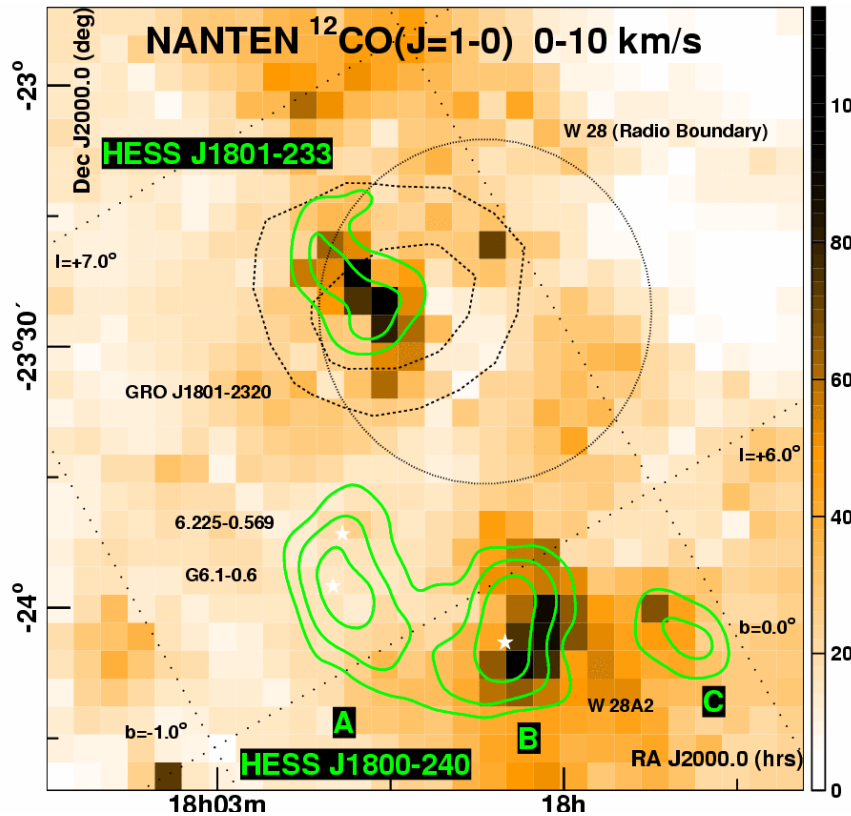
- Région complexe
 - Un reste de supernova proche
 - Nuages moléculaires choqués
 - Présence de masers OH
 - Source EGRET (GeV) coïncidente avec ces nuages

=> 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

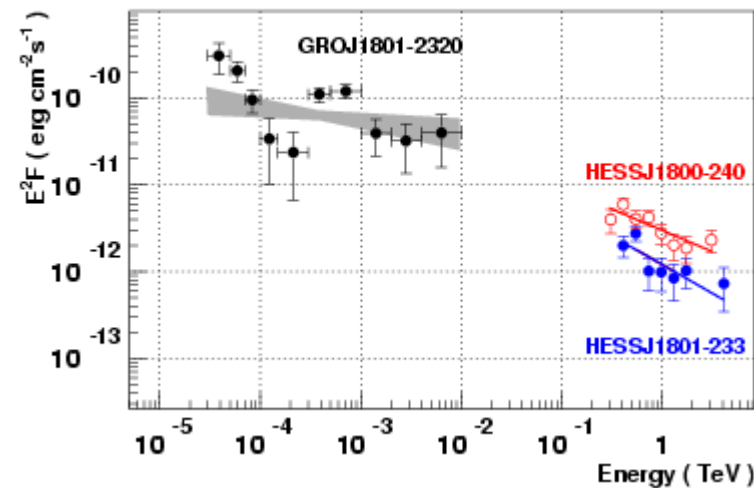


Aharonian et al. [astro-ph] 0801.3555

Région de W28

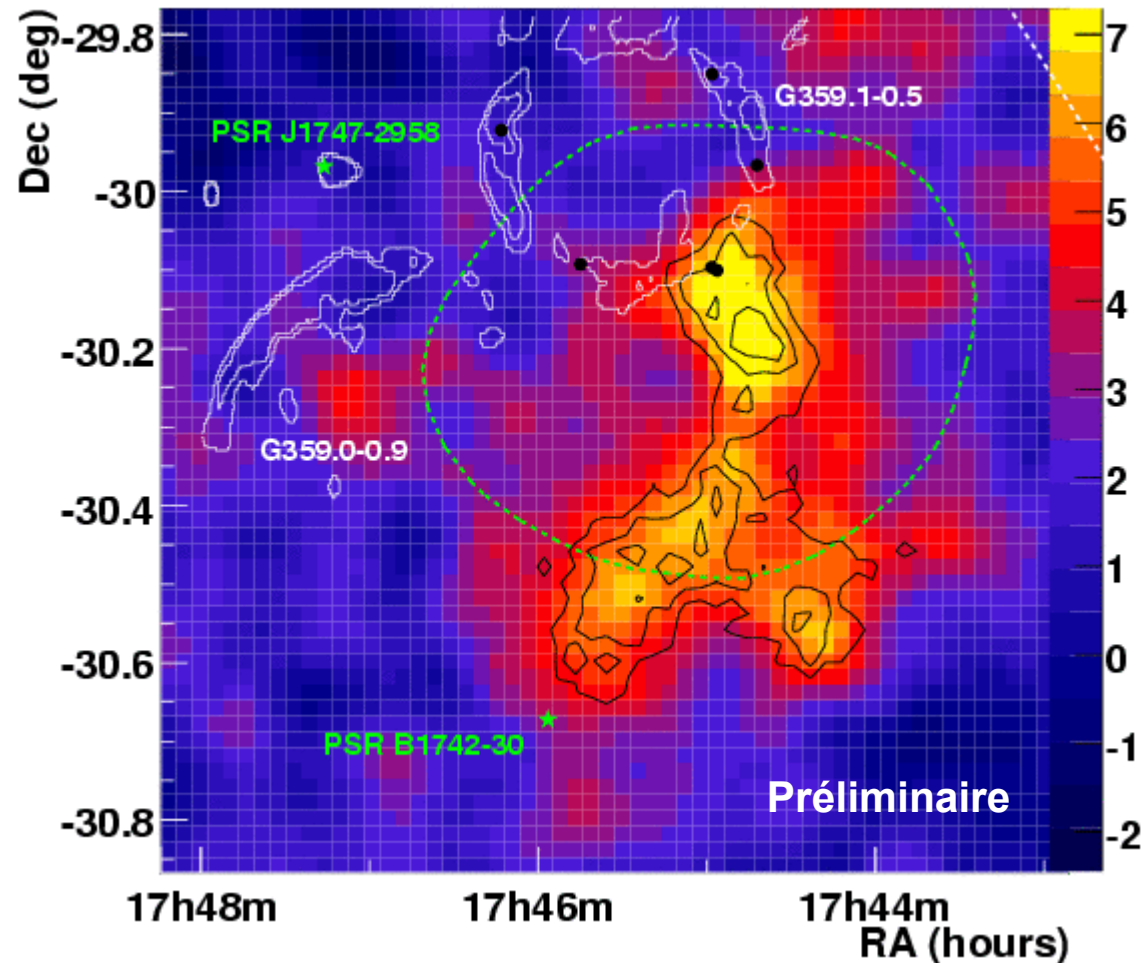


- Emission corrélée à la densité de matière
- Scénario hadronique probable
- Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN



SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

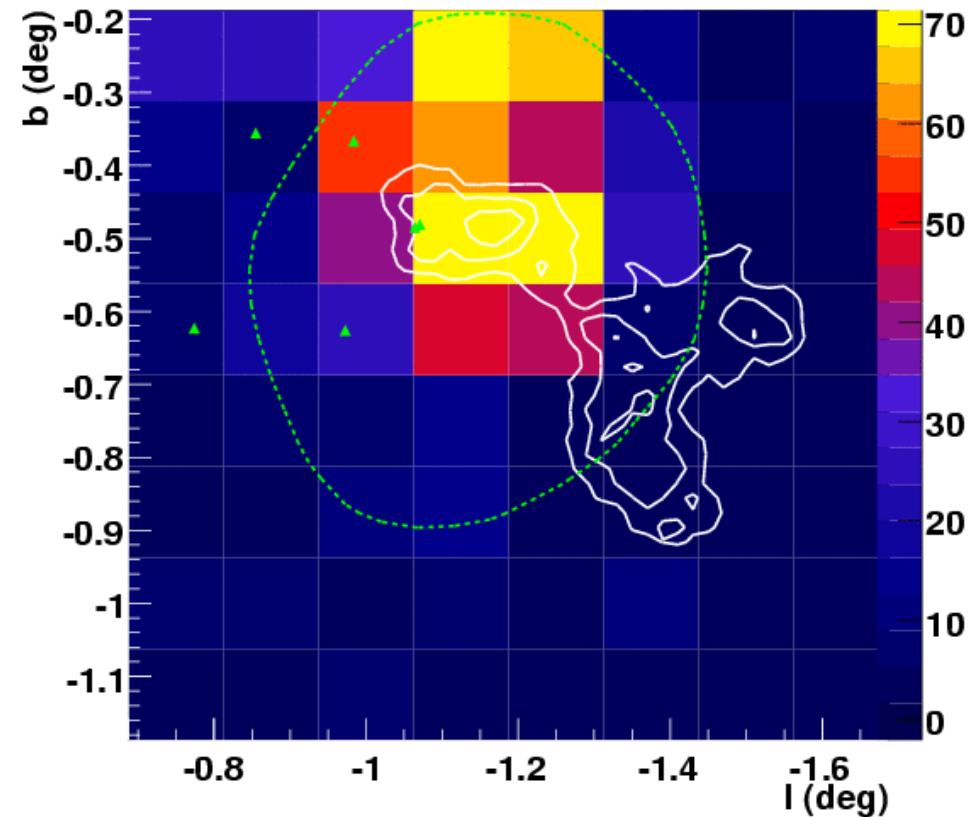
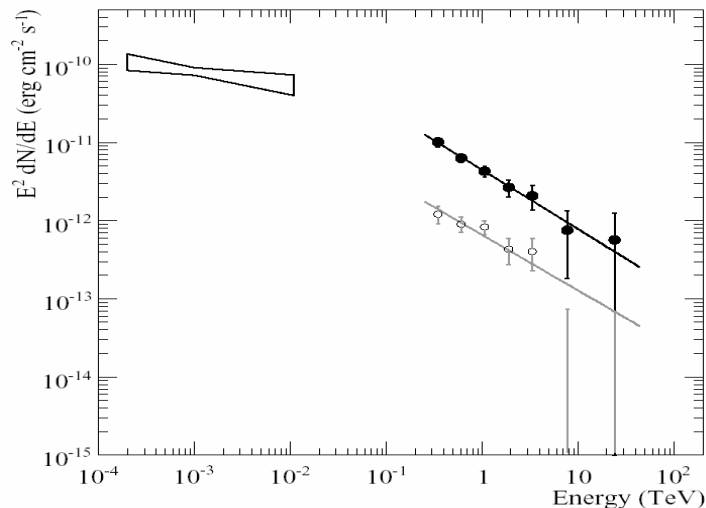
- Supernova en interaction avec des nuages moléculaires
 - Nuages moléculaires choqués
 - Coquille de matière autour du reste G359.1-0.5
 - Présence de plusieurs masers OH
=> nuages moléculaires choqués
- Source EGRET coïncidente à ce vestige + pas de rayons X
- Source HESS non identifiée
 - Morphologie complexe
 - Partie nord adjacente à G359.1-0.5



SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- Nuages moléculaires choqués
 - Nuage coïncident avec l'émission au TeV
 - 5×10^4 masses solaires
- Point de vue énergétique
 - $\sim 30\%$ de l'énergie typique d'explosion nécessaire (10^{51} erg)

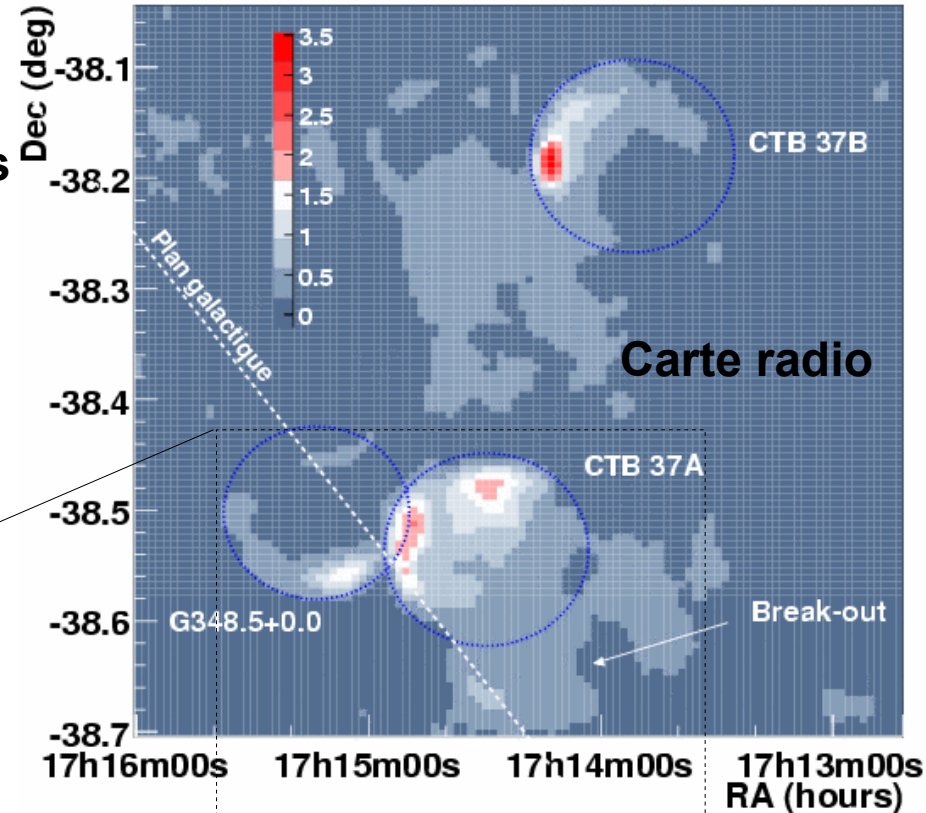
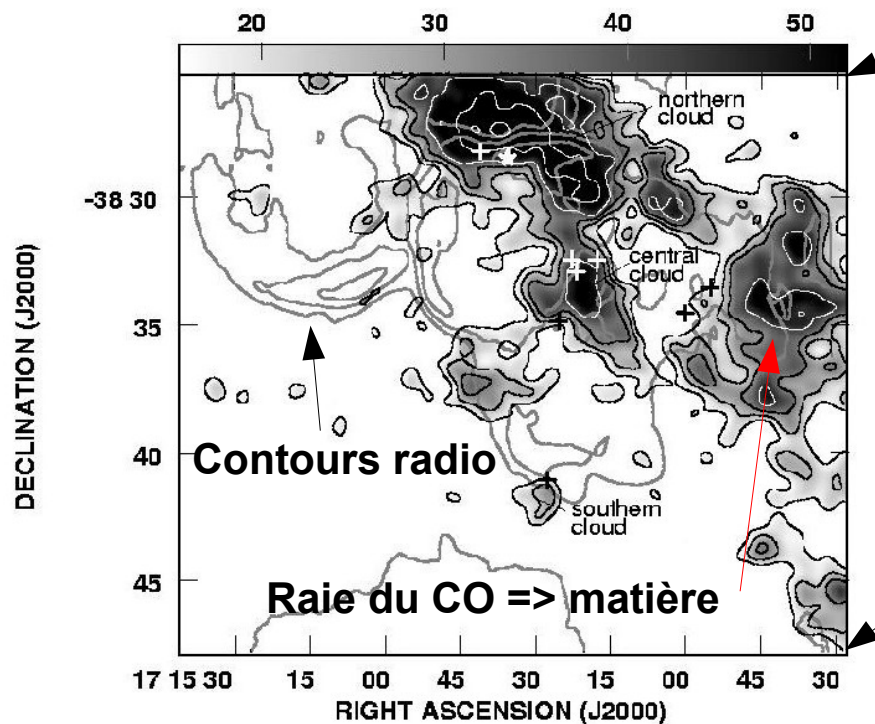
=> Interprétation hadronique très probable



Complexe de SNR CTB 37

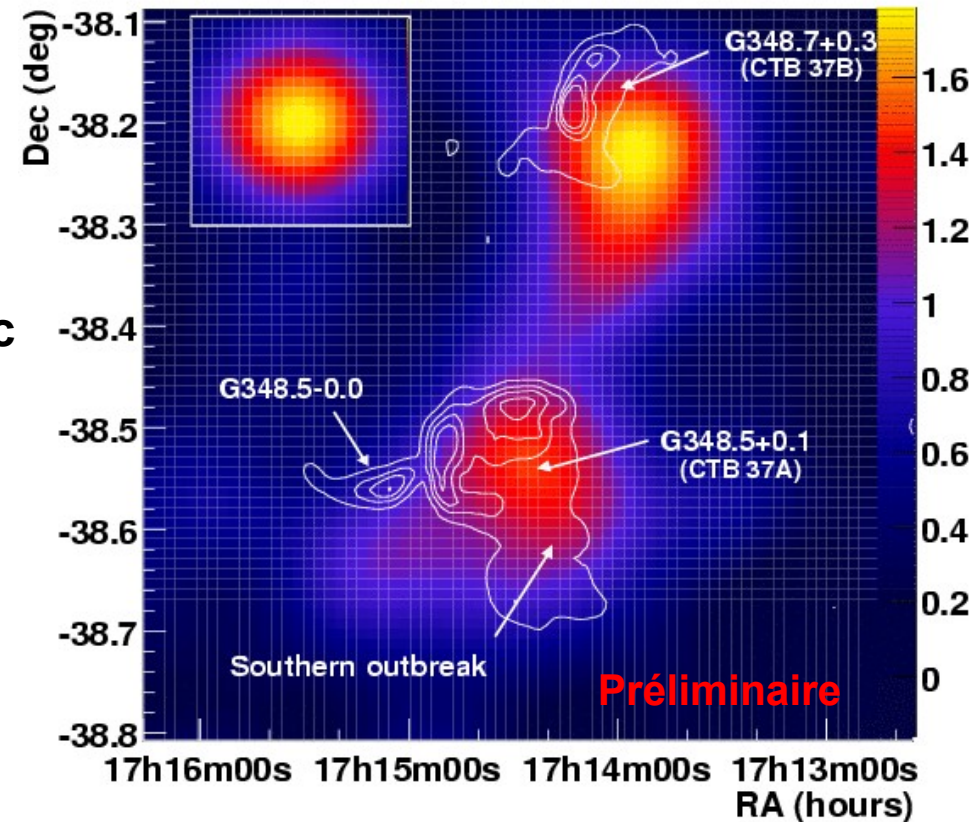
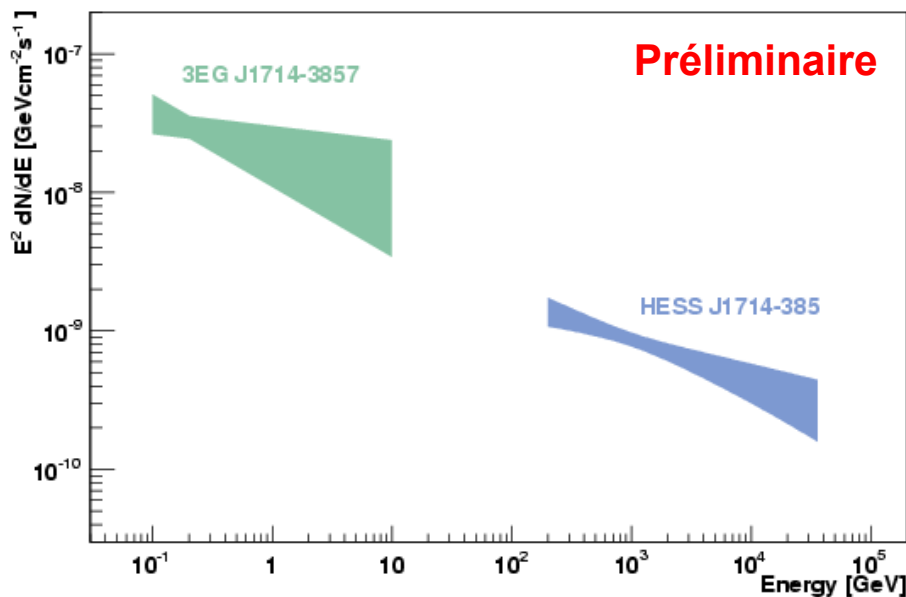
- Complexe de restes de supernova CTB 37
 - 3 restes observés en radio
- CTB 37A associé avec des nuages moléculaires
 - Plusieurs nuages (qq 10^3 masses solaires)
 - Masers OH

=> nuages moléculaires choqués
- Source EGRET



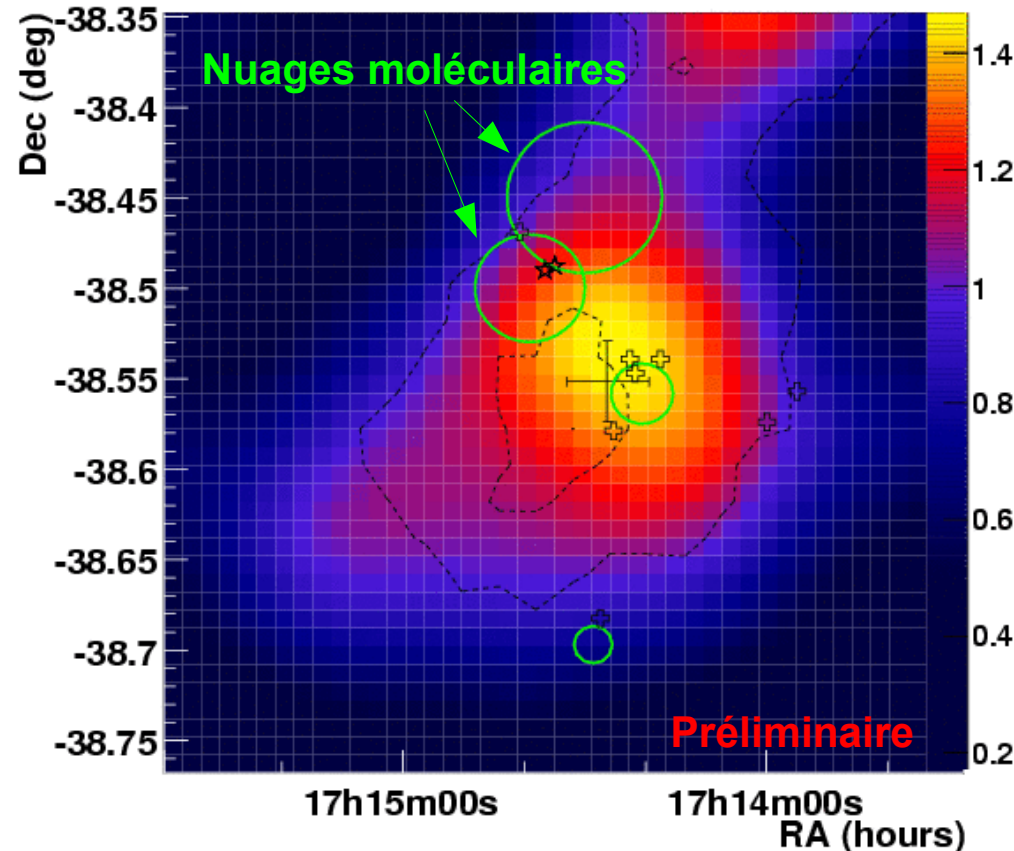
Deux sources HESS

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



CTB 37A & HESS J1714-385

- Correlation 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
 - [5 - 30] % des 10^{51} erg convertis en rayons cosmiques
 - => Scénario vraisemblable



Une nébuleuse de pulsar ?

- Observations en rayons X

- Emission thermique du reste de supernova

=> Nuages moléculaires chauffés par le choc

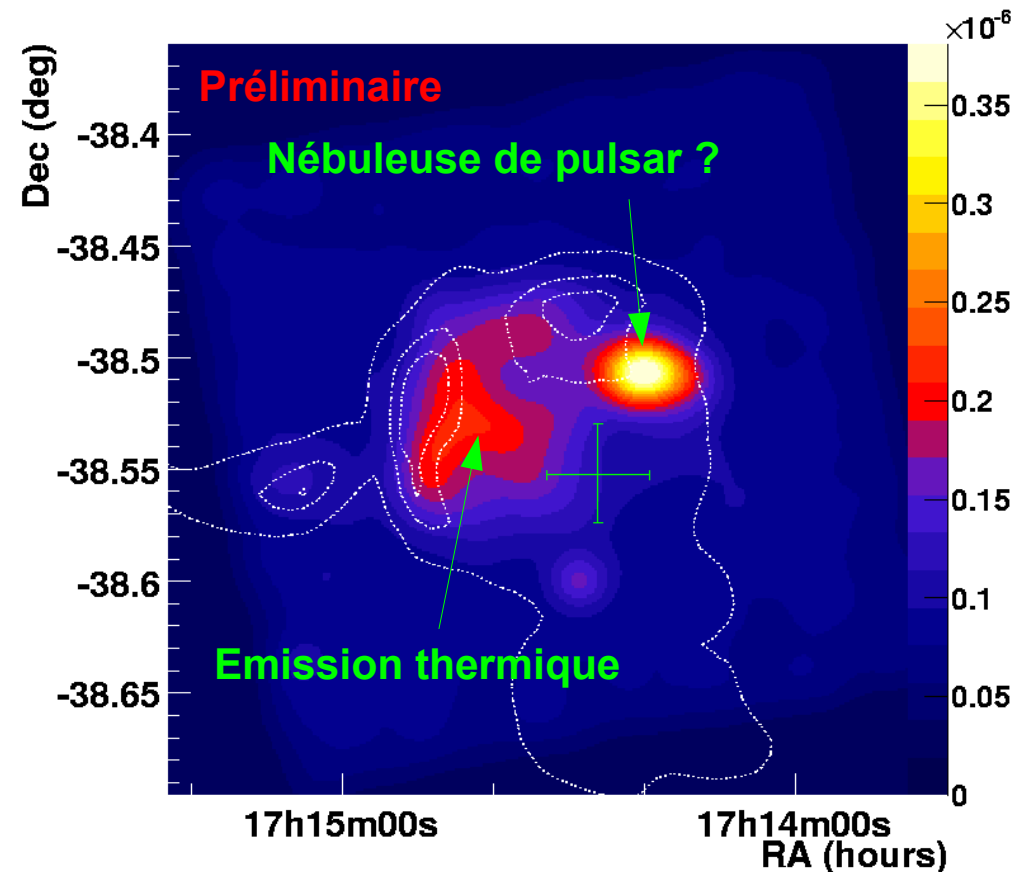
- Emission non thermique

=> 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 possible



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
 - Scénario hadronique dans chacun des cas est possible
 - Densité de rayons cosmiques en accord avec les modèles

=> Individuellement il est difficile de conclure

=> 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 E

=> Vers une réponse claire à l'origine des rayons cosmiques galactiques?