

Recherche de l'origine des rayons cosmiques galactiques avec HESS

Armand Fiasson
Post-doc
LAPP - Annecy le vieux

Sommaire

- **Introduction**
 - Les rayons cosmiques
 - L'astronomie gamma: quelle utilité pour leur étude
- **La technique de détection des rayons gamma et l'expérience HESS**
- **Observations de vestiges de supernova**
 - Vestiges de supernova isolés: limitations
- **Observations d'associations de vestiges de supernova et de nuages moléculaires détectés**
 - Utilité des nuages moléculaires
 - Associations détectées au TeV
- **Conclusion & perspectives**

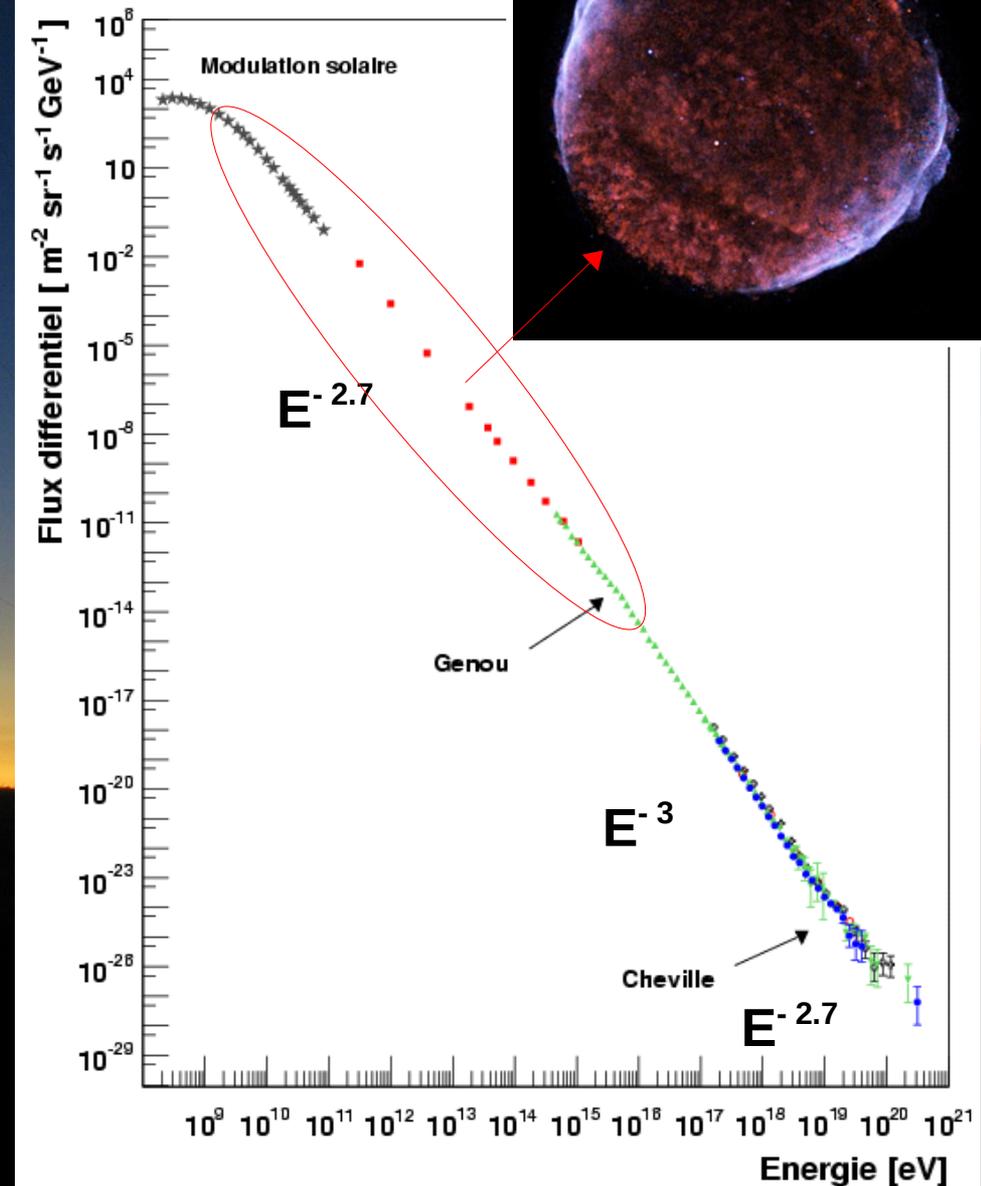
Les rayons cosmiques

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

- Spectre en énergie en loi de puissance
+ de 10 ordres grandeurs en énergie
=> inédit dans la nature

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

- $P_{RC} \approx \epsilon_{RC} \times V_{gal} / t_{échap} \approx 10^{41}$ erg/s
- Supernova $\approx 10^{42}$ erg/s
1 SN = 10^{51} erg / 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 stables
 - Produites par l'interaction des particules accélérées dans le milieu environnant
- **Les rayons gamma sont idéaux**
 - Taux de détection importants
 - => \sim photon / min / km² contre \sim neutrino / an / km³
 - Rayons γ 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⁻² an⁻¹
 - => Détection au sol

Hadrons

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

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

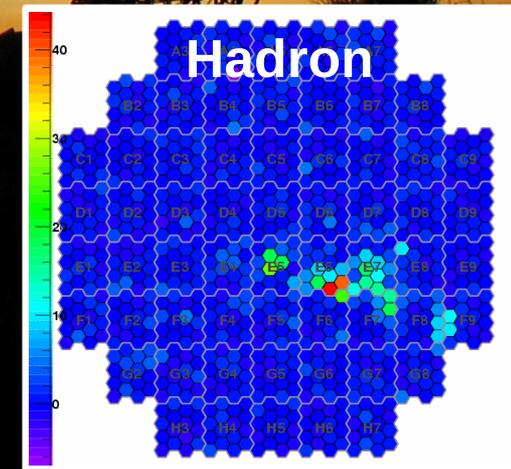
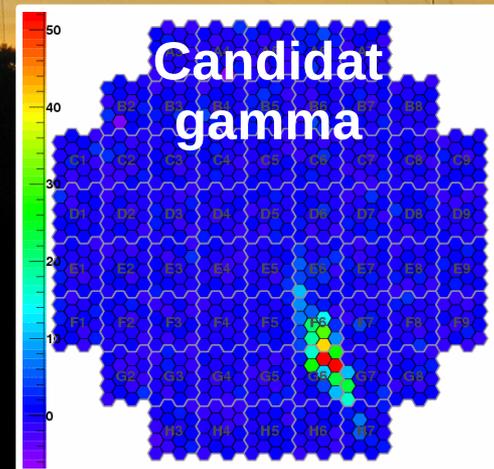
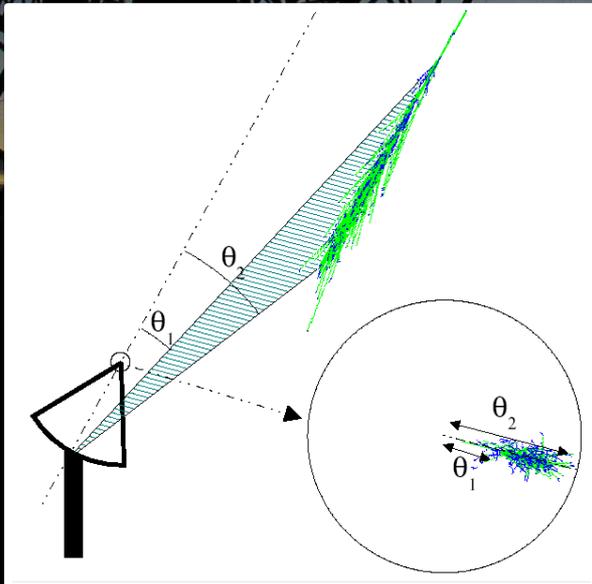
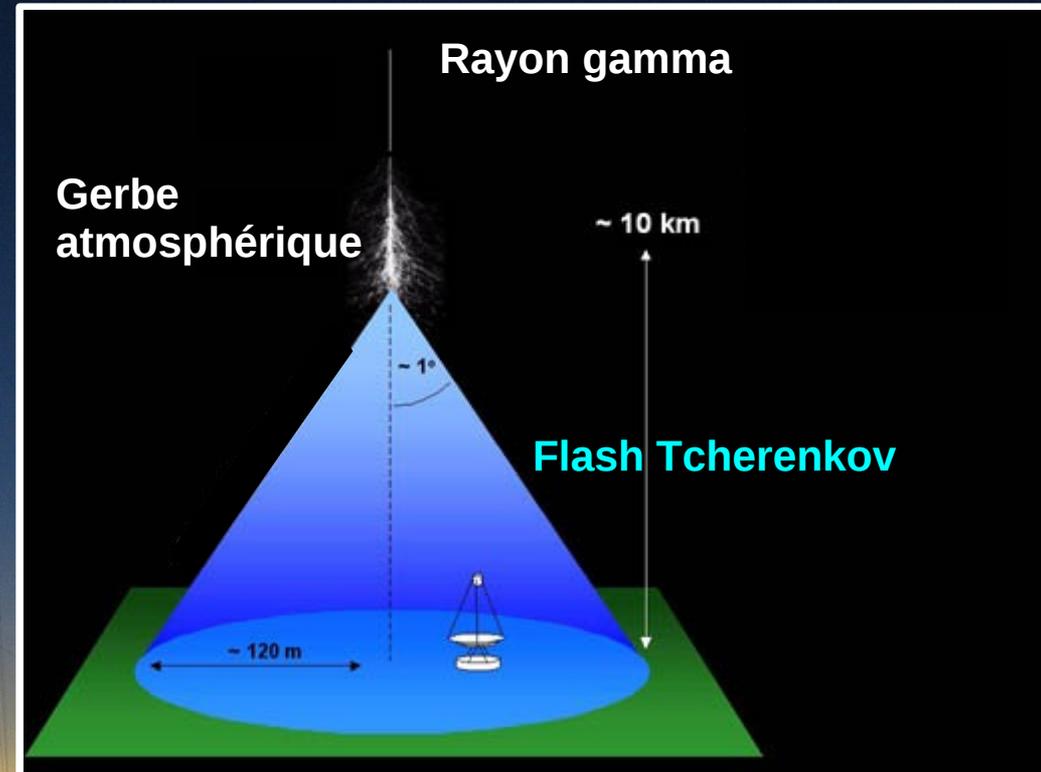
Electrons

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

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

L'imagerie Tcherenkov

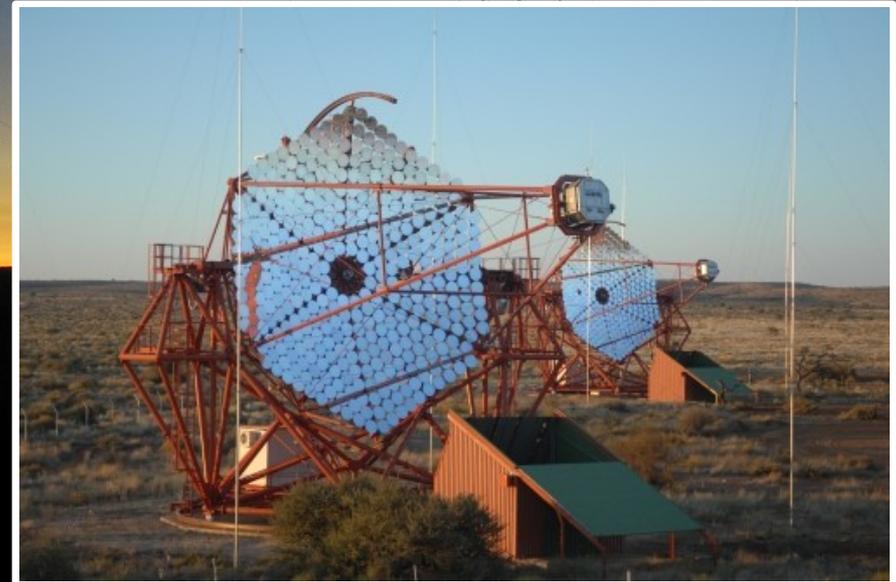
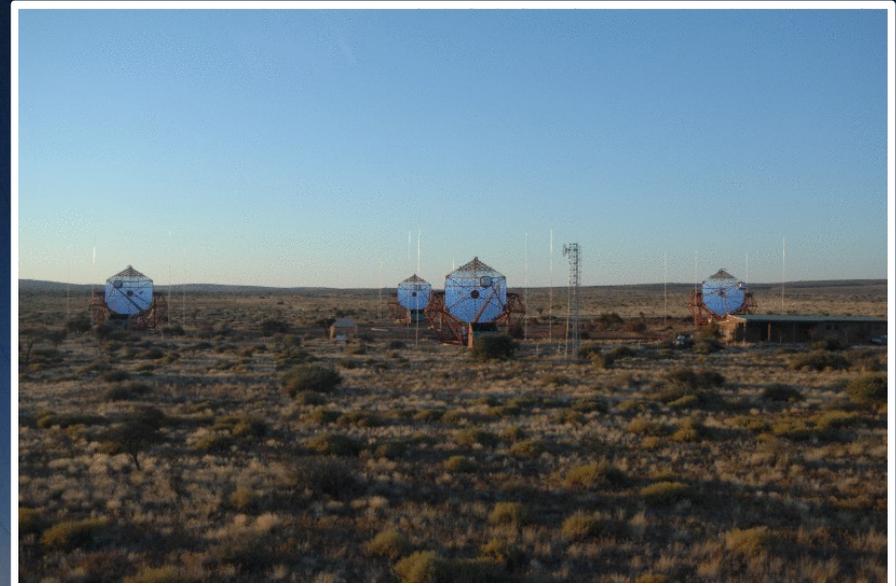
- L'atmosphère est opaque aux rayons gamma
 - Utilisée comme calorimètre
 - Flash Tcherenkov de la gerbe
- L'imagerie Tcherenkov:
 - Image de la gerbe en lumière Tcherenkov au plan focal d'un miroir



Le télescope HESS

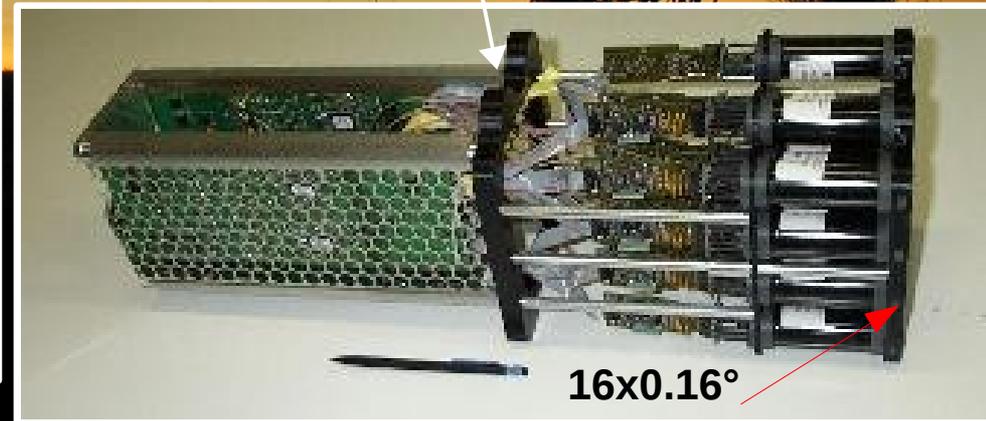
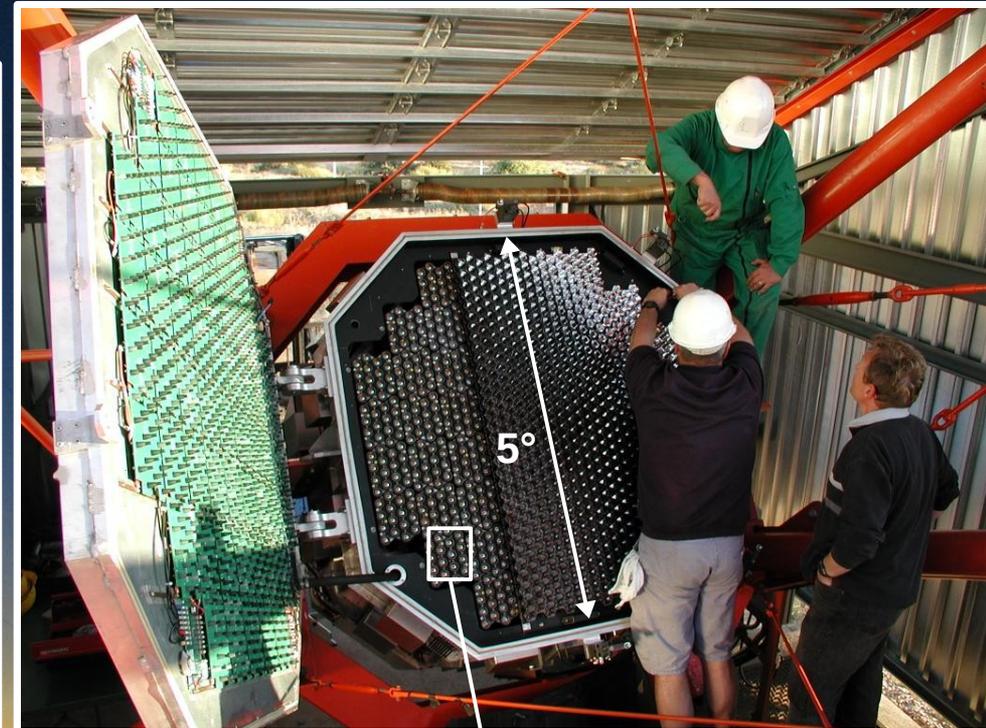
- **Situé en Namibie**
 - Ciel de l'hémisphère sud riche
 - Climat sec, 1800 m d'altitude, pollution lumineuse nulle
- **Synthèse des générations précédentes**
 - 4 imageurs en stéréo (cf HEGRA)
 - Miroir de 13 m de diamètre (cf Whipple)
 - Caméra rapide et pixels fins (cf CAT)
- **Réseau complet achevé en décembre 2003**
 - => 6 années de fonctionnement continu

Gamme en énergie: ~100 GeV → 100 TeV

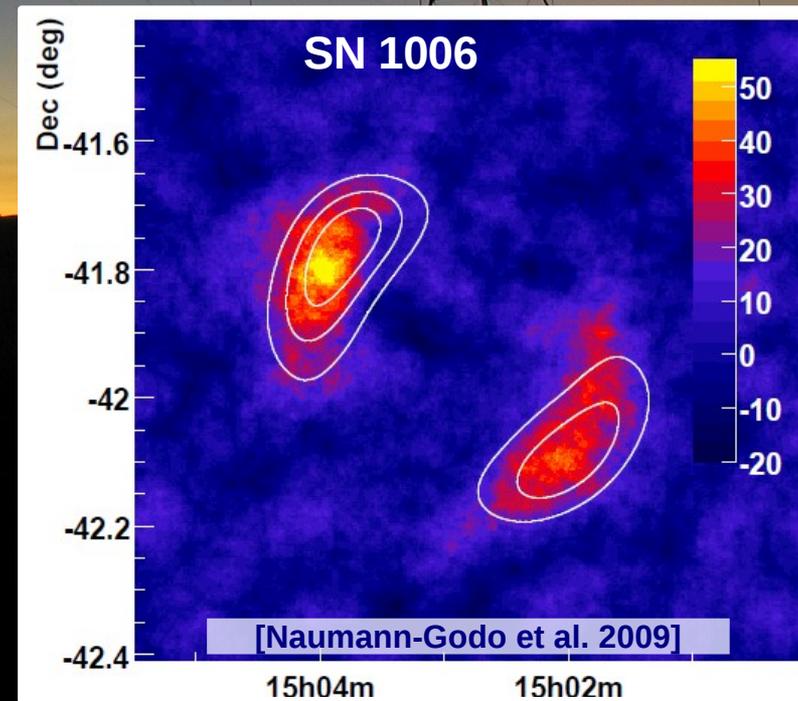
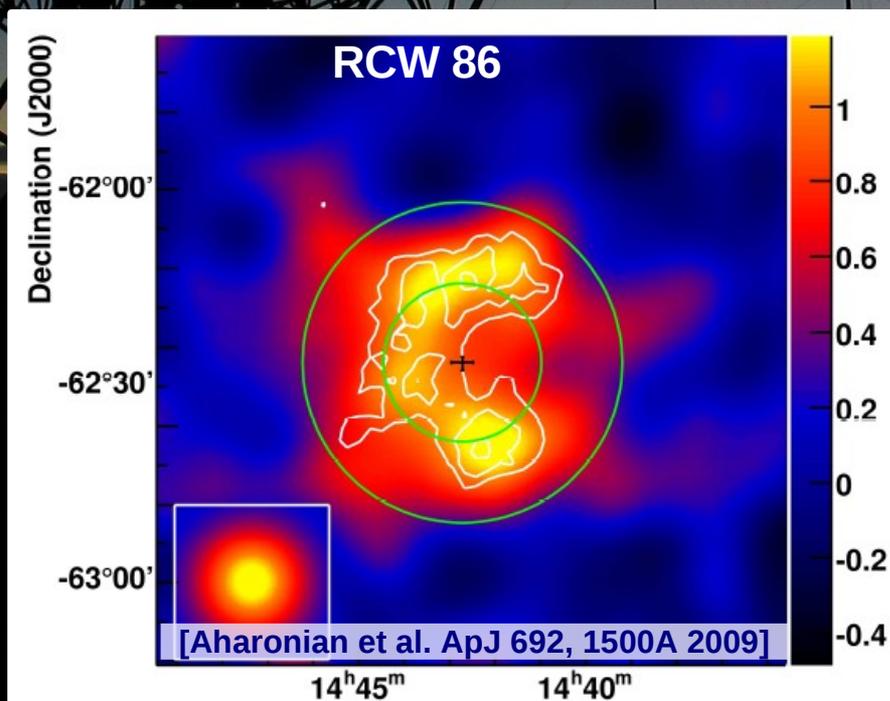
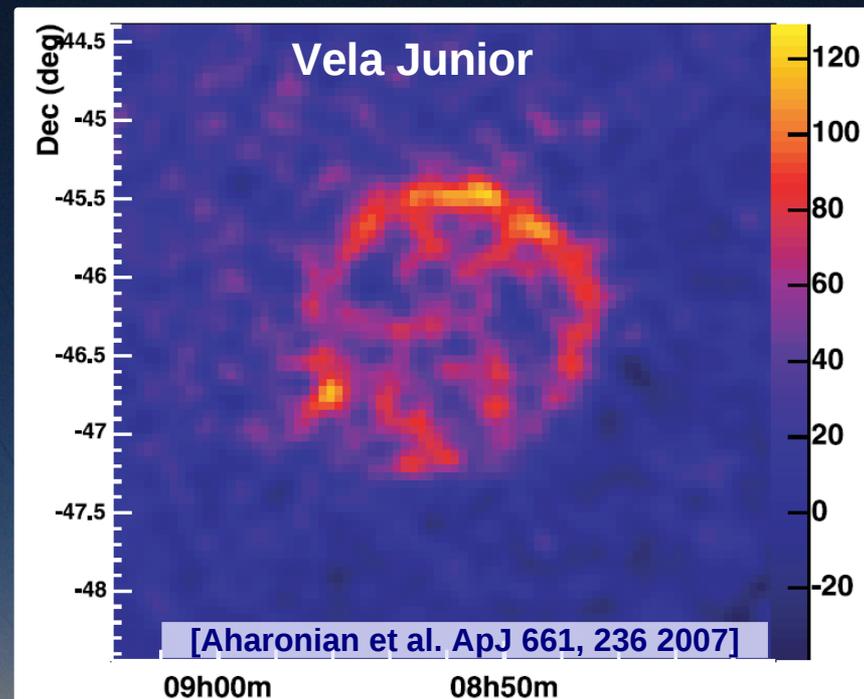
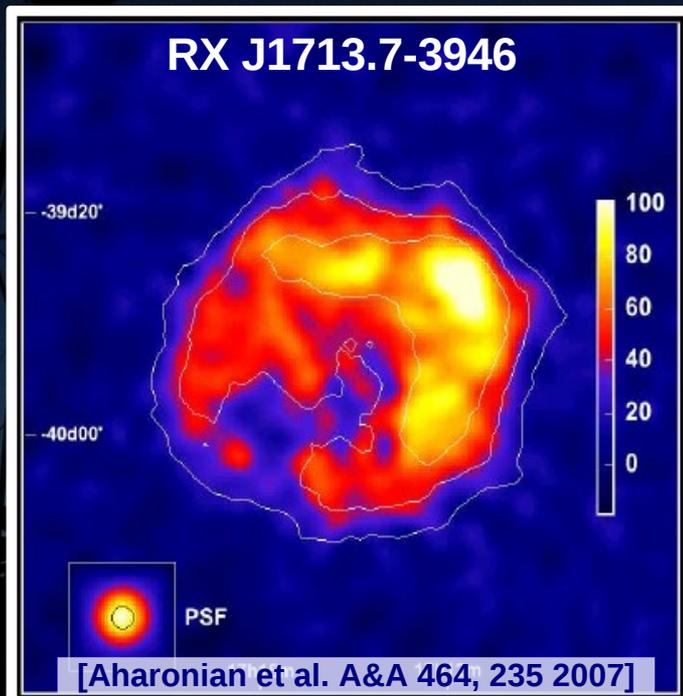


Les caméras de HESS

- **Caméras modulaires**
 - 960 pixels (0.16°) - 60 tiroirs de 16 PMs
 - Champ de vue total de 5°
 - Electronique rapide incluse
- **Traitement du signal issu des PMs**
 - Echantillonnage du signal à 1GHz
 - Mémoire circulaire de 128 capacités
 - Numérisation et addition de 16 échantillons dans les tiroirs
 - Déclenchement
 - Comparateur pour chacun des PMs
 - 3 pixels $>$ 5.3 pe par secteur
 - Stéréo par un déclenchement central

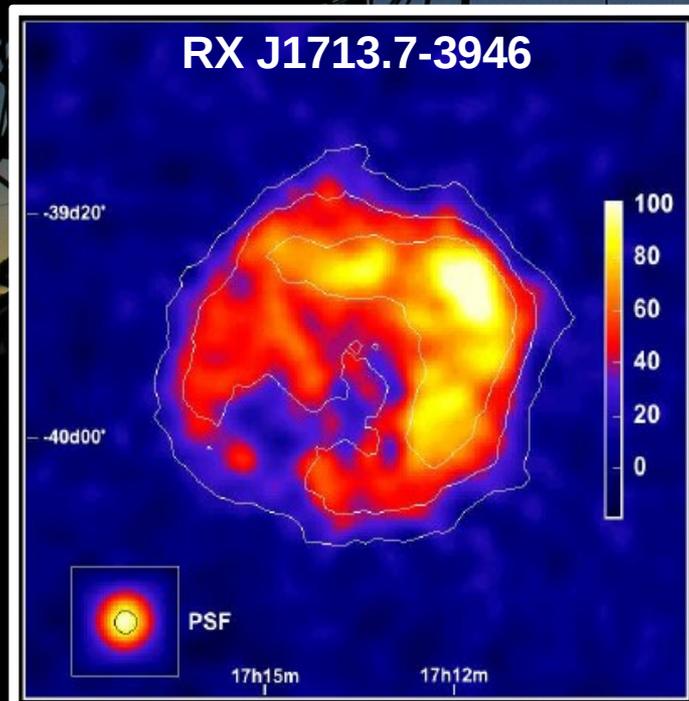


Détection de vestiges de SN au TeV

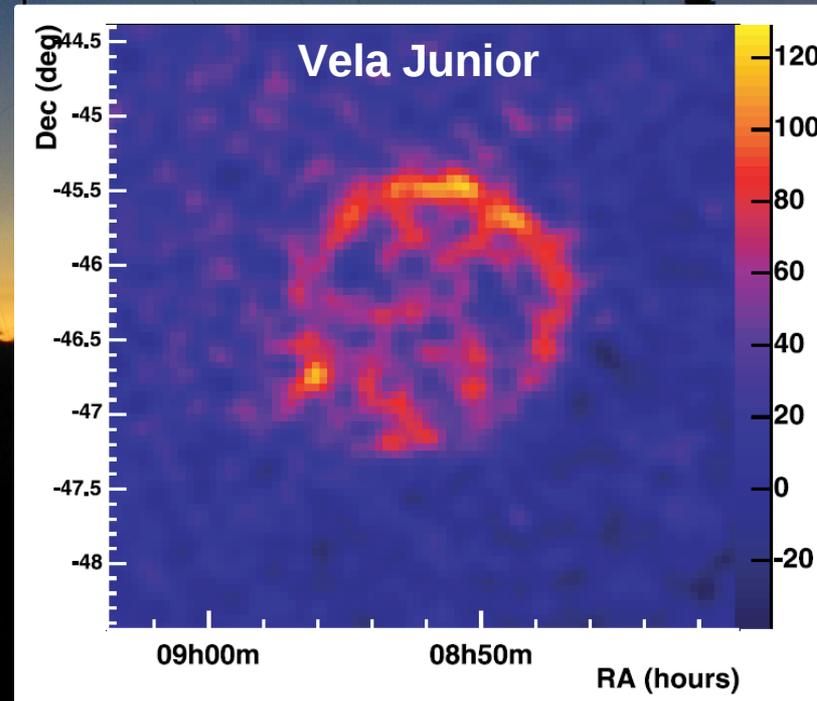


Vestiges de SN: accélérateurs confirmés

- **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}



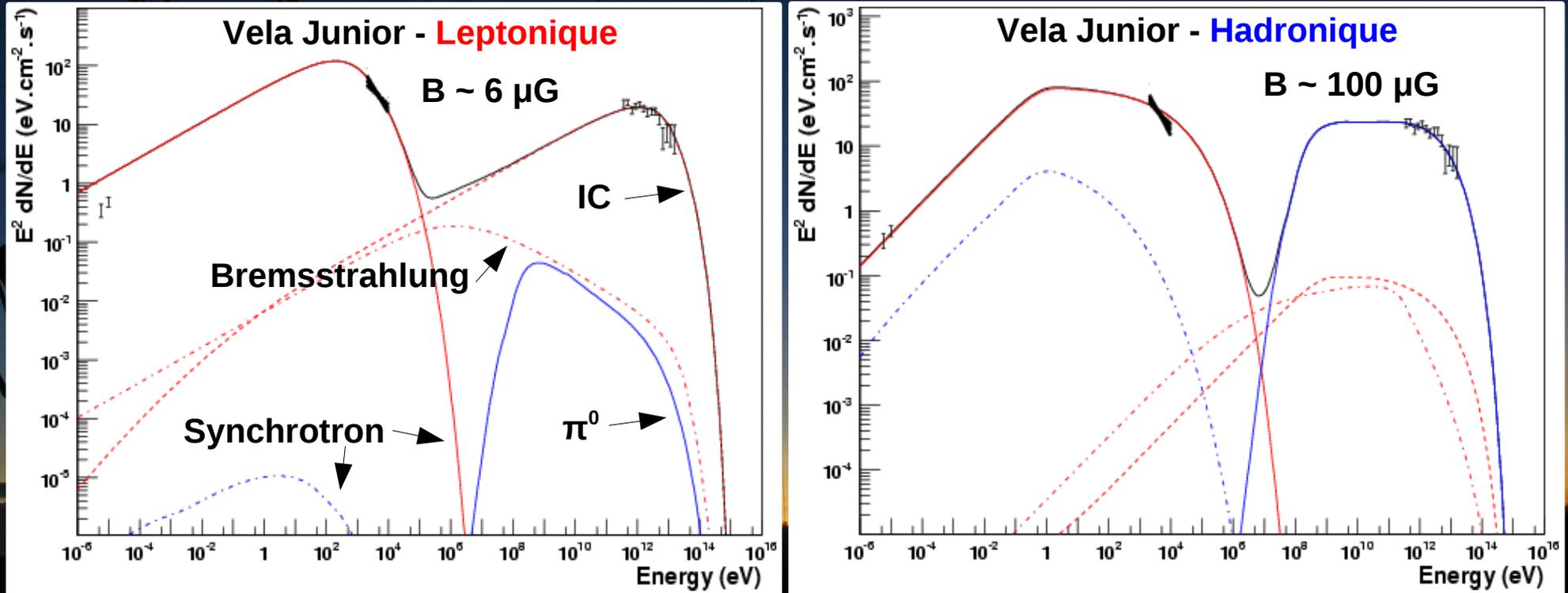
[Aharonian et al. A&A 464, 235 2007]



[Aharonian et al. ApJ 661, 236 2007]

Hadrons ou leptons accélérés?

- 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

- **Cadre observationnel où l'émission de pions neutres domine**
 - Milieu où seuls les protons subsistent
 - Milieu où la production de pions neutres est amplifiée par rapport au Compton Inverse

=> Accélérateurs associés à des concentrations de matière dense
- **Restes de supernova associés à des nuages moléculaires**
 - Relation étroite entre les deux espèces
 - Nuages = formation d'étoiles et de supernovæ
 - => Associations naturelles
 - Champ magnétique plus intense au sein des nuages
 - => Pertes radiatives drastiques pour les électrons

Nuages moléculaires



- **Une des composantes majeures de notre Galaxie:**

=> 1/2 du milieu interstellaire

- Dimension = qqes 10 pc

- Jusqu'à 10^6 masses solaires

=> Densité 10 cm^{-3} à 10^6 cm^{-3}

=> **Cibles de choix pour les rayons cosmiques**

- **Champ magnétique intense au sein des nuages**

- Effondrement gravitationnel => amplification

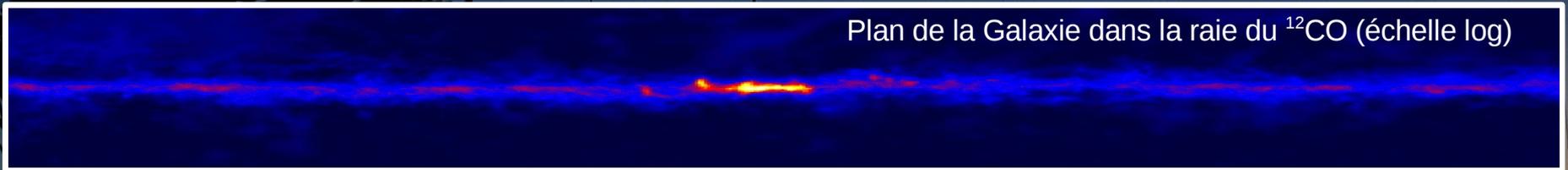
=> Jusqu'à qqes mG (contre qqes μG en moyenne)



Détection des nuages moléculaires

- **Constituant principal des nuages moléculaires: H_2**
 - Pas de moment dipolaire => pas de raie rotationnelle en radio
 - Utilisation du CO et CS
 - => quantité supposée proportionnelle à H_2
 - => raie rotationnelle en radio

Plan de la Galaxie dans la raie du ^{12}CO (échelle log)

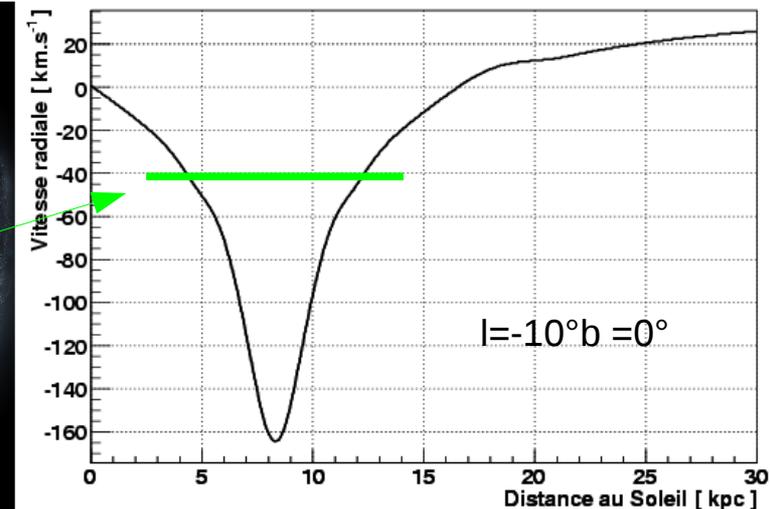
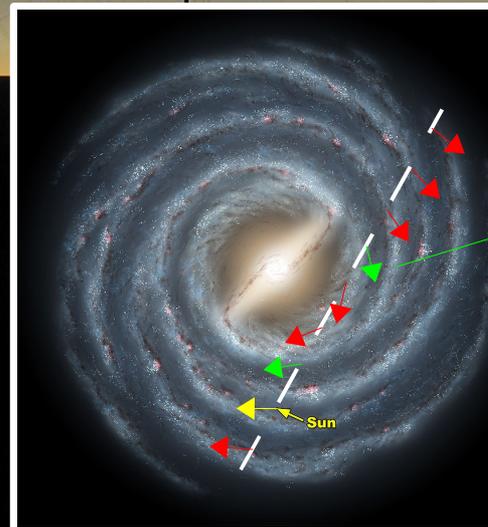


- **Flux de la raie**

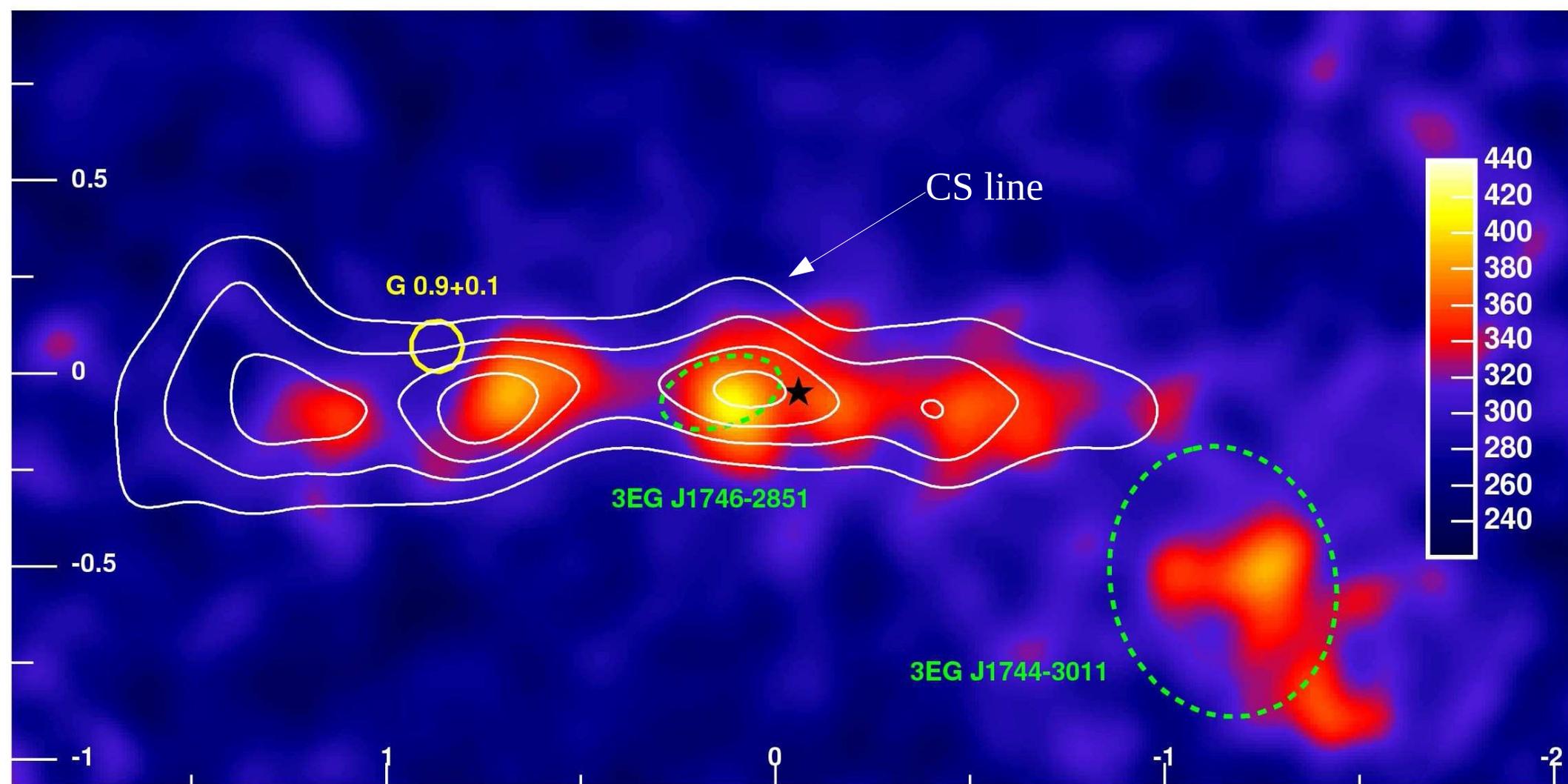
- proportionnel à la masse du nuage (à distance fixée)

- **Vitesse radiale**

- Effet Doppler
- => rotation à l'intérieur de la Galaxie
- Indication de distance

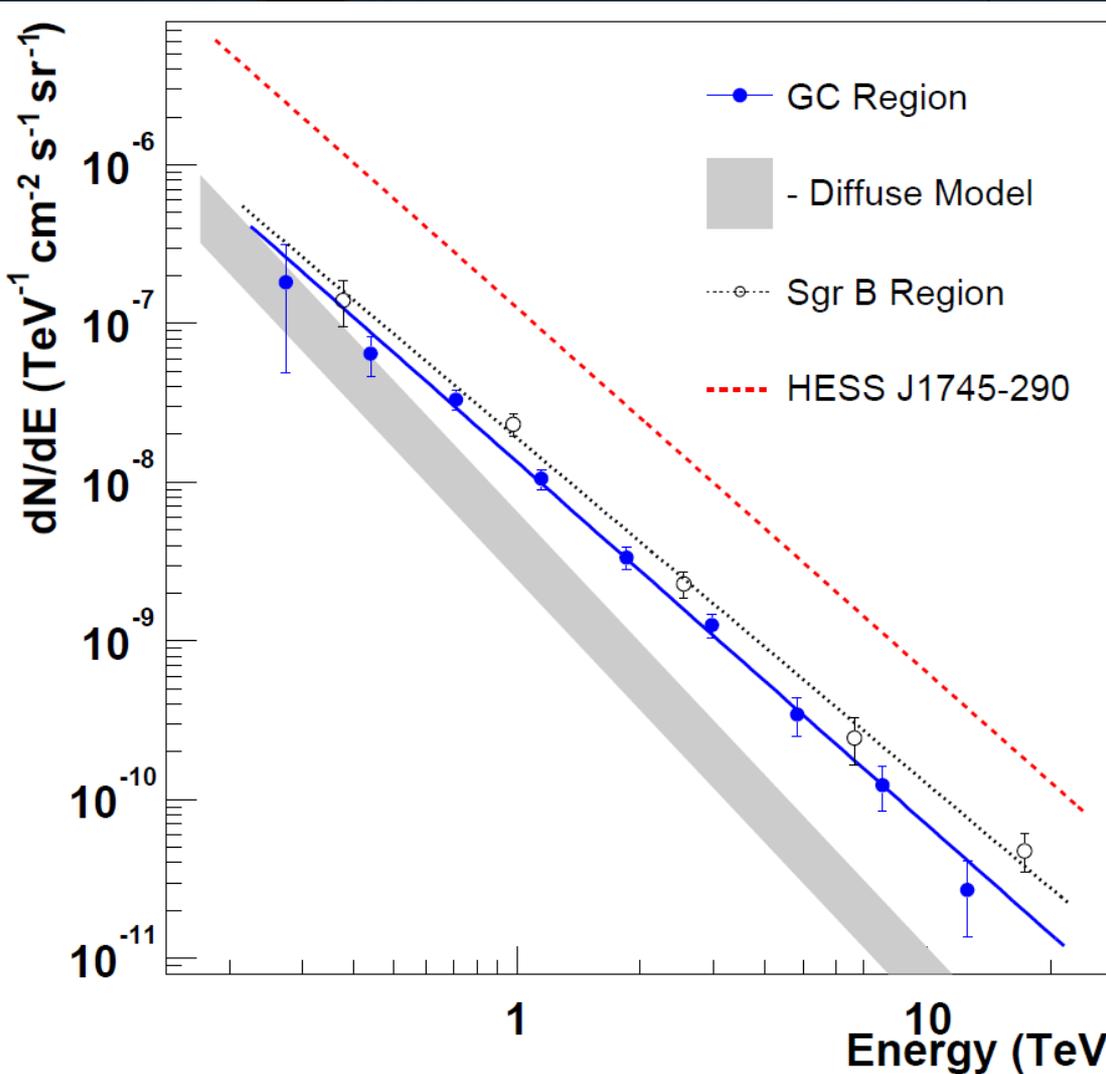


Centre galactique au TeV

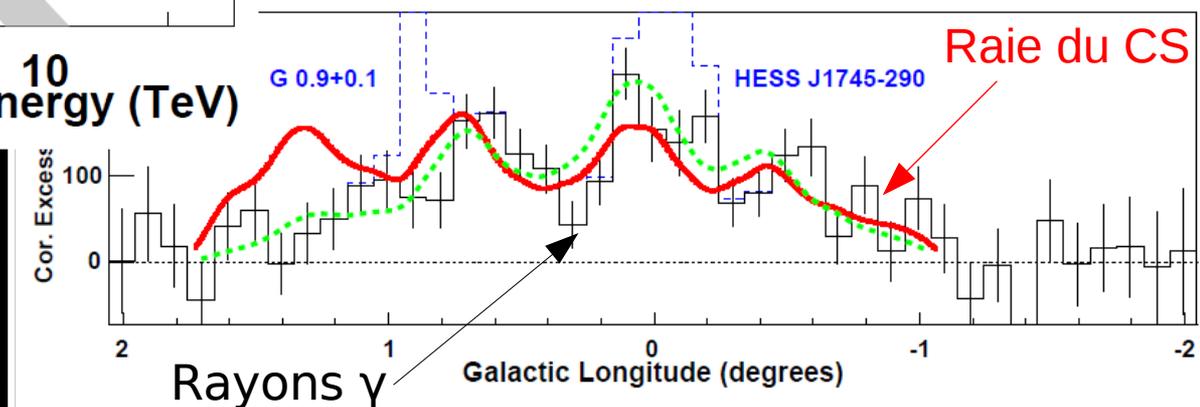


[Aharonian et al. Nature 439 695 2006]

Hadrons fraîchement accélérés



- Composante additionnelle au fond diffus gamma
=> Particules fraîchement accélérées
- Vraisemblablement des hadrons
=> 1 SNR pourrait expliquer le flux de rayons gamma



Associations accélérateur - 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 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**

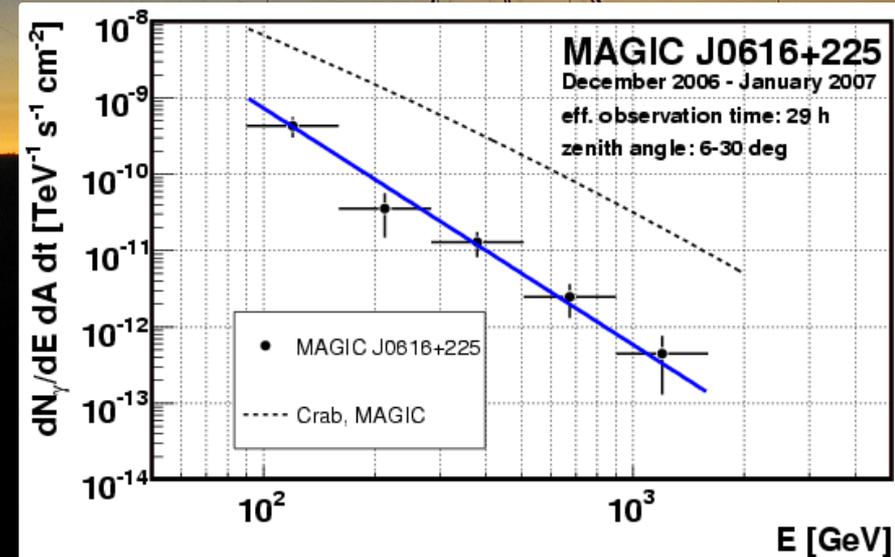
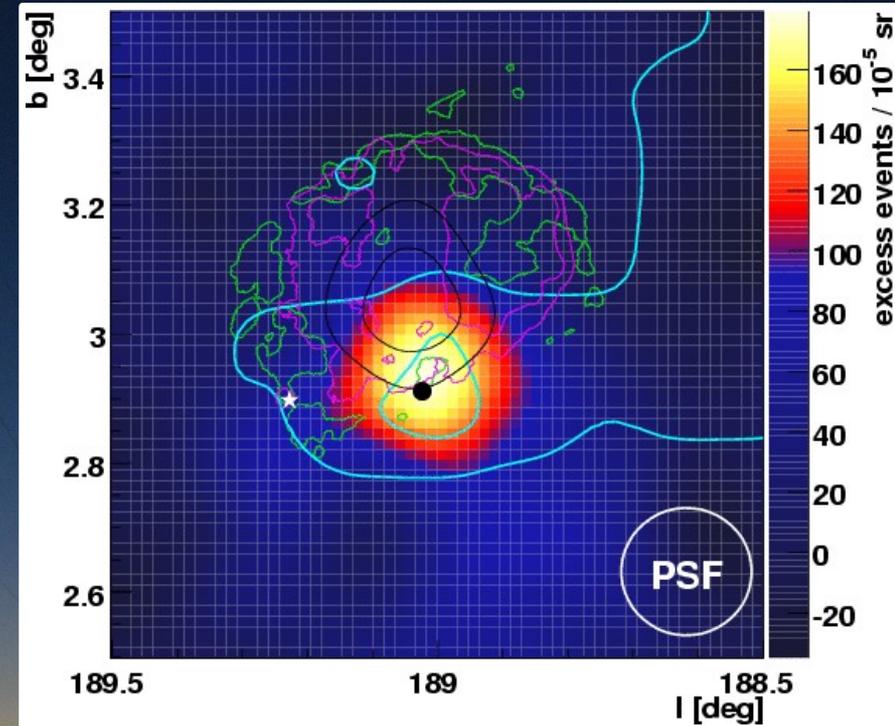
- Une des plus célèbres interactions nuage moléculaire – SNR
- Masers OH
- Corrélation avec la densité de matière

- **MAGIC & VERITAS**

- 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 la plus vraisemblable



[Albert et al. ApJ 664L 87A 2007]

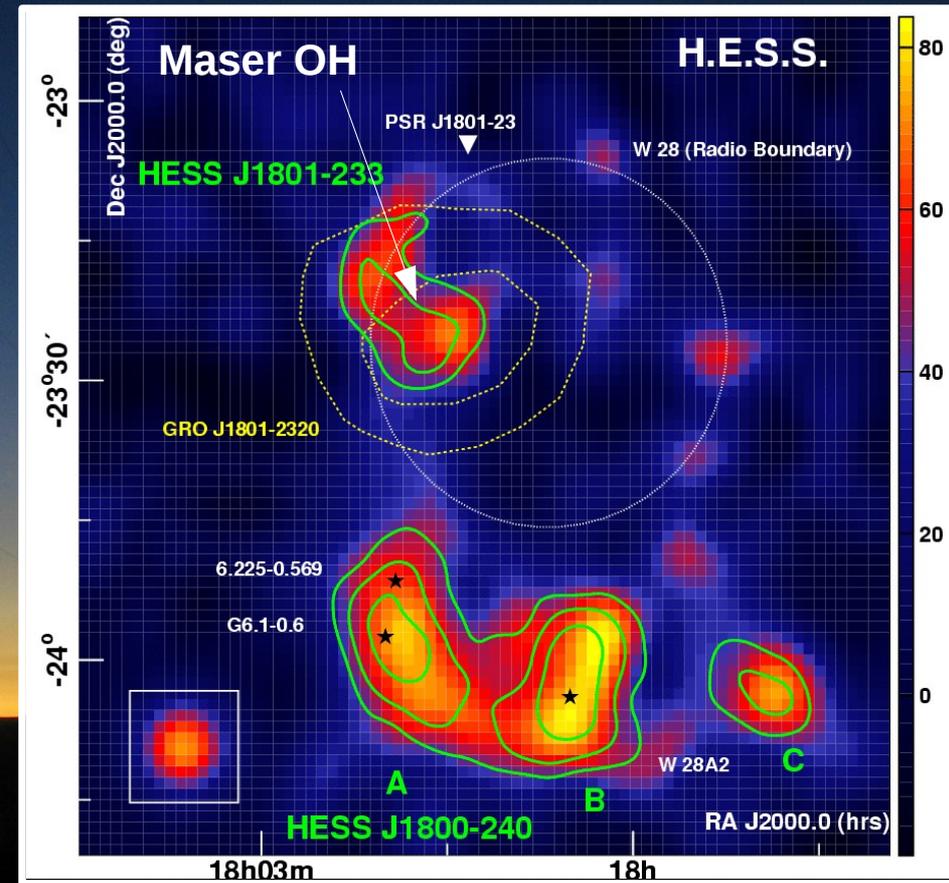
Région de W28

- **Région complexe**

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

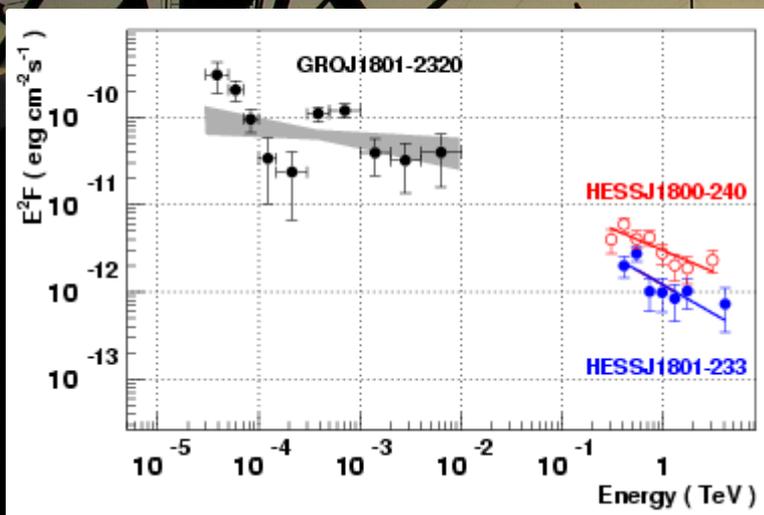
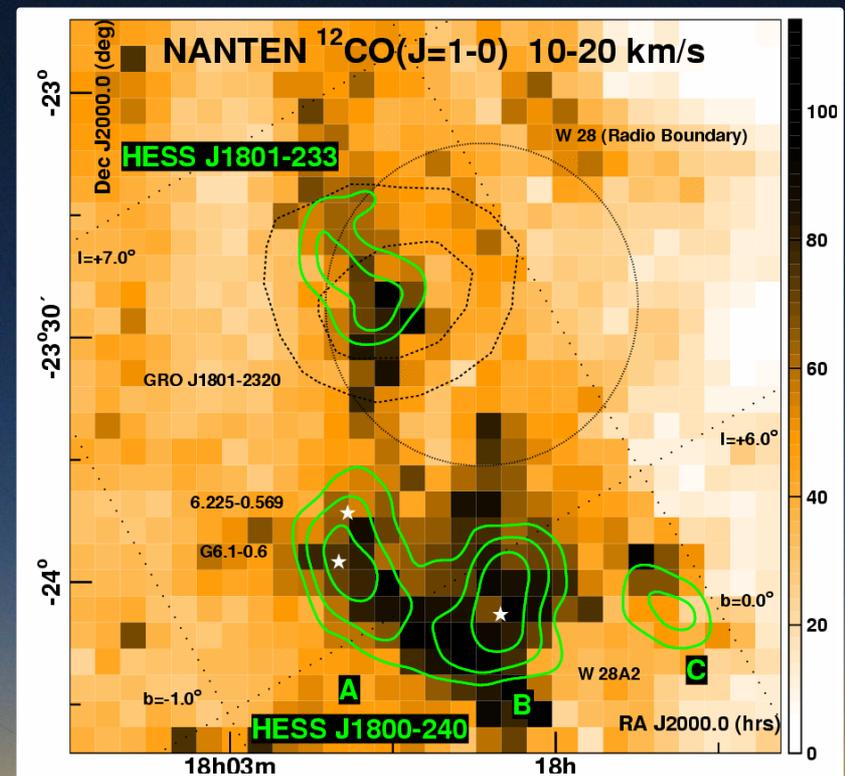
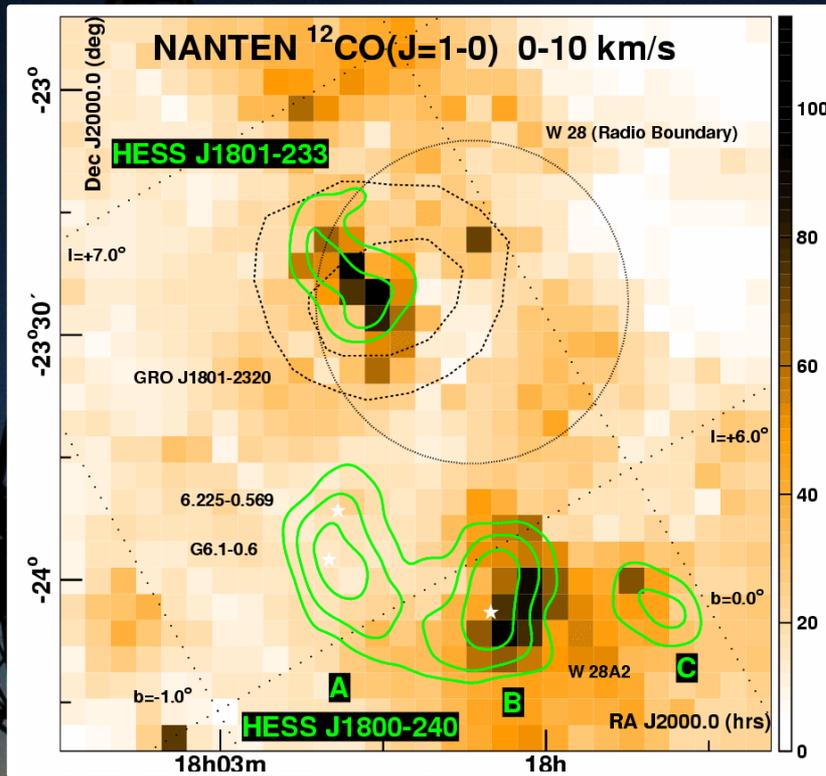
- **Emission gamma complexe**

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



[Aharonian et al. A&A 481 401A 2008]

Région de W28

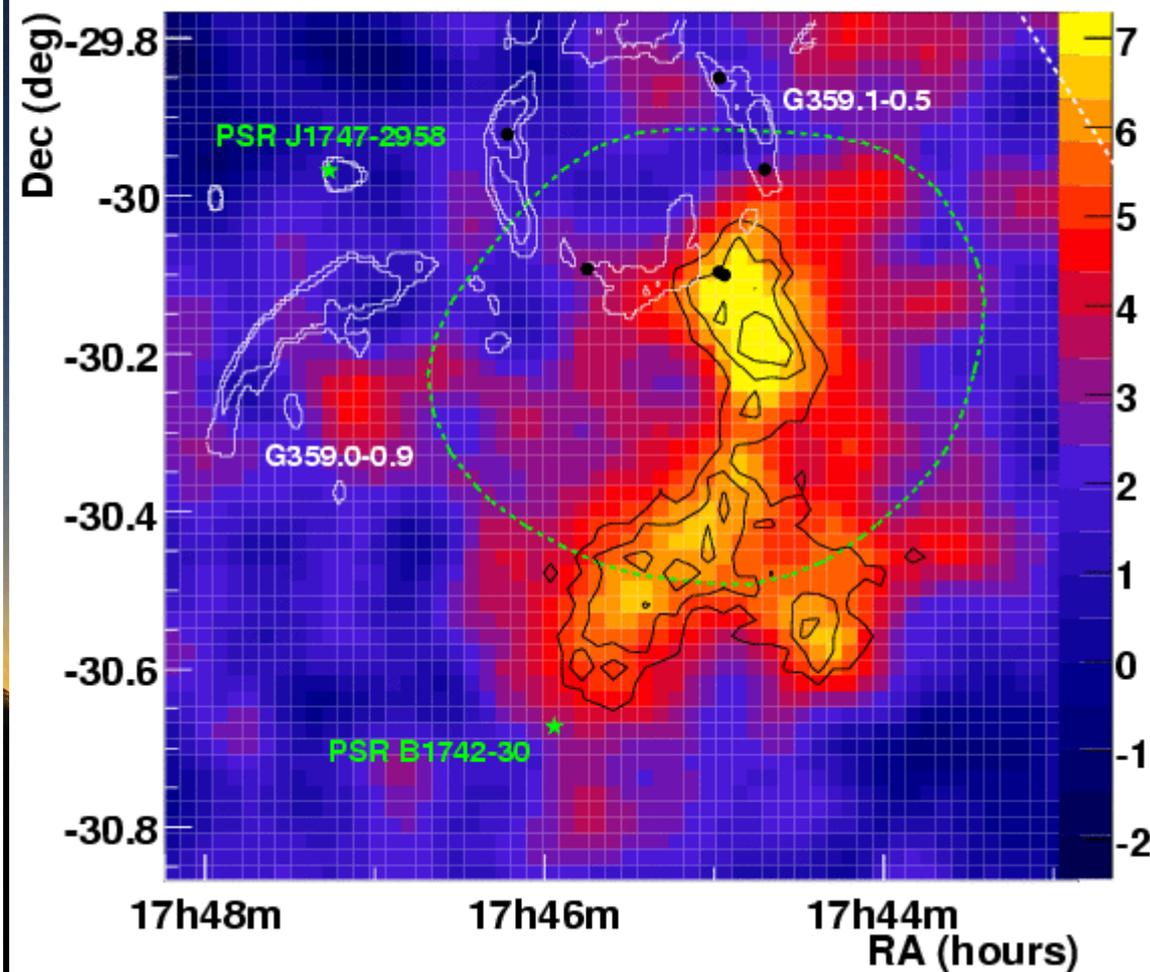


- Émission corrélée à la densité de matière
 - Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN
- => 10 à 30 fois la densité locale

=> **Scénario hadronique probable**

SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- SNR en interaction avec des nuages moléculaires
 - Coquille de matière autour du vestige G359.1-0.5
 - Plusieurs masers OH
- Source EGRET coïncidente à ce vestige
- Pas de rayons X
- Source HESS non identifiée
 - Morphologie complexe
 - Partie nord adjacente à G359.1-0.5



[Aharonian et al. A&A 483 509A 2008]

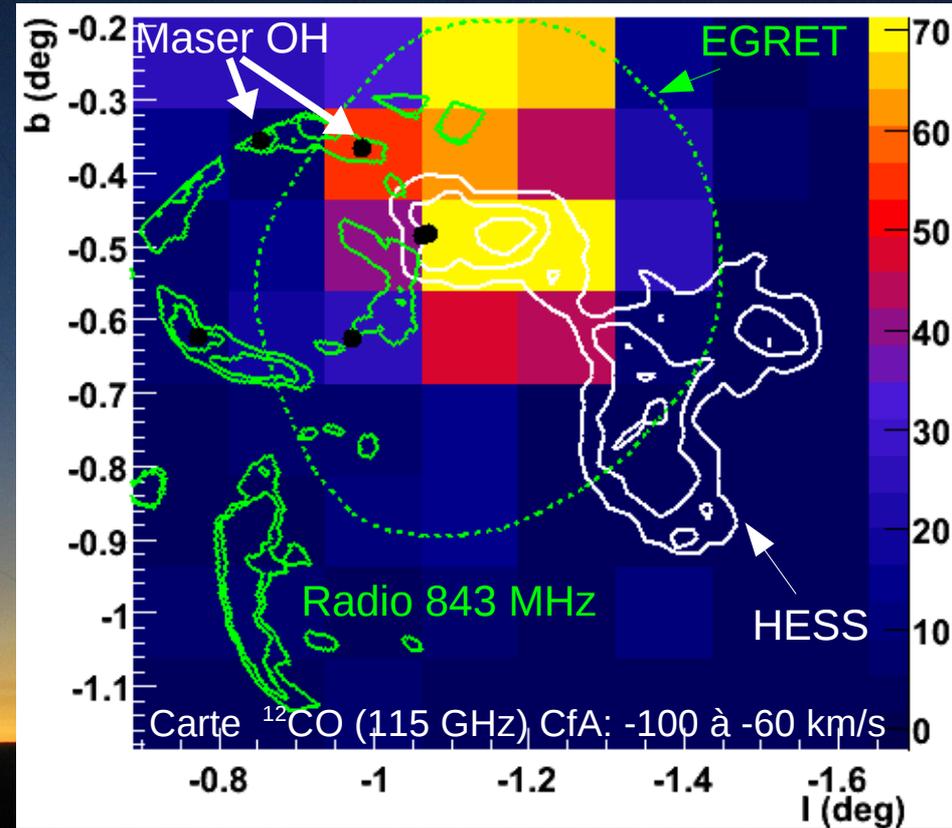
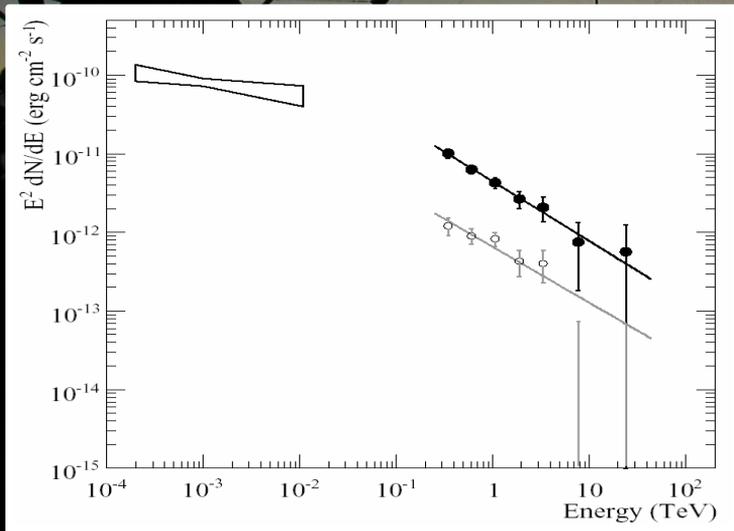
SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- Nuages moléculaires choqués

- Nuage coïncident avec l'émission au TeV
- 5×10^4 masses solaires

- Point de vue énergétique

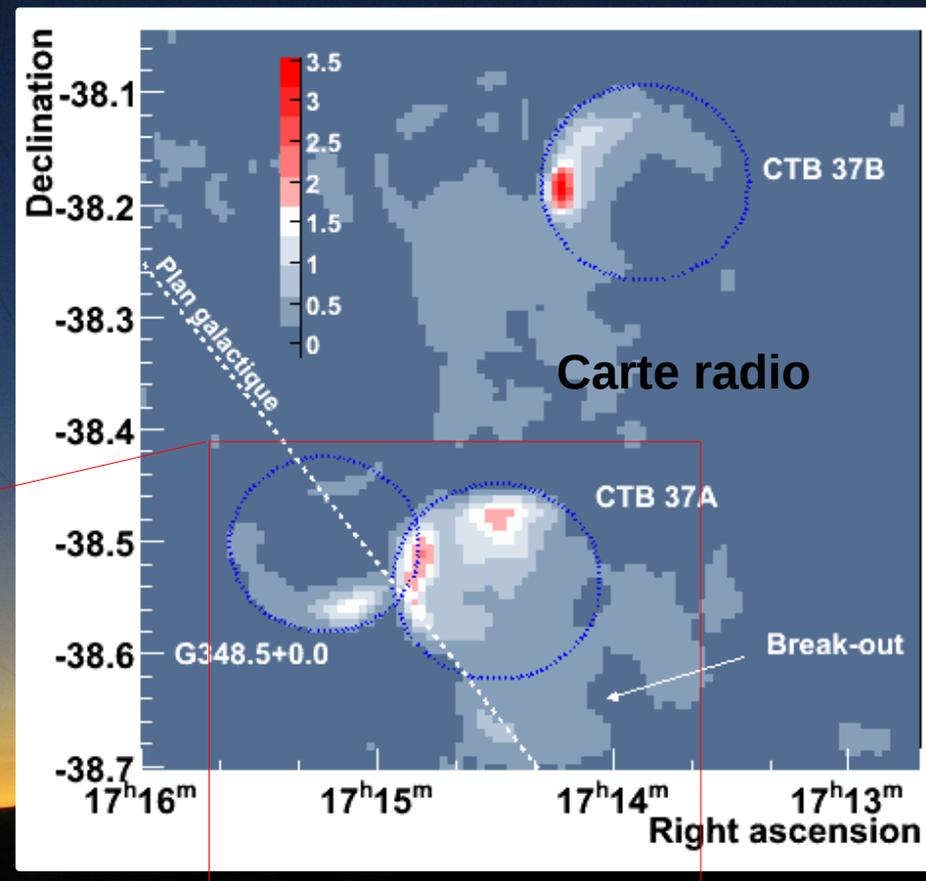
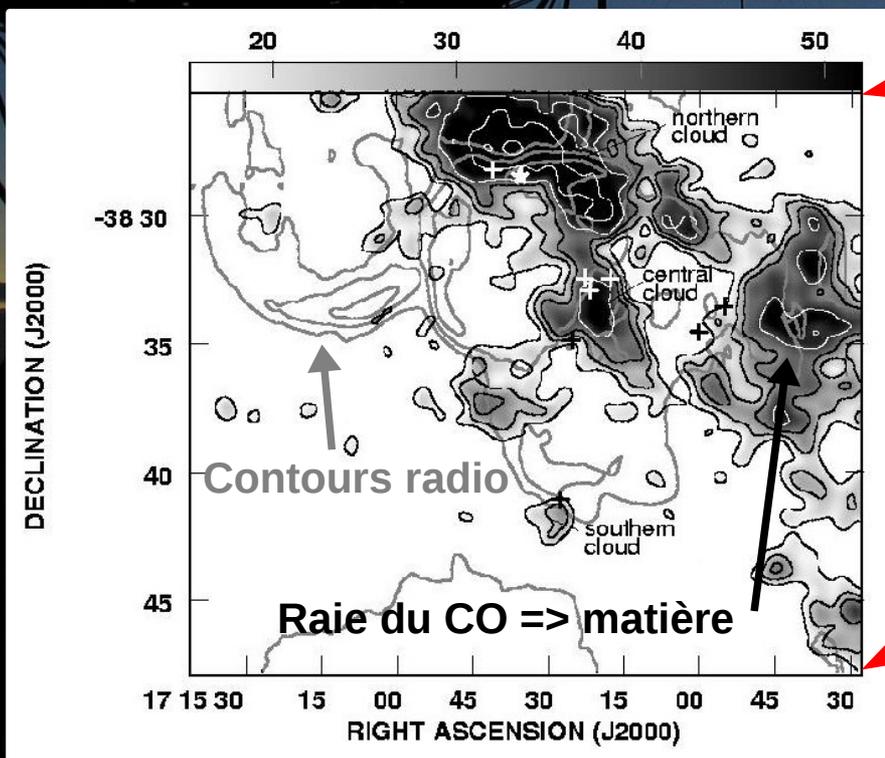
- $\sim 30\%$ de l'énergie typique d'explosion nécessaire (10^{51} erg)



=> Interprétation hadronique très vraisemblable

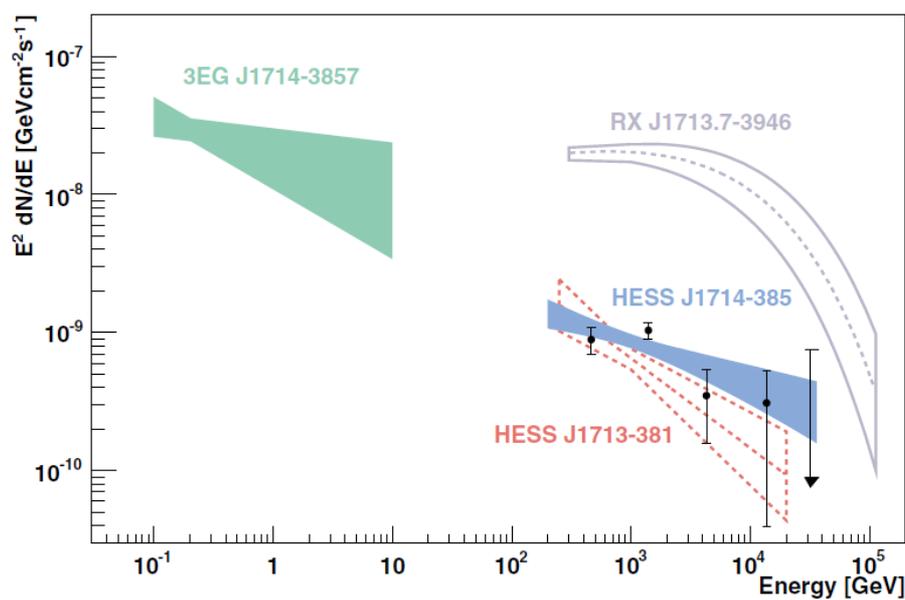
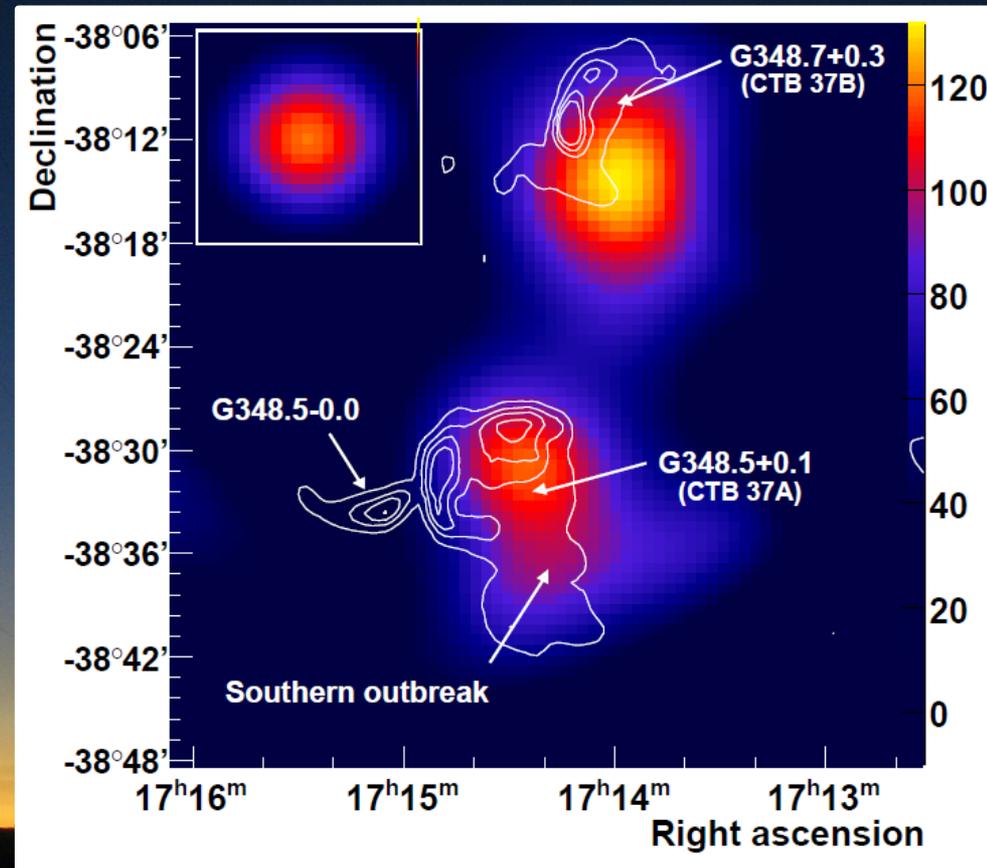
Complexe de SNR CTB 37

- Complexe de restes de supernova CTB 37
 - 3 restes observés en radio
- CTB 37A
 - Nuages choqués ($>10^3$ masses solaires)
=> Masers OH

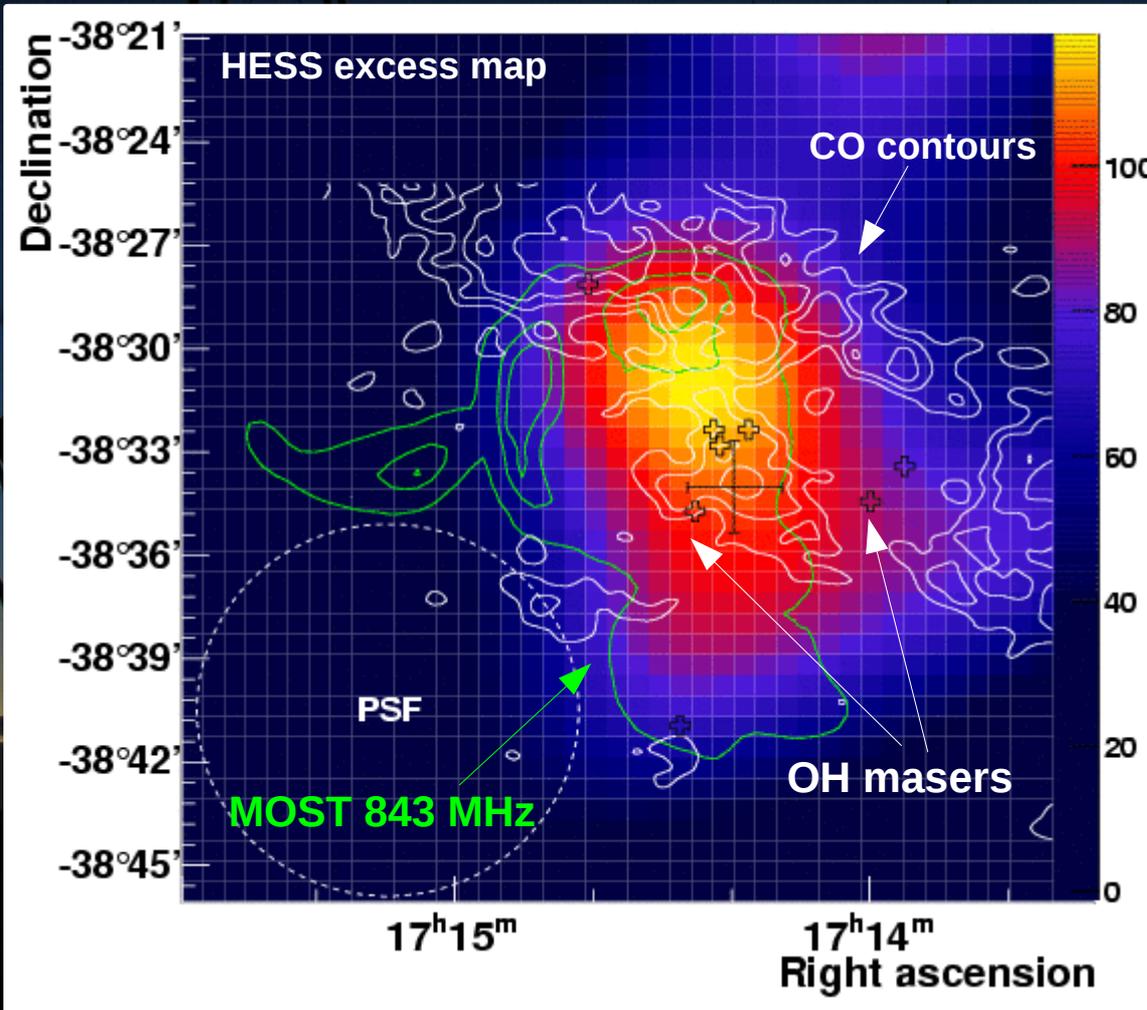


Deux sources HESS

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



CTB 37A: origine hadronique?



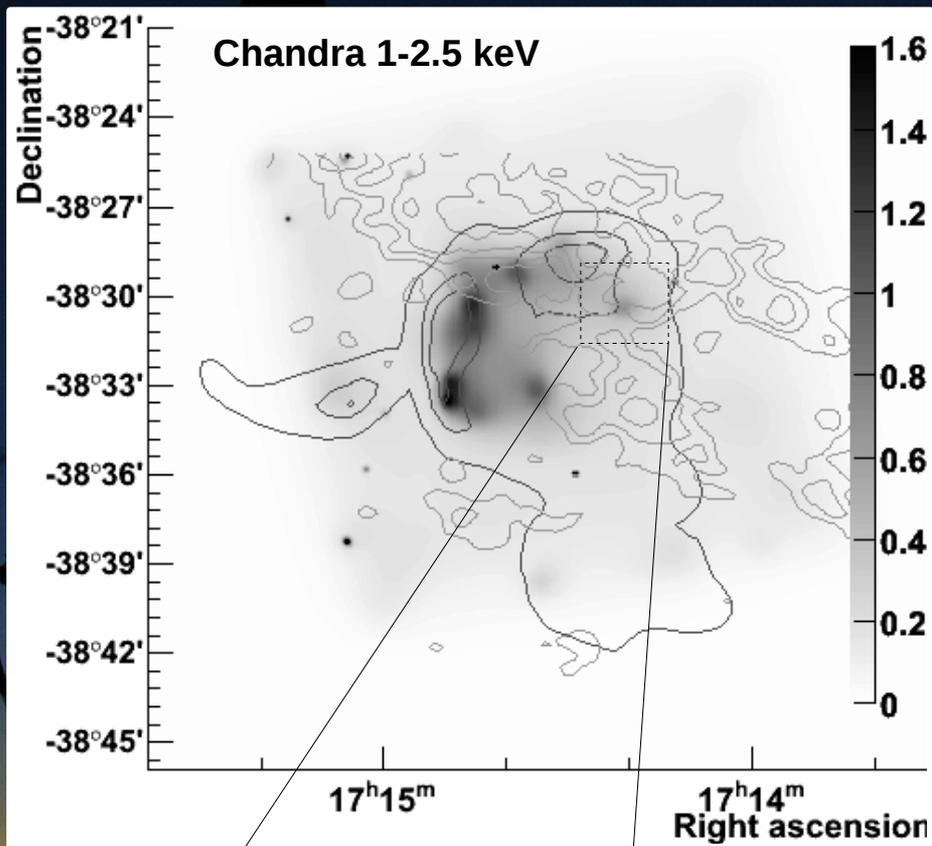
[Aharonian et al. A&A, 490, 685A 2008]

=> Interprétation hadronique possible

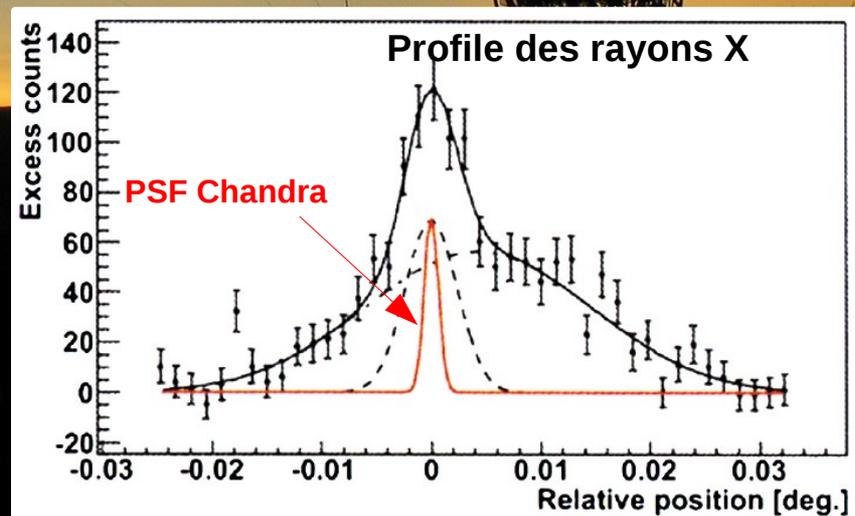
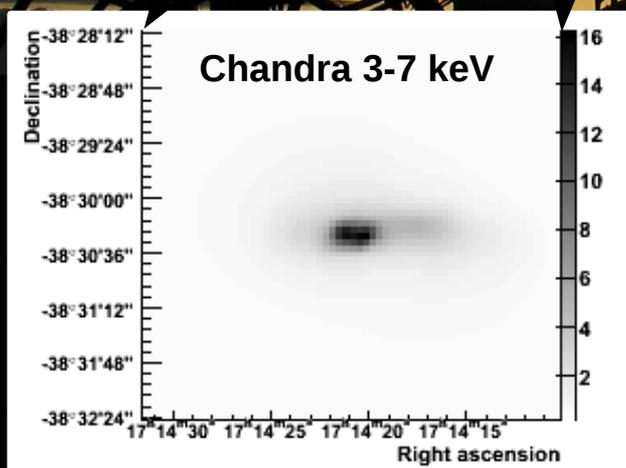
- **Vestige en interaction avec des nuages**
 - Masers OH
 - Nuages denses visibles en CO

=> Même distances que les masers
- **Scénario hadronique?**
 - => [4% - 30%] de conversion de l'énergie d'explosion dans les RC

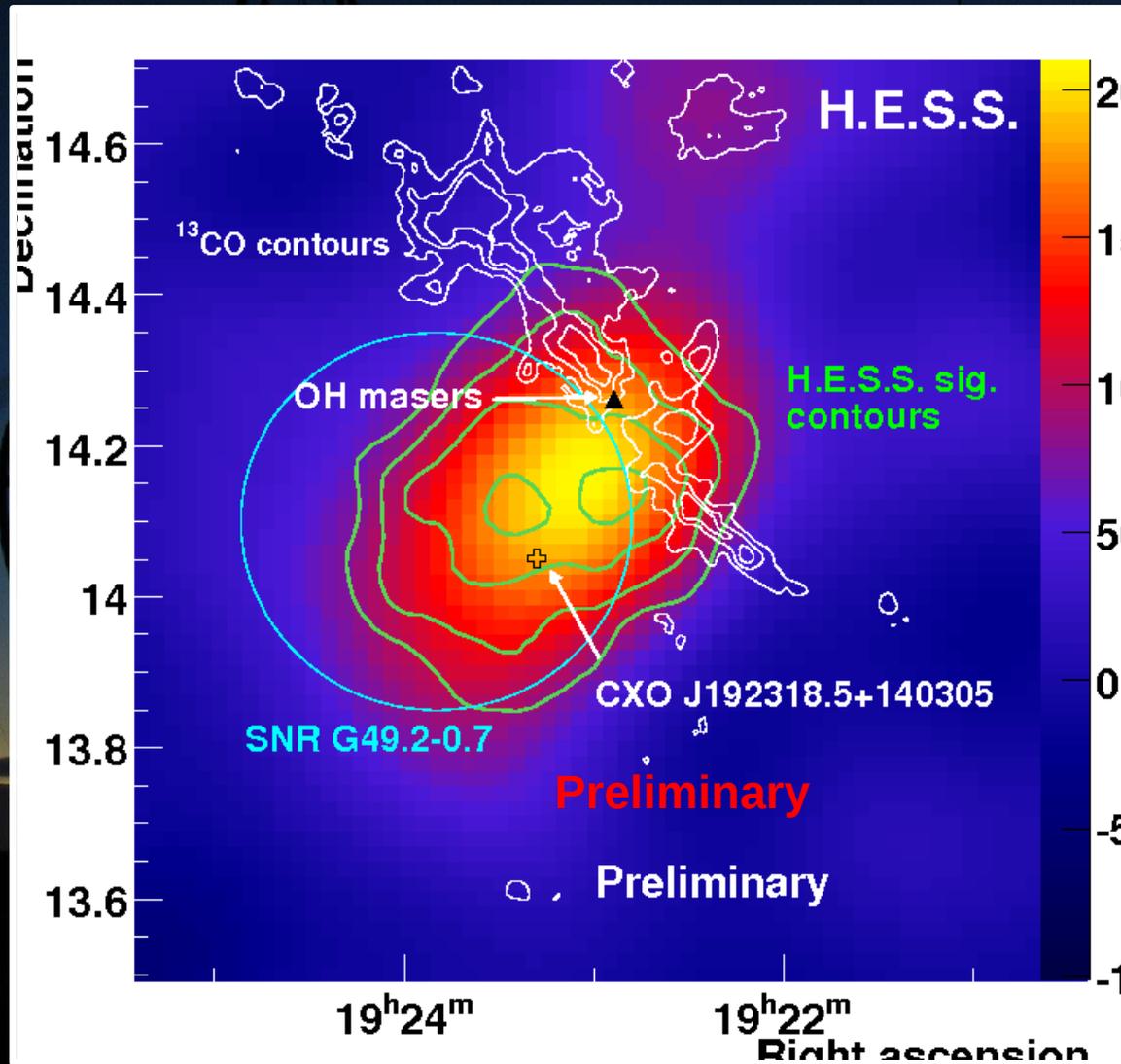
Ou leptonique?



- Observations en rayons X par Chandra et XMM-Newton
 - => Région complexe
- Emission thermique provenant du vestige
- Candidat nébuleuse de pulsar
 - Pourrait appartenir à CTB 37A
 - Luminosité en rayons X implique une perte d'énergie de rotation de 10^{37} erg/s
 - => ~0.1% de conversion en rayons γ



W51C & HESS J1923+141

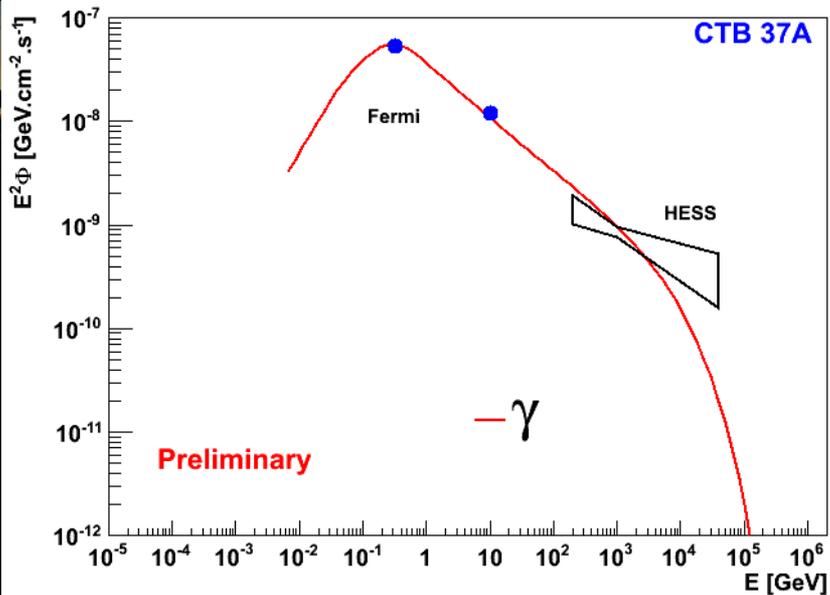
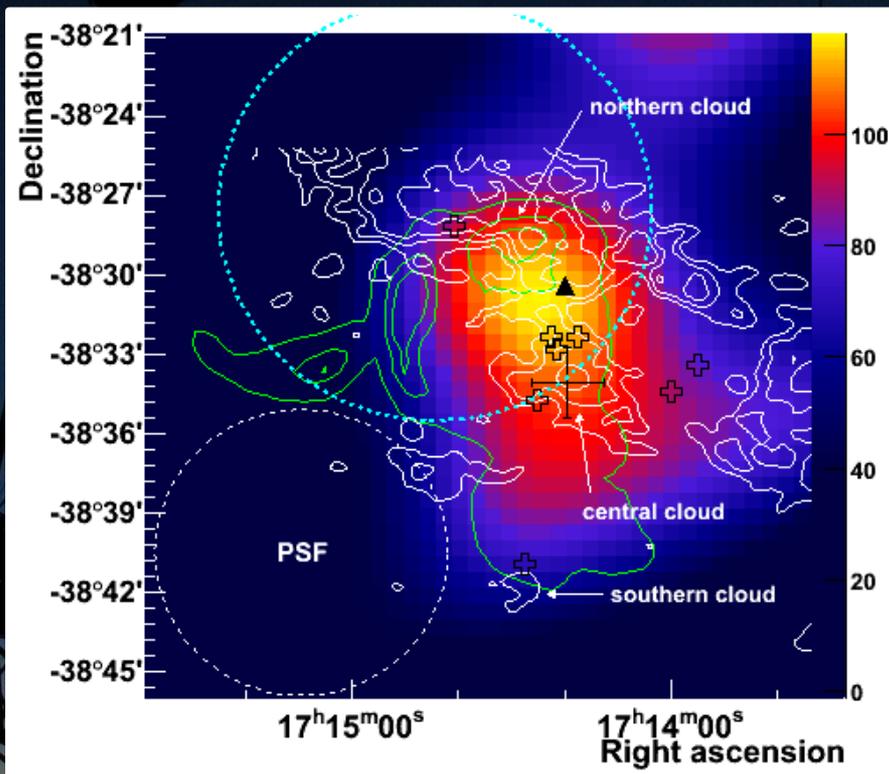


[Fiasson et al. 2009]

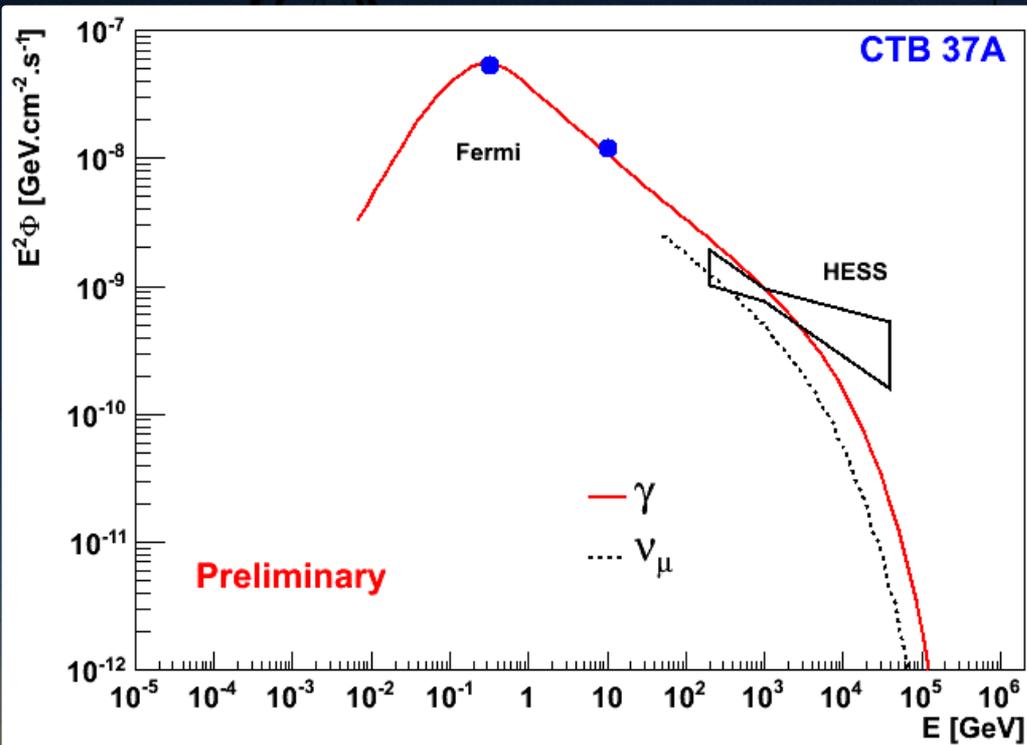
[Aharonian et al., en prep.]

- Région de W51 observée entre 2007 et 2009
=> Nouvelle source de rayons gamma
- Source étendue comparée à la PSF de HESS
- Flux intégré >1 TeV équivalent à 3% du flux provenant de la Nébuleuse du Crabe
- Plusieurs associations possibles
 - Nébuleuse de pulsar
 - Nuages moléculaires choqués
=> deux origines possibles

Associations GeV-TeV



Sources de neutrinos?



- Origine hadronique probable de l'émission gamma
=> Émission associée de neutrinos (désintégration de pions chargés)
- Nombre de détection >1 TeV faible pour KM3NeT pour ces deux exemples:
 - CTB37A: ~0.06 neutrino/an
 - W51C: ~0.1 neutrino/an

Conclusion - perspectives

- **L'observation de vestiges de supernova par HESS confirme qu'ils sont des accélérateurs efficaces de particules**
 - Détection de plusieurs vestiges de supernova jusqu'à des énergies > 10 TeV
 - Mais la nature leptonique/hadronique des particules accélérées reste inconnues
- **Les vestiges de supernova associés à des nuages moléculaires sont très prometteurs**
 - Observation d'une émission au TeV en direction de plusieurs d'entre eux
 - Détection d'une contrepartie au GeV par Fermi pour la plupart des cas
 - => Scénario hadronique vraisemblable dans chacun des cas
 - => **Difficile de conclure individuellement mais accumulation d'indications que les restes de supernova accélèrent des hadrons**
- **Perspectives:**
 - HESS, HESS II & CTA => étude statistique de ces objets
 - FERMI & HESS II => contraintes fortes à plus basse E
 - => **Une réponse claire à l'origine des rayons cosmiques galactiques sous peu?**

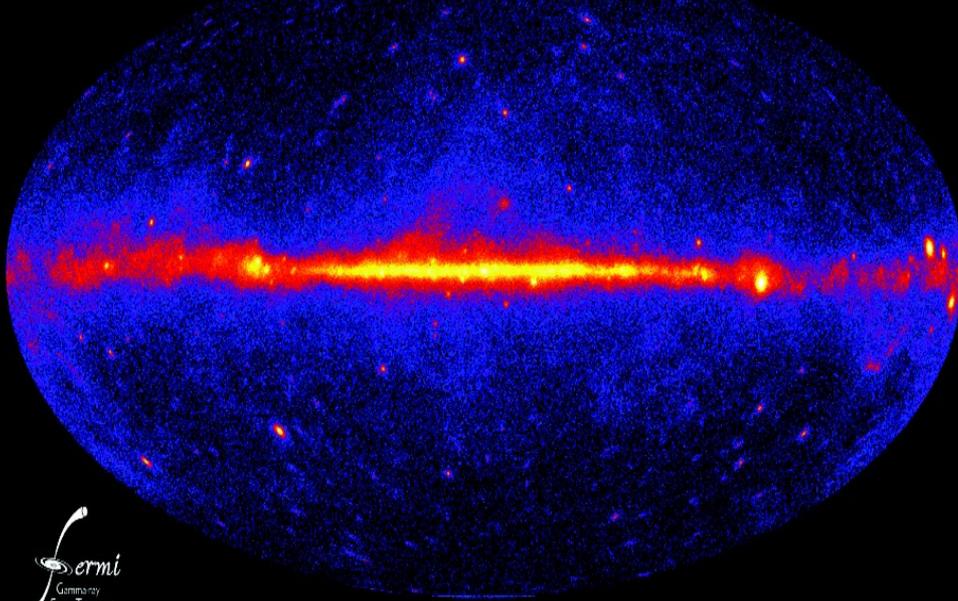
The image shows the silhouettes of several radio telescope structures against a sunset sky. The structures are complex, with many thin legs and a large, flat, circular dish-like top. The sky is a gradient of colors from dark blue at the top to orange and yellow near the horizon. The foreground is dark, suggesting the ground or a low-lying area.

Merci pour votre attention!

Les nuages moléculaires au GeV

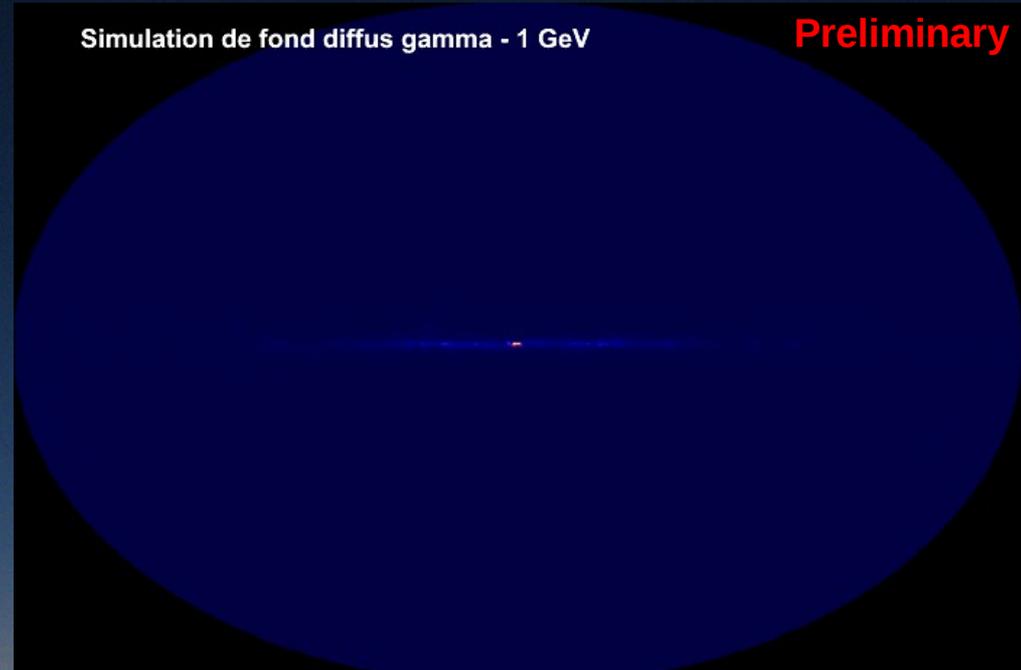
- Emission diffuse au GeV produite par les nuages moléculaires sur plan Galactique
=> Nuages "passifs" baignant dans la "mer" de rayons cosmiques

Le ciel au GeV par Fermi (1 an de données)



Simulation de fond diffus gamma - 1 GeV

Preliminary



Simulation de fond diffus gamma - 1 GeV (log)

