

Étude d'associations de vestiges de supernova et de nuages moléculaires avec HESS

Armand Fiasson
Post-doc LAPP

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 restes de supernova avec HESS**
 - Vestiges de supernova isolés: limitations
- **Étude d'associations de vestiges de supernova et de nuages moléculaires**
 - Intérêt de la présence de nuages moléculaires
 - Associations détectées en rayons gamma
- **Conclusion & perspectives**

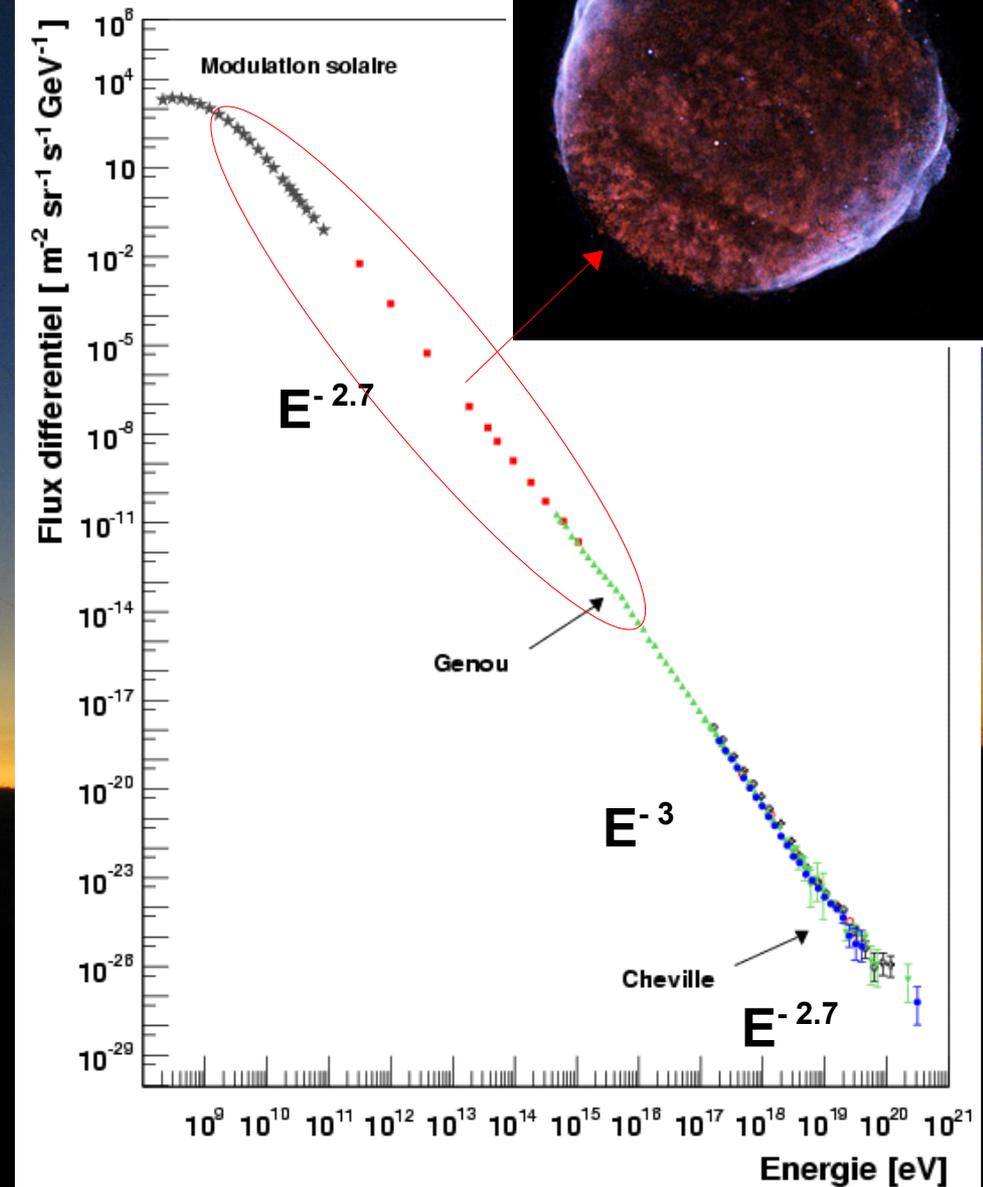
Les rayons cosmiques

- **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

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

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

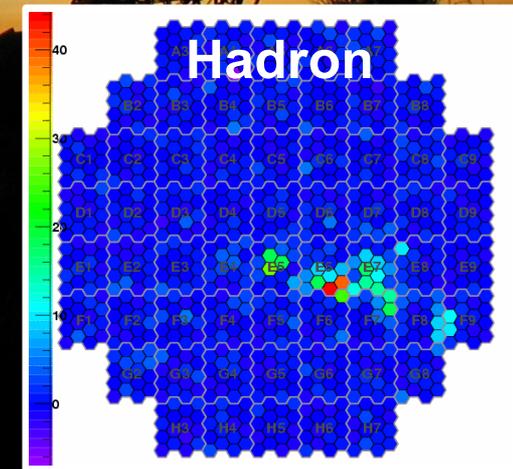
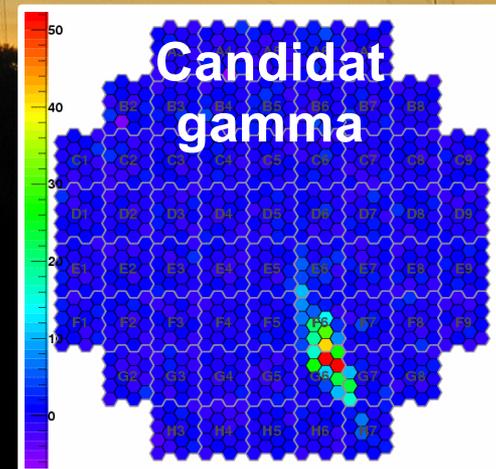
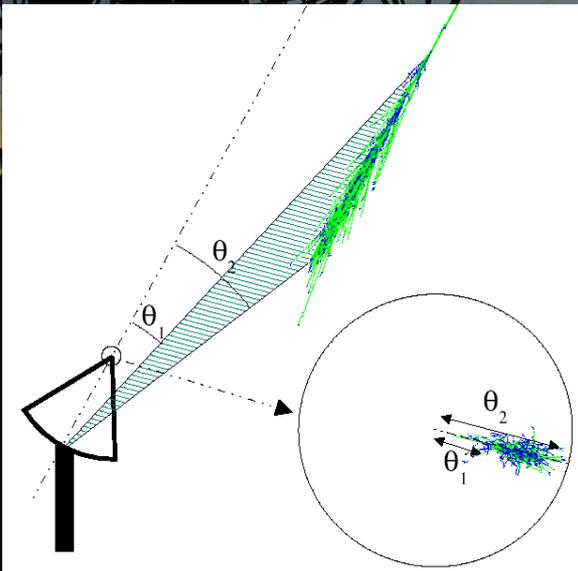
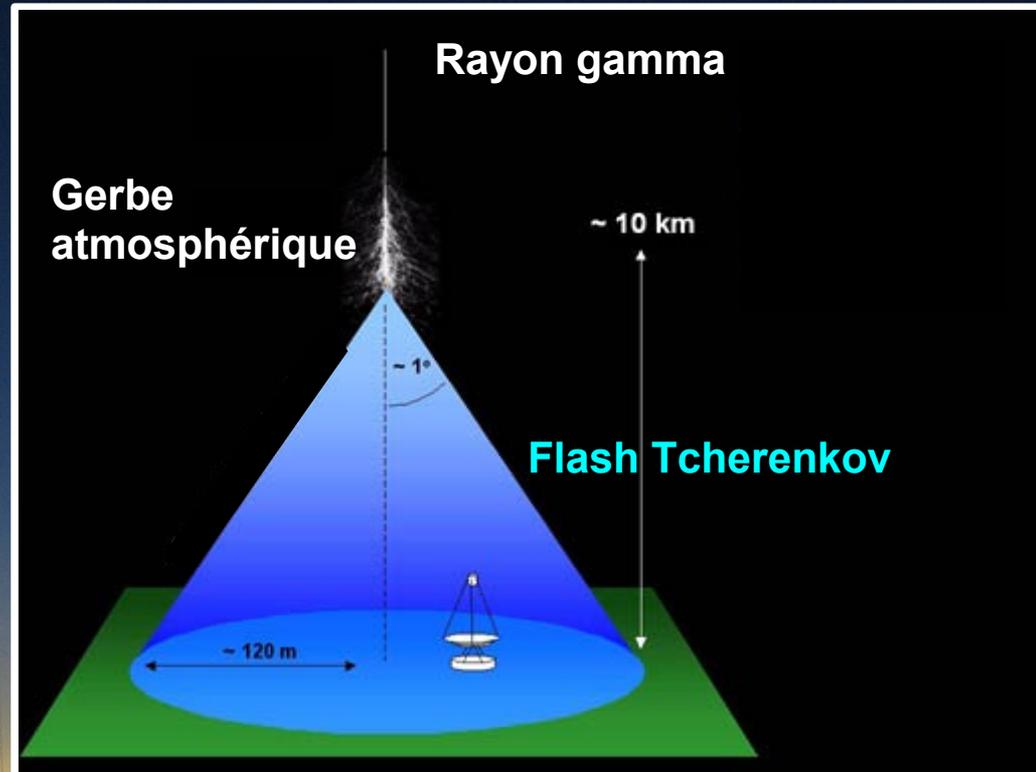
Electrons

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

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

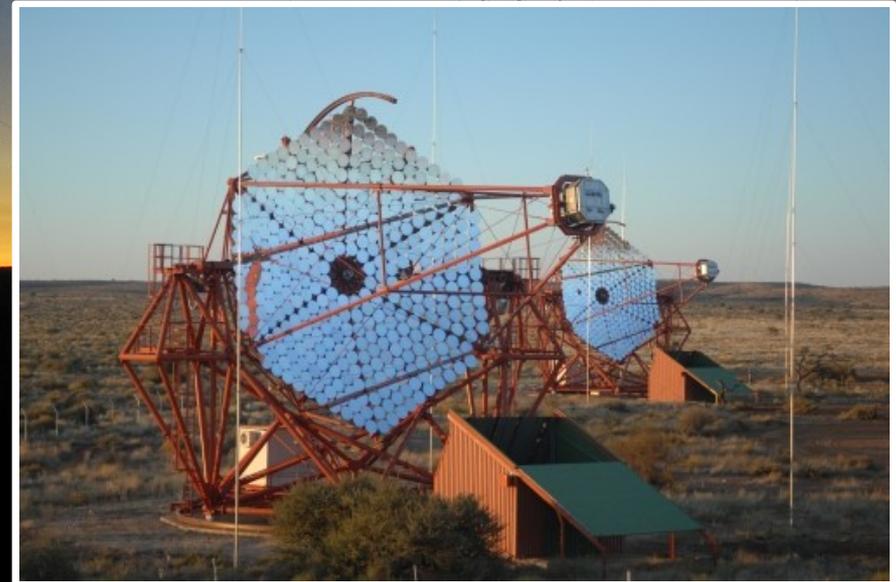
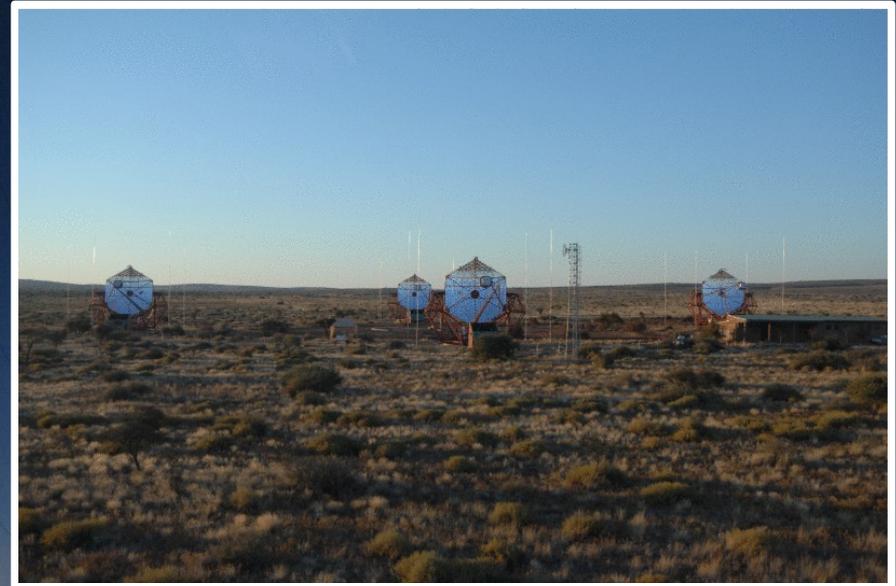
L'imagerie Tcherenkov

- 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**
 - => 5 années de fonctionnement continu



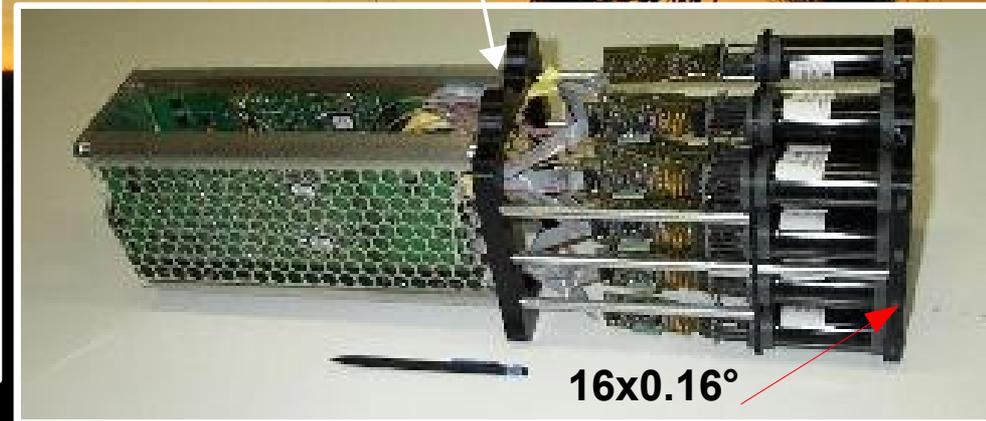
Les caméras de HESS

- **Caméras modulaires**

- 960 pixels (0.16°) - 60 tiroirs de 16 PMs
- Champ de vue total de 5°
- Electronique rapide incluse

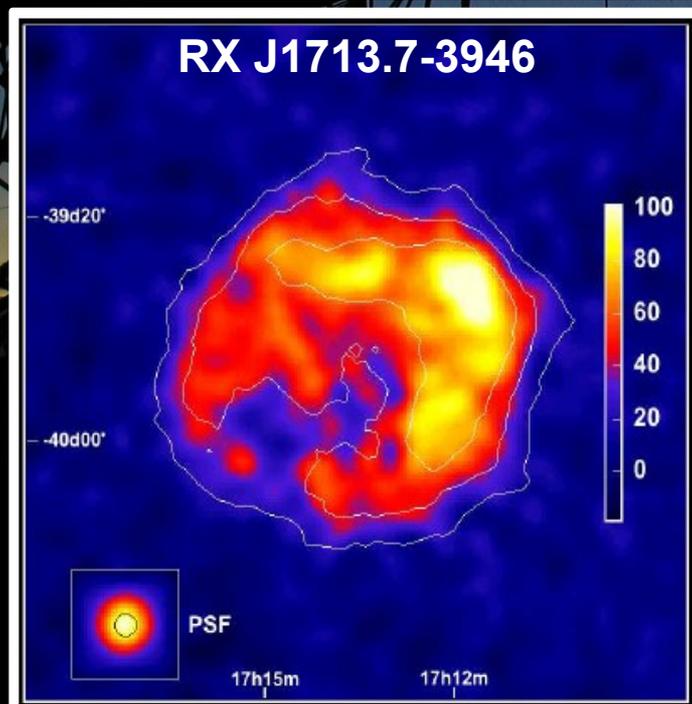
- **Traitement du signal issu des PMs**

- 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

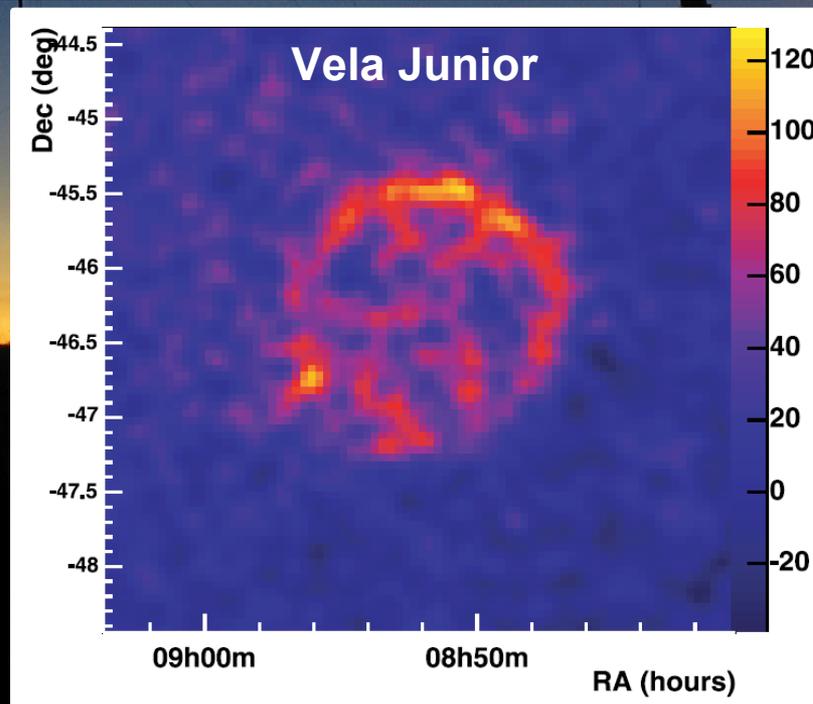


Observations de vestiges de supernova

- **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}



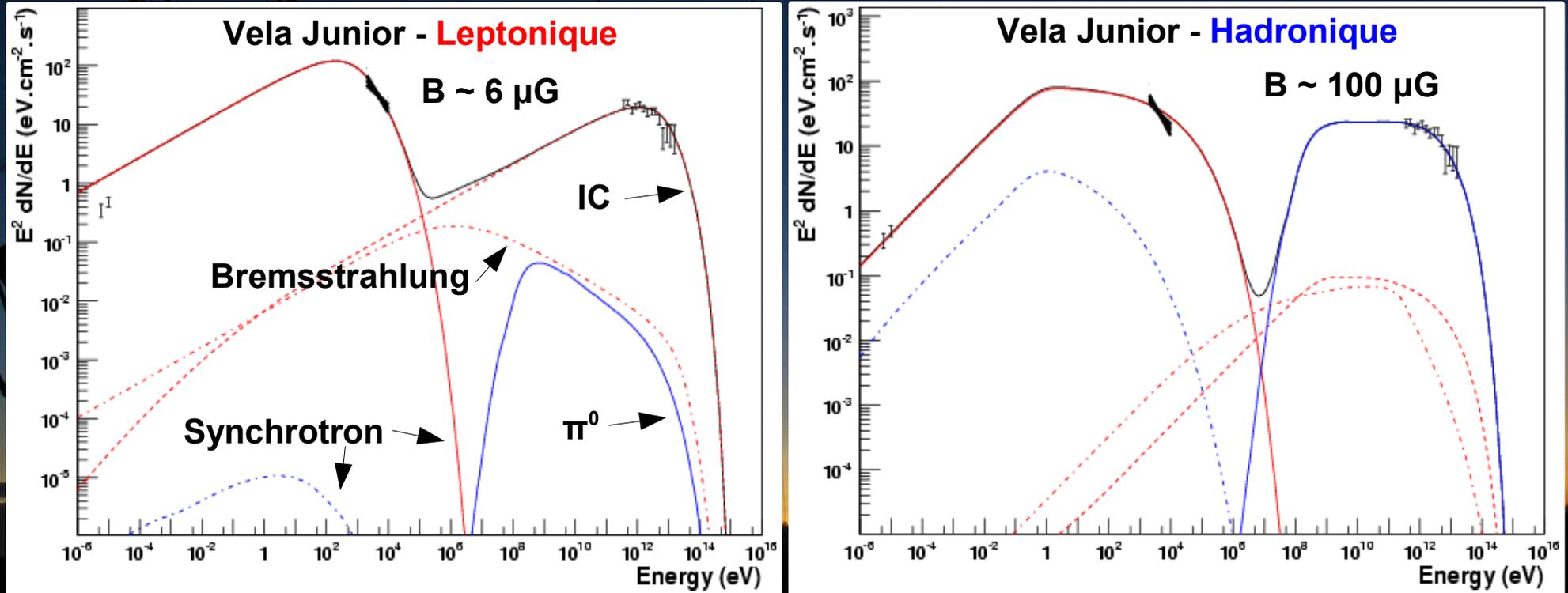
[Aharonian et al. A&A 464, 235 2007]



[Aharonian et al. ApJ 661, 236 2007]

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

- => 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

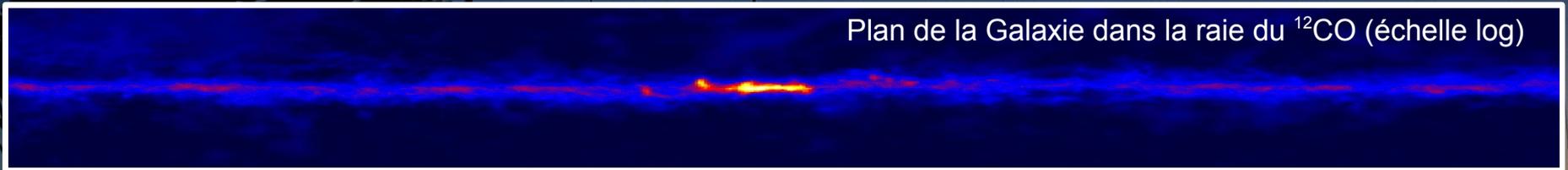
- => Jusqu'à qqes mG (contre qqes μG en moyenne)



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)

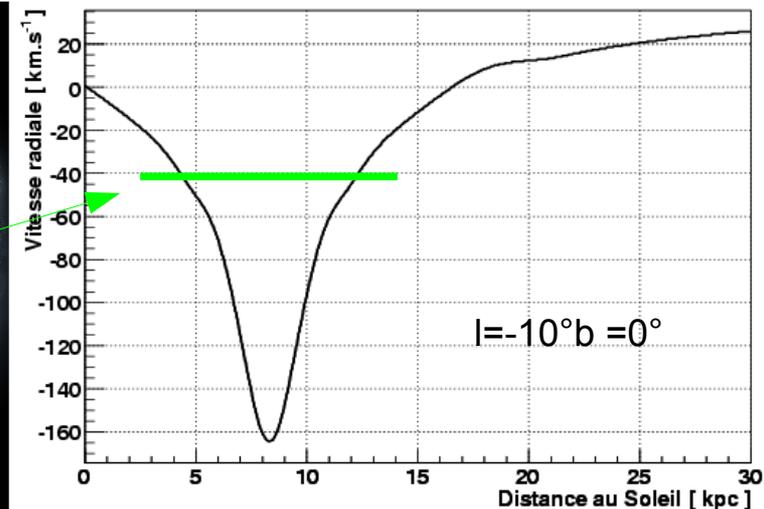
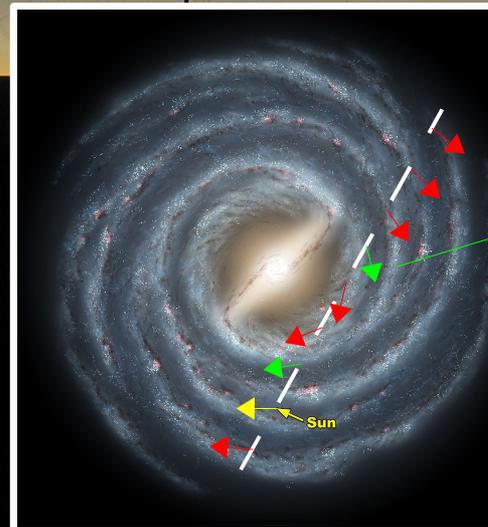


- **Flux de la raie**

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

- **Vitesse radiale**

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



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

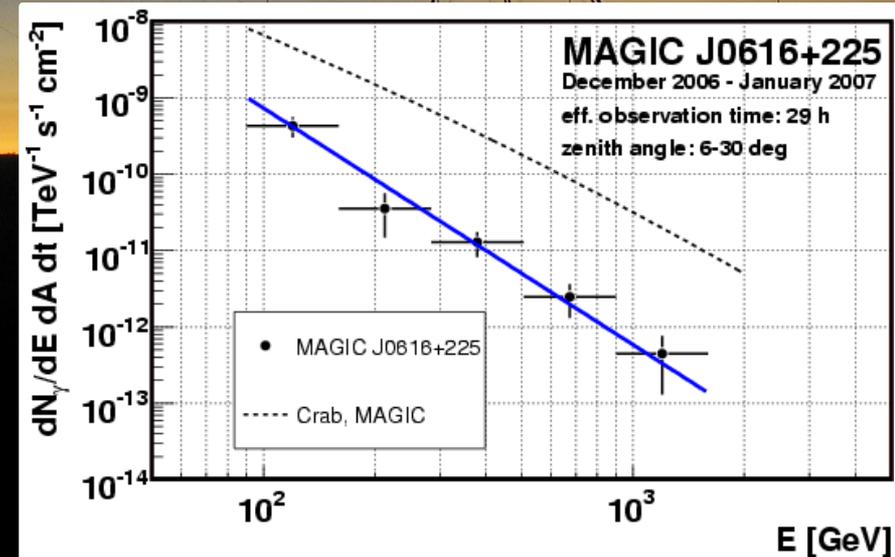
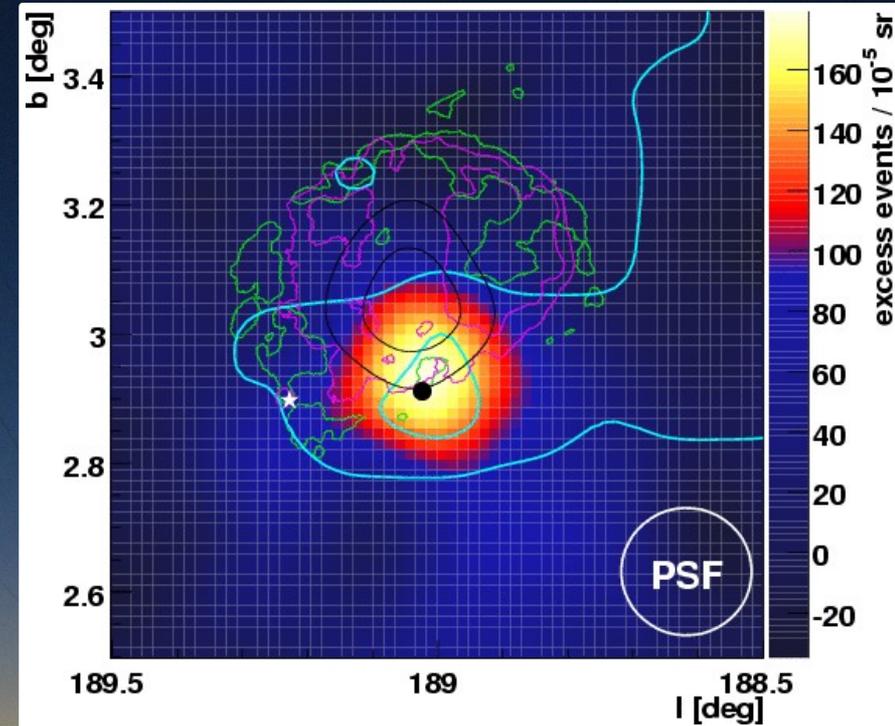
=> Plus de 20 vestiges de supernova présentent cette émission

=> 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 (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 la plus vraisemblable



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

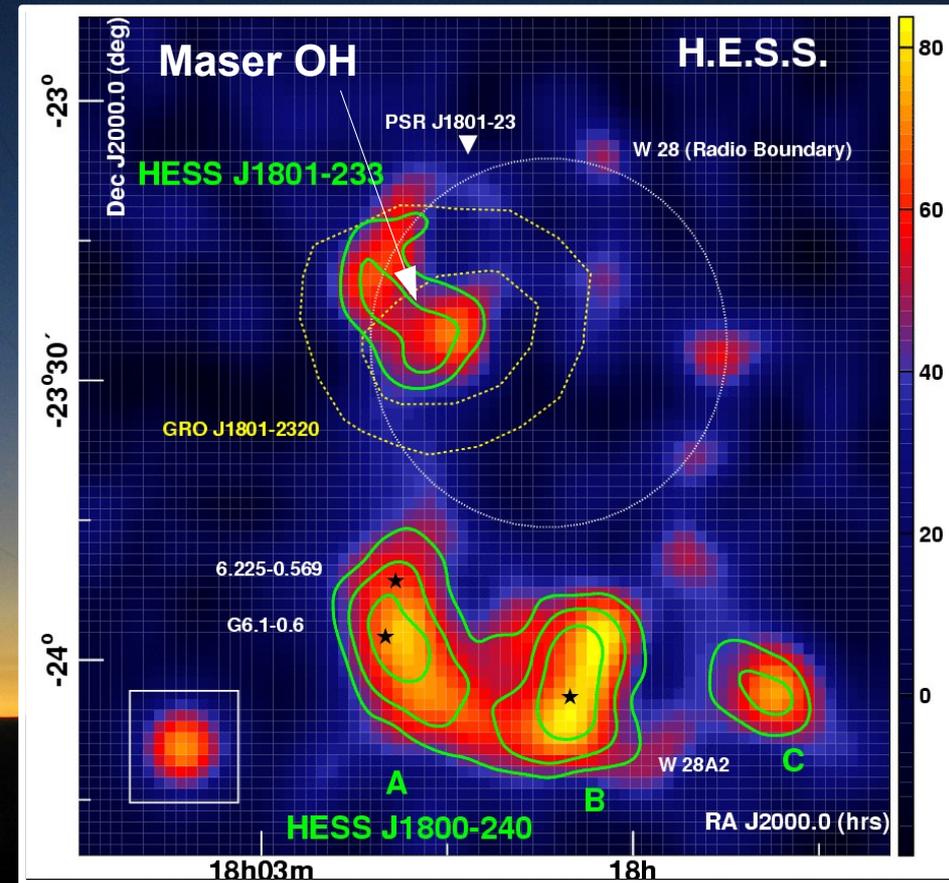
Région de W28

- **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

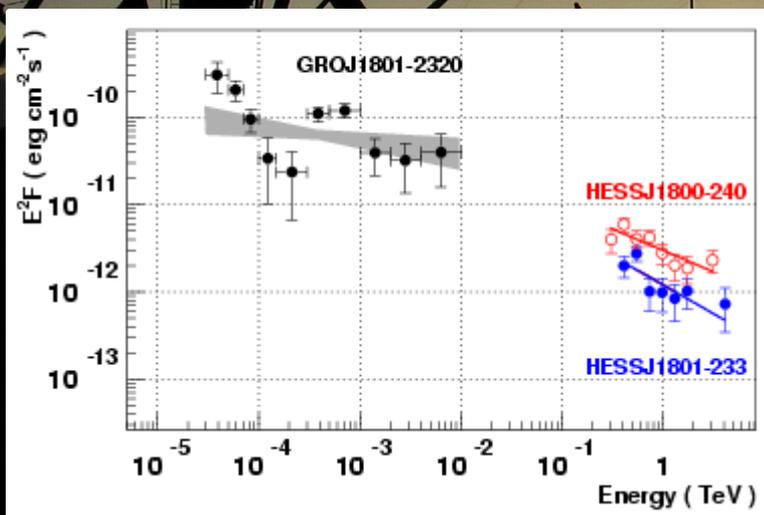
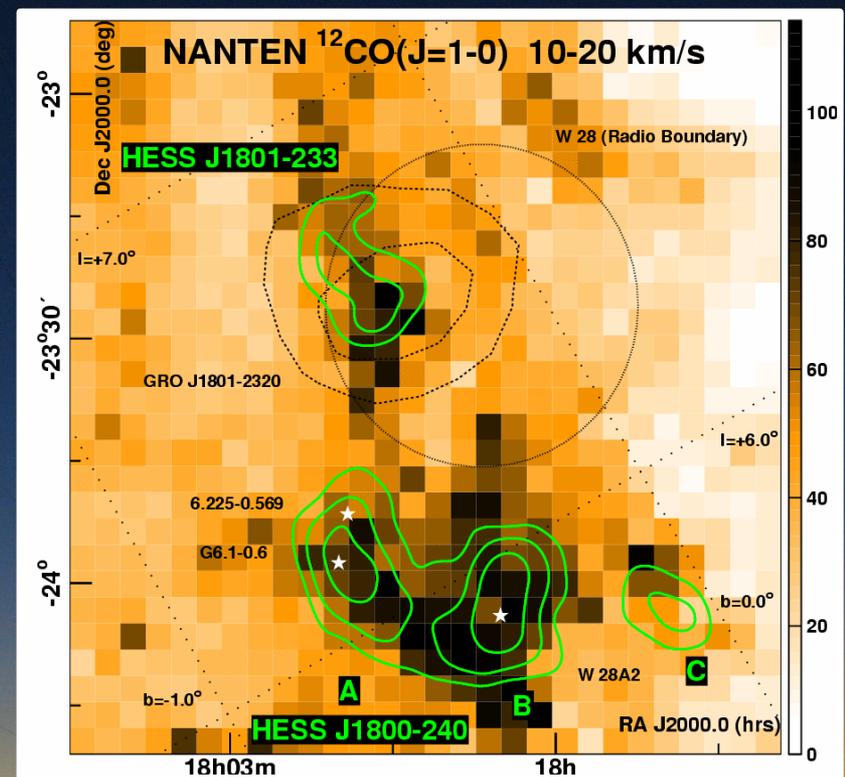
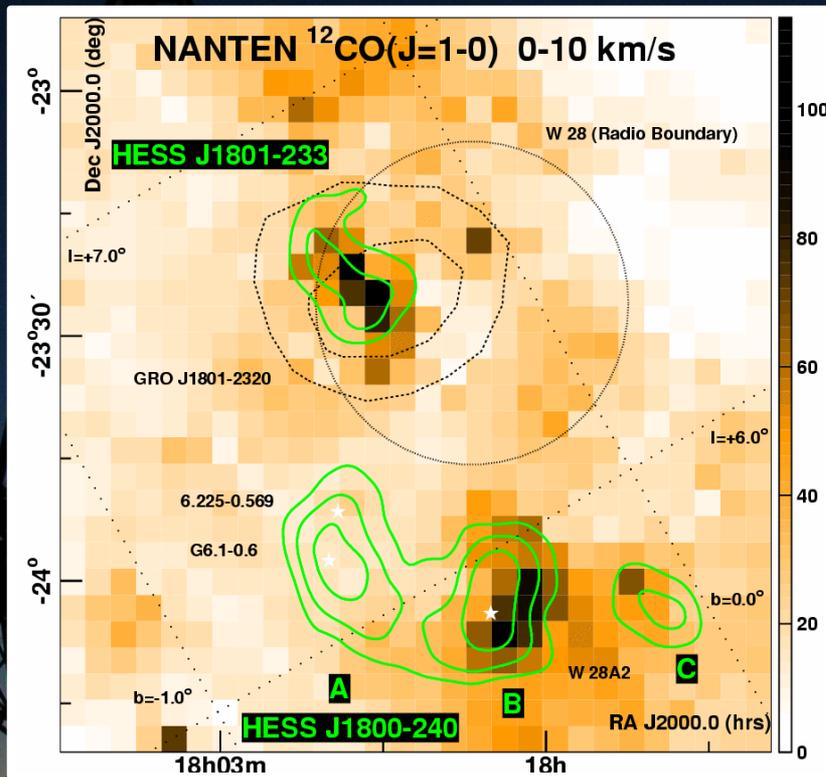
- **Emission gamma complexe**

- 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

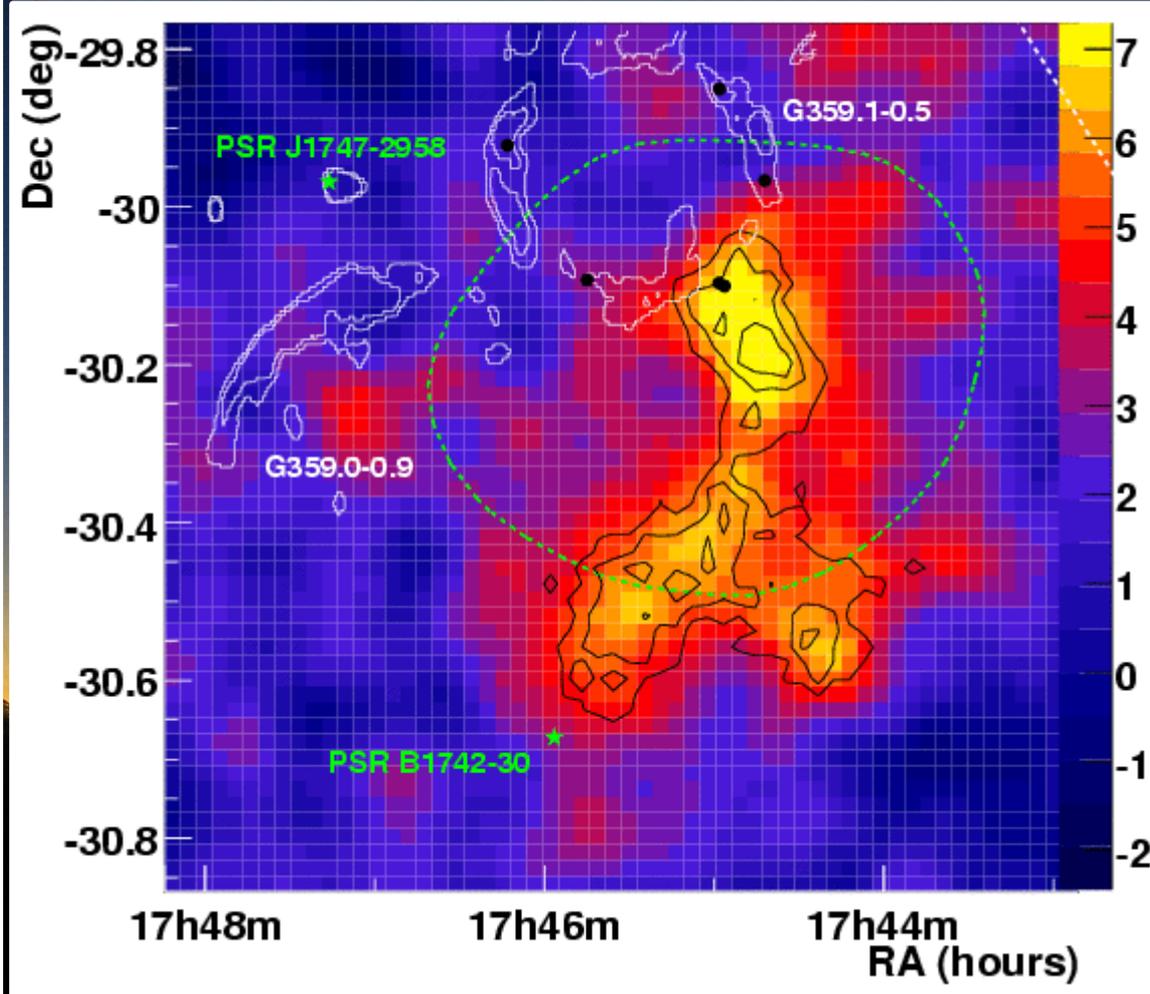


- Émission corrélée à la densité de matière
 - Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN
- => 10 à 30 fois la densité locale

=> **Scénario hadronique probable**

SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

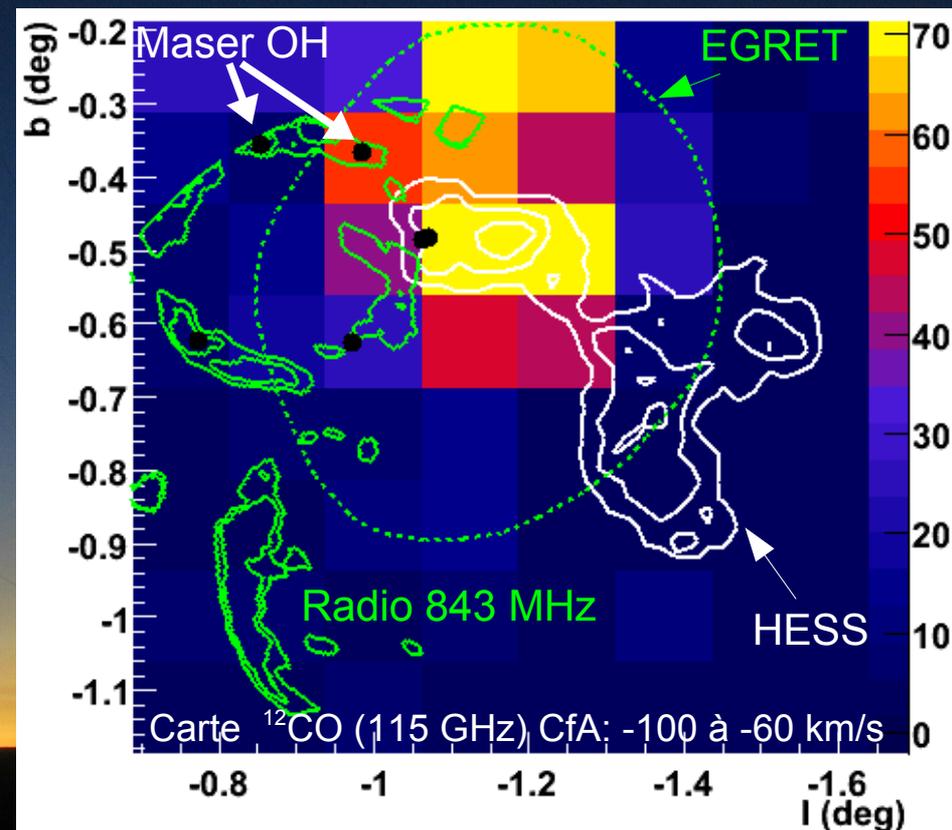
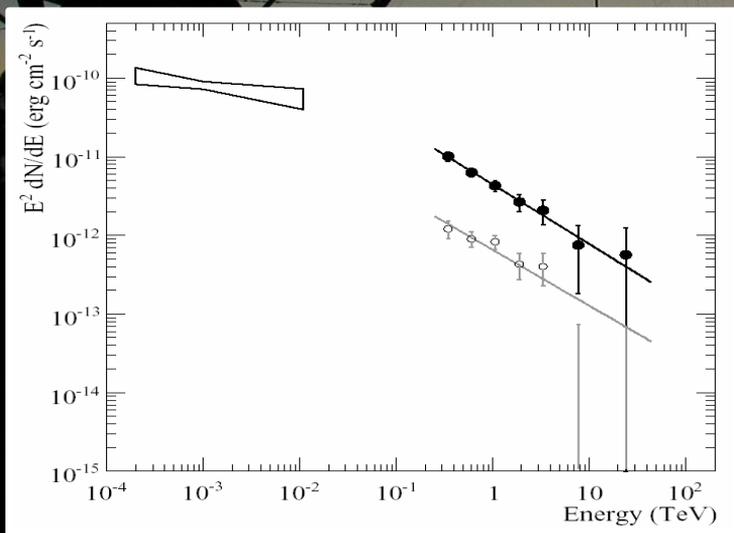
- **SNR en interaction avec des nuages moléculaires**
 - Coquille de matière autour du vestige G359.1-0.5
 - Plusieurs masers OH
- **Source EGRET coïncidente à ce vestige**
- **Pas de rayons X**
- **Source HESS non identifiée**
 - Morphologie complexe
 - Partie nord adjacente à G359.1-0.5



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

SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

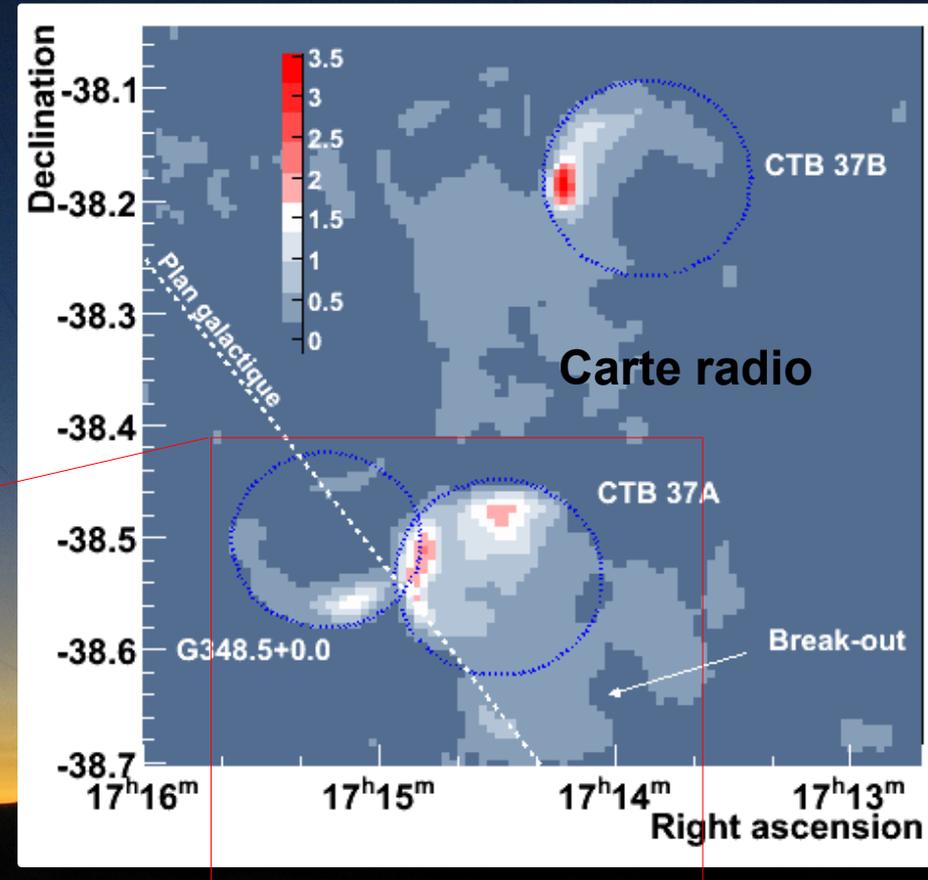
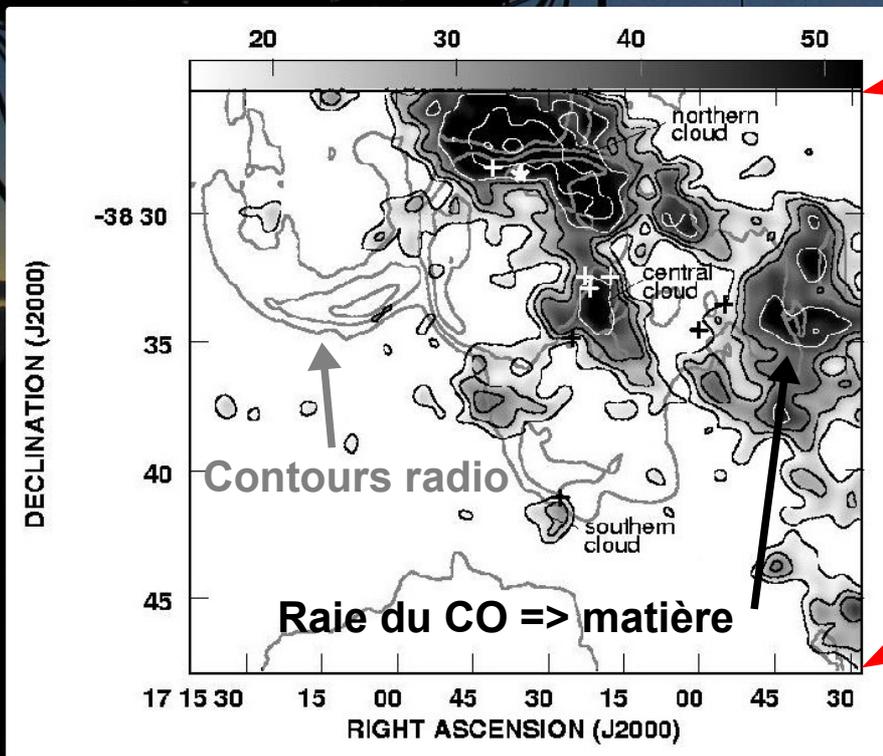
- **Nuages moléculaires choqués**
 - Nuage coïncident avec l'émission au TeV
 - 5×10^4 masses solaires
- **Point de vue énergétique**
 - $\sim 30\%$ de l'énergie typique d'explosion nécessaire (10^{51} erg)



=> Interprétation hadronique très vraisemblable

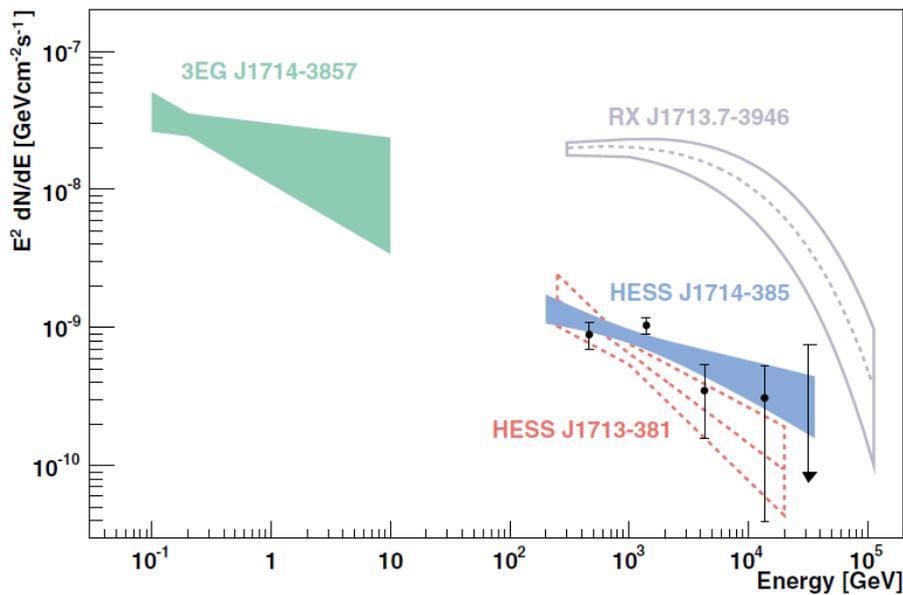
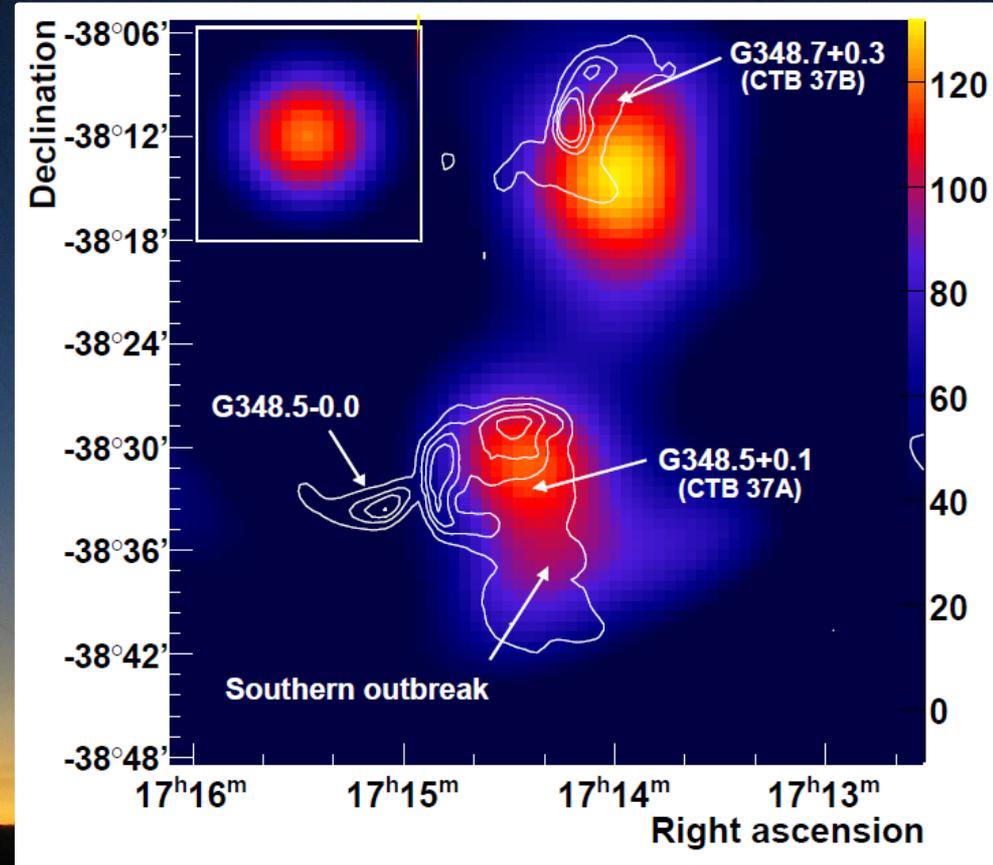
Complexe de SNR CTB 37

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

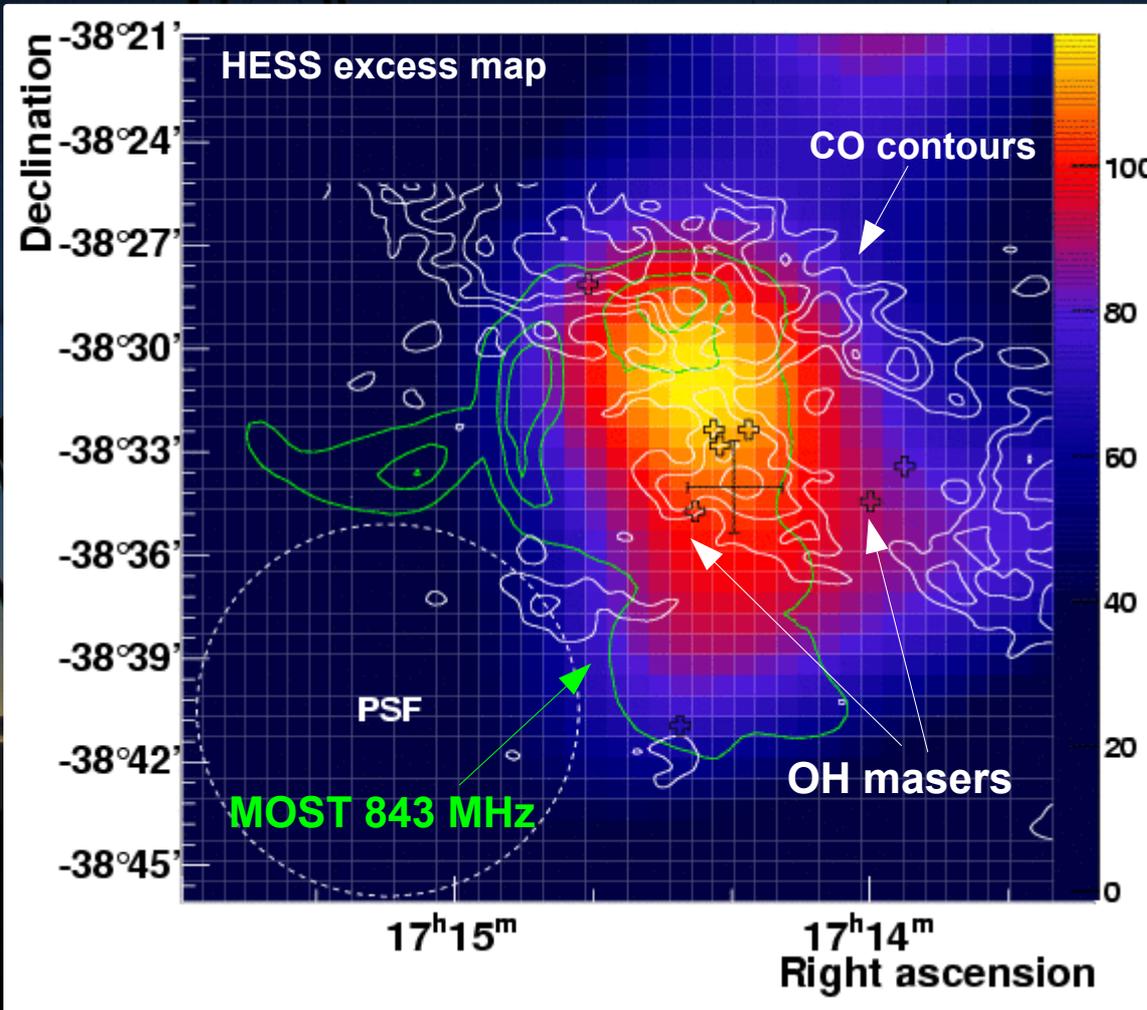


Deux sources HESS

- 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: scénario hadronique?



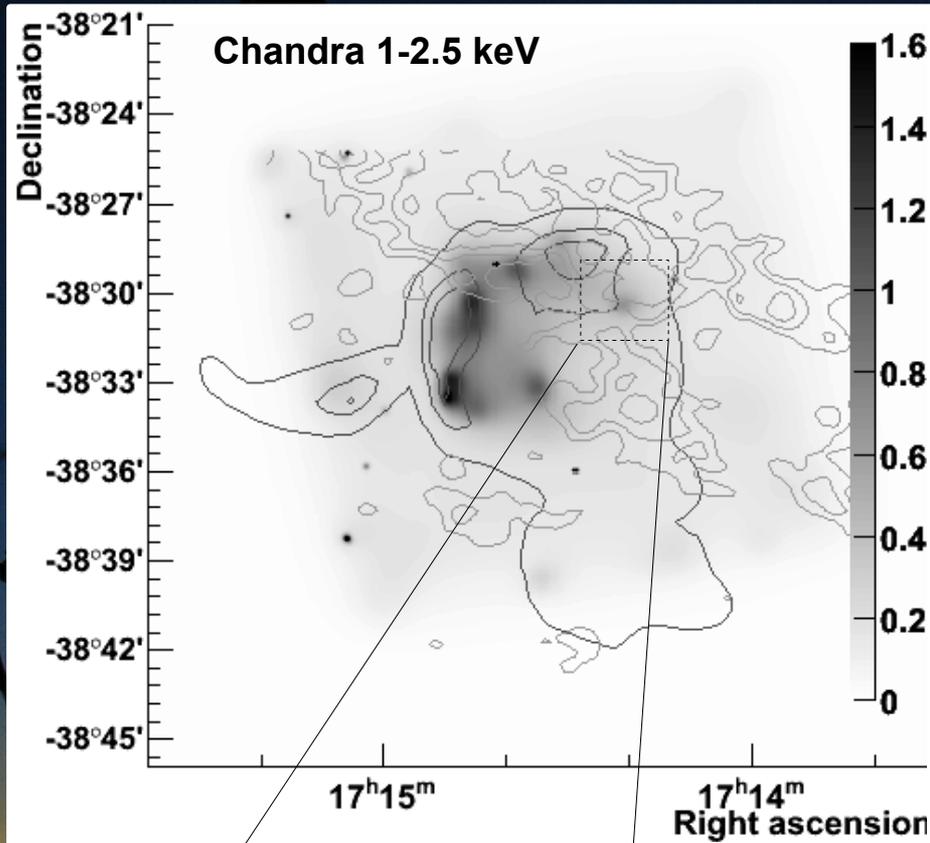
[Aharonian et al. A&A, 490, 685A 2008]

=> Interprétation hadronique possible

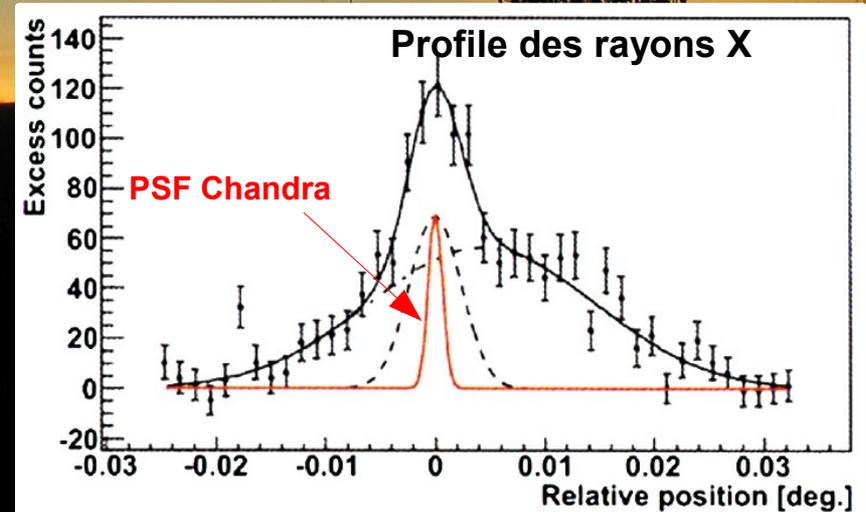
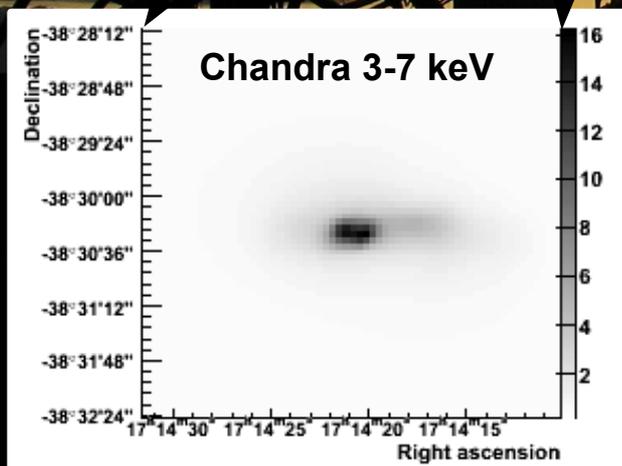
- **Vestige en interaction avec des nuages**
 - Masers OH
 - Nuages denses visibles en CO

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

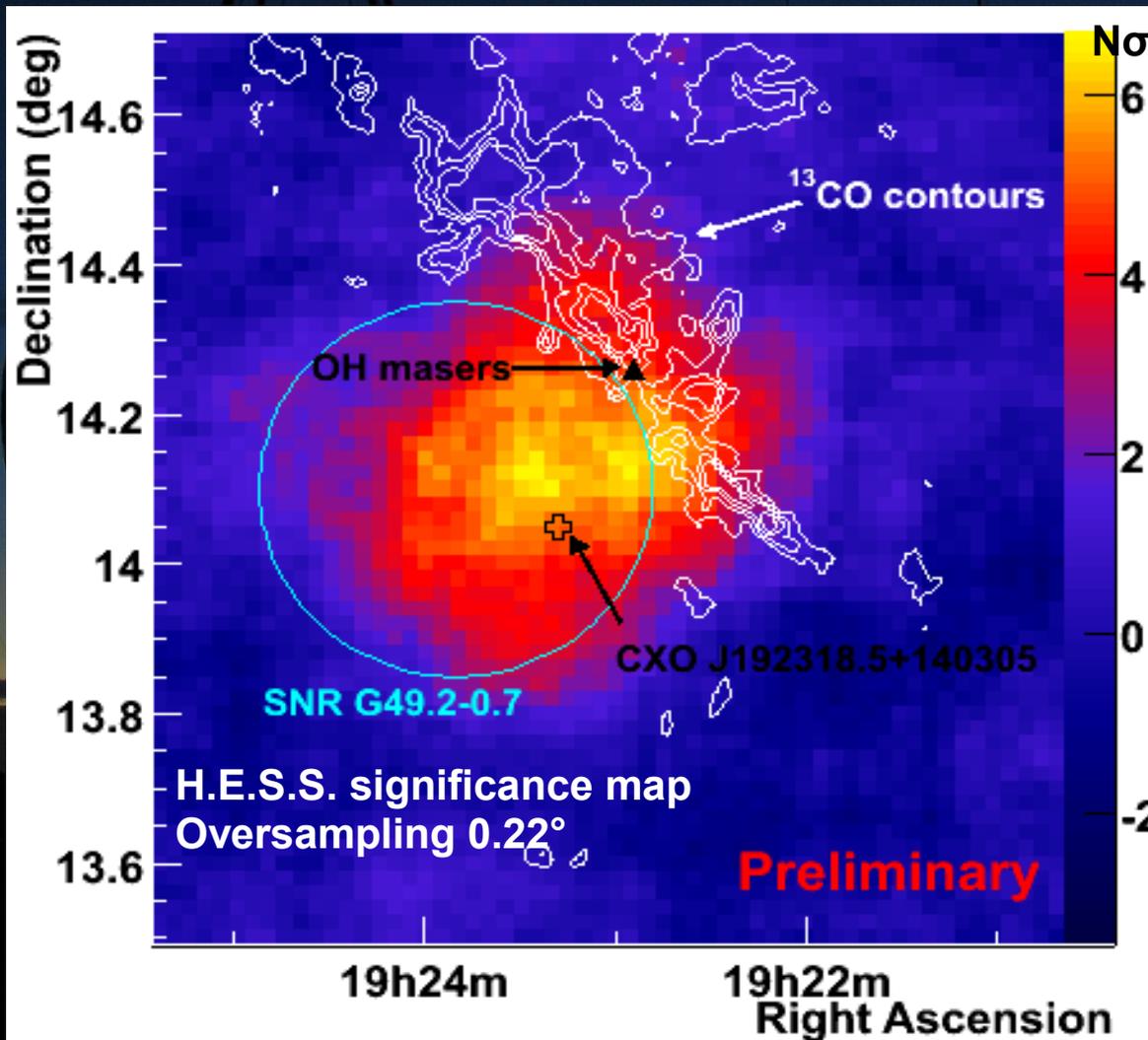
Ou leptonique?



- 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



- Région de W51 observée en 2007 et 2008
=> 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

Conclusion - perspectives

- **Démarche alternative pour mettre en évidence l'accélération de hadrons**
 - Associations 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 possible dans chacun des cas
 - Densité de rayons cosmiques en accord avec les modèles
 - => Individuellement: difficile de conclure
 - => Mais accumulation d'indications 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
 - => **Une réponse claire à l'origine des rayons cosmiques galactiques sous peu?**

The background of the slide is a photograph showing the silhouettes of several radio telescope structures against a sunset sky. The sky transitions from a deep blue at the top to a bright orange and yellow near the horizon. The structures are complex metal frameworks with large, flat, circular reflectors. One large structure is prominent on the left, and another smaller one is on the right. Several tall, thin masts are also visible in the background.

Merci pour votre attention!