

Les nuages moléculaires, révélateurs de rayons cosmiques dans les vestiges de supernovae?

F. Feinstein
LPTA, Montpellier

HESS : High Energy Stereoscopic System

- Quatre télescopes imageurs Tcherenkov atmosphériques
- Khomas Highlands en Namibie à 1800 m d'altitude

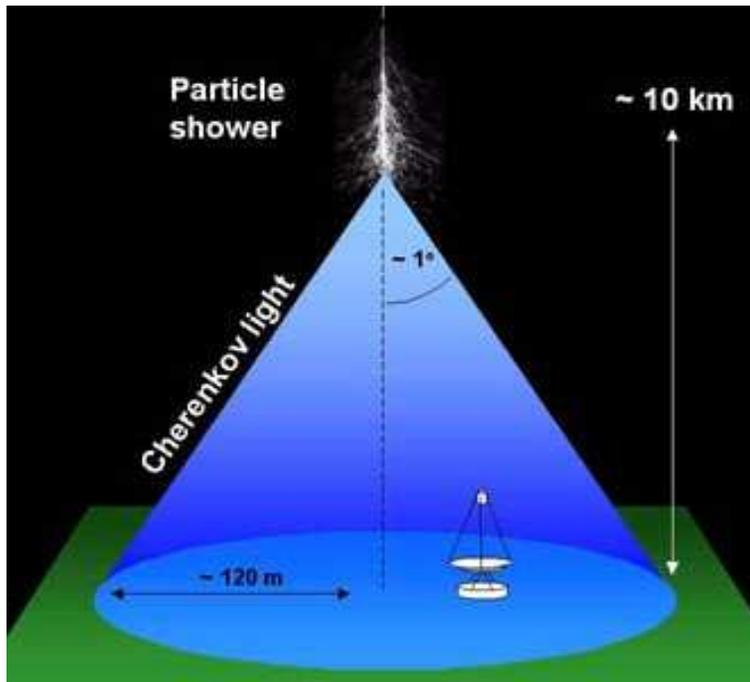
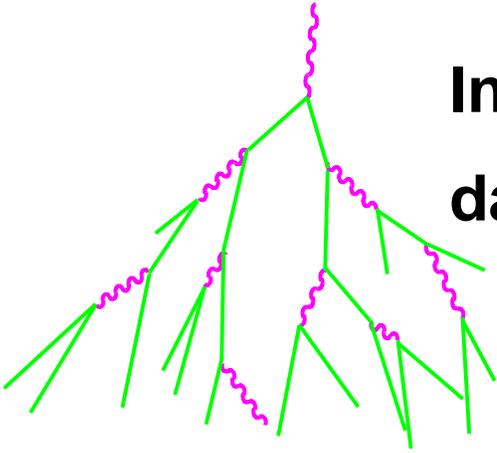
Hémisphère Sud => partie centrale du plan de la Galaxie
=> la plupart des sources



- Finalisé en décembre 2003
=> plus de 4 ans de données en configuration complète

Principe de l'imagerie Tcherenkov

Interaction du rayon gamma
dans la haute atmosphère



Propagation du flash
Tcherenkov jusqu'au sol

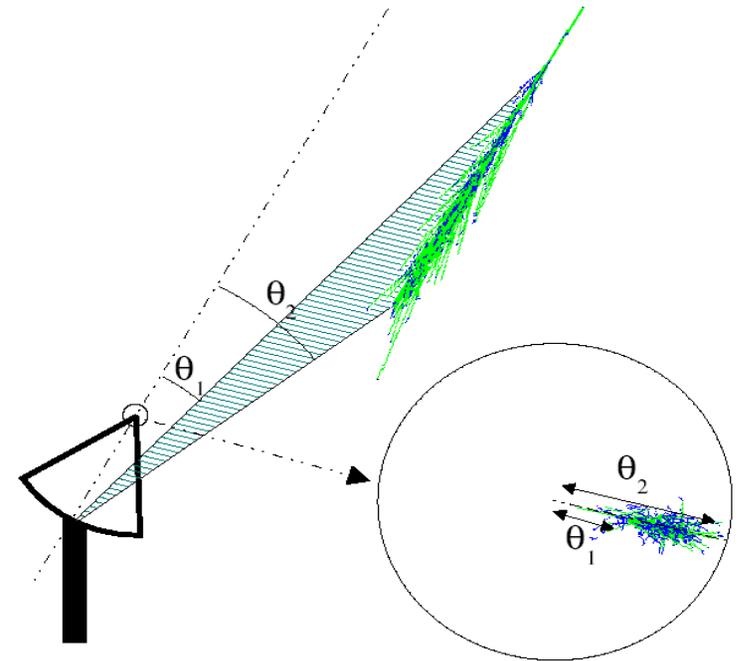
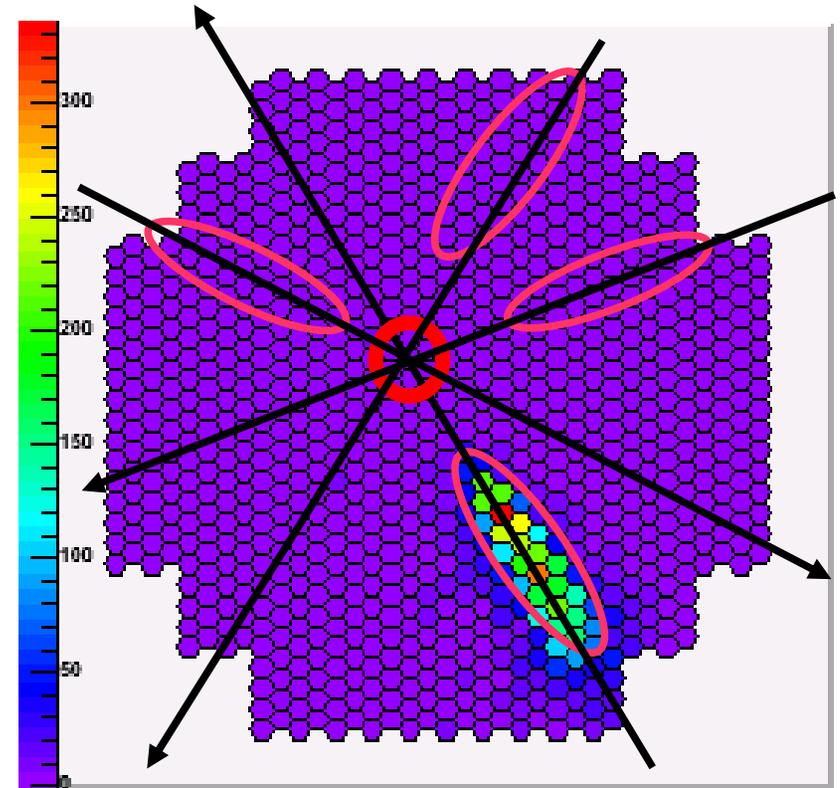
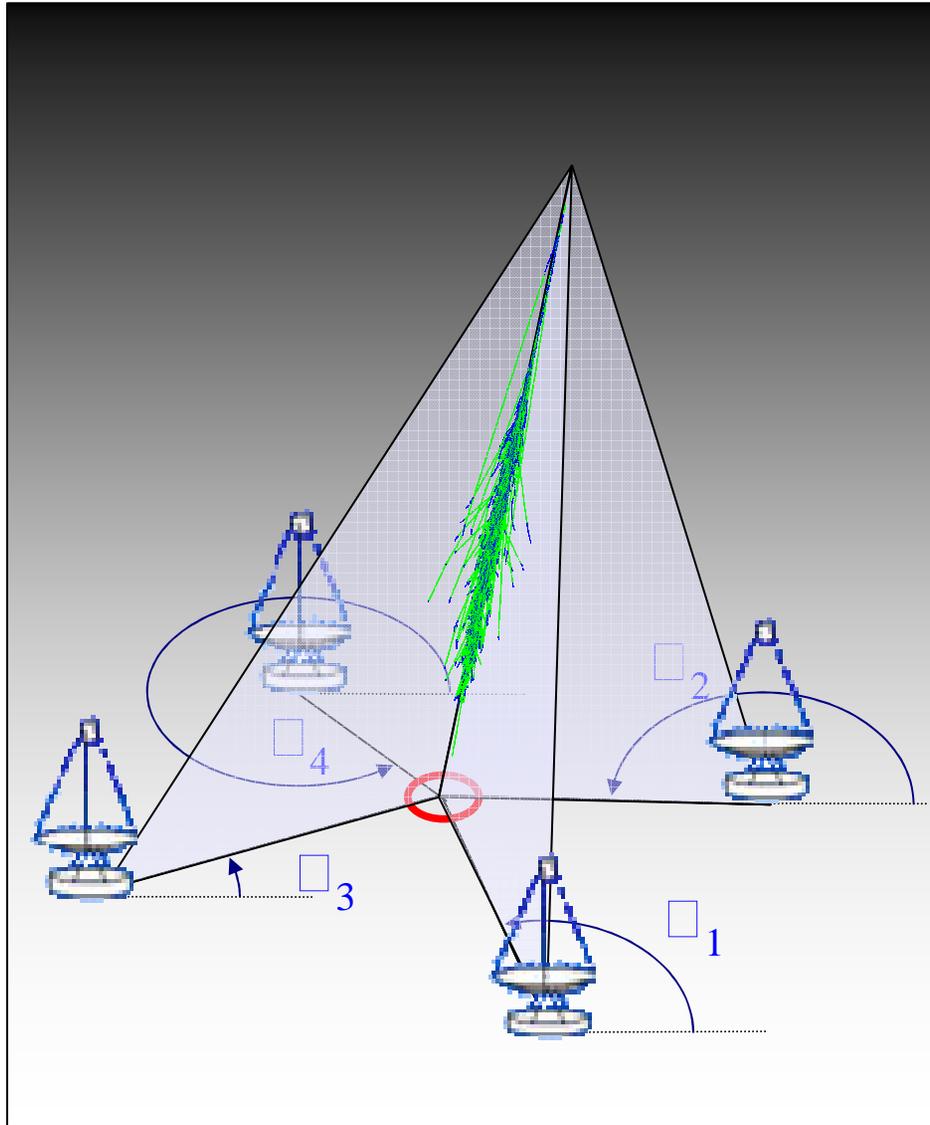


Image de la gerbe
au foyer du réflecteur

Observation stéréoscopique



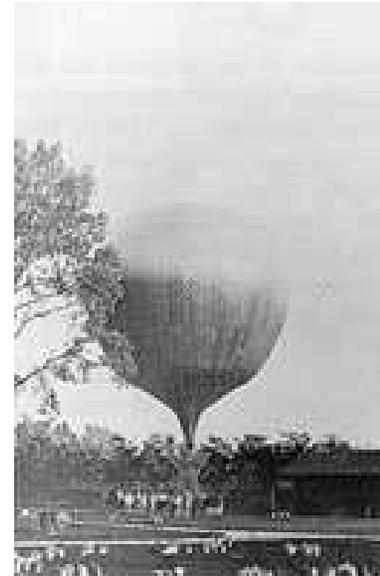
Performances du télescope H.E.S.S.

- champ de vue 5° , caméras de 960 pixels :
 - électronique intégrée,
échantillonnage à 1 ns

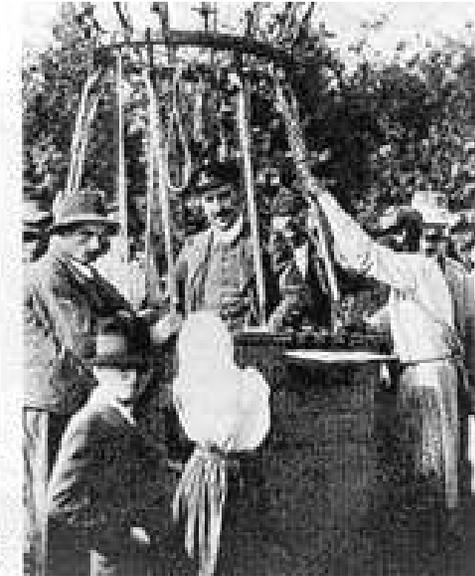
- Résolution: $\Delta\theta \sim 0.15^\circ$
- Domaine d'énergie : 0.2 - 50 TeV;
 - $\Delta E/E \sim 15\%$

L'origine des rayons cosmiques

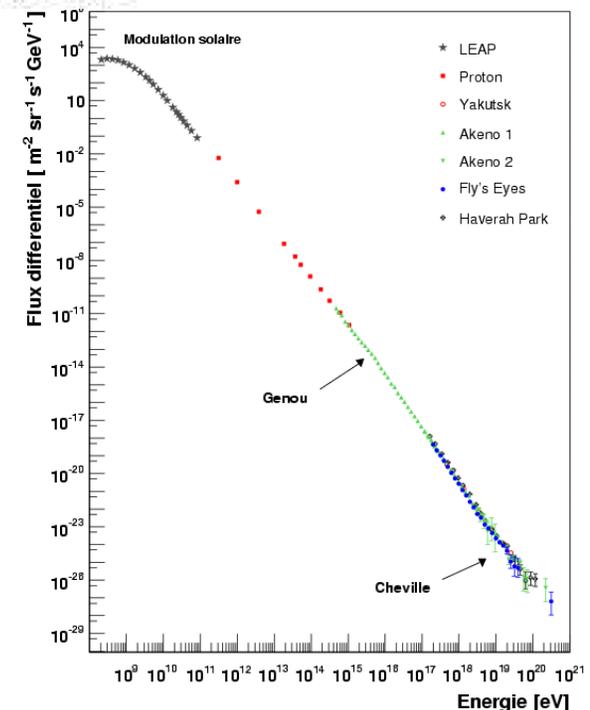
- Découverts en 1912 par V. HESS
 - Mesures en ballon
 - Jusqu'à l'échelle du PeV :
 - contenus par le champ magnétique dans la Galaxie
- => origine galactique
- Quels sont les accélérateurs de hadrons ?
 - Hypothèse prometteuse :
 - vestiges de supernovae



Victor Hess - 1912

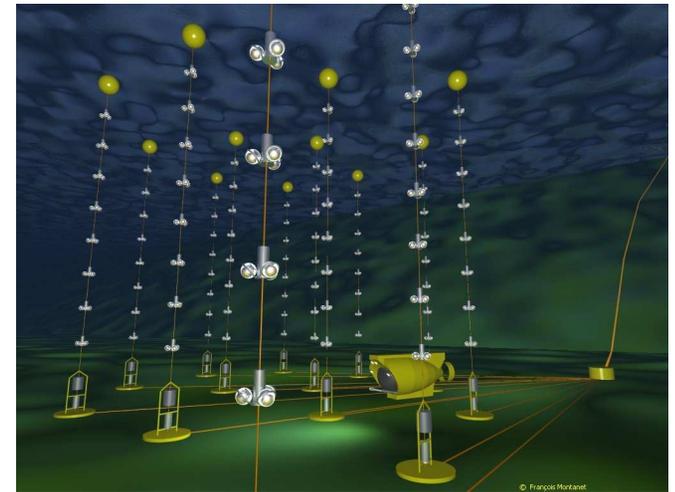


DR



Démarches expérimentales

- **Pb: rayons cosmiques défléchis par les champs magnétiques**
- **Plusieurs messagers utilisables :**
 - Neutrinos
 - Rayons cosmiques ($E > 10^{18}$ eV)
 - Rayons gamma



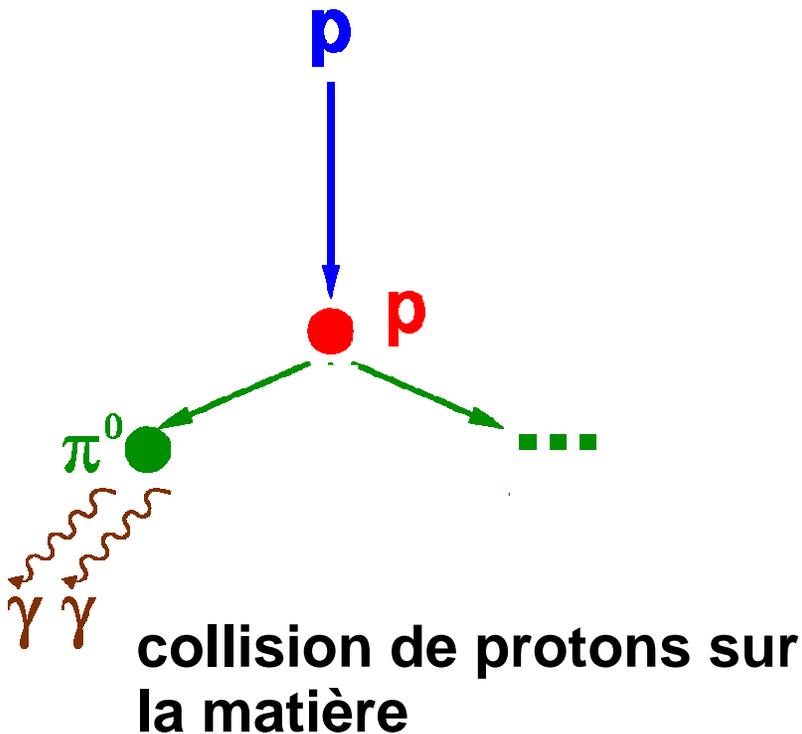
Vestiges de supernovae et rayons cosmiques

- Ondes de choc à travers le milieu interstellaire
 - ⇒ accélérateurs de rayons cosmiques plausibles
- Mécanisme de Fermi du 1^{er} ordre
 - gain d'énergie par le passage répété au travers du choc supersonique (typ. 5000 km/s)
 - ~ 10% de l'énergie de l'explosion accélère les hadrons
 - puissance suffisante pour compenser l'échappement des rayons cosmiques de la Galaxie
- Toujours pas de preuve expérimentale indiscutable
 - ⇒ les rayons γ de très haute énergie sont de bons traceurs pour un tel mécanisme

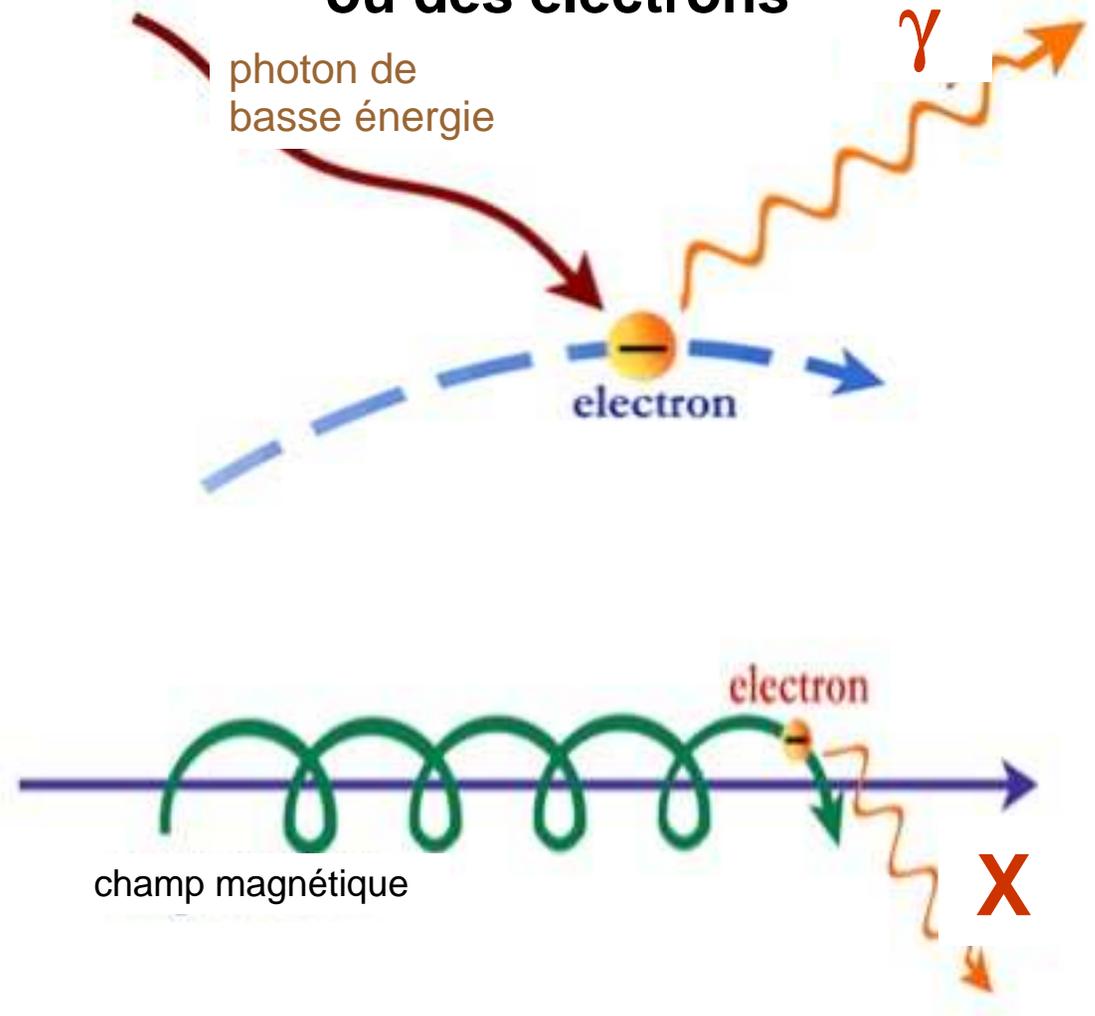
Les rayons cosmiques et les rayons γ

Un signal ambigu provenant :

des protons



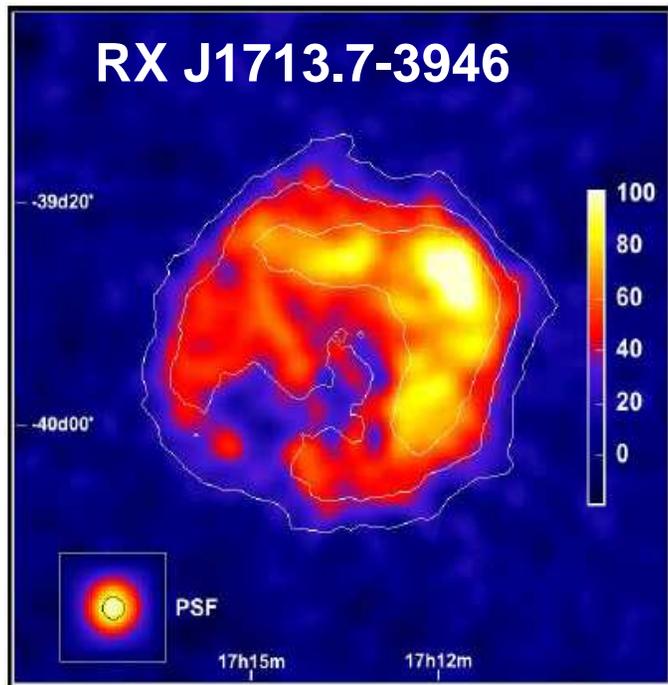
ou des électrons



Vestiges de supernovae

Deux vestiges de supernovae en coquille

- RX J1713.7-3946 et Vela Junior (RX J0852-4622)



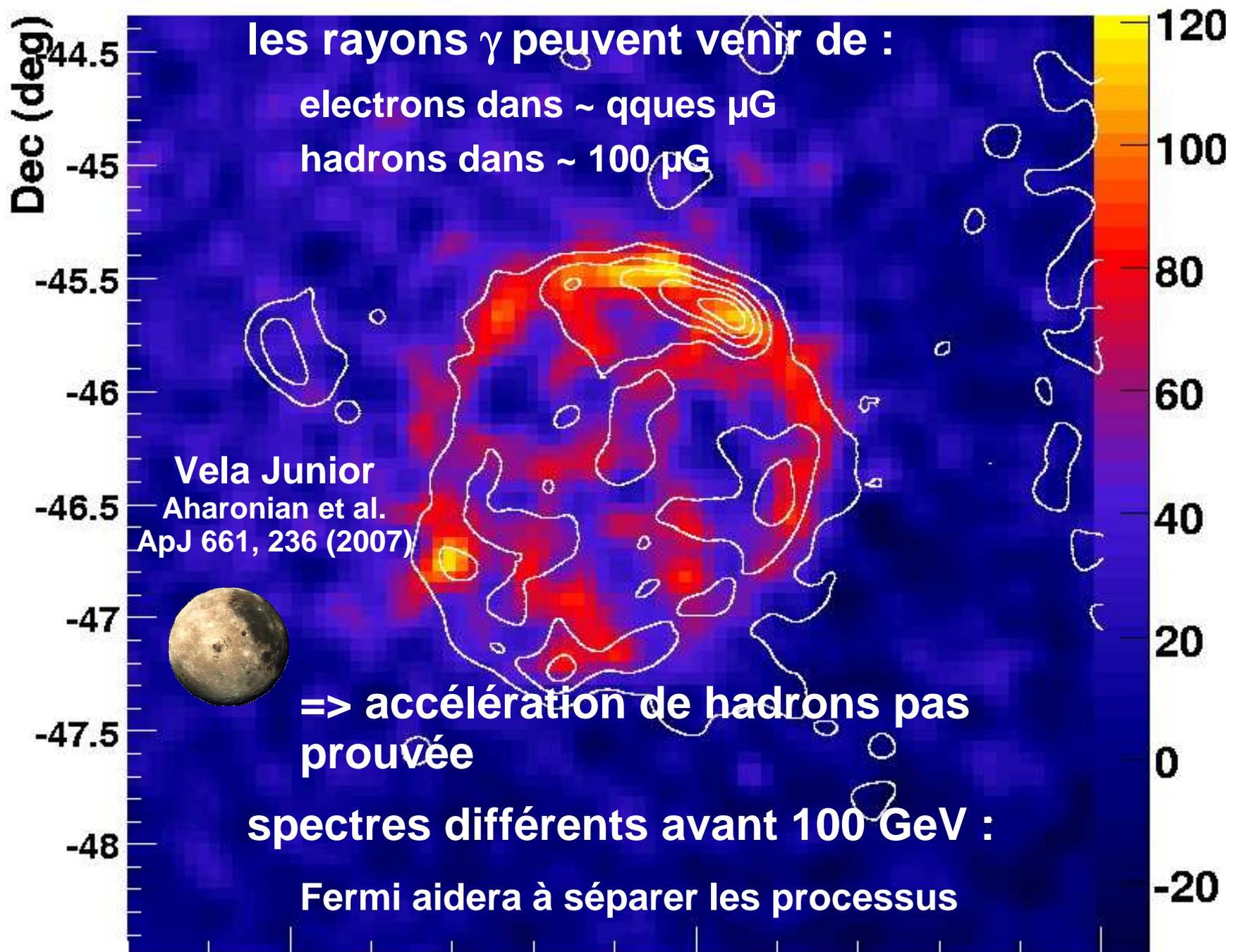
Aharonian et al. A&A 464, 235 (2007)

Premier vestige en coquille résolu

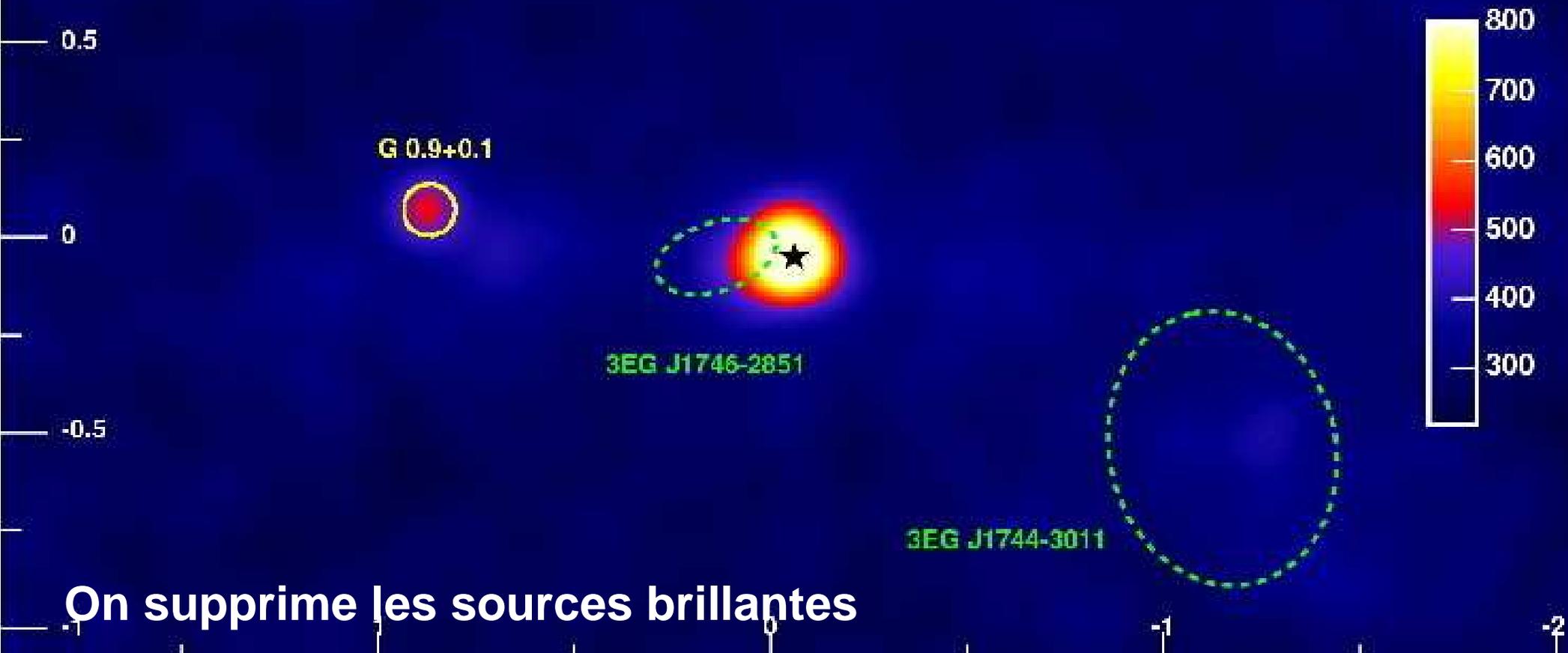
- indice spectral proche de 2 jusqu'à 30 TeV
- => particules accélérées au delà de 100 TeV
- corrélation avec des rayons X non thermiques

Aharonian et al. ApJ 661, 236 (2007)

Vestiges de supernovae



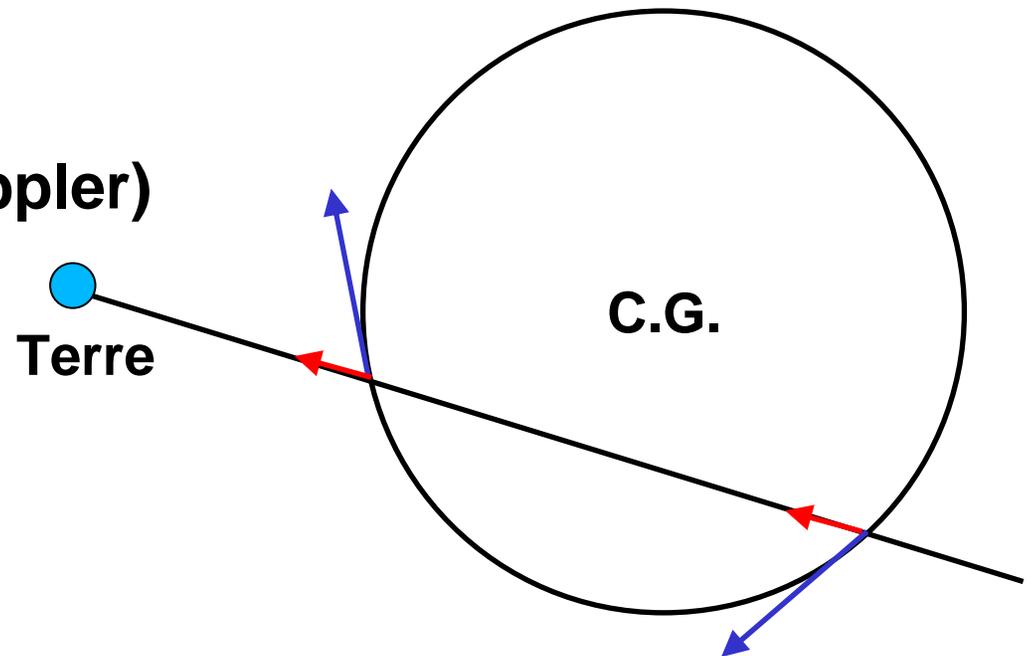
Autour du centre de la Galaxie



**Forte corrélation avec les nuages de gaz denses sur 300 pc
=> suggère une production par interaction p-p
Masse de gaz bombardée: 2 à 4 10^7 masses solaires
Source proche... mais inconnue !**

Les nuages moléculaires

- Masses de gaz dense $> 10^3/\text{cm}^3$ (milieu IS $1/\text{cm}^3$) \Rightarrow molécules
- Détection
 - Spectres rotationnels en radio (CO, CS)
 - \Rightarrow intensité des raies prop. à la densité de colonne de H_2 (composant principal)
- $> 10^3, 10^5$ masses solaires
- estimation de distance :
 - **vitesse radiale** (effet Doppler)
 - ambiguïté



Association avec des vestiges de SN

- Association naturelle
 - zone de naissance d'étoiles massives finissant en SN
 - durée de cohésion du nuage > vie de l'étoile
- Révélateurs de hadrons accélérés
 - cibles pour les particules $\rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 - corrélation entre densité de matière et émission γ
 - \Rightarrow associations accélérateur-cible discrimine hadrons et électrons
- Mais incertitude des distances des vestiges de SN :
 - diamètre apparent : récent et proche ou ancien et lointain ?
 - absorption X : dépend de la colonne densité
 - \Rightarrow comment distinguer les associations véritables?

L'indication du maser OH (A. Fiasson)

- inversion de population du radical OH (niveaux rotationnels)
- mécanisme unique : pompage collisionnel avec H₂

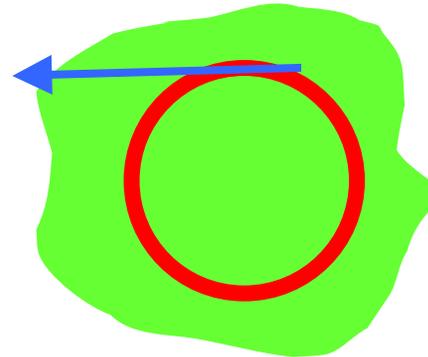
Elitzur M. ApJ, 203, 124 (1976)

– conditions spécifiques : $10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 25 \text{ K} - 200 \text{ K}$

=> une onde de choc à travers un nuage moléculaire

– effet maser

si ligne de visée tangente
à l'onde de choc



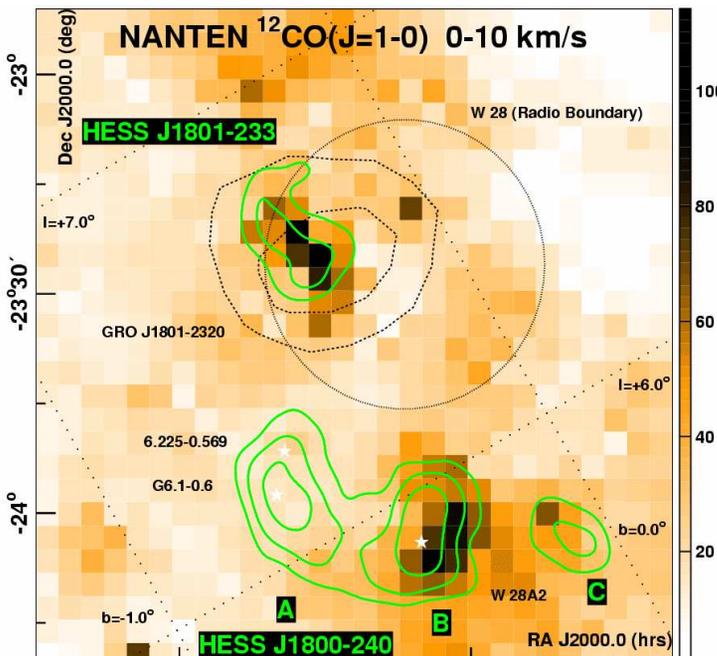
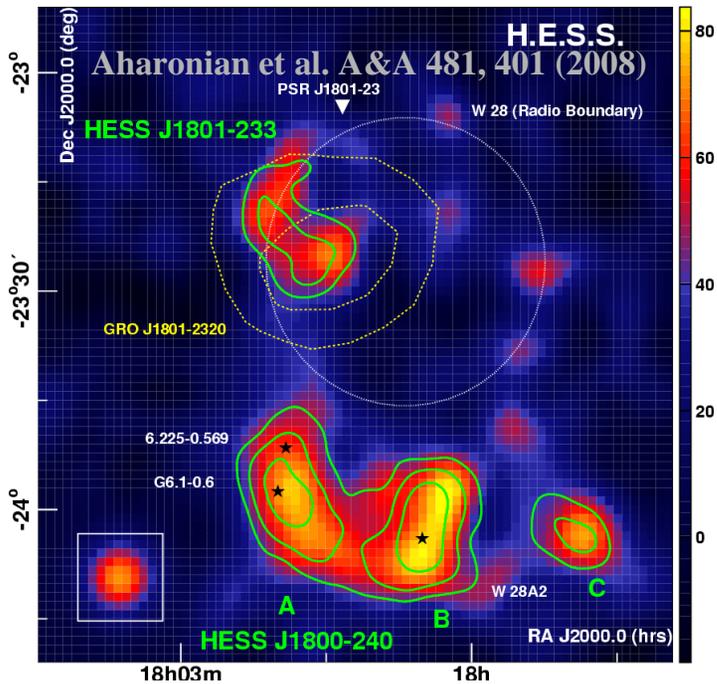
- origine de OH :

- formation de H₂O dans la compression
- émission X thermique dans le choc en retour (en aval)
- dissociation H₂O en OH

Détection du maser OH 1720 MHz

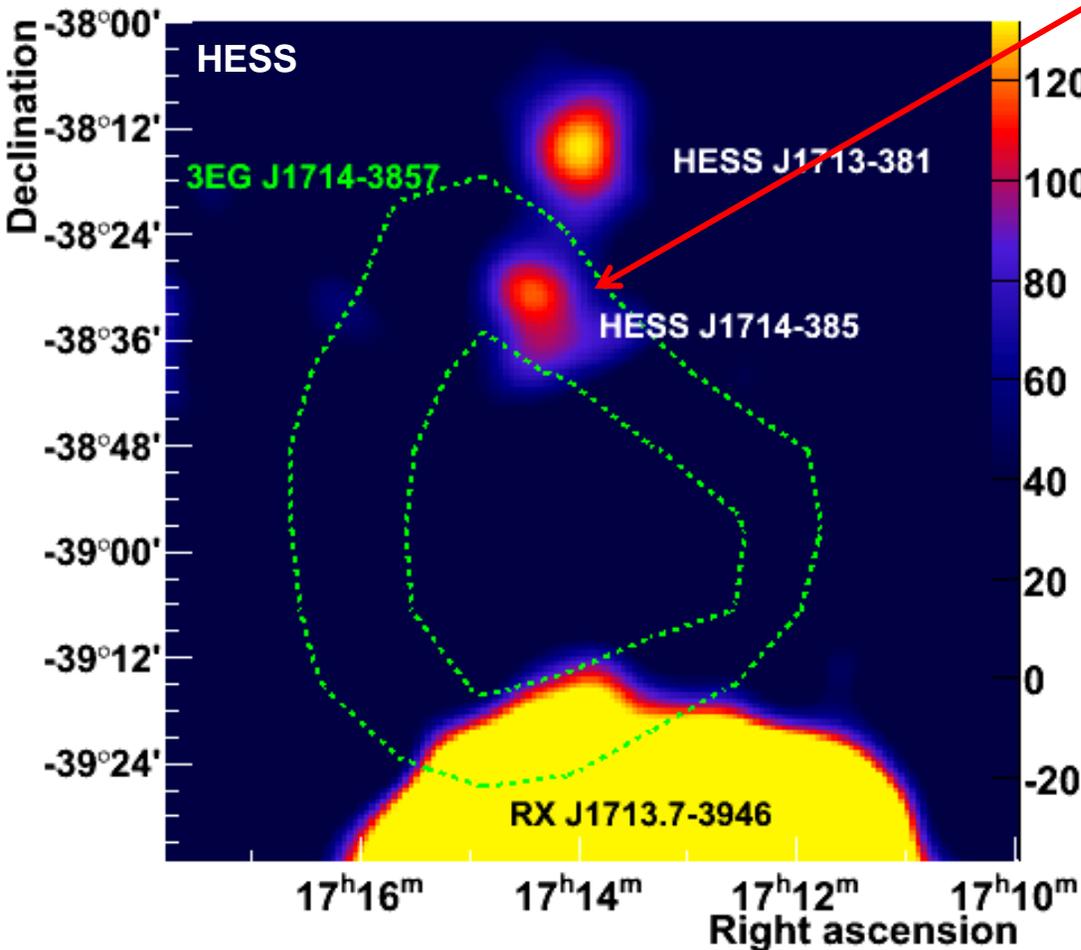
- forte suppression hors de ces conditions : pas de masers OH dans tous les chocs
- **MAIS ! détection => vraie interaction**
- pas d'associations fortuites à cause de distances imprécises
- Plusieurs relevés pointés sur les vestiges de SN
 - Frail et al. 1996, Green et al. 1997, Claussen et al. 1997, Koralesky et al. 1998, Yusef-Zadeh et al. 1999
- **18 vestiges émettent à 1720 MHz**
 - Sans doute d'autres à découvrir
- un programme d'observation gamma ciblé
- analyse du relevé systématique de HESS

W28 (SNR G6.4-0.1)



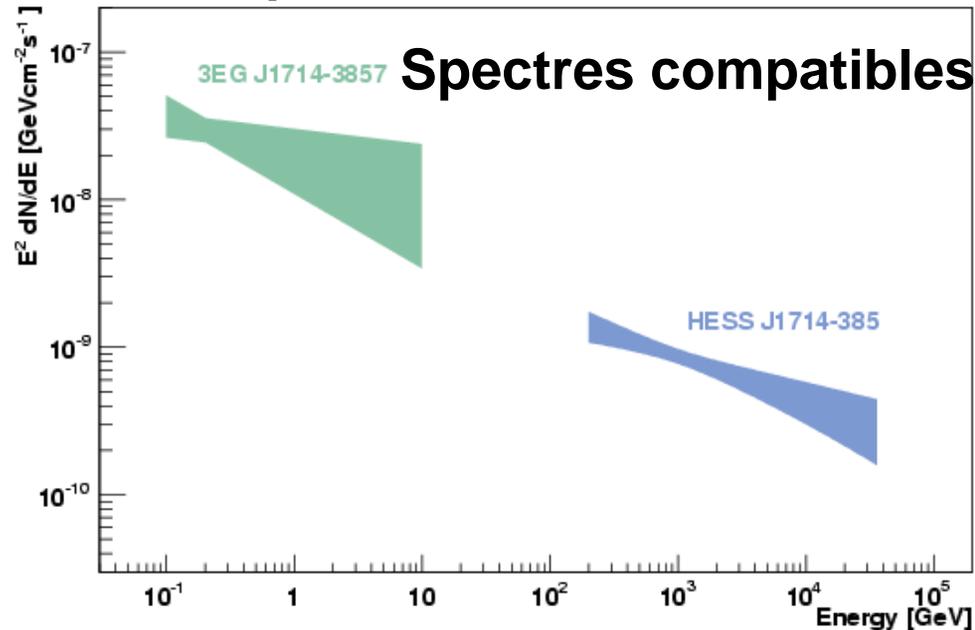
- **Champ de vue complexe en multi- λ**
 - Plusieurs vestiges
 - Régions de formation d'étoiles
 - Régions H_{II}
- **Signal Nord coïncide avec une source EGRET**
- **Interaction (masers OH) avec un nuage moléculaire dense vu en CO par les observations NANTEN**
- **Emission gamma Nord coïncide avec le nuage**
 - => **Energie compatible avec des RC accélérés par le vestige et interagissant avec le nuage**
 - => **Scénario hadronique probable**
 - **2% du flux du Crabe**

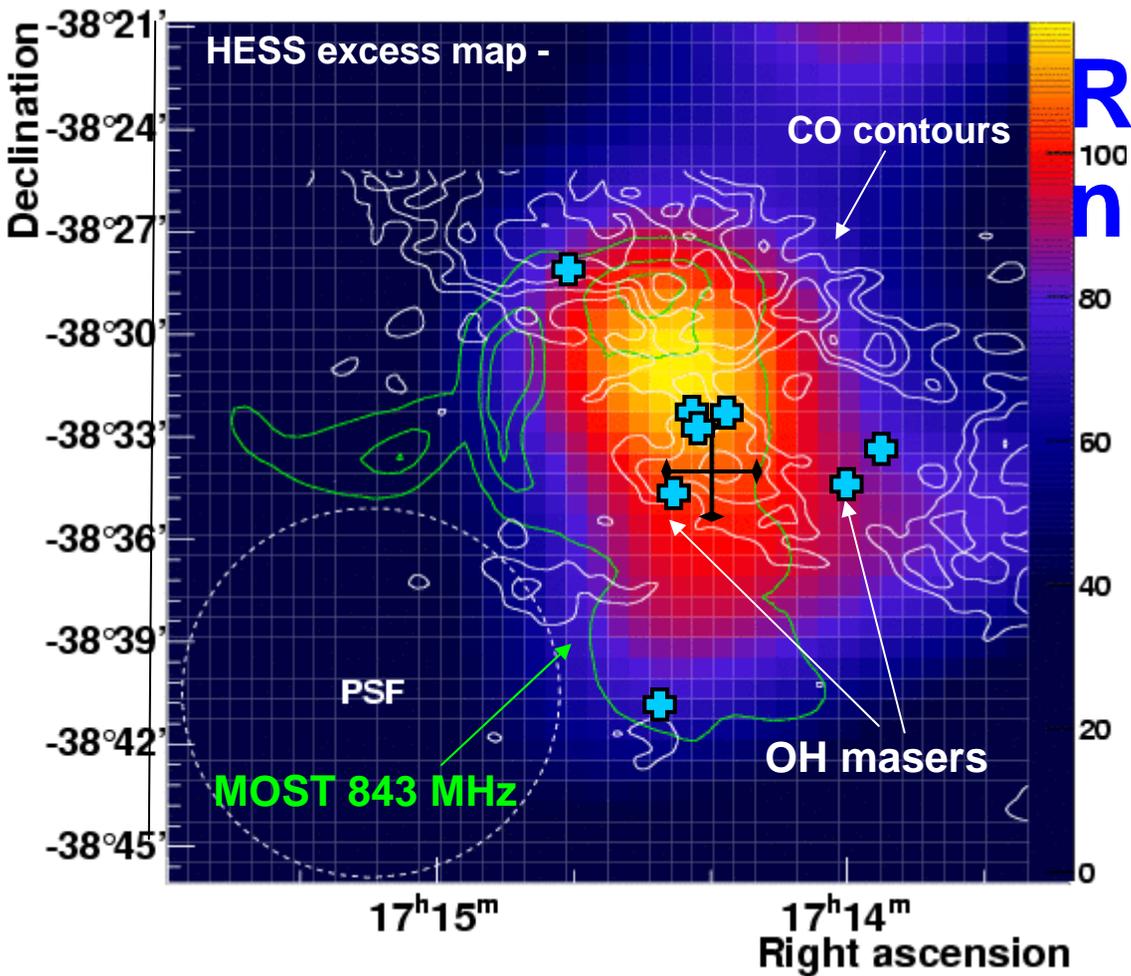
HESS J1714-385 & CTB 37A



- Découverte récente H.E.S.S.
 - Proche de RX J1713.7-3946
 - Coïncident avec SNR G348.5+0.3 (CTB 37A)
 - indice spectral : $\Gamma = 2.30 \pm 0.13$
 - Source étendue : $\sigma \sim 4'$
 - **3% du flux du Crabe**

- Contrepartie de 3EG J1714-3857?
Spectres compatibles

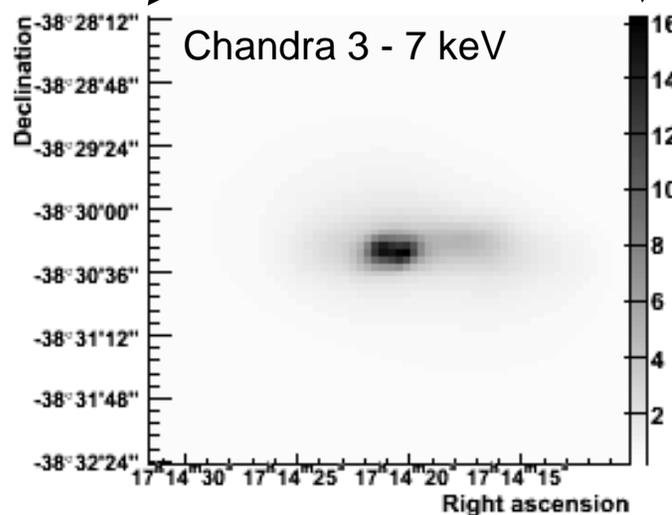
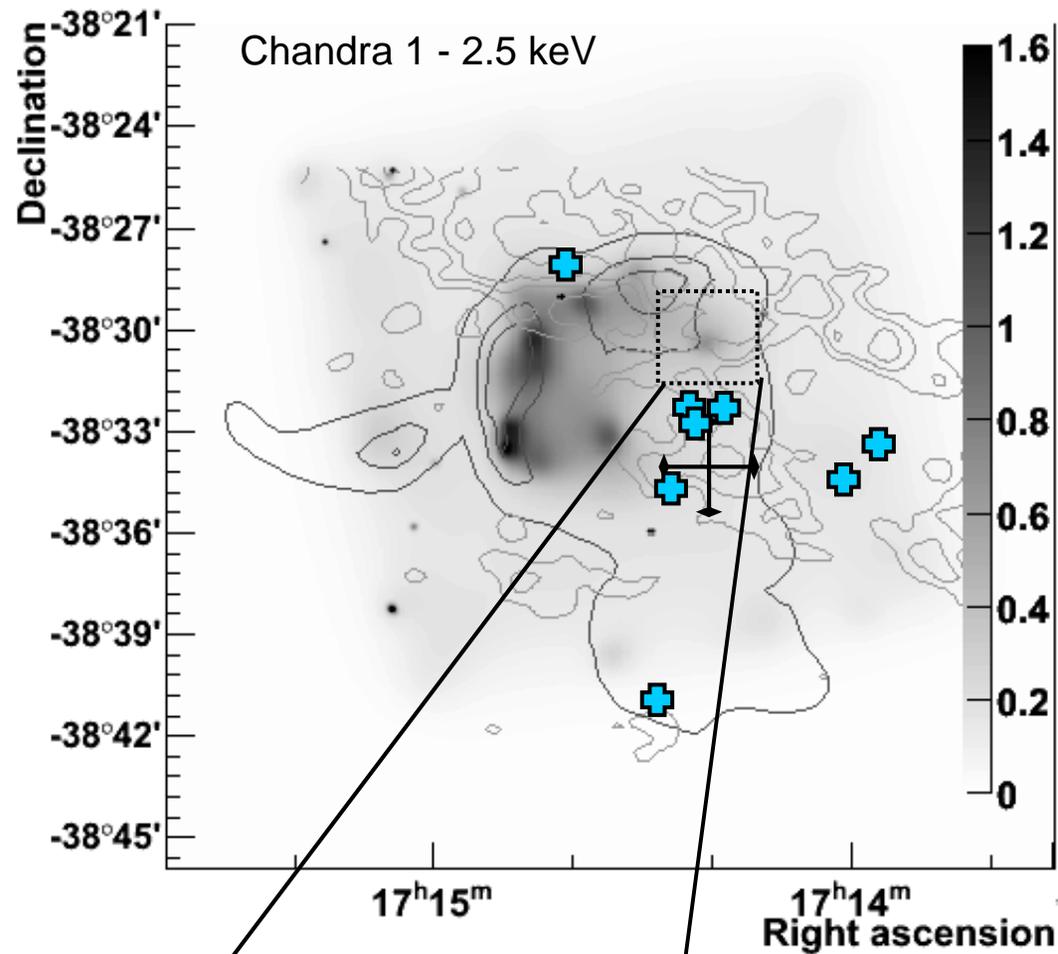




Rayons Cosmiques et nuages moléculaires ?

- Vestige interagit avec plusieurs nuages moléculaires
 - **+** Masers OH (1720 MHz)
 - Nuages moléculaires denses détectés dans la raie CO
 - Interactions hadroniques possibles
 - Flux γ compatible avec des RCs accélérés par CTB 37A
- => entre 4% et 30% de l'énergie d'explosion en RCs

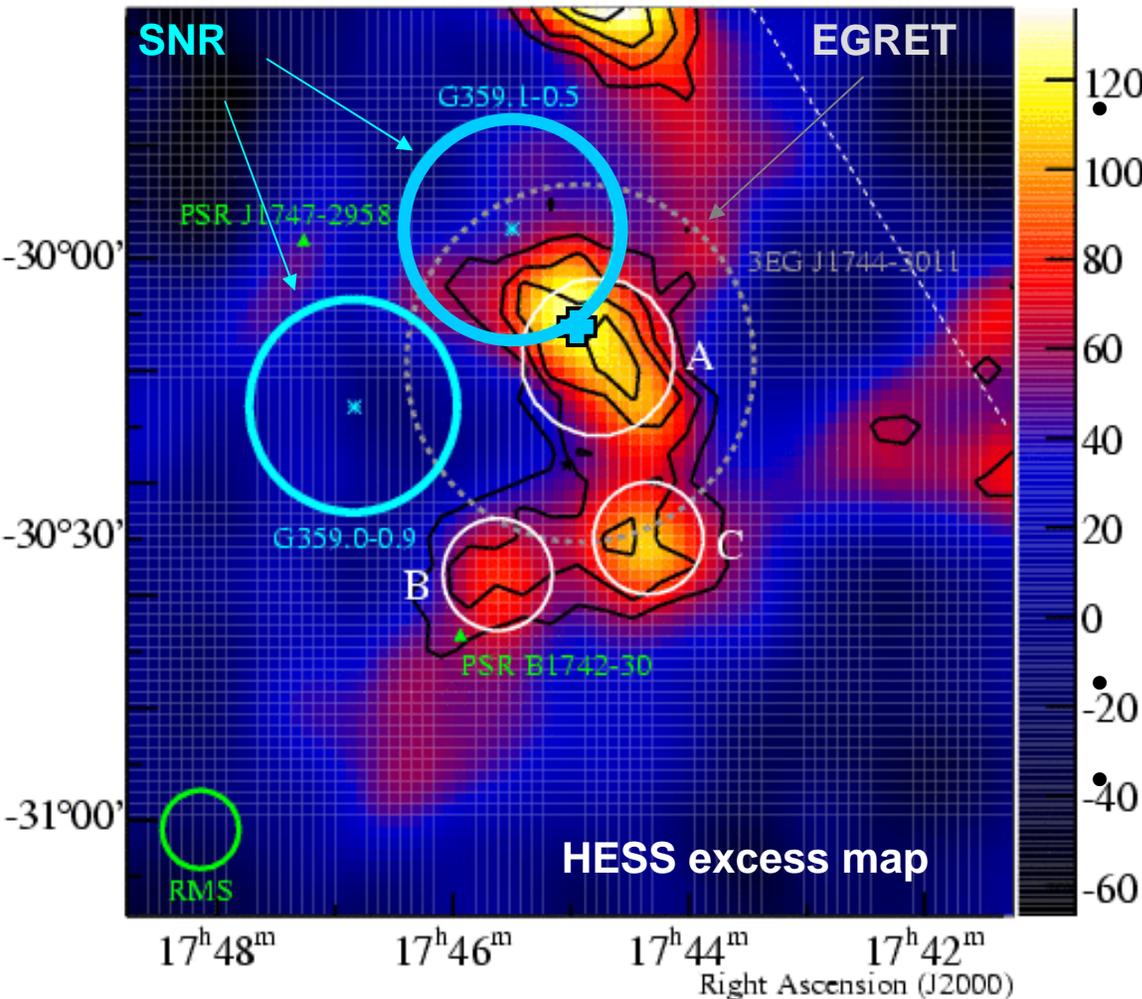
Aharonian et al.
Astron. Astrophys. 490 (2008) 685-693



Ou nébuleuse de pulsar ?

- Observations X Chandra & XMM-Newton
 - Emission thermique de l'intérieur du vestige
 - Candidat nébuleuse de pulsar découverte
 - Association possible avec CTB 37A
 - Luminosité X implique une décélération de rotation de 10^{37} erg/s, forte puissance
- \Rightarrow ~ 0.1% conversion en rayons γ
- \Rightarrow **Scenario leptonique possible**

HESS J1745-303



• Découvert par relevé galactique en 2004

– 2005 – 2007 : statistiques augmentées

⇒ morphologie complexe, probablement multiple

⇒ non identifié

• Power law of index $\Gamma = 2.71 \pm 0.1$

• Candidat pour la **partie A** ?

– source EGRET sans contrepartie

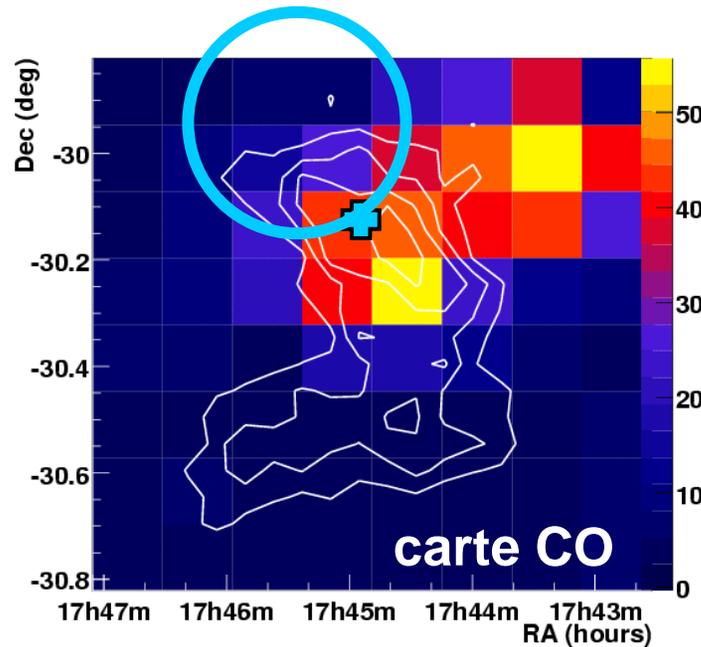
(contour 95% CL)

– flux **EGRET** compatible

– **pas de** contrepartie XMM

– **1.5% du flux du Crabe**

RCs accélérés par G359.1-0.5 ?



Aharonian et al. A&A 483, 509A (2008)

- SNR G359.1-0.5

abs. H1 => près du CG : $7,6 \pm 0,4$ kpc

- Choc interagit avec un nuage

- masers OH à 1720 MHz sur le bord du vestige
- observations CO [-100 km/s, -60 km/s], comp. avec CG, coïncidentes avec la source γ

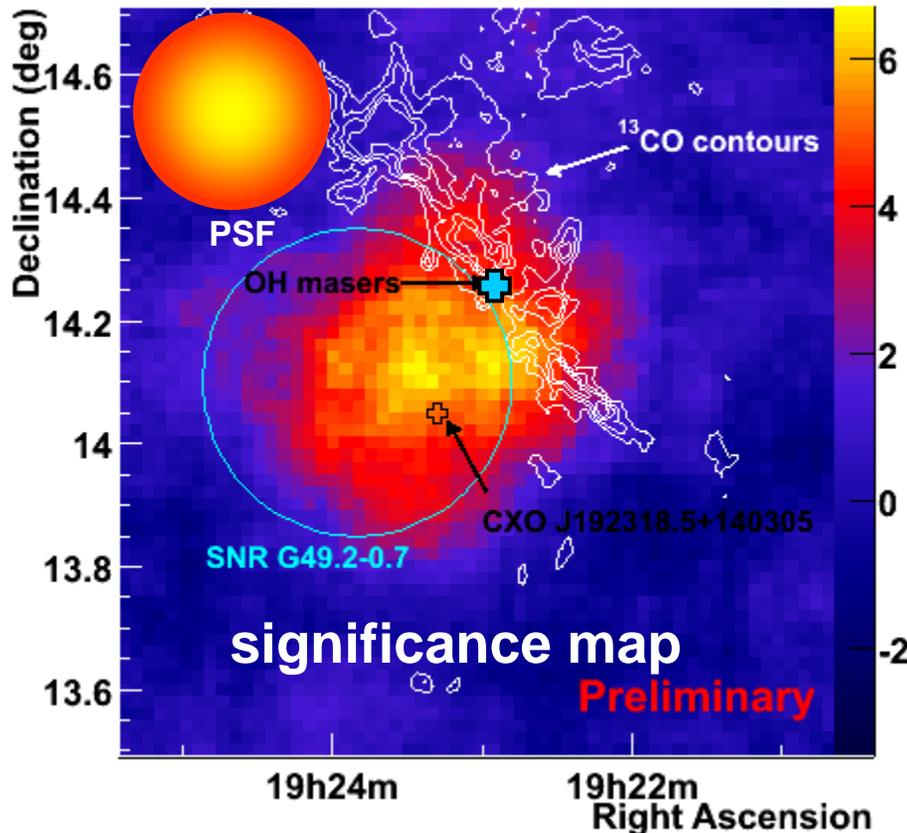
- Interaction hadrons-nuage ?

⇒ 15% à 60% de l'énergie de l'explosion en rayons cosmiques

Un nouveau candidat: HESS J1923+141

- relevé 2007 + observations 2008

- 16.5 heures live-time
- Significativité pic de 6.7σ
(suréchantillonnage $0.22''$)
⇒ 4.4σ après essais



- nuage à 60-80 km/s ^{13}CO (DENSE !)
- maser à 70 km/s
- Source plus large que la PSF

3 % du flux du Crabe

⇒ Découverte d'une nouvelle source γ THE par H.E.S.S.

HESS J1923+141: contreparties possibles

- Etude morphologique en cours
- Plusieurs contreparties possibles
 - Nébuleuse de pulsar Chandra CXO J192318.5+1403035
 - Luminosité X implique une décélération de rotation
~ 3×10^{36} erg/s à 6 kpc
=> conversion < 0,1 % de cette énergie en rayons gamma
 - Nuage moléculaire choqué par SNR G49.2-0.7
 - Masers OH 1720 MHz coïncident avec le bord du vestige
 - Nuage moléculaire allongé coïncident avec le bord du vestige et les masers
=> dans le sens d'un scénario hadronique

=> nouvelle source H.E.S.S. coïncidente un vestige associé à un maser OH

Résumé et perspectives

- De nombreux vestiges de SN sont des sources gamma de THE
- Quatre observés par HESS sont en interaction avec un nuage moléculaire
- Des masers OH à 1720 MHz assurent la réalité de l'interaction
- Des sources EGRET correspondent
- Les bilans énergétiques sont compatibles avec une accélération de hadrons
- Une nébuleuse de pulsar est souvent présente aussi => leptons ?
- Manque de résolution angulaire pour distinguer
- Toutes ces sources ont un flux faible et sont étendues : qqes % Crabe
- Progrès futurs :
 - HESS 2 : sensibilité et résolution x 2
 - EGRET => Fermi
 - CTA : sensibilité x10 et résolution x 4
- Des dizaines de cas => une cartographie du flux de cosmiques dans les vestiges ...

