

# Recherche d'accélérateurs de rayons cosmiques galactiques avec HESS

Armand Fiasson, LPTA



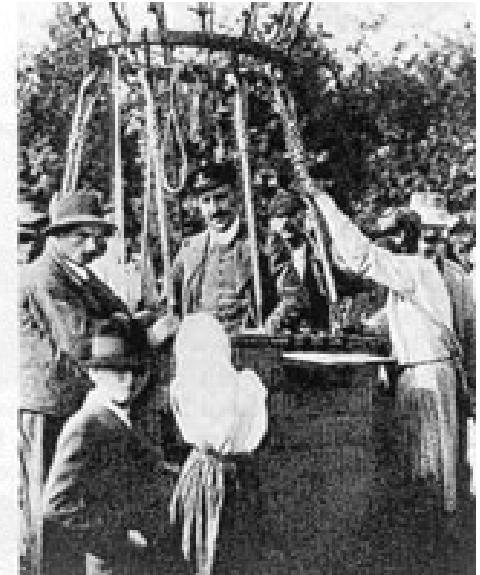
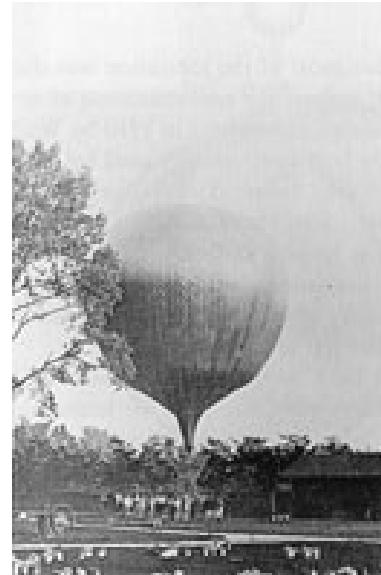
# Sommaire

- **Rayons cosmiques: énergie et origine**
- **Le photon gamma, un messager 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!



Victor Hess - 1912

DR

- 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

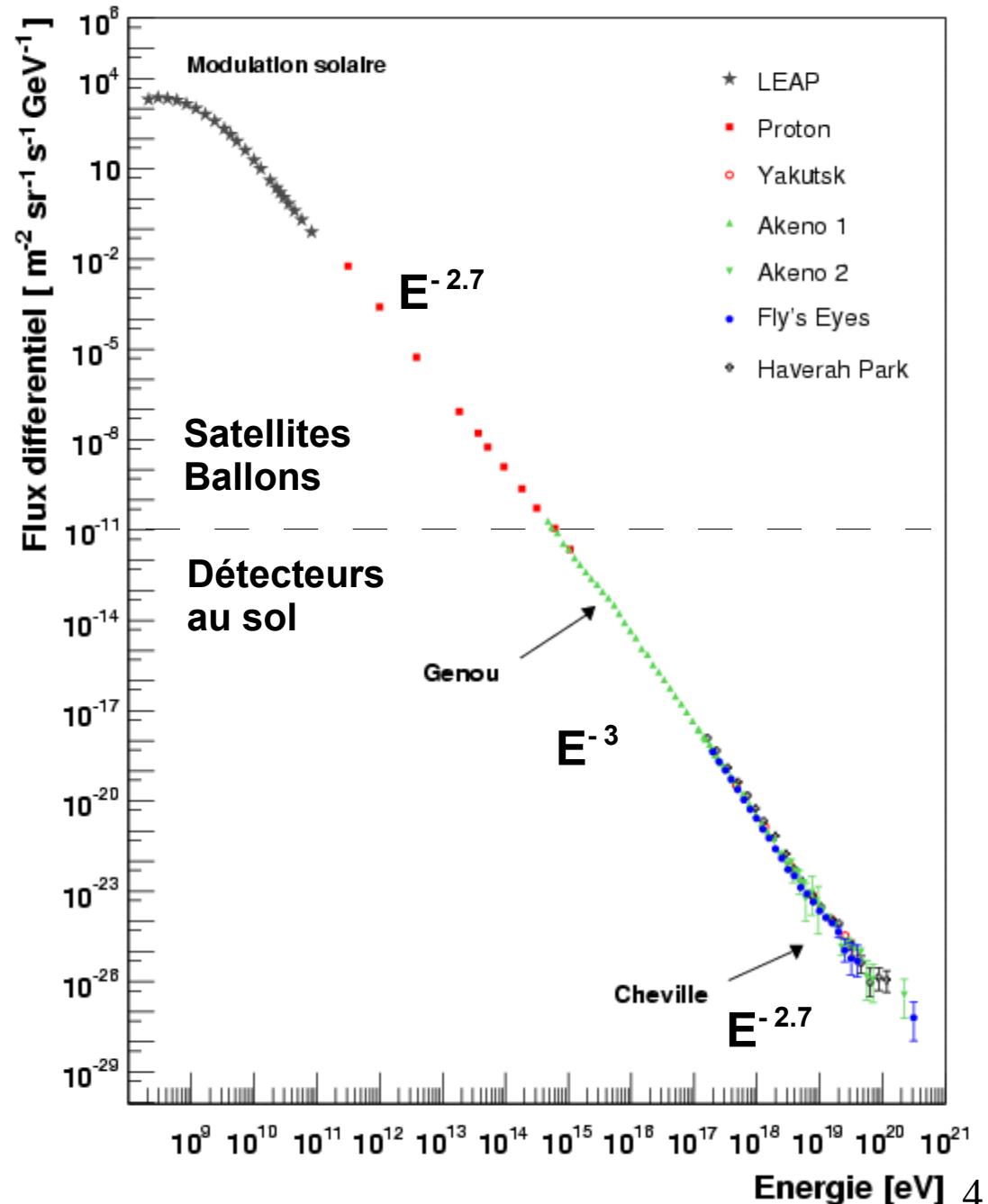
- => d'où viennent-ils?



Aiguille des cosmiques

# Spectre en énergie

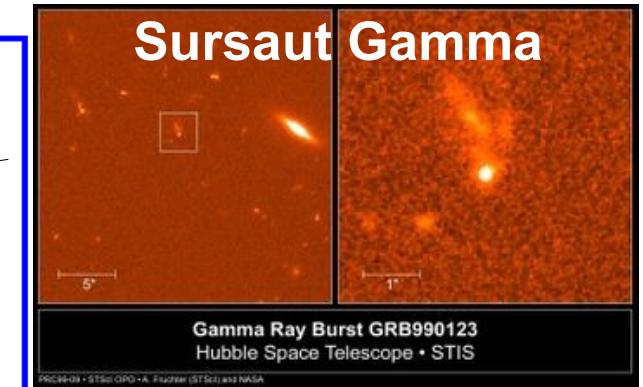
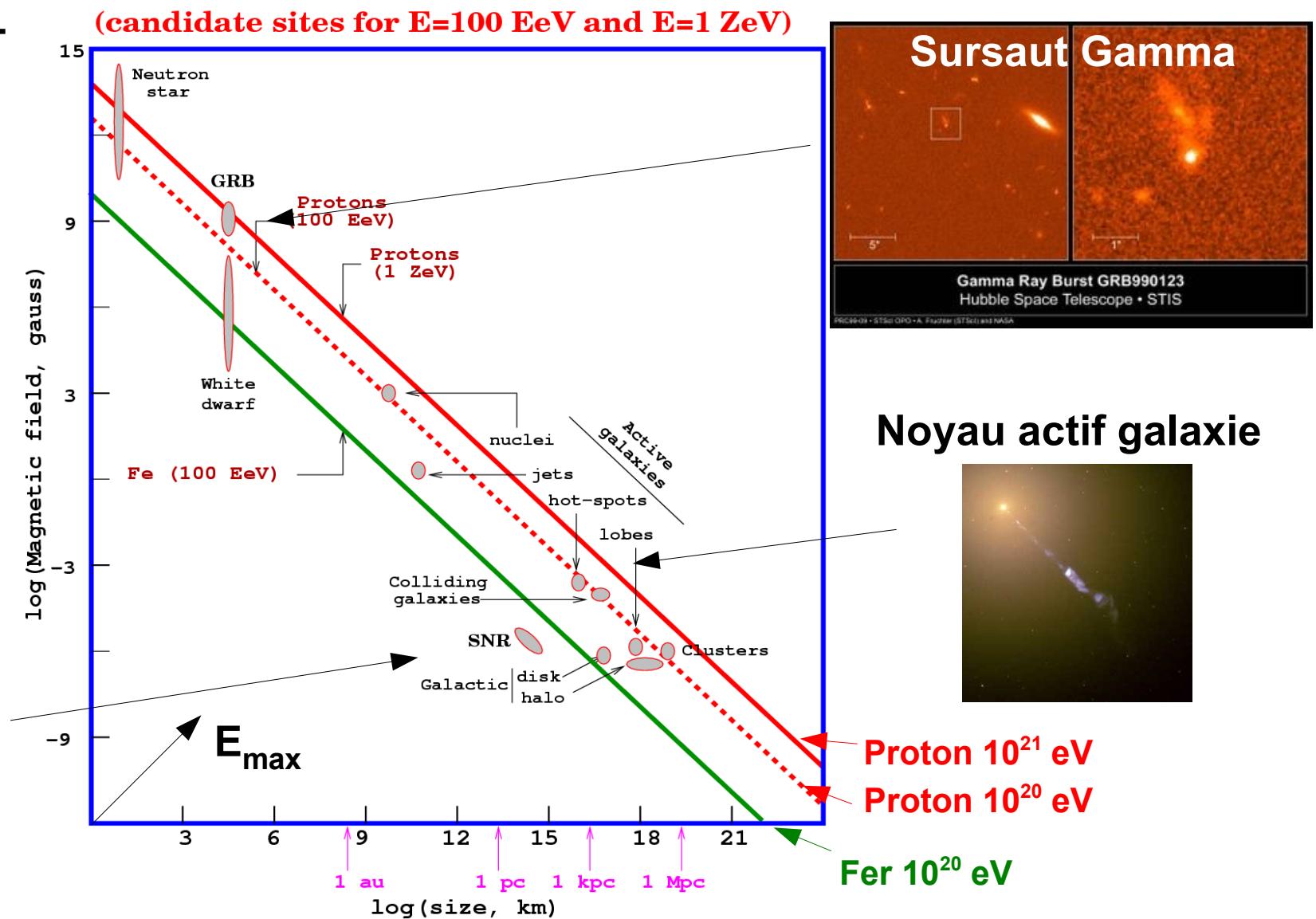
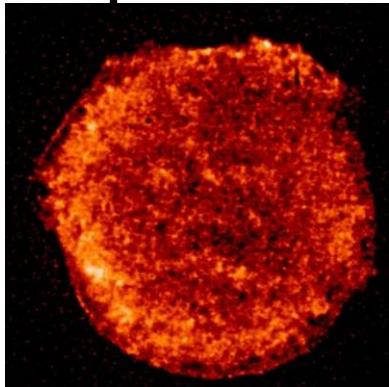
- Différentes méthodes d'observation
  - Satellites & ballons à basse énergie
  - Détection au sol à plus haute énergie (gerbes atmosphériques)
- Spectre en loi de puissance
  - Plusieurs cassures
  - => Origine différente
  - Limite de l'accélération
  - Transition entre origine



# Candidats potentiels

- Argument simple: Confinement dans une zone d'accélération  
 $\Rightarrow E_{\max} \sim Z \cdot B \cdot L$

Vestige de supernova

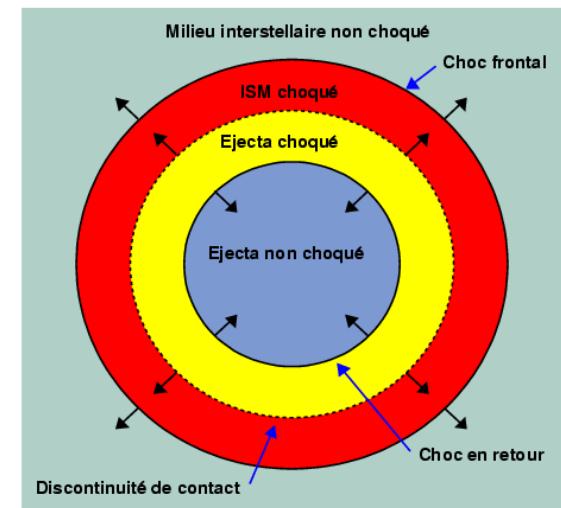
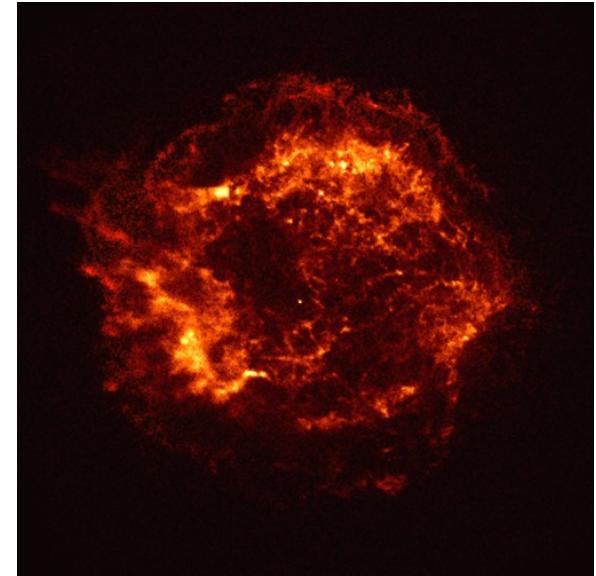


Noyau actif galaxie



# Rayons cosmiques galactiques

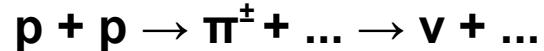
- SNe expliquerait le flux de RC au sein de la Galaxie
  - Taux  $\sim 1$  SN / 30 ans
  - $\sim 10\%$  de conversion de l'énergie d'explosion en rayons cosmiques
- Accélération par onde de choc
  - => Passages répétés au niveau du choc
  - => Diffusion par les perturbations magnétiques de part et d'autres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



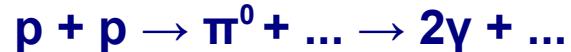
# Démarches expérimentales

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

- Neutrinos



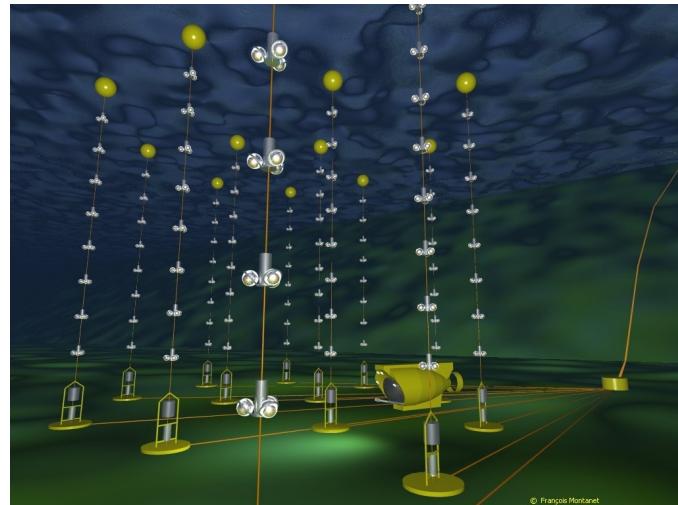
- Rayons gamma



→ Produits de l'interaction de particules accélérées

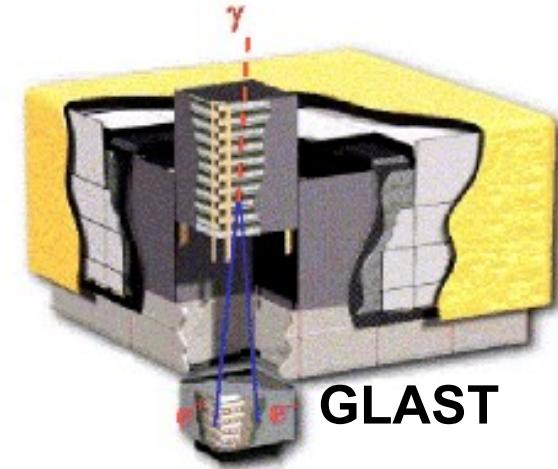
=> Photons au TeV : Indiquent la présence de particules  $E > 1$  à 10 TeV

=> Idéal pour détecter les accélérateurs dans la Galaxie

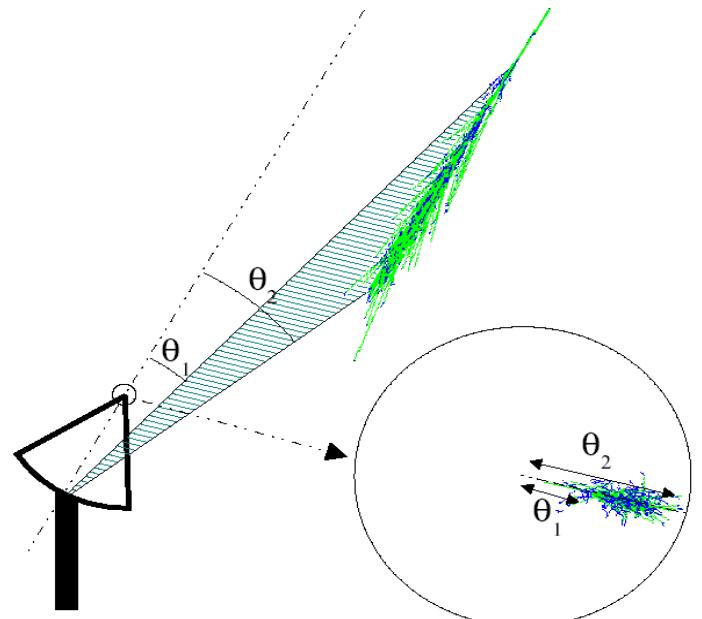
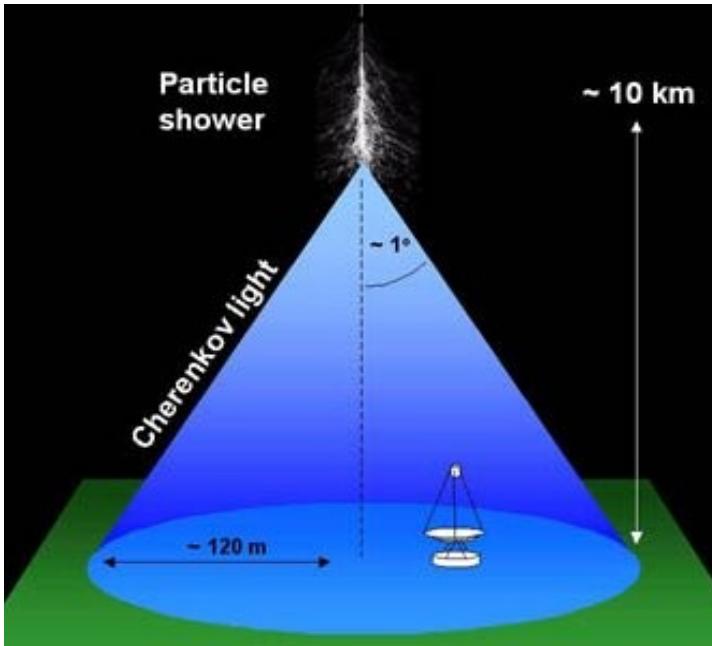


# Astronomie gamma

- 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 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

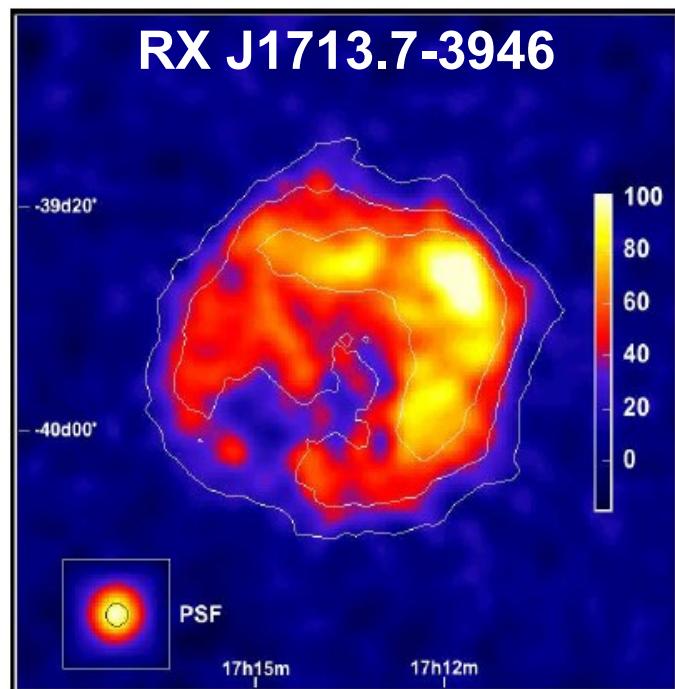
# Les télescopes de HESS

- 4 télescopes de 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

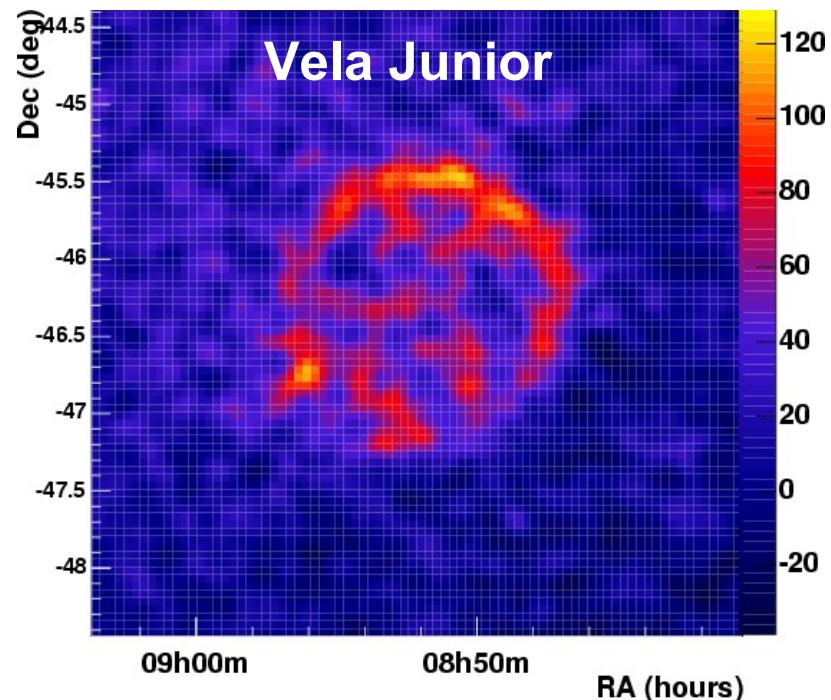


# Observations de vestiges de supernova

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



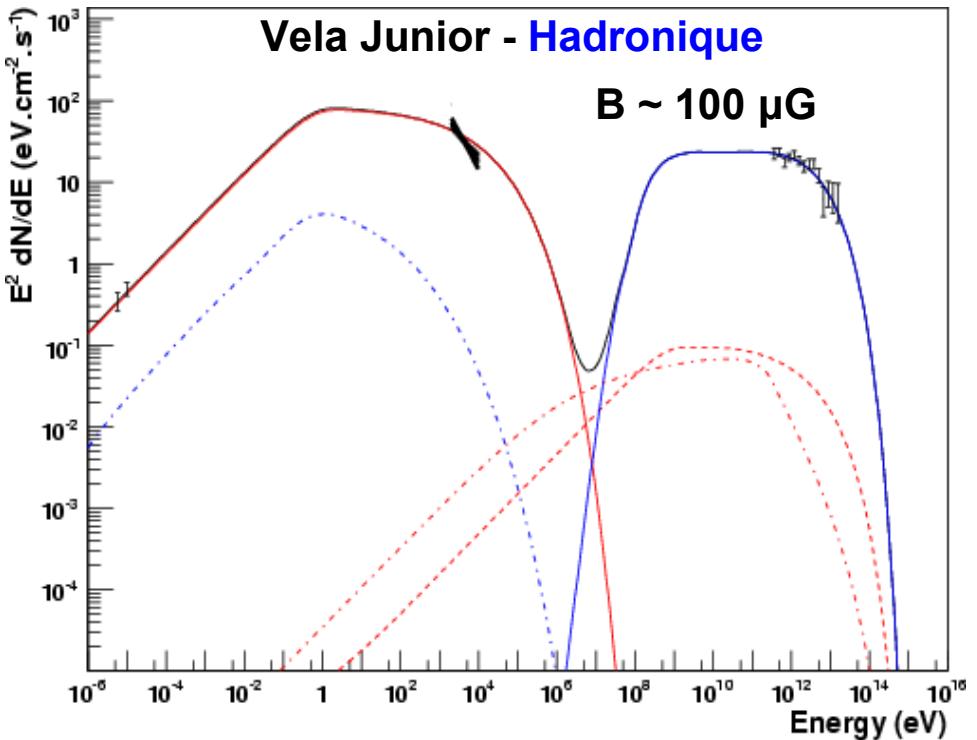
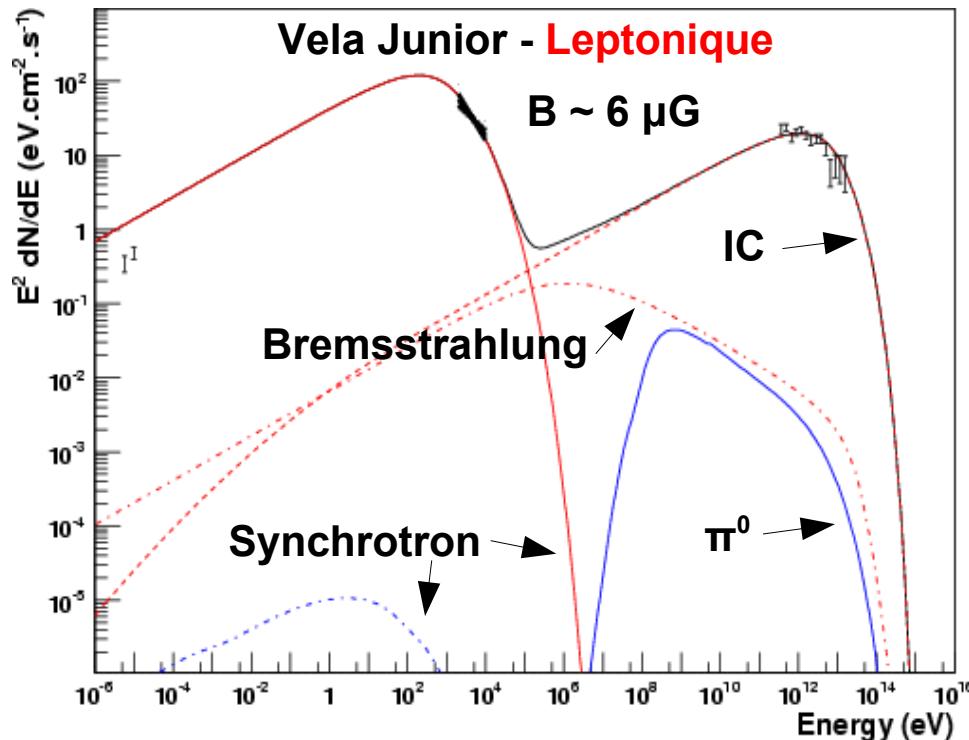
Aharonian et al. A&A 464, 235 (2007)



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



- 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

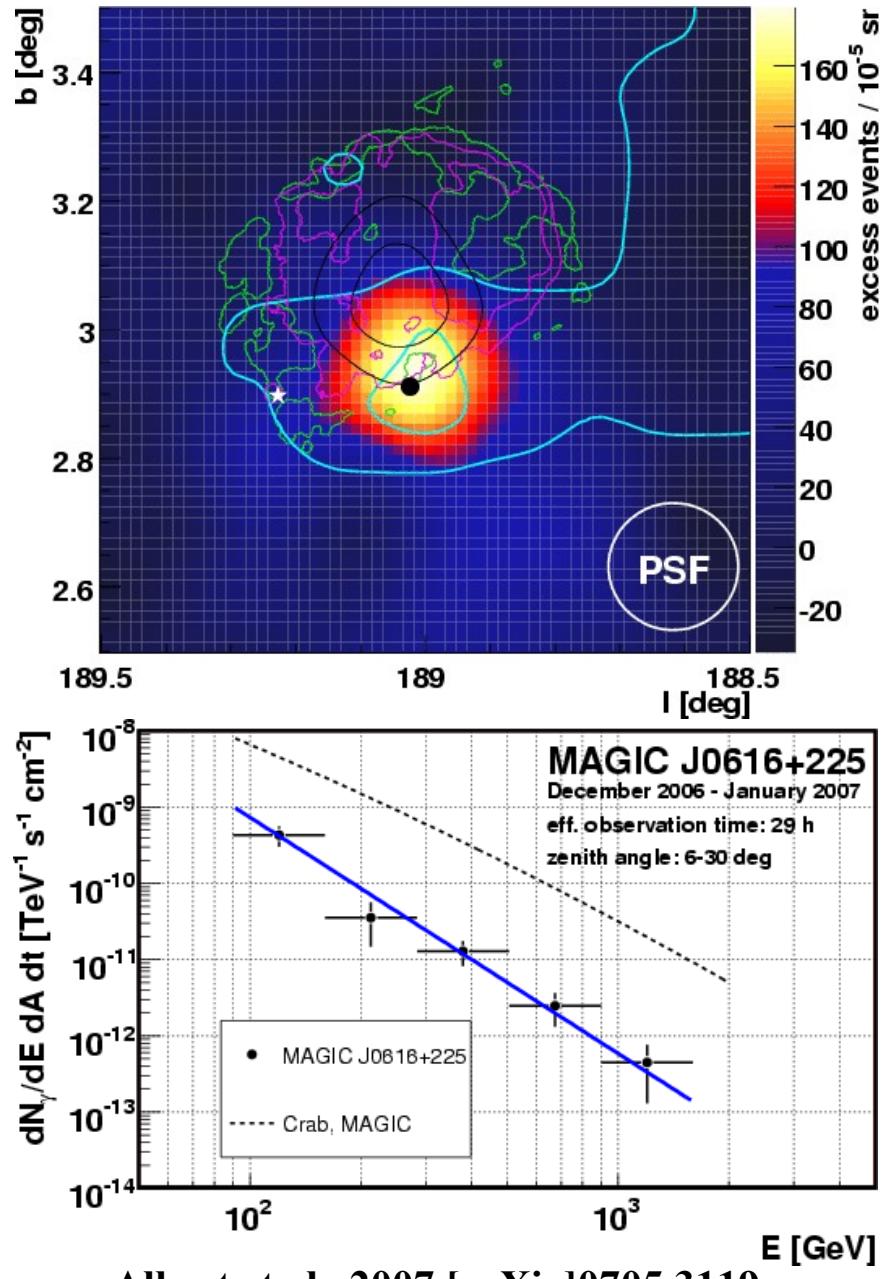
# Associations accélérateur - cibles

- 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 ( $O_1 + H_2 \rightarrow H_2O$ , ...)
    - 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 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

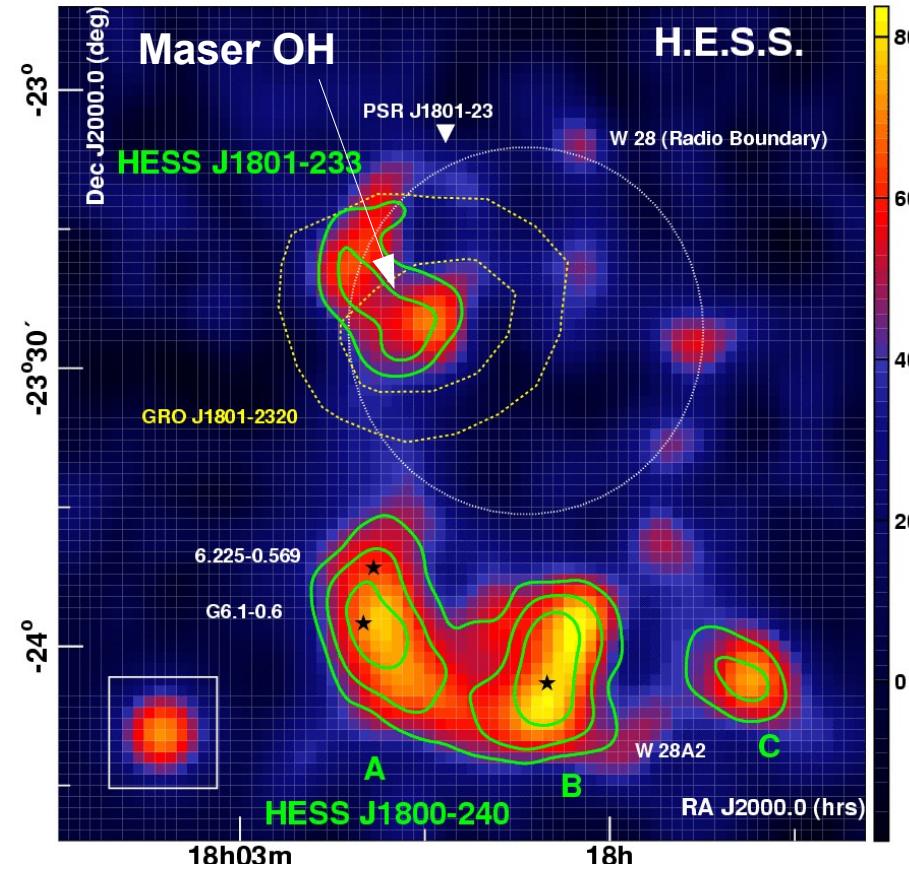


Albert et al. 2007 [arXiv]0705.3119

# Région de W28

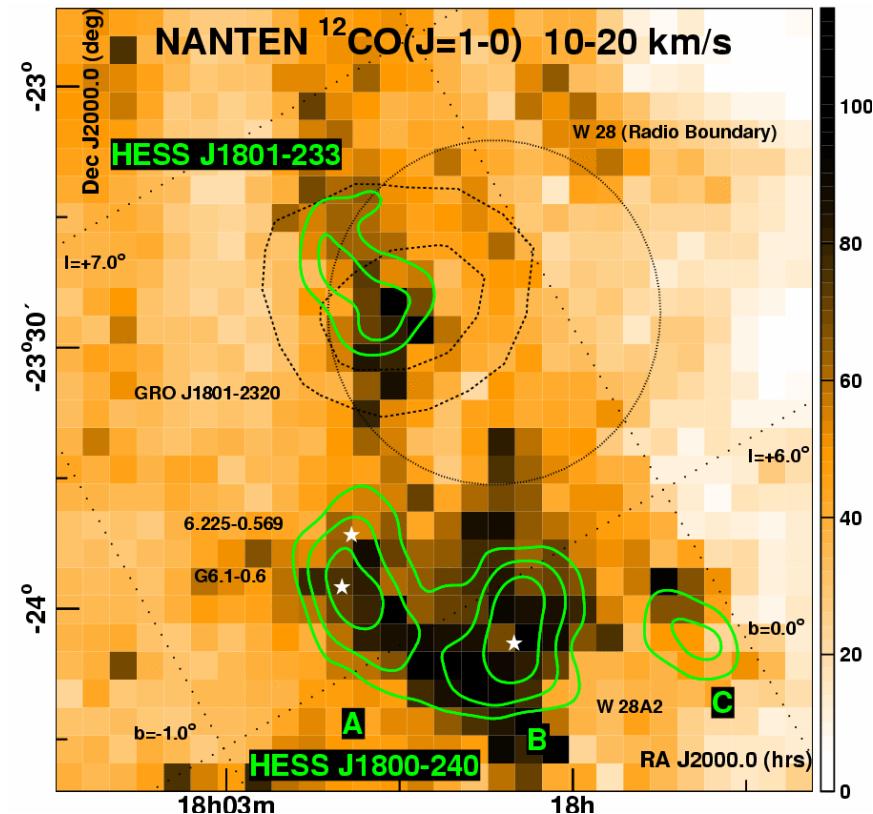
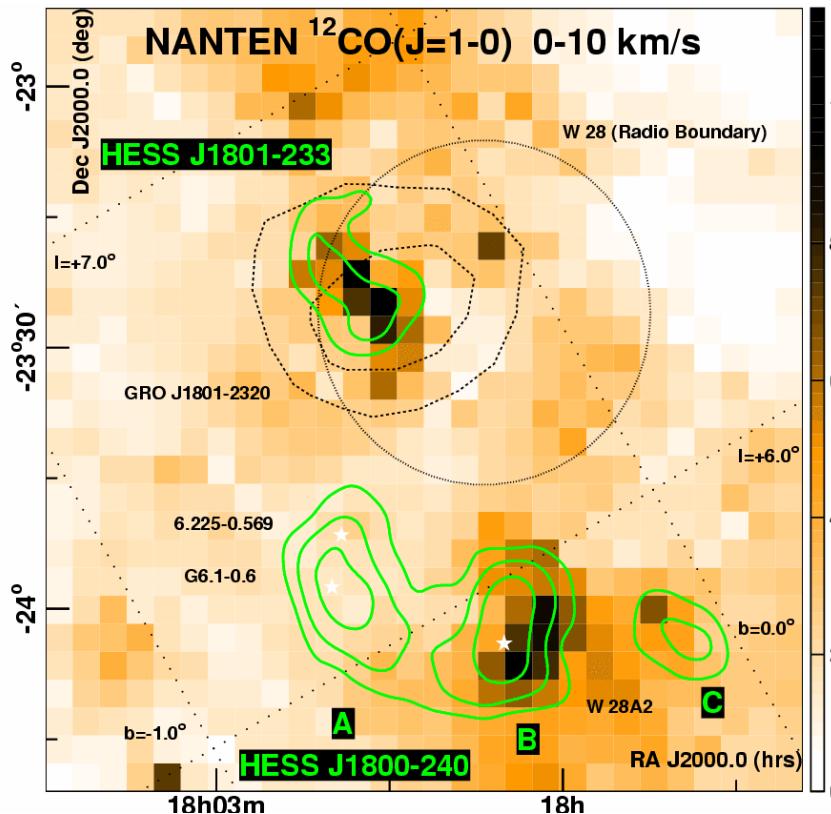
- **Région complexe**
  - Un reste de supernova proche
  - Nuages moléculaires choqués
    - Présence de masers OH
  - Source EGRET (GeV) coïncidente avec ces nuages

=> 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

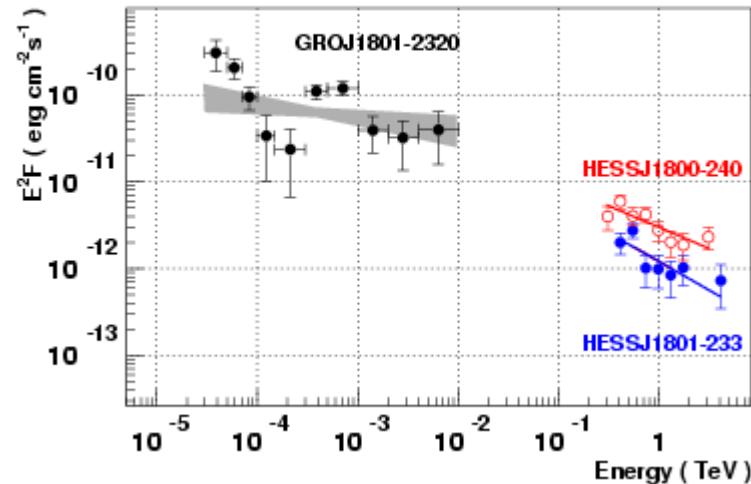


Aharonian et al. [astro-ph] 0801.3555

# Région de W28

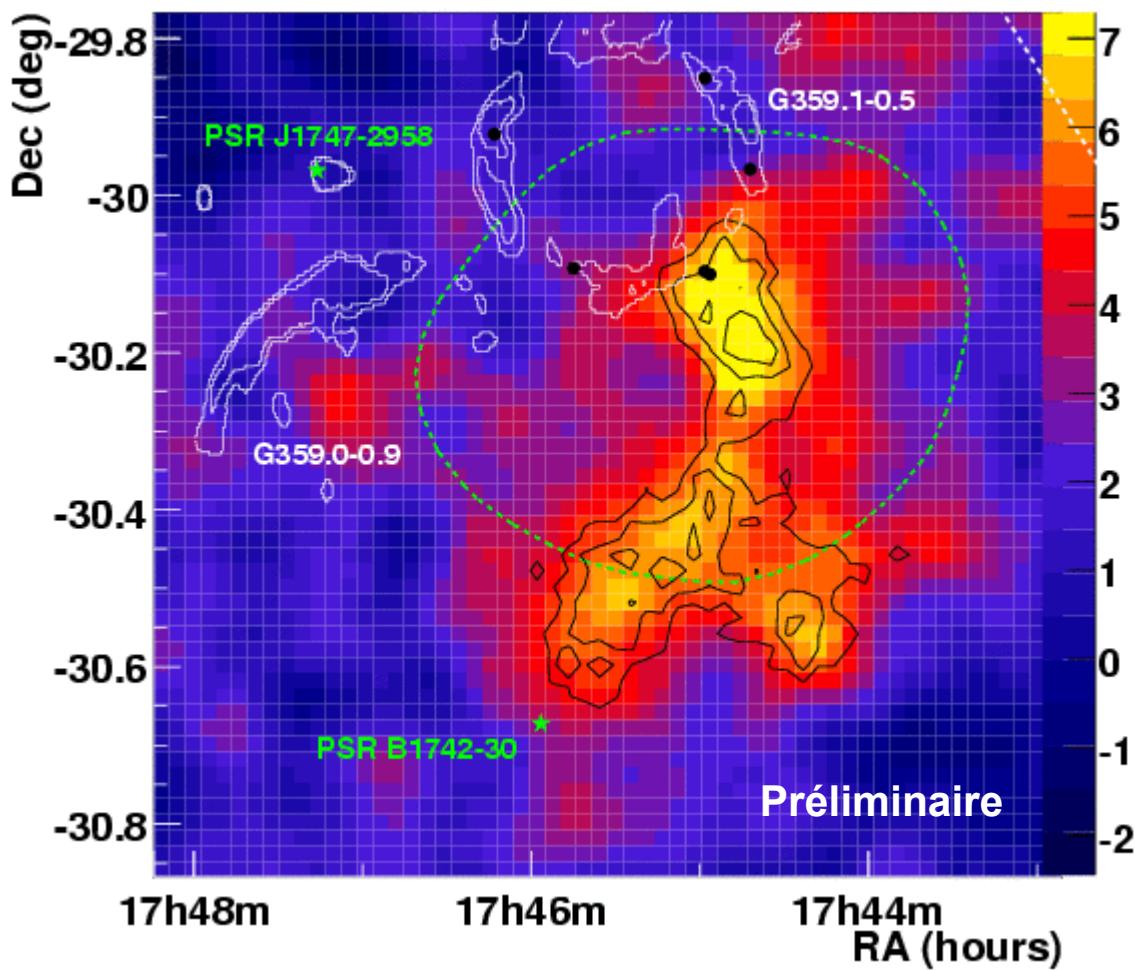


- Emission corrélée à la densité de matière
- Scénario hadronique probable
- Densité de rayons cosmiques impliquée en accord avec l'accélération par le reste de SN



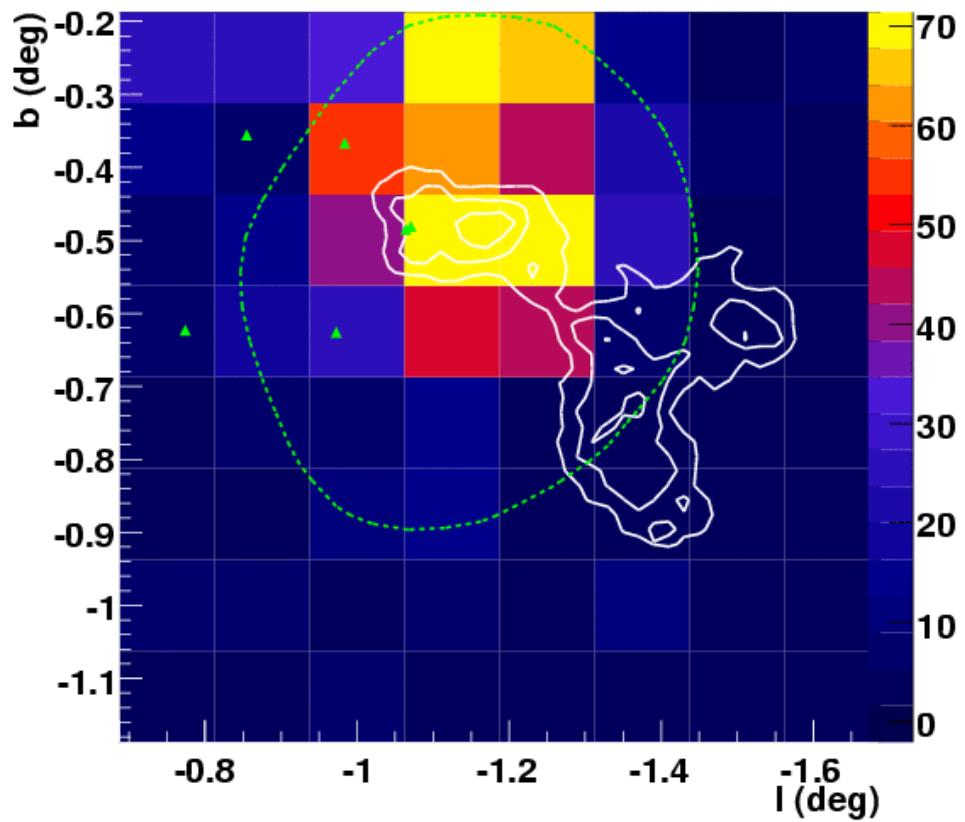
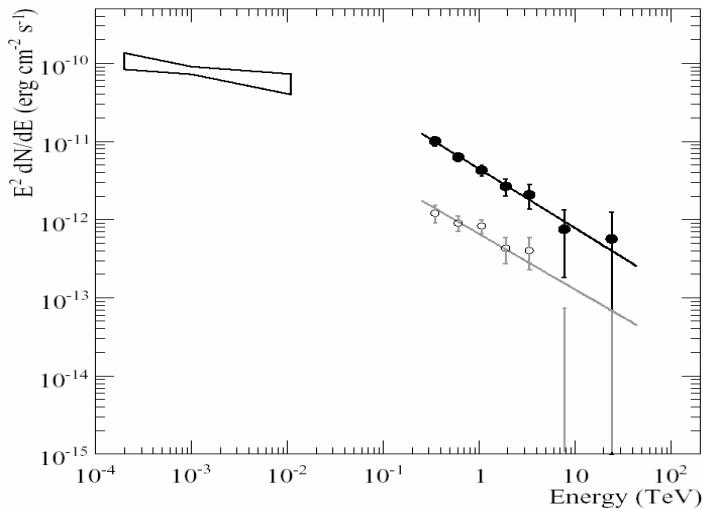
# SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

- 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



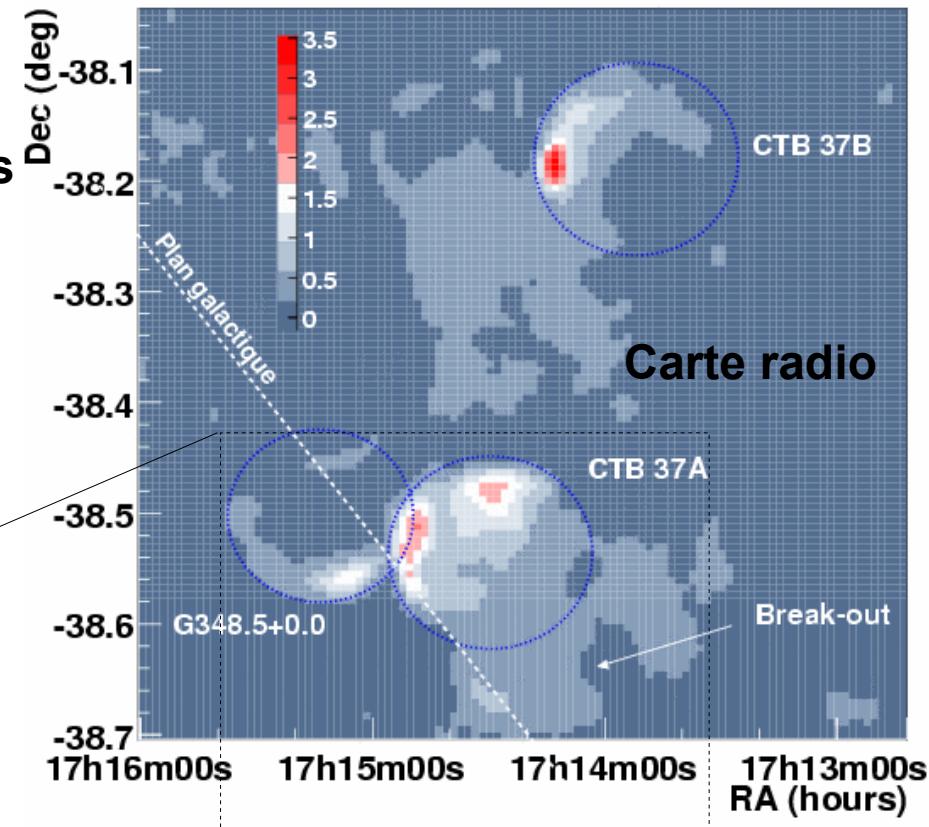
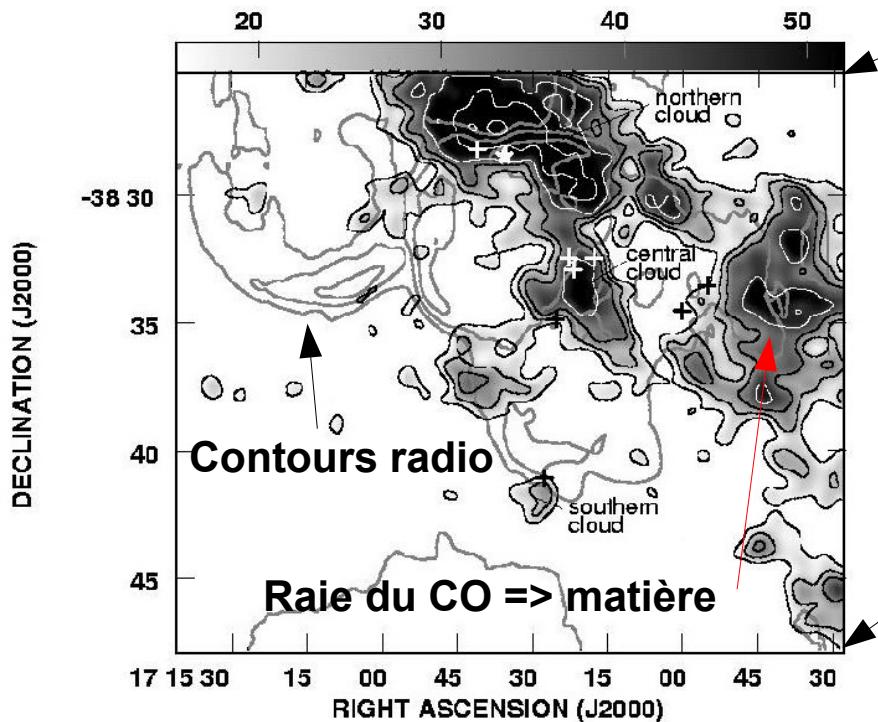
# SNR G359.1-0.5 & HESS J1745-303

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



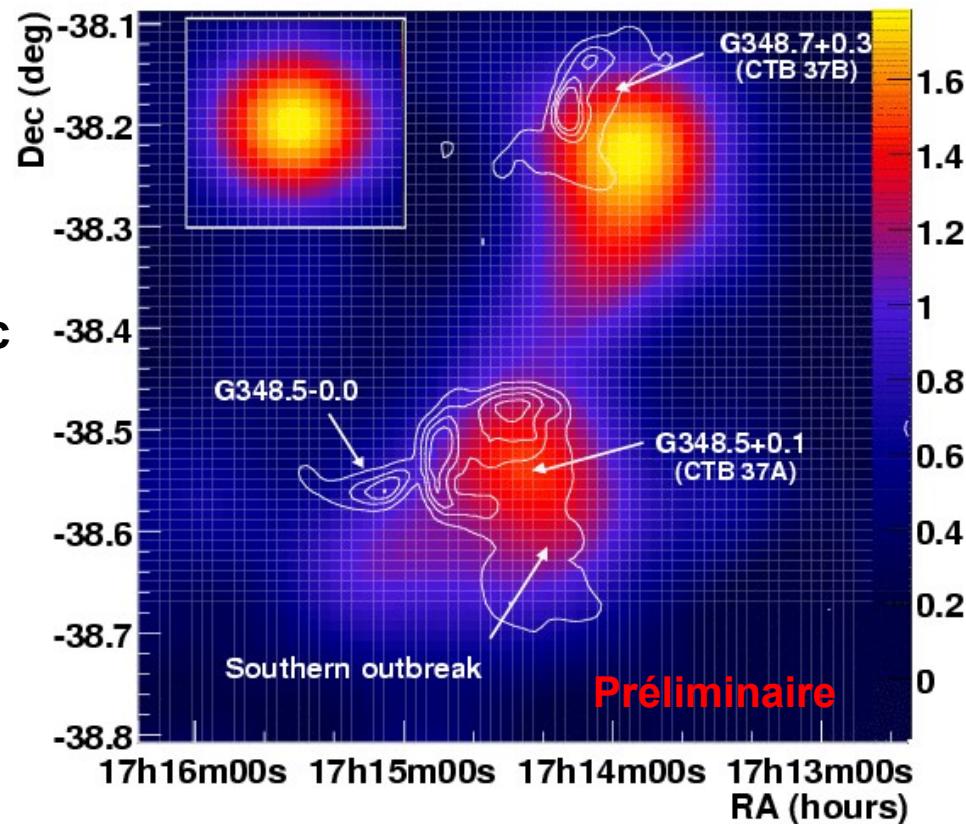
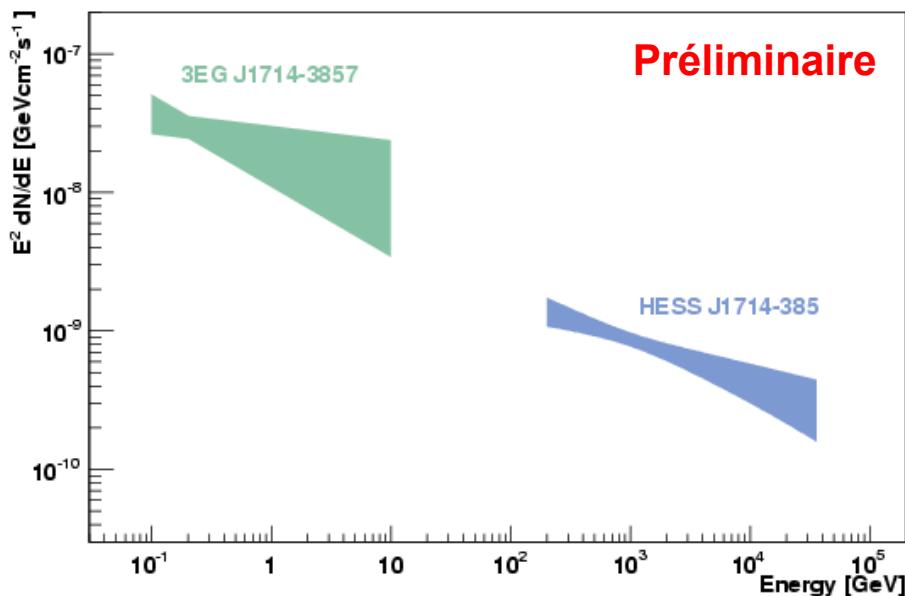
# Complexe de SNR CTB 37

- 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



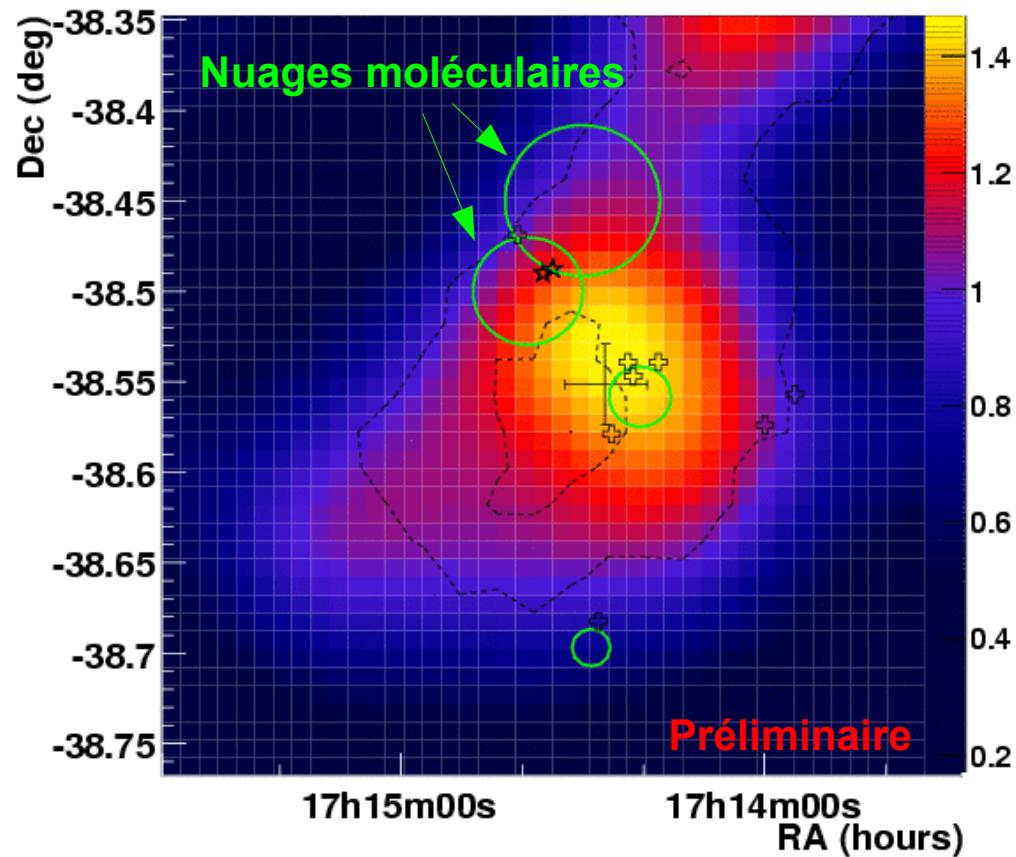
# Deux sources HESS

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



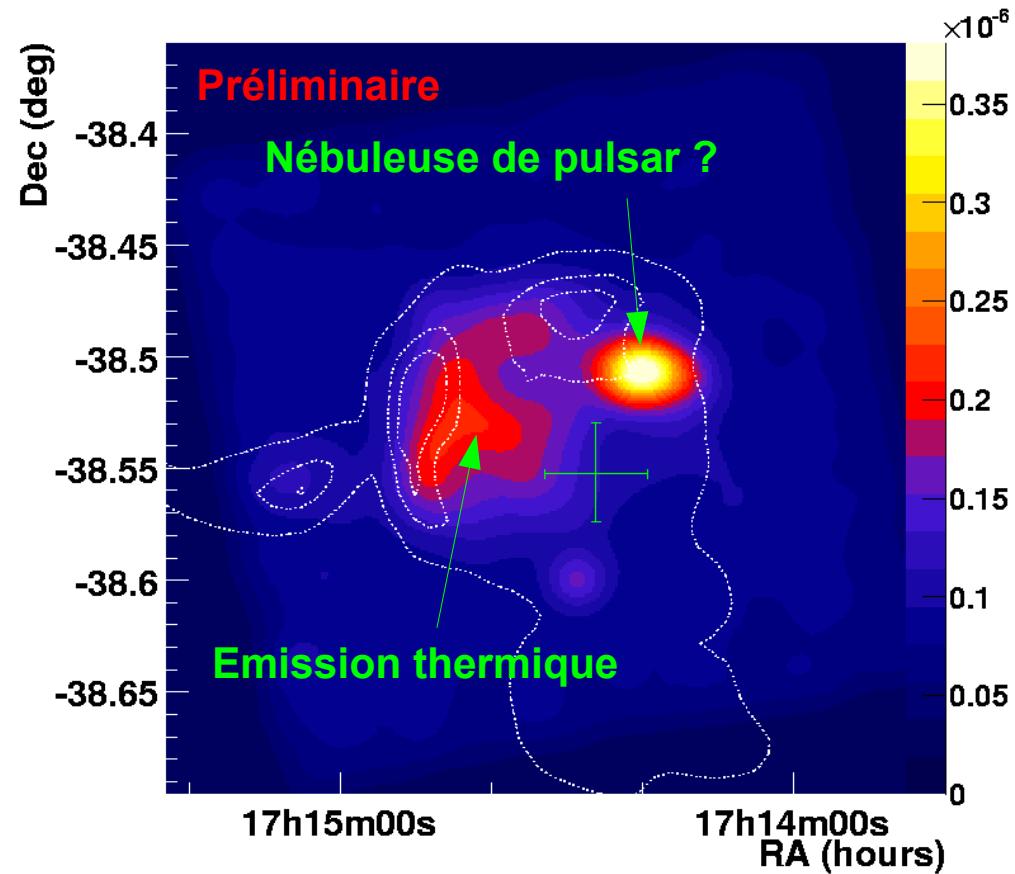
# CTB 37A & HESS J1714-385

- 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?