



Les nuages moléculaires en astronomie gamma

Armand Fiasson
Post-doc
LAPP - Annecy le vieux

Sommaire

- **Introduction**
 - Les rayons cosmiques
 - L'astronomie gamma: quelle utilité pour leur étude
- **Observations de nuages moléculaires dans le voisinage de vestiges de supernova**
 - Utilité des nuages moléculaires
 - Quelques associations détectées au TeV
- **Le fond diffus gamma galactique**
 - Modèle de propagation
- **Conclusion & perspectives**

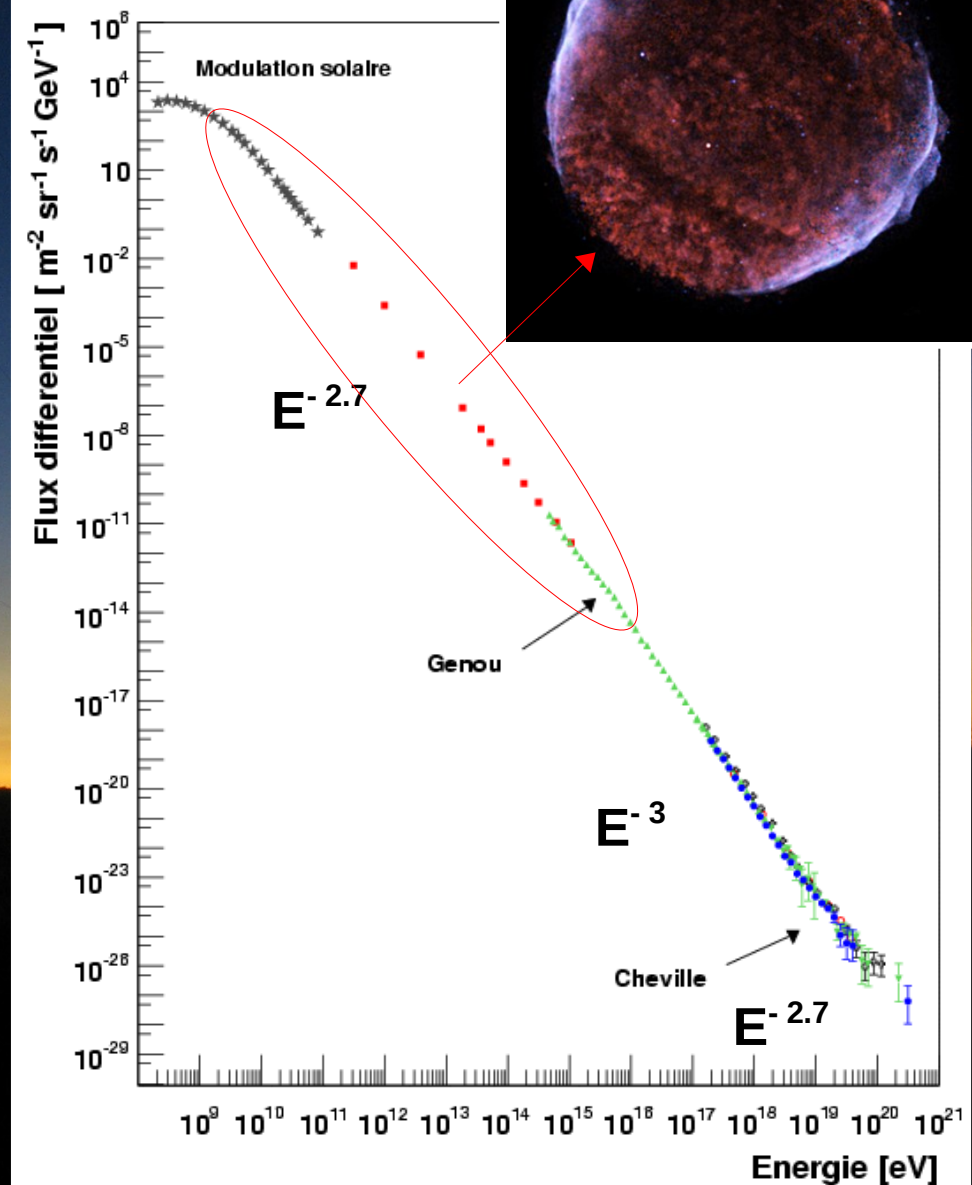
Les rayons cosmiques

- **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**

- $P_{RC} \approx \epsilon_{RC} \times V_{gal} / t_{échap} \approx 10^{41} \text{ erg/s}$
- Supernova $\approx 10^{42} \text{ erg/s}$
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 $> 1 \text{ TeV} \Rightarrow \sim 6 \text{ photons m}^{-2} \text{ an}^{-1}$
 - => Détection au sol

Hadrons

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

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

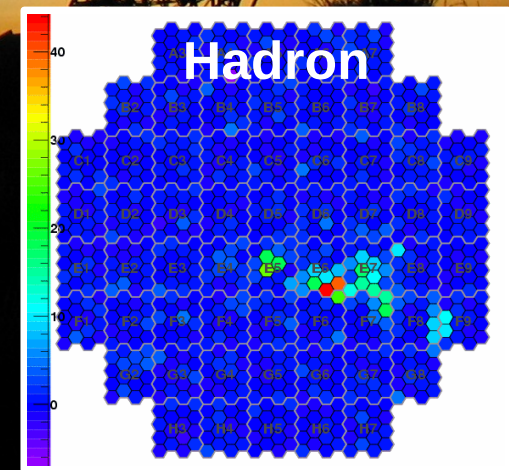
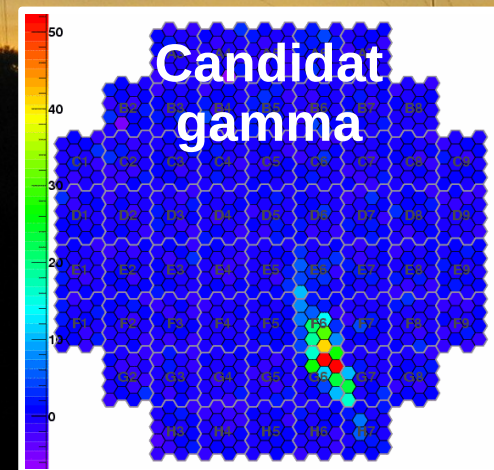
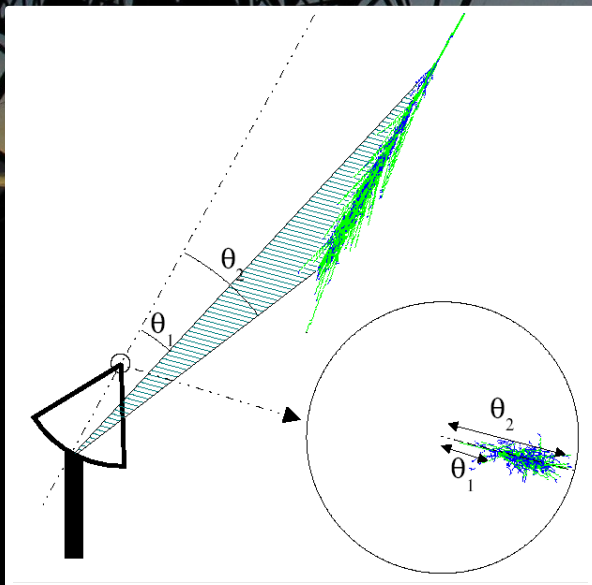
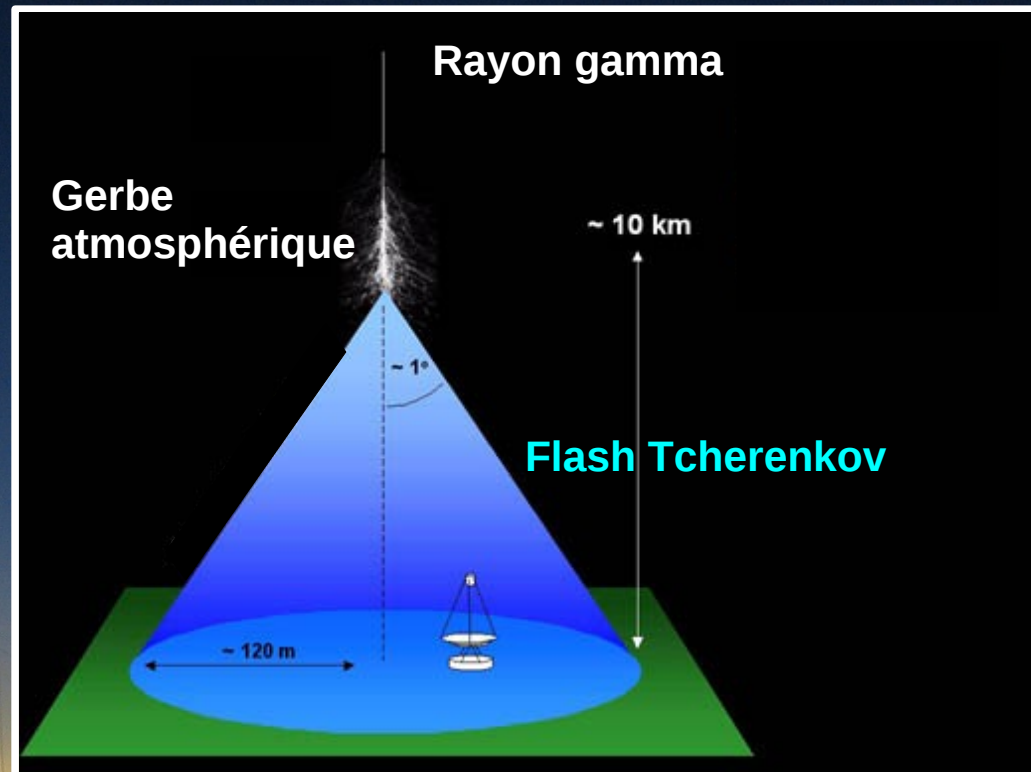
Electrons

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

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

L'imagerie Tcherenkov

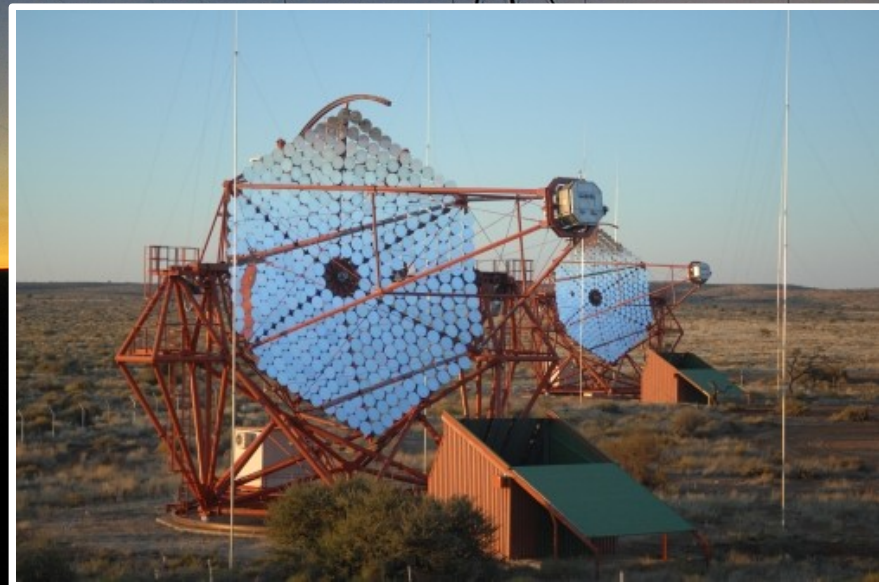
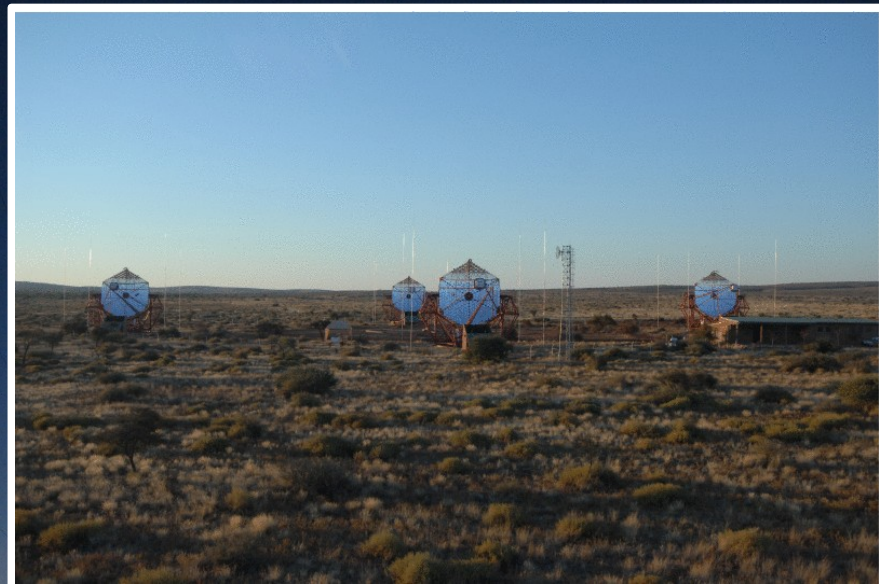
- L'atmosphère est opaque aux rayons gamma
 - Utilisée comme calorimètre
 - Flash Tcherenkov de la gerbe
- L'imagerie Tcherenkov:
 - Image de la gerbe en lumière Tcherenkov au plan focal d'un miroir



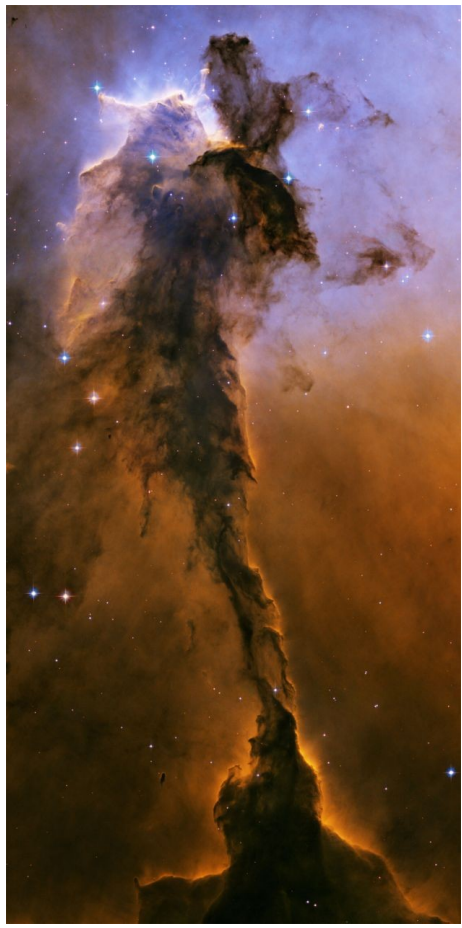
Le télescope HESS

- **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 \rightarrow 100 TeV



Nuages moléculaires



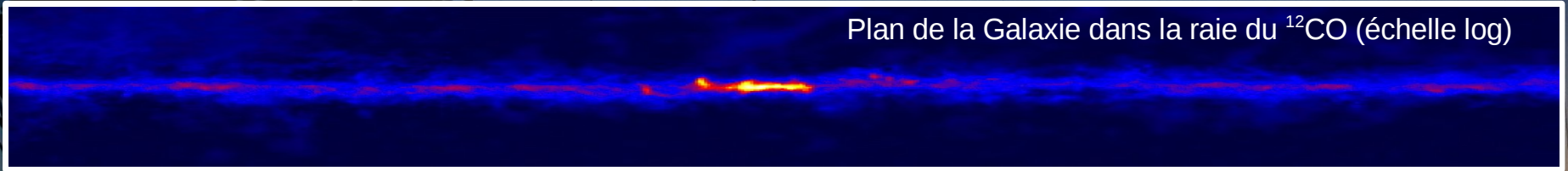
- **Une des composantes majeures de notre Galaxie:**
 - => $\frac{1}{2}$ du milieu interstellaire
 - Dimension = qqes 10 pc
 - Jusqu'à 10^6 masses solaires
 - => Densité 10 cm^{-3} à 10^6 cm^{-3}
 - => **Cibles de choix pour les rayons cosmiques**
- **Champ magnétique intense au sein des nuages**
 - Effondrement gravitationnel => amplification
 - => Jusqu'à qqes mG (contre qqes μG en moyenne)



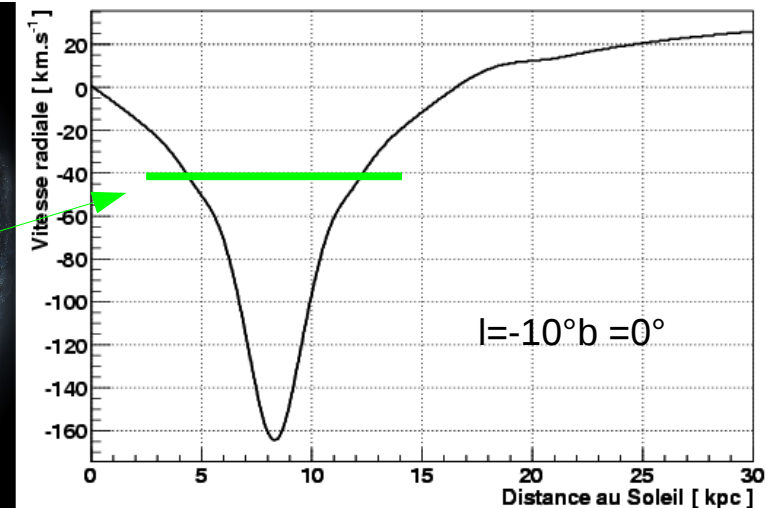
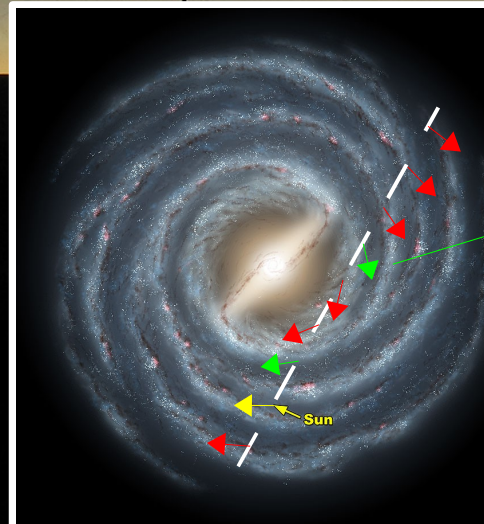
Détection des nuages moléculaires

- **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

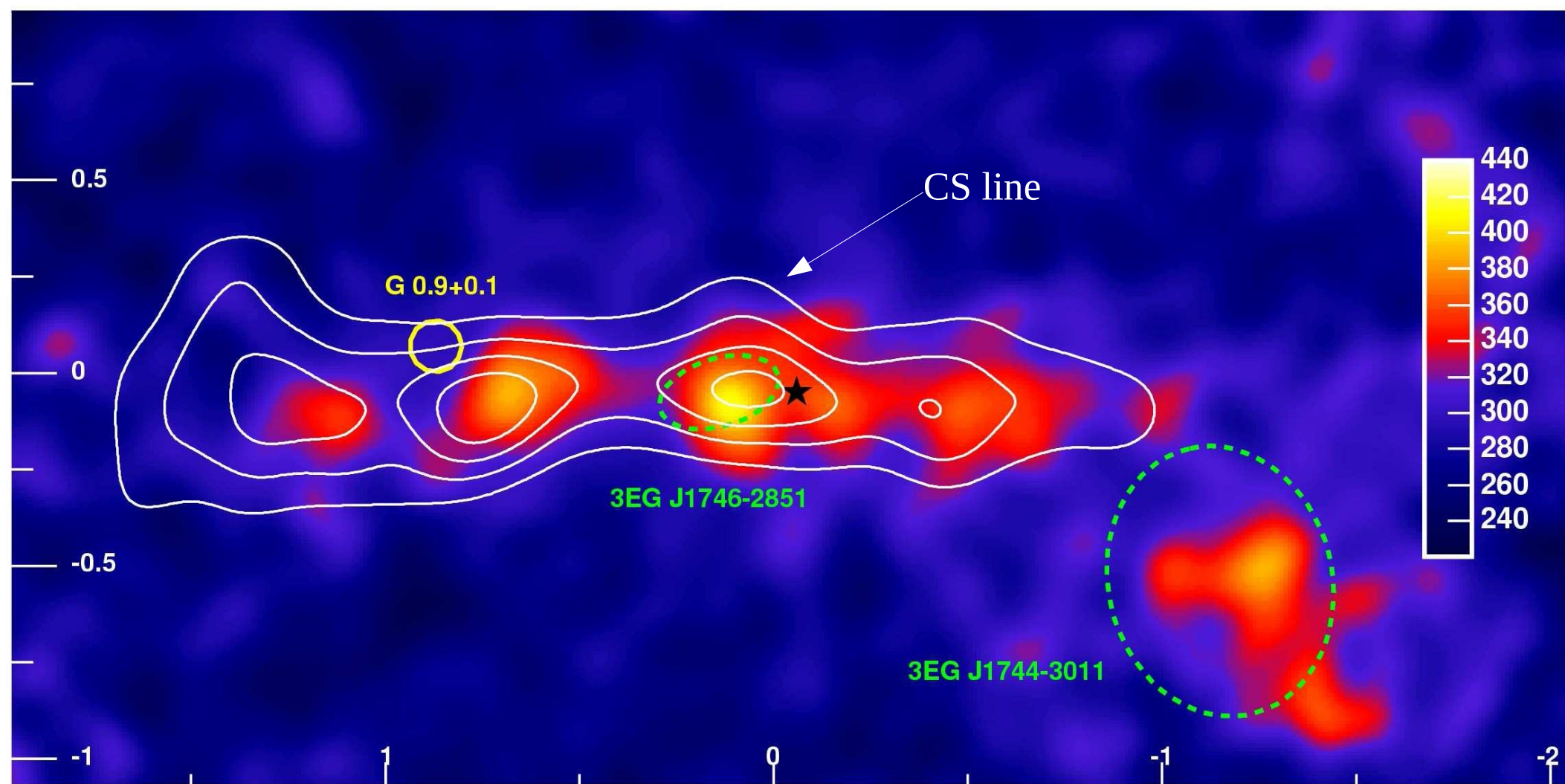
Plan de la Galaxie dans la raie du ^{12}CO (échelle log)



- **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

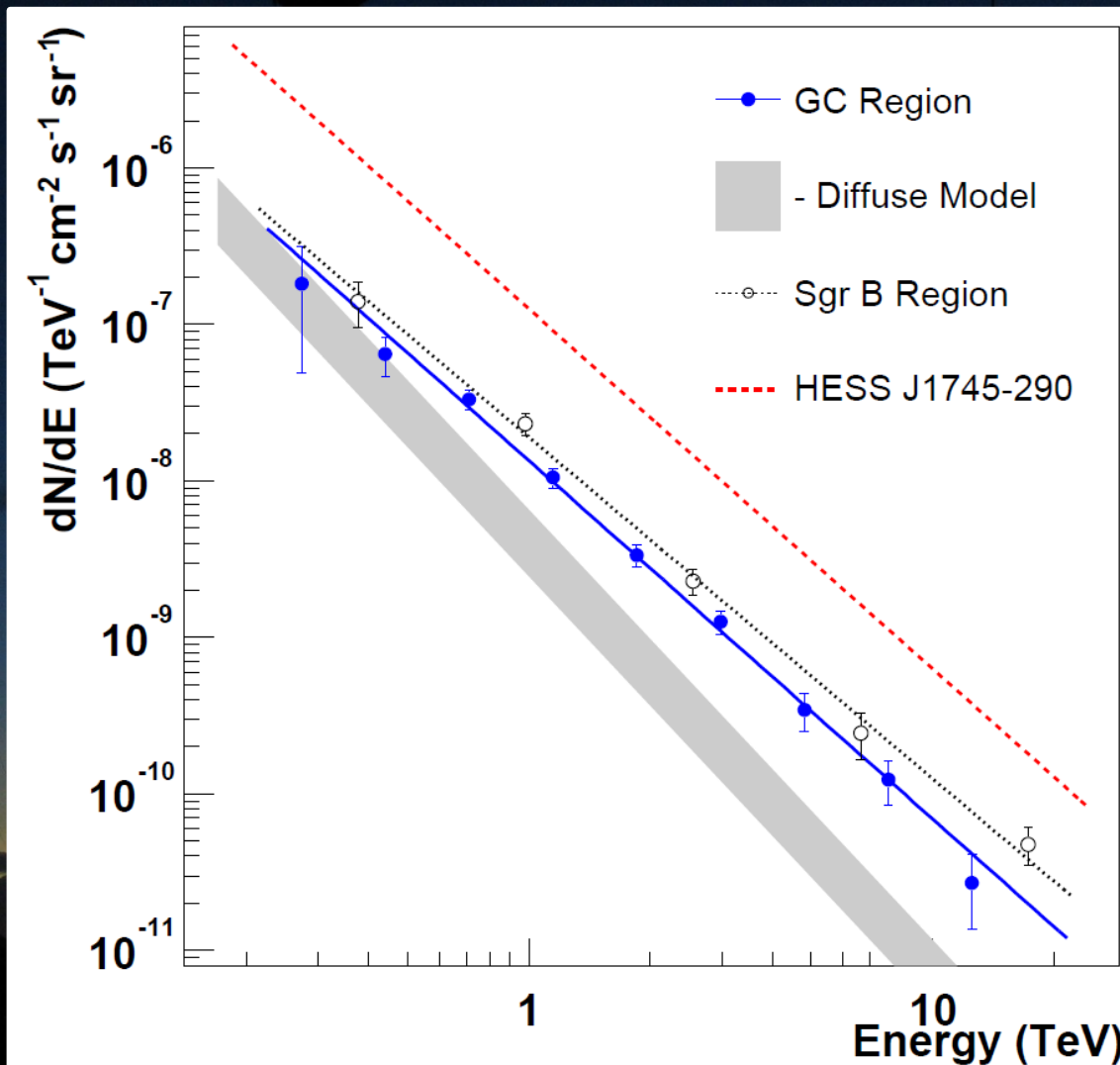


Centre galactique au TeV

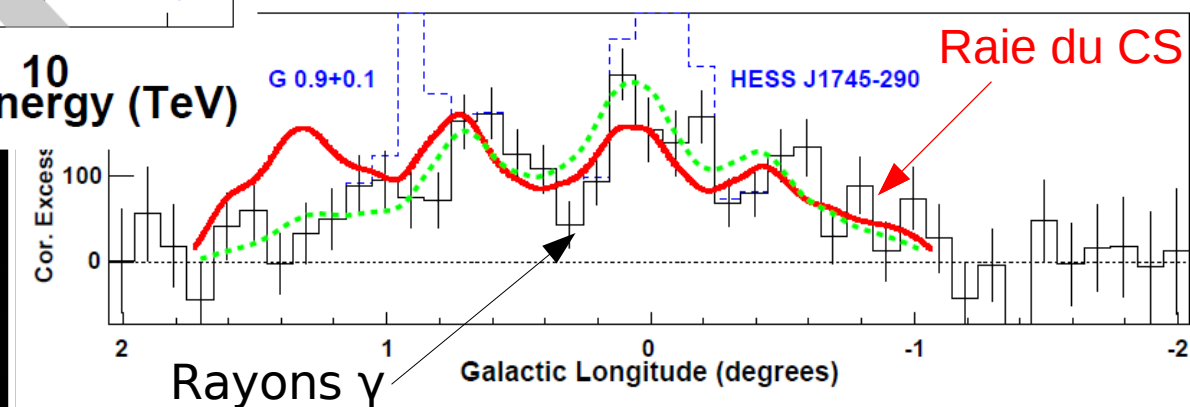


[Aharonian et al. Nature 439 695 2006]

Hadrons fraîchement accélérés



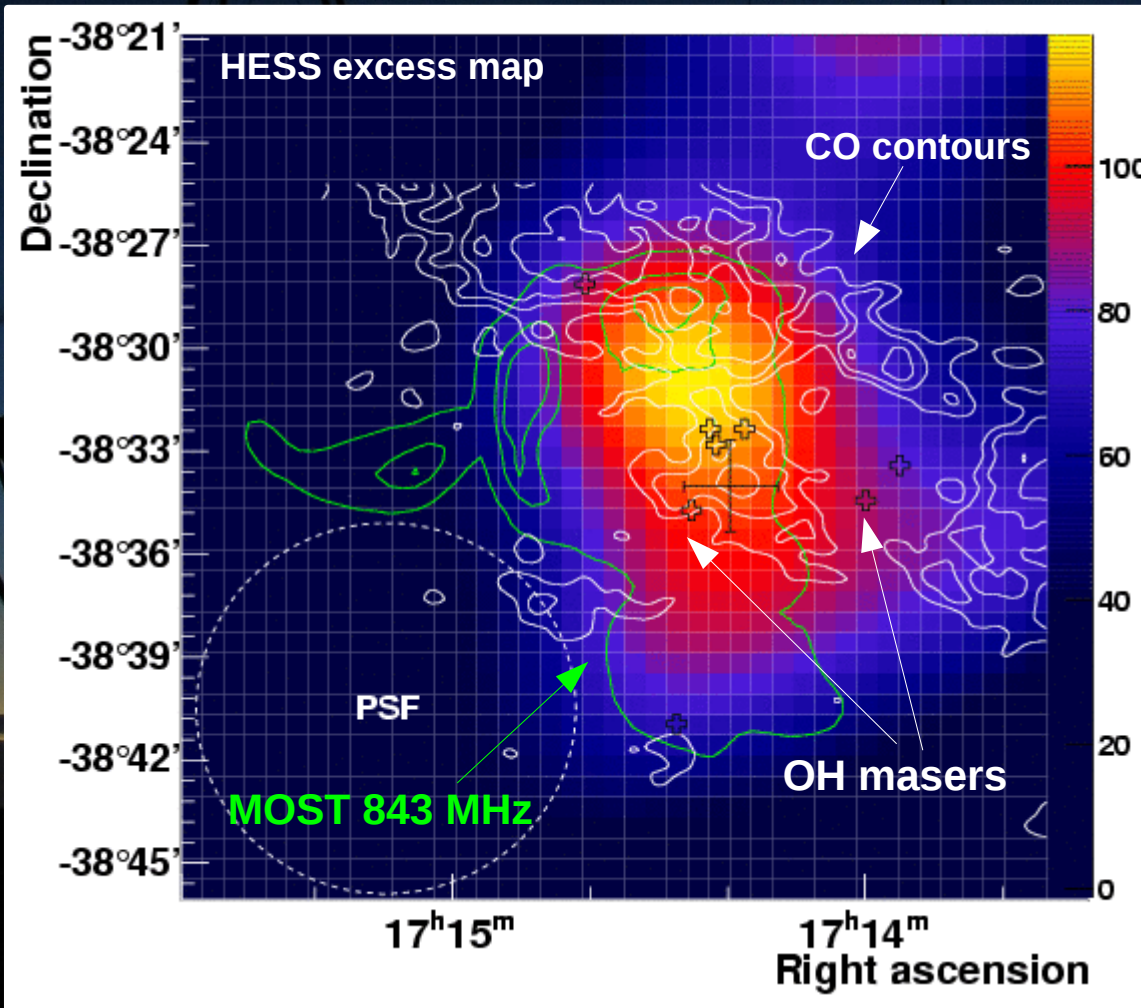
- Composante additionnelle au fond diffus gamma
 => Particules fraîchement accélérées
- Vraisemblablement des hadrons
 => 1 SNR pourrait expliquer le flux de rayons gamma



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**

CTB 37A: origine hadronique?



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

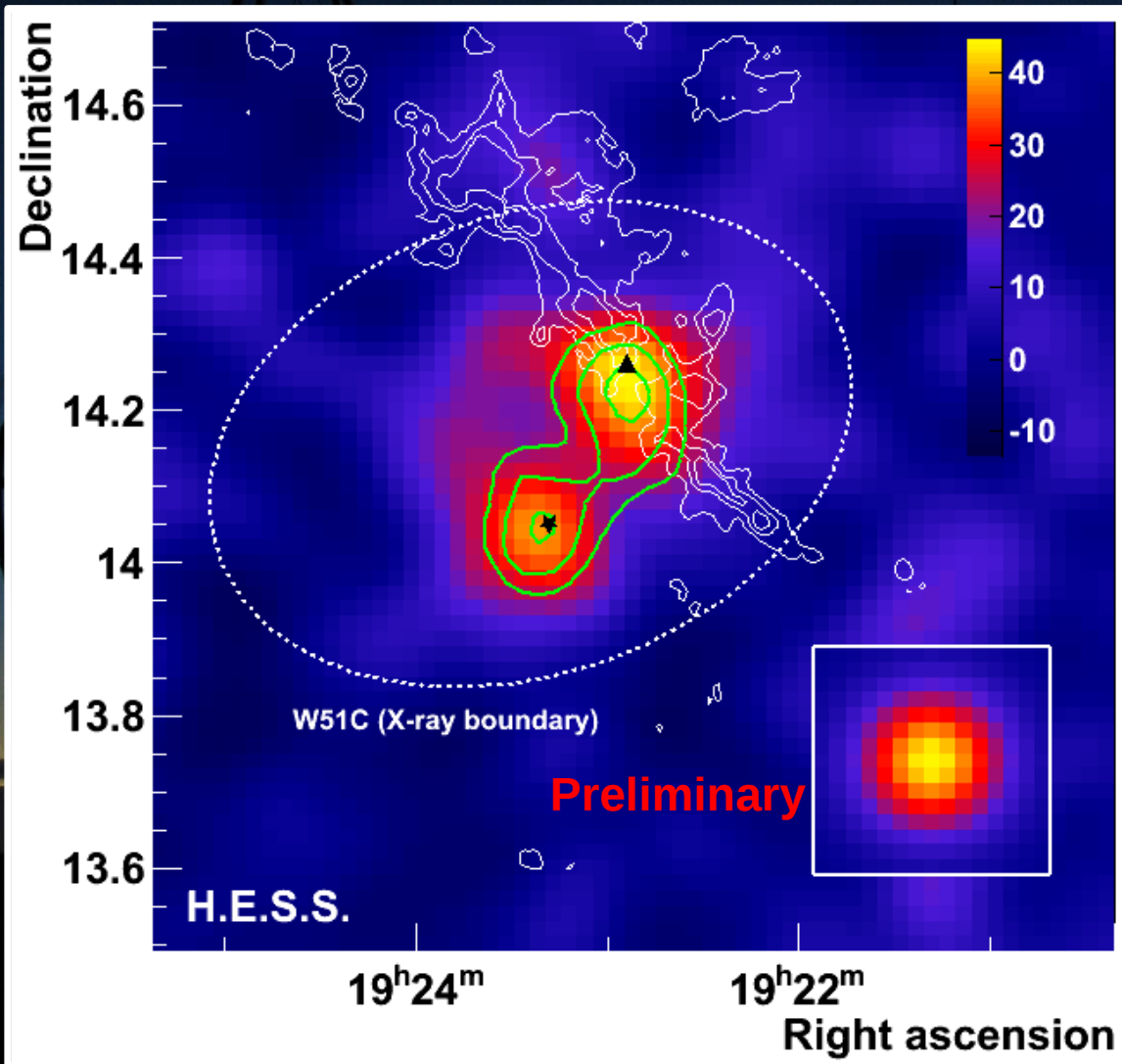
- **Vestige en interaction avec des nuages**
 - Masers OH
 - Nuages denses visibles en CO

=> Même distances que les masers
- **Scénario hadronique?**

=> [4% - 30%] de conversion de l'énergie d'explosion dans les RC

=> Interprétation hadronique possible

W51C & HESS J1923+141

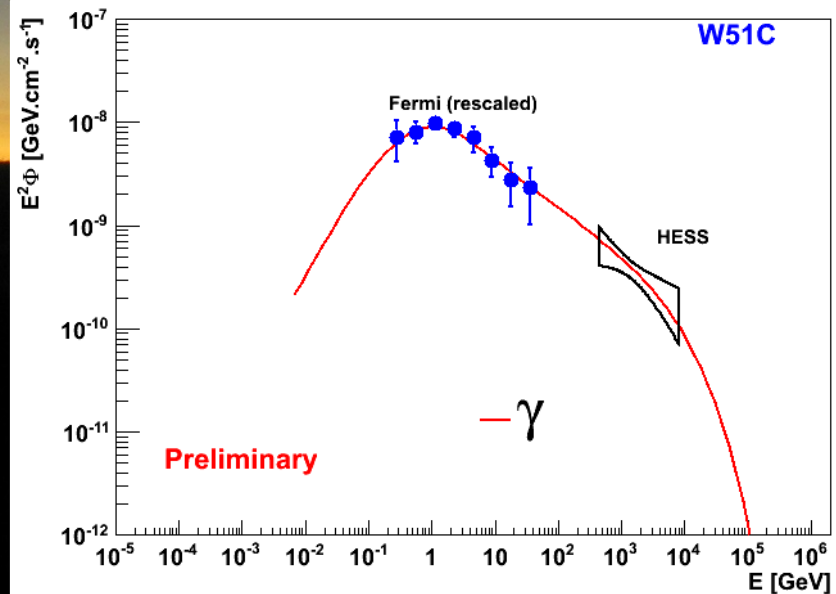
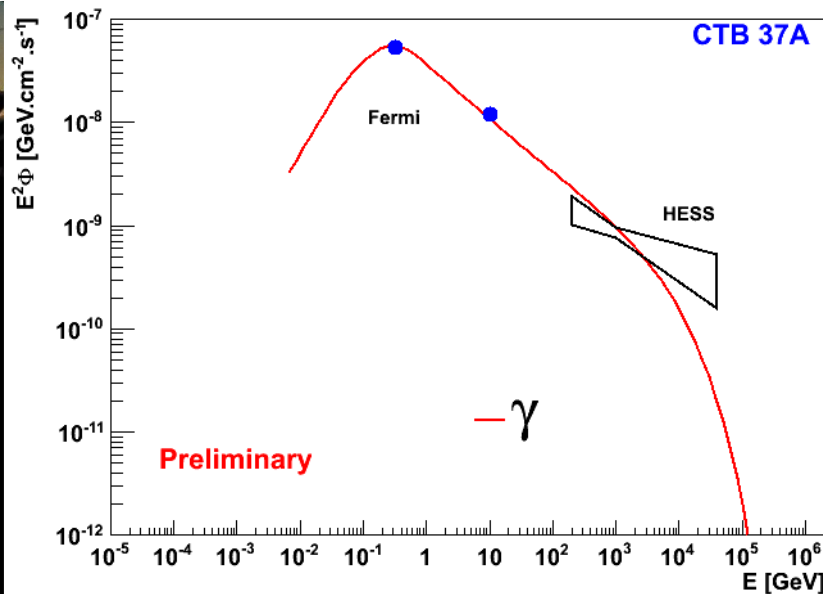
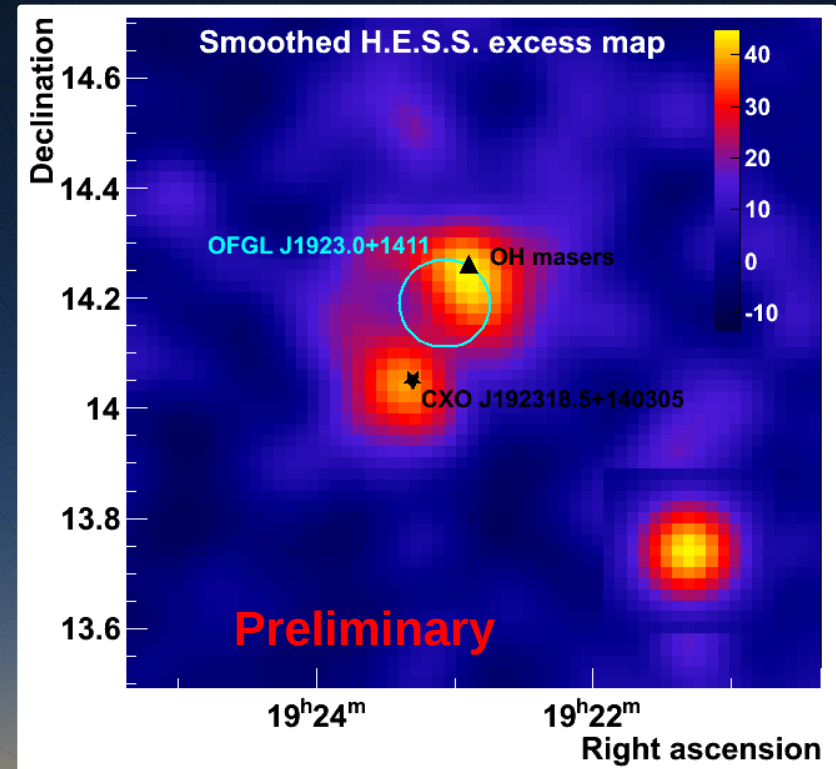
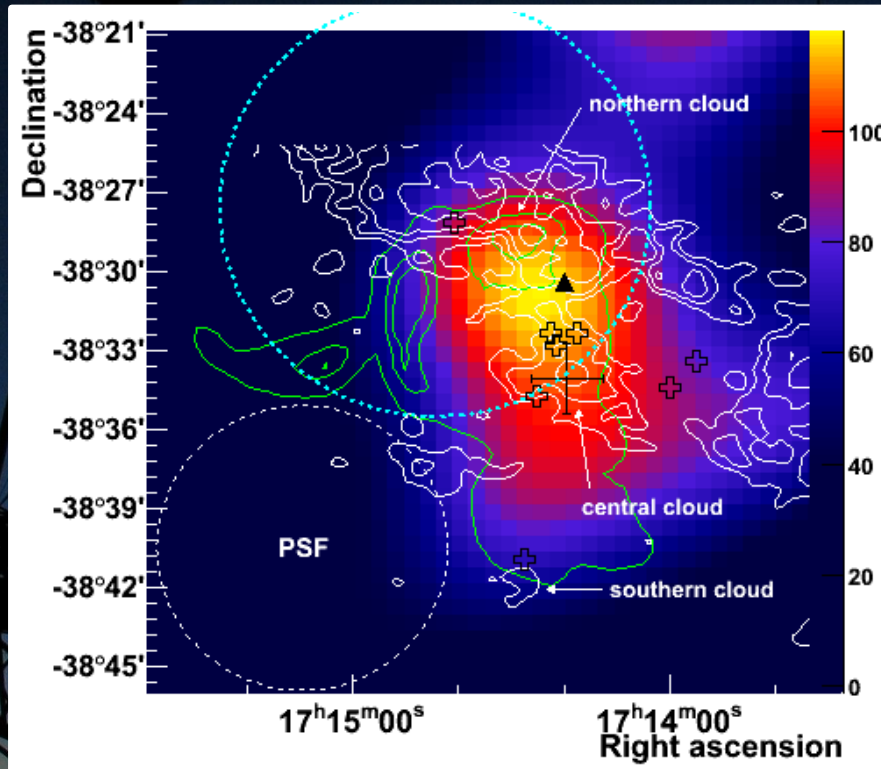


- Région de W51 observée entre 2007 et 2009
=> Nouvelle source de rayons gamma
- Source étendue comparée à la PSF de HESS
- Flux intégré >1 TeV équivalent à 3% du flux provenant de la Nébuleuse du Crabe
- Plusieurs associations possibles
 - Nébuleuse de pulsar
 - Nuages moléculaires choqués
=> deux origines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

[Fiasson et al. 2009]

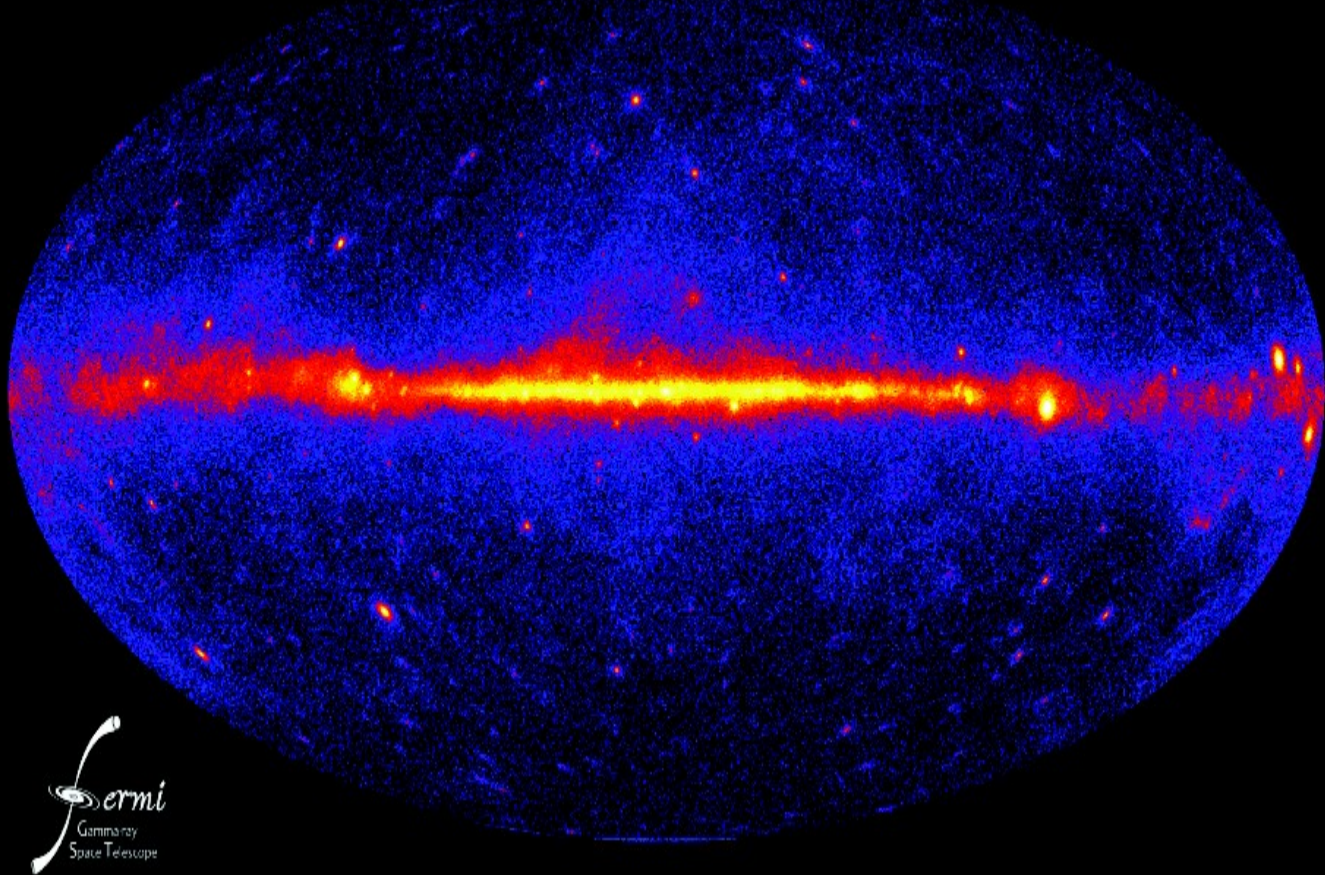
Aharonian et al., en prep.]

Associations GeV-TeV



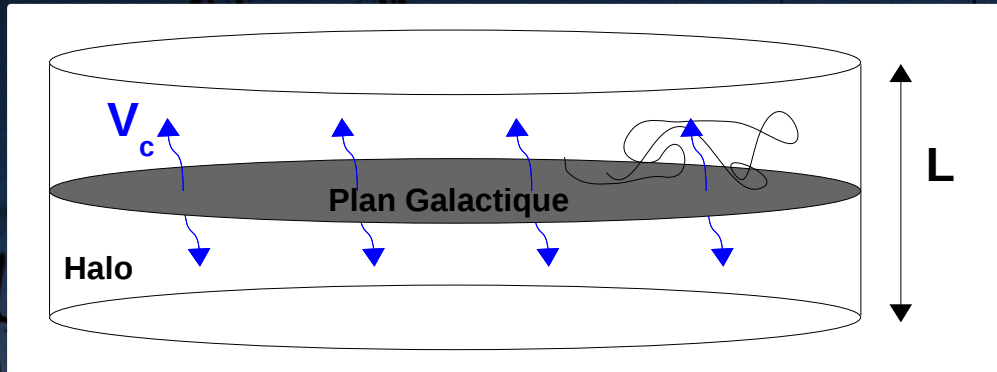
Le fond gamma diffus

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



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

Propagation des rayons cosmiques



Protons/noyaux primaires

- Sources de rayons cosmiques primaires (vestiges de supernova)
 - Diffusion par champ magnétique turbulent dans le halo
 - Halo de hauteur L
 - $K(E) = K_0 \cdot \beta \cdot R^\delta$
 - Convection hors du disque: V_c
 - Spallation
- => Seuls 4 paramètres

$$\Psi(r, z, E) = \frac{dN}{d\vec{x} dE}$$

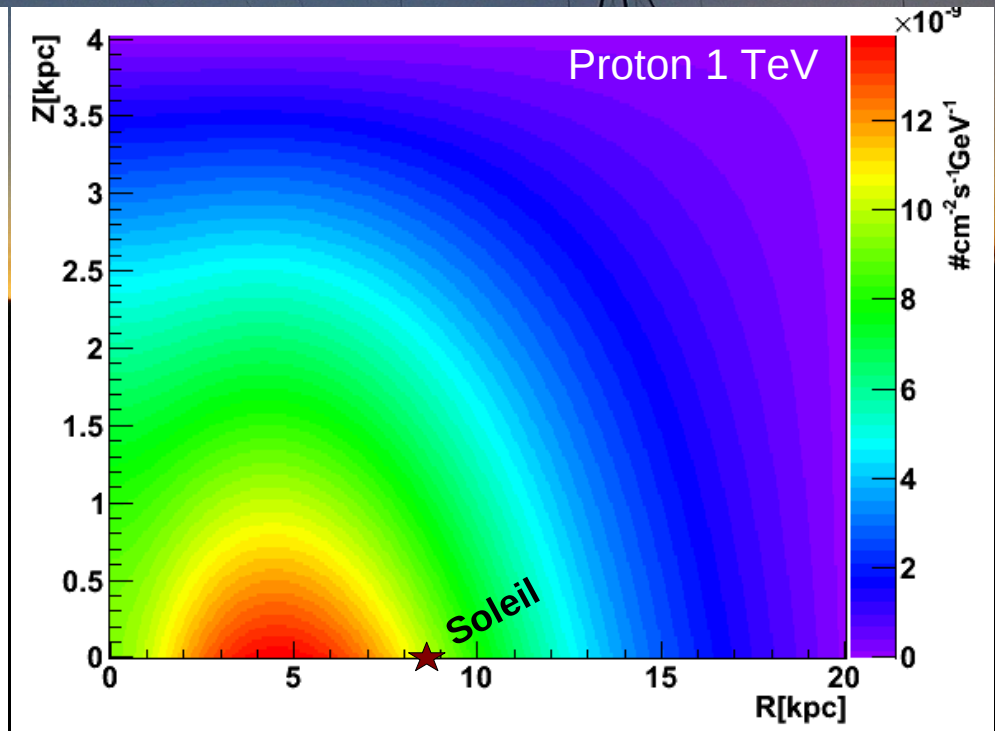
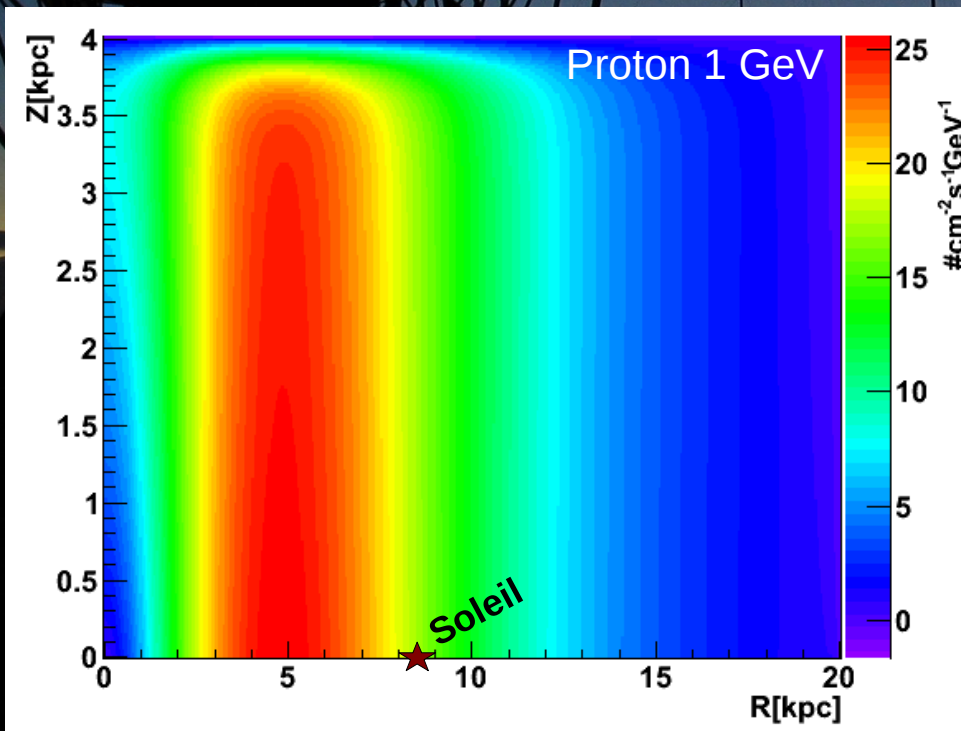
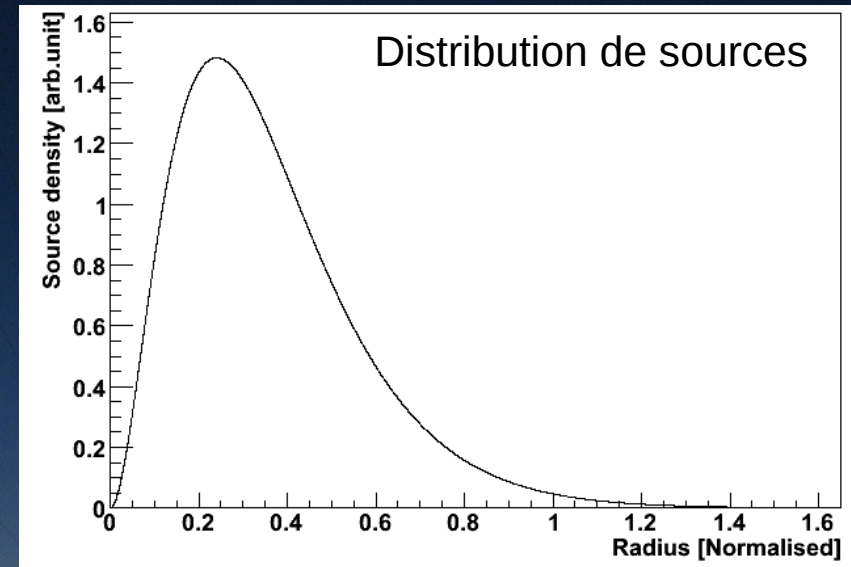
$$\partial_z (V_c \Psi) - K \Delta \Psi + \partial_E (b^{loss}(E) \Psi) = Q(r, z, E)$$

Modèle de propagation

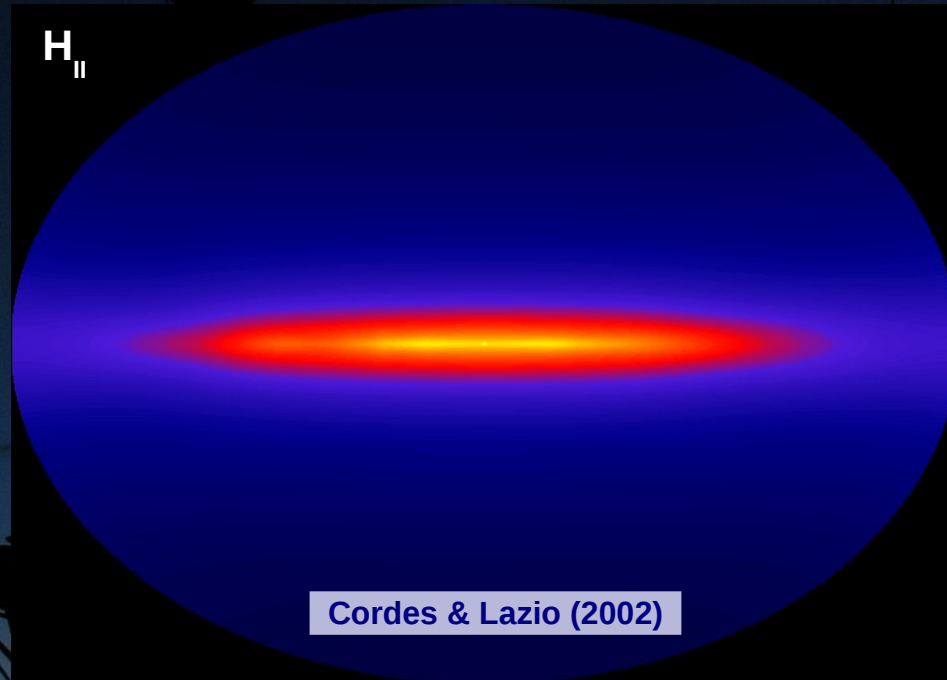
- **Hypothèses**
 - Symétrie cylindrique du système (sources et propagation)
 - Accélération des particules dans le disque ($Z=0$) qui diffusent dans le halo
 - Distribution des pulsars comme distribution de sources
 - Les particules s'échappent au delà des limites du halo => flux de particules nul
 - Solution stationnaire
- **Solution semi-analytique à l'équation de transport** (cf Maurin et al. 2001)
 - Décomposition en série de fonctions de Bessel
 - Distribution de rayons cosmiques
 - Distribution de sources
 - Contraint à partir du flux de rayons cosmiques mesurés sur Terre
=> Pas d'hypothèse sur le spectre originel des particules

Distribution des rayons cosmiques

- La résolution de l'équation permet d'obtenir le flux de protons en tout point de la Galaxie
 - Normalisé au niveau du système solaire

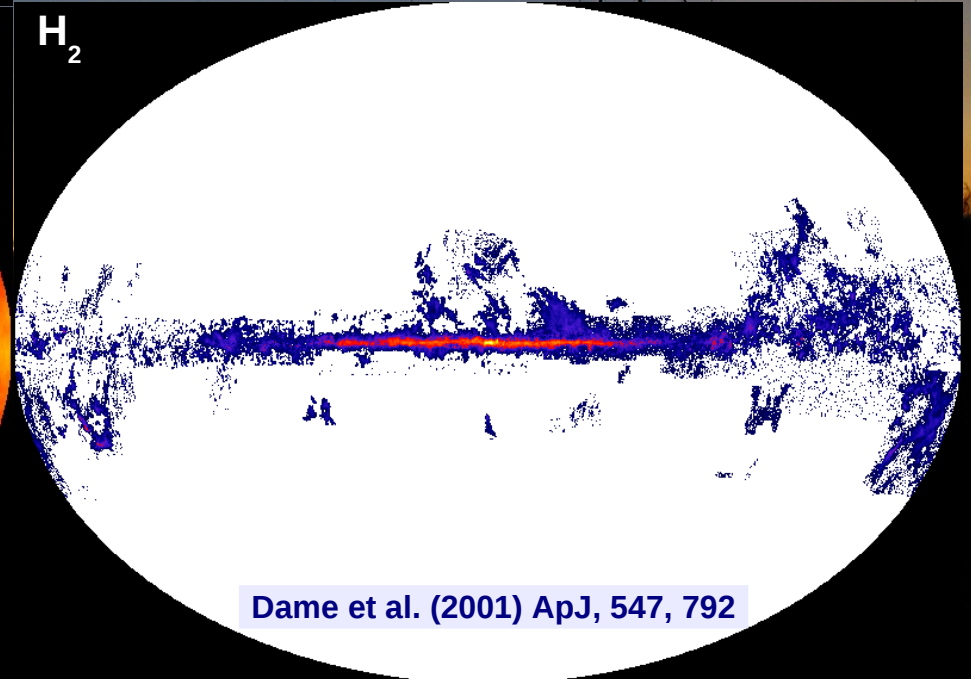
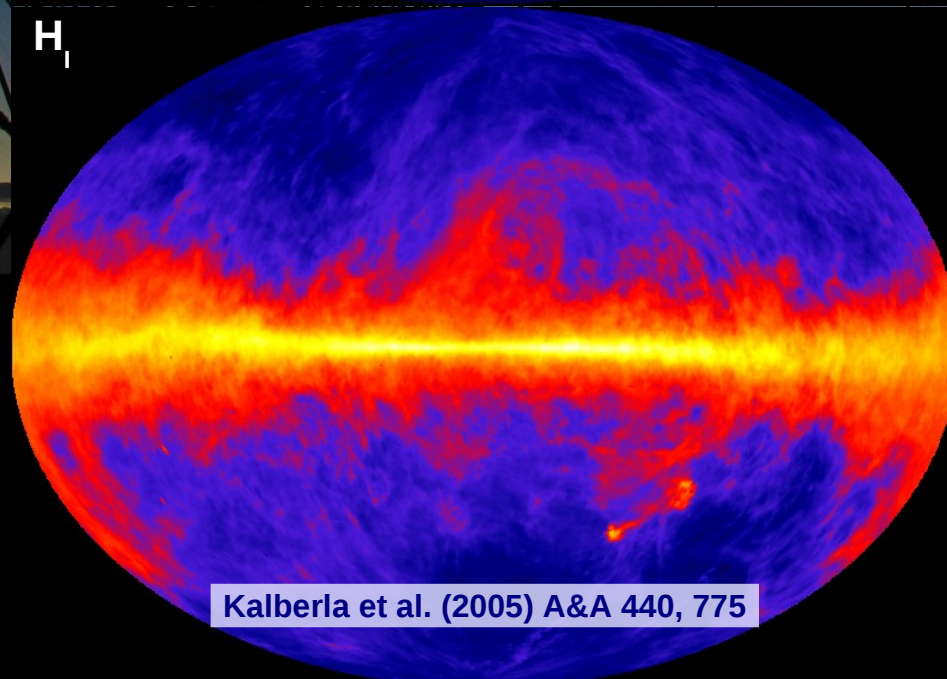


Les cibles



La matière cible est sous diverse forme
(principalement de l'hydrogène ~90%)

- Ionisée H_{II} (distribution d' e^-)
- Atomique H_I (relevé raie H_I)
- Moléculaire H_2 (relevé raie du CO)

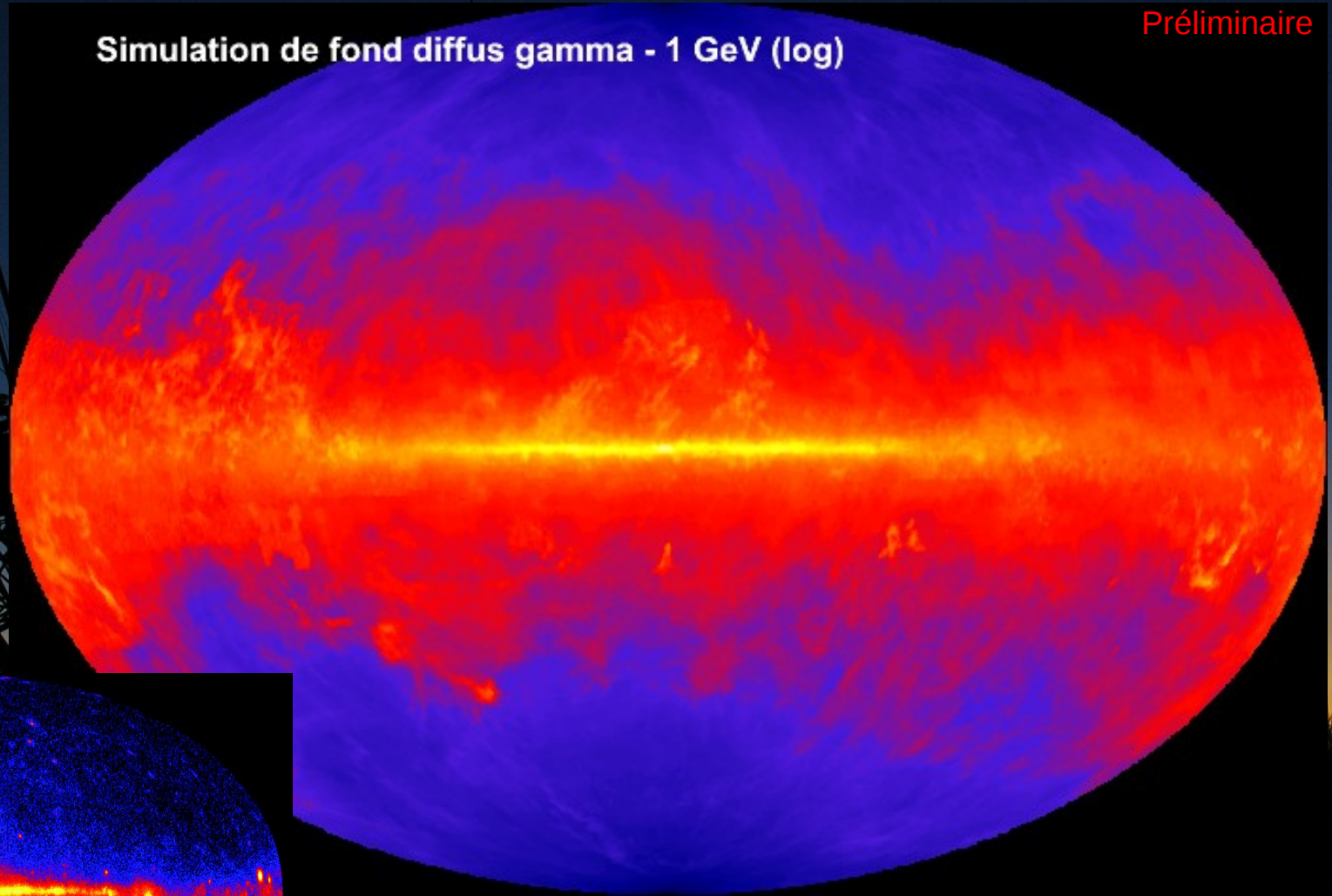
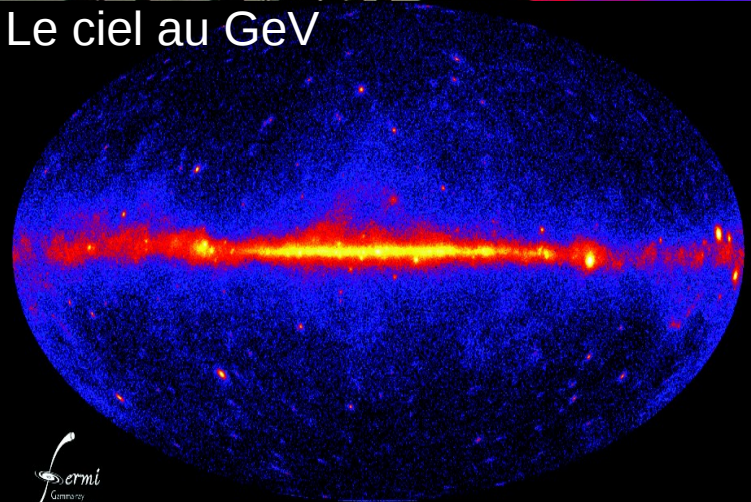


L'émission gamma associée

Simulation de fond diffus gamma - 1 GeV (log)

Préliminaire

Le ciel au GeV



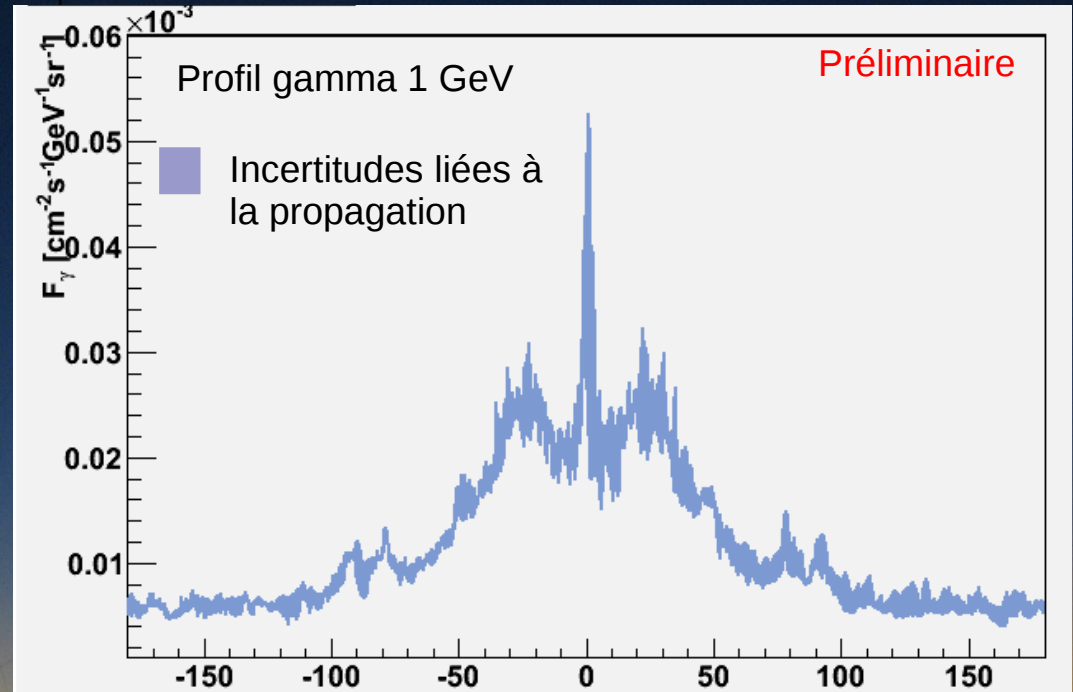
- Composante hadronique uniquement
=> Composante électronique + sources additionnelles présente sur la carte Fermi

Incertitude: Propagation & matière

- Quatres paramètres interviennent dans la propagation

$$L - V_c - K_0 - \delta$$

=> bornés par les mesures de rapport d'abondance de rayons cosmiques secondaires



- La détermination des distributions de matière n'est pas triviale
 - La distance aux nuages n'est pas directement estimable
=> déconvolution des observations à partir de courbes de rotation
 - La quantité de matière n'est elle aussi pas directement observables
=> relation raie millimétrique – colonne de densité incertaine

Conclusion - perspectives

- **Les vestiges de supernova associés à des nuages moléculaires sont très prometteurs pour mettre en évidence l'accélération de hadrons**
 - 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**
 - => Une étude statistique avec HESS-II et CTA sera très intéressante
- **Outil de simulation du fond diffus gamma bientôt disponible**
 - Tests du modèle et estimations des incertitudes avec les données au GeV de Fermi
 - Application des prédictions aux sensibilités de HESS, HESS-II, CTA et AMS
 - => étude de détectabilité de ce fond diffus à plus haute énergie

The background of the slide is a photograph showing the silhouettes of several radio telescope antennas against a twilight sky. The sky transitions from a deep blue at the top to a bright orange glow near the horizon. The antennas are complex structures with many support legs and a large dish-like top. One large antenna is prominent on the left, and another smaller one is on the right. Several thin vertical poles are also visible in the background.

Merci pour votre attention!