



Les nuages moléculaires en astronomie gamma

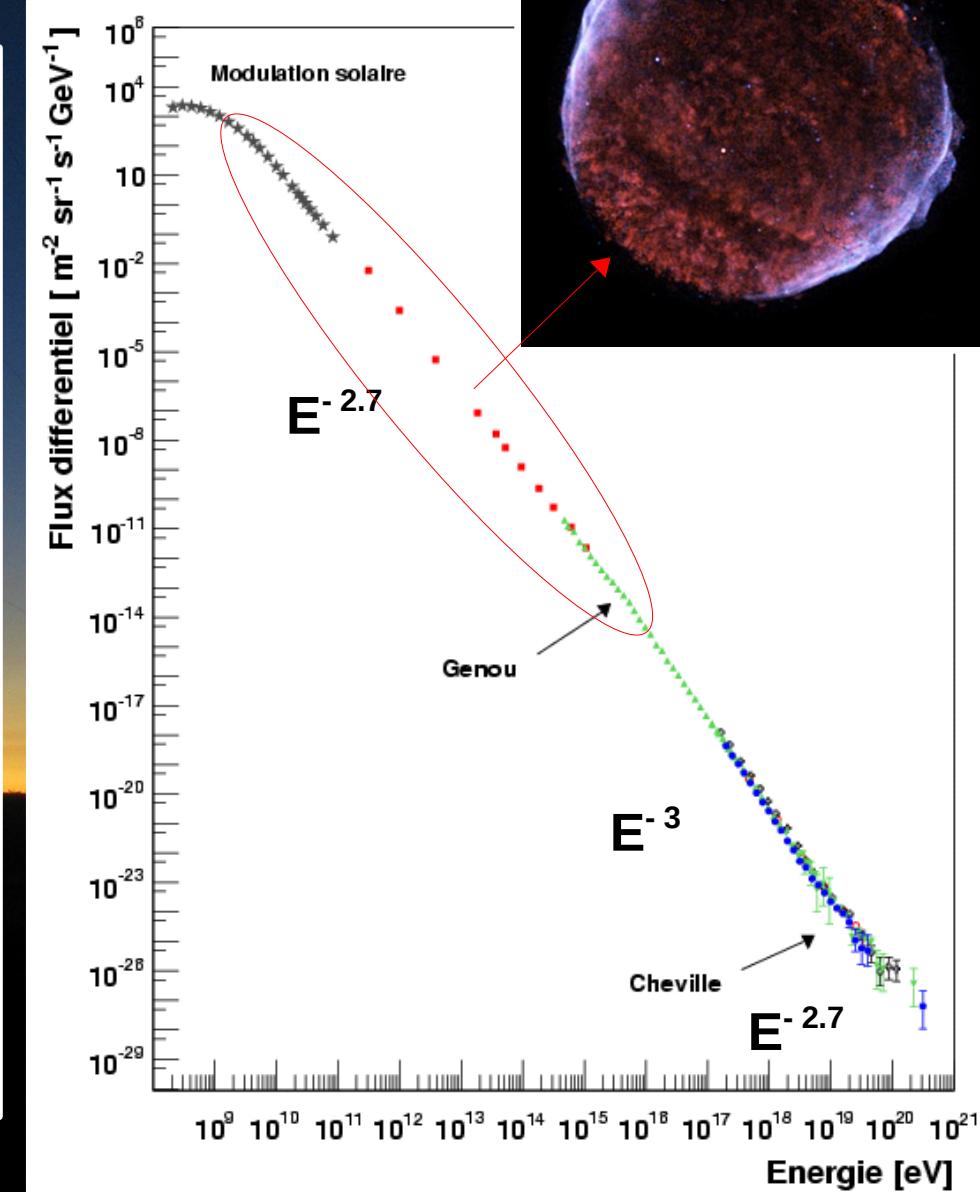
Armand Fiasson
Post-doc
LAPP - Annecy le vieux

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

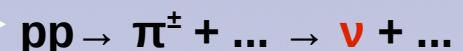
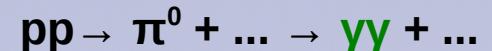
- Découverte récente: 1912 par Victor HESS
 - Spectre en énergie en loi de puissance
- + de 10 ordres grandeurs en énergie
=> inédit dans la nature
- Vestiges de supernova = lieu supposé d'accélération dans la Galaxie
 - $P_{RC} \approx \varepsilon_{RC} \times V_{gal} / t_{échap} \approx 10^{41}$ erg/s
 - 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
=> ~ photon / min / km² contre ~ 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 => ~ 6 photons m⁻² an⁻¹
=> Détection au sol

Hadrons

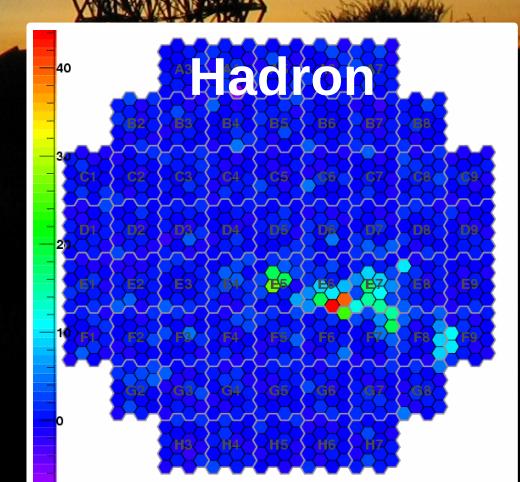
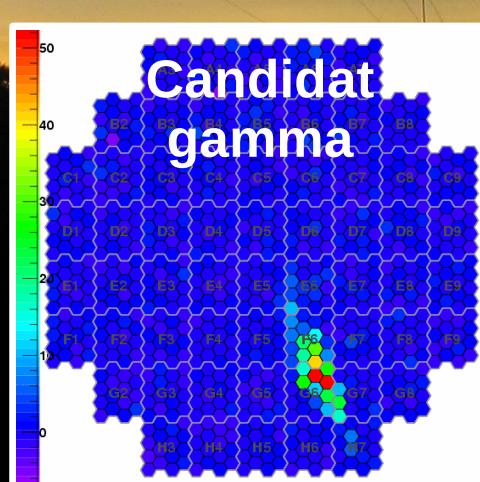
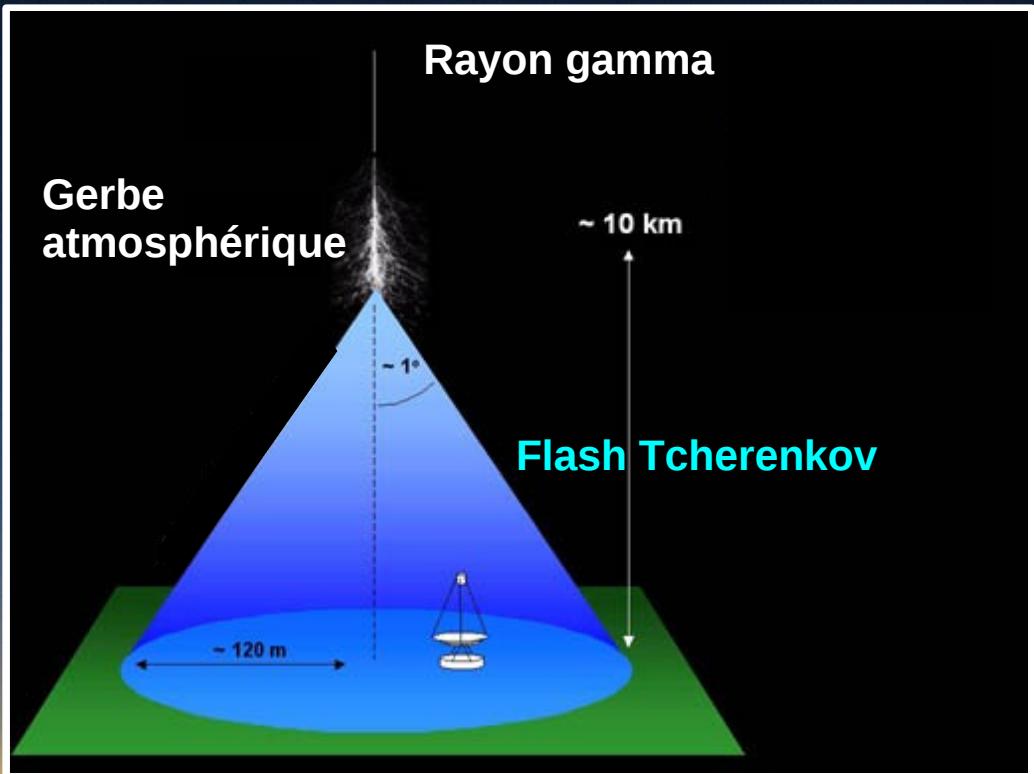
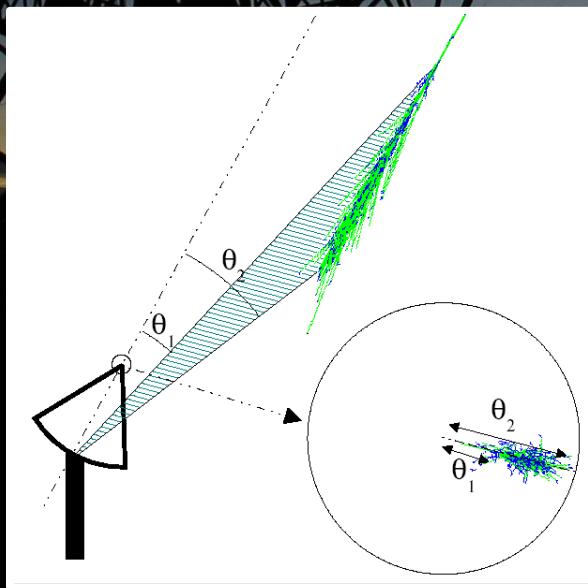


Electrons



L'imagerie Tcherenkov

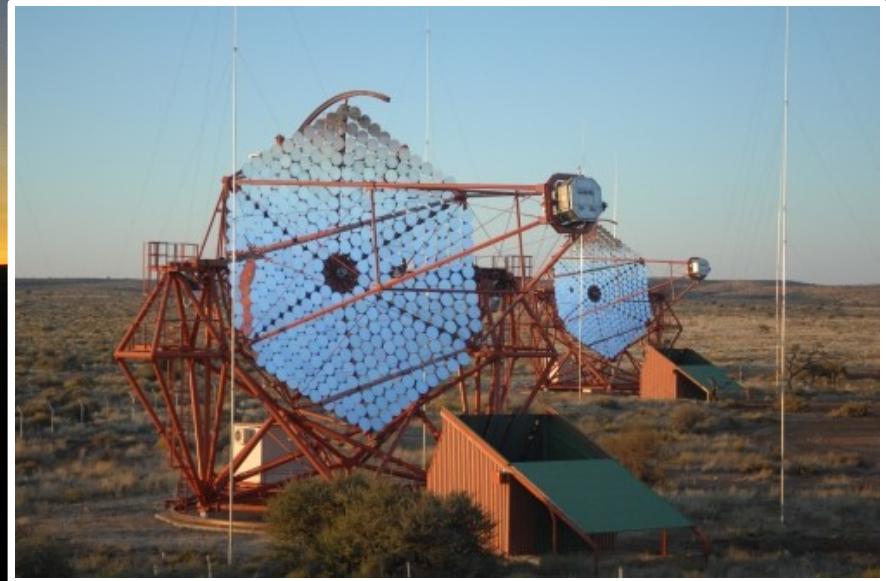
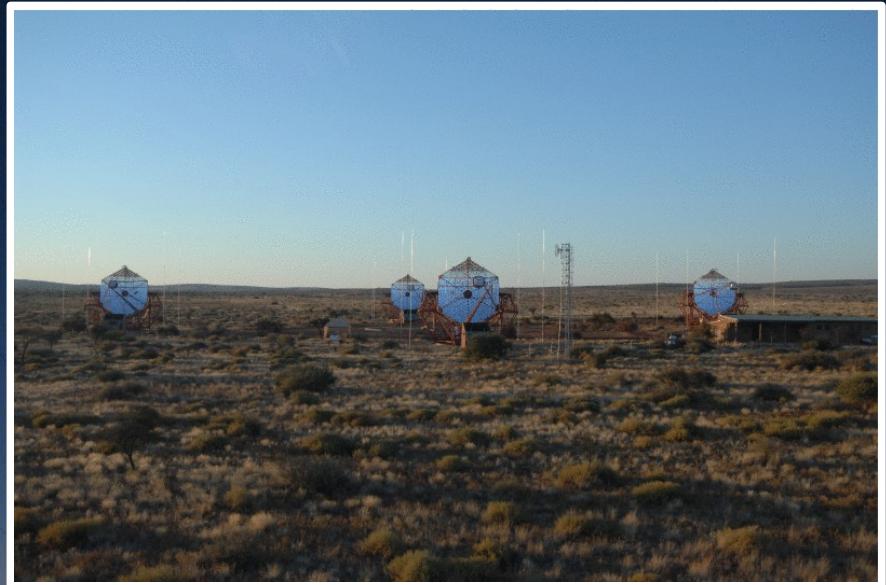
- L'atmosphère est opaque aux rayons gamma
 - Utilisée comme calorimètre
 - Flash Tcherenkov de la gerbe
- L'imagerie Tcherenkov:
 - Image de la gerbe en lumière Tcherenkov au plan focal d'un miroir



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



Nuages moléculaires



- **Une des composantes majeures de notre Galaxie:**
 - => ½ du milieu interstellaire
 - Dimension = quelques 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 quelques mG (contre quelques μG en moyenne)

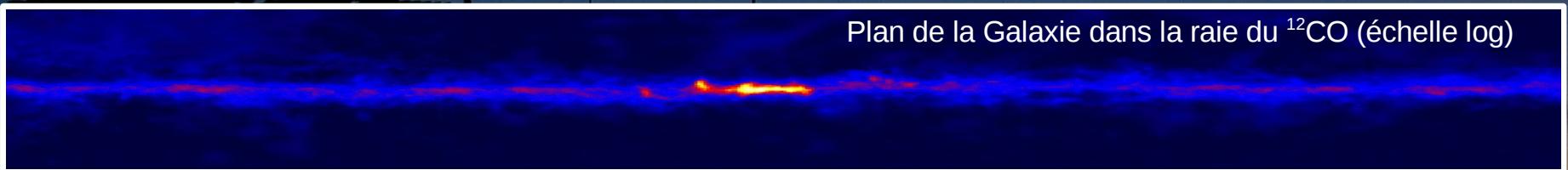


Détection des nuages moléculaires

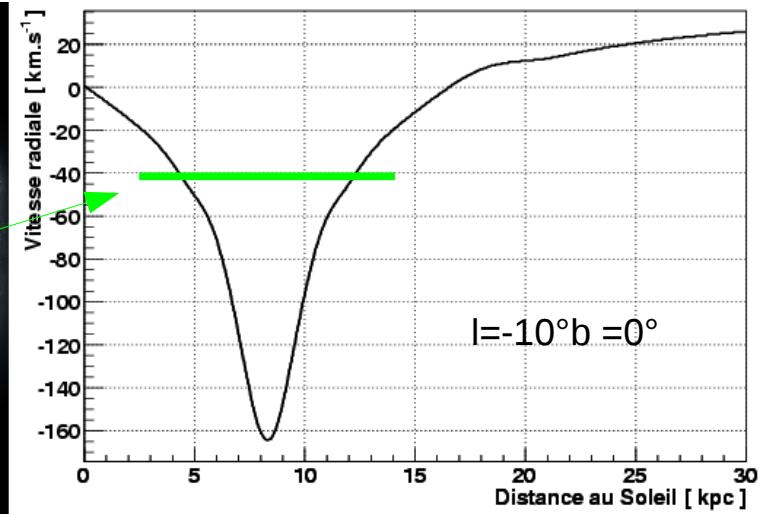
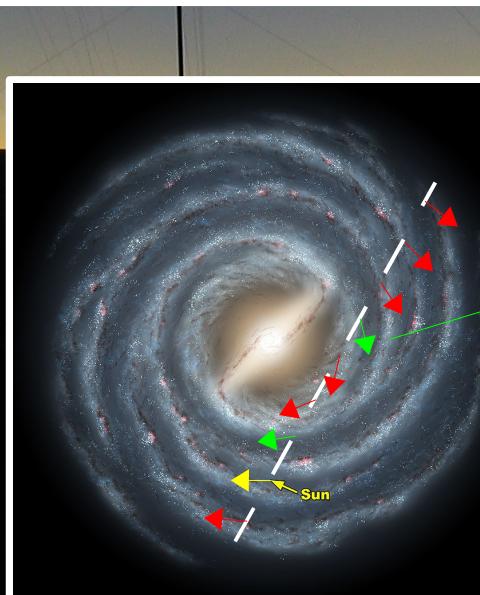
- Constituant principal des nuages moléculaires: H_2
 - Pas de moment dipolaire => pas de raie rotationnelle en radio
 - Utilisation du CO et CS

=> quantité supposée proportionnelle à H_2

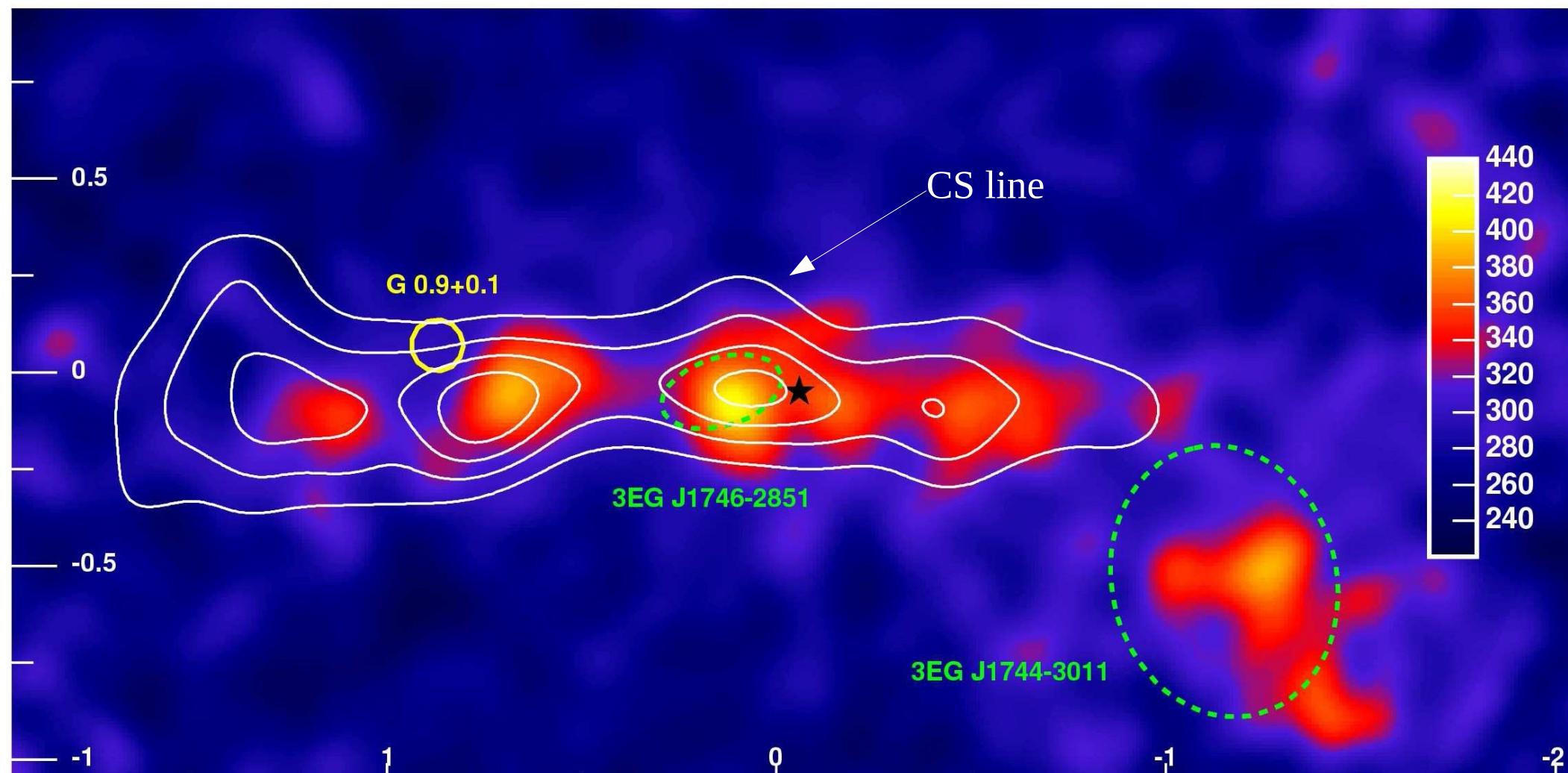
=> raie rotationnelle en radio



- 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

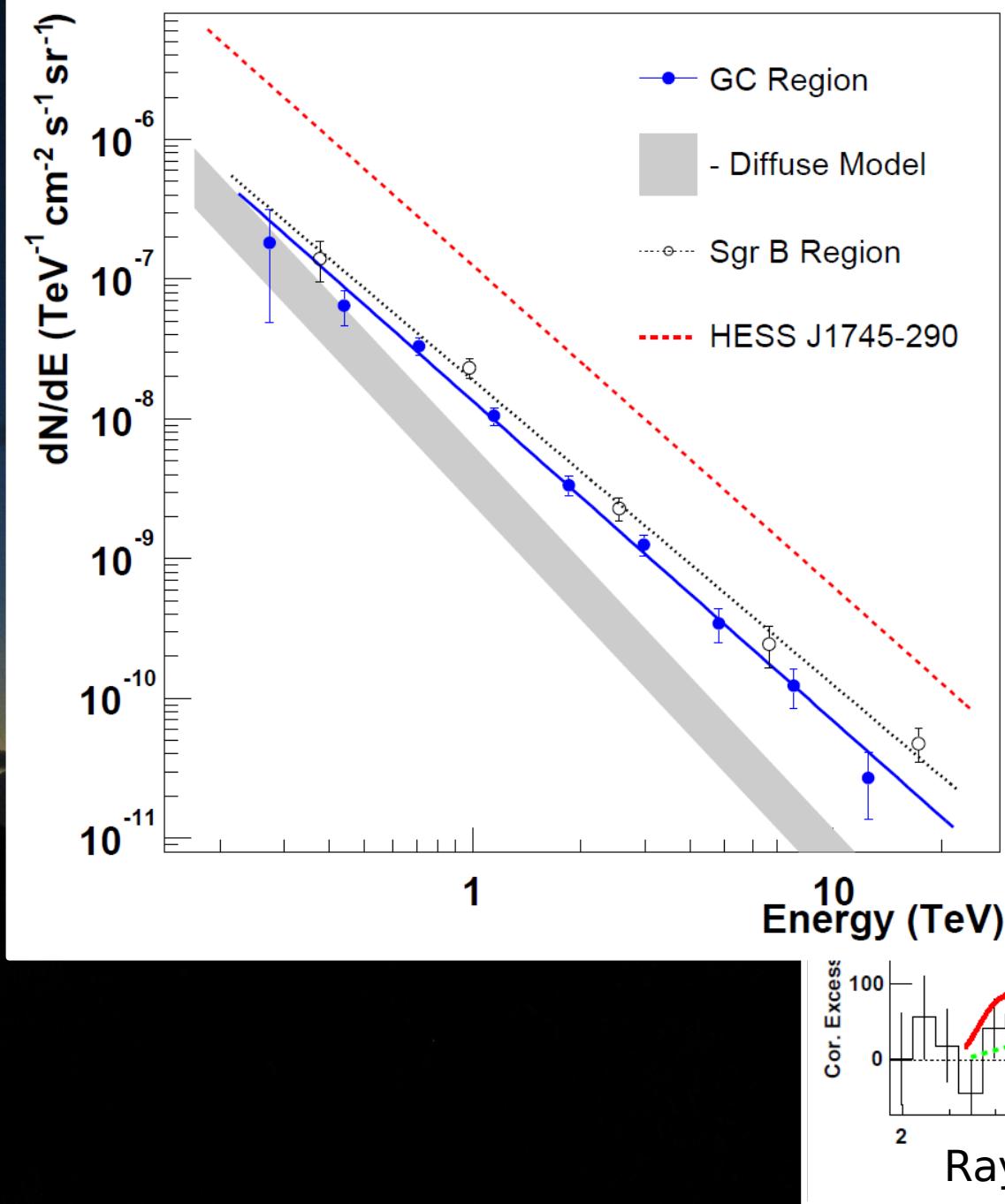


Centre galactique au TeV

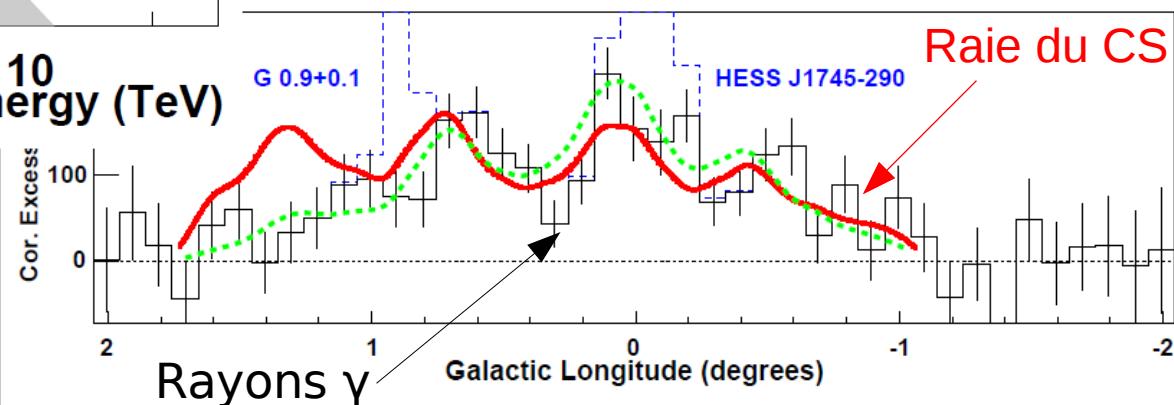


[Aharonian et al. Nature 439 695 2006]

Hadrons fraîchement accélérés



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



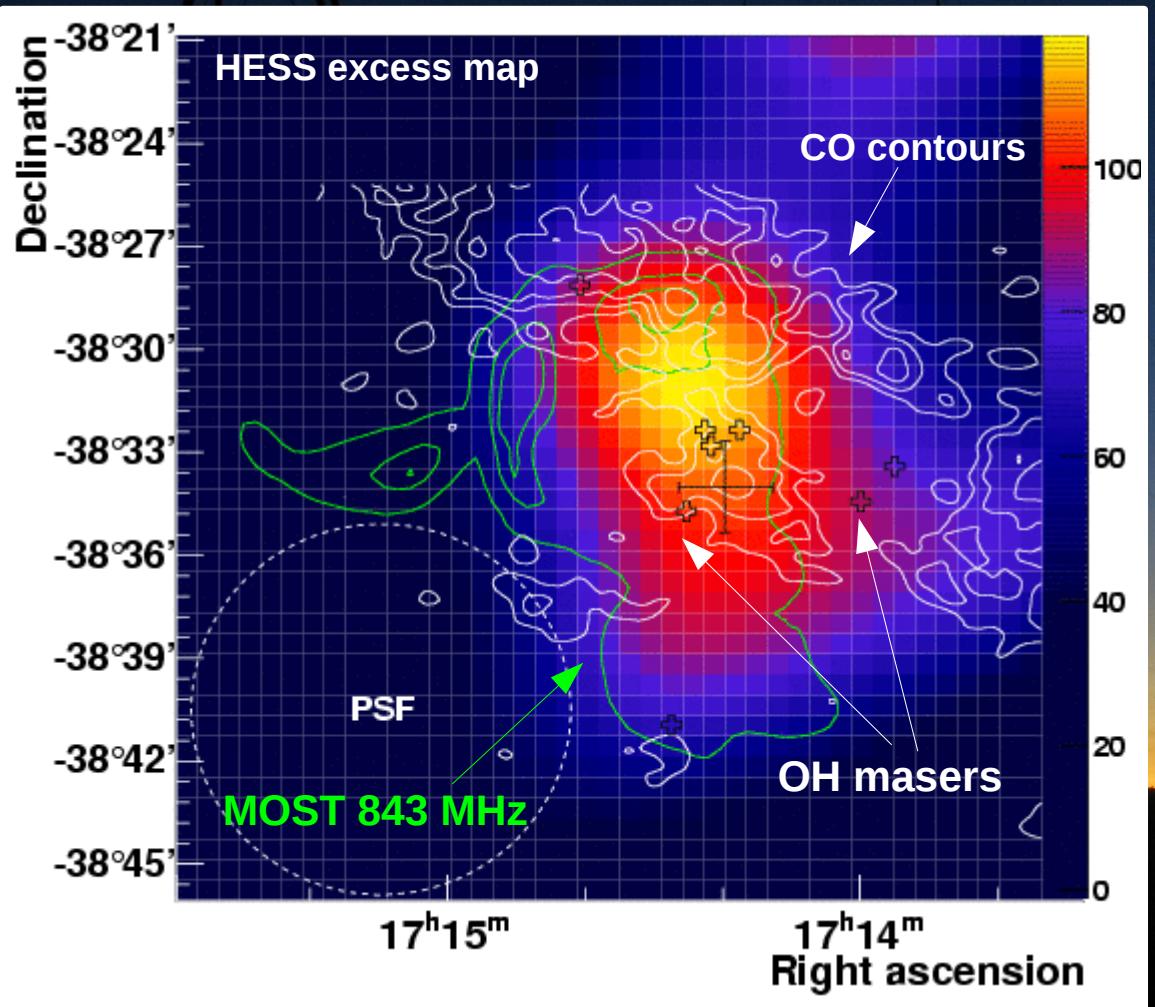
Associations accélérateur - cibles

- **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?

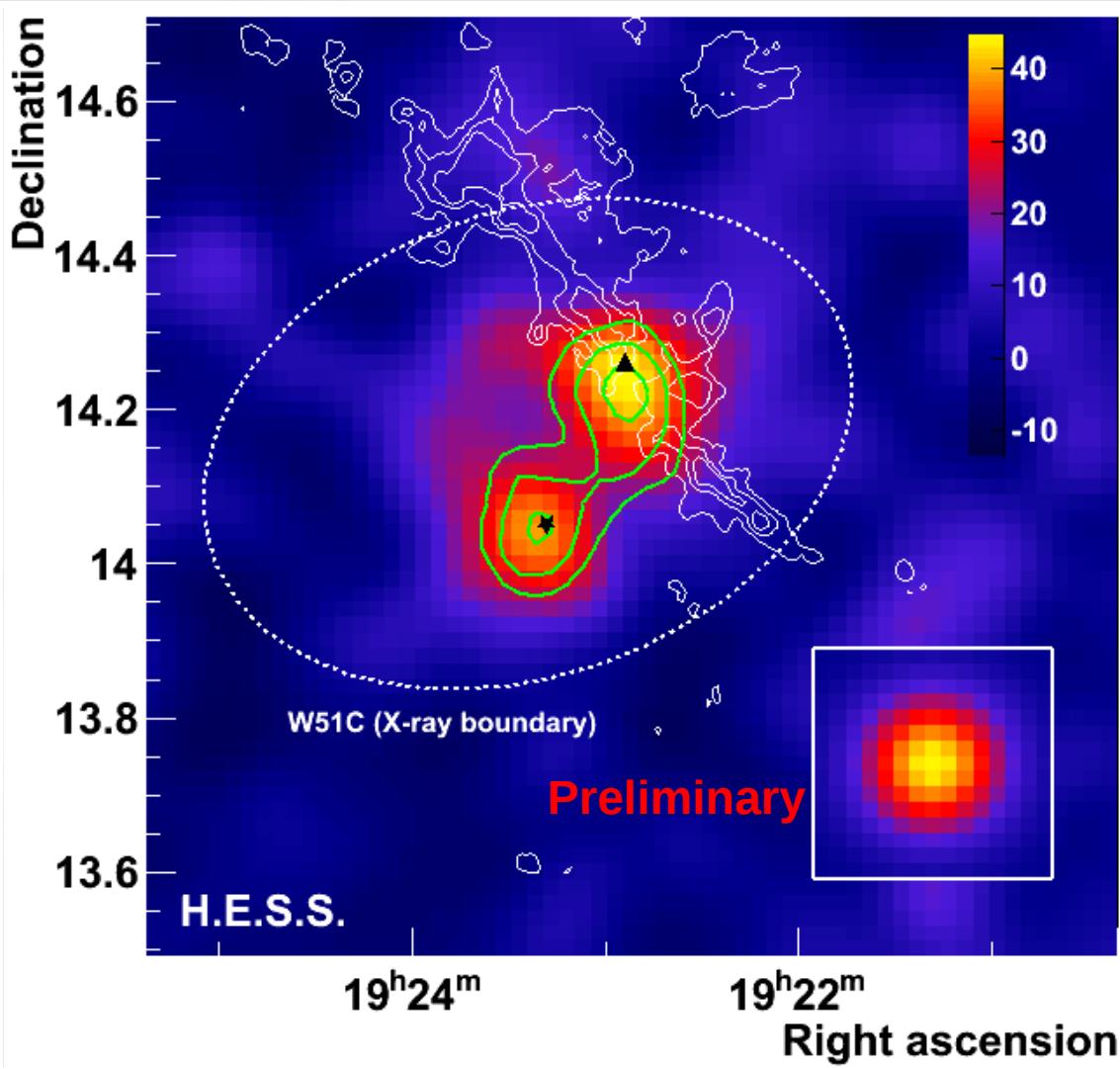


[Aharonian et al. A&A, 490, 685A 2008]

- **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

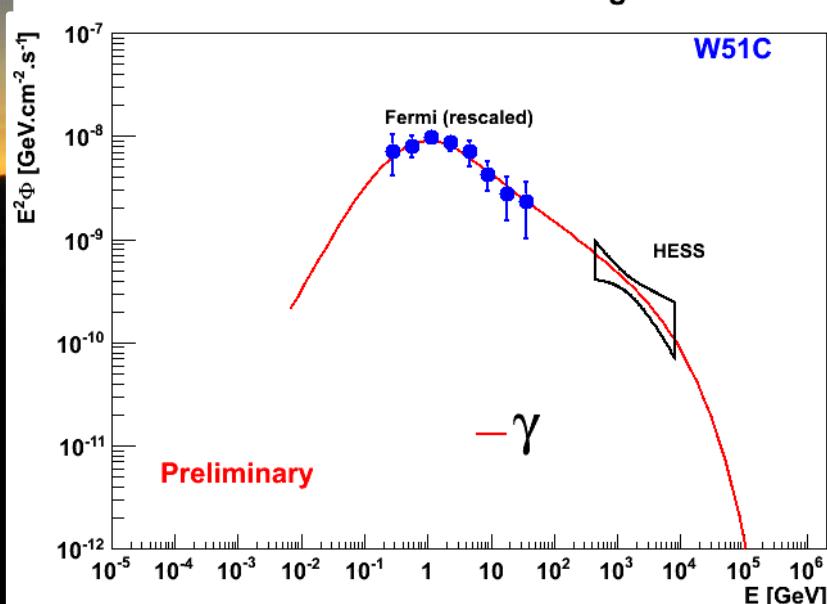
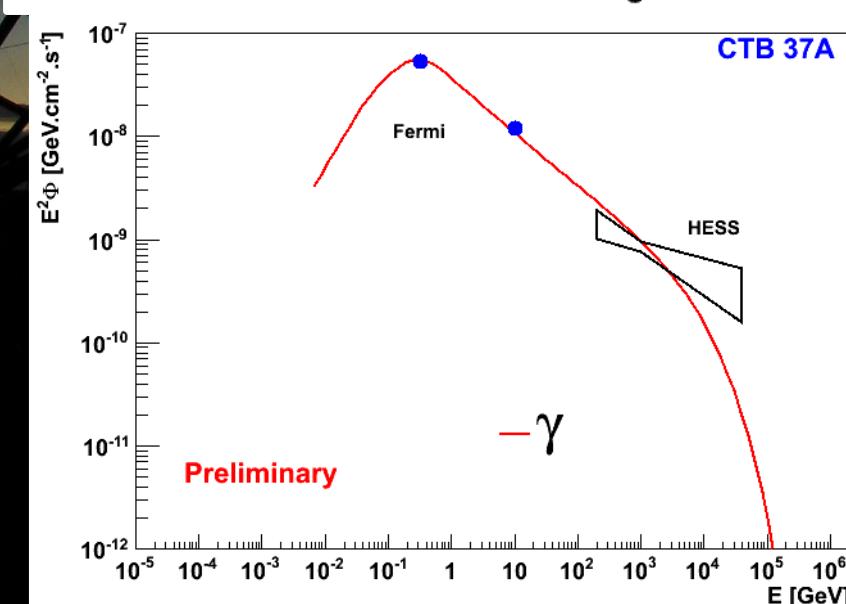
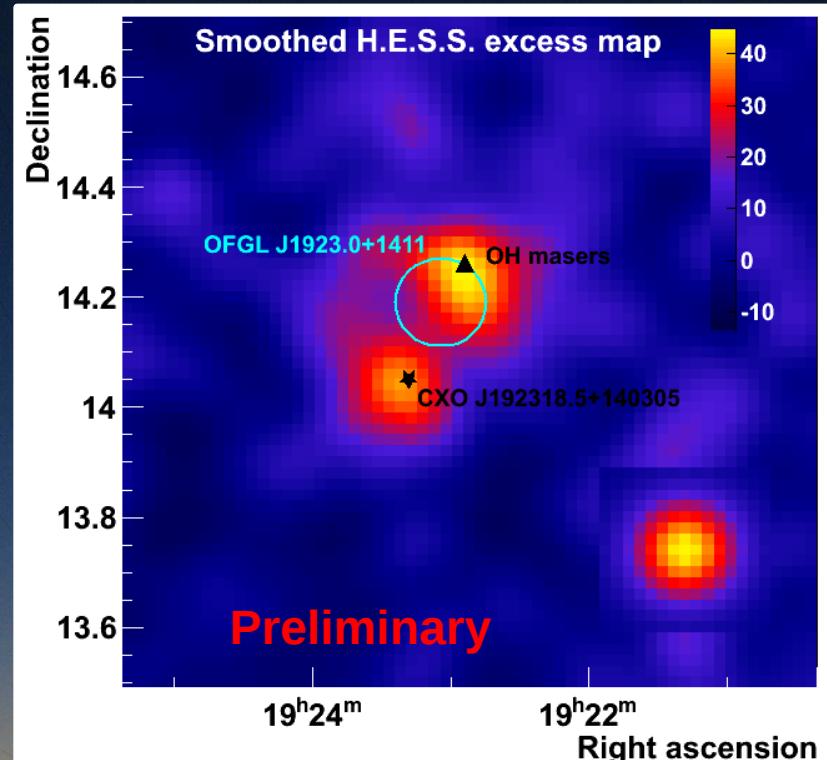
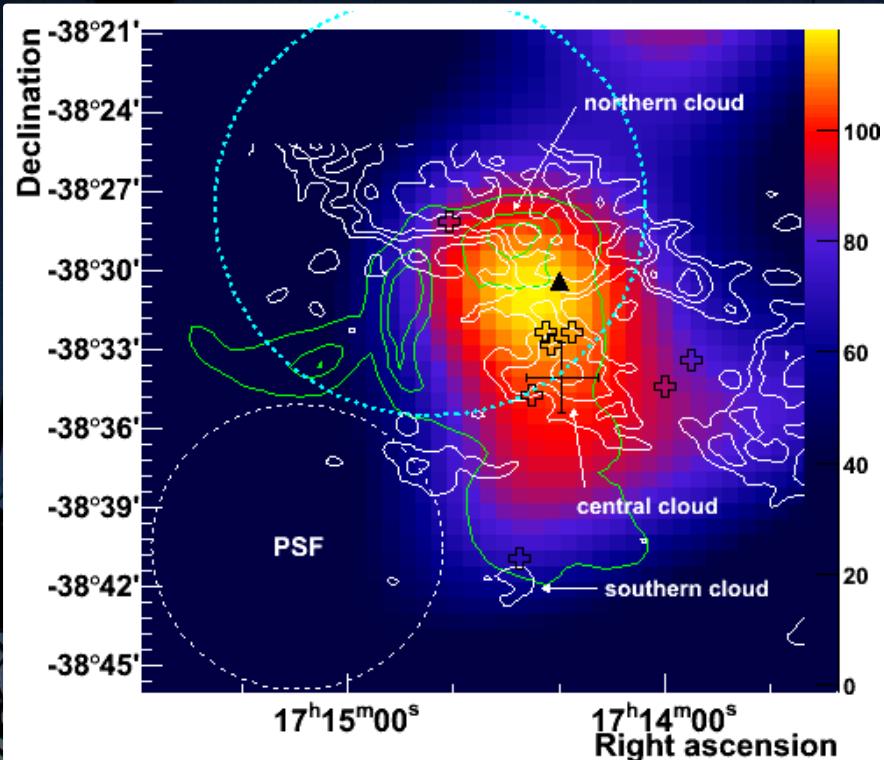
W51C & HESS J1923+141



[Fiasson et al. 2009] [Aharonian et al., en prep.]

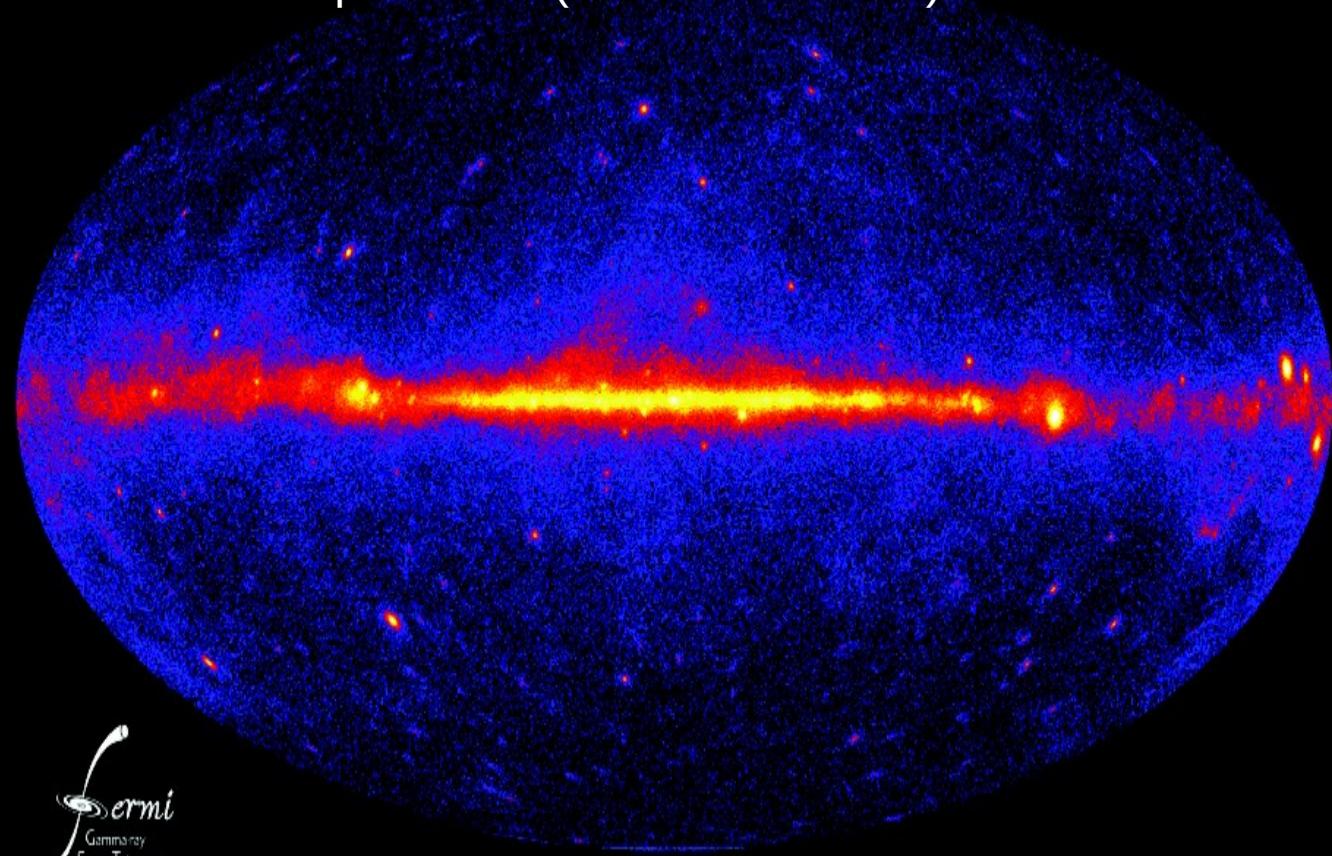
- Région de W51 observée entre 2007 et 2009
=> Nouvelle source de rayons gamma
- Source étendue comparée à la PSF de HESS
- Flux intégré >1 TeV équivalent à 3% du flux provenant de la Nébuleuse du Crabe
- Plusieurs associations possibles
 - Nébuleuse de pulsar
 - Nuages moléculaires choqués
=> deux origines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

Associations GeV-TeV



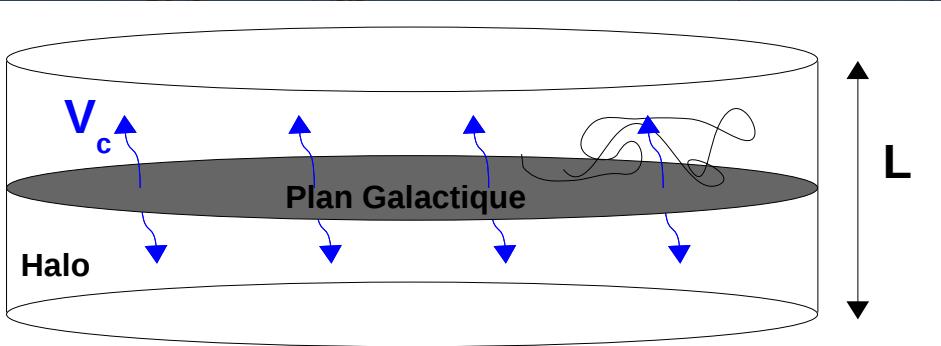
Le fond gamma diffus

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



Prottons/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

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

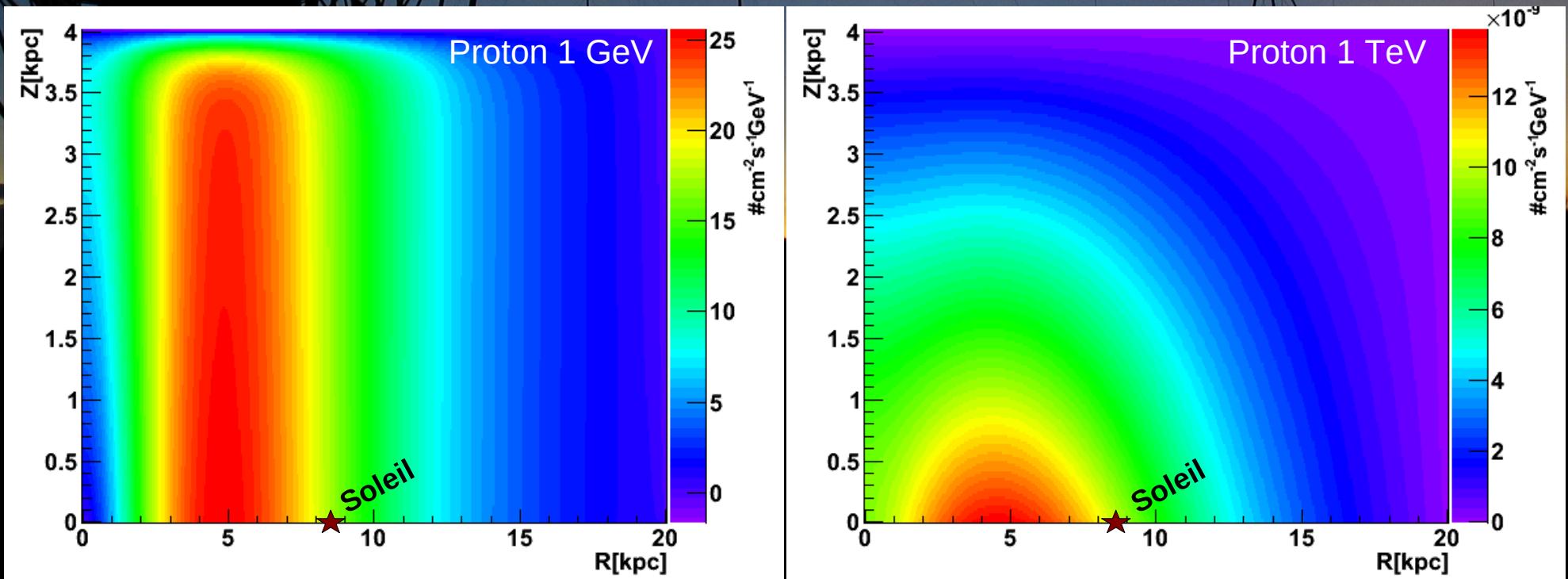
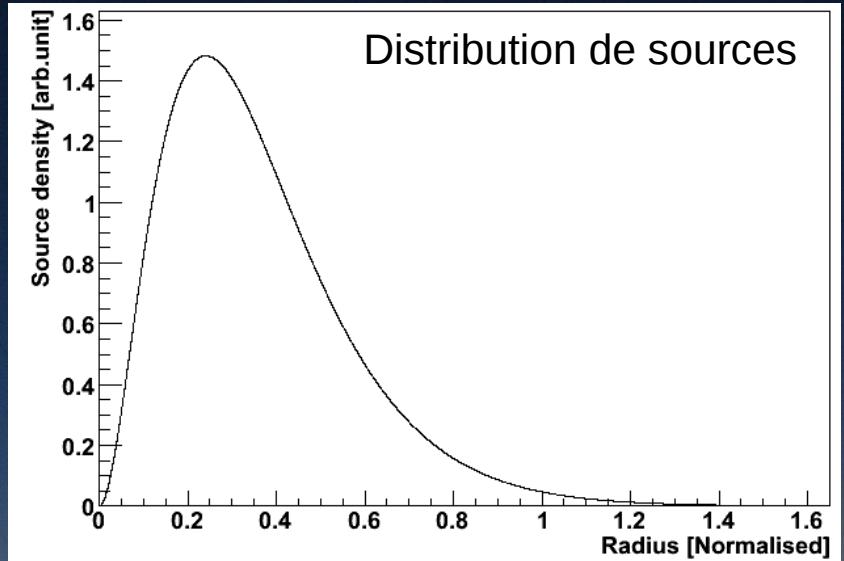
$$\partial_z (V_c \Psi) - K \Delta \Psi + \partial_E (b^{loss}(E) \Psi) = Q(r, z, E)$$

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

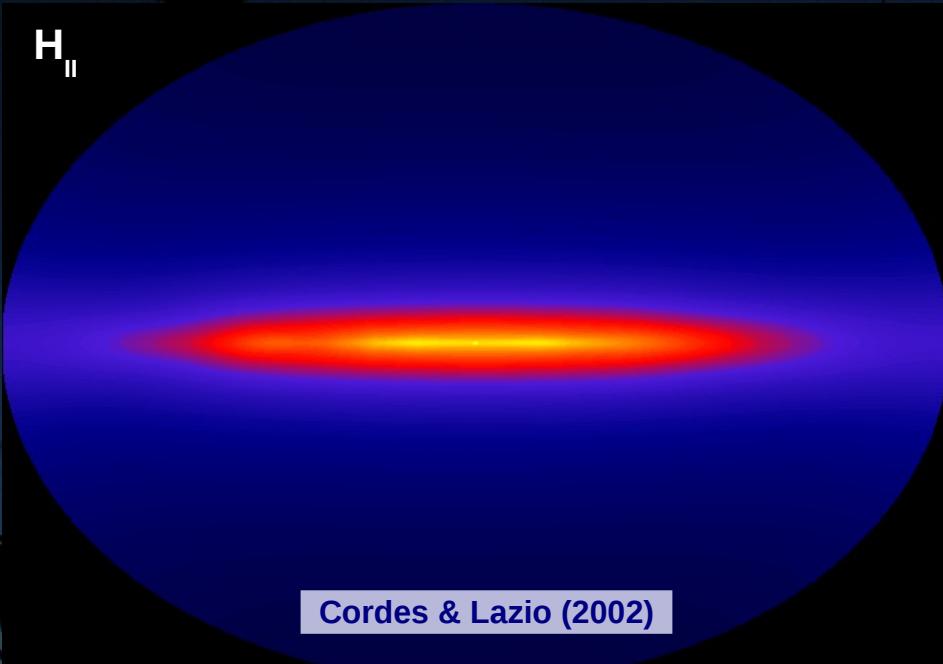
Distribution des rayons cosmiques

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



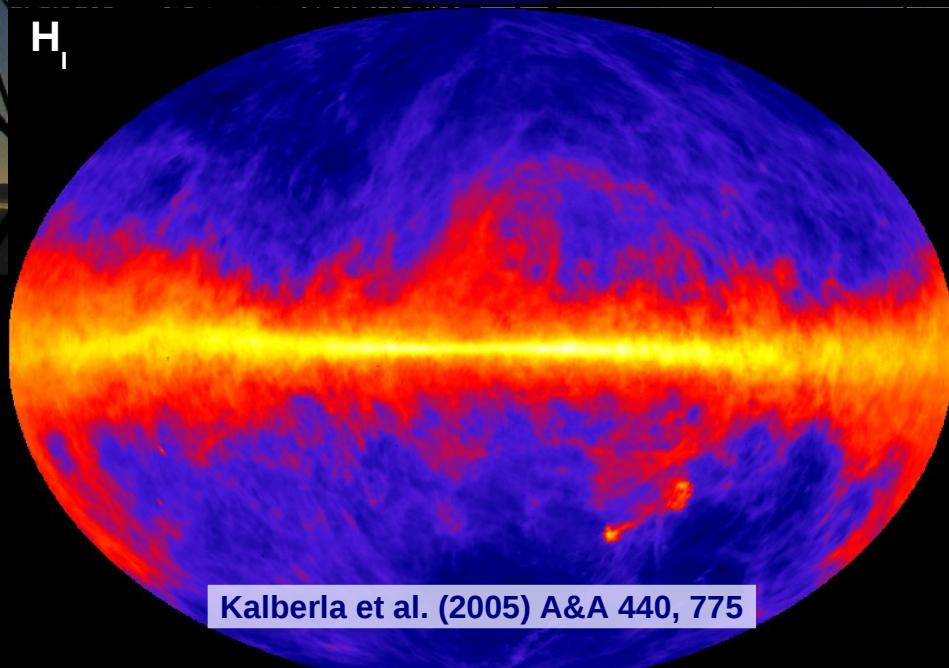
Les cibles

H_{\parallel}



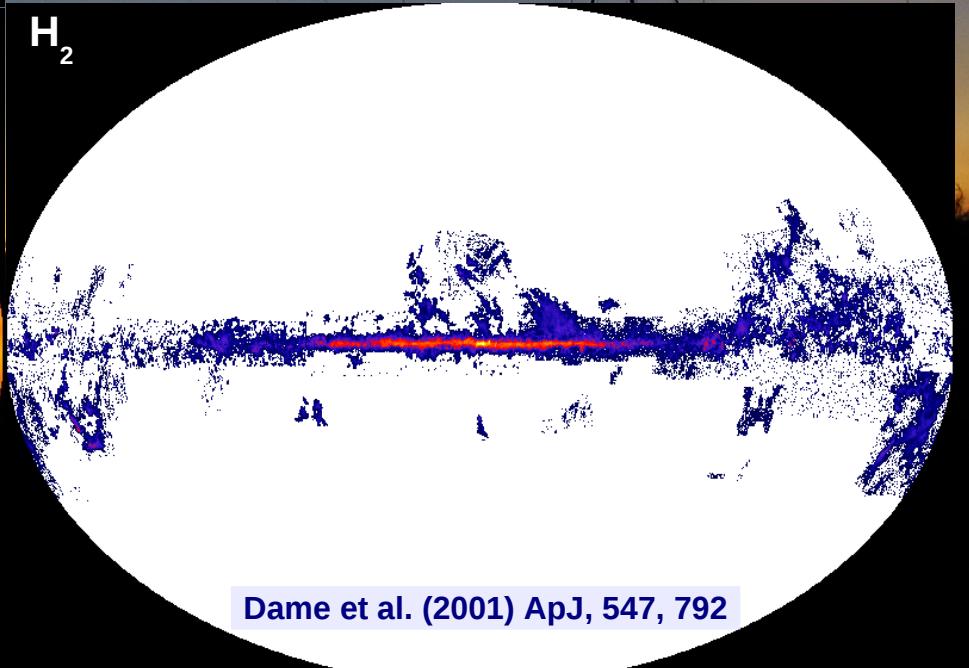
Cordes & Lazio (2002)

H_i



Kalberla et al. (2005) A&A 440, 775

H_2



Dame et al. (2001) ApJ, 547, 792

La matière cible est sous diverse forme

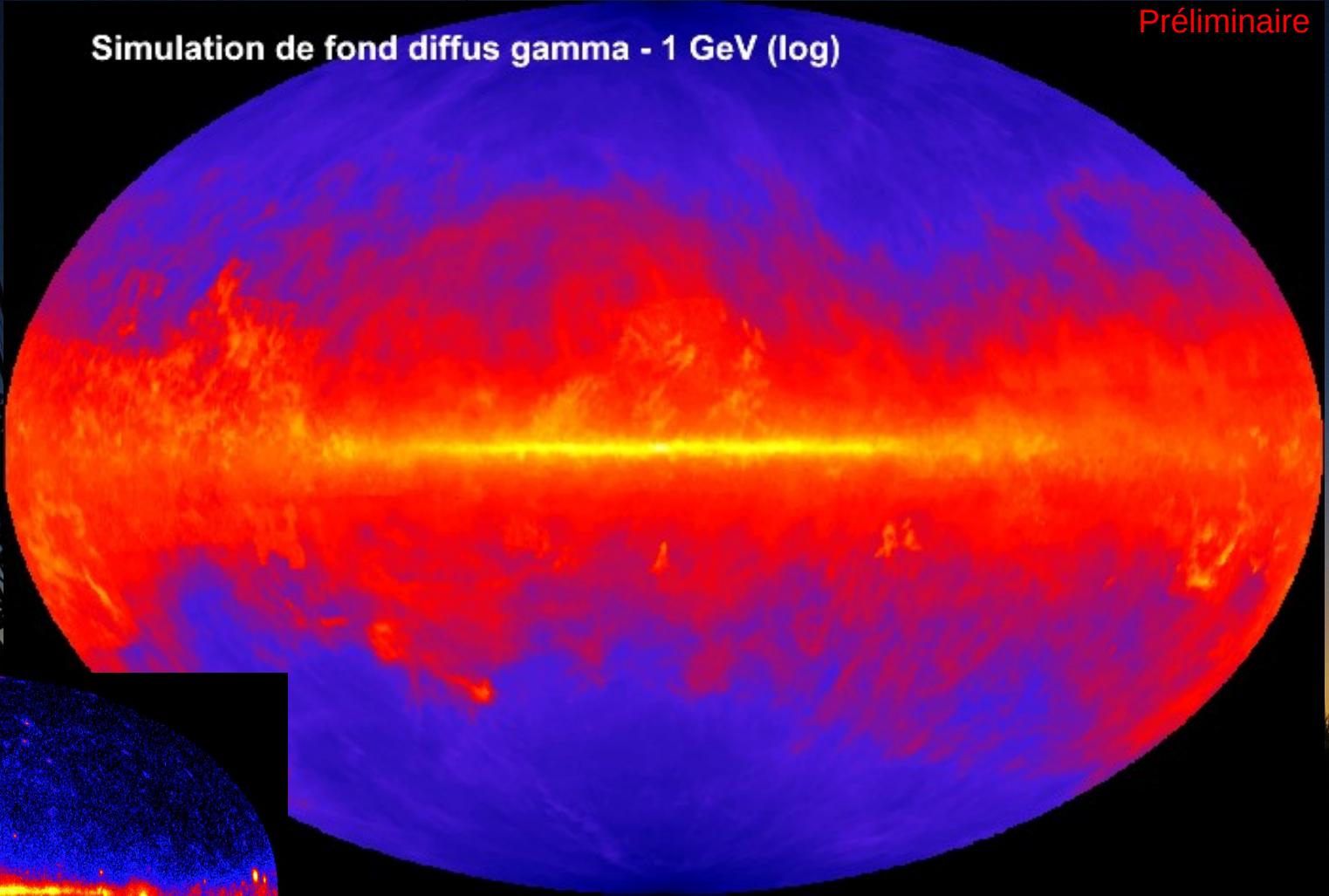
(principalement de l'hydrogène ~90%)

- Ionisée H_{\parallel} (distribution d' e^-)
- Atomique H_i (relevé raie H_i)
- Moléculaire H_2 (relevé raie du CO)

L'émission gamma associée



Le ciel au GeV



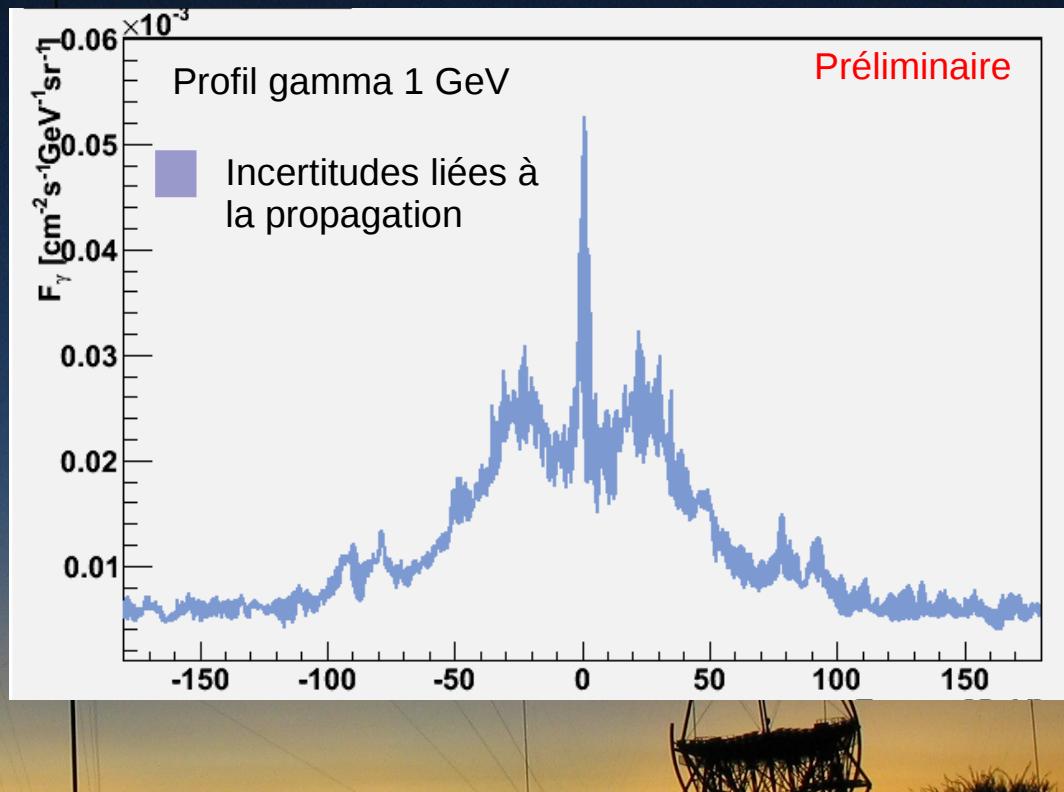
- Composante hadronique uniquement
=> Composante électronique + sources additionnelles présente sur la carte Fermi

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

Merci pour votre attention!

