

Etude des sources gamma dans le plan galactique avec H.E.S.S.

Hélène LAFFON
LLR, Ecole Polytechnique



JJC, 26 novembre 2010



Plan

1) L'astronomie gamma: lieux et mécanismes de production

- Les principales sources gamma galactiques
- Les mécanismes d'accélération
- Les processus physiques mis en jeu

2) L'instrumentation au TeV

- Les observatoires Tcherenkov

3) Analyse des données

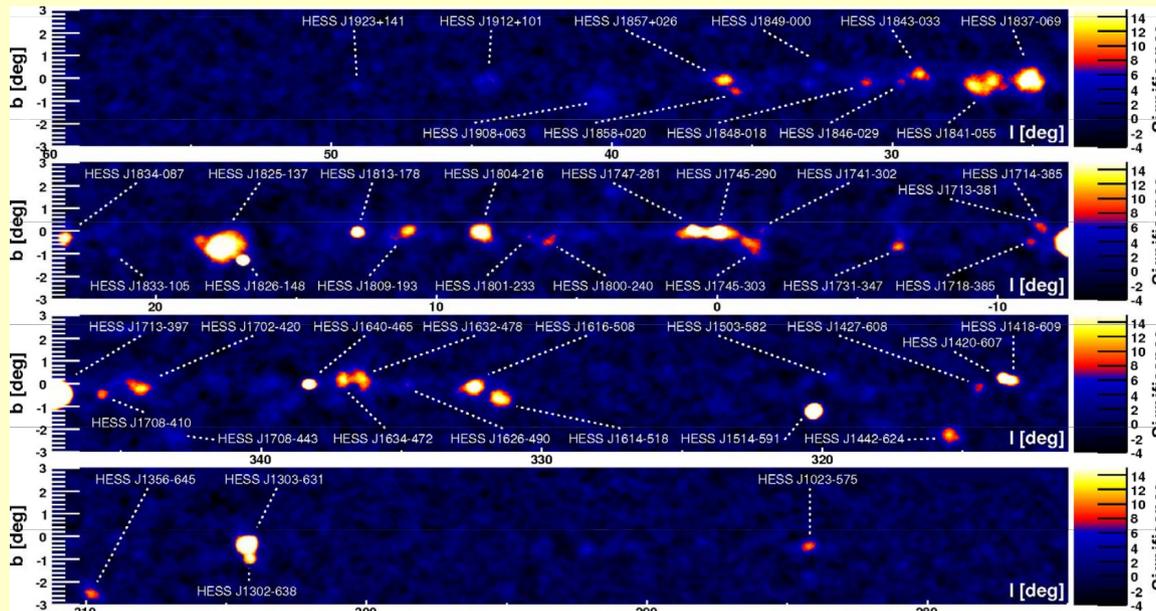
- Les différents bruits de fond
- Les méthodes de reconstruction
- Les données multi-longueur d'onde

4) Amélioration de la résolution angulaire

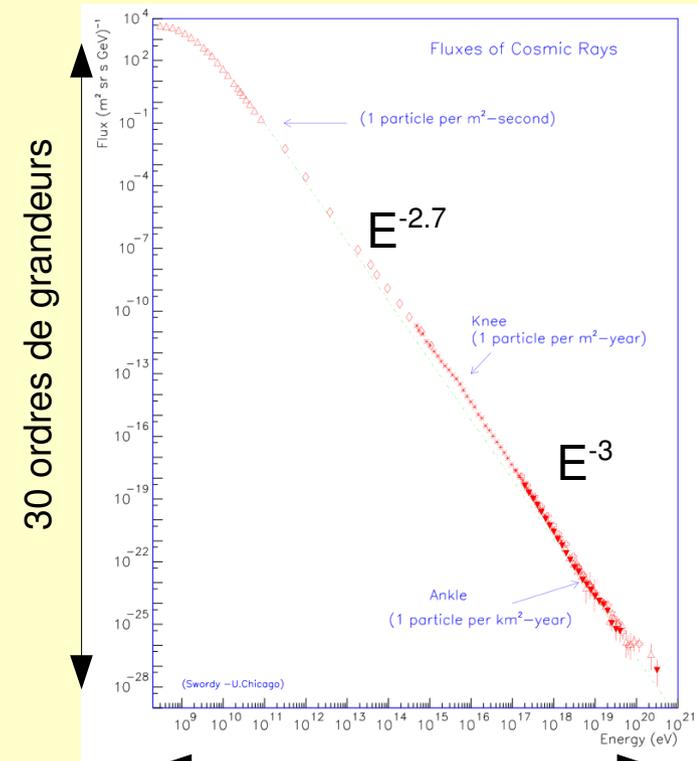
5) Etude d'un reste de supernova: G22.7-0.2

1) L'astronomie gamma: c'est quoi?

- De ~ 100 MeV à ~ 100 TeV
- But premier \rightarrow comprendre l'origine des rayons cosmiques (recherche indirecte)
- Étude des sources observées



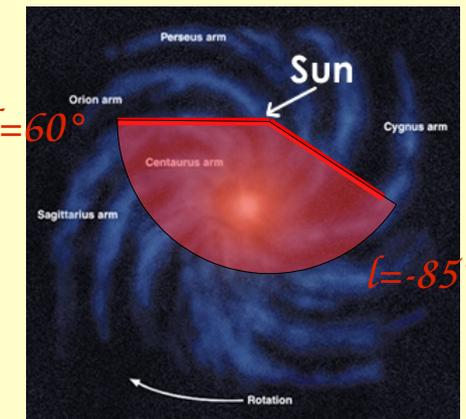
\hookrightarrow Plan galactique vu par HESS



30 ordres de grandeurs

12 ordres de grandeurs

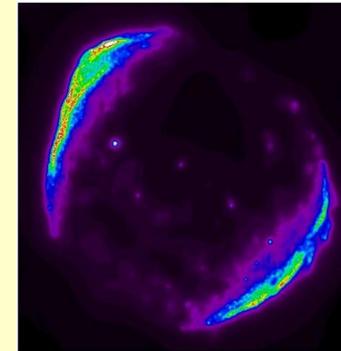
\hookrightarrow Spectre des rayons cosmiques



Les principales sources gamma galactiques

- **Les restes de supernovae (SNR)**

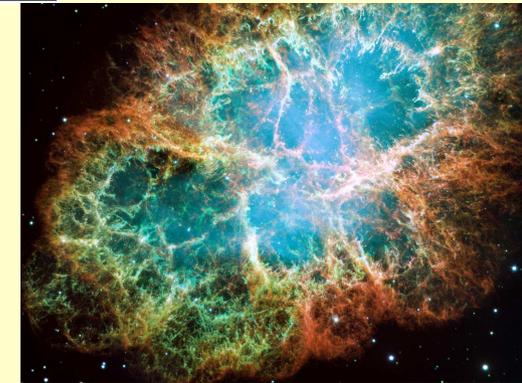
- Expansion du plasma chaud dans le milieu interstellaire
- Ondes de choc



← SN1006

- **Les pulsars et leurs nébuleuses**

- Énergie rotationnelle permet d'accélérer les particules chargées
- Formation d'un vent relativiste qui remplit la nébuleuse



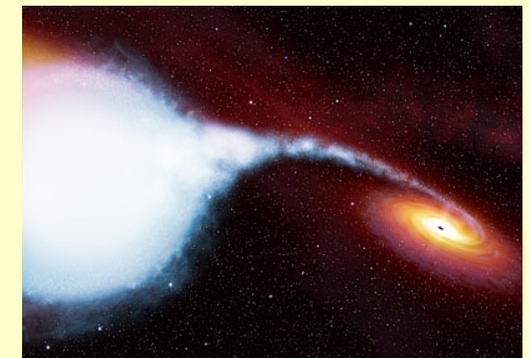
Nébuleuse du Crabe

- **Les nuages moléculaires**

- Intéraction des RC avec les particules du nuage

- **Binaires**

- Vent stellaire de l'étoile massive alimente en énergie l'onde de choc de la nébuleuse → phénomène périodique variable



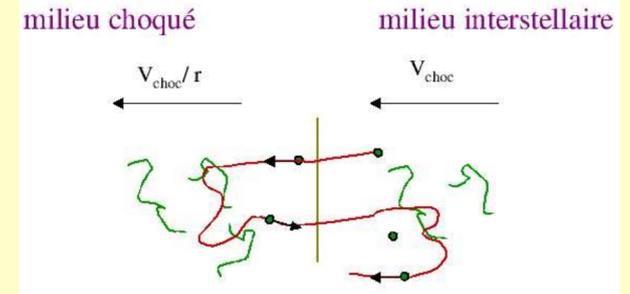
- **Microquasars**

- Trou noir avec disque d'accrétion et émission de jets de particules relativistes

Les mécanismes d'accélération

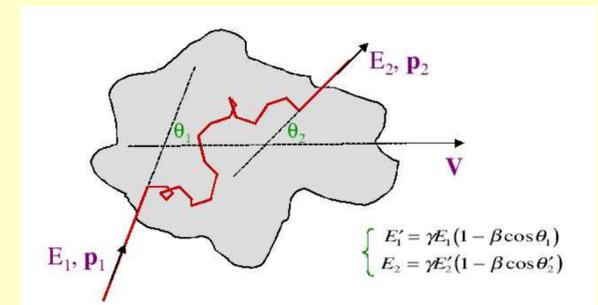
- « Fermi 1er ordre »: accélération par ondes de choc

- Processus efficace
- SNRs



- « Fermi 2ème ordre »: chocs avec nuages magnétisés

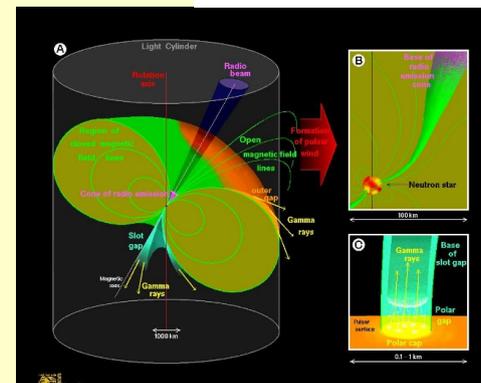
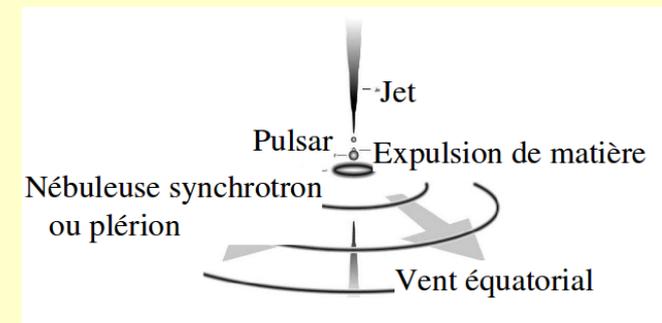
- Moins efficace
- Nuages moléculaires géants



- Accélération par énergie rotationnelle des pulsars

→ 3 zones possibles:

- Près du pulsar (polar cap ou outer gap)
- Dans le vent relativiste
- Au niveau du choc terminal



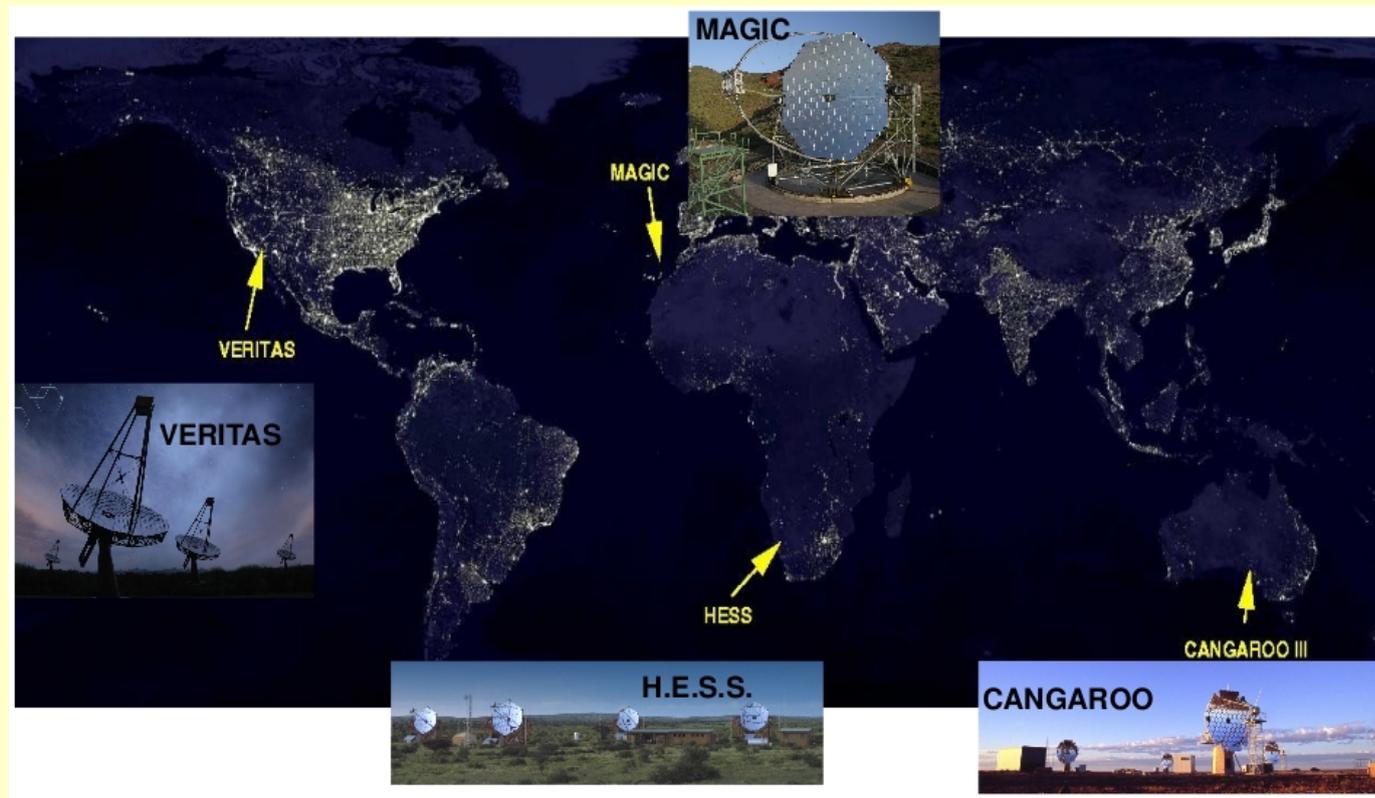
Les mécanismes de production des γ

Principaux processus physiques donnant lieu à une émission γ :

- Hadronique: $pp \rightarrow \pi_0 \rightarrow \gamma \gamma$
- Leptoniques:
 - Rayonnement synchrotron
 - Compton inverse sur fond diffus galactique (CMB, IR, optique)
 - « Synchrotron-Self Compton »: compton inverse sur $\gamma_{\text{synchrotron}}$

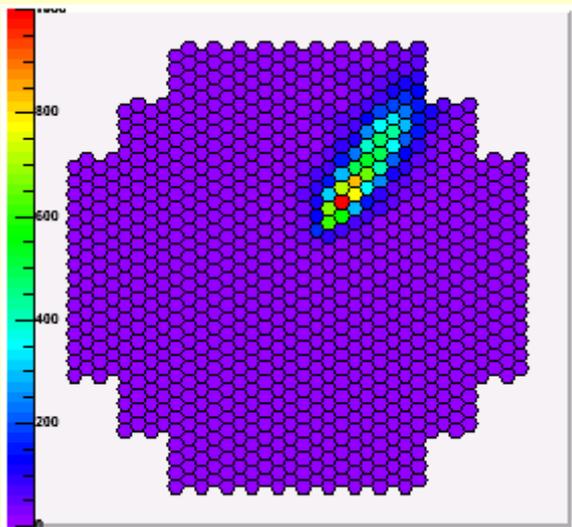
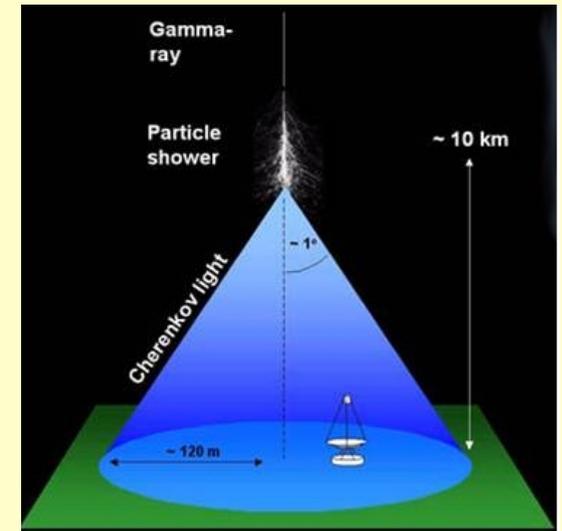
2) Instrumentation au TeV

- De 100 MeV à 10 GeV → télescopes spatiaux (satellites)
→ EGRET, Fermi
- Détecteurs Tcherenkov atmosphériques: 4 expériences actuellement
- Gamme d'énergie ~50 GeV à 50 TeV



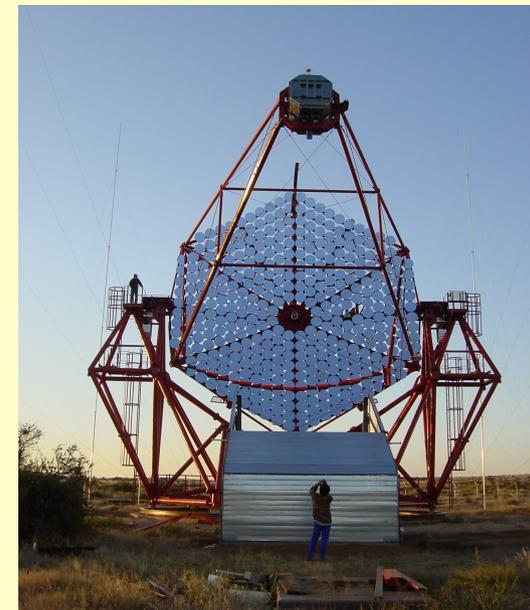
2) Télescopes Tcherenkov atmosphériques: principe

- γ crée une gerbe électromagnétique à son entrée dans l'atmosphère
- Production d'un flash Tcherenkov détecté par les télescopes
- Observation de l'image en optique de la gerbe sur la caméra (détection indirecte)



← *exemple de gerbe observée sur la caméra*

JJC, 26 novembre 2010



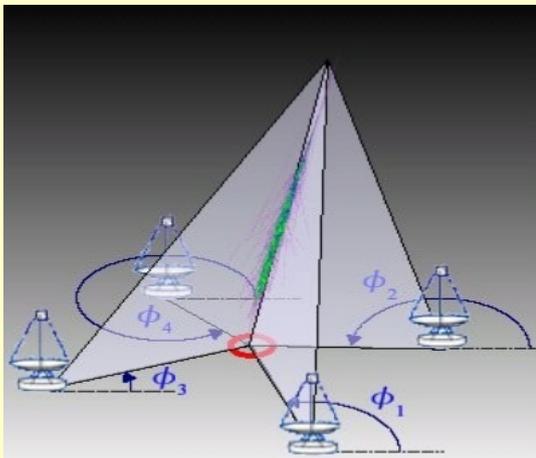
Un télescope de H.E.S.S.

2) Télescopes à effet Tcherenkov: la stéréoscopie

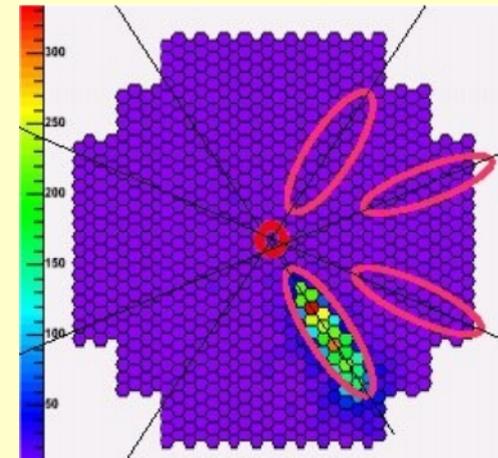
- H.E.S.S. → High Energy Stereoscopic Array



- 4 télescopes: la stéréoscopie permet de remonter plus facilement à la direction du gamma incident

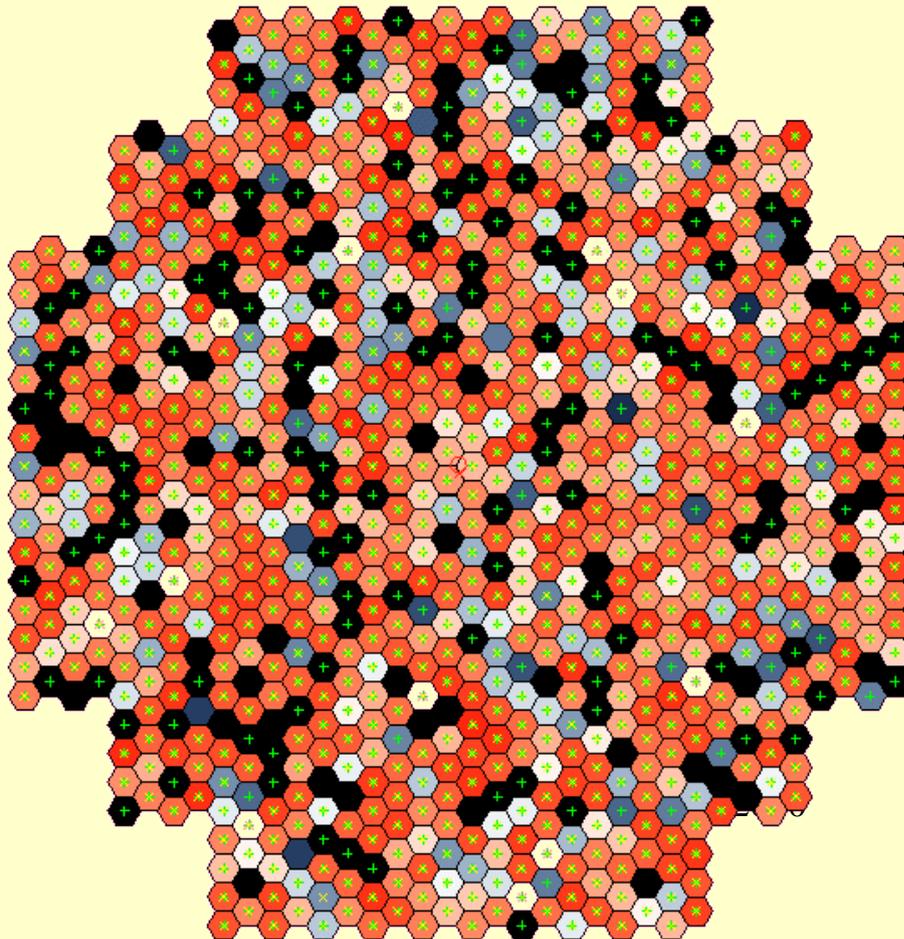


JJC, 26 novembre 2010



3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra

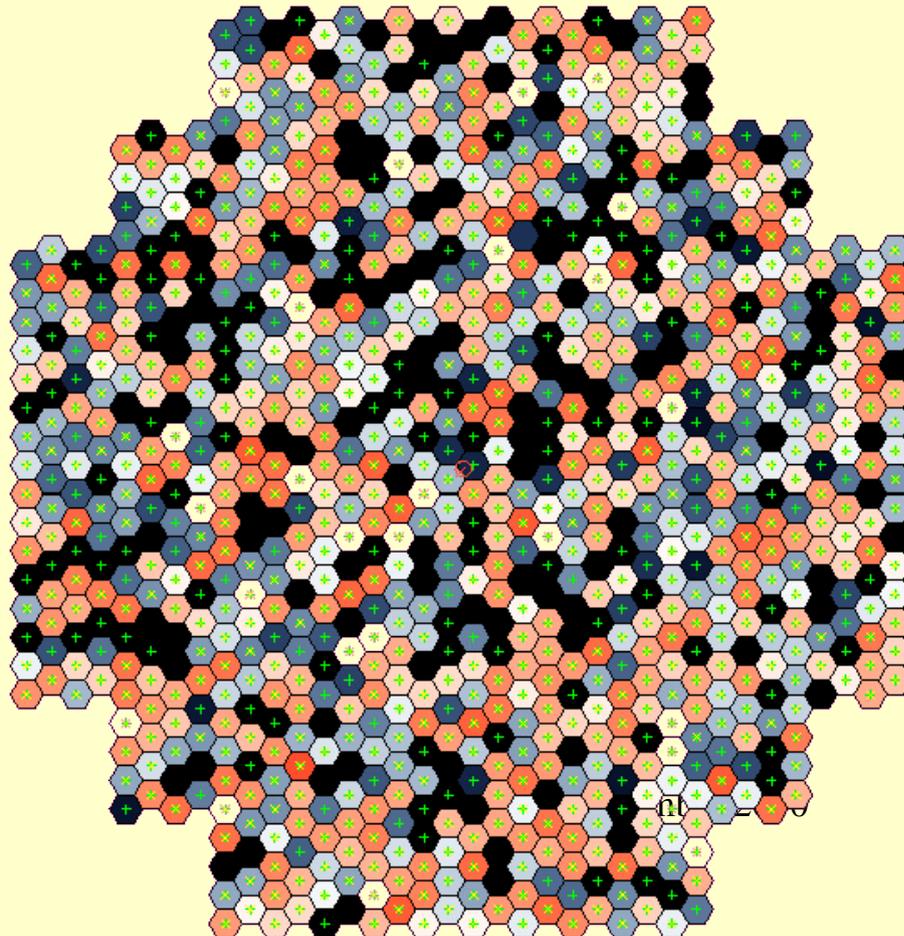


1 PM détecte 1 photon/5
(20% d'efficacité)!

Temps d'intégration = 100 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

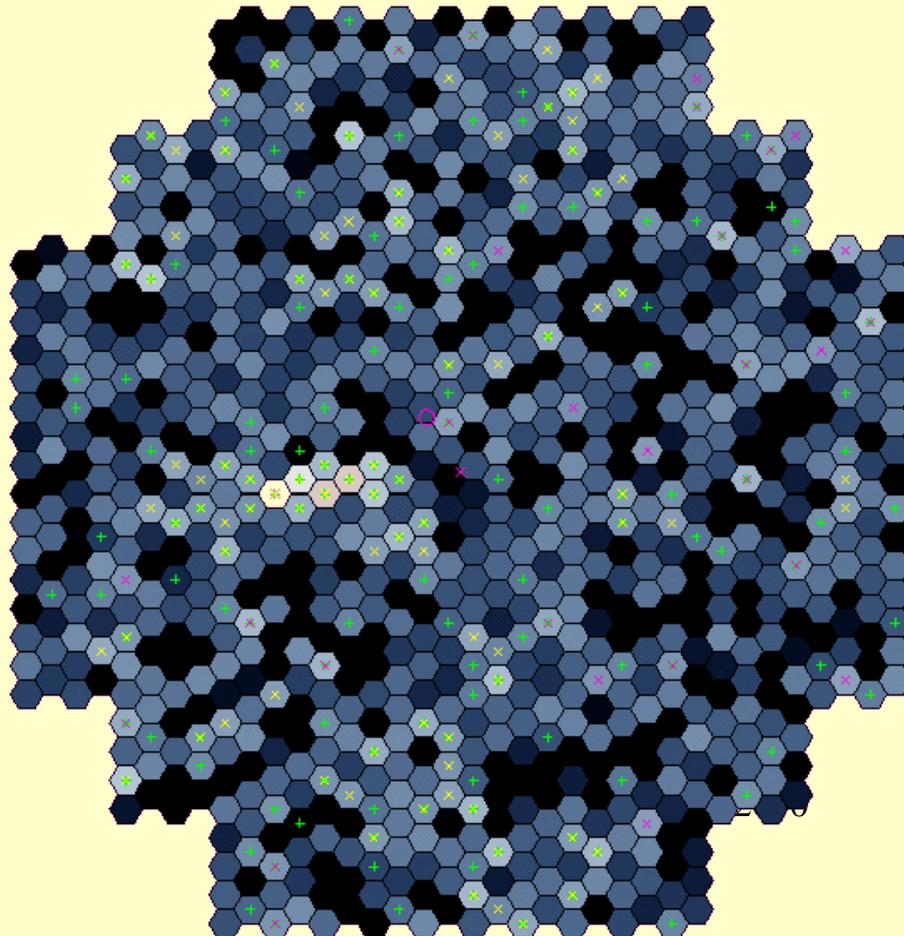
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



Temps d'intégration = 10 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

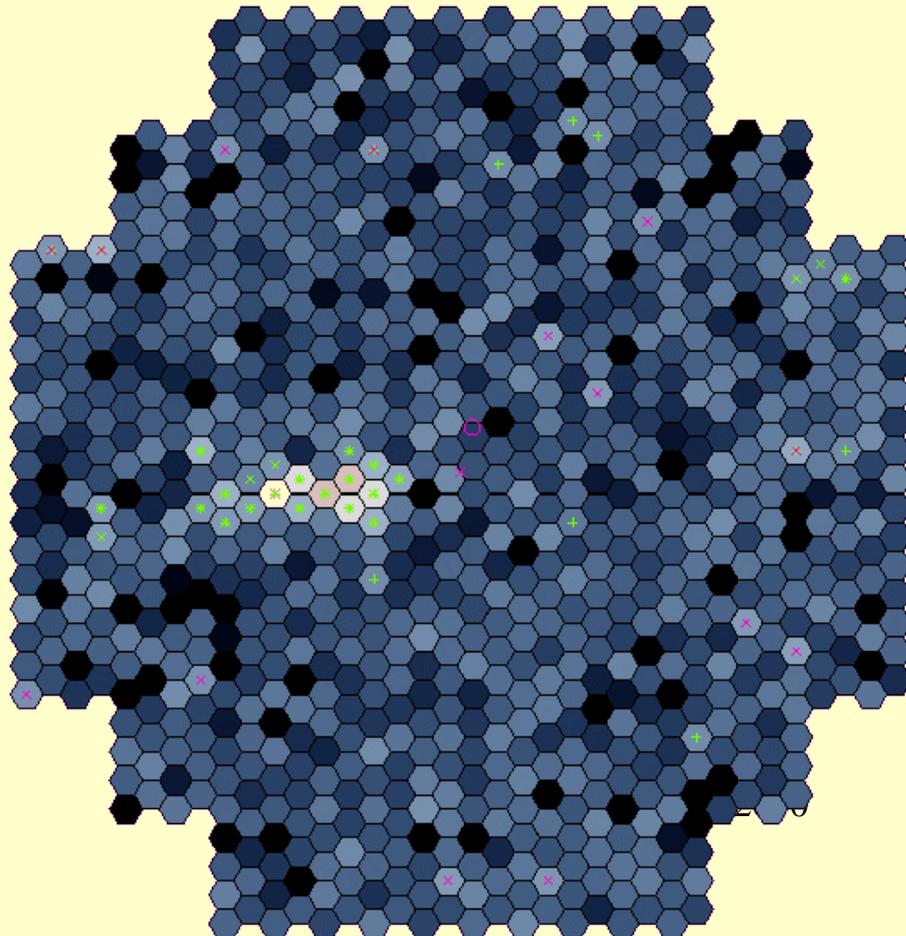
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



Temps d'intégration = 1 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

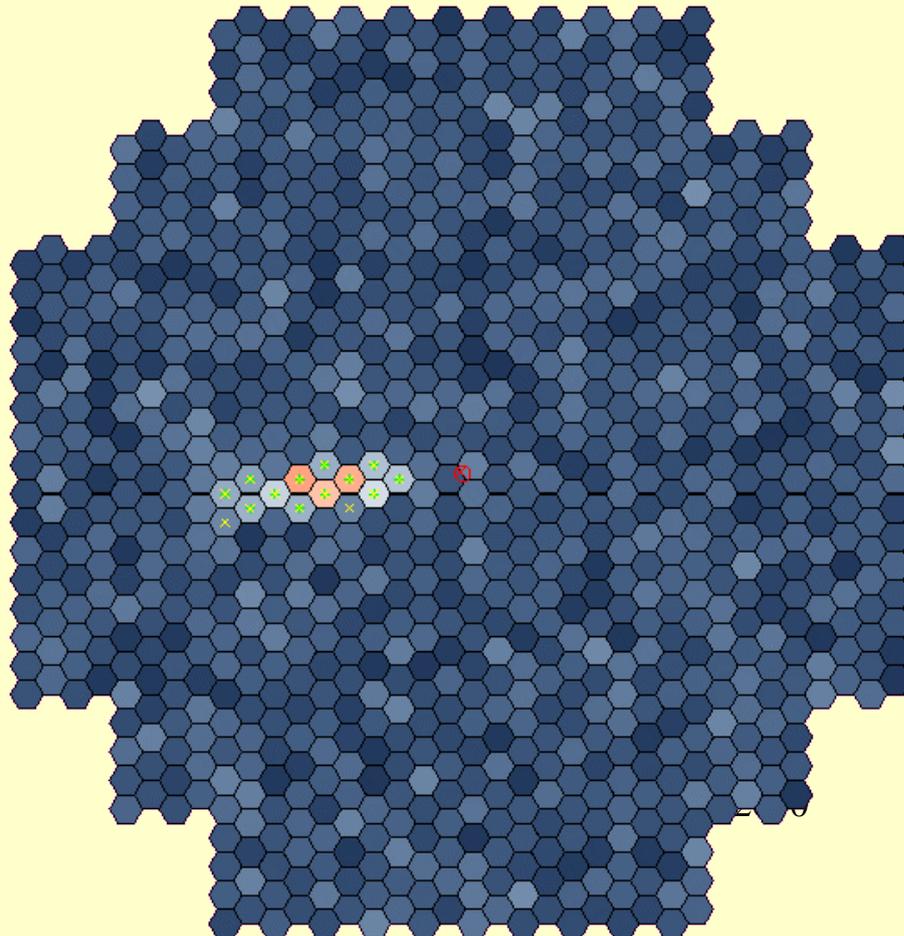
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



Temps d'intégration = 100 ns

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



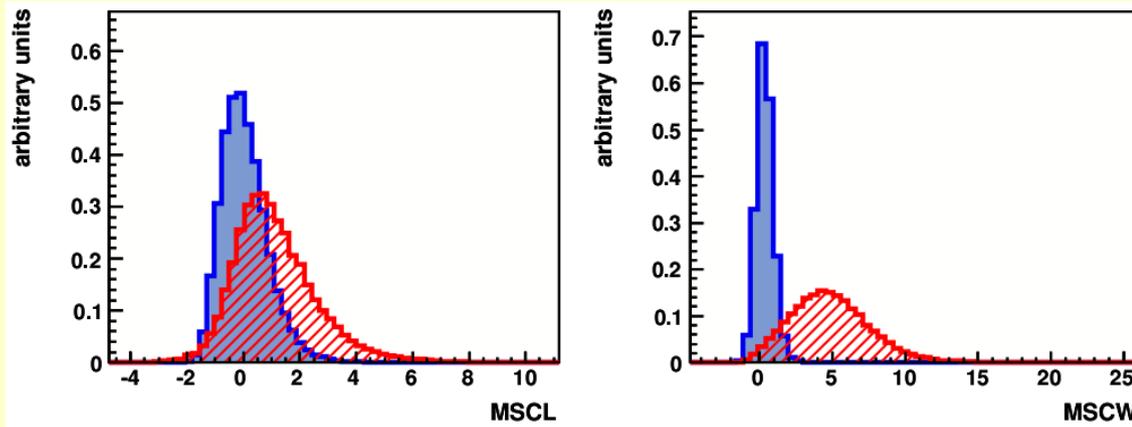
Temps d'intégration = 10 ns

Les principaux bruits de fond

- Hadronique: rayons cosmiques produisent aussi des gerbes atmosphériques, mais de nature différente

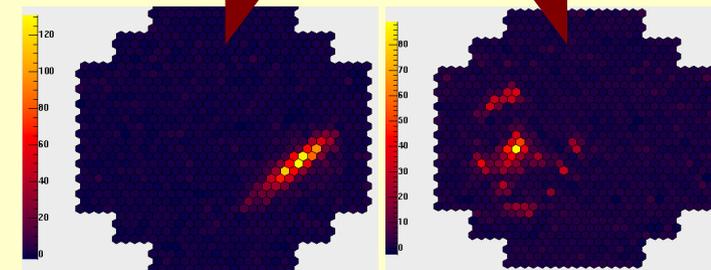
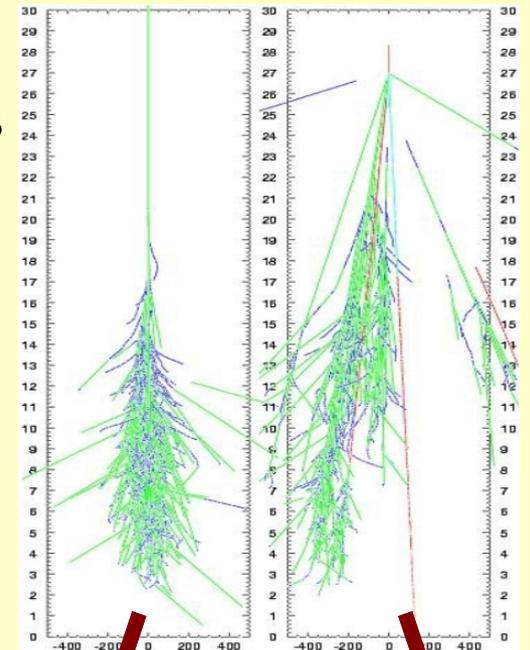
→ Discrimination hadrons/ γ grâce à des paramètres géométriques: largeur et longueur moyennes réduites de l'image sur la caméra

$$MSP = \frac{1}{N} \sum_i \frac{P^i - \langle P^i \rangle}{\sigma_P^i}$$



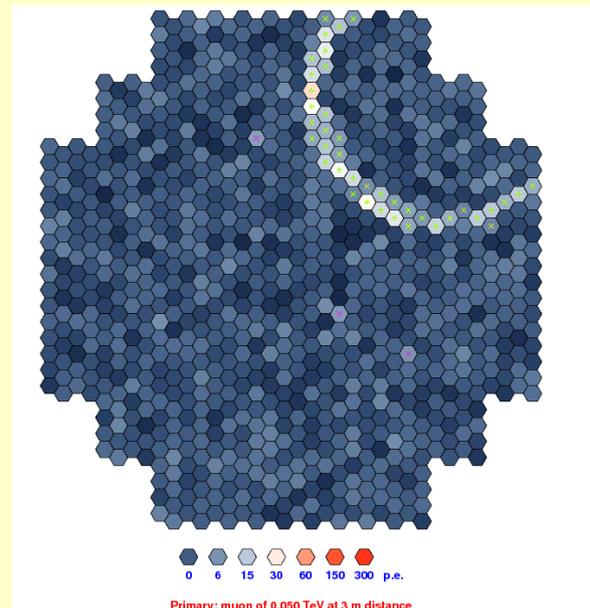
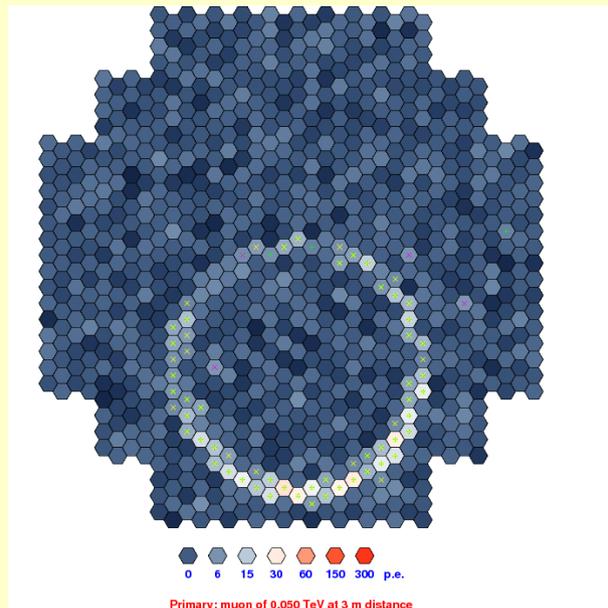
↳ distributions des longueurs et largeurs réduites pour les **gammas** et **hadrons**

gerbe EM gerbe hadronique



Les principaux bruits de fond

- Les muons isolés provenant des gerbes hadroniques
→ éliminés par la stéréoscopie ou par les critères de forme



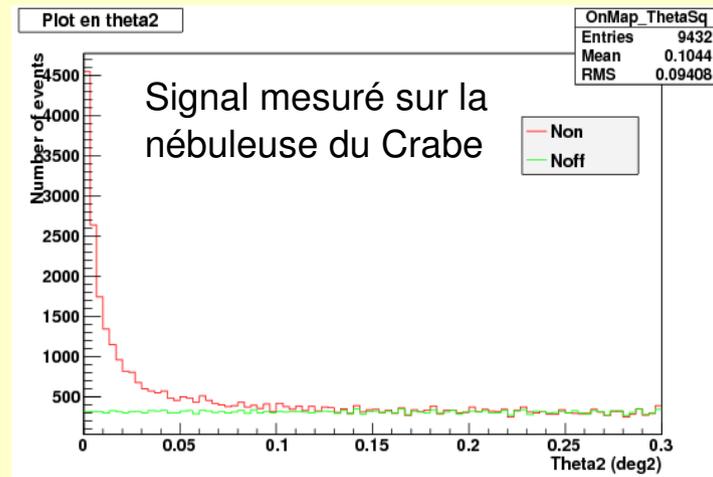
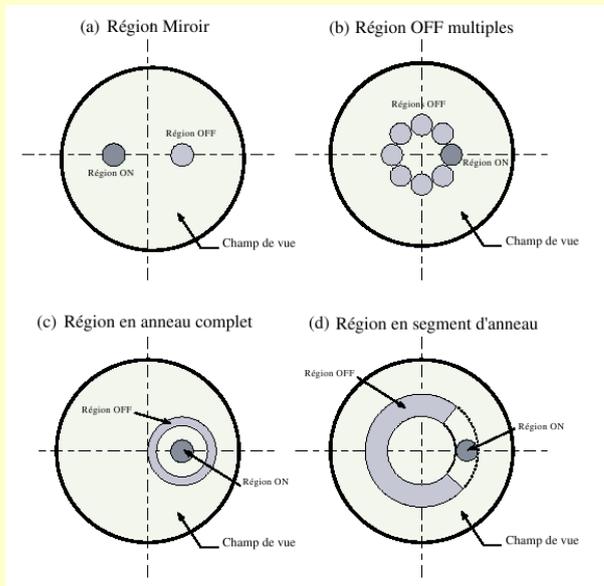
← exemples de muons observés sur la caméra

Les principaux bruits de fond

- Les électrons/positrons cosmiques
- Problème: ils forment des gerbes EM tout comme les γ \rightarrow pas de distinction possible
- Solution: hypothèse de l'isotropie \rightarrow soustraction quantitative à partir d'une région où il n'y a pas de signal observé

Soustraction des bruits de fond

- Bruits de fond restants: électrons/positrons cosmiques
+ hadrons non supprimés par les coupures de forme
- bruits de fond isotropes → soustraction quantitative à partir d'une région où il n'y a pas de signal observé



$$Excès = N_{ON} - \alpha N_{OFF}$$

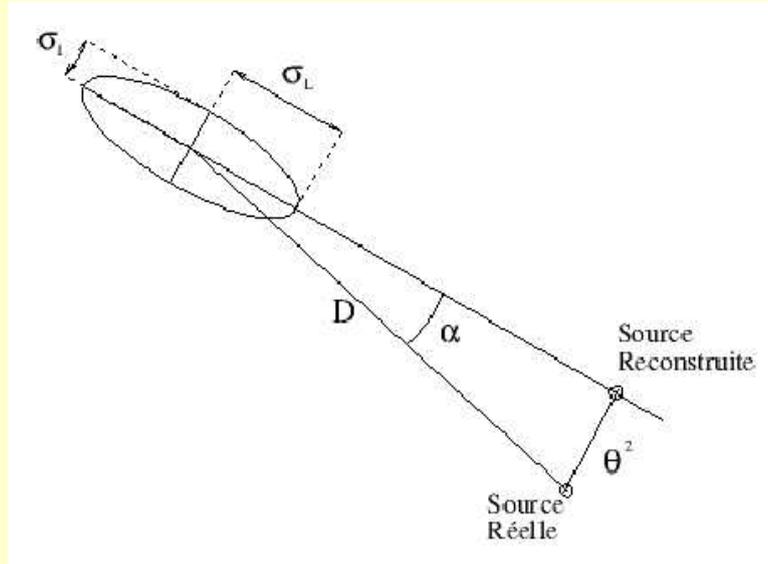
$$\alpha \sim \frac{Surface_{ON}}{Surface_{OFF}}$$

$$Significativité = \frac{Excès}{\sqrt{N_{ON} + \alpha^2 N_{OFF}}}$$

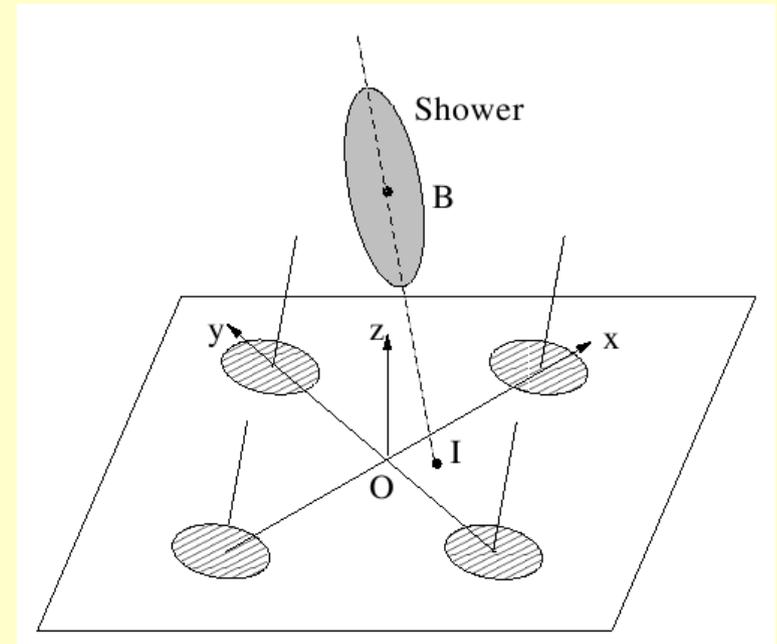
*Exemple de définition de régions OFF
(sans signal) par rapport à la région ON
observée*

3) Analyse des données: les méthodes de reconstruction

- La reconstruction des gerbes consiste à calculer les paramètres intrinsèques de la gerbe pour remonter à la direction et l'énergie du γ incident
- Elle permet aussi de réduire les hadrons (coupures sur critères de forme)
- Exemples de reconstruction utilisées:



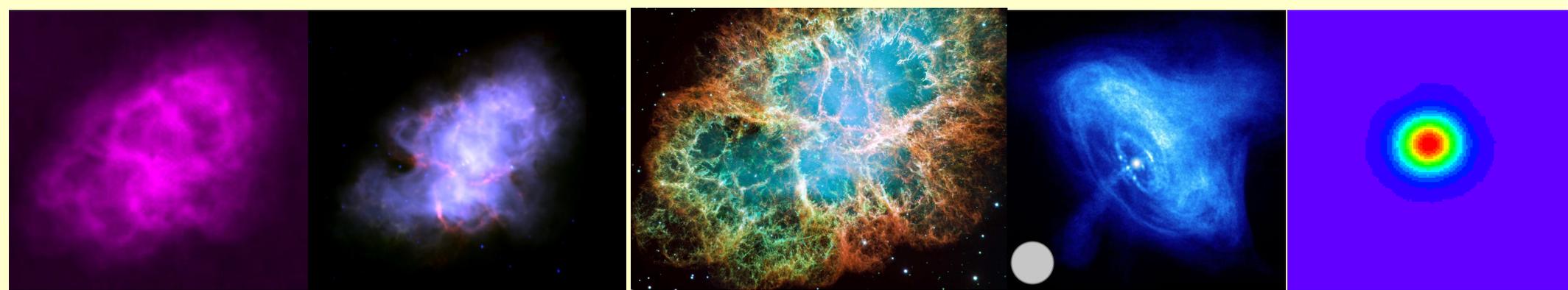
Méthode de Hillas



Méthode « Model3D »

3) Analyse des données multi-longueurs d'onde

- Les sources γ émettent aussi aux autres longueurs d'onde
- Exemple de la nébuleuse de pulsar du Crabe:



Radio

IR (Spitzer)

Optique (Hubble)

X (Chandra)

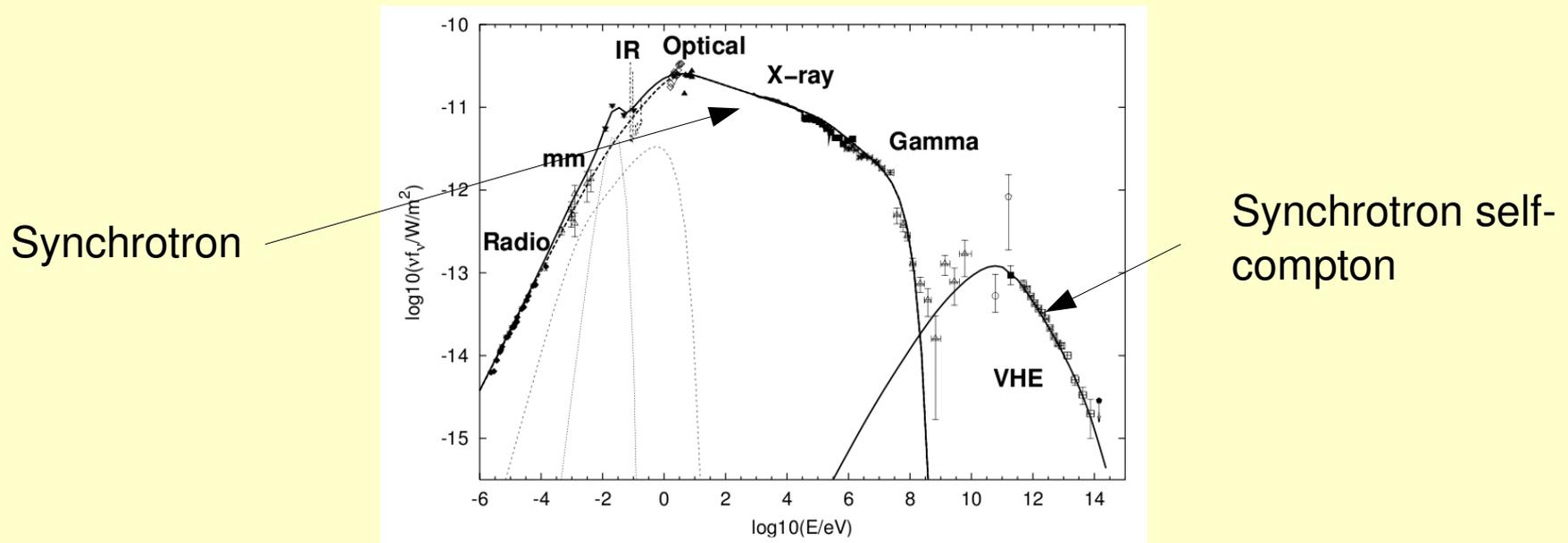
γ (HESS)

λ

E

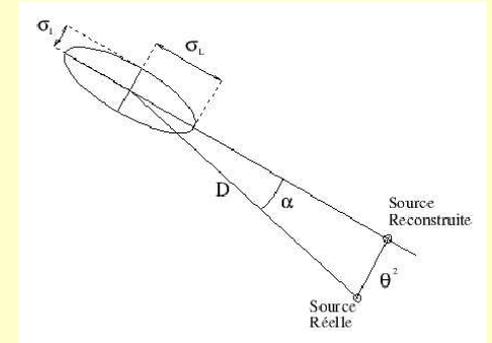
3) Analyse des données multi-longueurs d'onde

- L'origine de l'émission observée peut être expliquée par des modèles (hadroniques ou leptoniques) qui concernent toute la gamme d'énergies
- Exemple de la nébuleuse de pulsar du Crabe:



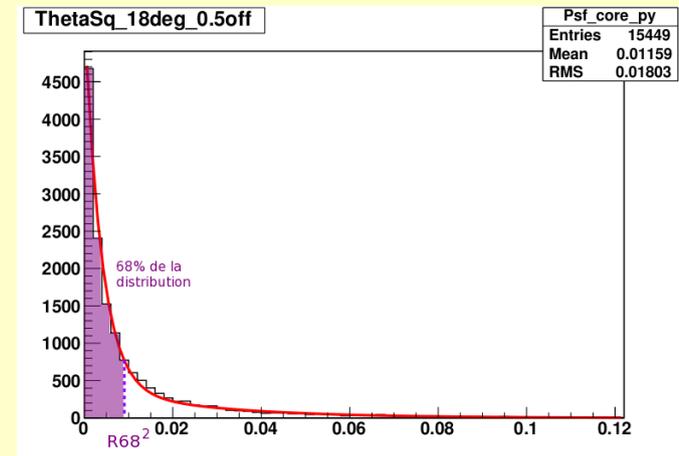
4) Amélioration de la résolution angulaire: Définition

- Θ^2 = écart entre la direction reconstruite et la direction réelle de la source



- Résolution angulaire (R68) = 68% de la distribution de Θ^2 (Point Spread Function)

$$PSF = A \left(\exp\left(\frac{-\theta^2}{2\sigma_1}\right) + A_{rel} \exp\left(\frac{-\theta^2}{2\sigma_2}\right) \right)$$



4) Amélioration de la résolution angulaire

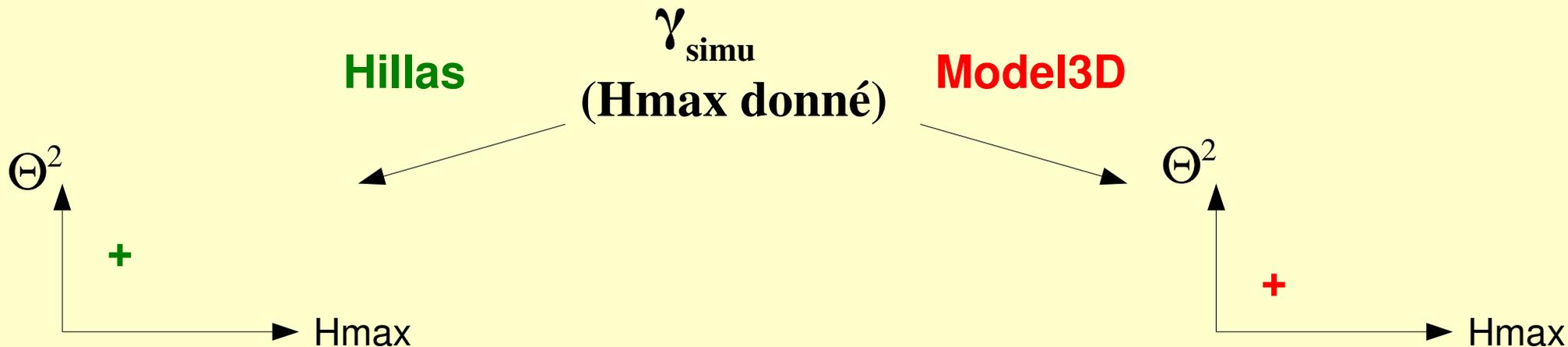
- H.E.S.S. fonctionne depuis 2004 → les sources les plus brillantes en gamma ont déjà été détectées
- Limites de l'instrument → amélioration de la résolution angulaire nécessaire
 - Étude morphologique des sources étendues
 - Détection des sources plus faibles considérées comme du fond
- Amélioration possible avec coupures + strictes:
 - intensité de la gerbe sur la caméra
 - nombre de télescopes déclenchés maximal
- Mais problème: plus assez de statistique (trop peu d'événements)

Amélioration de la résolution angulaire

- Idée: jouer sur les différentes méthodes de reconstruction
- Les méthodes de reconstruction sont sensibles à différentes propriétés des gerbes → résolutions angulaires différentes en fonction de certains paramètres
- Création d'un algorithme de choix de la méthode (Hillas ou Model3D) en fonction de la hauteur du maximum de gerbe de l'événement (=maximum de l'émission des photons Tcherenkov)
- Définition d'une variable de choix:
$$K = \frac{2(R68_{M3D} - R68_{Hillas})}{(R68_{M3D} + R68_{Hillas})}$$
- Opérateur « binaire »:
 - $K > 0 \rightarrow$ Hillas
 - $K < 0 \rightarrow$ M3D

1ère étape: simulations

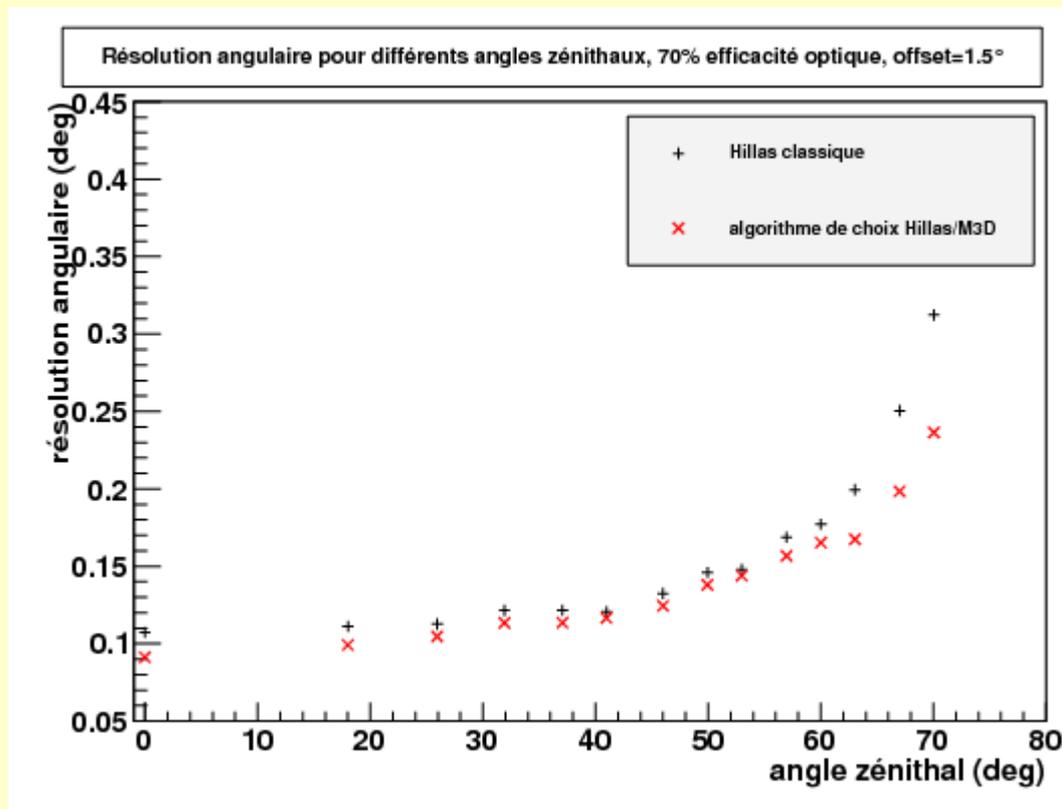
- simulations \rightarrow f(efficacité optique, zénith, offset)
- Pour chaque événement \rightarrow calcul du Θ^2 obtenu avec chaque méthode et remplissage des histogrammes en fonction de Hmax



- Une fois les histos remplis, calcul de la résolution angulaire pour chaque bin en Hmax et calcul de Kappa
- \rightarrow création de tables de choix en Kappa en fonction de efficacité optique, zénith, offset, multiplicité et Hmax à utiliser pour les vrais événements

2ème étape: utilisation des tables

- en fonction des paramètres de l'événement (efficacité optique, zénith, offset, multiplicité et Hmax) → lecture de la table correspondante et choix de la meilleure méthode



← *Résolution angulaire obtenue avec l'algorithme de choix en moyenne **10%** meilleure qu'avec l'analyse Hillas normale dans cette configuration*

3ème étape: utilisation de l'algorithme sur les données réelles



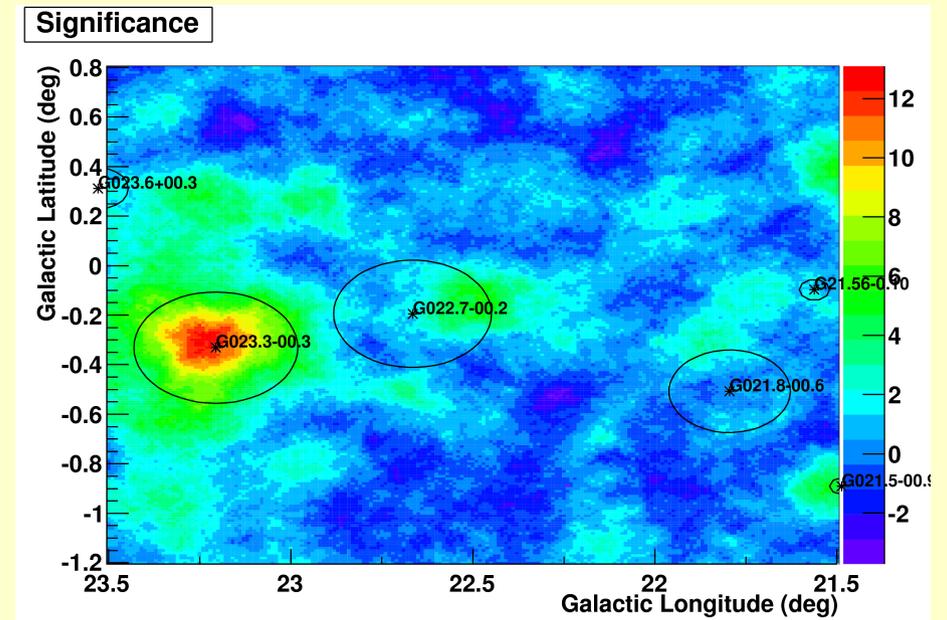
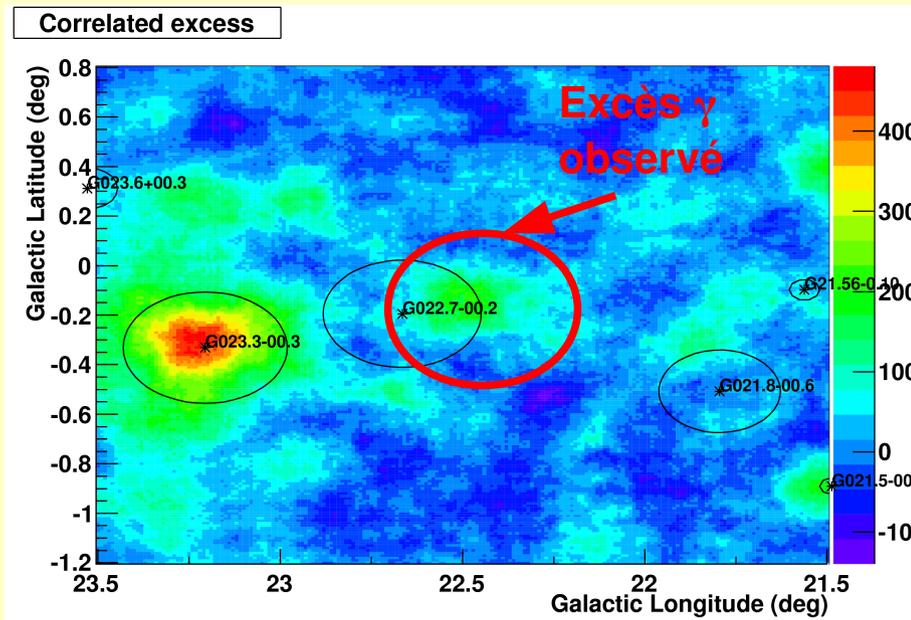
Travail en
cours...

4) Etude d'un reste de supernova: SNR G22.7-0.2

$$Excès = N_{ON} - \alpha N_{OFF}$$

$$\alpha \sim \frac{Surface_{ON}}{Surface_{OFF}}$$

$$Significativité = \frac{Excès}{\sqrt{N_{ON} + \alpha^2 N_{OFF}}}$$



- Position (22.48° , -0.15°) [coordonnées galactiques]
- Source faible (0.5% du flux du Crabe à 1 TeV)
mais tout de même détectée à + de 5σ

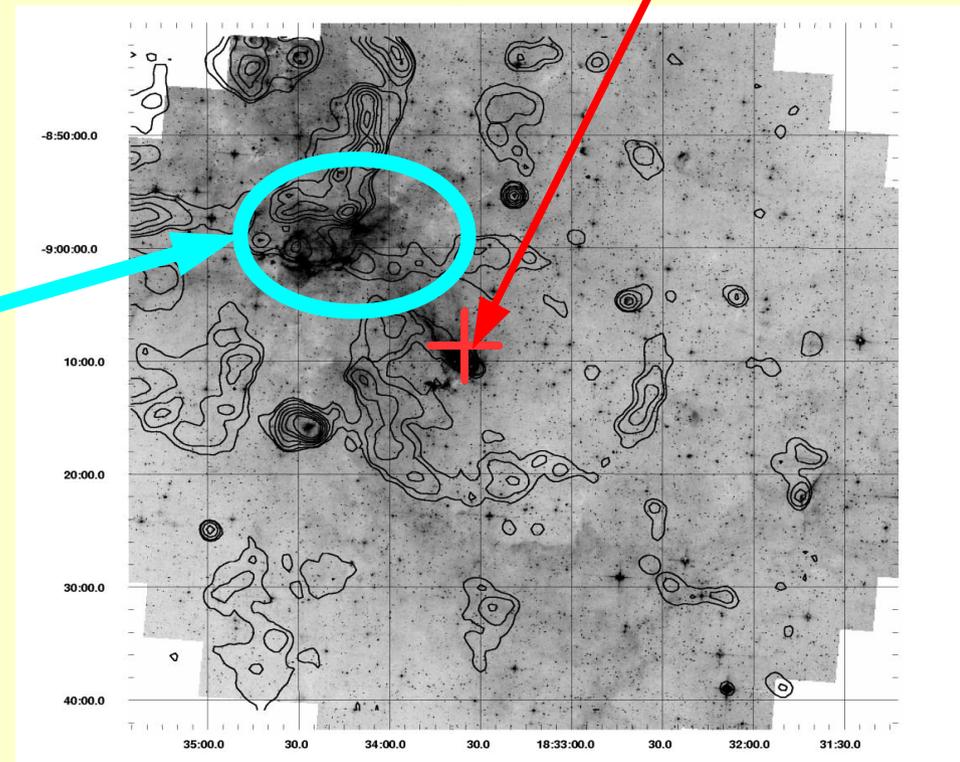
Recherche de contreparties à d'autres λ

- SNR G22.7-0.2 détectée en radio
- Émission IR observée par Spitzer
- Expansion de la SNR dans une région HII
+ possible MASER OH traceur de la matière choquée
→ excitation des nuages par l'onde de choc

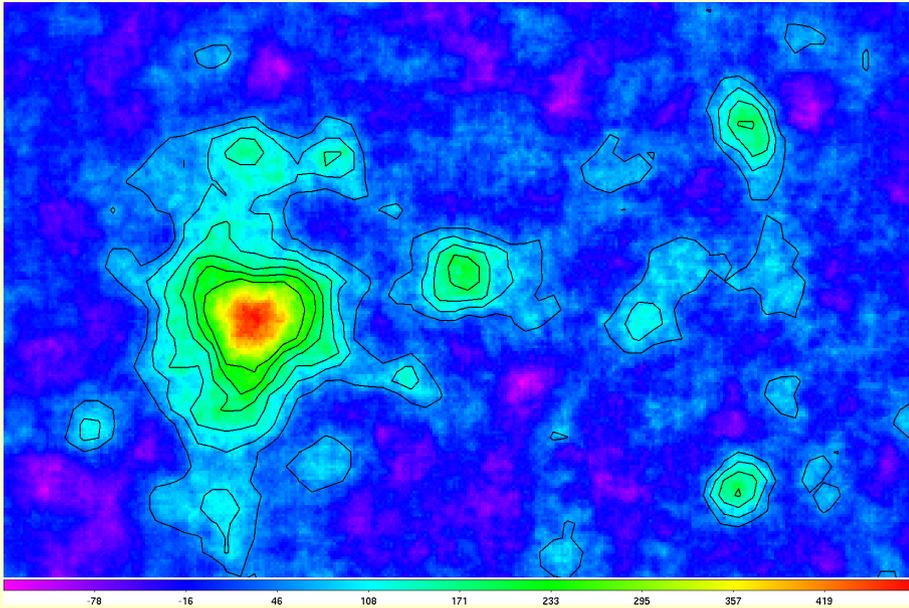
Région HII excitée?

- Possible interaction avec la SNR voisine → ~même distance?
- Données X en attente d'analyse

MASER OH

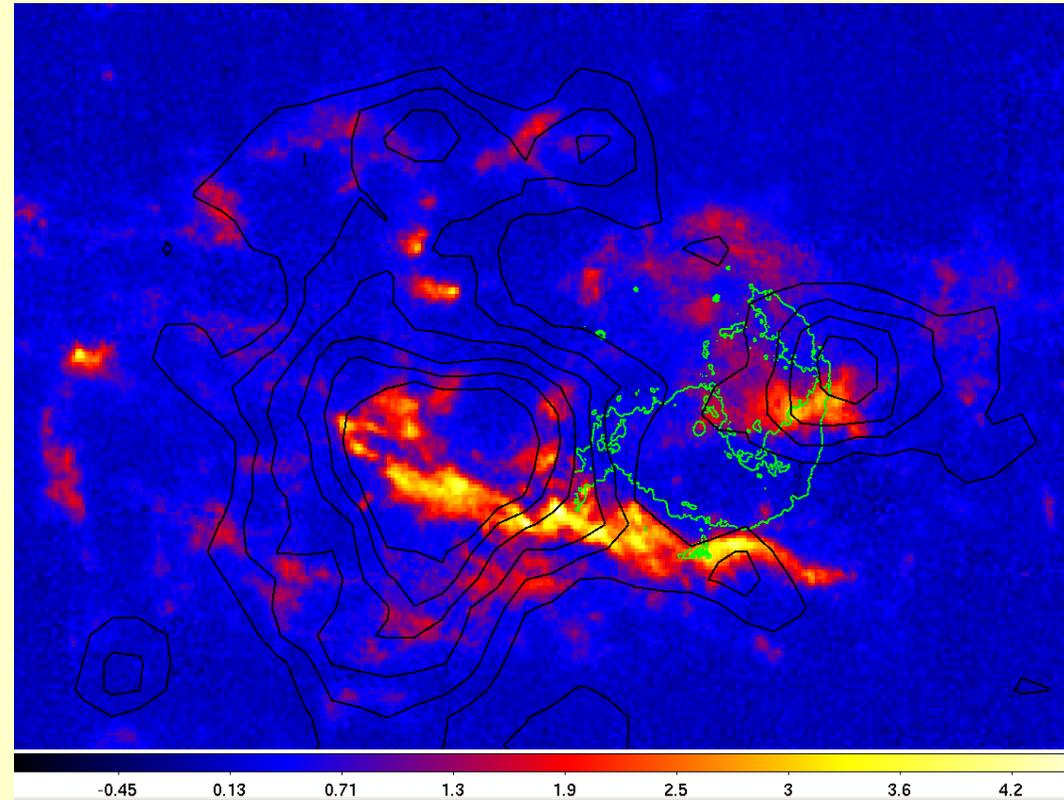


Données radio supplémentaires observables: nuages moléculaires ^{13}CO



Carte d'excès de H.E.S.S.

→ **coïncidence spatiale avec
les nuages ^{13}CO**



*Données ^{13}CO à 76 km/s
+ contours H.E.S.S. en noir
+ contours SNR en radio en vert*

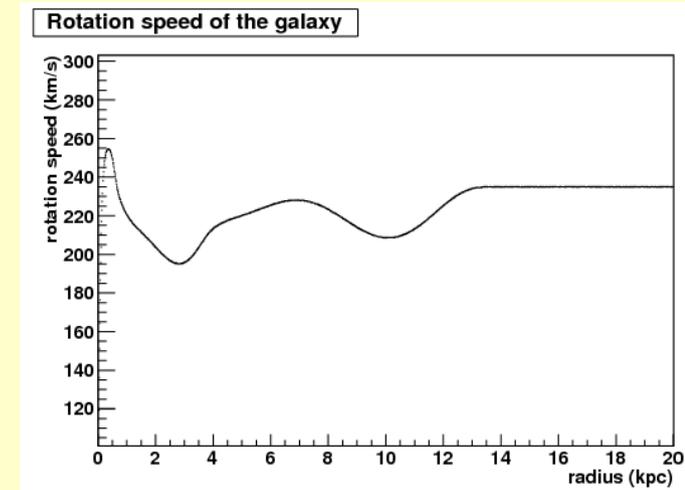
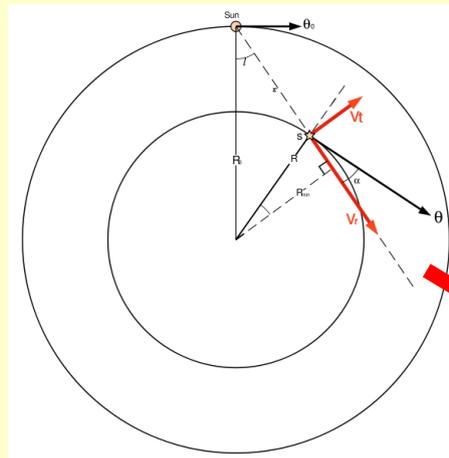
Etude de la SNR G22.7-0.2

- Hypothèse prometteuse: accélération des rayons cosmiques dans la SNR puis interaction avec les nuages moléculaires alentours
 - Processus hadronique? $pp \rightarrow \pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$
 - Etude énergétique pour tester cette hypothèse
 - Avec données X \rightarrow possibilité de faire un spectre multi- λ et de tester un modèle hadronique

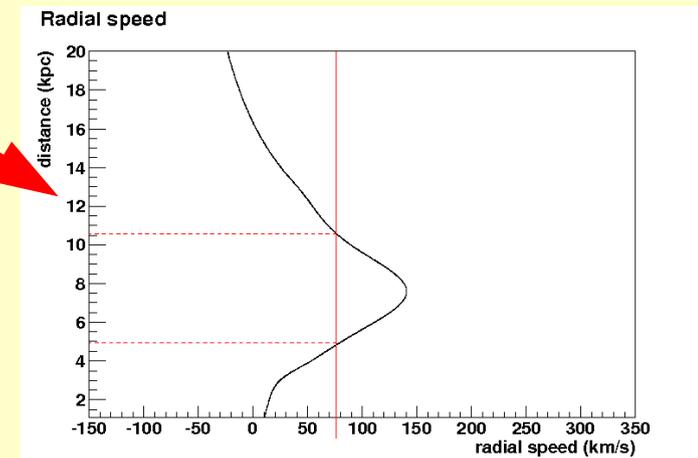
Distance des nuages observés, vitesse de rotation de la galaxie

- Mesure de la courbe de rotation de la galaxie
→ modèle de Clemens

- 2 distances possibles:
4.8 kpc ou 10.5 kpc



- Distance G22.7-0.2 inconnue
- Mais hypothèse interaction SNR voisine
à une distance de 4.2 kpc → 4.8 kpc + probable



Etude Energétique

- Interaction RC avec nuages moléculaires
→ Prédiction du flux γ observé:

$$F_{\gamma}(E > E_0) \approx 9 \cdot 10^{-11} \theta \left(\frac{E_0}{1 \text{ TeV}} \right)^{-1.1} \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ kpc}} \right)^{-2} \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Drury, Aharionan & Völk (1993)

- Flux γ connu, hypothèses sur la distance et l'énergie de la SN, calcul de la densité du nuage (Simon et al, 2001)
→ estimation de la fraction d'énergie nécessaire pour accélérer les RC afin d'expliquer le flux observé
- 3.8% de l'énergie de la supernova nécessaire pour expliquer ce flux → OK

Conclusion

- Amélioration de la résolution angulaire en cours
- Possibilité de découvrir de nouvelles sources
→ ré-analyse du plan galactique
et de réaliser des études morphologiques + fines
- SNR G22.7-0.2 bon candidat comme accélérateur de rayons cosmiques
- Données supplémentaires multi- λ à analyser pour vérifier l'hypothèse hadronique
- Futur → étude approfondie des modèles théoriques
- Etude phénoménologique des SNR vues par HESS → réalisation d'un catalogue