

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

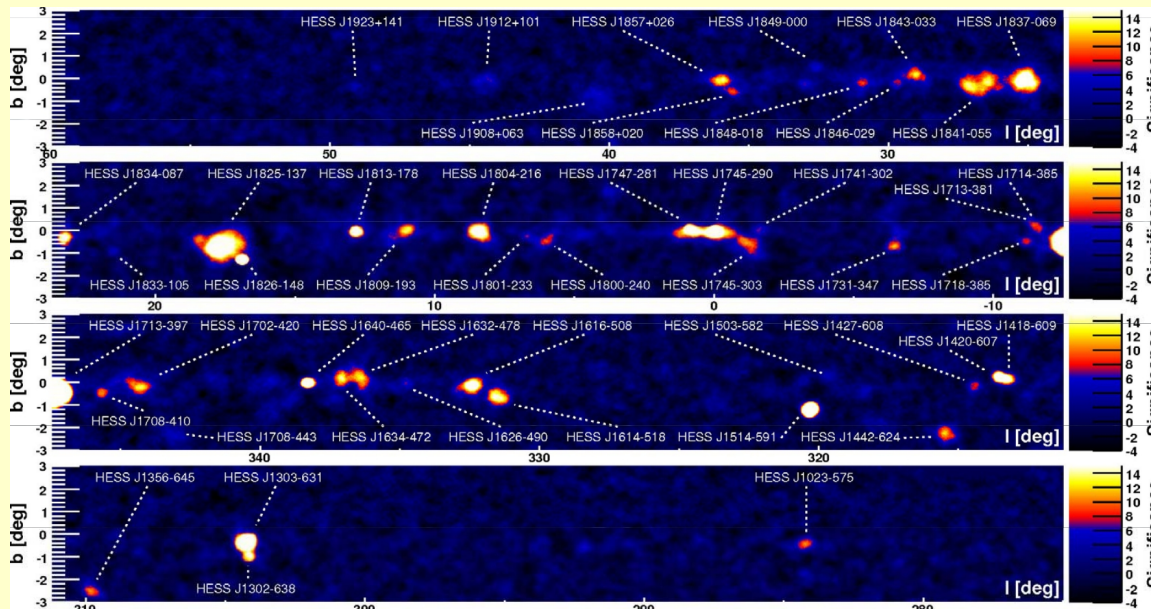
- Les différents bruits de fond
- Les méthodes de reconstruction
- Les données multi-longueur d'onde

4) Amélioration de la résolution angulaire

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

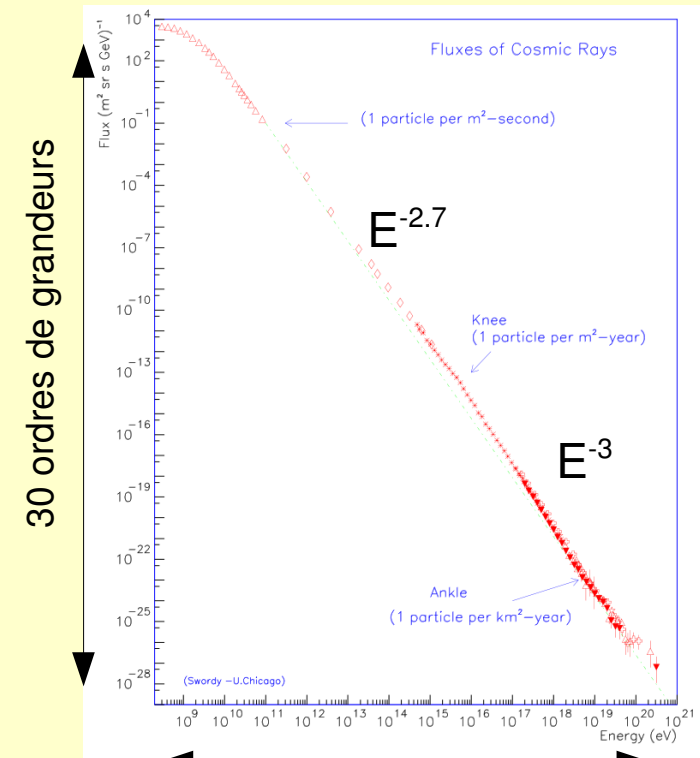
1) L'astronomie gamma: c'est quoi?

- 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

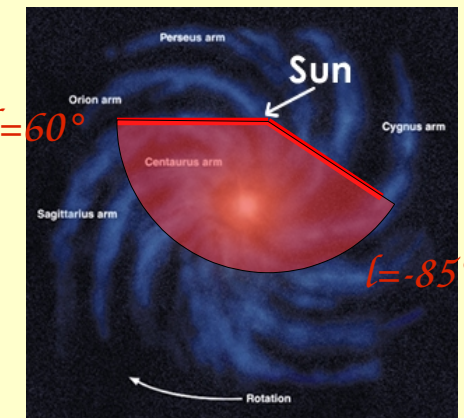
JJC, 26 novembre 2010



30 ordres de grandeurs

12 ordres de grandeurs

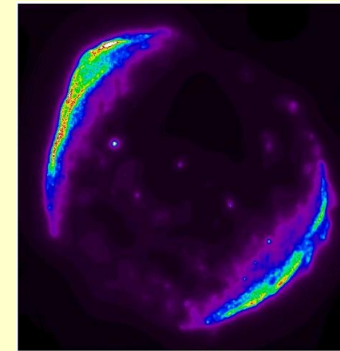
\hookrightarrow Spectre des rayons cosmiques



Les principales sources gamma galactiques

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

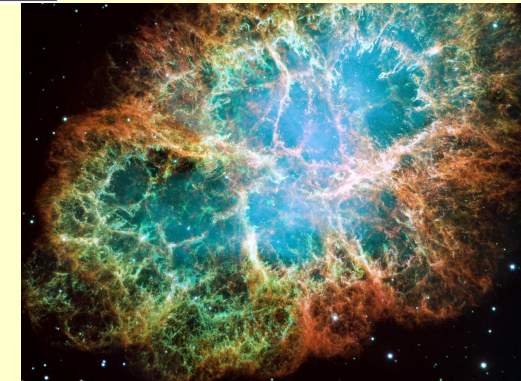
- Expansion du plasma chaud dans le milieu interstellaire
- Ondes de choc



← 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



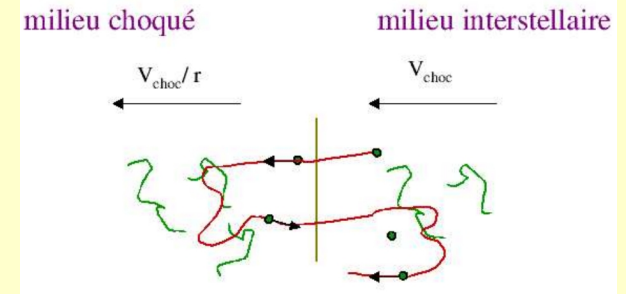
- **Microquasars**

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

Les mécanismes d'accélération

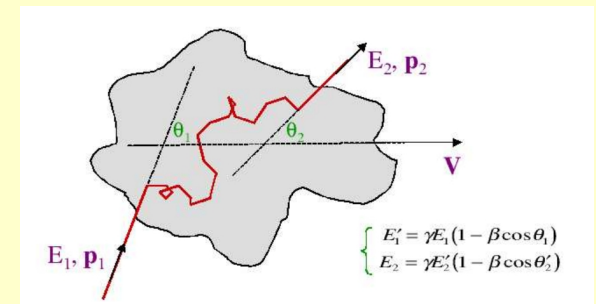
- « Fermi 1er ordre »: accélération par ondes de choc

- Processus efficace
- SNRs



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

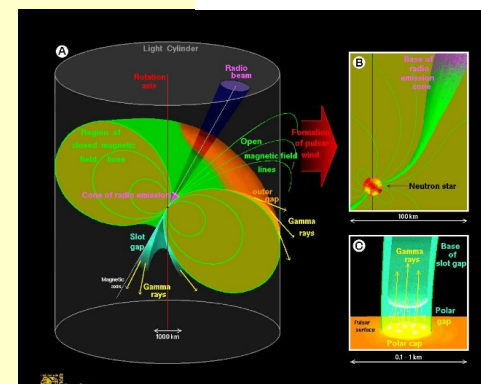
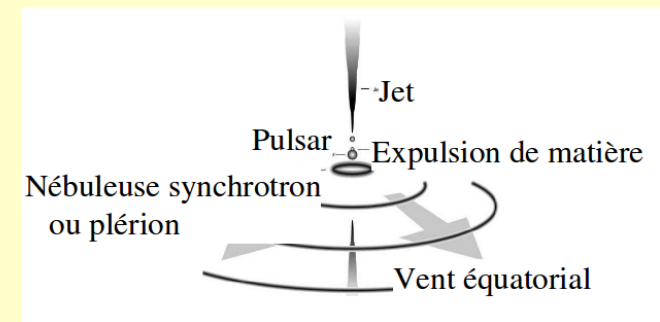
- Moins efficace
- Nuages moléculaires géants



- 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



JJC, 26 novembre 2010

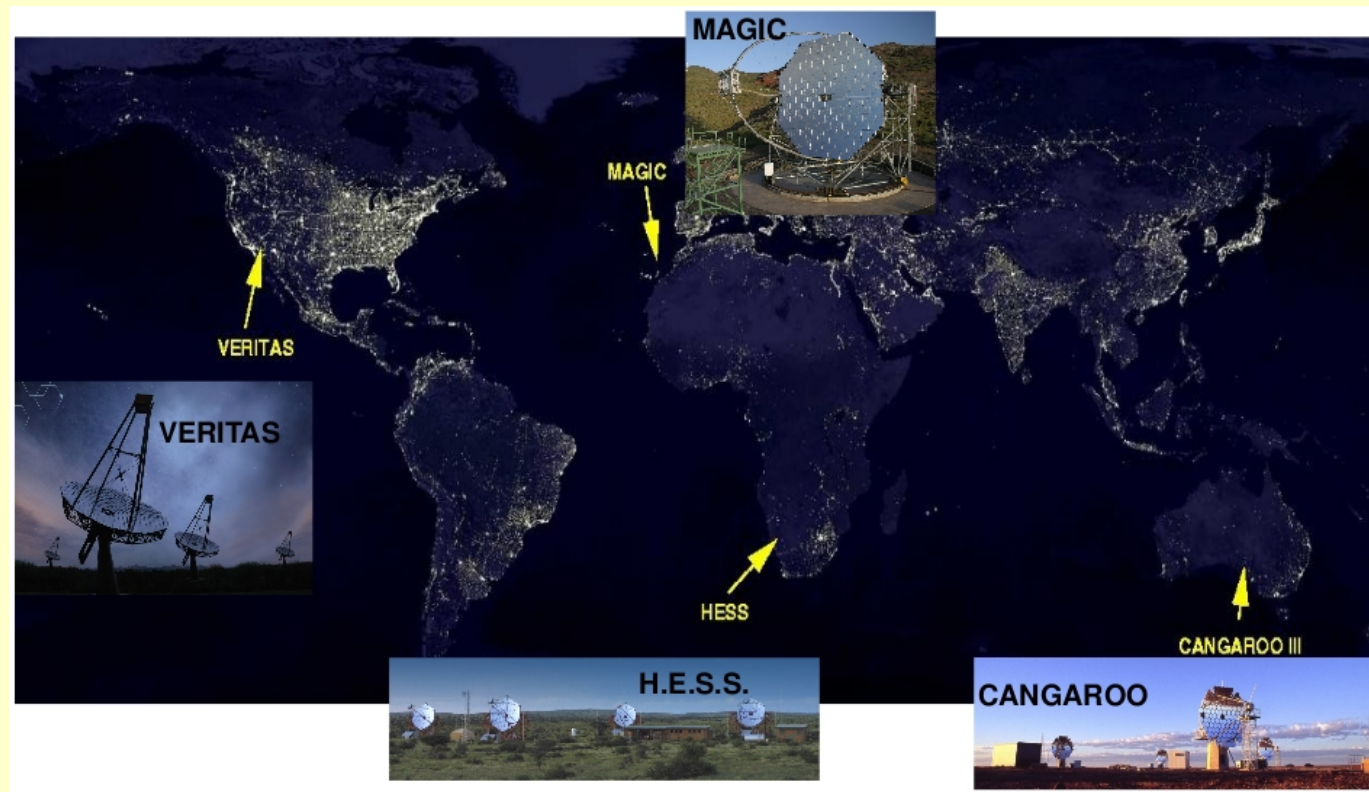
Les mécanismes de production des γ

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 $\gamma_{\text{synchrotron}}$

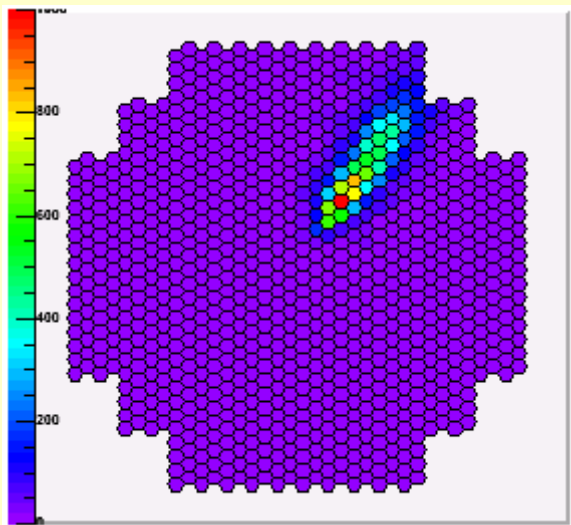
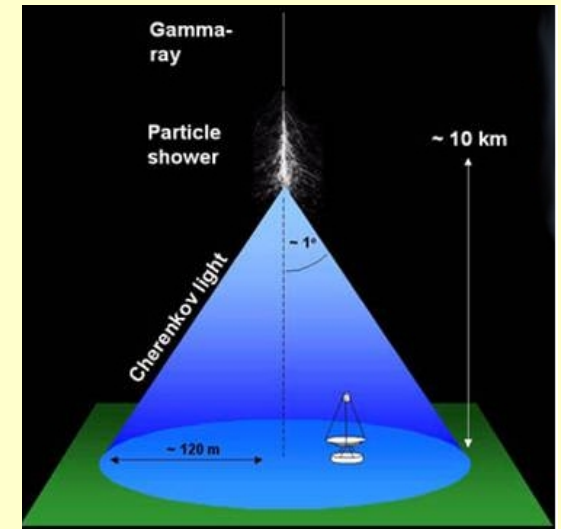
2) Instrumentation au TeV

- 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



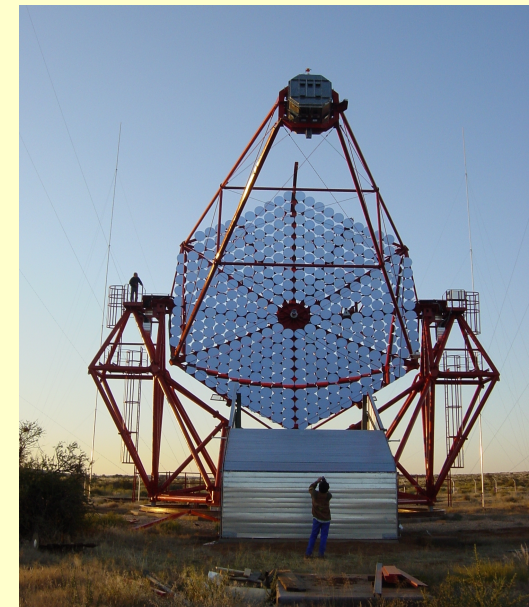
2) Télescopes Tcherenkov atmosphériques: principe

- 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



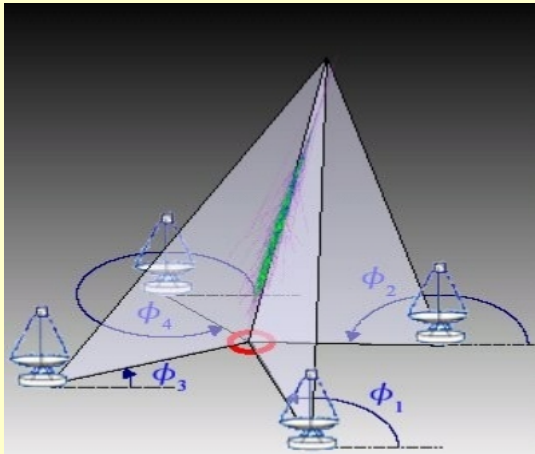
Un télescope de H.E.S.S.

2) Télescopes à effet Tcherenkov: la stéréoscopie

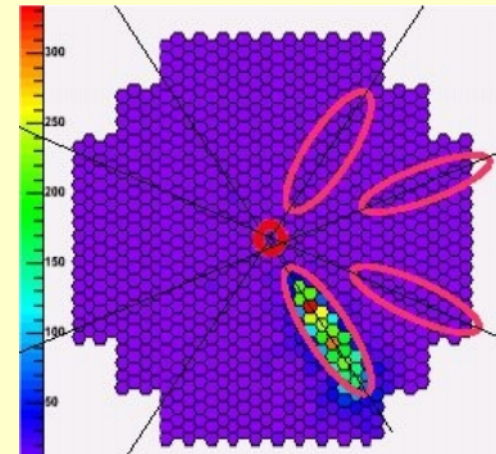
- H.E.S.S. → High Energy Stereoscopic Array



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

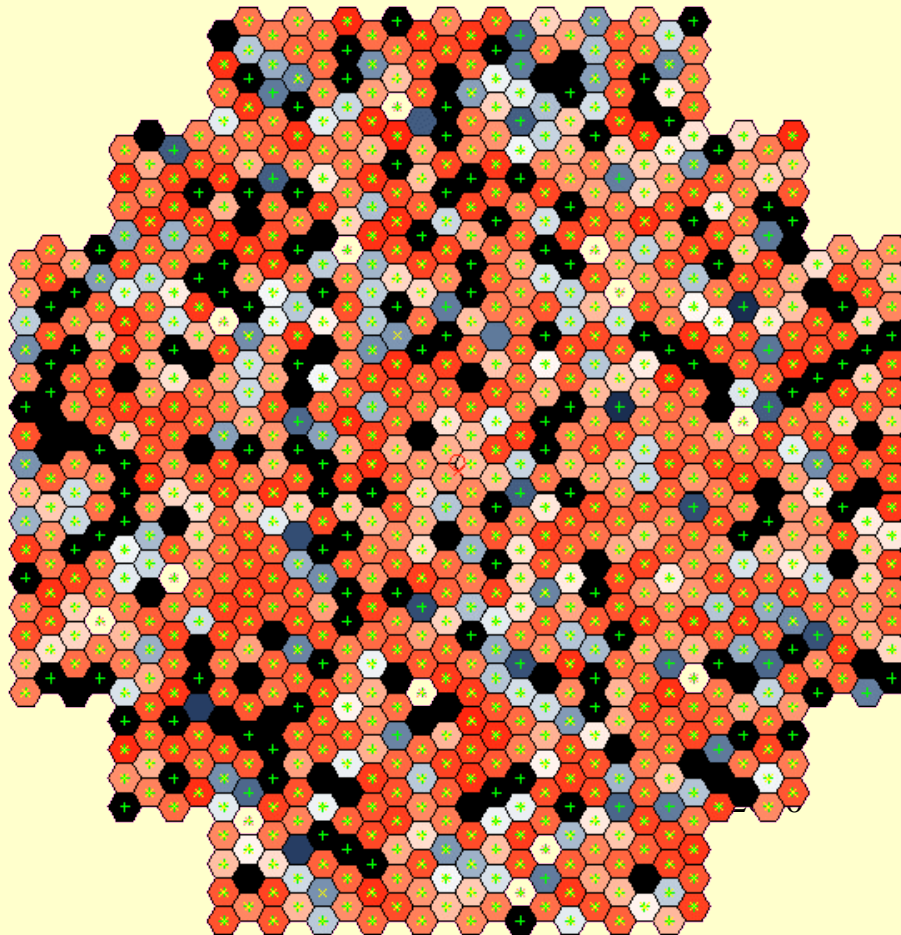


JJC, 26 novembre 2010



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

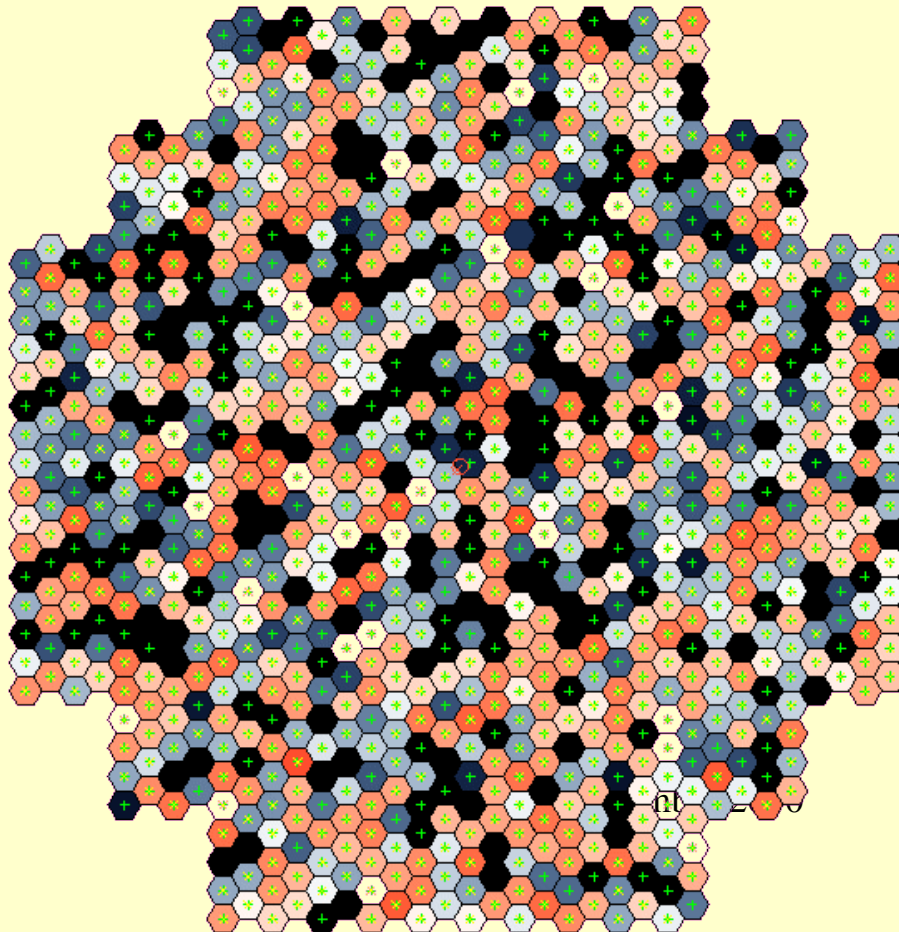


1 PM détecte 1 photon/5
(20% d'efficacité)!

Temps d'intégration = 100 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

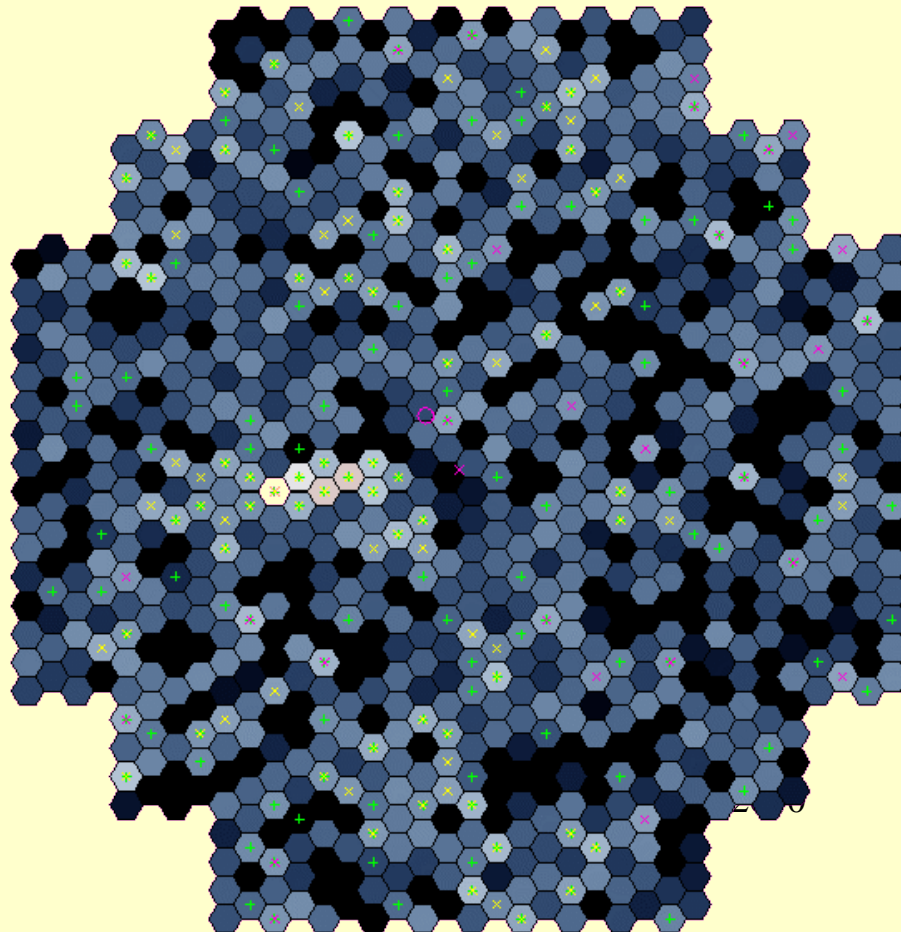
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



Temps d'intégration = 10 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

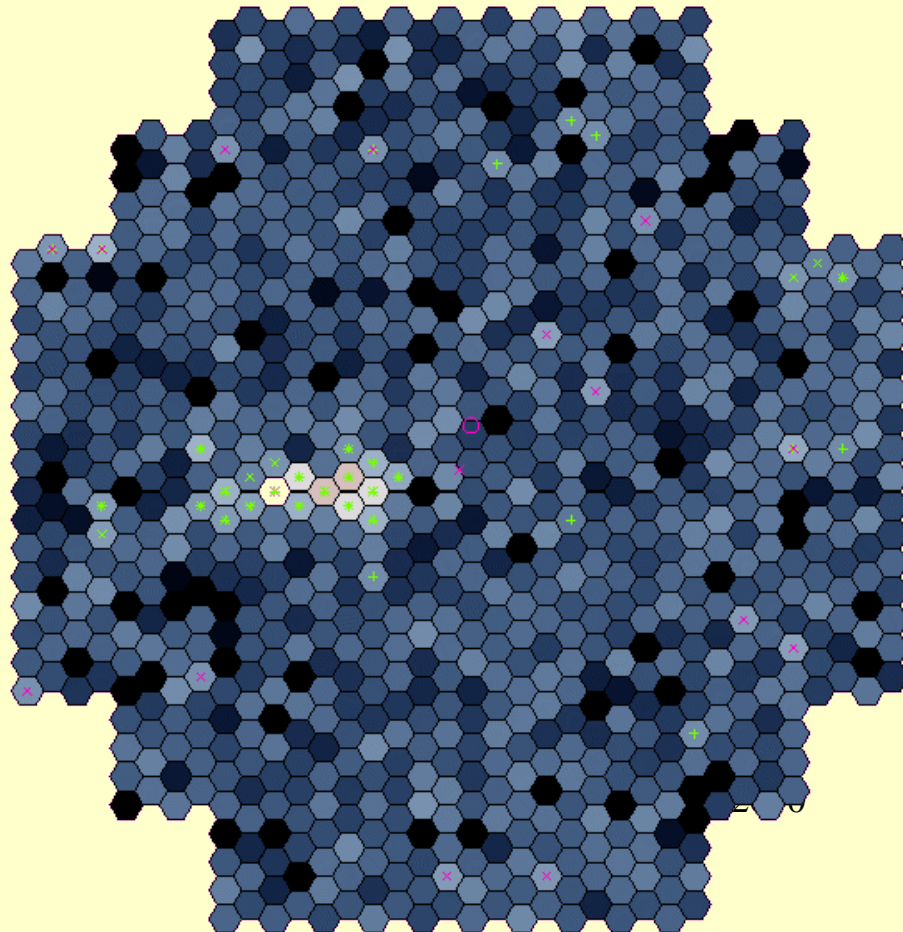
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



Temps d'intégration = 1 μ s

3) Analyse des données: les principaux bruits de fond

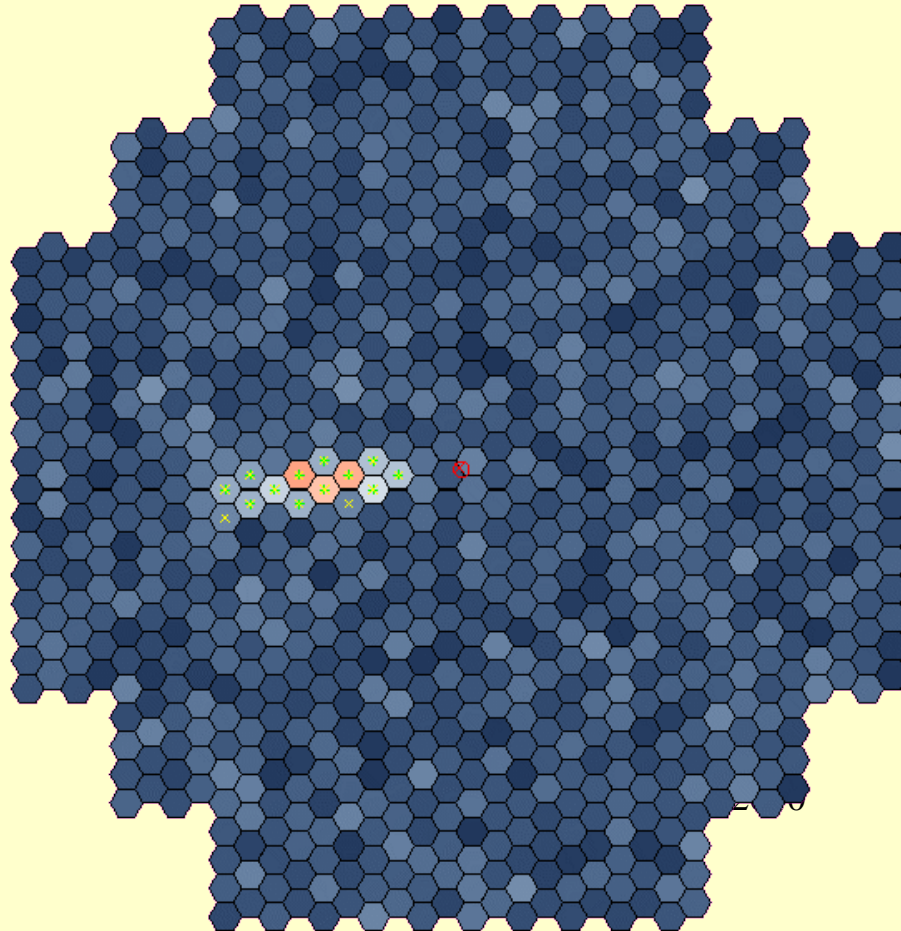
- Bruit de fond de ciel (NSB) → électronique rapide et élimination des pixels isolés sur la caméra



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



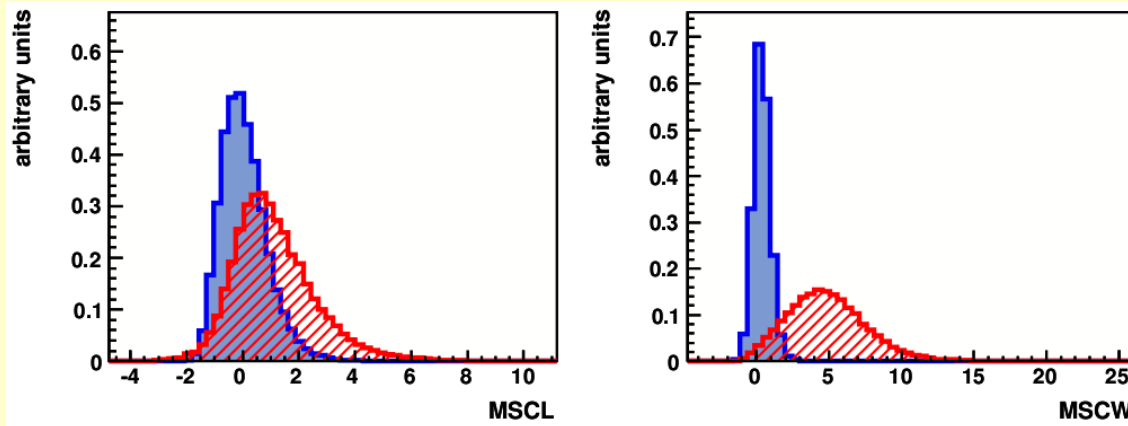
Temps d'intégration = 10 ns

Les principaux bruits de fond

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

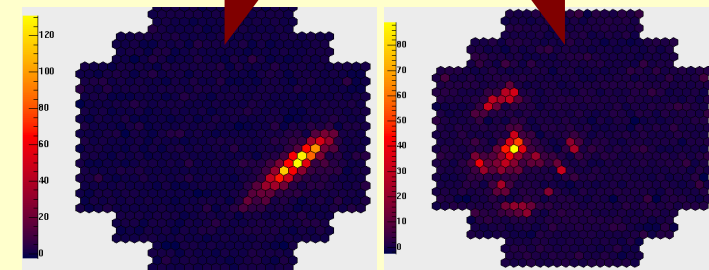
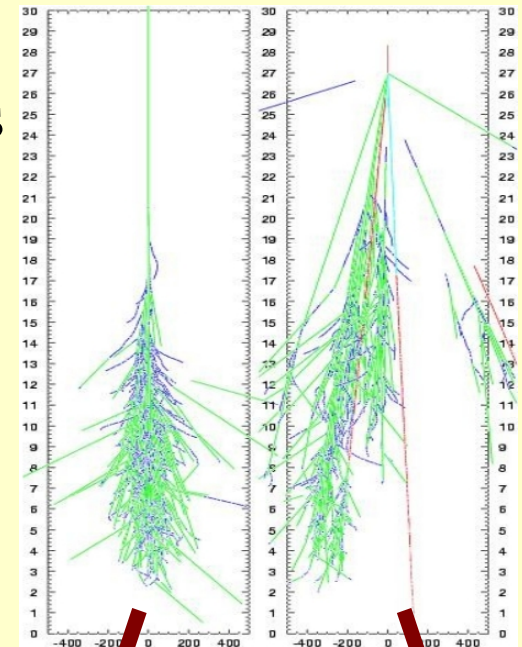
→ Discrimination hadrons/ γ grâce à des paramètres géométriques: largeur et longueur moyennes réduites de l'image sur la caméra

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



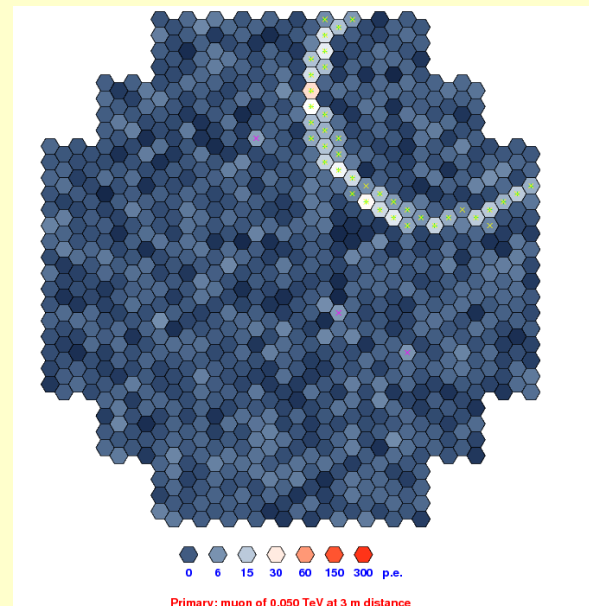
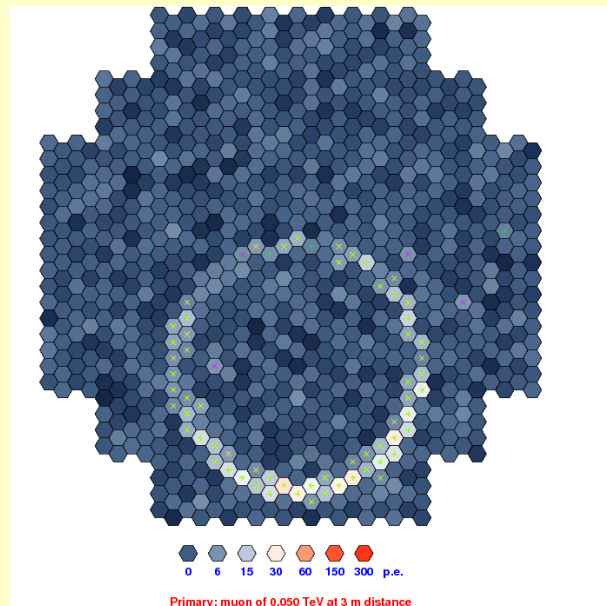
↳ distributions des longueurs et largeurs réduites pour les **gammas** et **hadrons**

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



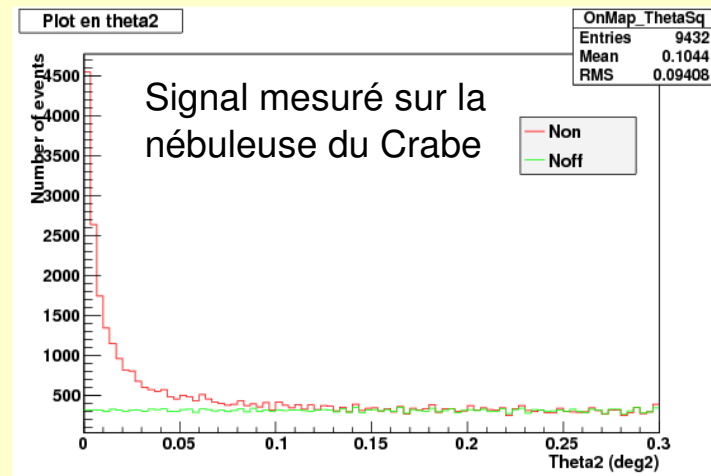
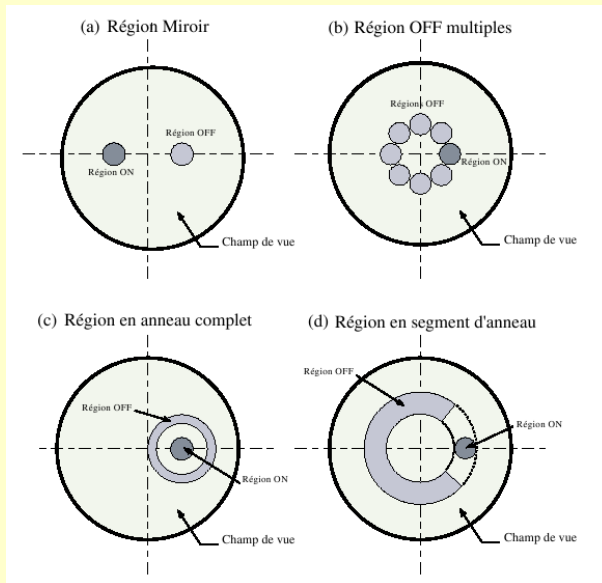
← exemples de muons observés sur la caméra

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



$$Excès = N_{ON} - \alpha N_{OFF}$$

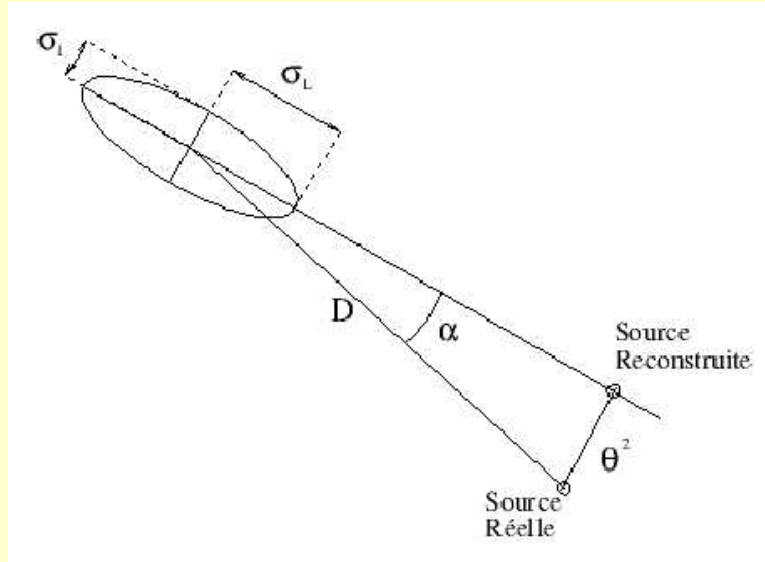
$$\alpha \sim \frac{Surface_{ON}}{Surface_{OFF}}$$

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

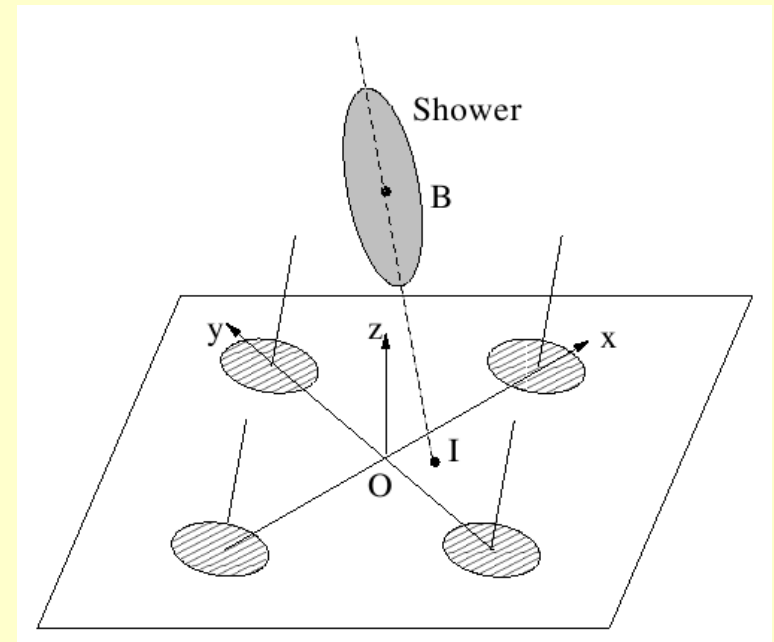
*Exemple de définition de régions OFF
(sans signal) par rapport à la région ON
observée*

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:



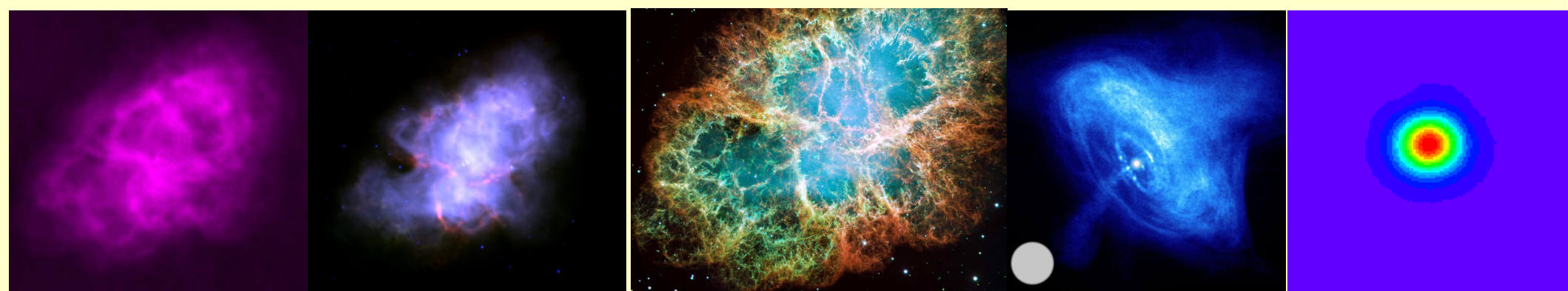
Méthode de Hillas



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:



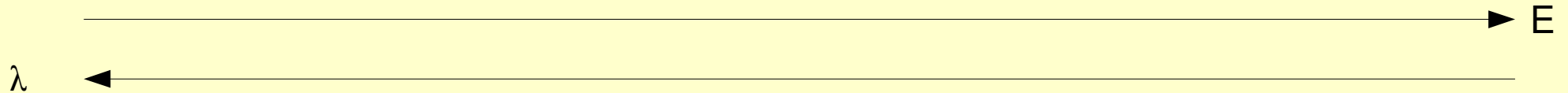
Radio

IR (Spitzer)

Optique (Hubble)

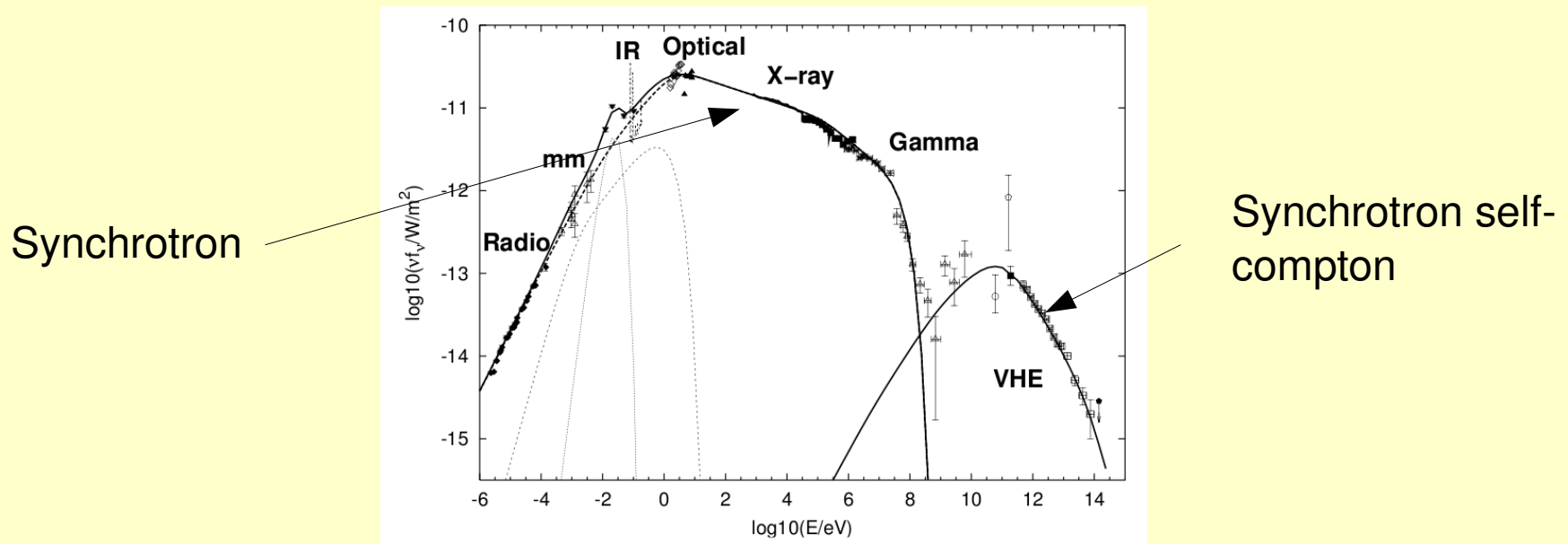
X (Chandra)

γ (HESS)



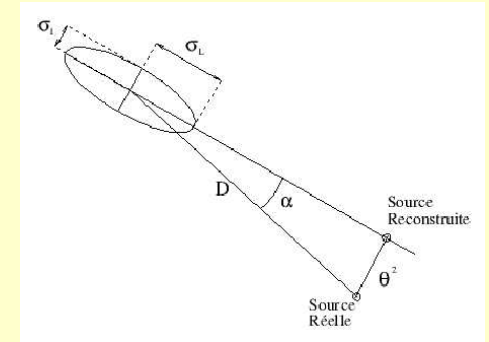
3) Analyse des données multi-longueurs d'onde

- 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:



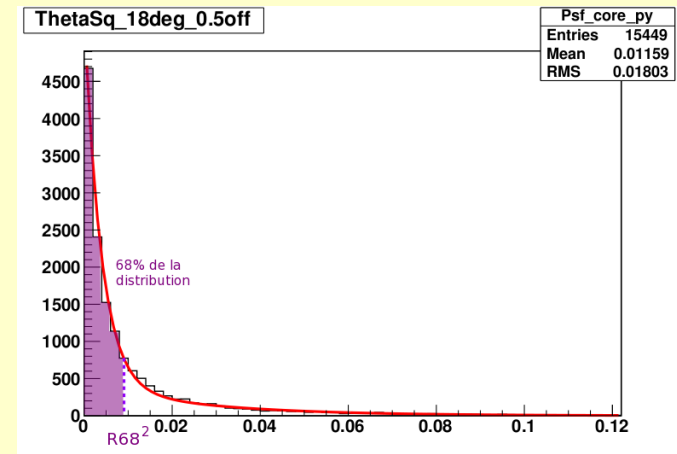
4) Amélioration de la résolution angulaire: Définition

- 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

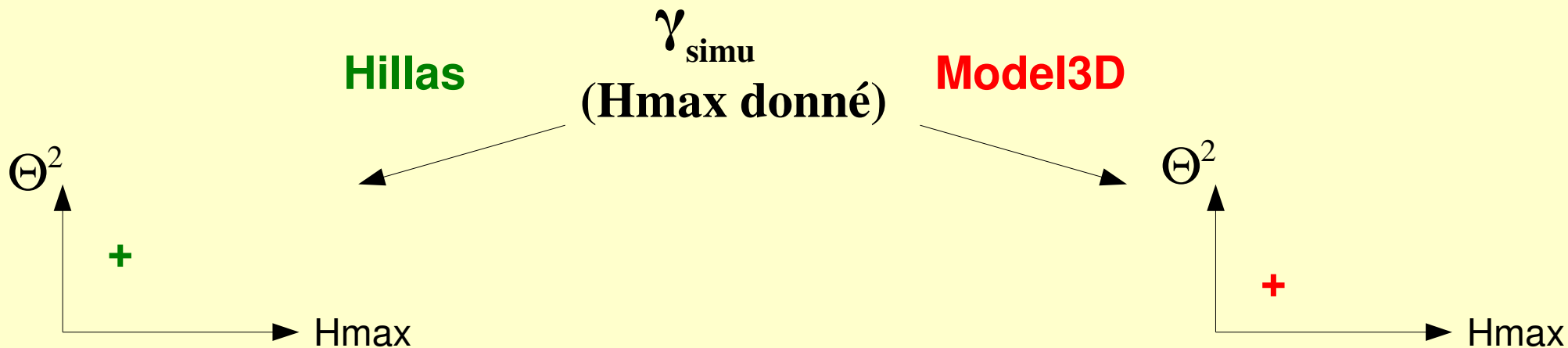
- H.E.S.S. fonctionne depuis 2004 → les sources les plus brillantes en gamma ont déjà été détectées
- Limites de l'instrument → amélioration de la résolution angulaire nécessaire
 - Étude morphologique des sources étendues
 - Détection des sources plus faibles considérées comme du fond
- Amélioration 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

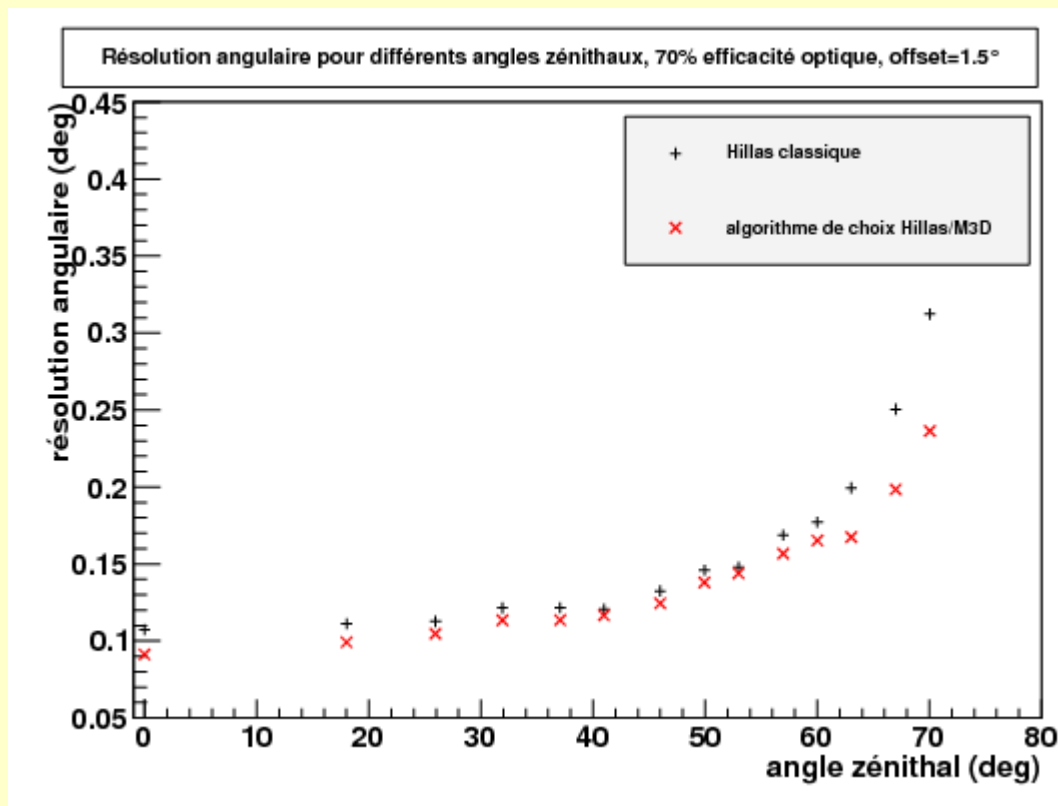
- simulations \rightarrow f(efficacité optique, zénith, offset)
- Pour chaque événement \rightarrow calcul du Θ^2 obtenu avec chaque méthode et remplissage des histogrammes en fonction de Hmax



- 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

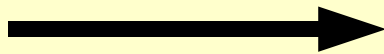
2ème étape: utilisation des tables

- 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



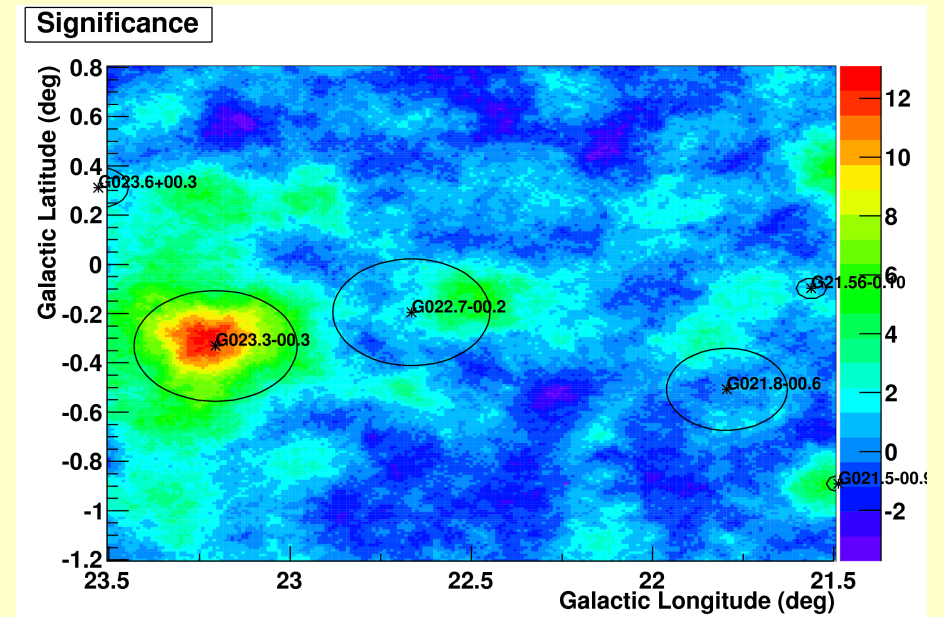
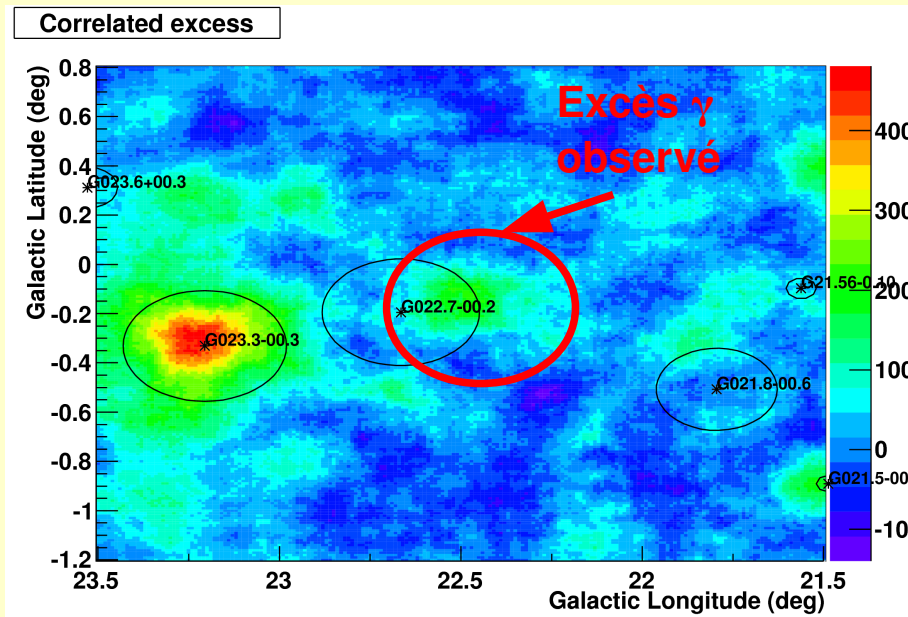
Travail en
cours...

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

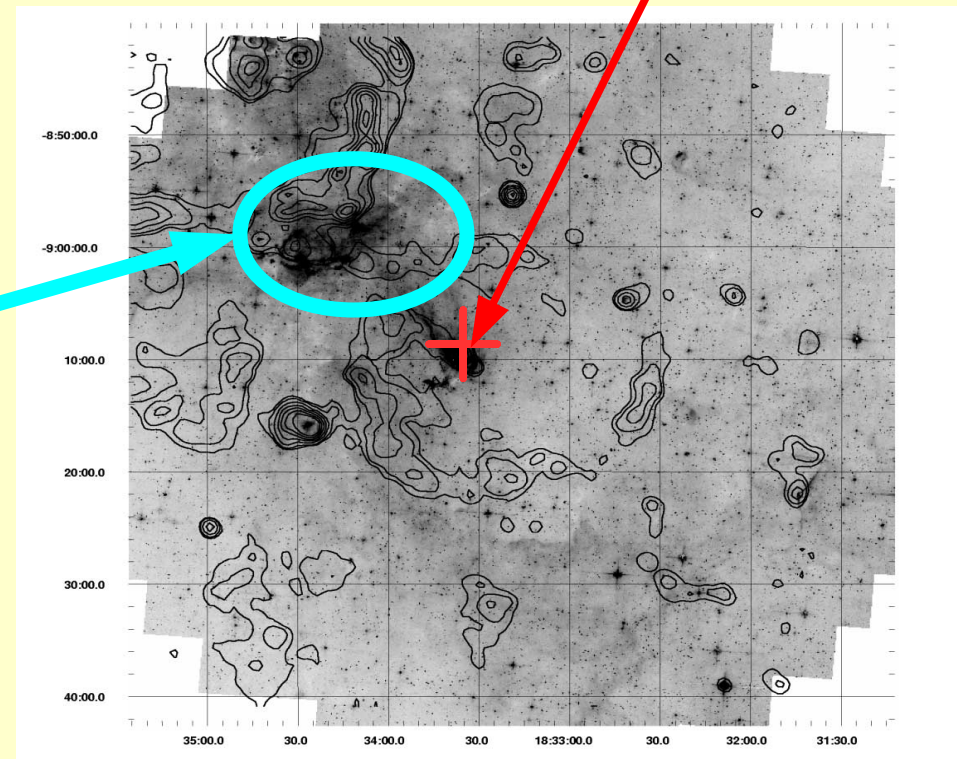
Recherche de contreparties à d'autres λ

- 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

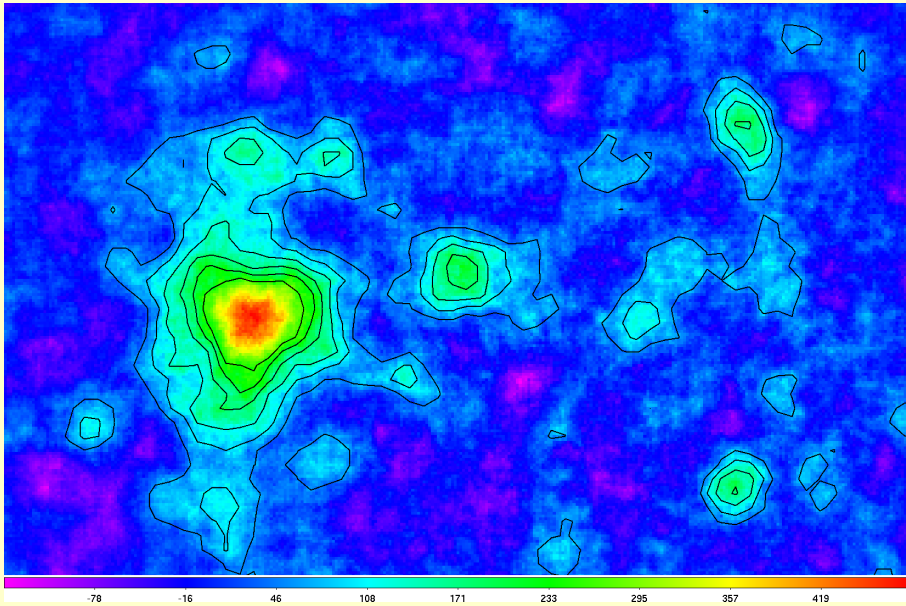
Région HII excitée?

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

MASER OH

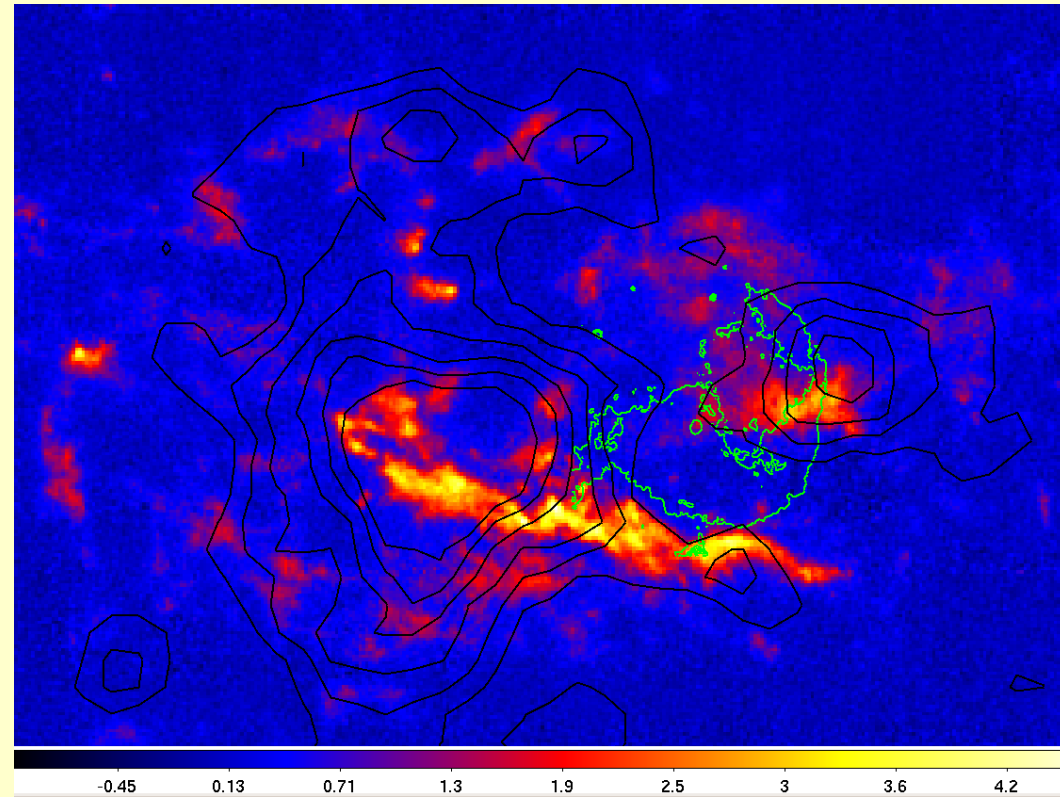


Données radio supplémentaires observables: nuages moléculaires ^{13}CO



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*

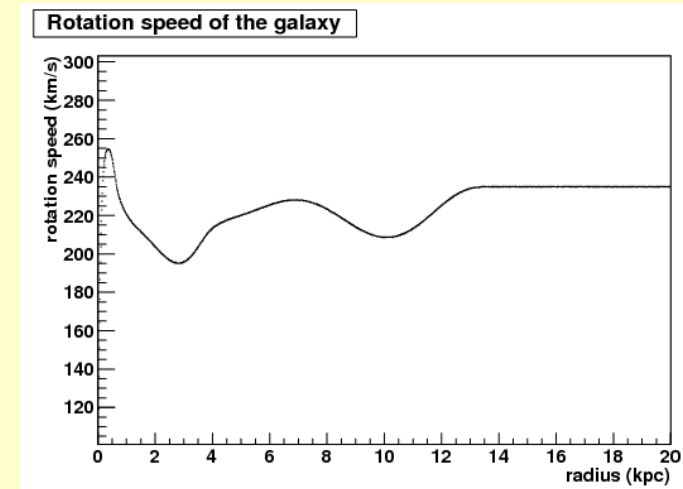
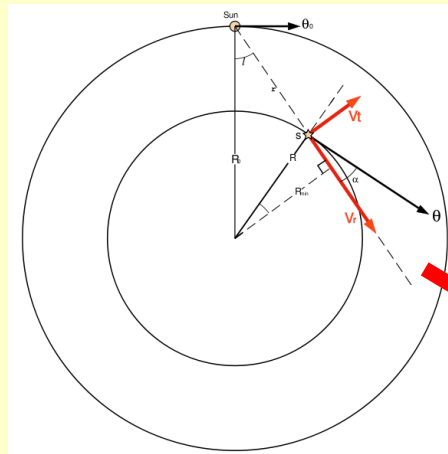
Etude de la SNR G22.7-0.2

- 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

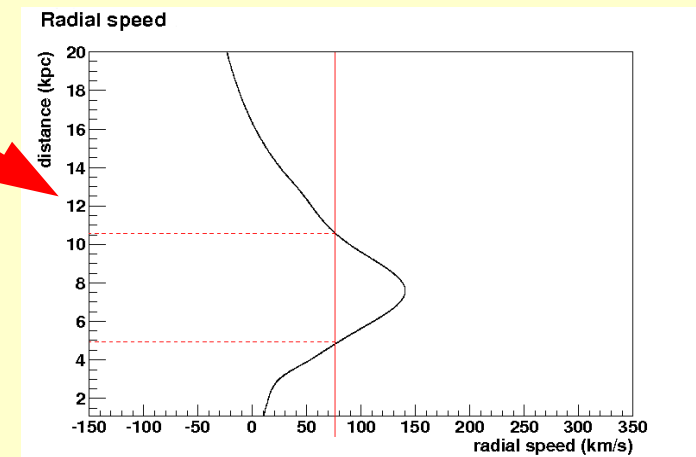
Distance des nuages observés, vitesse de rotation de la galaxie

- 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:

$$F_{\gamma}(E > E_0) \approx 9.10^{-11} \theta \left(\frac{E_0}{1 \text{ TeV}} \right)^{-1.1} \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ kpc}} \right)^{-2} \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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