

HESS, Une nouvelle fenêtre sur l'Univers non thermique à très haute énergie.

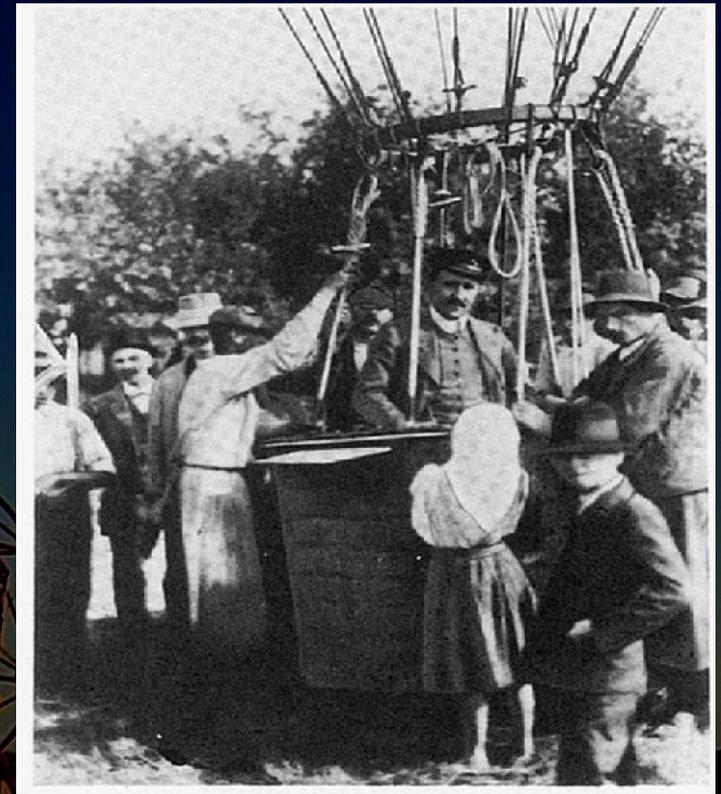
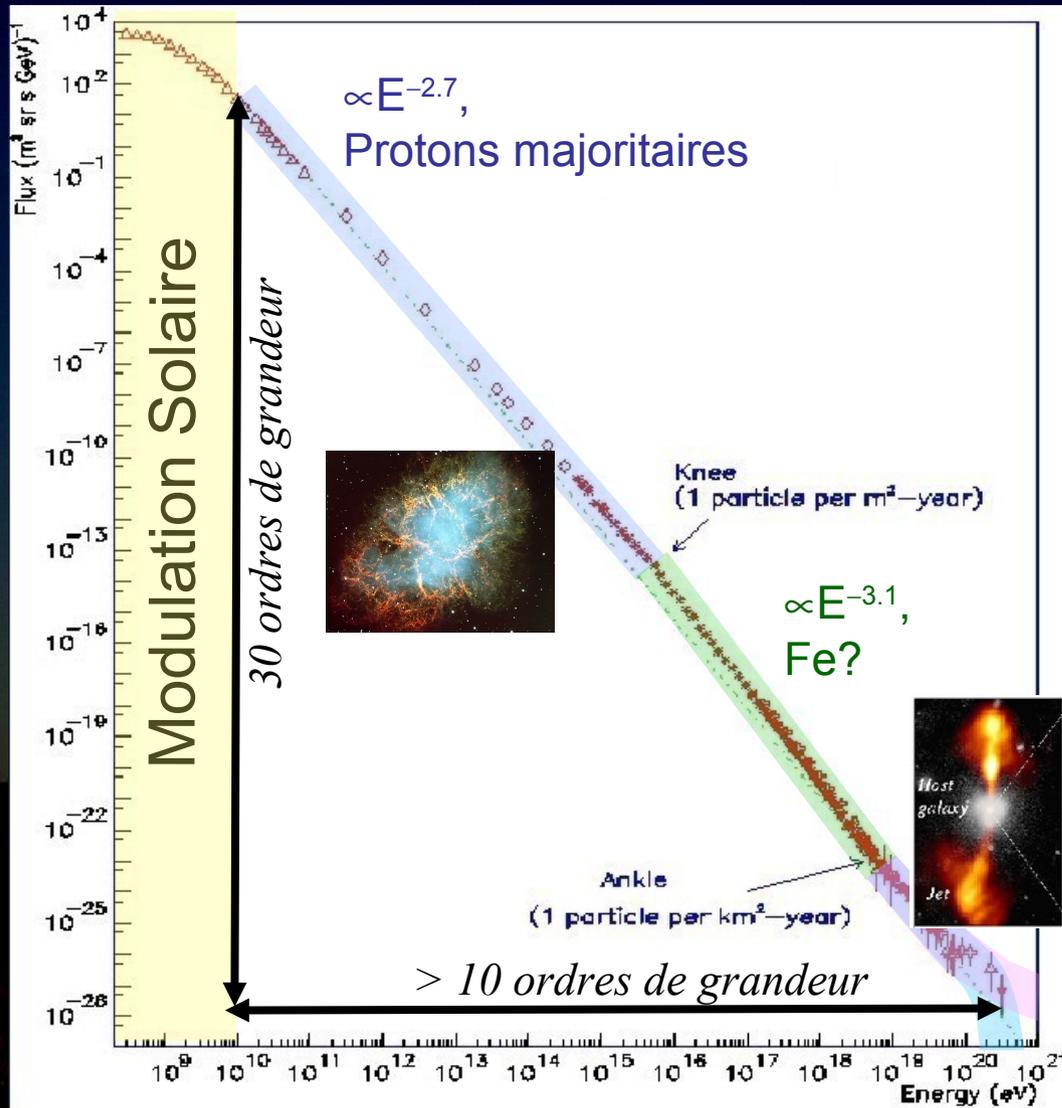
Mathieu de Naurois
LLR IN2P3-CNRS-Ecole Polytechnique
denauroi@in2p3.fr

- ❑ Le contexte, la technique Cherenkov Atmosphérique
- ❑ HESS, un réseau de télescopes hors du commun
- ❑ Quelques résultats de HESS
- ❑ HESS-II, un télescope géant



Le contexte, la technique

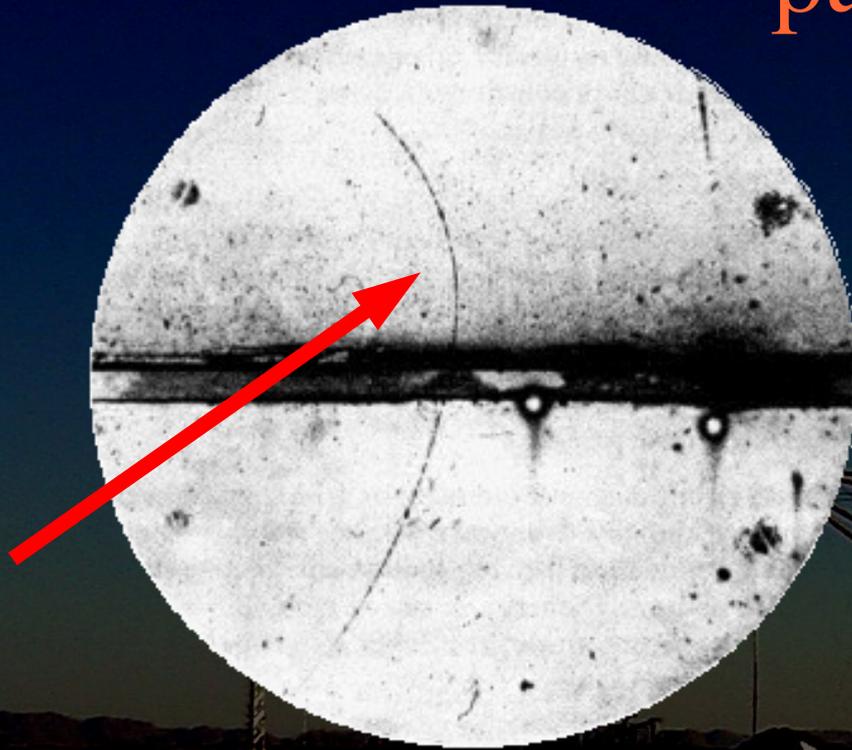
Le mystère des rayons cosmiques



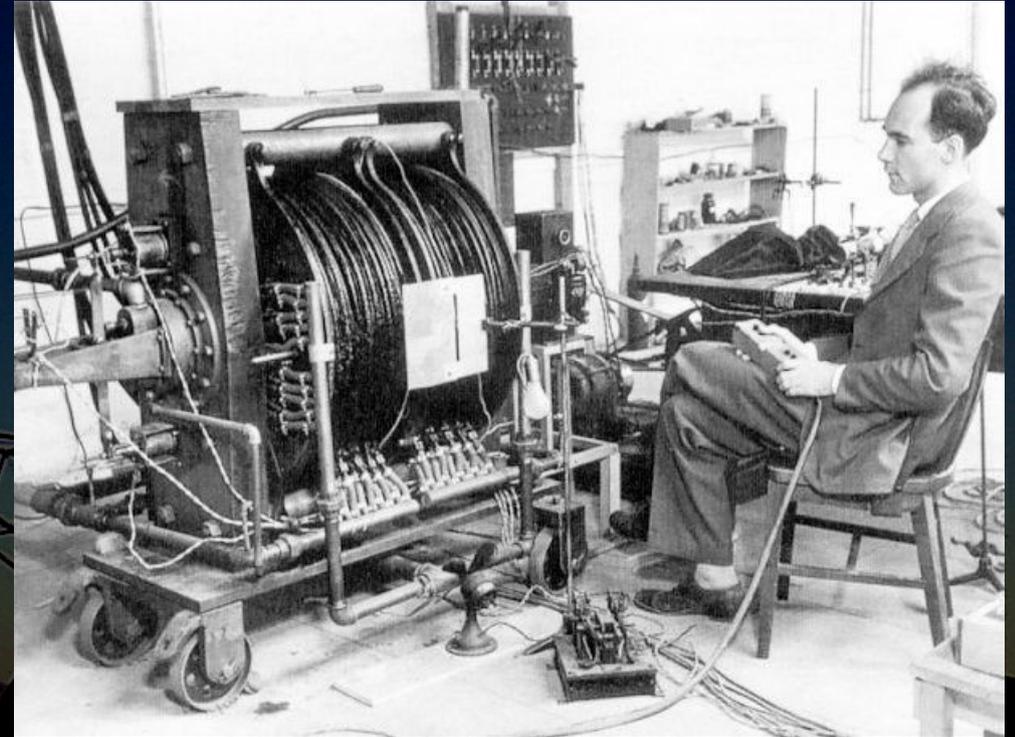
Découverte
Vol en Ballon
Victor Hess, 1912

- ❑ Découverts en 1912 (Victor HESS)
- ❑ 10 ordres de grandeurs en énergie, 30 en flux
- ❑ Origine encore inconnue (galactique $< 10^{15}$ eV, extragalactique au dessus ?)

Les rayons cosmiques et la physique des particules

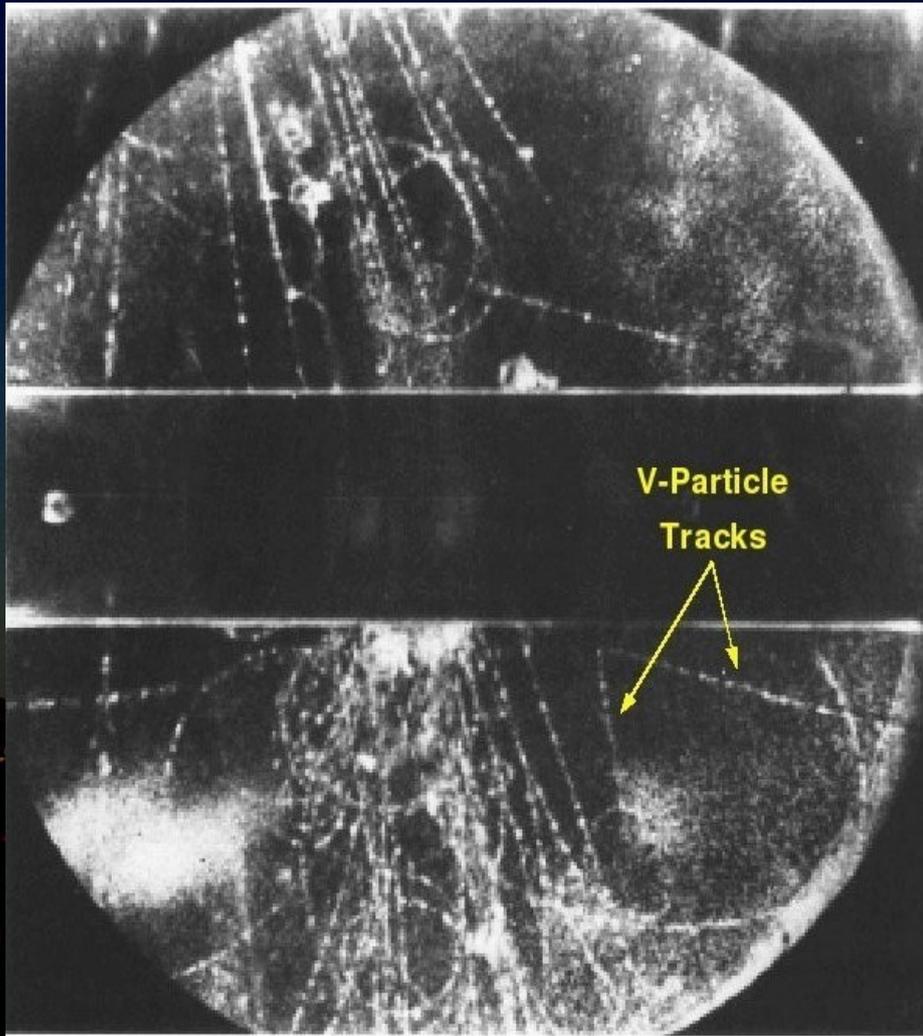


Premier positron
Anderson, Phys. Rev. (1933)

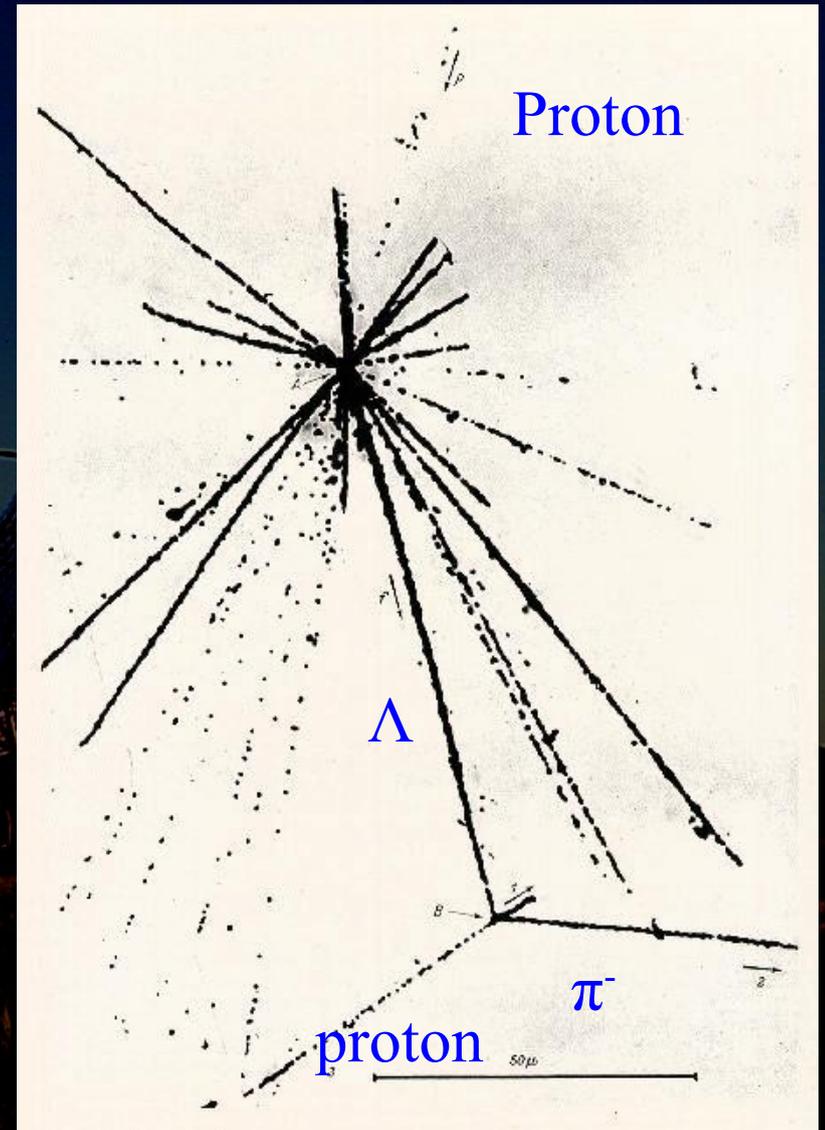


- ❑ 1933: Découverte du positron (e^+) dans es rayons cosmiques
- ❑ Découverte suivie de nombreuses autres :
 μ^\pm (1936), π^\pm (1947), particules étranges (1947), ...

Et d'autres...



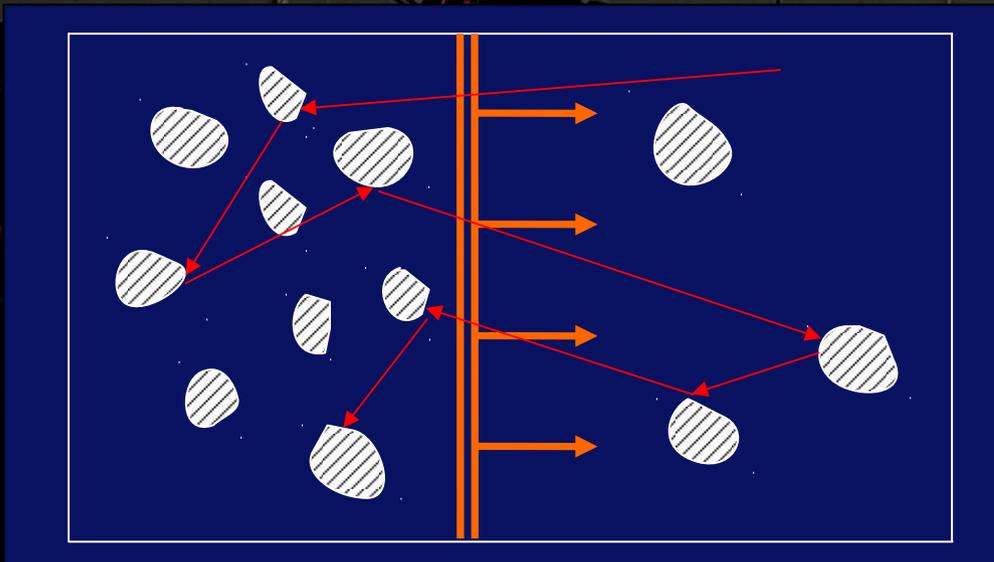
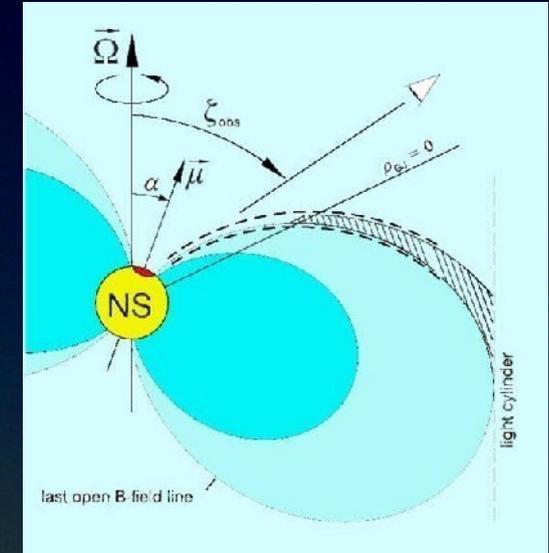
Kaon neutre ($d\bar{s}/s\bar{d}$)
(Rochester et Butler, 1947)



Λ (uds)
(Danysz et Pniewski, 1953)

Comment accélérer des particules?

- Champs électriques intenses: pulsars (Etoiles à neutron magnétisées en rotation rapide)
~ effet dynamo, $V \sim 10^{12}$ V
- Chocs astrophysiques: « ping-pong »
particule accélérée à chaque passage dans un choc, rediffusée par B (Mécanisme de Fermi)



n

$$\frac{d N_e}{d E_e} \propto E^{-2}$$

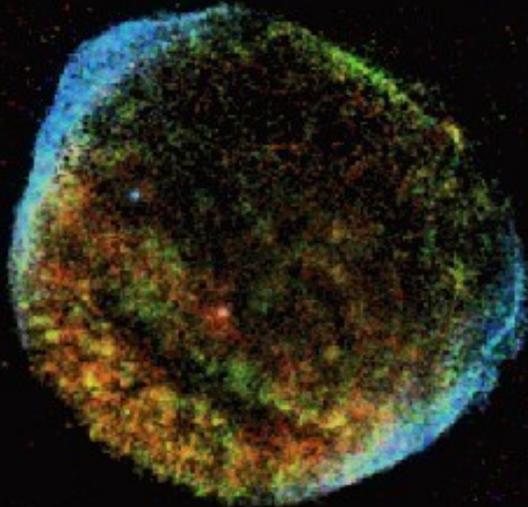
E

Comment lever le voile ?

- ❑ Les suspects :
 - ❑ Restes de supernova, noyaux actifs de galaxie,
- ❑ Mais les rayons cosmiques sont déviés...
- ❑ → Utiliser des messagers neutres (secondaires)

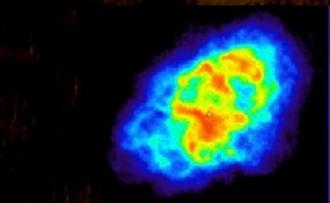
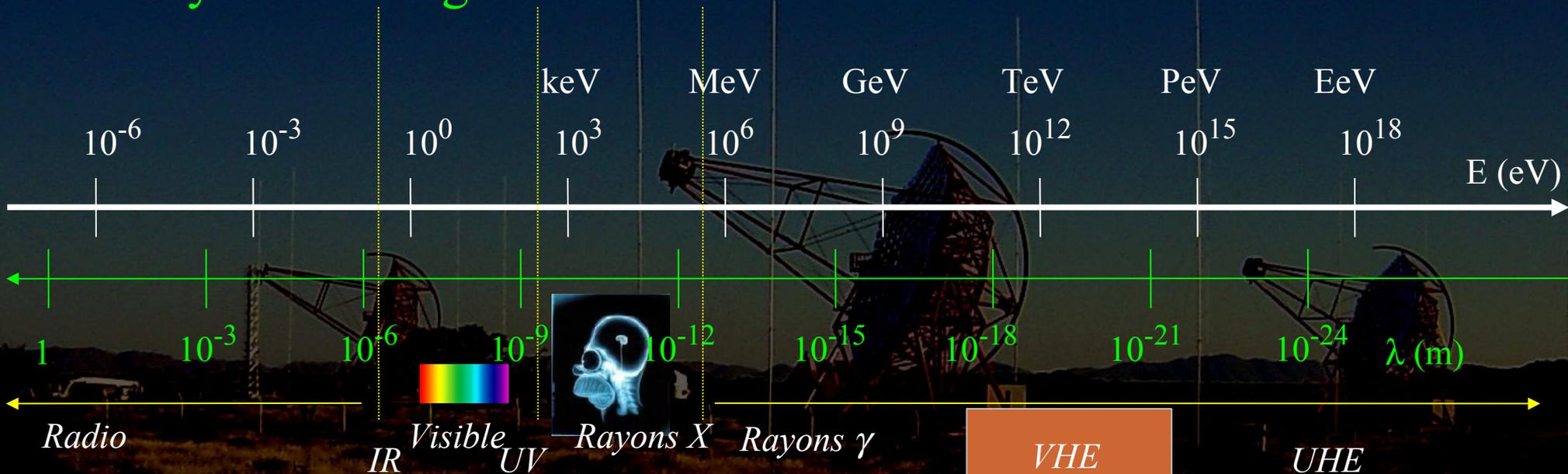
**Protons,
Noyaux
Électrons**

Photons γ , neutrinos



La lumière invisible

La lumière visible représente une octave sur près de 70 !
Le rayonnement gamma couvre 20 octaves à lui seul



Objets froids (10K),
Poussières,...
Émission Synchrotron
d'électrons accélérés



Objets chauds
(~2000K),
soleil,
nébuleuses



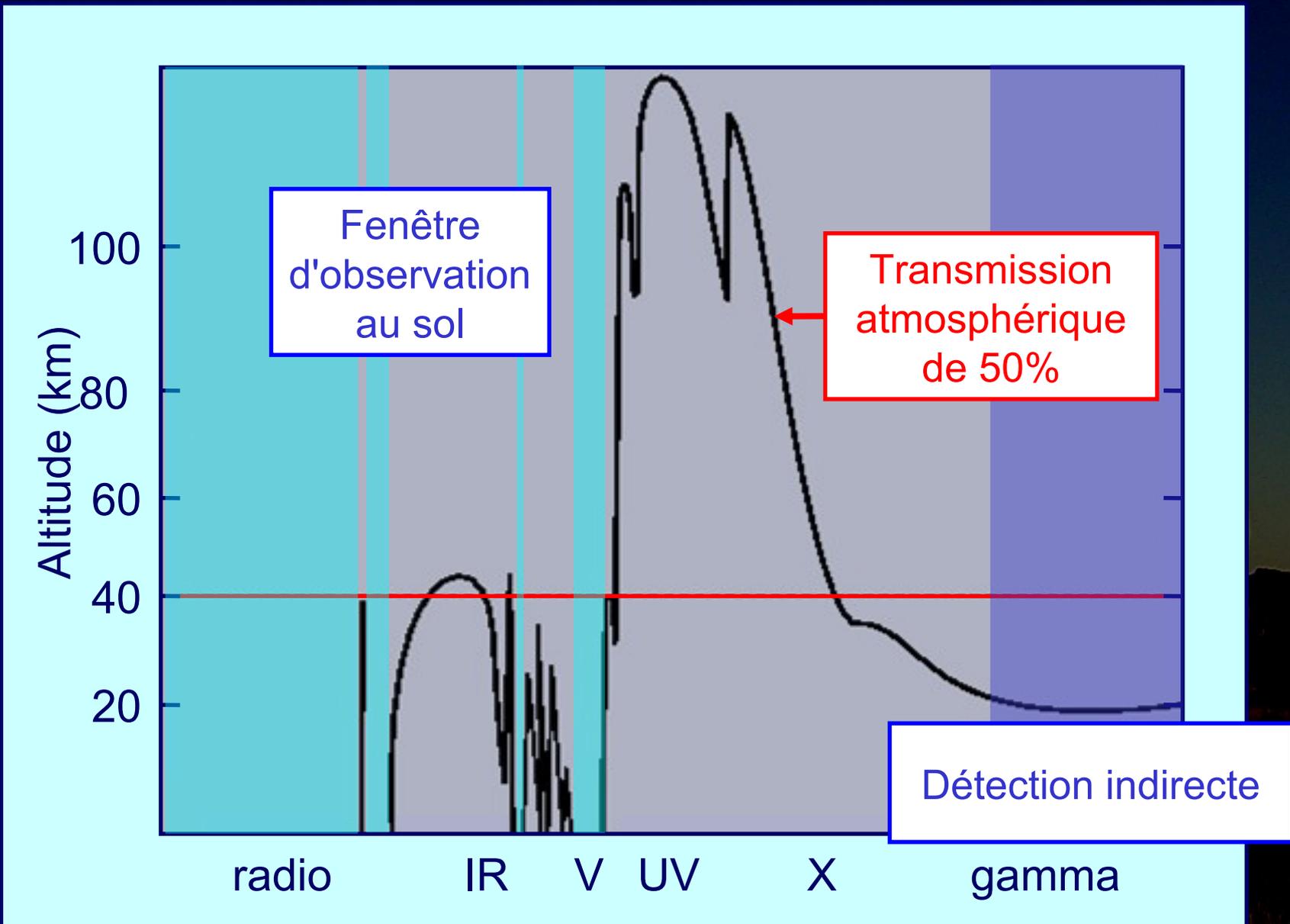
Objets compacts très chauds
(~ 10^6 K),
pulsars, trous noirs...
Taille ~km

VHE
(Très Haute
Energie)

UHE
(Ultra Haute Energie)

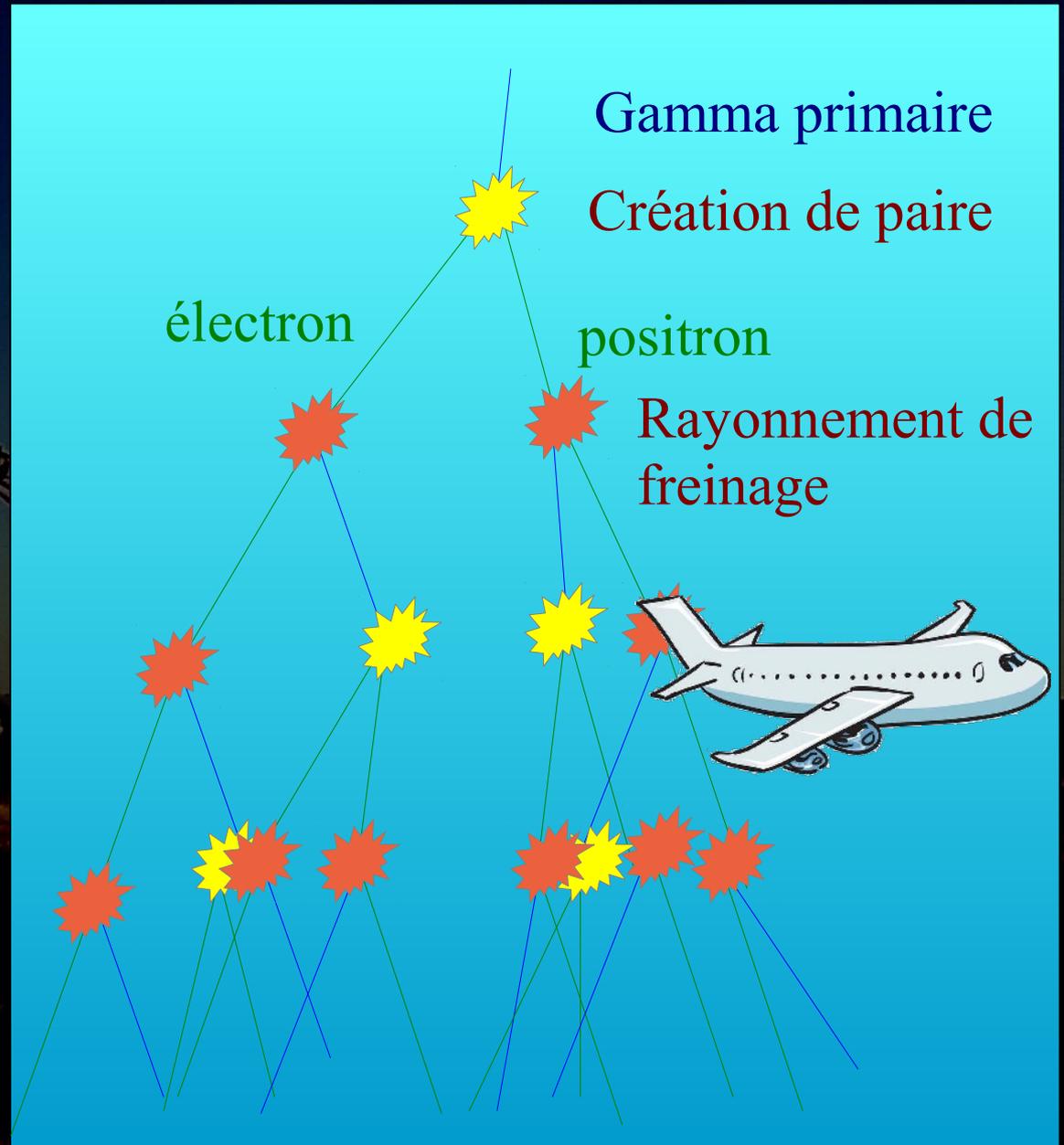
Objets extrêmement énergétiques, Processus non
thermiques (Accélération de particules dans des chocs)
Inverse Compton, Bremstrahlung, Annihilation,
Désintégration de Pions

Où observer?



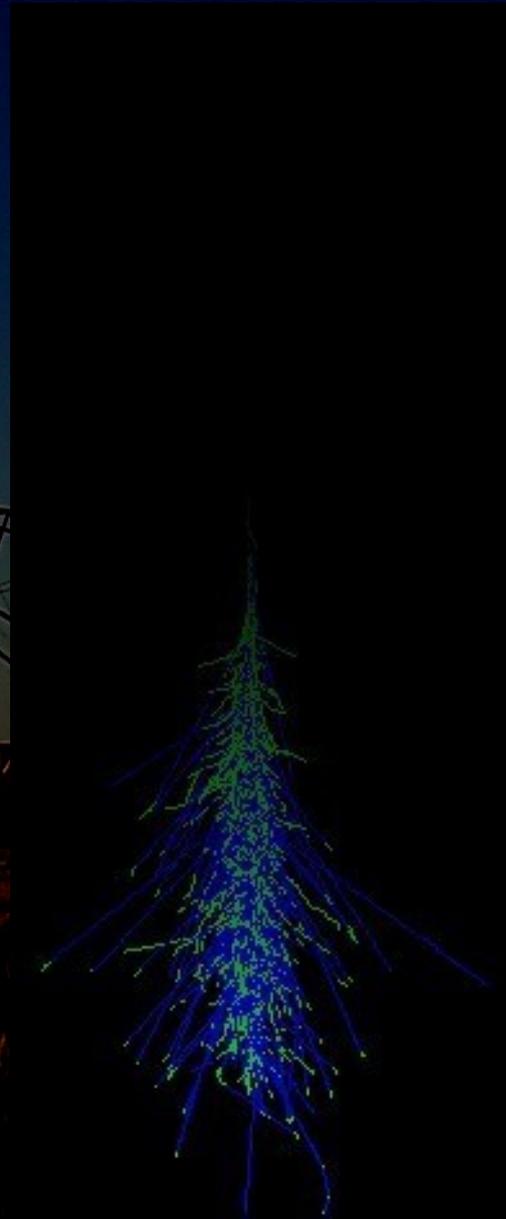
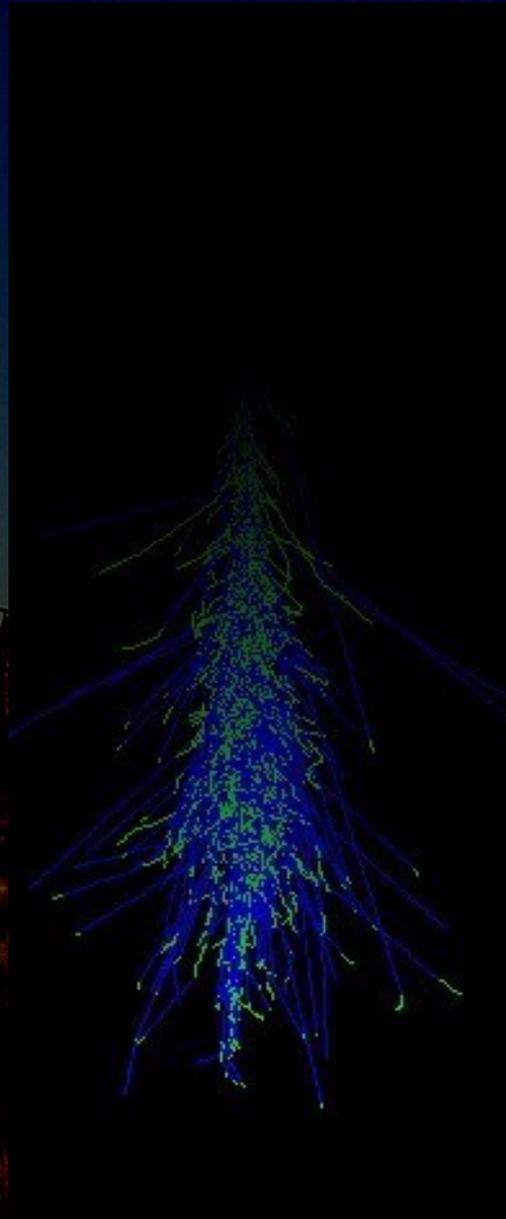
Cascades atmosphériques

- ❑ Interaction du photon primaire avec un noyau de l'atmosphère
- ❑ Succession de créations de paire et de rayonnement de freinage
- ❑ L'énergie est ainsi peu à peu redistribuée en un grand nombre de particules et absorbée dans l'atmosphère
- ❑ Les cascades issues de protons (et de noyaux) comportent en sus des fragments nucléaires et des particules pénétrantes (muons, ...)

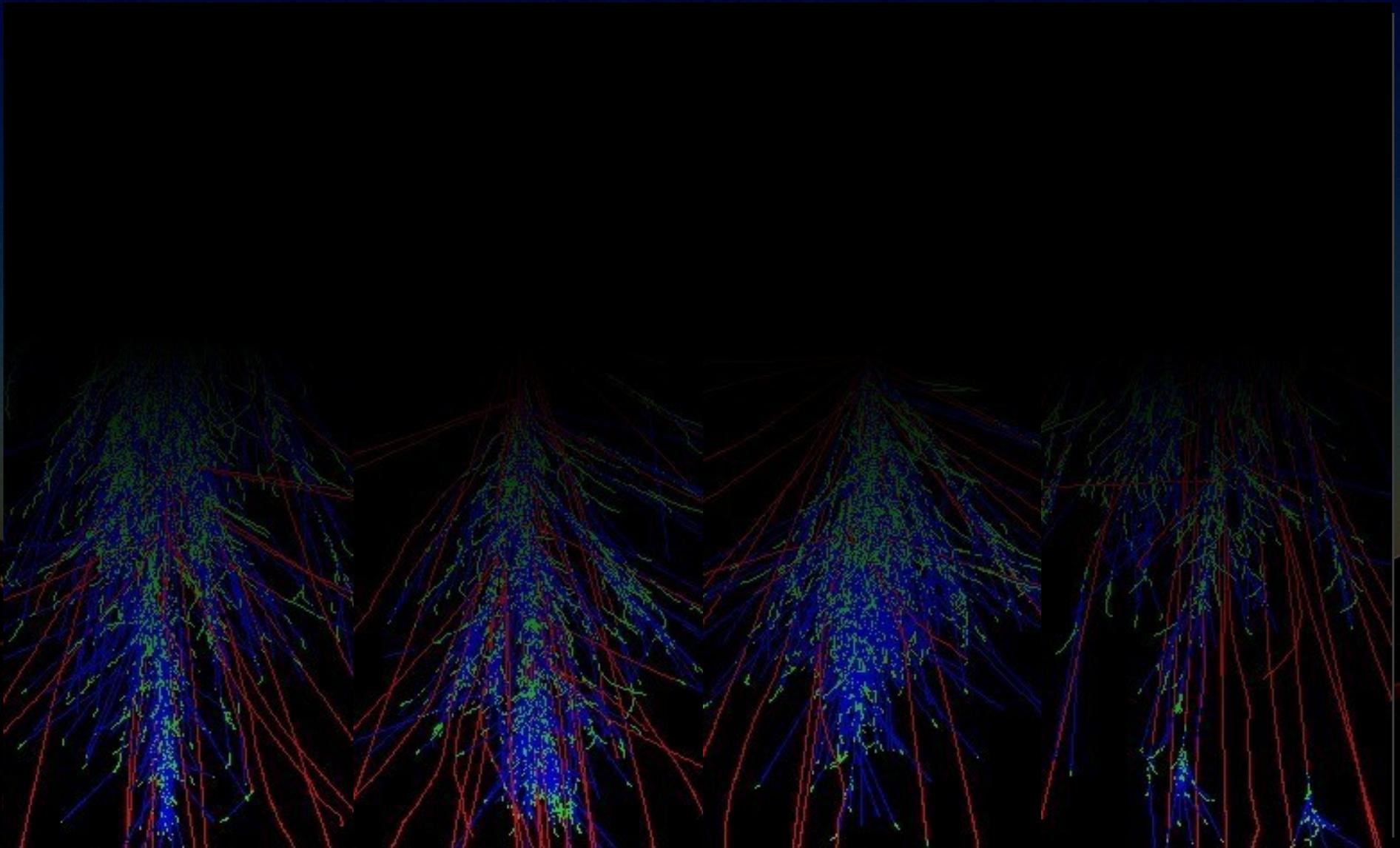


Cascades atmosphériques

γ , 200 GeV

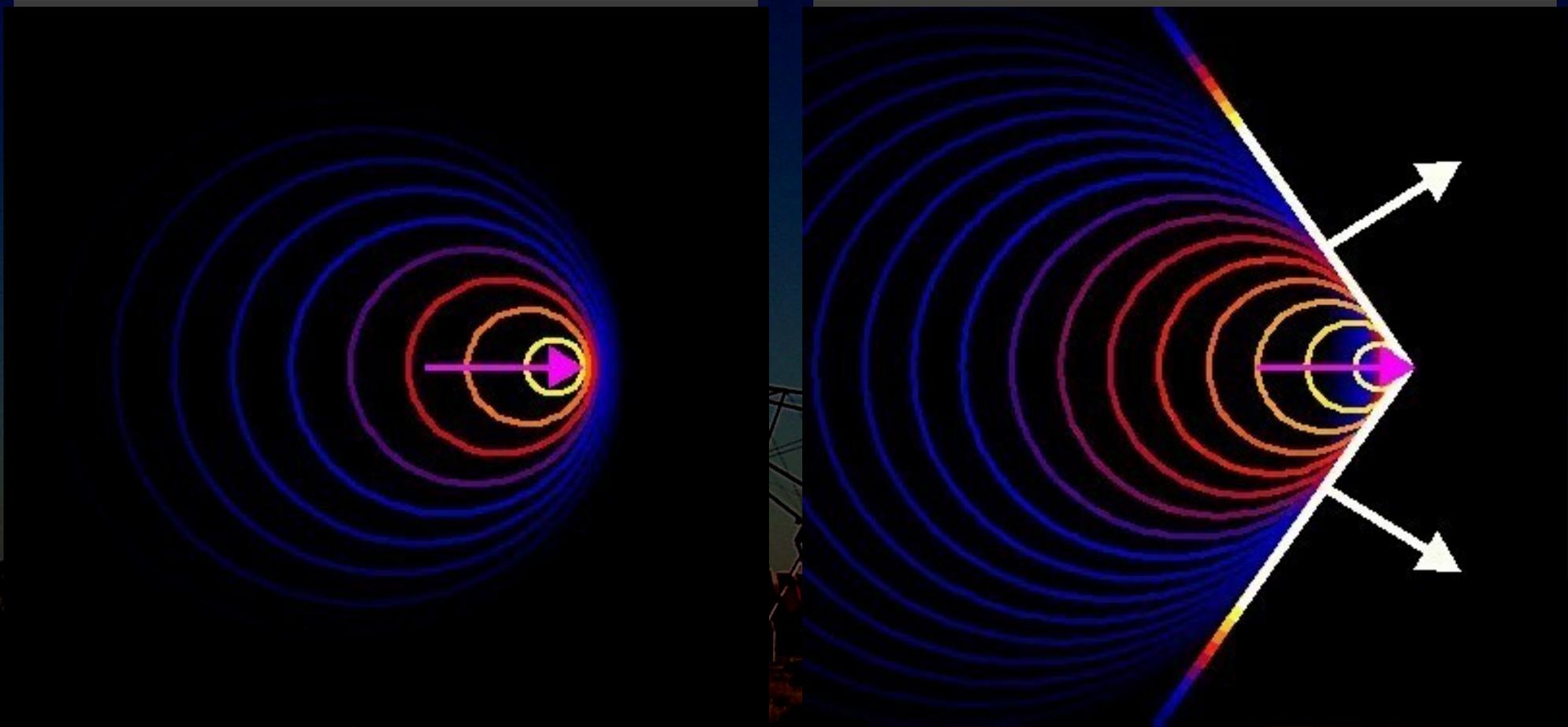


Cascades atmosphériques



- ❑ Les cascades engendrées par les protons et noyaux sont plus fluctuantes, et contiennent des particules pénétrantes

Émission Cherenkov



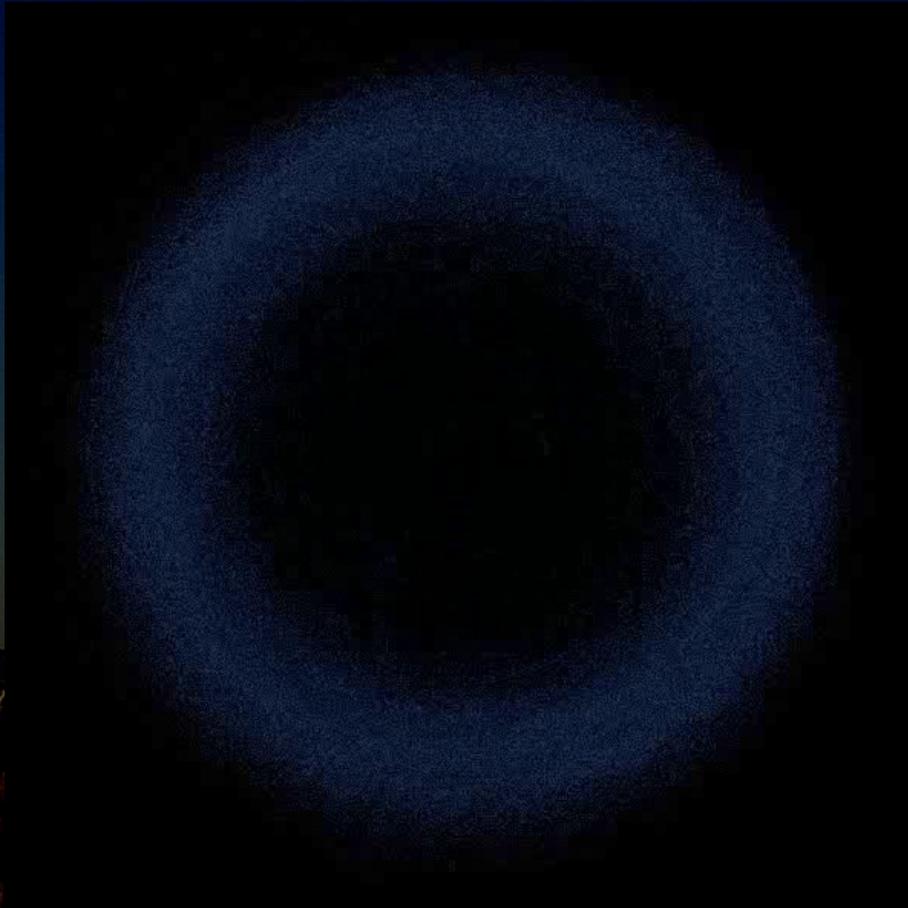
- Lorsque la lumière est ralentie dans le milieu, l'onde est comprimée à l'avant
- Lorsque la particule va plus vite que la lumière (dans le milieu), un bang lumineux se produit (là où les ondes s'additionnent)

Analogies

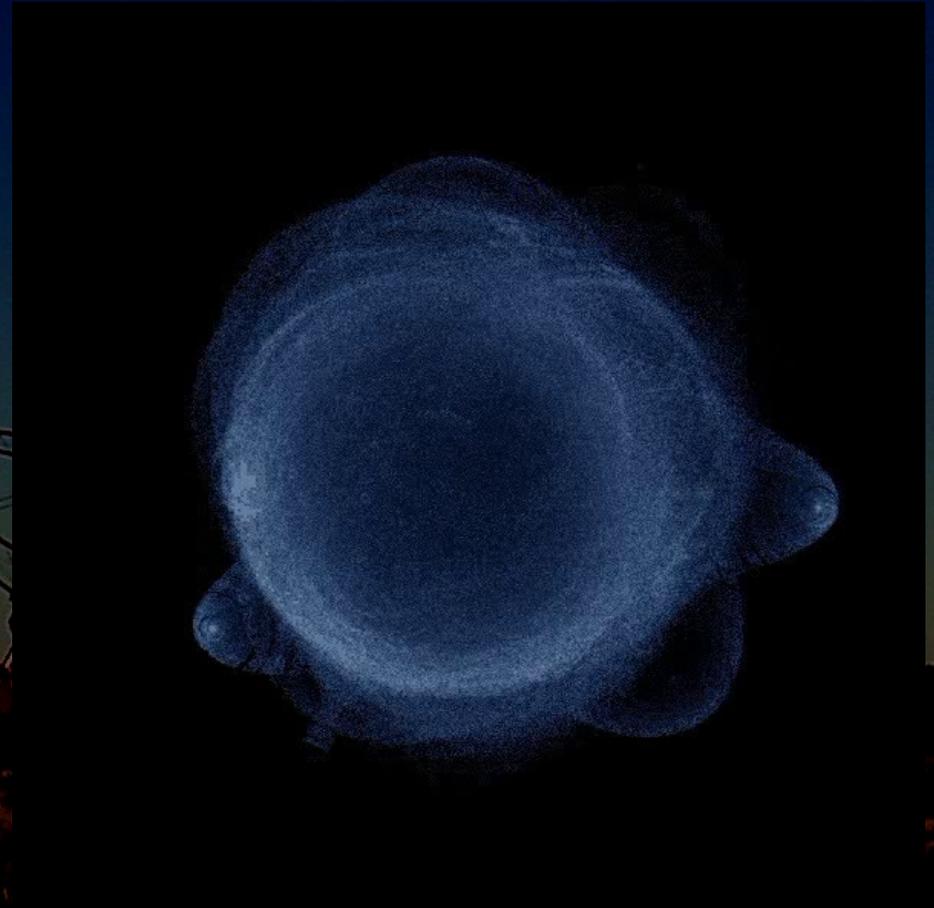


Émission Cherenkov des cascades

γ , 100 GeV



Protons, 500 GeV



← 300m →

Simulations: K. Berlöhr

- ❑ Émission très ténue et très brève (qqs milliardièmes de secondes)
- ❑ Cascades de protons plus fluctuantes (permet une différentiation)

Techniques expérimentales



TIBET

Eau ou
scintillateur

Primaire (γ , hadron)

Cascade
Atmosphérique

μ

Détecteur
de
Hadrons

Émission
Cherenkov

Primaire (γ , hadron)

Cascade
Atmosphérique

Télescope
Cherenkov



MILAGRO

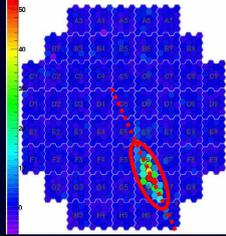
HESS, VERITAS, MAGIC, CANGAROO



STACEE, CELESTE, SOLAR II, GRAAL



Technique Cherenkov Atmosphérique



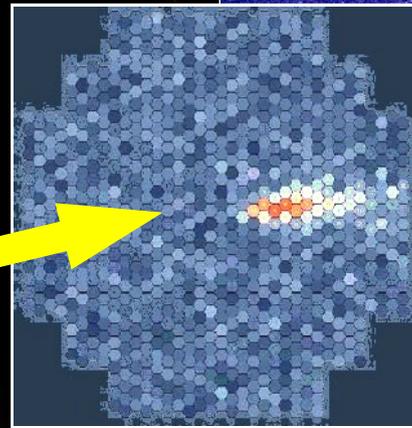
Sky & Telescope

Cascade
 γ
Rayon Cosmique

≈ 10 km

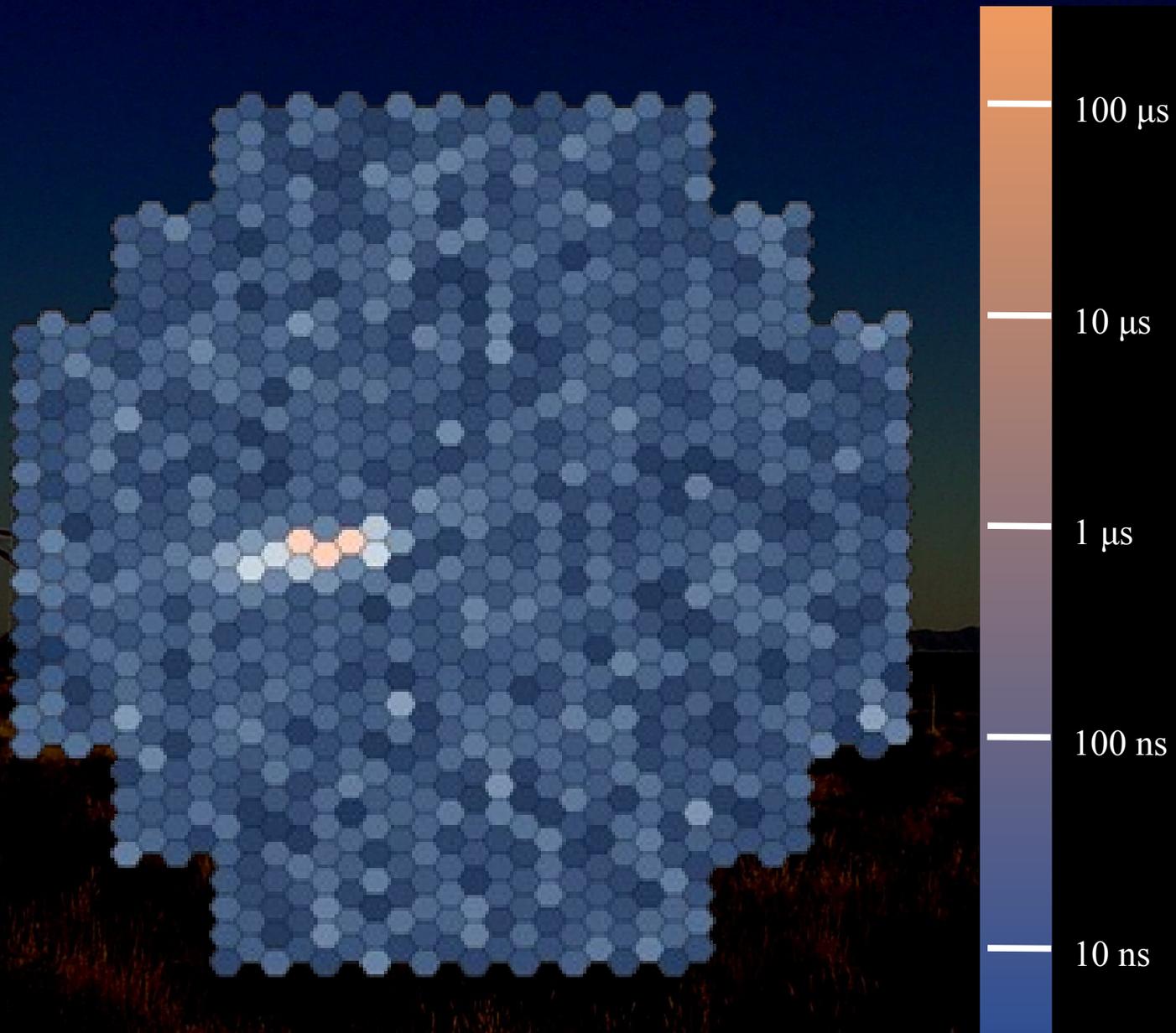
Lumière Cerenkov

≈ 120 m

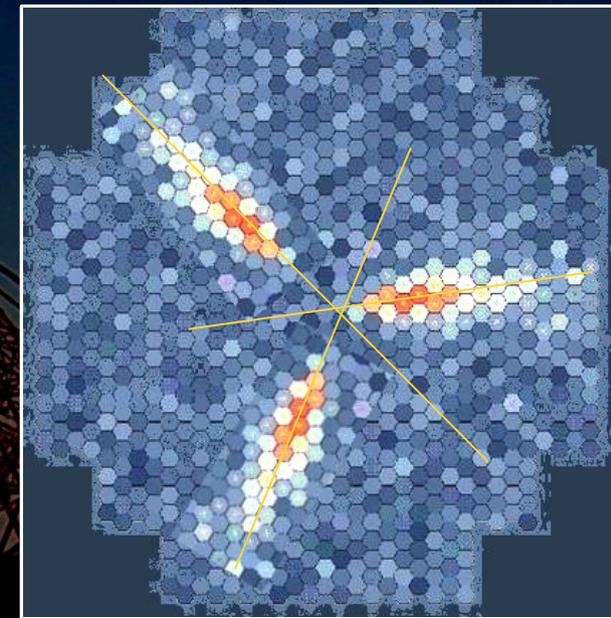
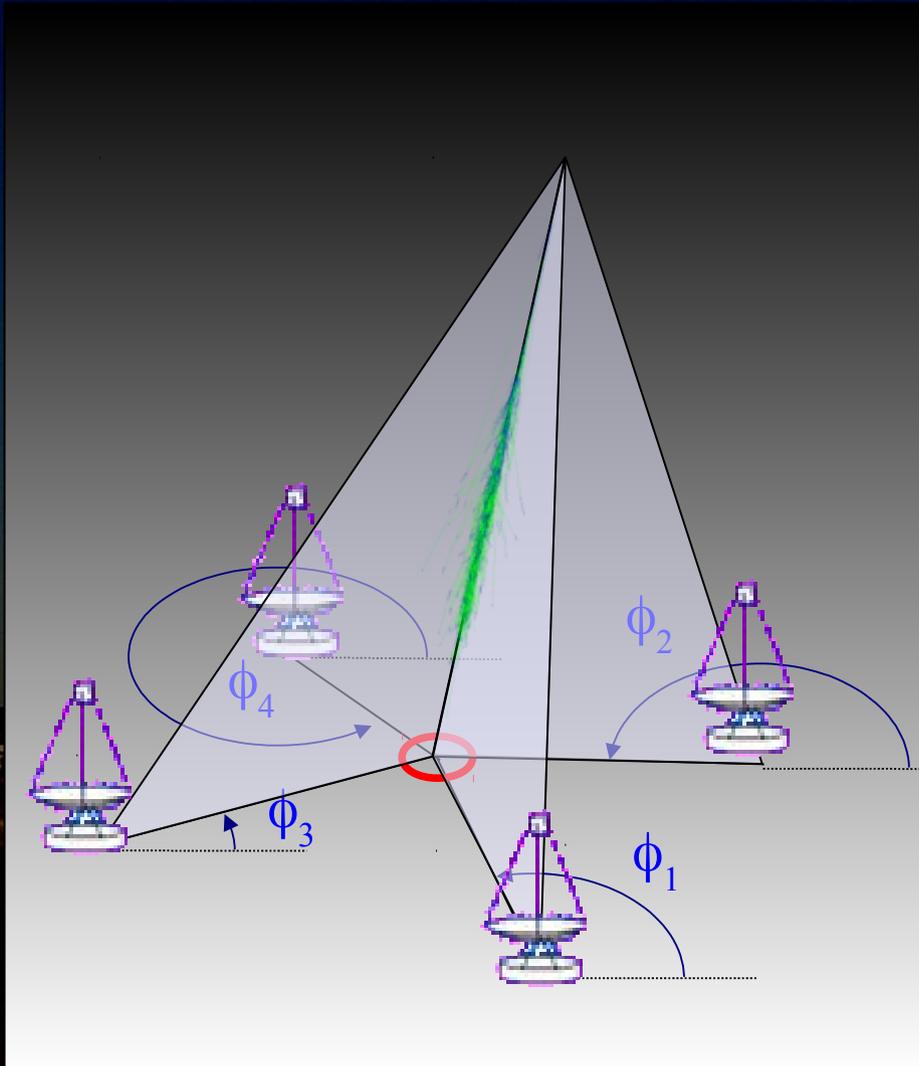
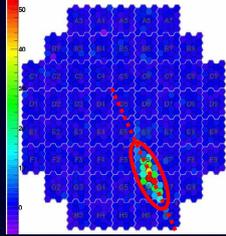


irg,

Facteur clef : la rapidité



Vision stéréoscopique



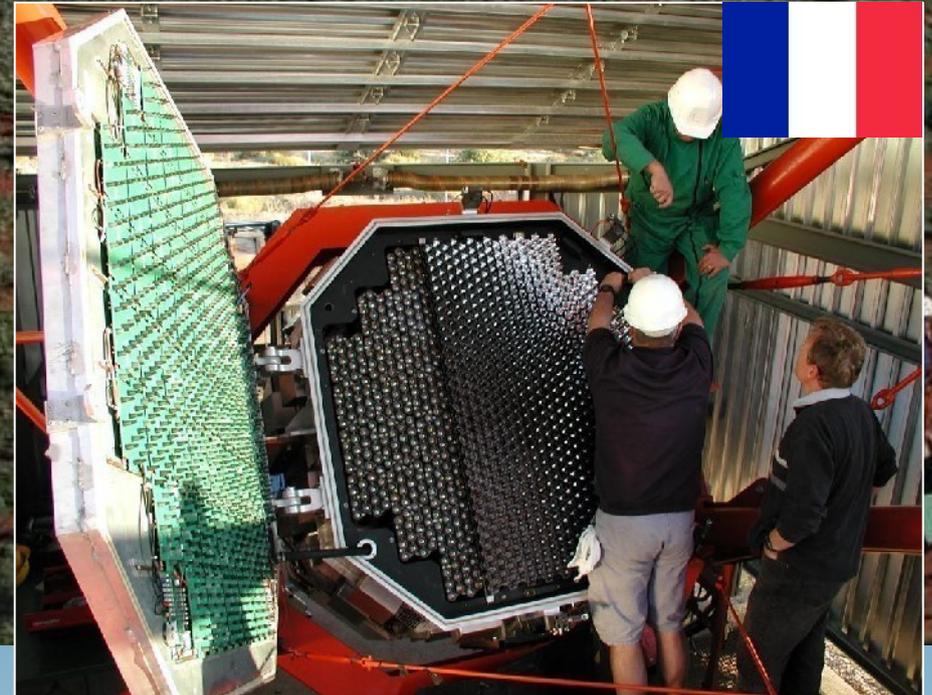
Images de 3 télescopes superposées

- La vision stéréoscopique permet une identification aisée de la direction et de l'impact de la cascade.

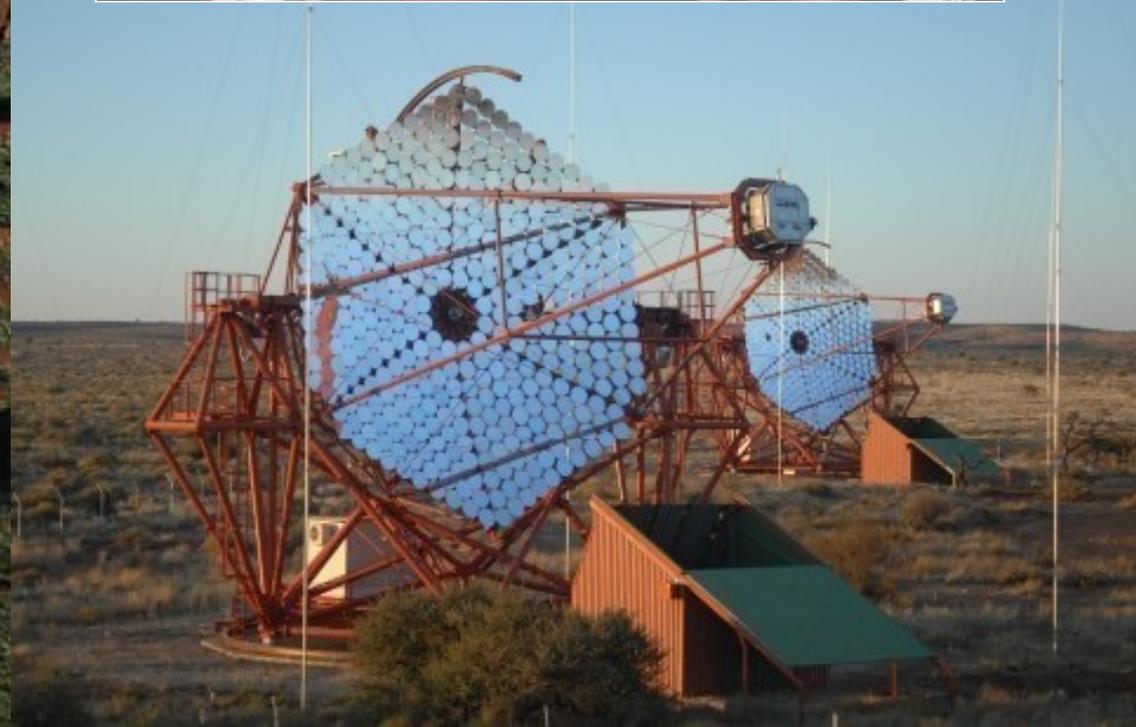


H.E.S.S. High Energy Stereoscopic System

H.E.S.S. en Namibie

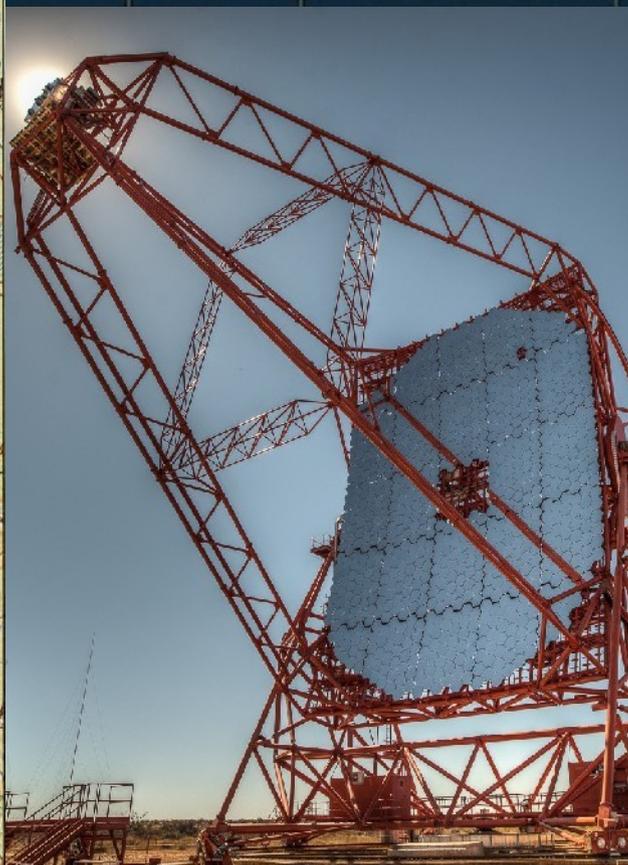
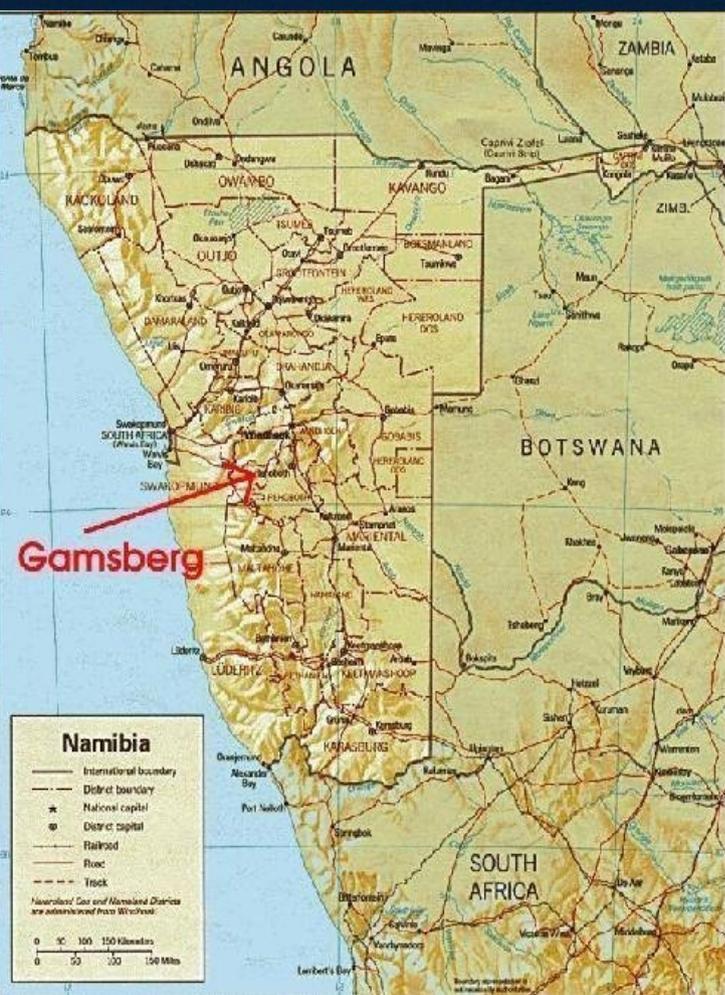


- ❑ 4 télescopes (en carré de 120 m)
 - ❑ Réflecteur de 12 m de diamètre, 15 m de focale
- ❑ Des caméras extrêmement rapides:
 - ❑ 960 pixels (PMT)
 - ❑ Échantillonnage à 1 ns
 - ❑ ~ 1 tonne
- ❑ Système complet depuis le 10/12/2003



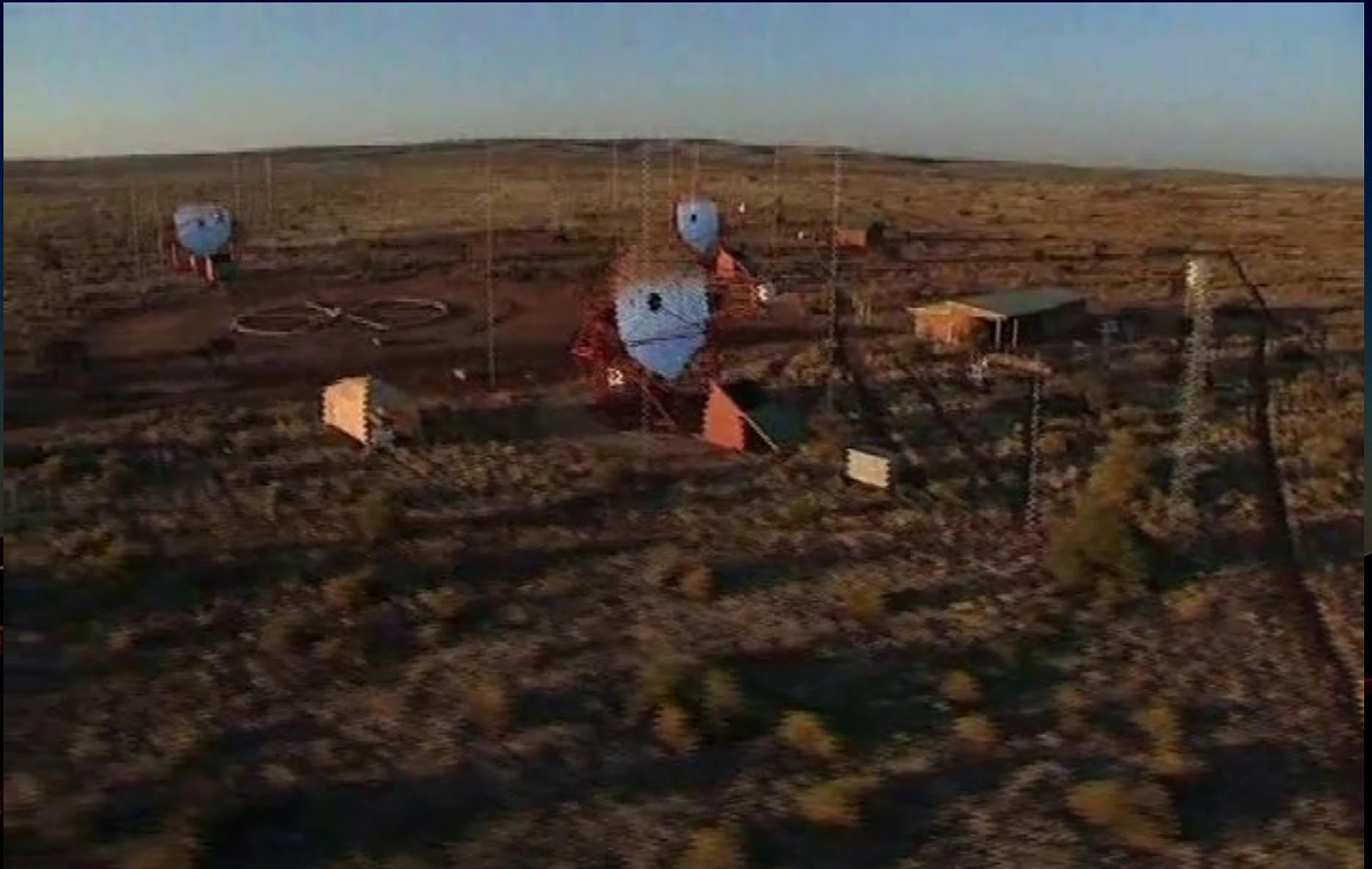
High Energy Stereoscopic System

- ❑ Consortium international, mené par Allemagne + France
- ❑ Site: 23°16" S, 16°30" E, 1800 m asl, 100 km de Windhoek (Namibie)
 - ❑ très bonne qualité optique du ciel
 - ❑ hémisphère peu observé, grande partie du plan galactique observable

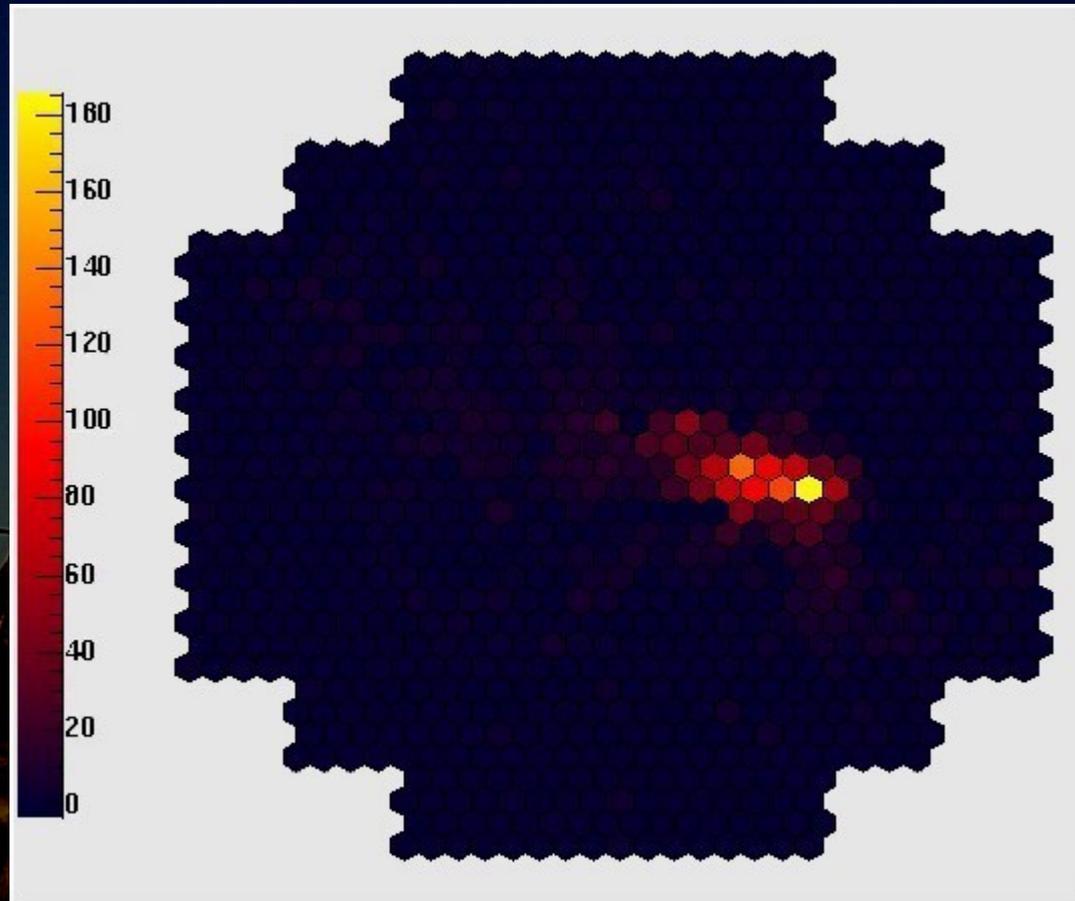


MPI Kernphysik, Heidelberg
Humboldt Univ. Berlin
Ruhr-Univ. Bochum
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
CEA Saclay
CESR Toulouse
LPTA Montpellier
LAOG Grenoble
LAPP Anecy
Observatoire de Paris
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies
Charles Univ., Prag
Yerewan Physics Inst.
North-West Univ., Potchefstroom
Univ. of Namibia, Windhoek

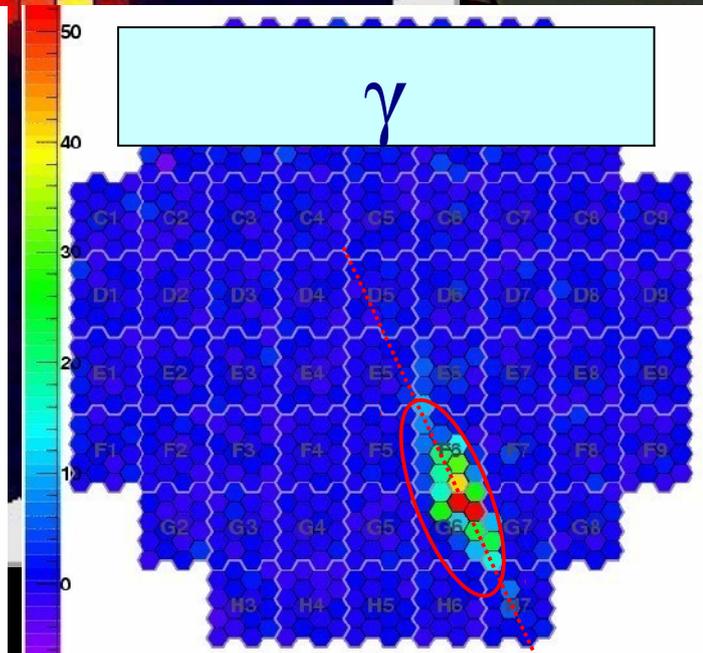
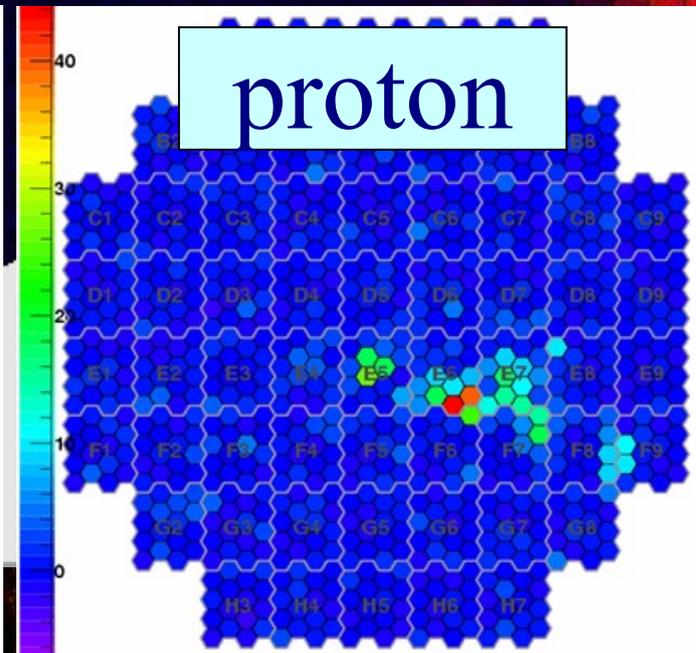
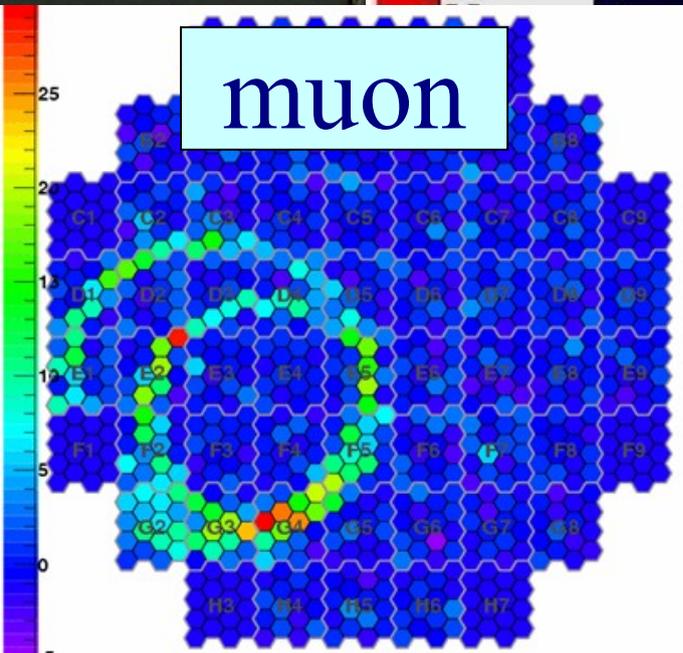
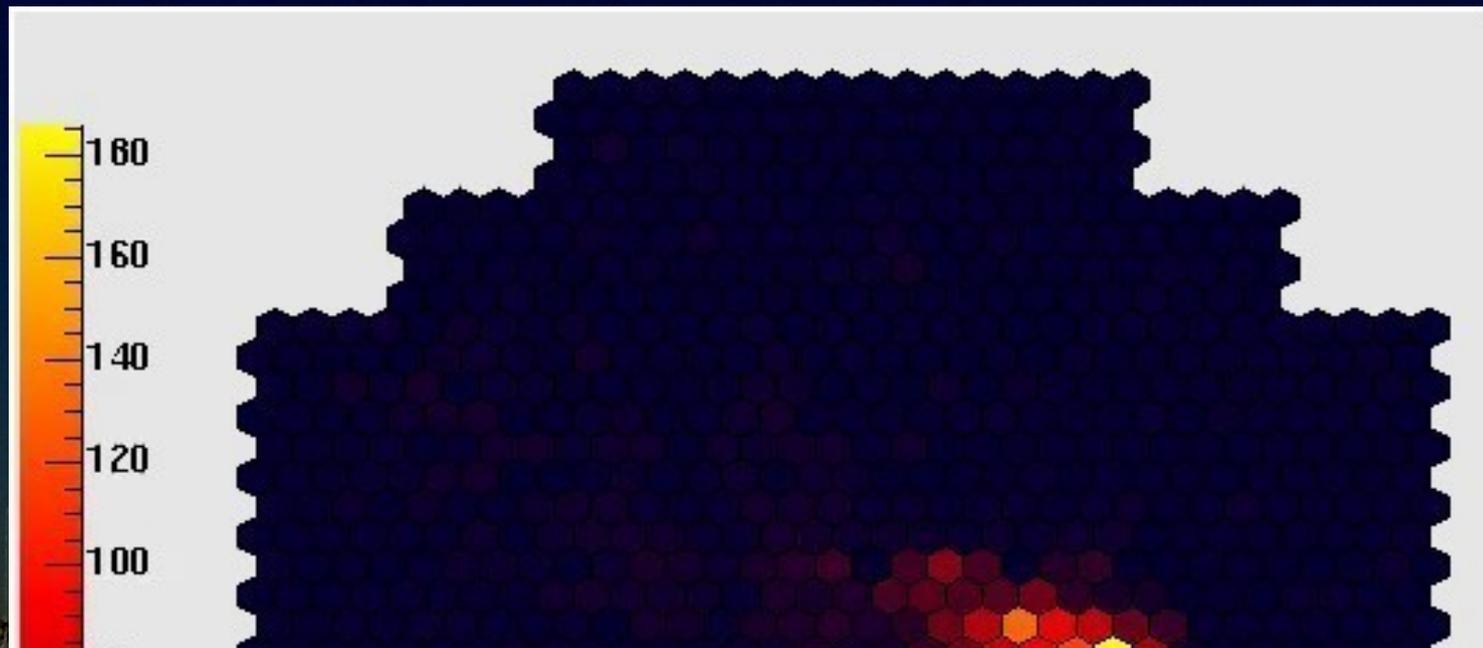
Le site



Événements



Événements

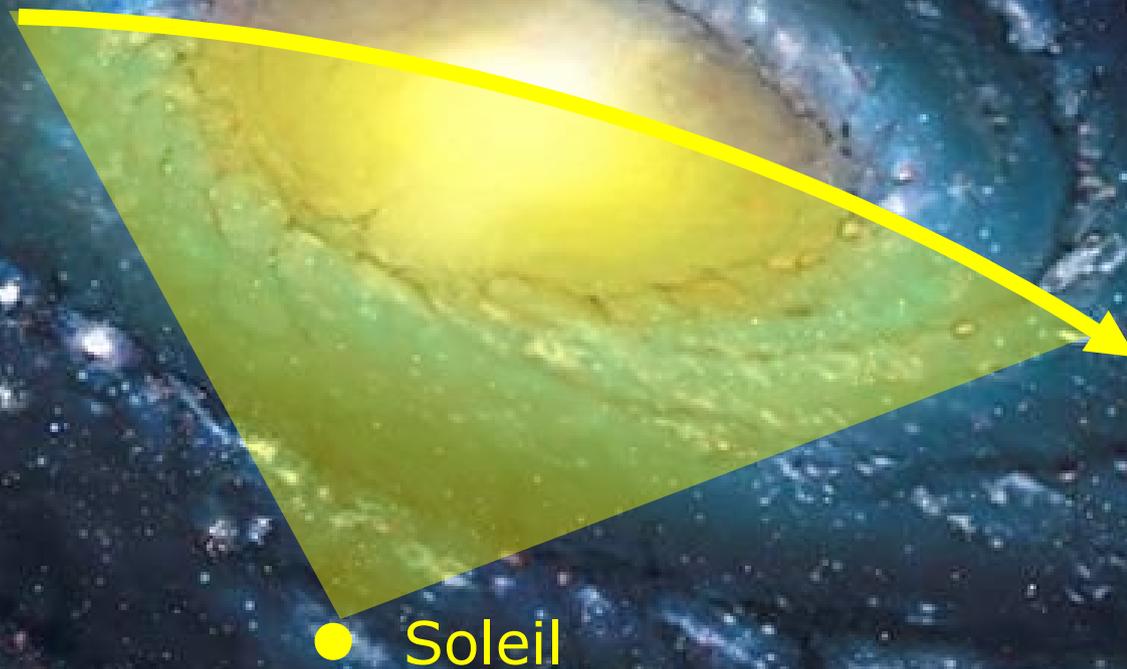




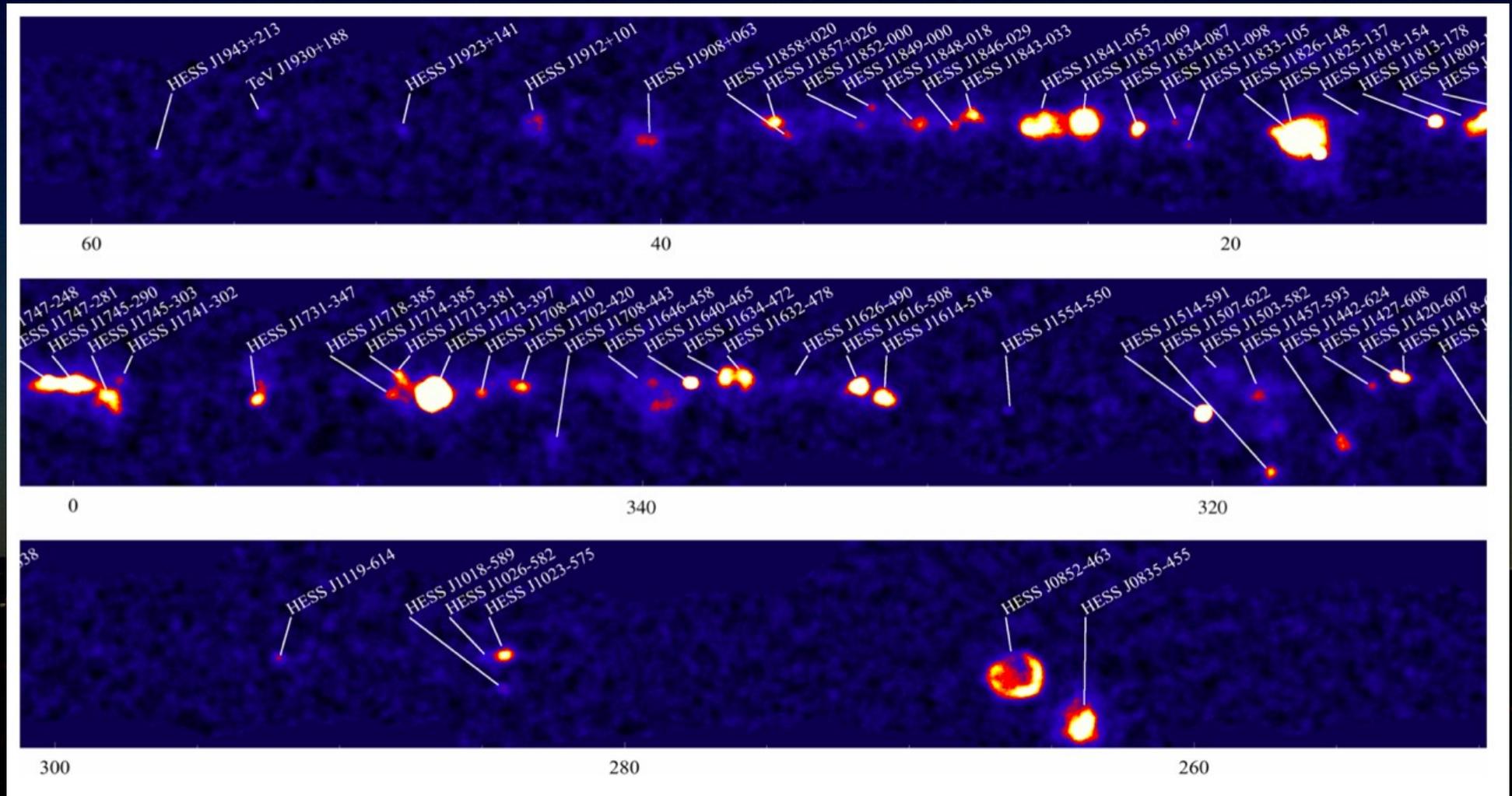
Quelques résultats

Cartographie des régions centrales

$\ell = -85^\circ$ (ou 275°) à $\ell = +60^\circ$ et $|b| < 3^\circ$
~3000 heures d'observation



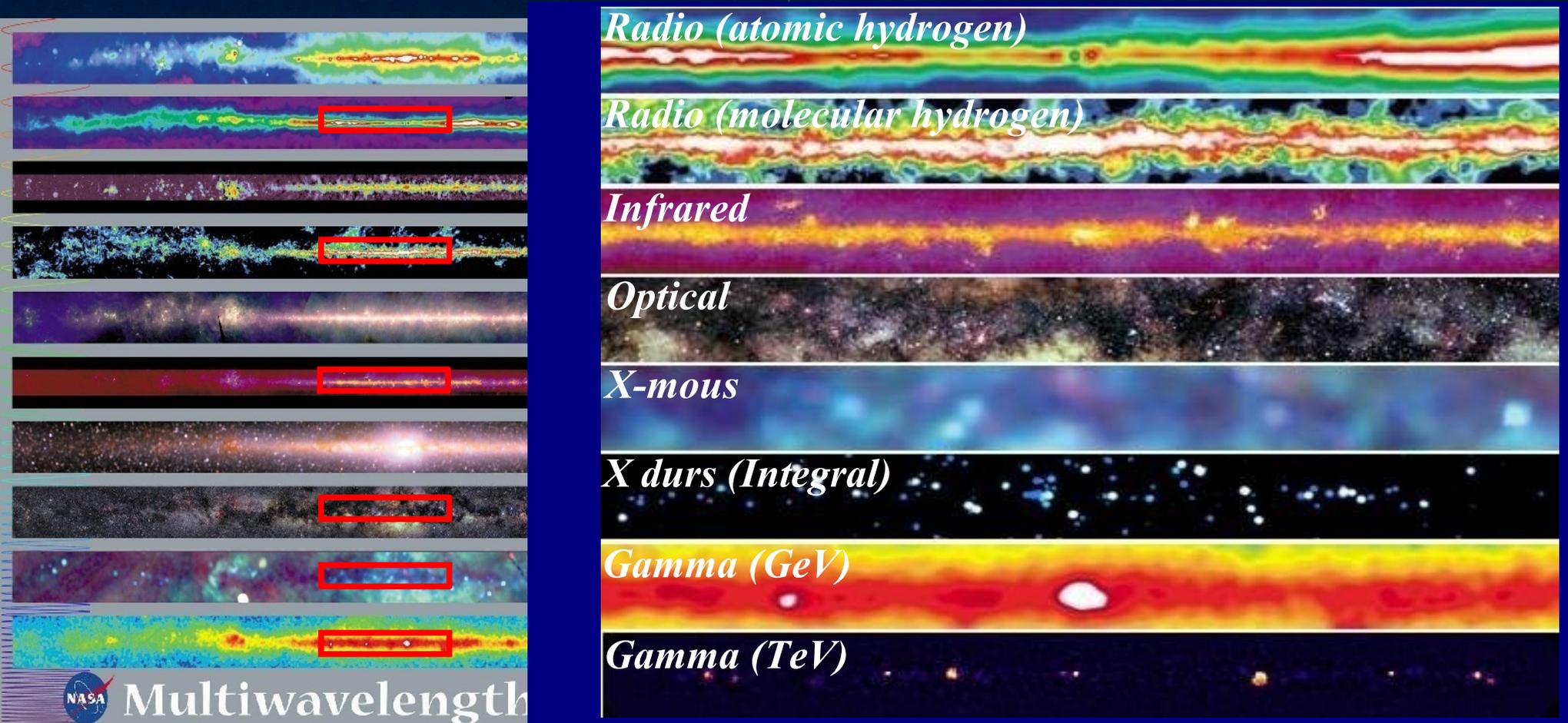
Une moisson impressionnante



~60 sources de types variés : restes de supernova, nébuleuses synchrotrons, systèmes binaires, vents stellaires
Sources majoritairement (très) étendues

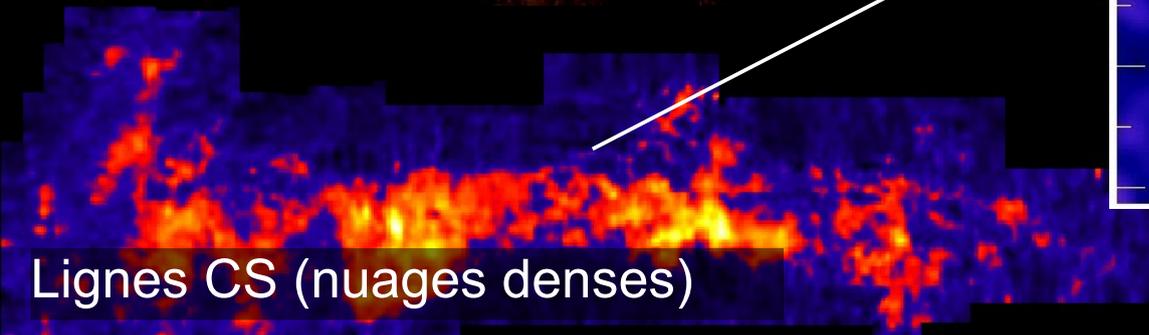
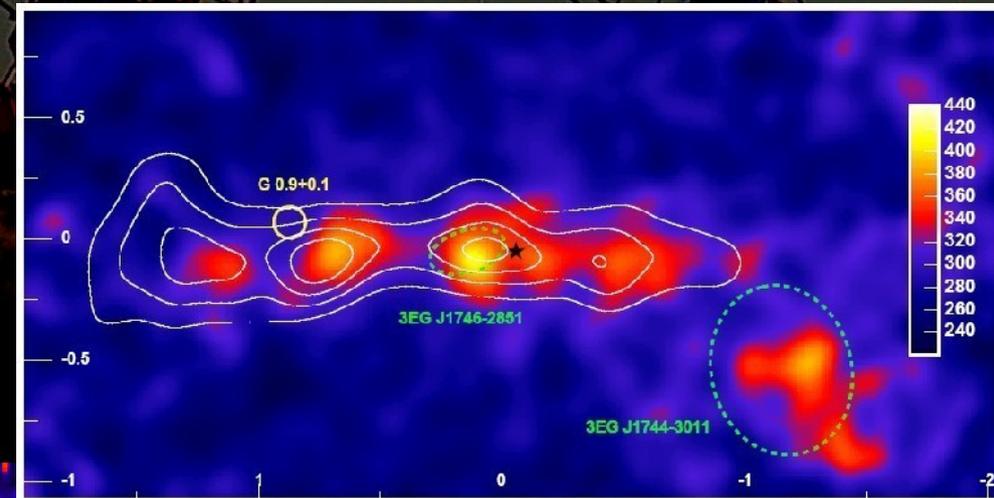
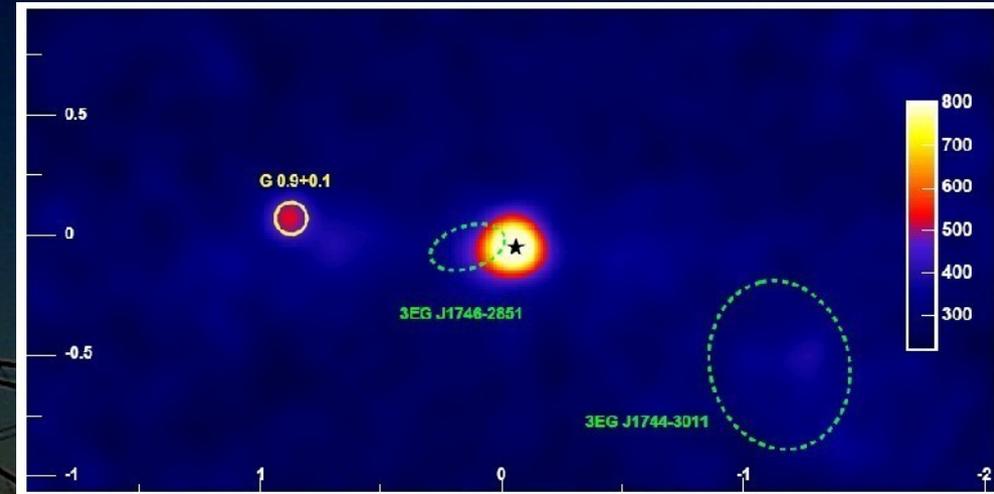
Cartographie des régions centrales

Des sources très concentrées sur le plan ($\sim 0.3^\circ$)
 \Rightarrow Jeunes!, échelle du gaz présent dans le plan



Centre Galactique – Émission Diffuse

- 2 sources ponctuelles (PWN)
- Emission diffuse associée à des nuages moléculaires
- Interaction des rayons cosmiques avec la matière interstellaire?
- Plus de particules de haute énergie qu'au voisinage de la terre \Rightarrow effet de propagation



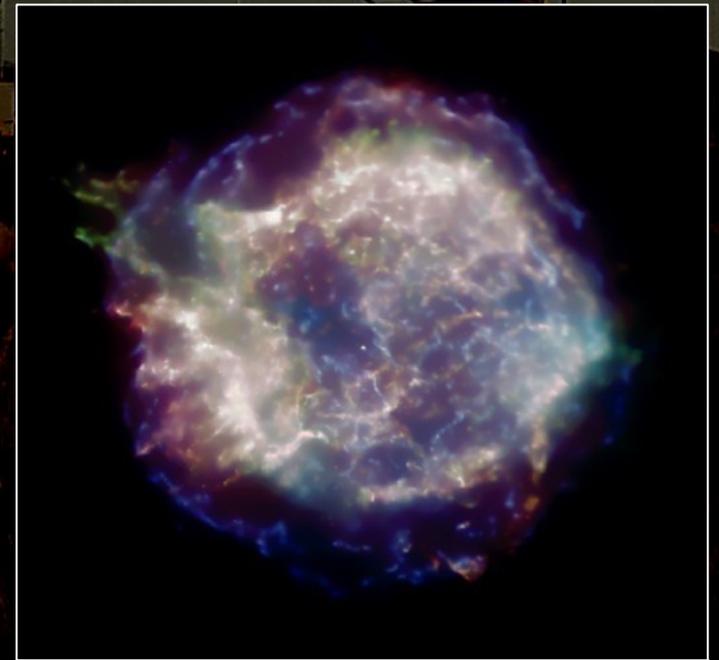
$pp \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma ?$

Restes de Supernovæ (en coquille)

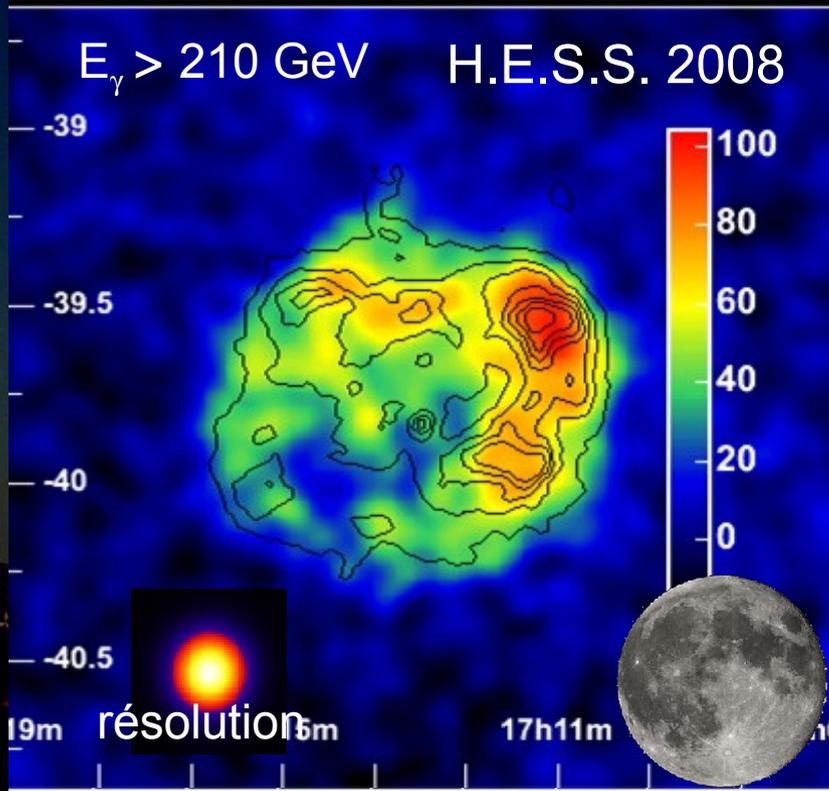
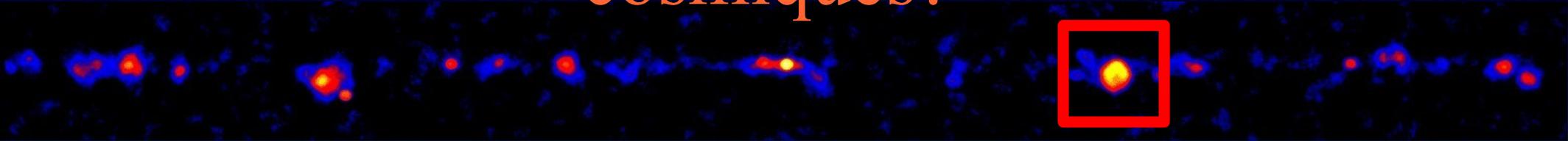
- ❑ Résidu d'explosion d'étoile massive
- ❑ Onde de choc balayant la matière interstellaire (> 1000 km/s), forme de coquille
- ❑ Intérieur très chaud: 1 million de degrés, énergie libérée gigantesque: 10^{44} J = 10^{16} Hiroshima
- ❑ Restes de Supernova sont les meilleurs candidats pour les rayons cosmiques galactiques:
 - ❑ 1 SNR/Galaxie et par siècle
 - ❑ Efficacité de conversion $\sim 10\%$



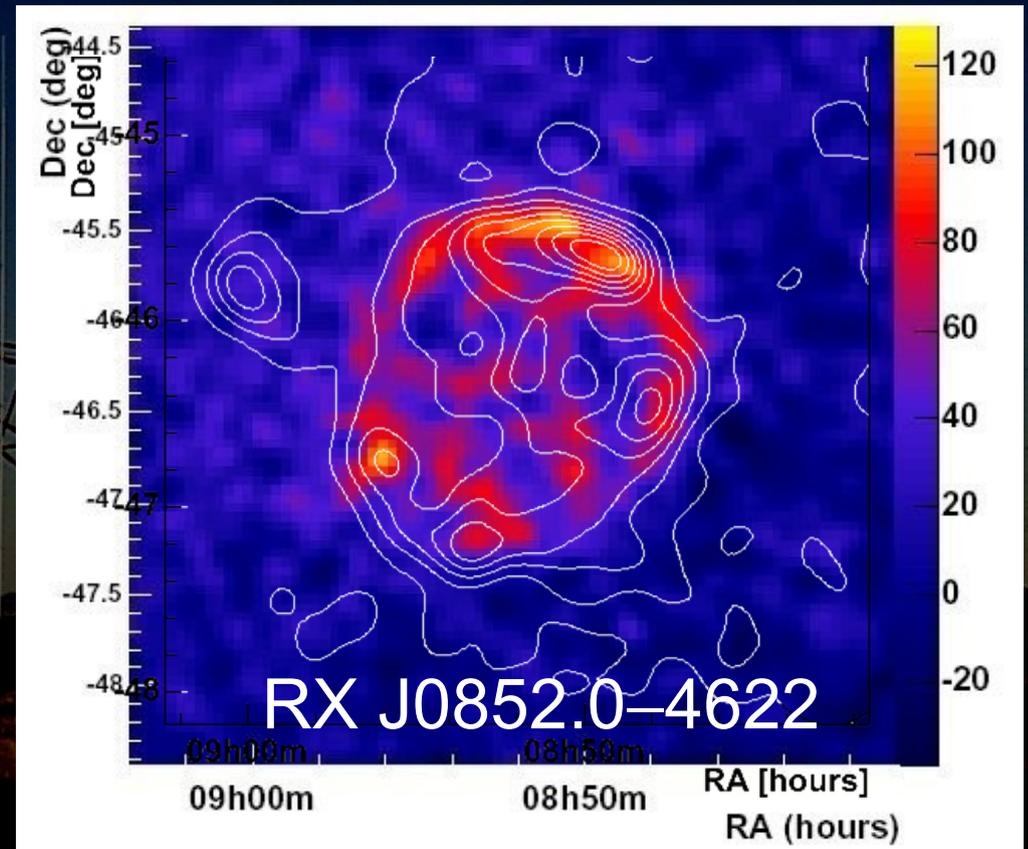
Vue d'artiste (ESA/Nasa)



Restes de supernovæ: des accélérateurs cosmiques?



RX J1713.7-3946

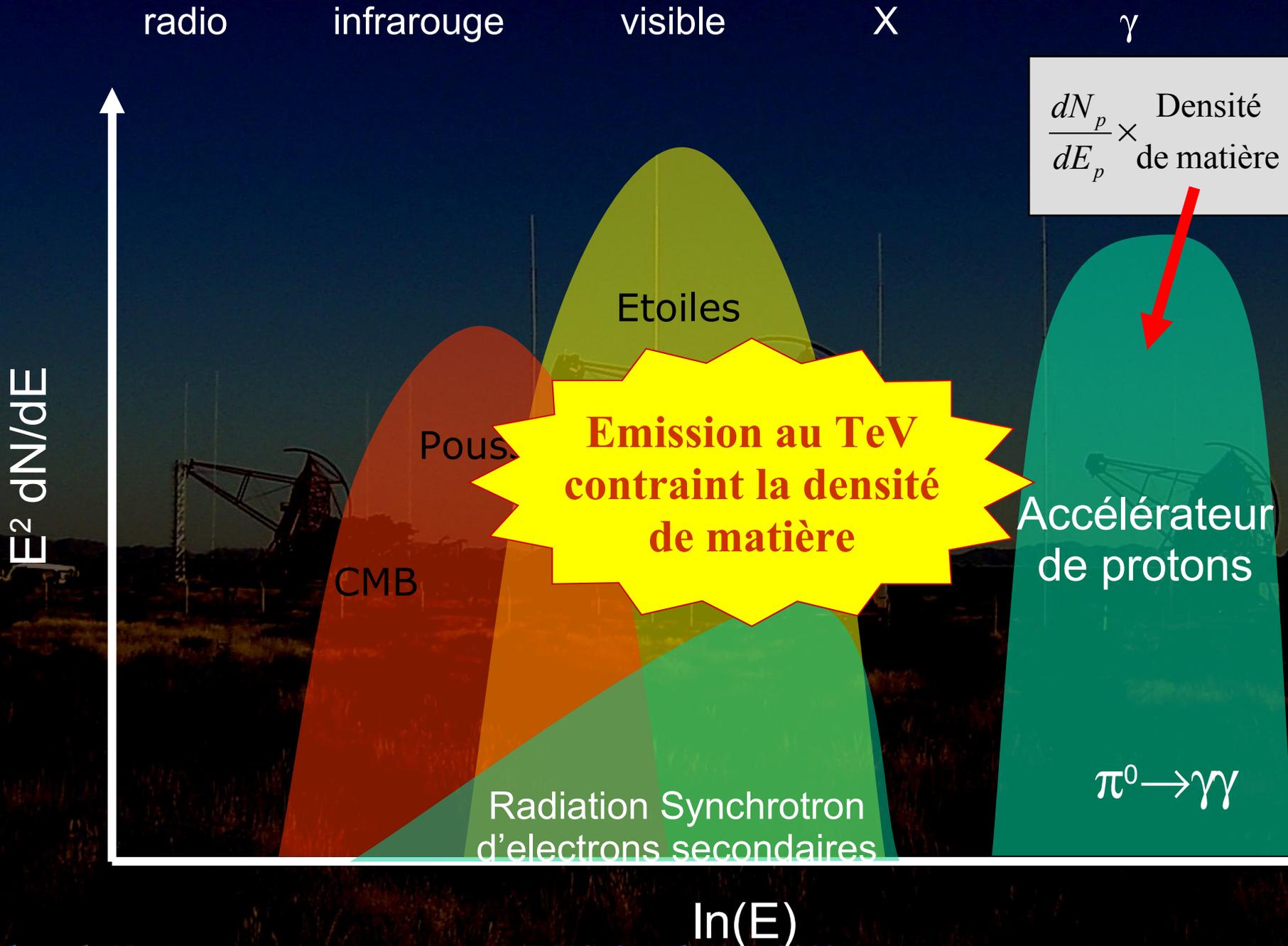


Corrélation très nette entre émission X et γ

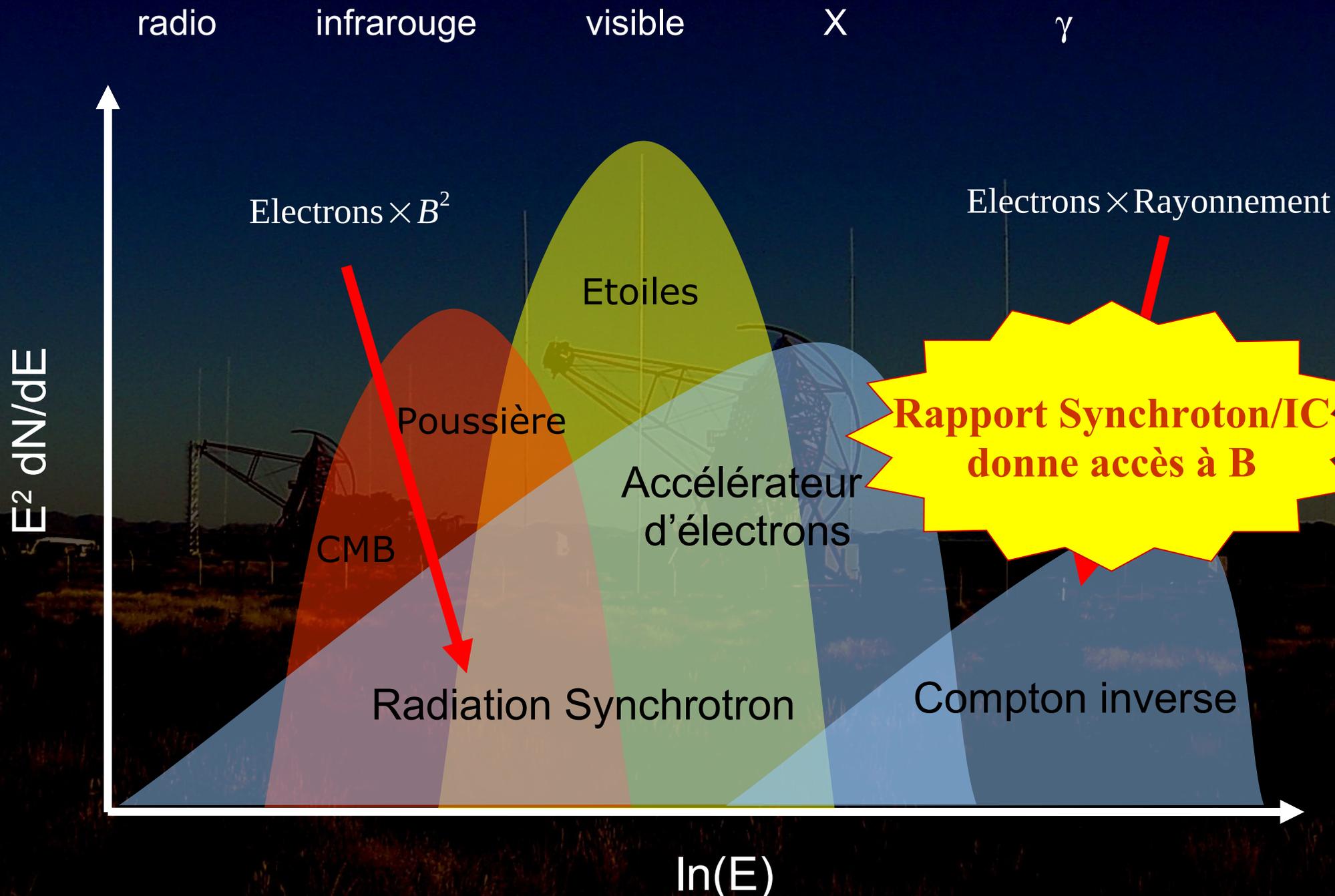
□ Les restes de SN accélèrent des particules au moins jusqu'à 100 TeV

⇒ Quel type de particules?

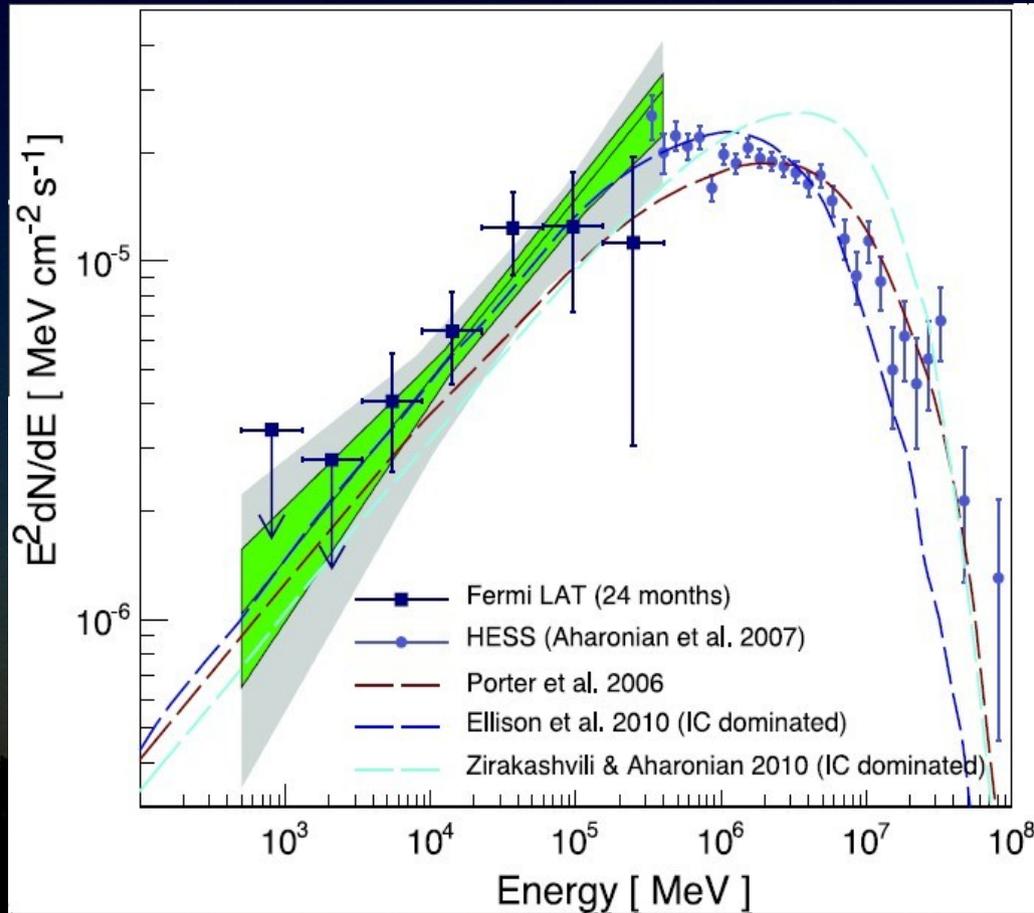
Electron ou Hadrons?



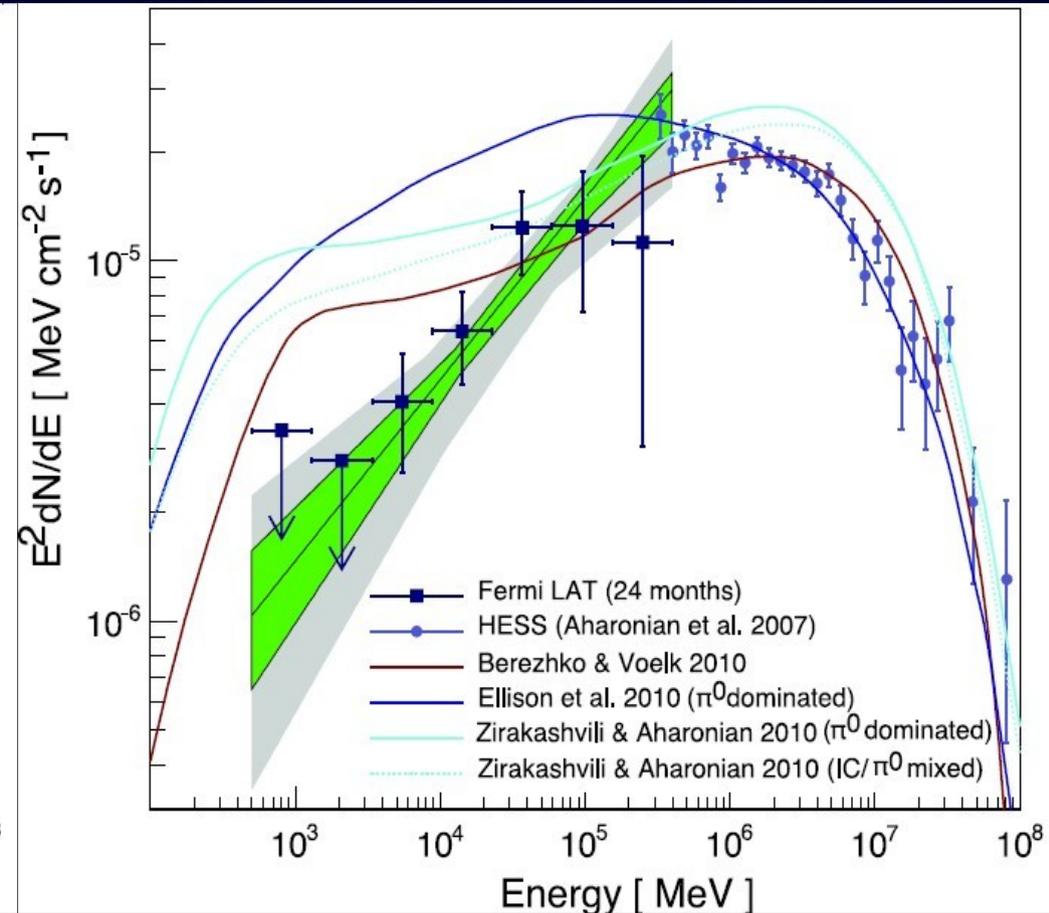
Electron ou Hadrons?



Où en est-on ?



Leptonique

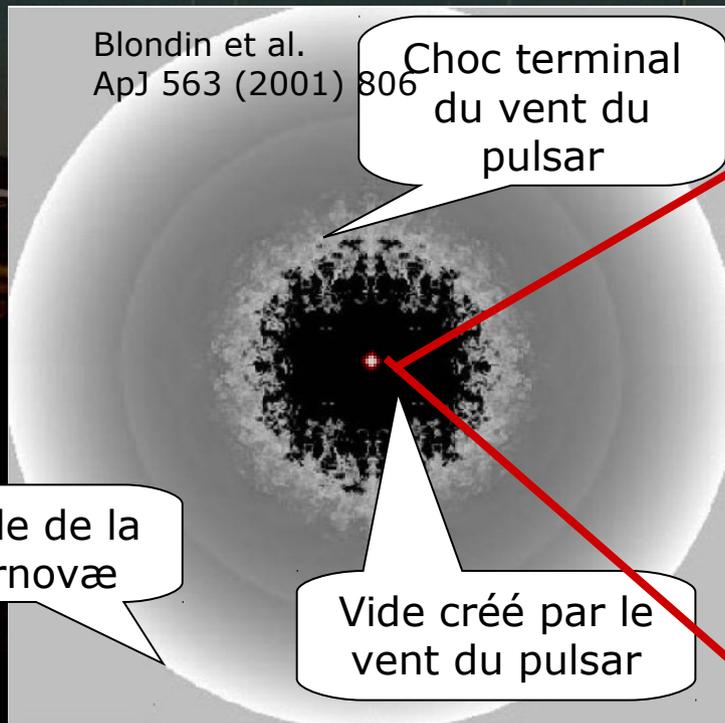


Hadronique

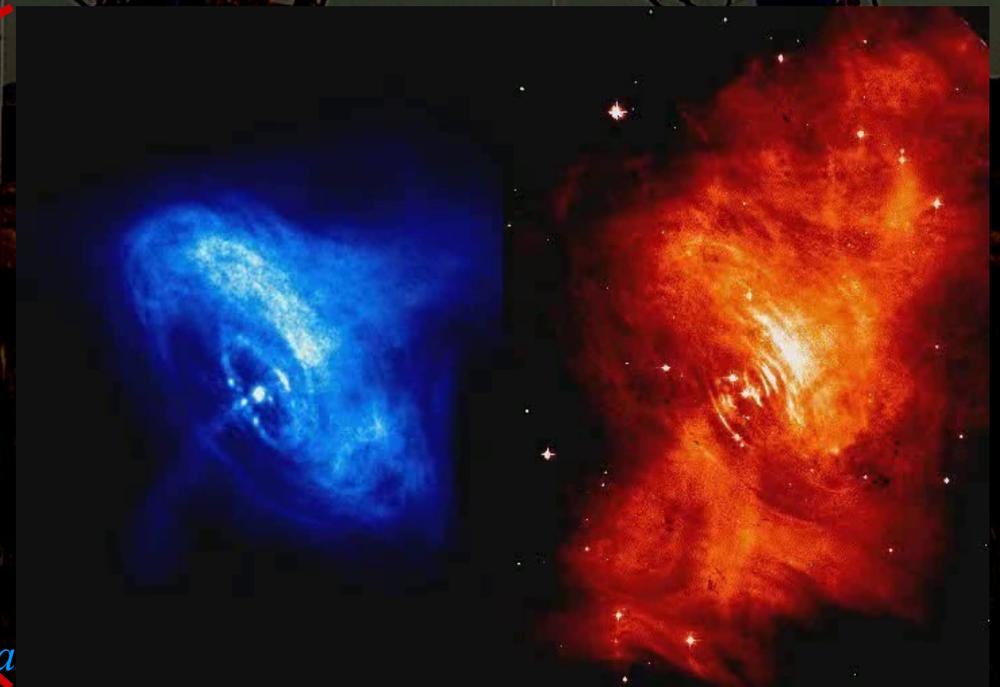
- ❑ Les modèles leptoniques reproduisent bien le domaine du GeV mais on du mal à haute énergie (coupure Klein Nishina)
- ❑ Les modèles hadroniques surestiment l'émission au GeV

Nébuleuses de vent de Pulsar

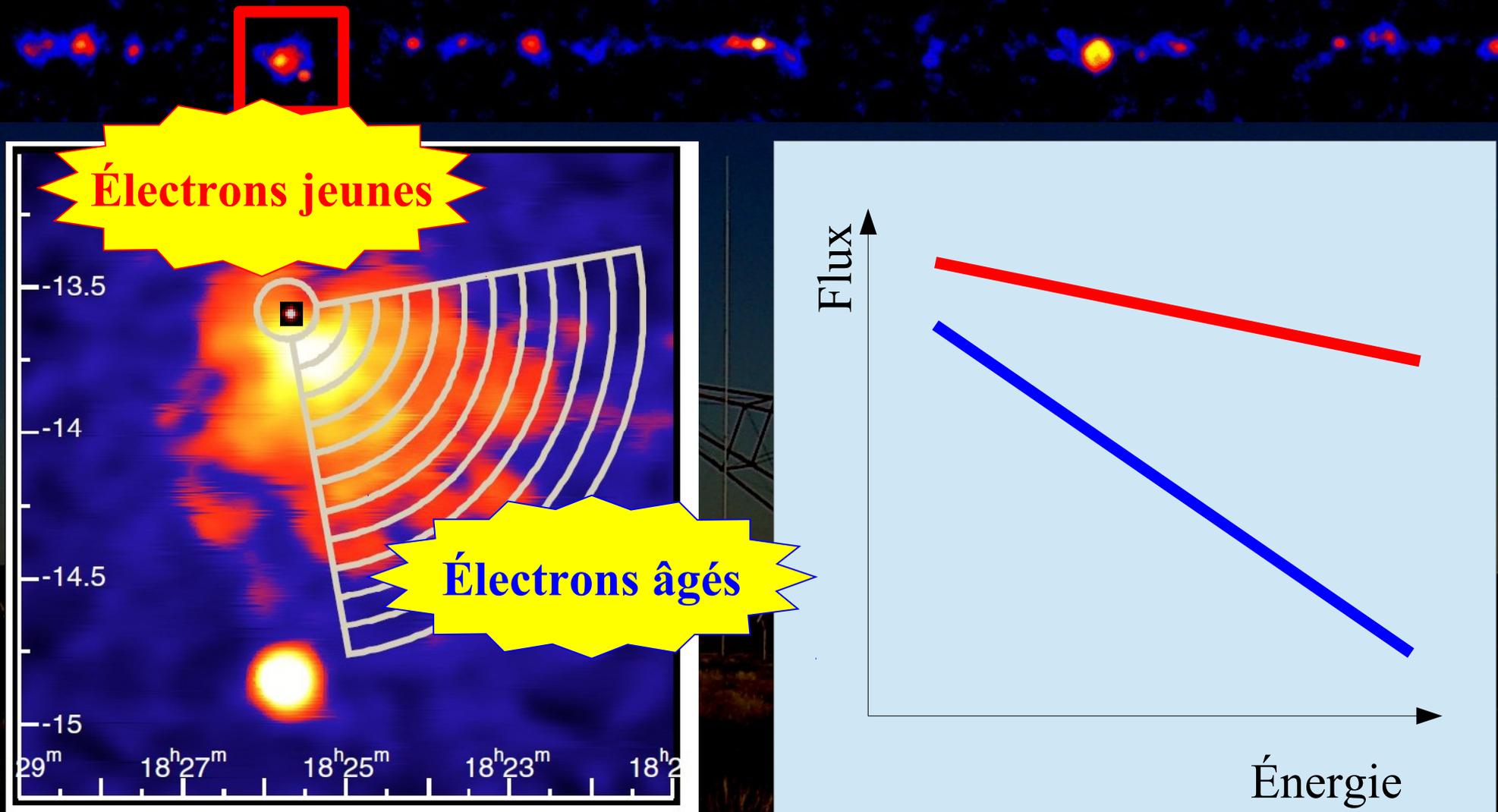
- ❑ Nébuleuse du Crabe:
Supernovæ historique (1054)
observée par les Chinois et les
Européens
- ❑ Forme une « Nébuleuse
synchrotron » alimentée par un
pulsar jeune (33ms) (**Plérion**)



Chandra



Freinage des électrons en direct

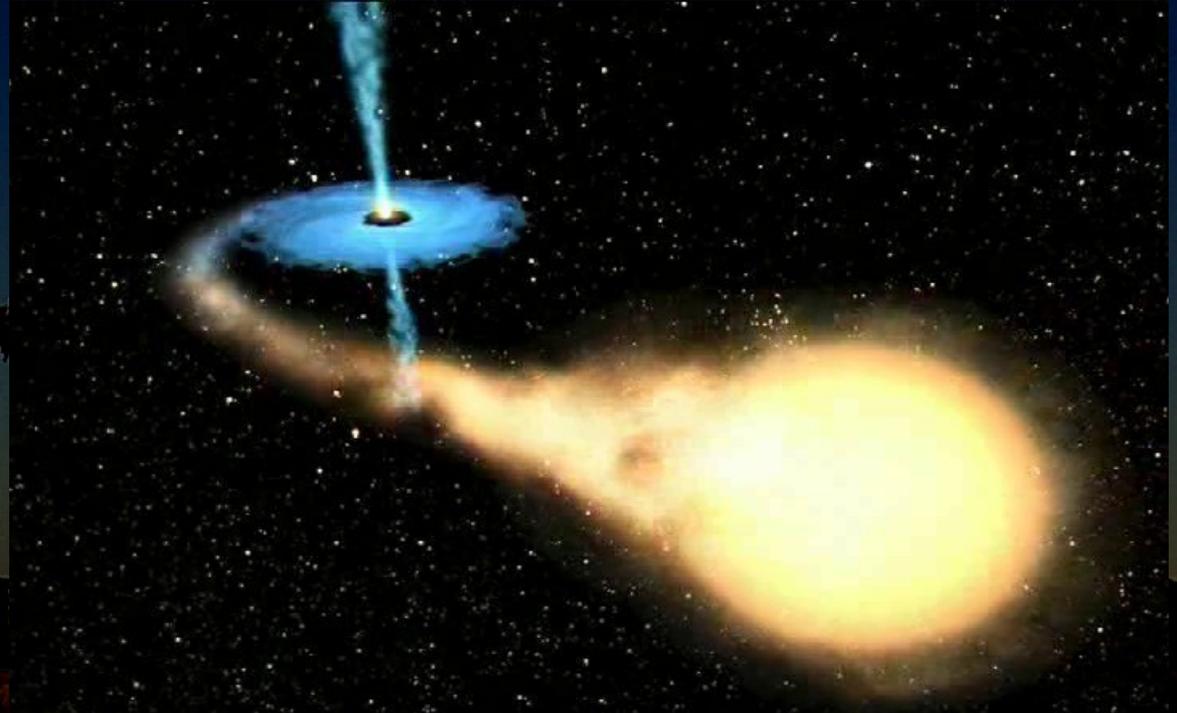


□ Énergie décroît lorsqu'on s'éloigne du pulsar

⇒ Première observation du refroidissement des électrons

Systemes binaires

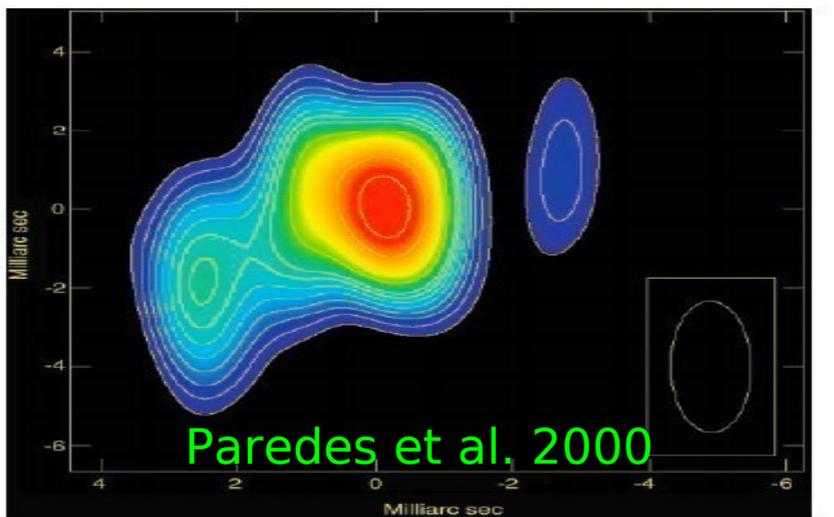
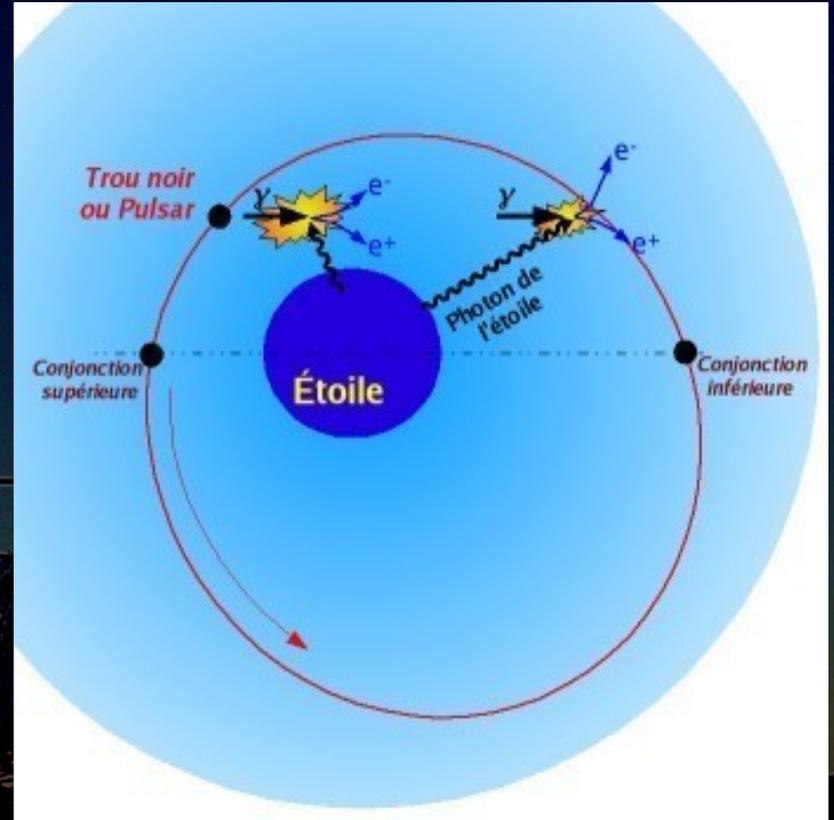
- ❑ Systeme forme de:
 - ❑ Un objet compact (trou noir ou etoile a neutron)
 - ❑ Une etoile compagne
 - ❑ Un disque d'accrétion
 - ❑ Des jets
- ❑ Accélération de particules dans les jets
- ❑ Émission très variable sur de nombreuses échelles de temps
- ❑ Permettent de comprendre les mécanismes d'accrétion et de formation des jets de plasmas



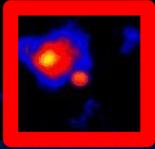
Vue d'artiste (ESA/NASA)

LS 5039 – Une binaire Gamma

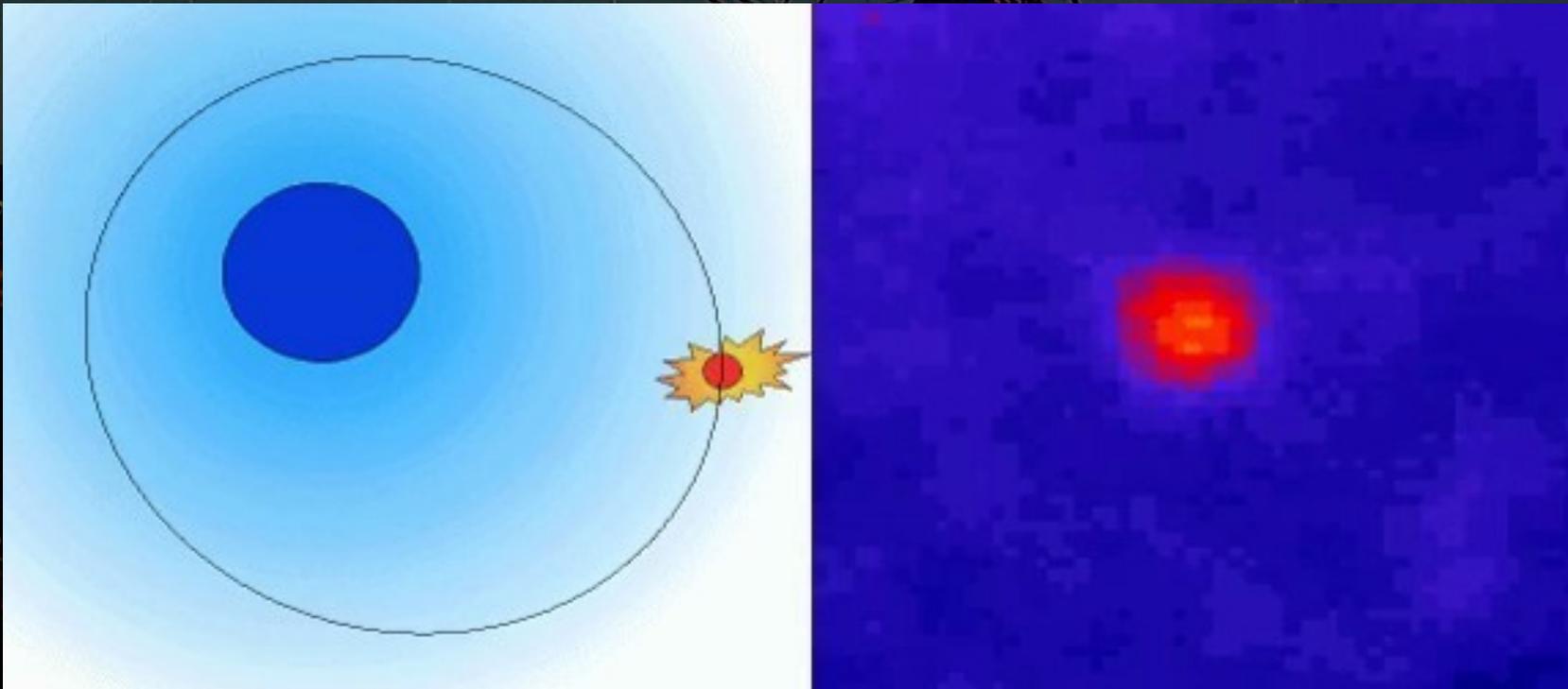
- ❑ Système binaire LS 5039:
 - ❑ Étoile massive ($20 M_{\odot}$) et très chaude, UV
 - ❑ Objet compact (trou noir ou étoile en neutron)
 - ❑ Orbite serrée ($d = [2 - 4.5] R_{\star}$)
 $0.1 \times$ (terre – soleil) !
 - ❑ Période orbitale 3.9 jours
- ❑ Jets observés en radio



Observations de LS 5039

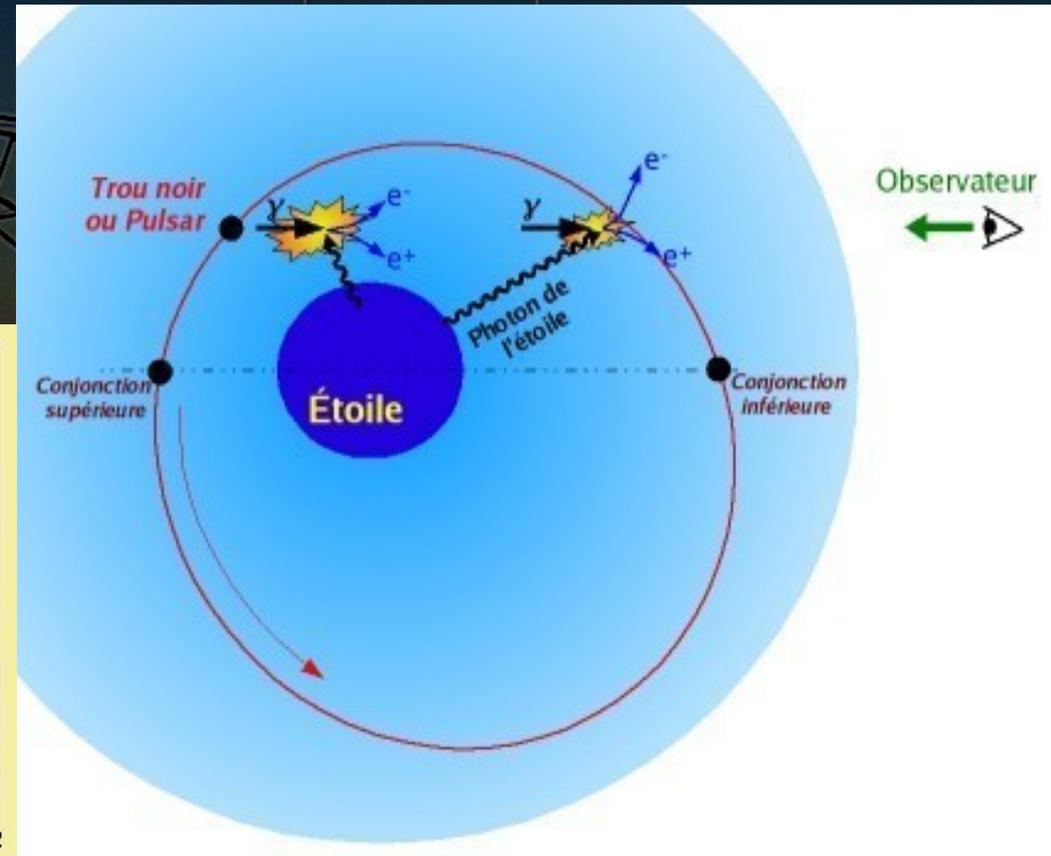
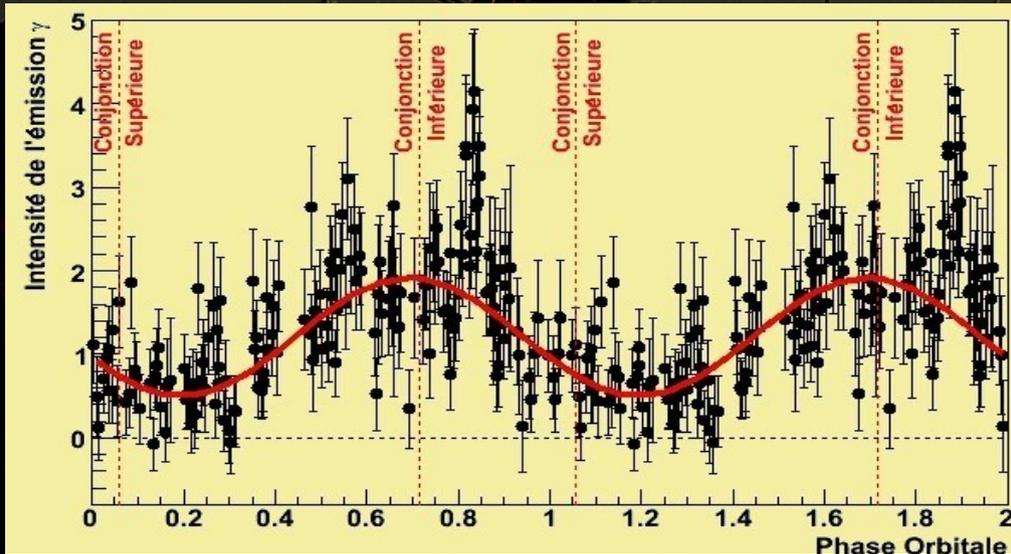


- ❑ Émission modulée à la période de 3.9 jours, modulation assez compliquée
- ❑ Première source périodique au TeV



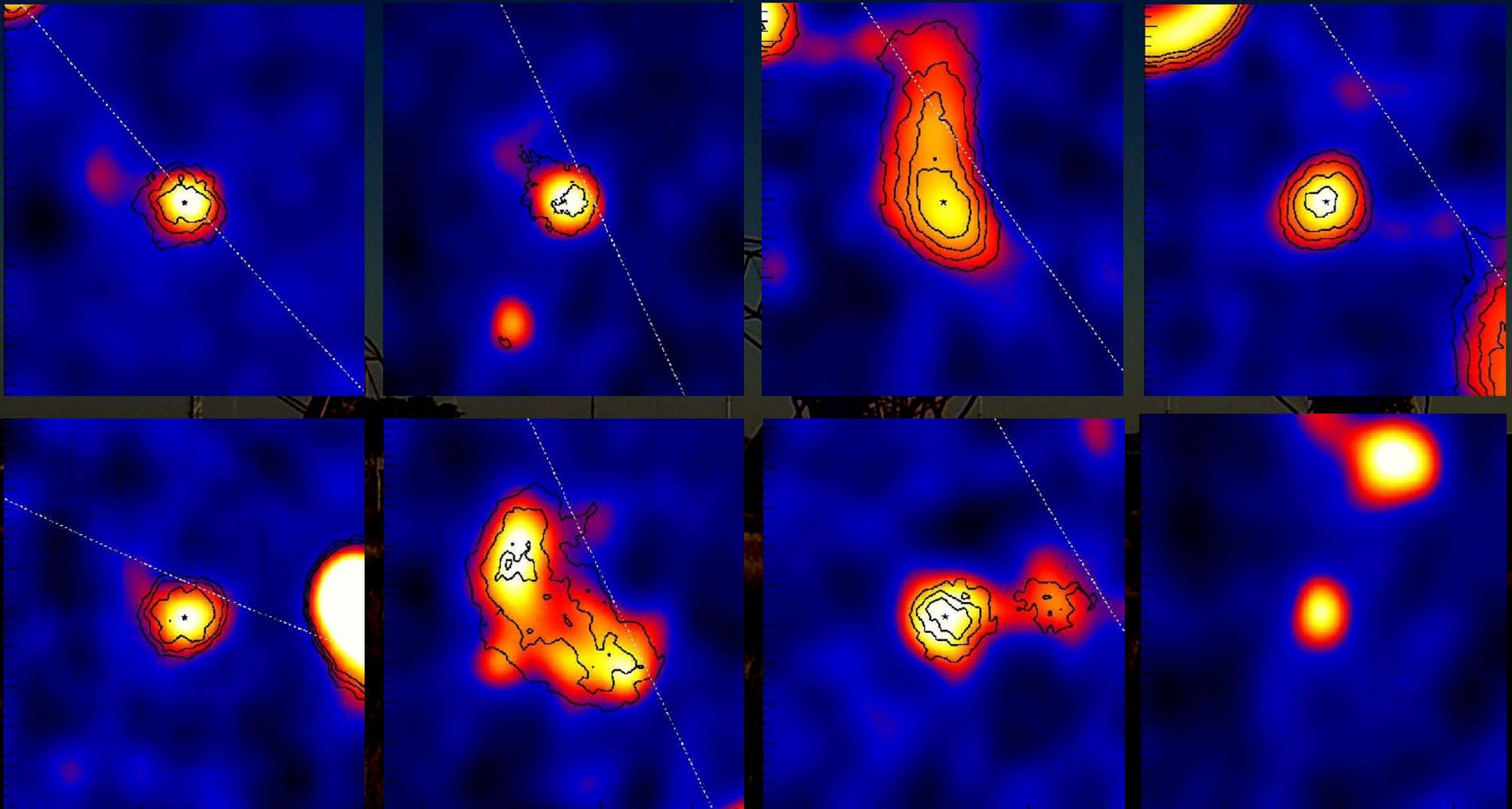
La lumière est opaque à la lumière !

- ❑ Les photons γ sont absorbés par création de paire sur les photons de l'étoile ($\gamma + h\nu \rightarrow e^+ + e^-$)
- ❑ Absorption modulée par la géométrie (maximale pour une collision frontale)
- ❑ Mise en évidence de l'absorption de la lumière par la lumière



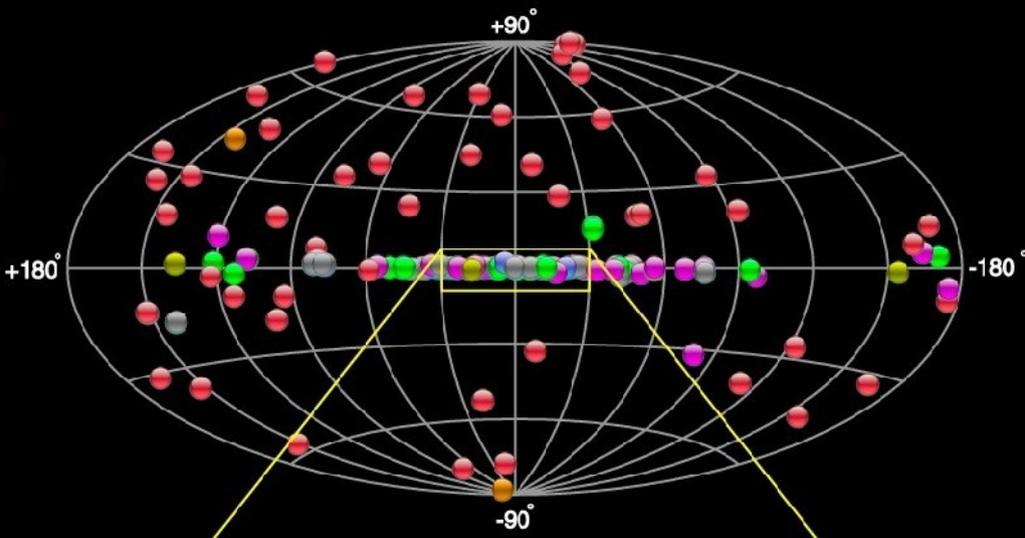
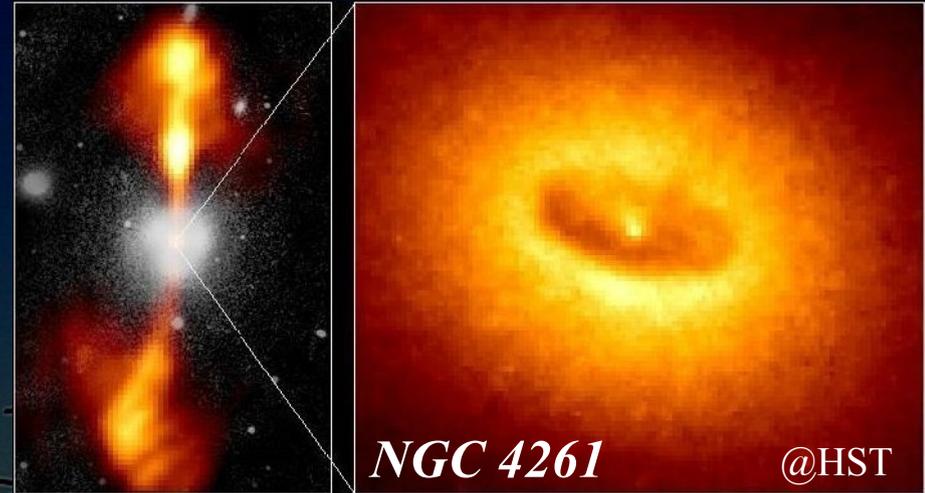
Accélérateurs sombres – Sans contreparties

- ❑ Les vraies sources de rayons cosmiques?
- ❑ Ou des nébuleuses âgées, éteintes aux autres longueurs d'onde?



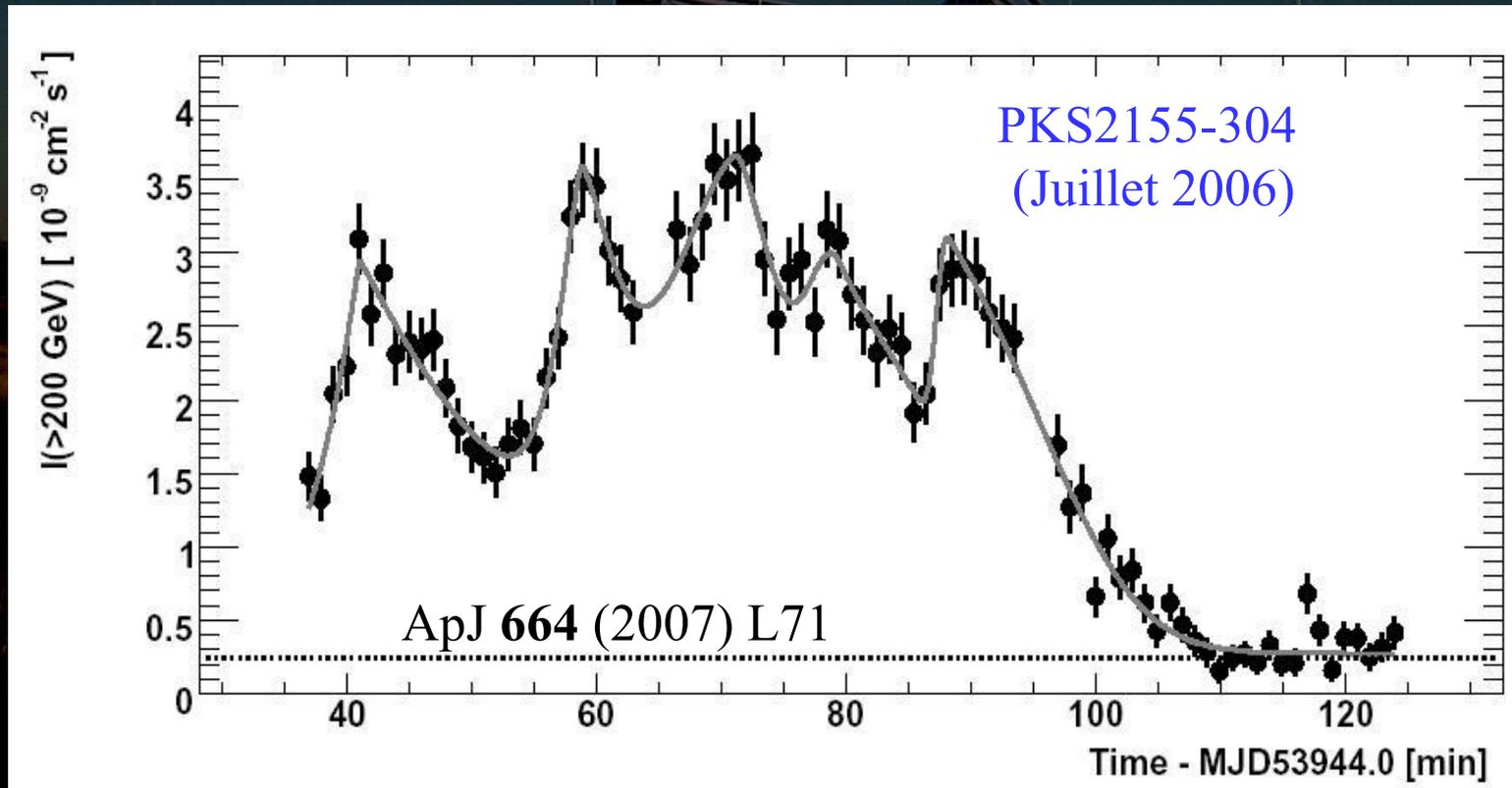
Noyaux Actifs de Galaxie

- ❑ Trou noir supermassif (10^6 - $10^9 M_{\odot}$) entouré par un disque d'accrétion
- ❑ Jets ultra-relativistes (taille \sim Mpc)
- ❑ Blazars: jets pointant vers la terre: émission décalée en énergie et amplifiée, visibles de très loin



Les Blazars au TeV

- Émission au TeV très variable, échelles de temps très courtes (~ 1 mn): taille de la région très petite, (100 fois plus que l'horizon du trou noir)
- Permettent de sonder la vitesse de la lumière et de tester la transparence de l'Univers à grande distance

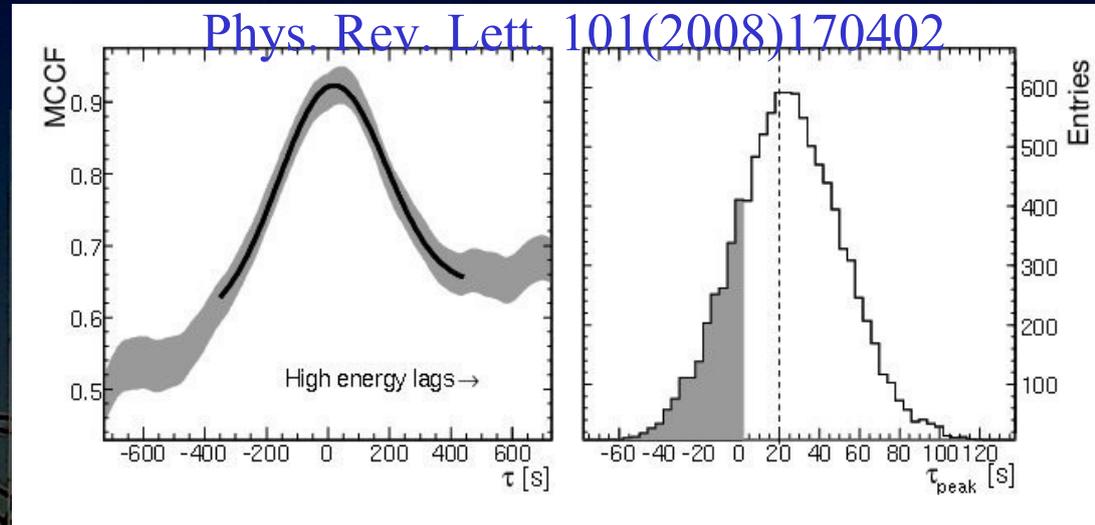


Tests de l'invariance de Lorentz

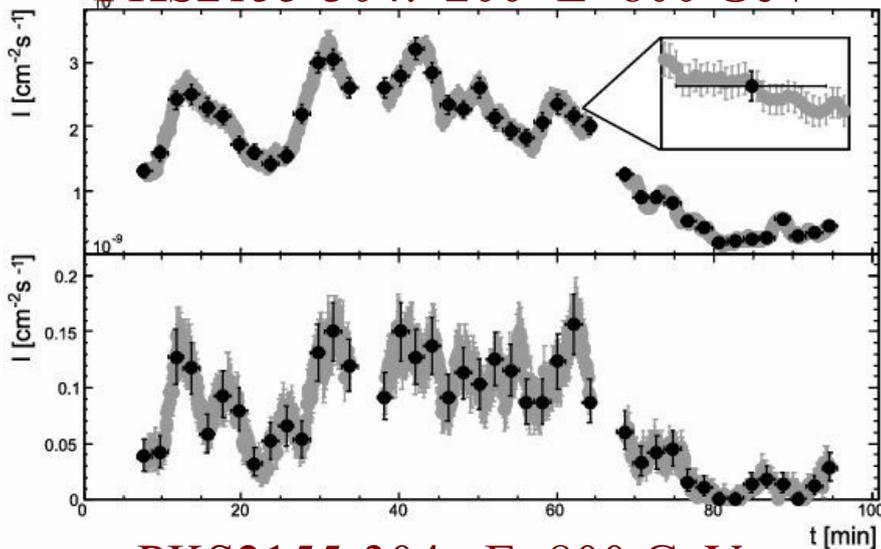
- Distances cosmologiques et variabilité permettent de tester la constance de « c »
- Recherche d'écart temporel entre différentes gammes d'énergie
- Limite: 73 s TeV^{-1} (95% CL)
- Limite inférieure sur l'échelle de la Gravité Quantique

PKS2155-304: cross-correlation function vs. time lag

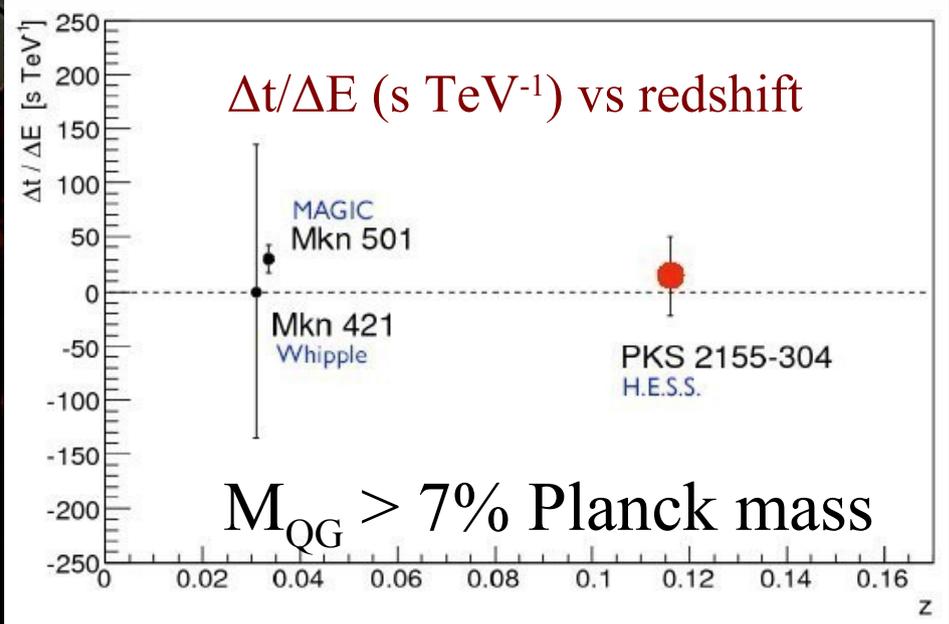
Phys. Rev. Lett. 101(2008)170402



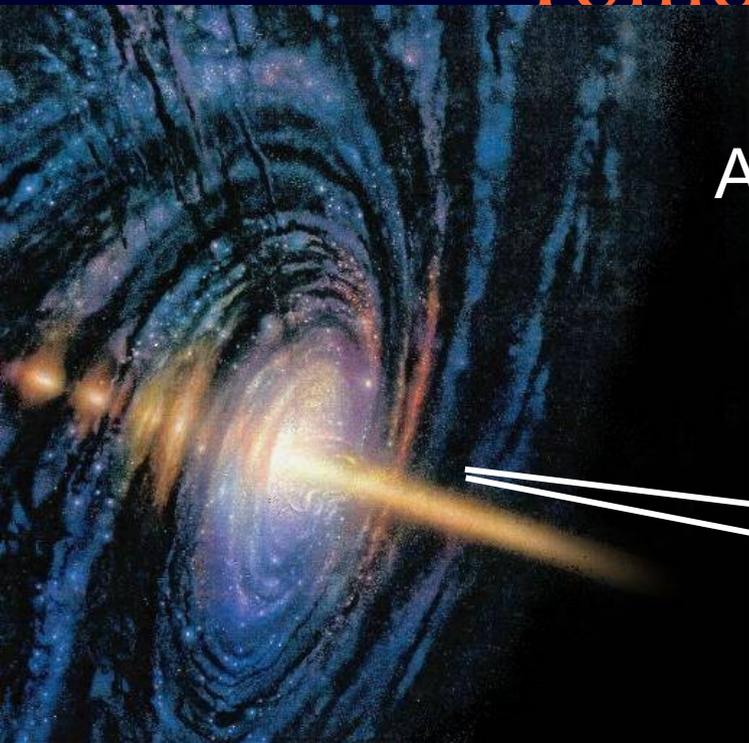
PKS2155-304: $200 < E < 800 \text{ GeV}$



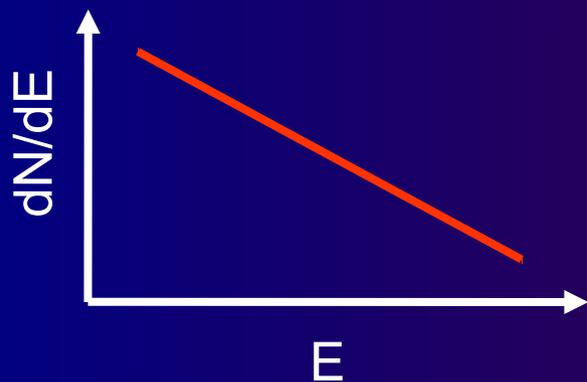
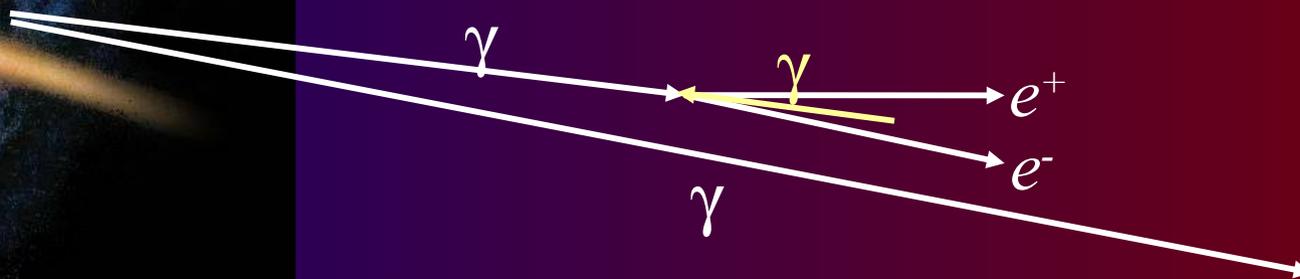
PKS2155-304: $E > 800 \text{ GeV}$



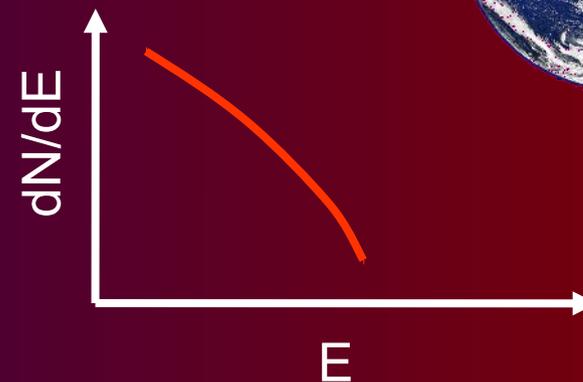
Tomographie de l'Univers



Absorption des γ par création de paire
sur le fond galactique infra-rouge



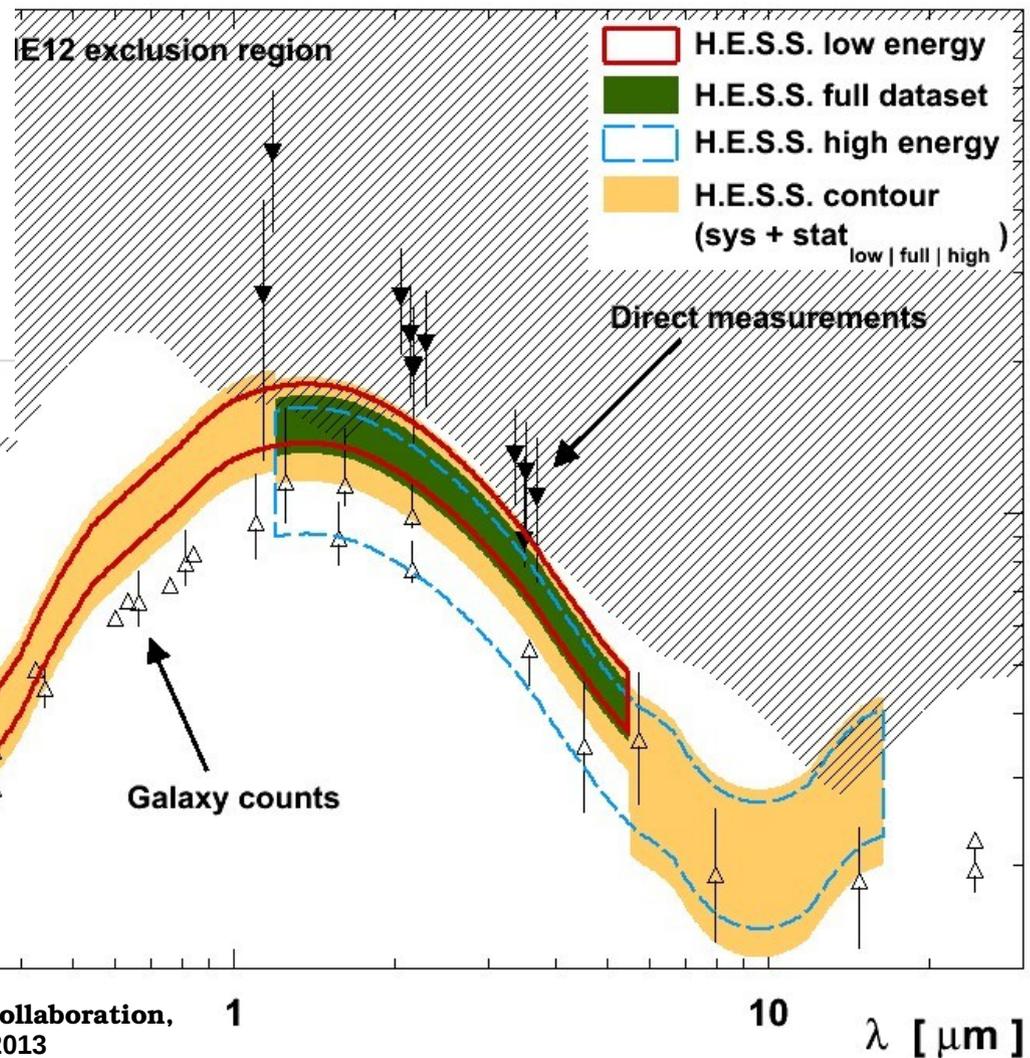
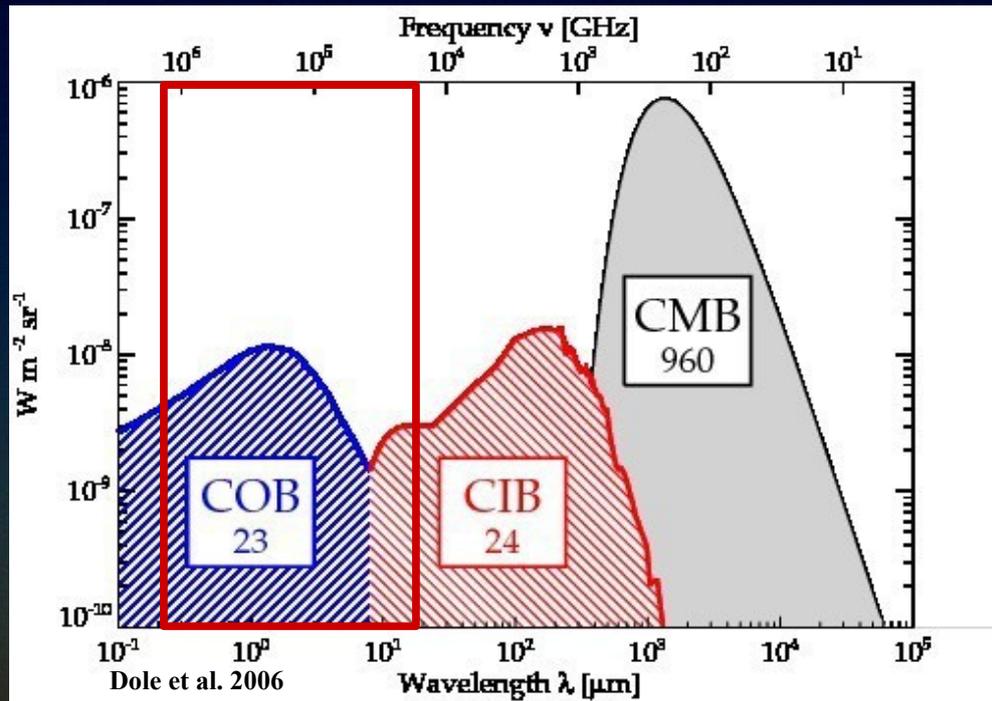
Physique des objets compacts,
accélération/absorption/jets,...



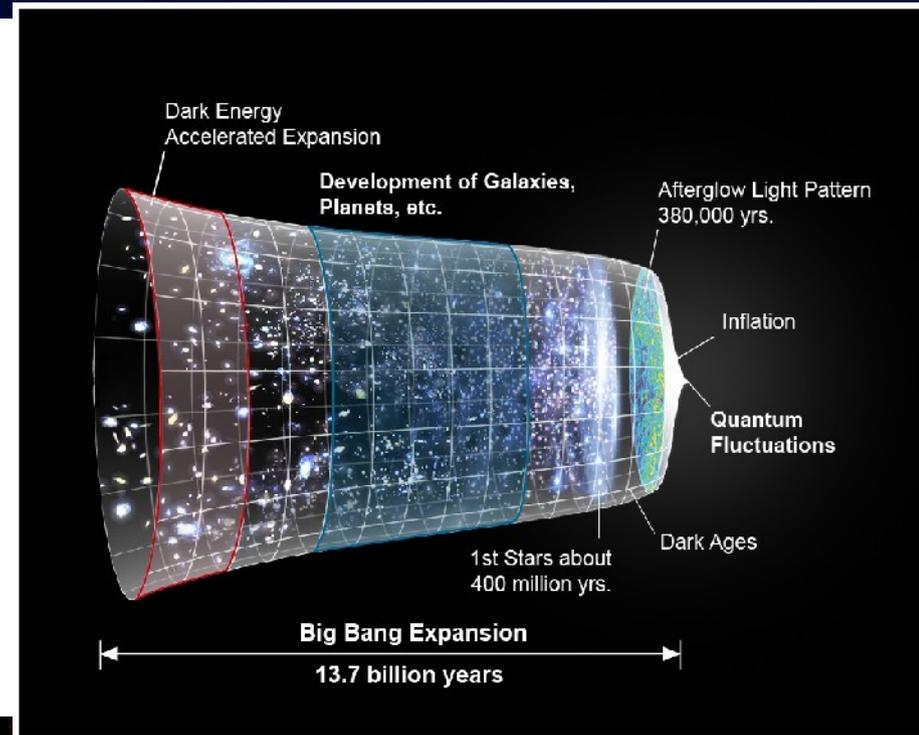
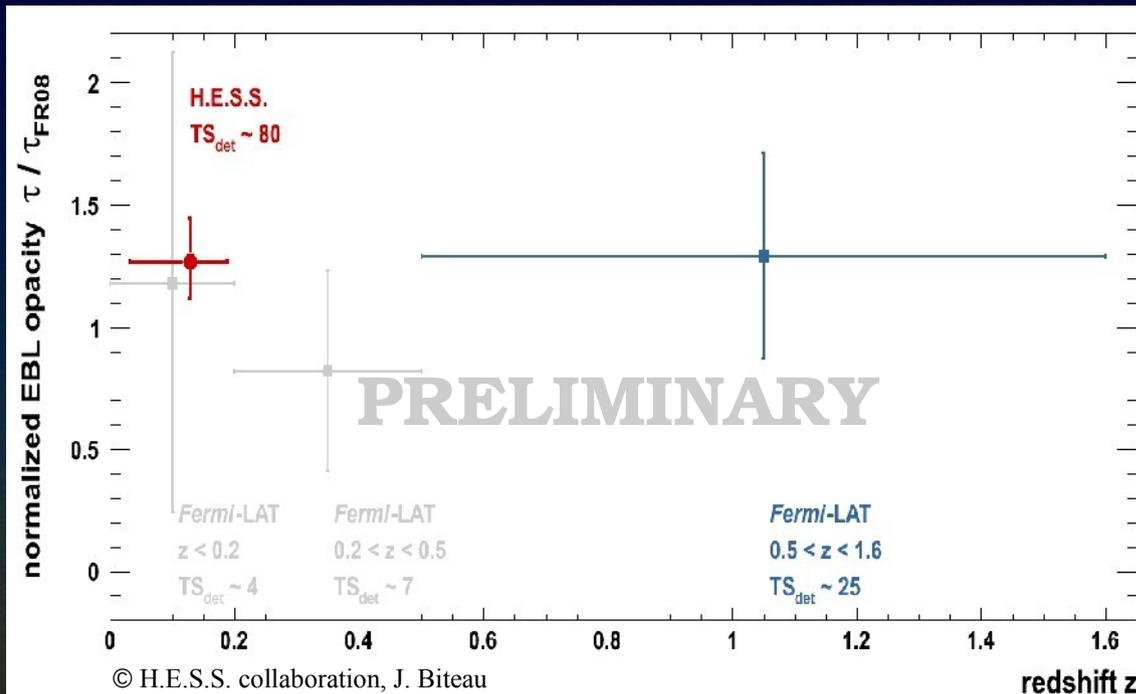
Mesure du fond infrarouge
(\rightarrow Cosmologie)

Mesure du fond EBL

- HESS couvre le fond optique cosmique (étoiles et galaxies)
- C'est le deuxième fond après le CMB

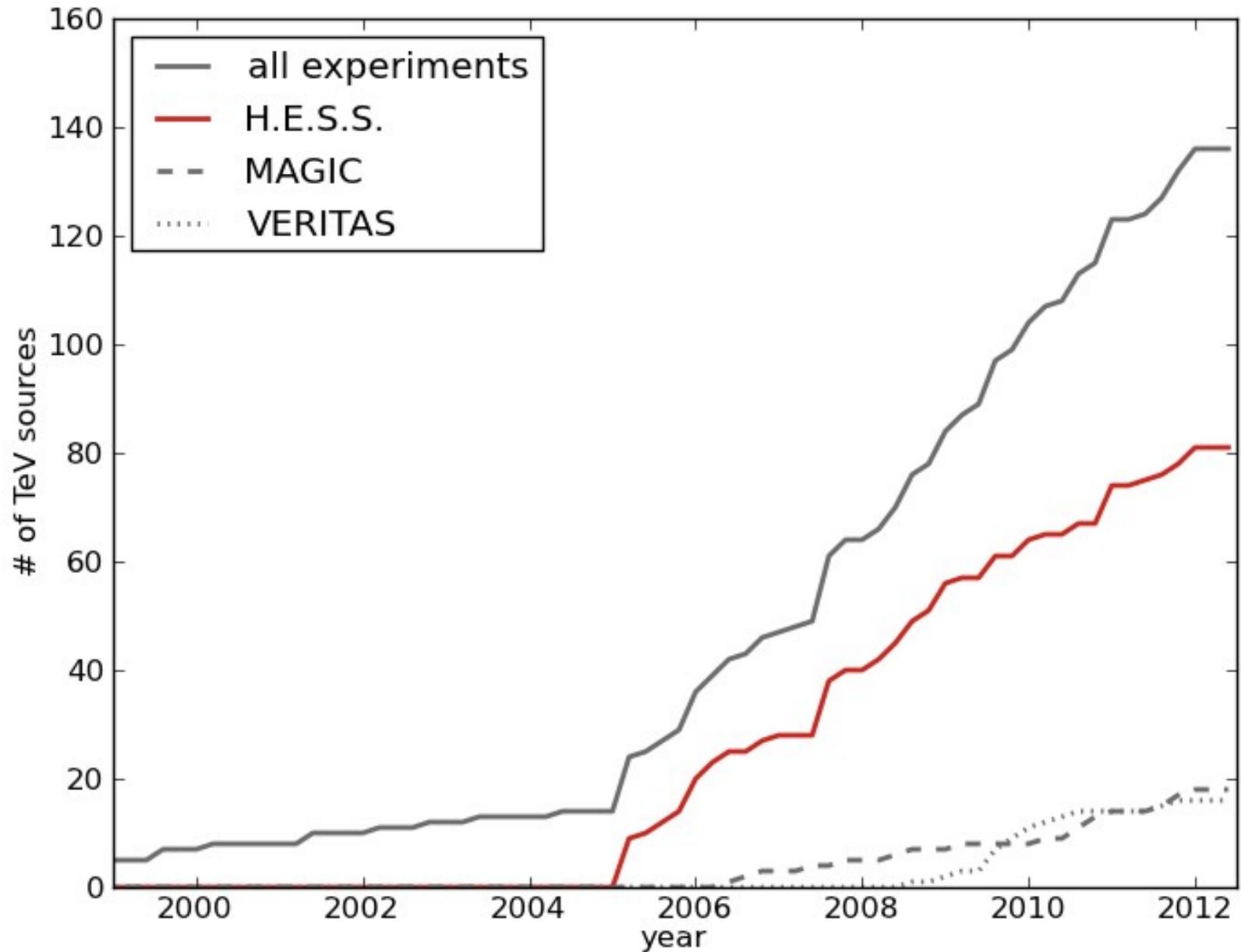


Un exemple de complémentarité



- HESS (> 100 GeV) couvre la region $z < 0.2$ (5 Gyr)
- Fermi couvre $0,5 < z < 1,5$ (4 – Gyr après le bib bang)

Une belle success-story



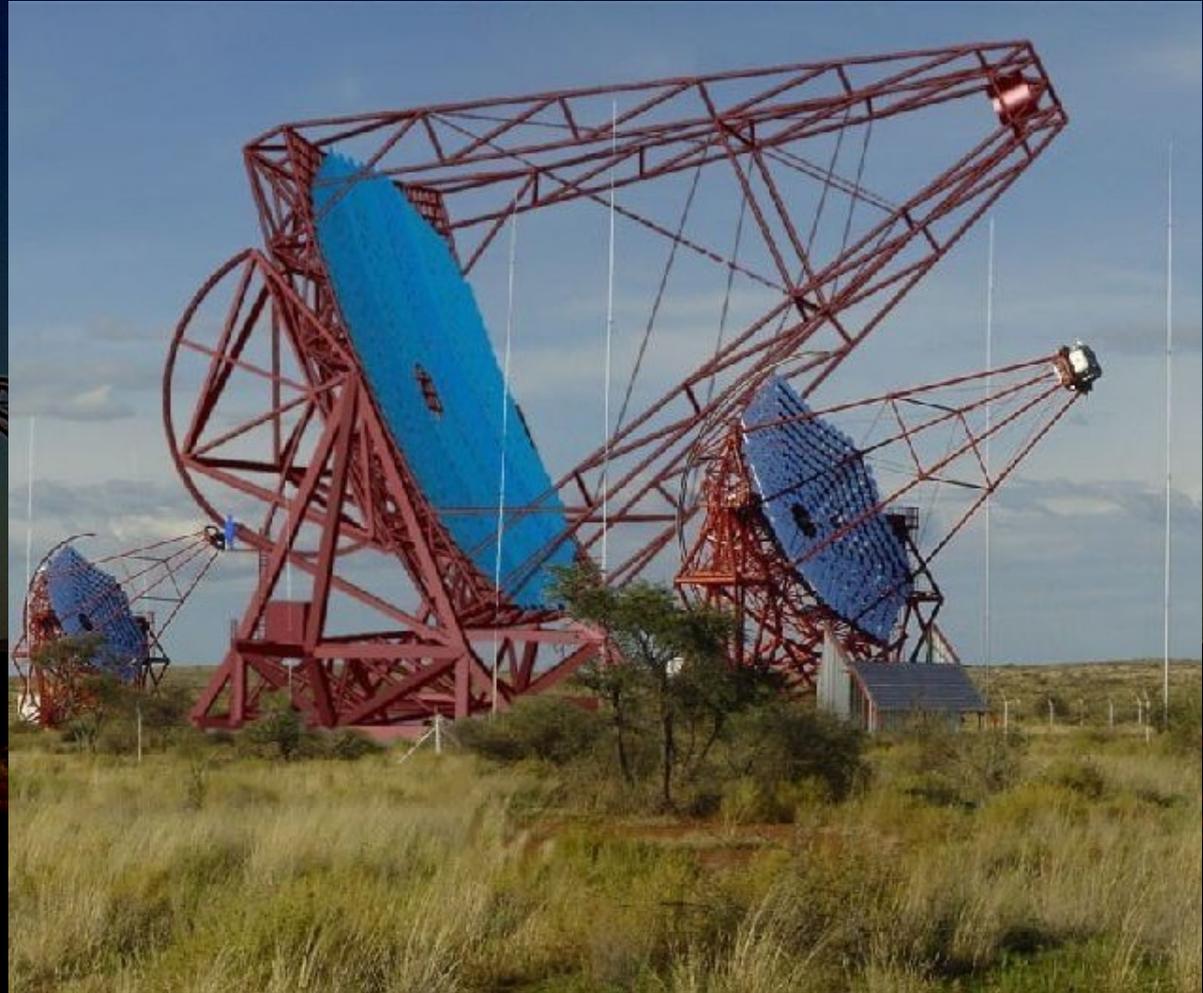


HESS-II

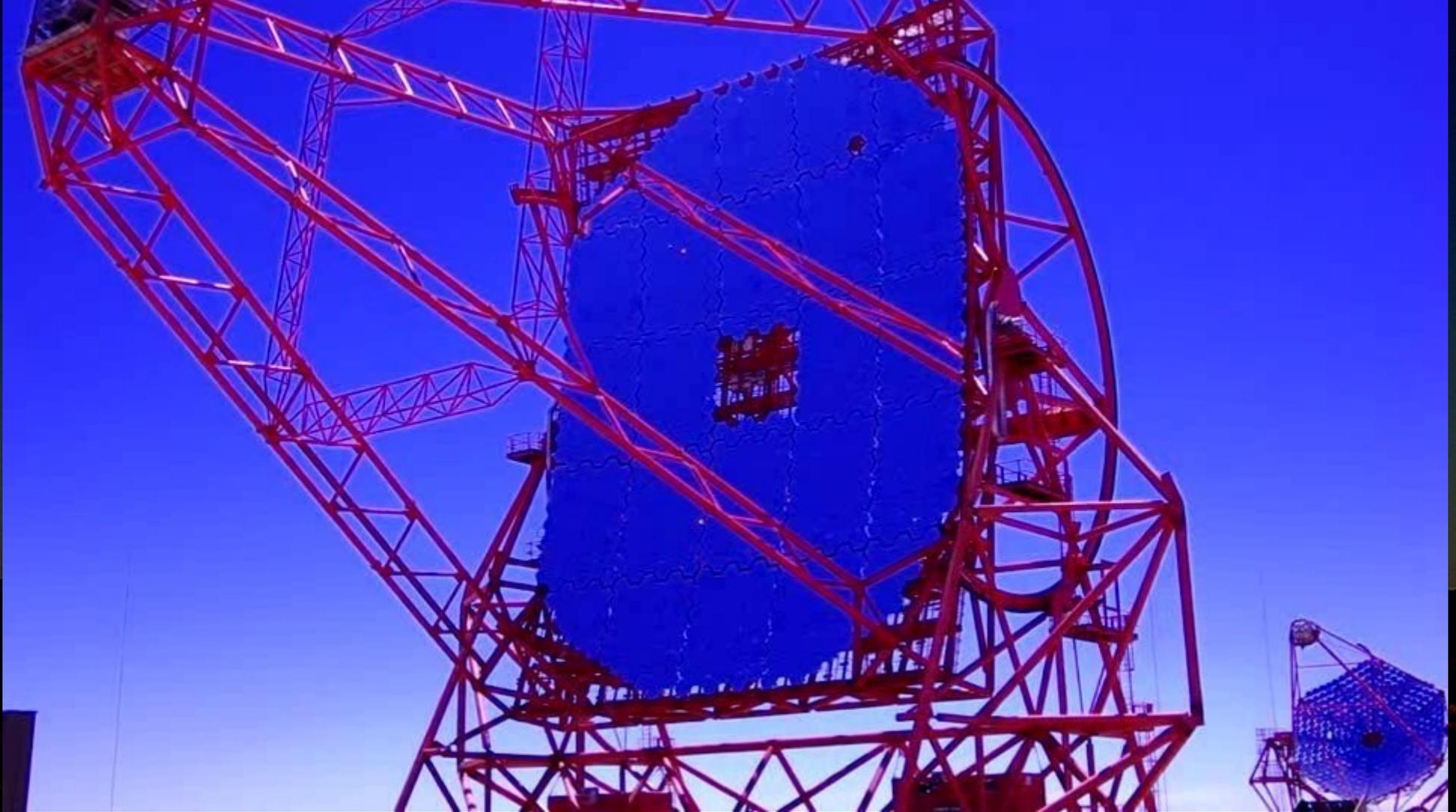
Un nouveau géant

H.E.S.S. II

- Un nouveau télescope géant au centre du réseau
 - Pour abaisser le domaine en énergie de 100 GeV à environ 20 GeV
 - améliorer la précision
 - et augmenter les synergies avec les autres instruments (satellites)
 - réagir aux événements transitoires (sursauts gamma,....)
- Mis en service en septembre 2012



Le télescope

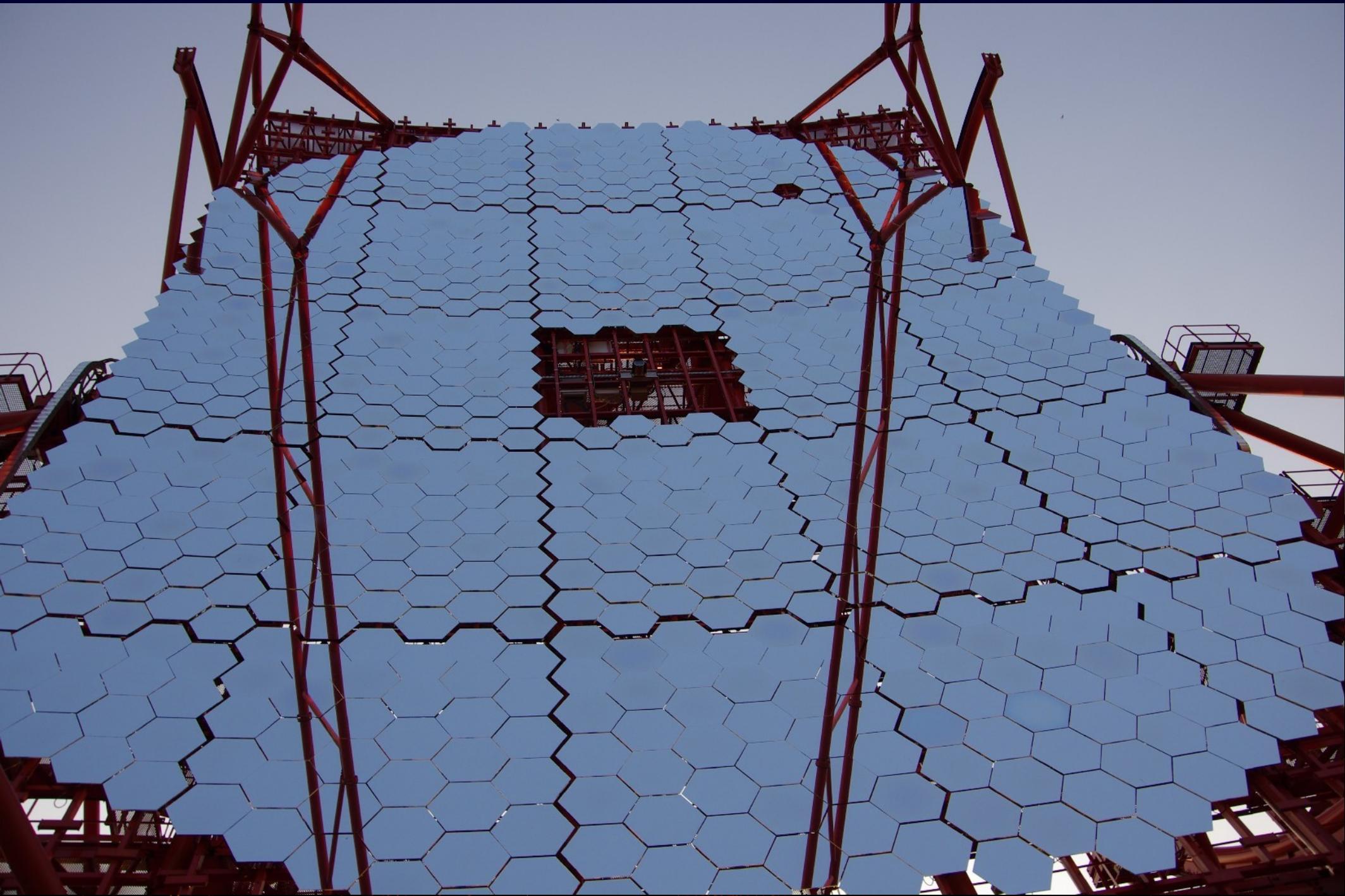


Le plus grand réflecteur optique au monde (600 m²)

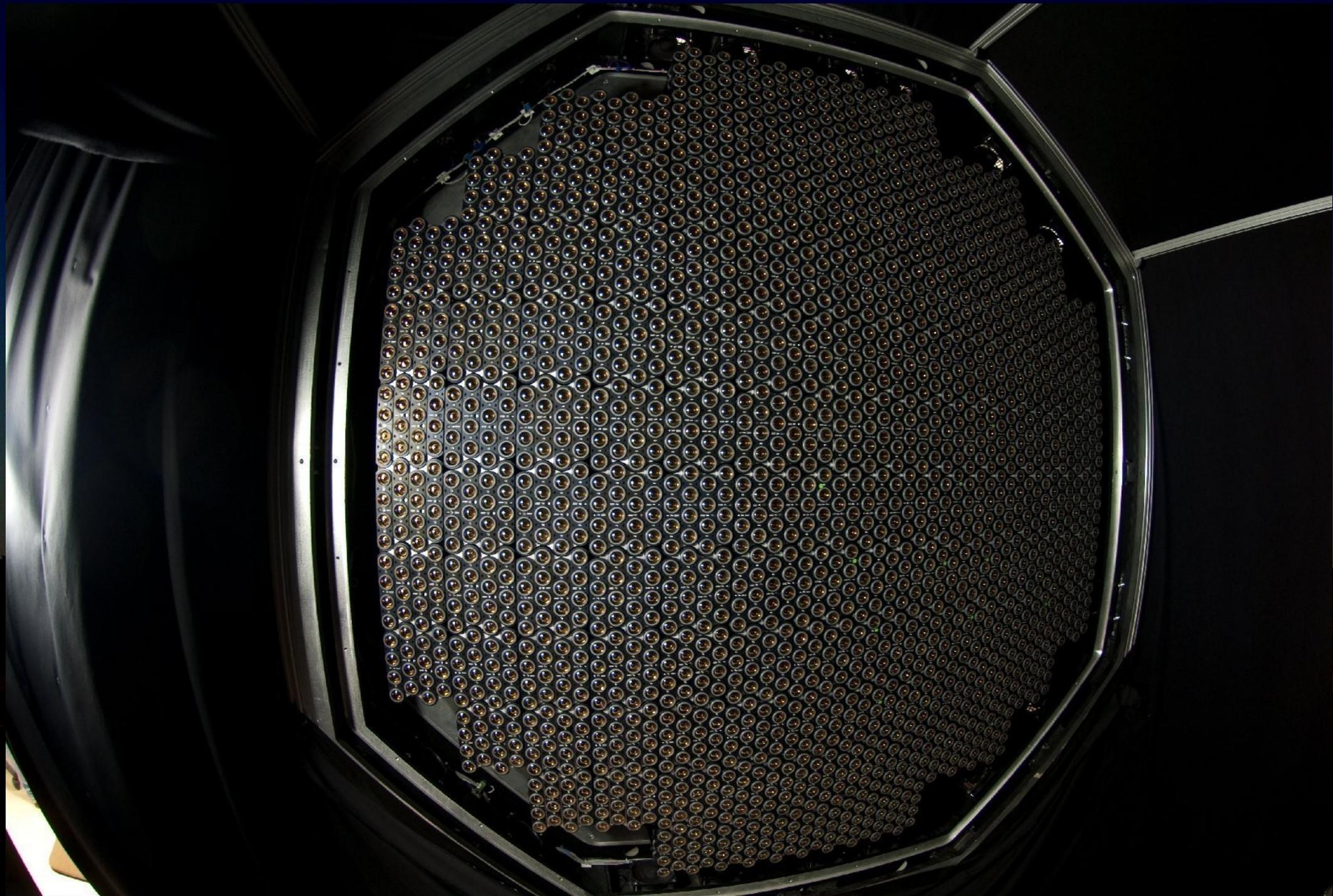
Structure porte-miroirs



Le miroir









L'inauguration – 27/09/2012

Cliché : C. Foehr
H.E.S.S. Collab.



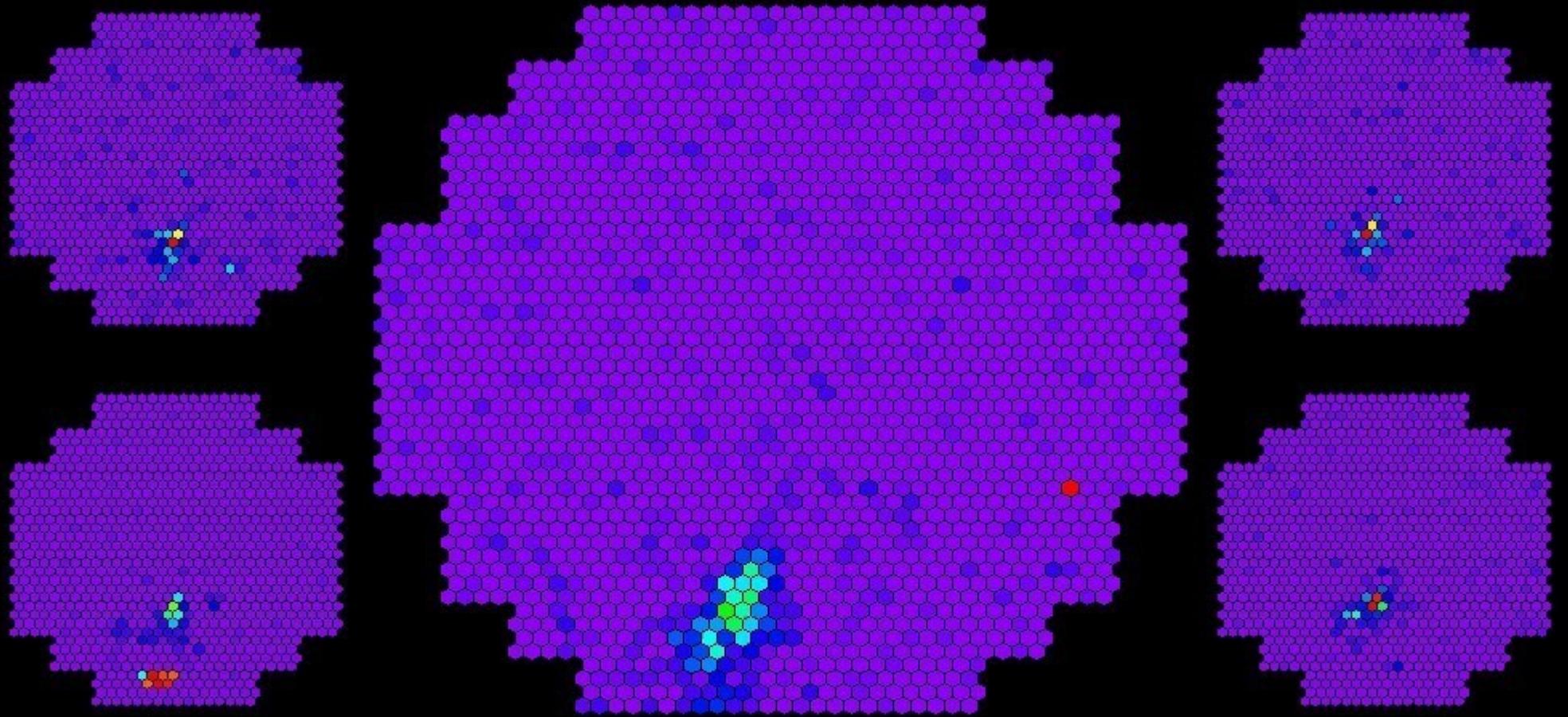
Journée portes ouverte

Cliché : C. Foehr
H.E.S.S. Collab.

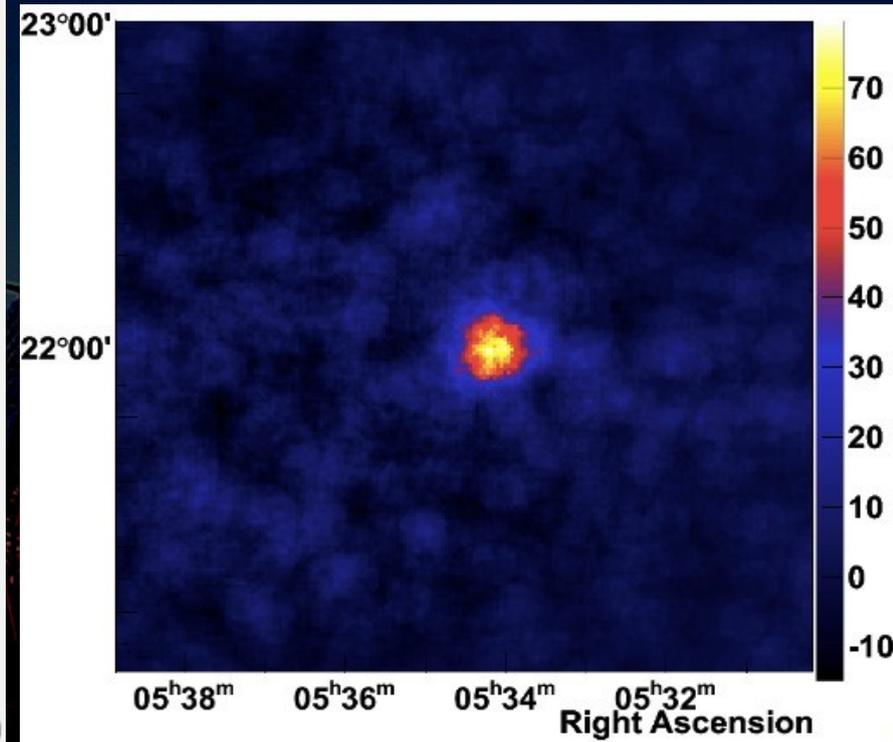
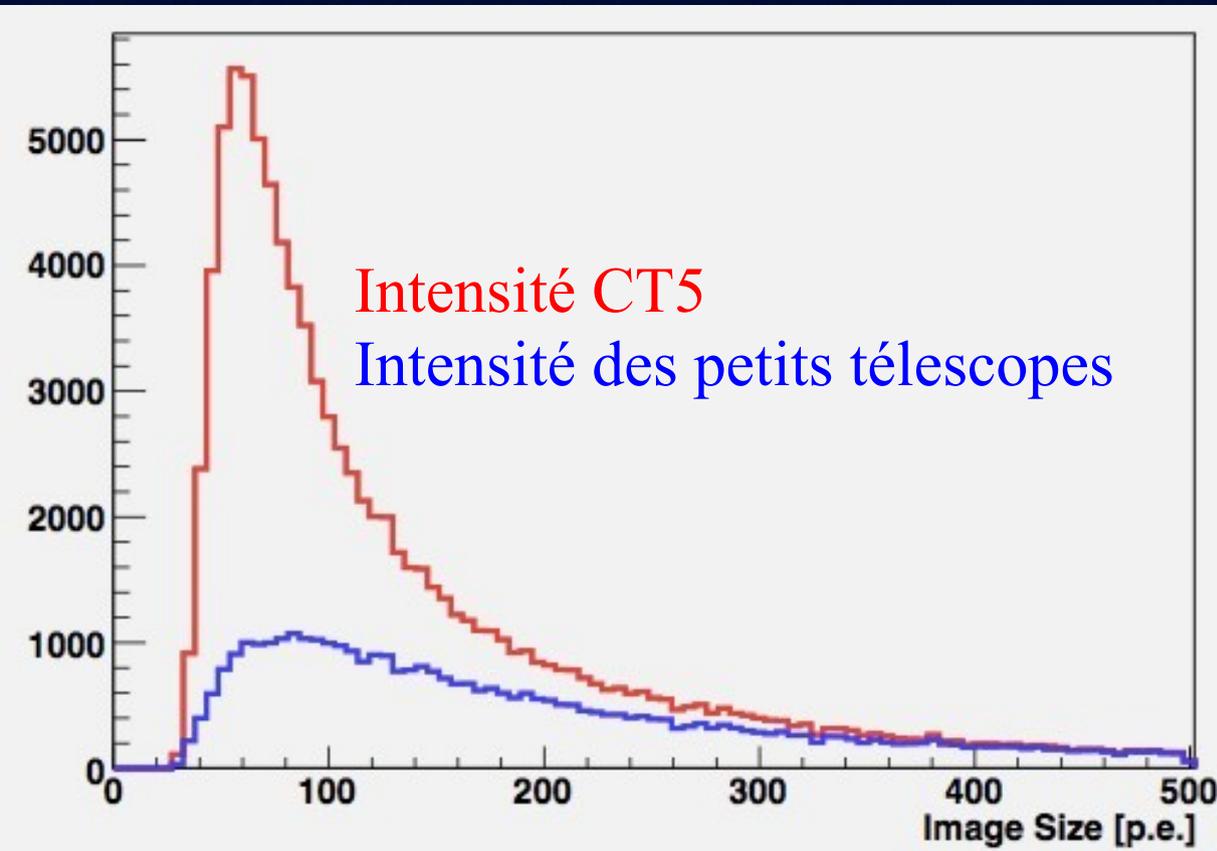




Les premiers événements



les premiers résultats – La nébuleuse du Crabe



Une page de pub



Merci



Backup

