


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

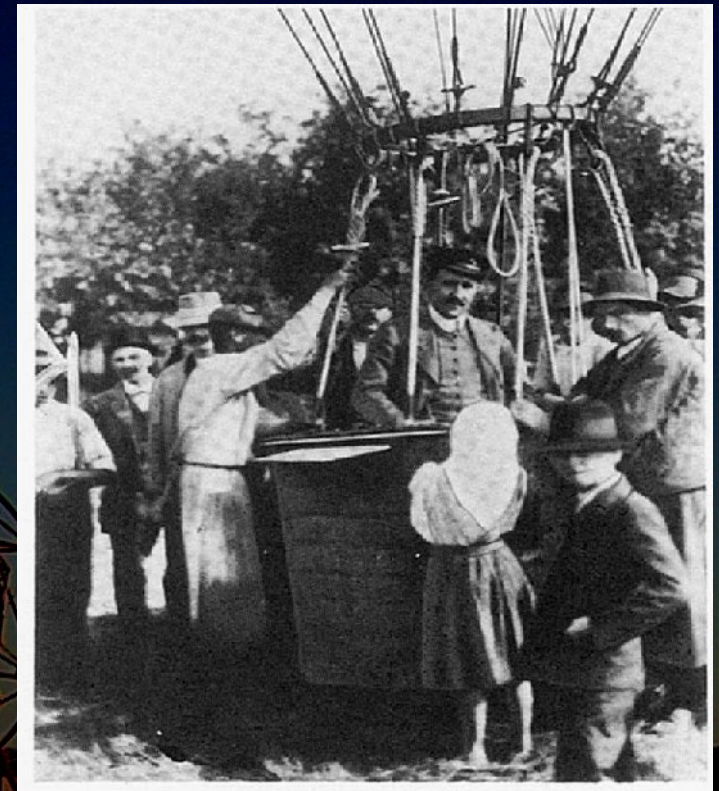
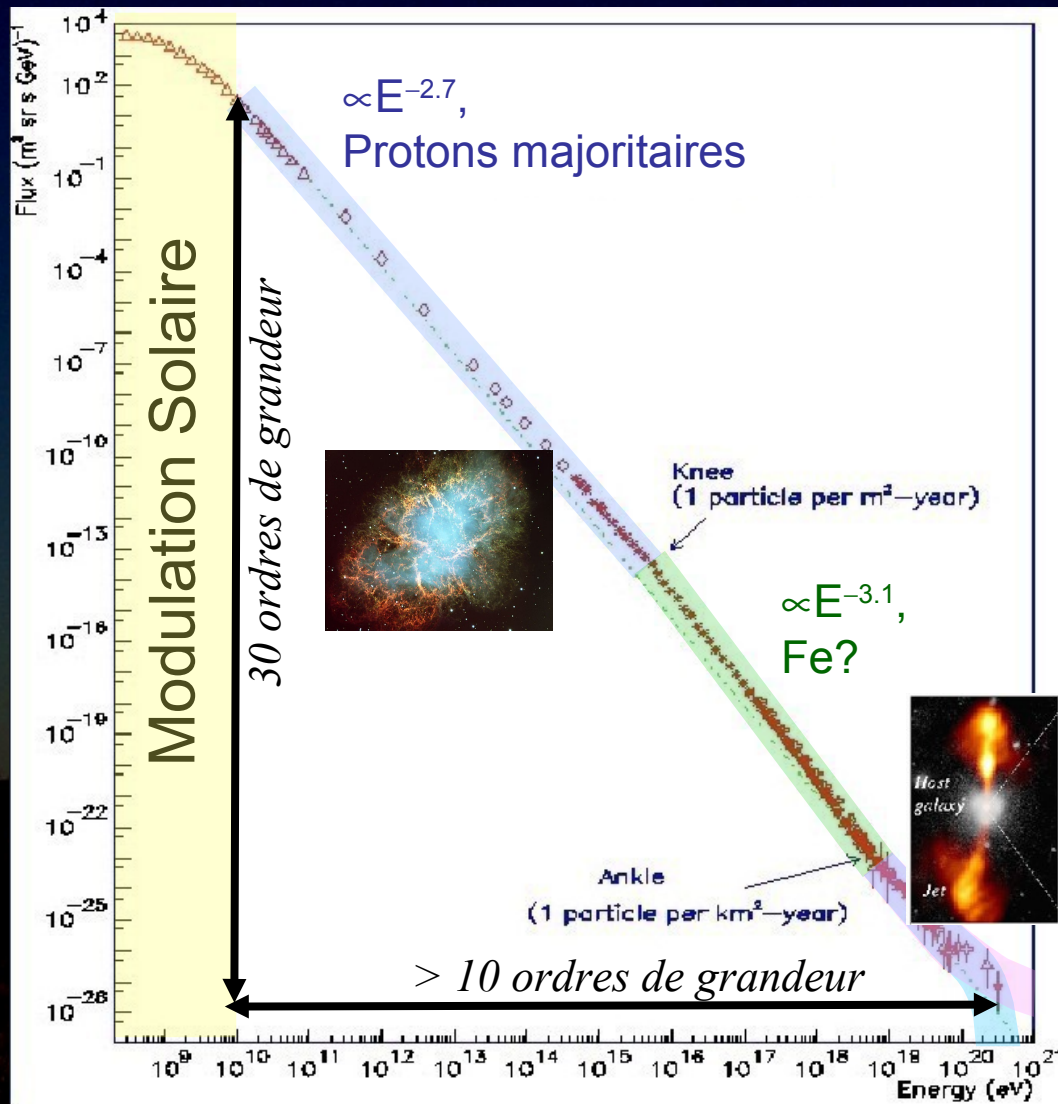
Mathieu de Naurois
LLR IN2P3-CNRS-Ecole Polytechnique
denauroi@in2p3.fr

- 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

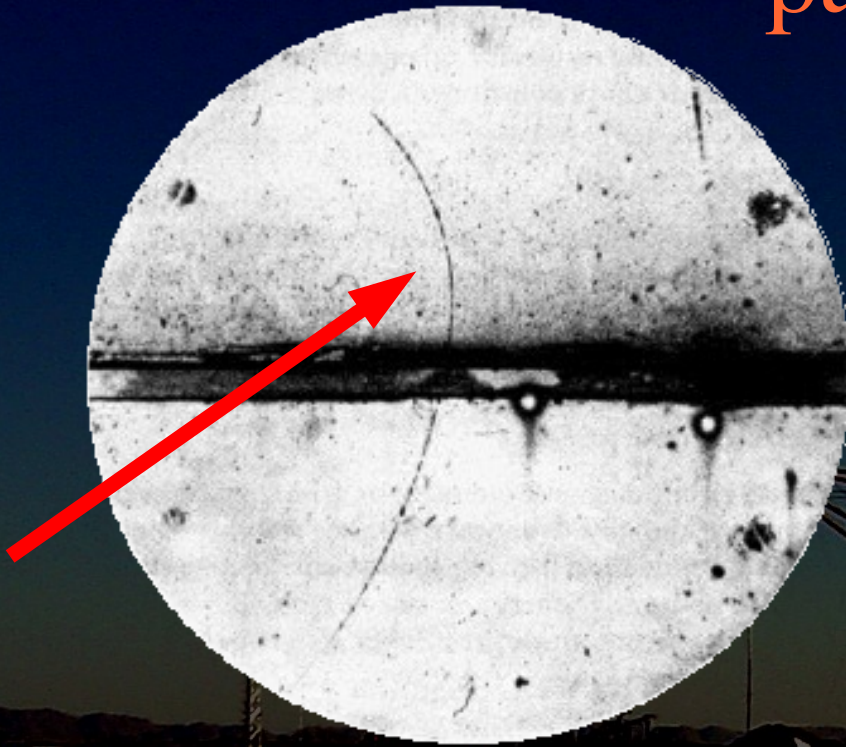
Le mystère des rayons cosmiques



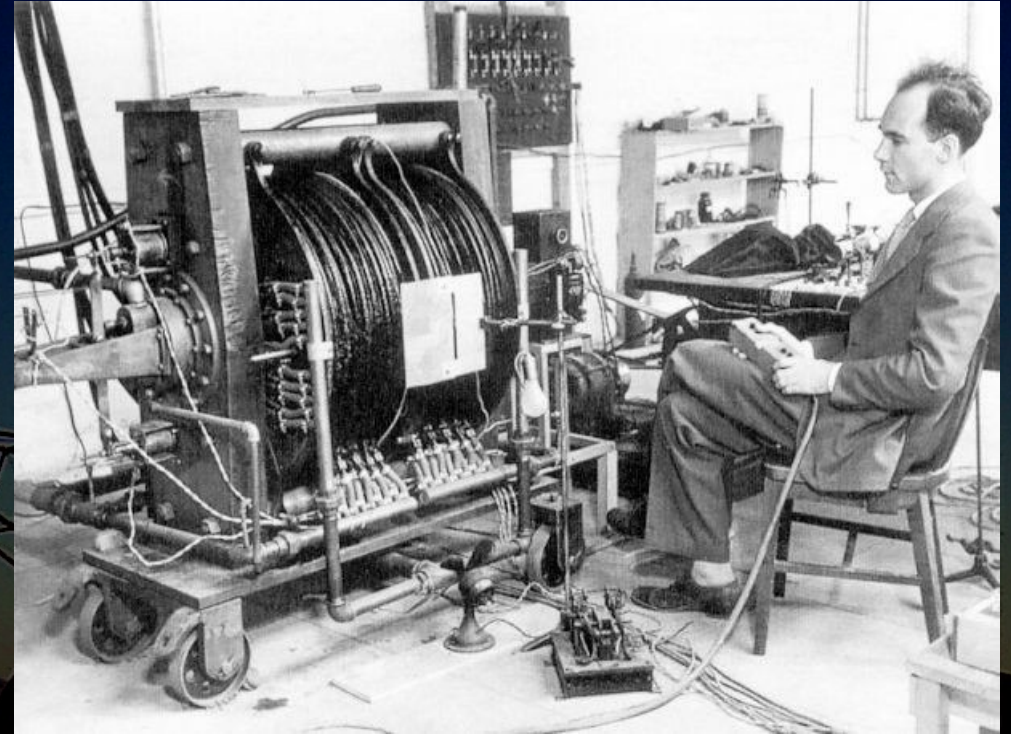
Découverte
Vol en Ballon
Victor Hess, 1912

- ❑ 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

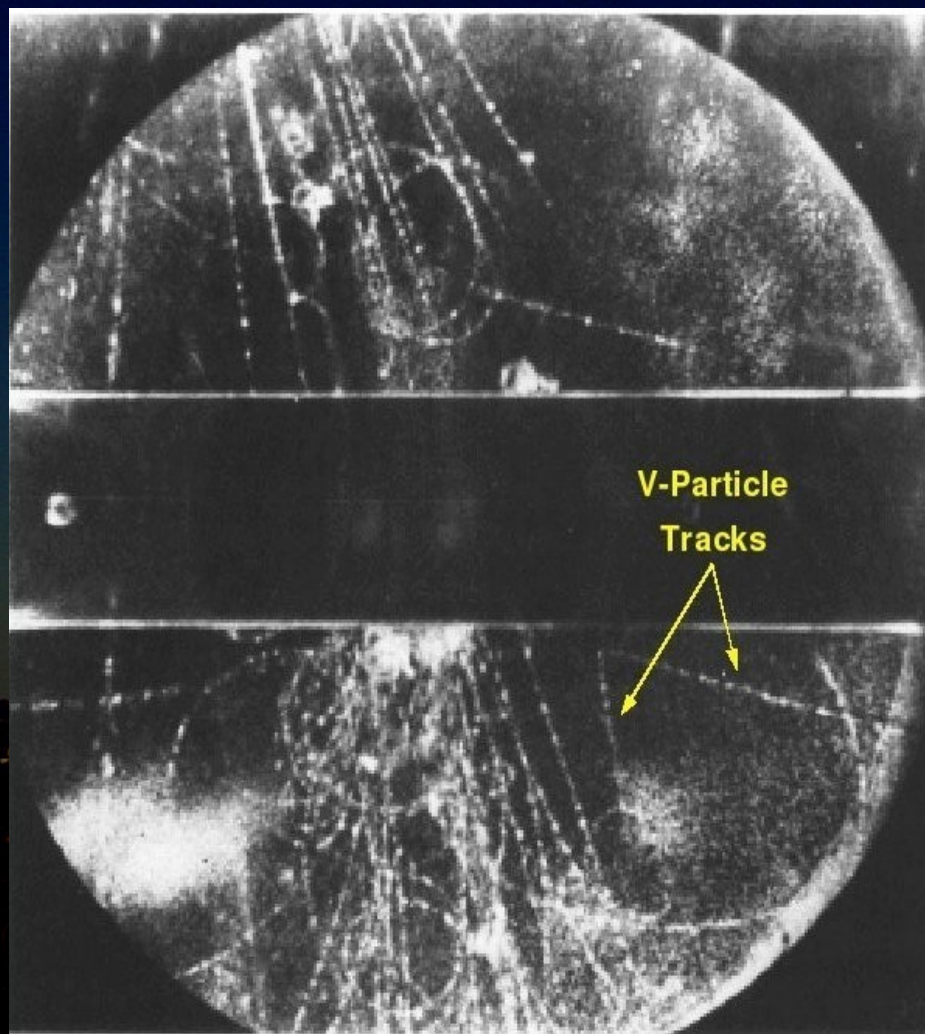


Premier positron
Anderson, Phys. Rev. (1933)

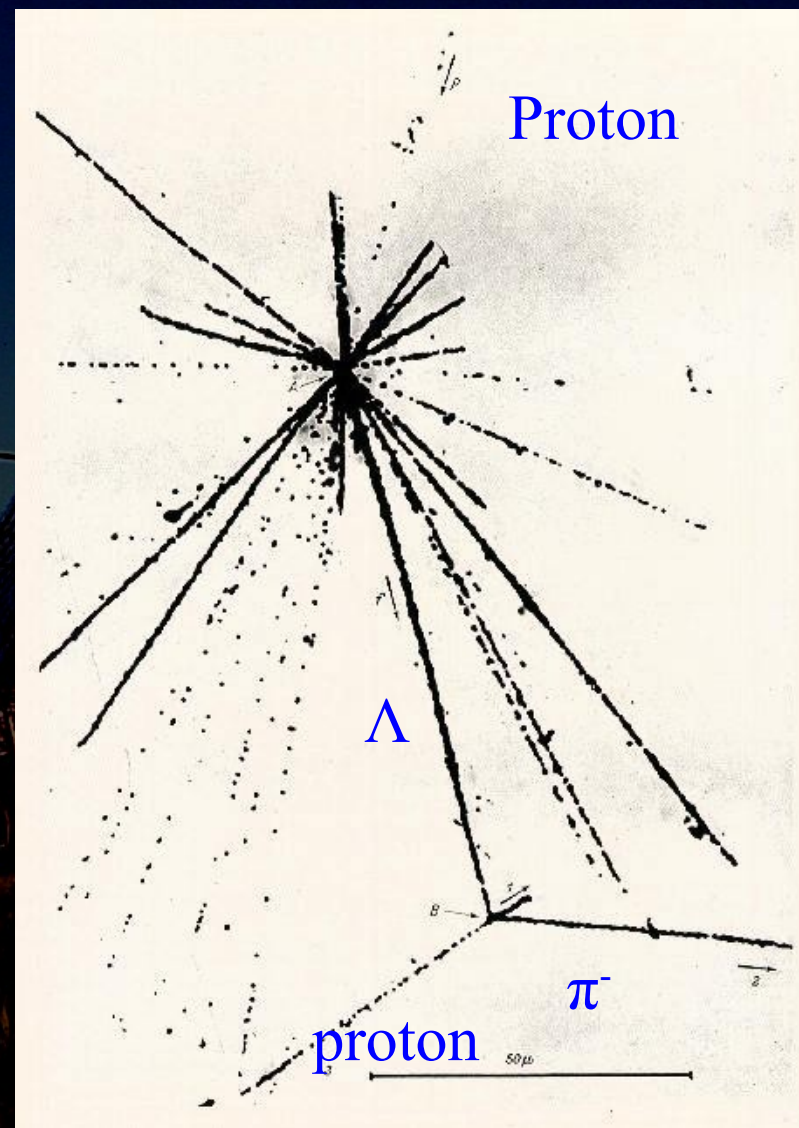


- 1933: Découverte du positron (e^+) dans es rayons cosmiques
- Découverte suivie de nombreuses autres :
 μ^\pm (1936), π^\pm (1947), particules étranges (1947), ...

Et d'autres...



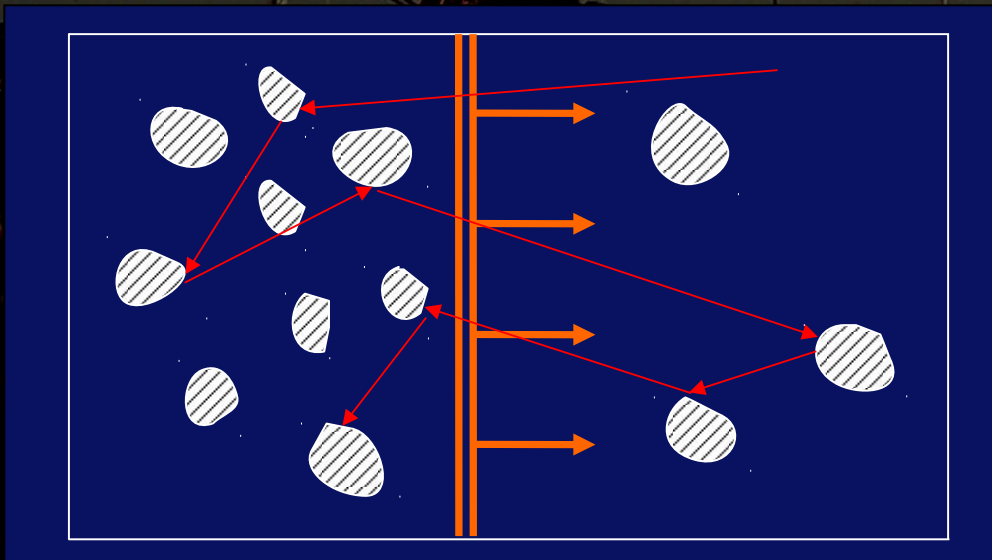
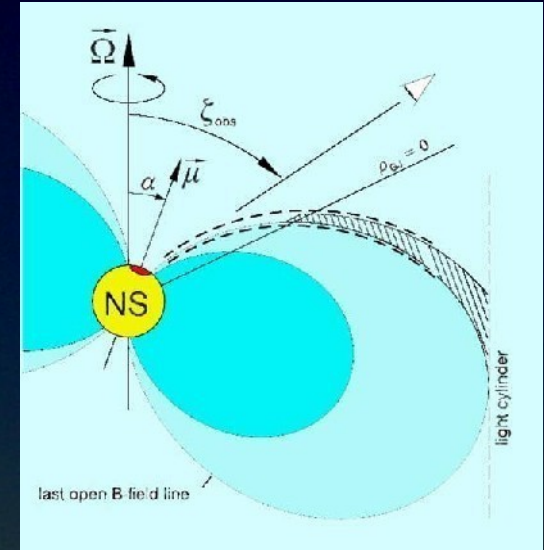
Kaon neutre ($\bar{d}s/s\bar{d}$)
(Rochester et Butler, 1947)



Λ (uds)
(Danysz et Pniewski, 1953)

Comment accélérer des particules?

- Champs électriques intenses: pulsars (Etoiles à neutron magnétisés 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

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

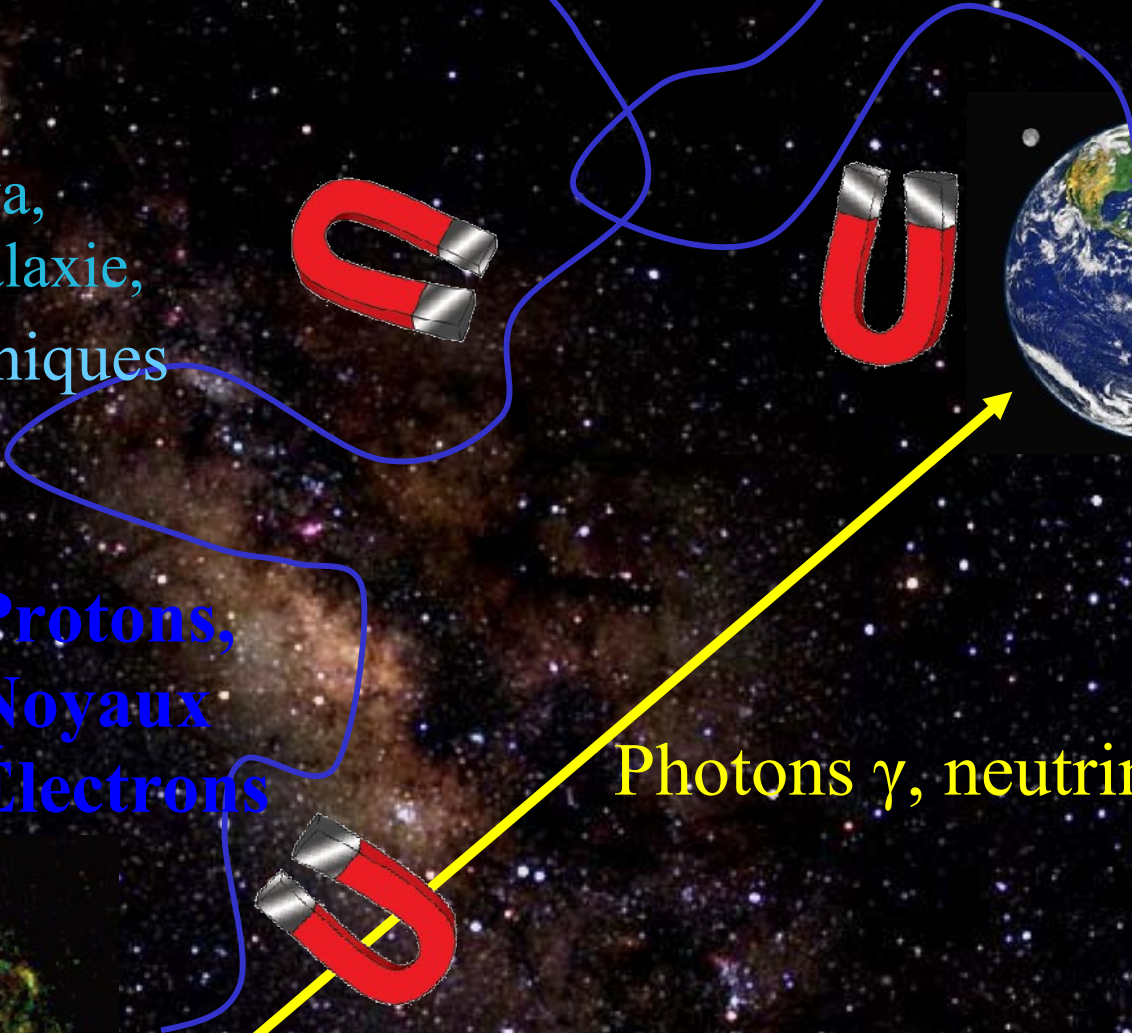
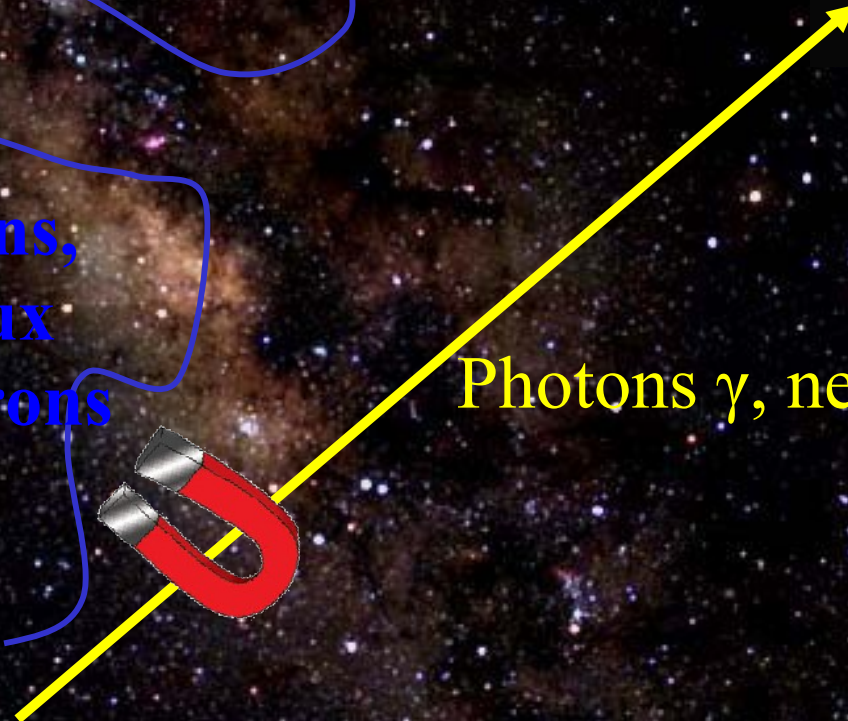
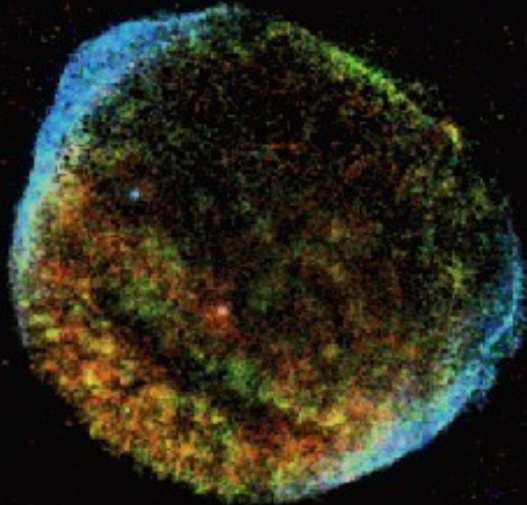
E

Comment lever le voile ?

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

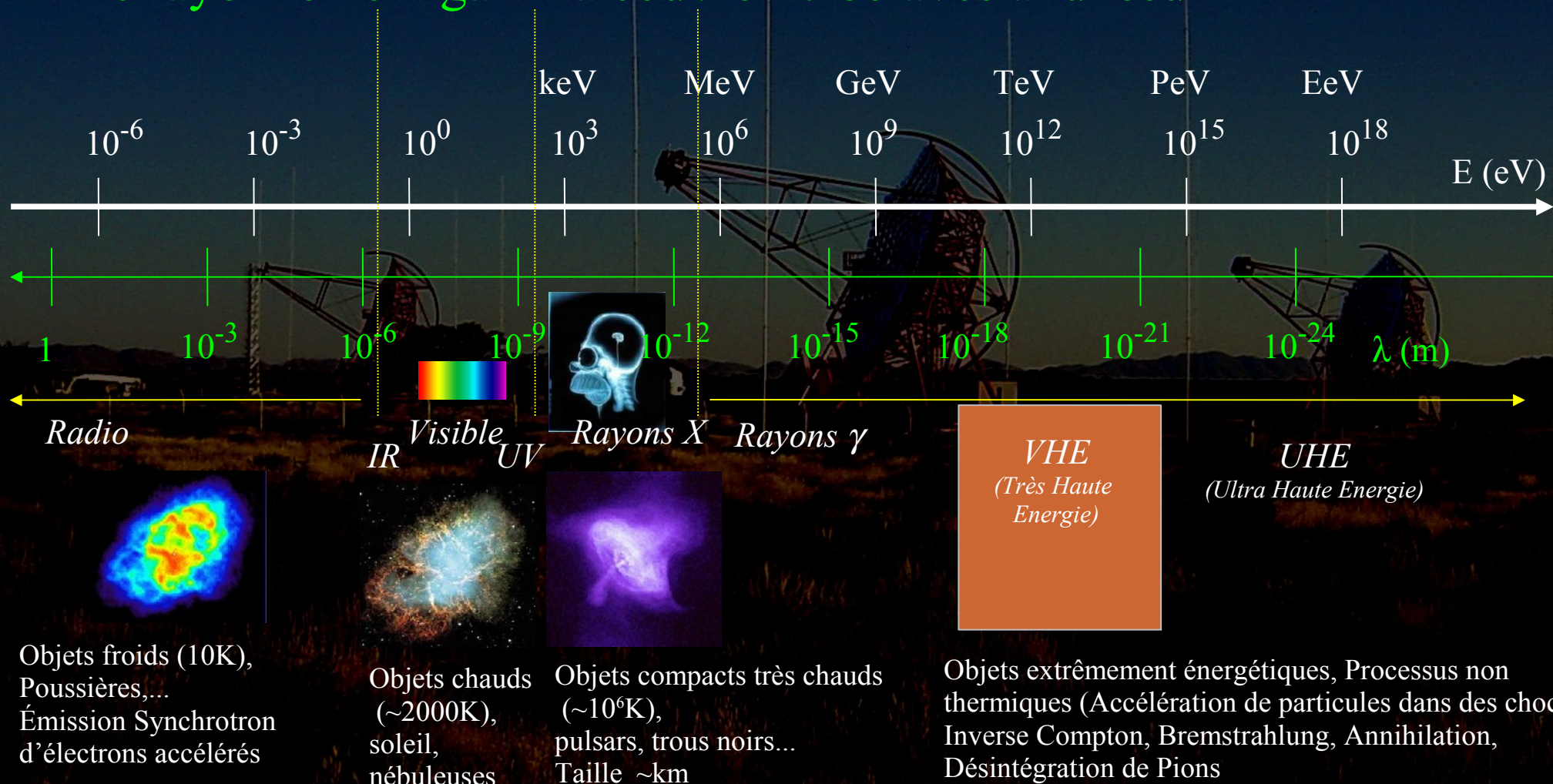
**Protons,
Noyaux
Électrons**

Photons γ , neutrinos

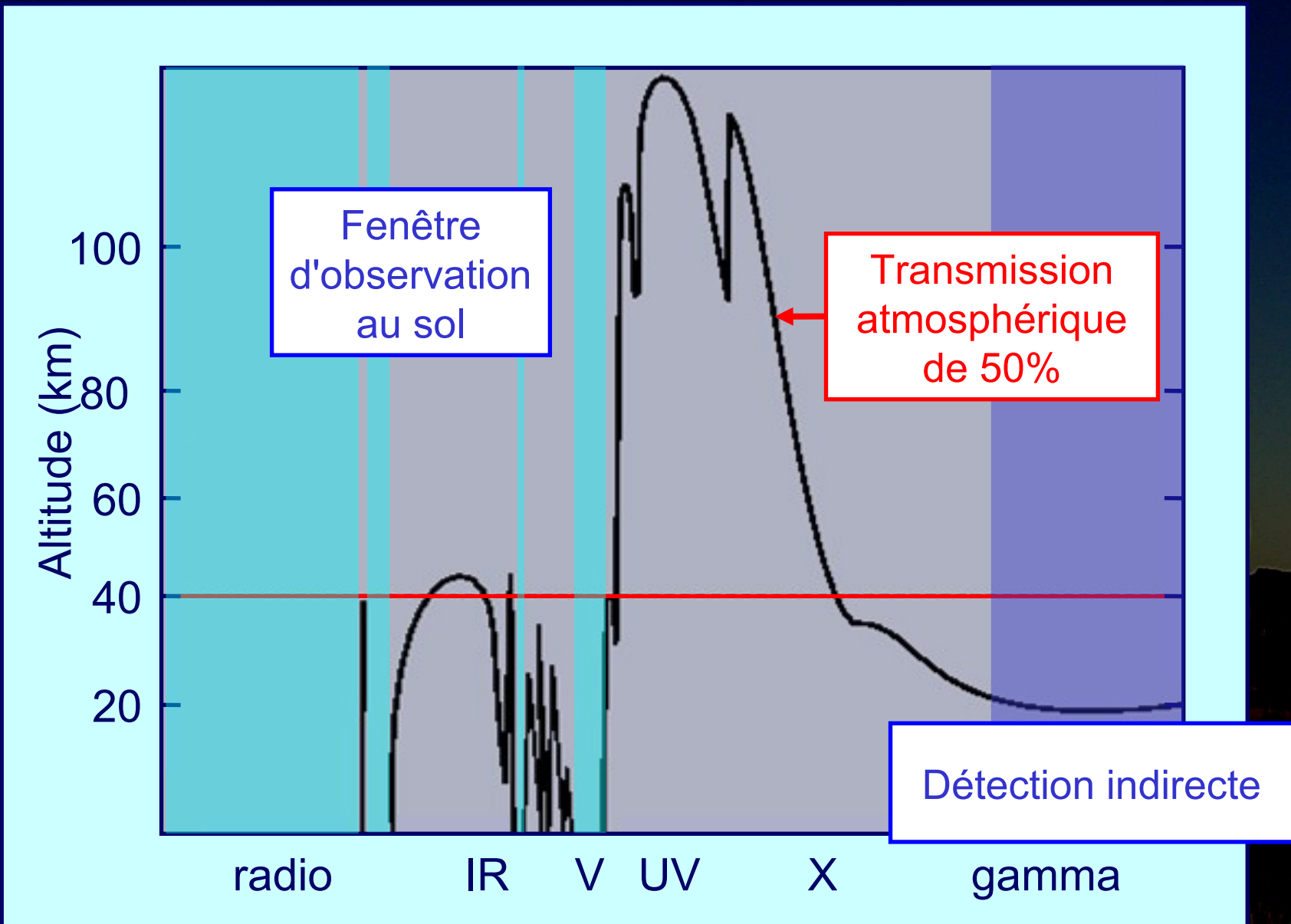


La lumière invisible

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

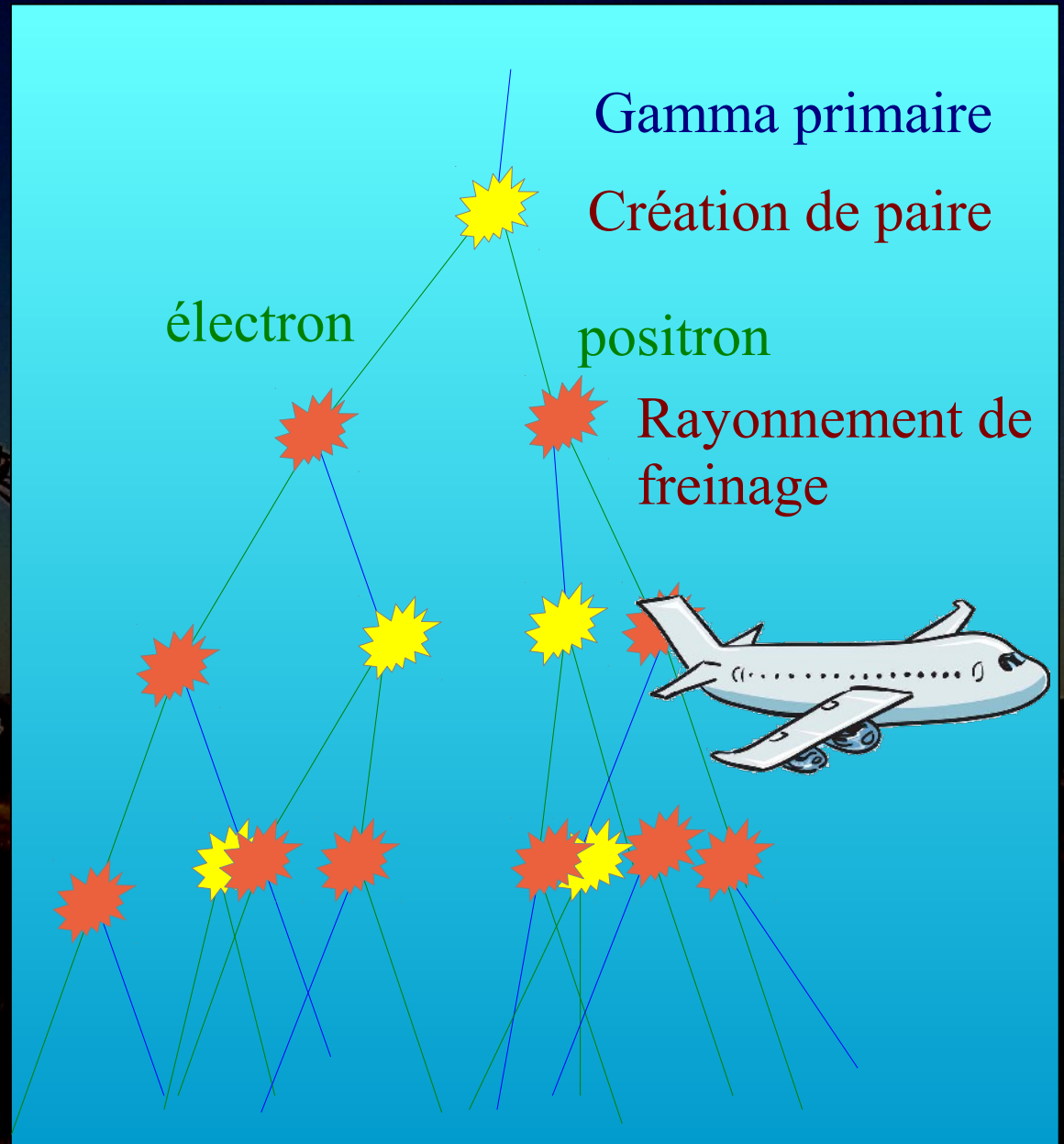


Où observer?



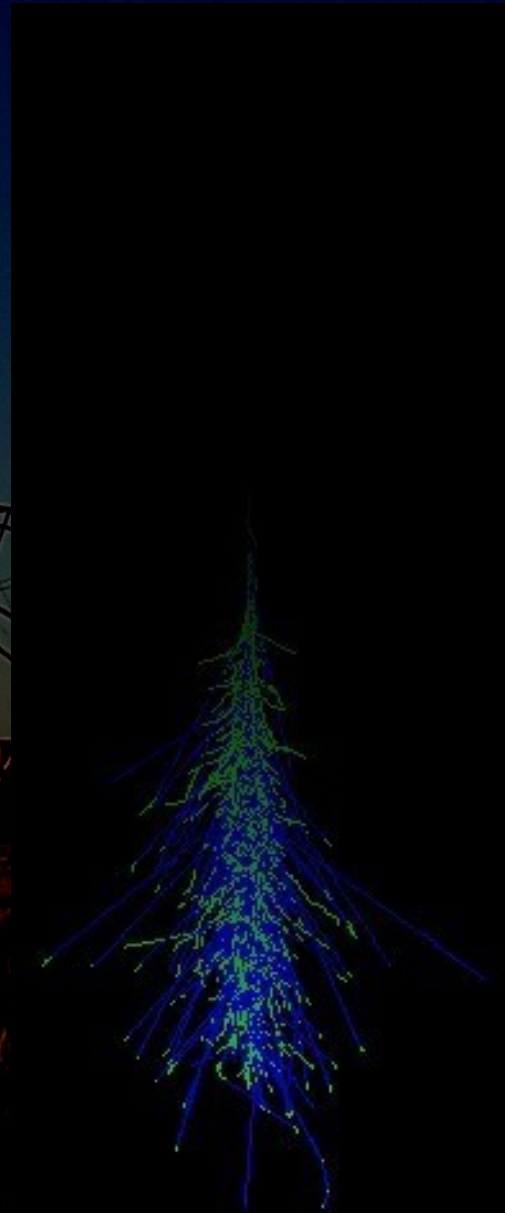
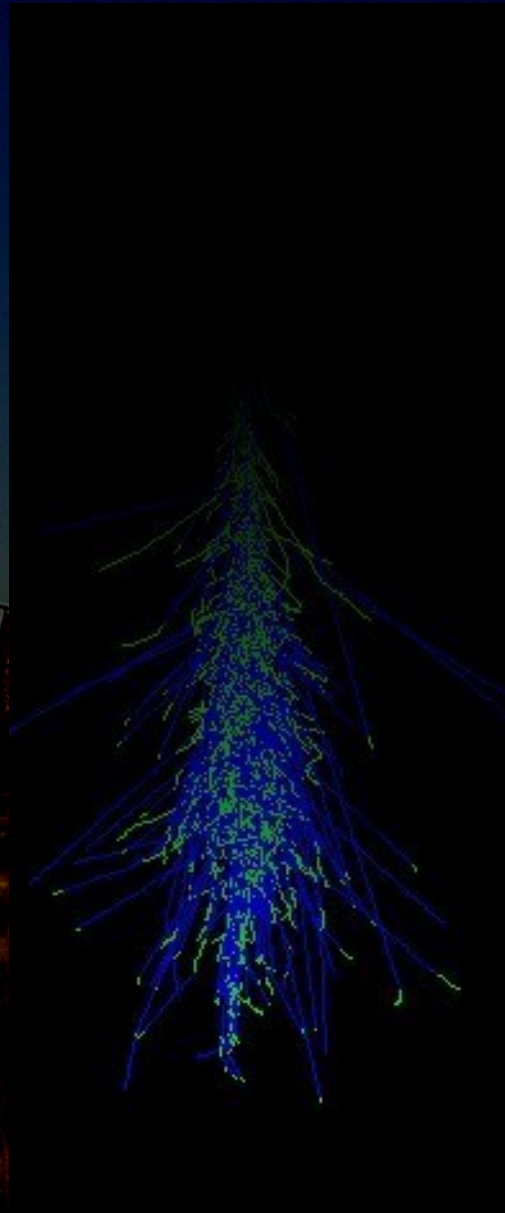
Cascades atmosphériques

- ❑ 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, ...)

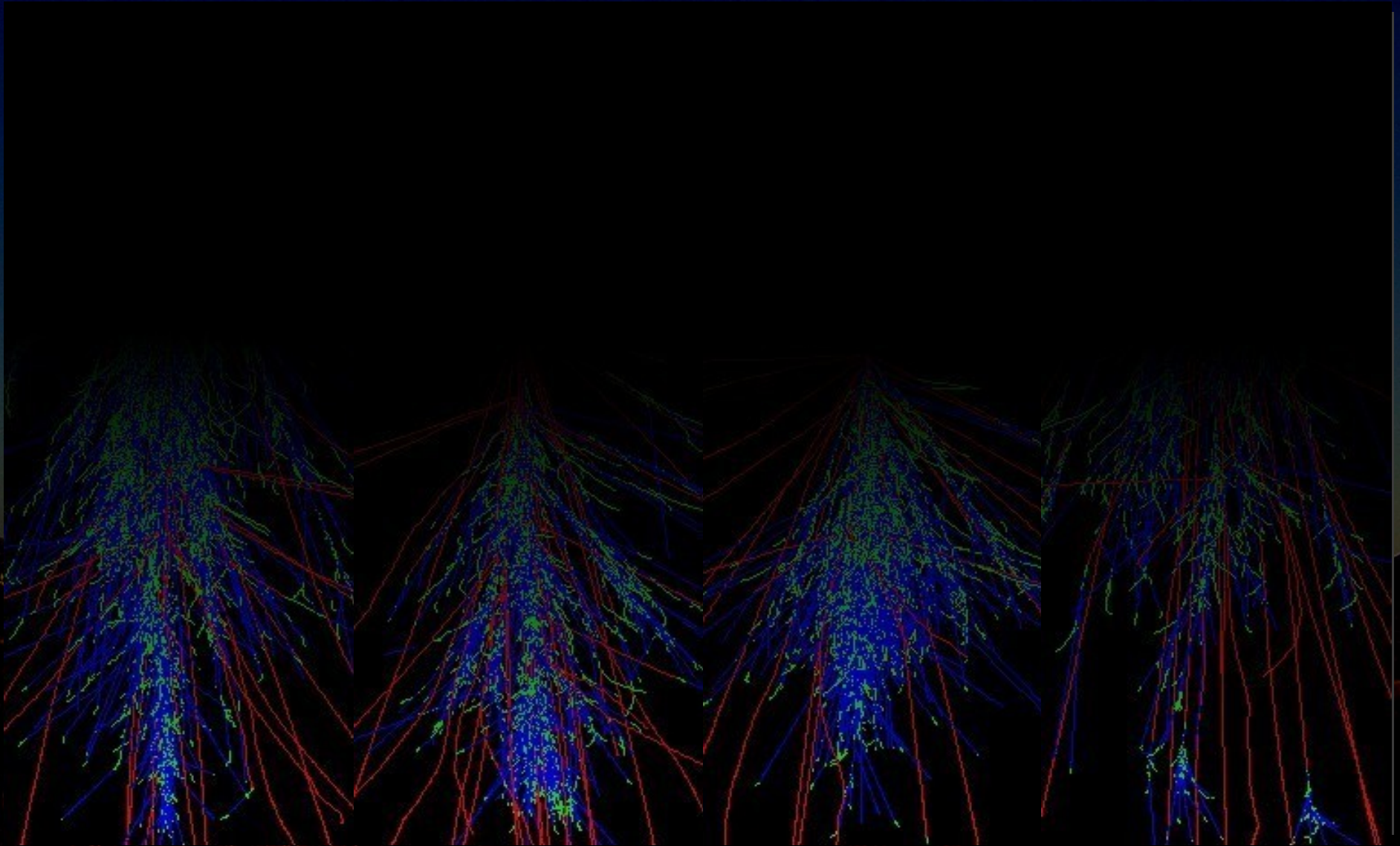


Cascades atmosphériques

γ , 200 GeV

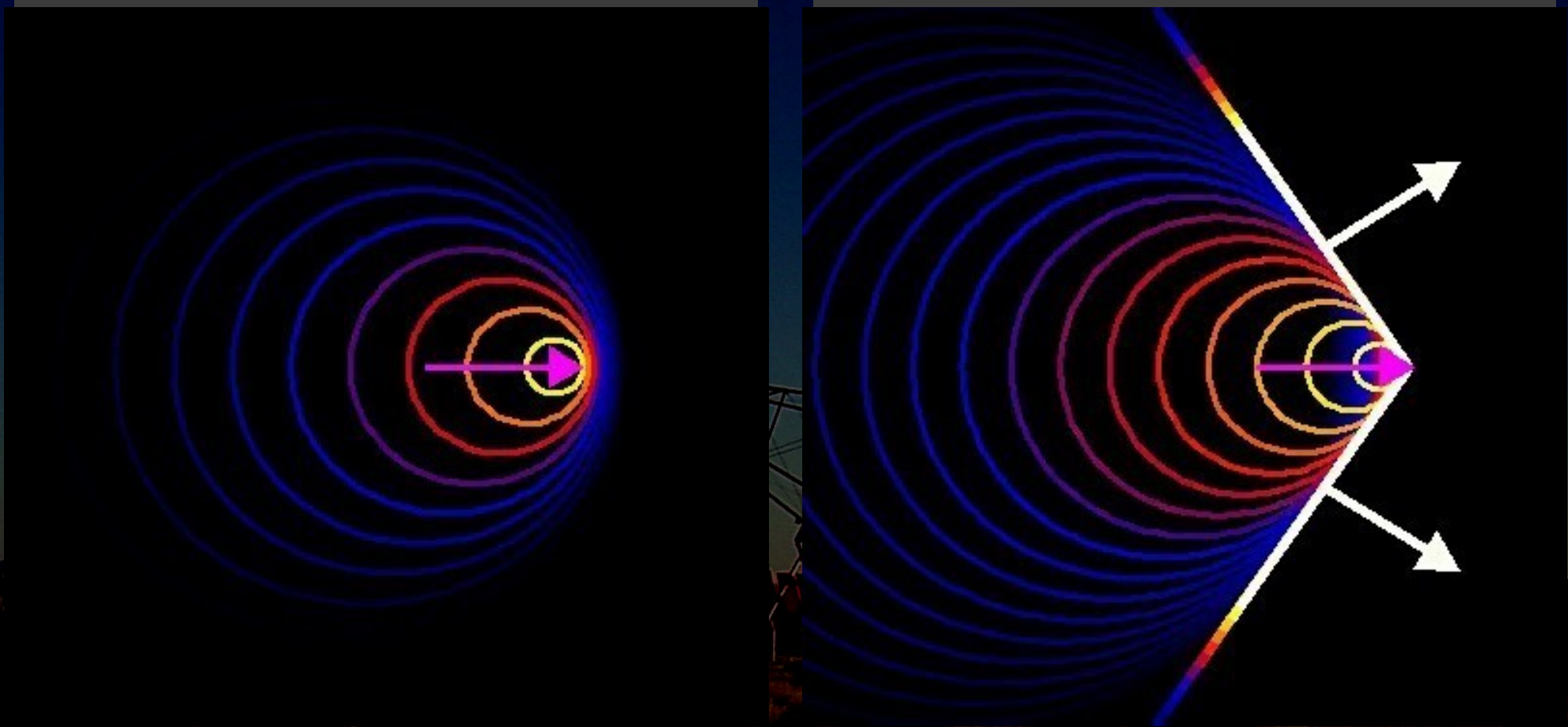


Cascades atmosphériques



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

Émission Cherenkov



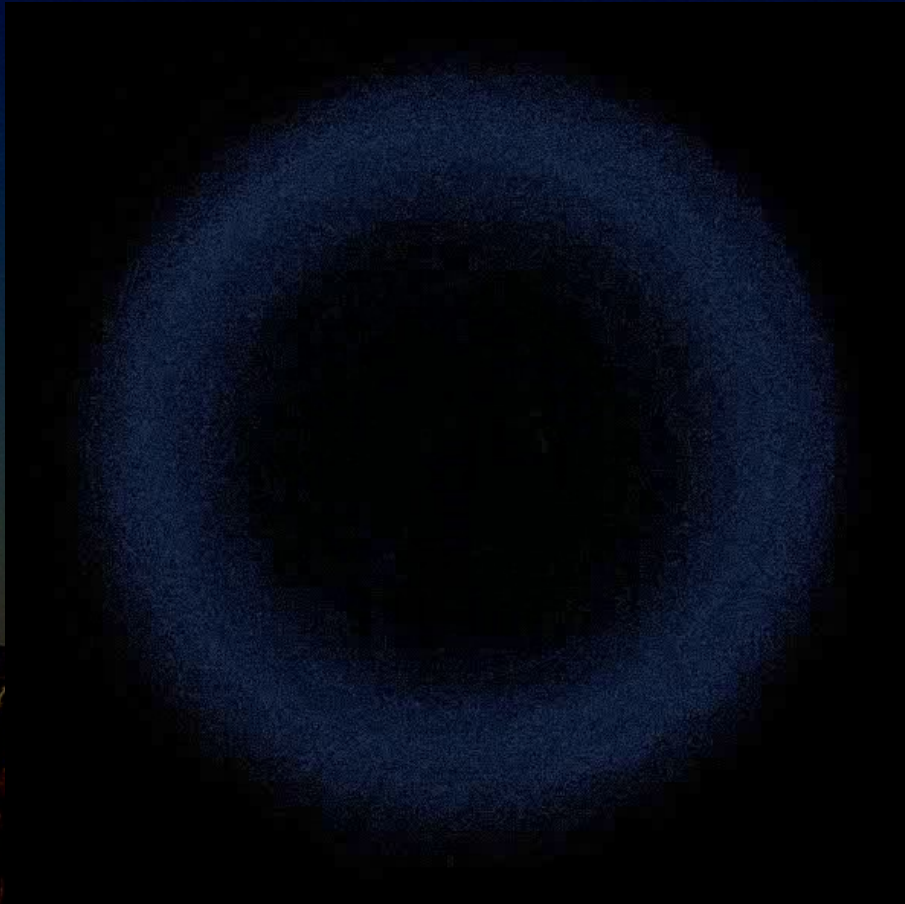
- ❑ Lorsque la lumière est ralentie dans le milieu, l'onde est comprimée à l'avant
- ❑ Lorsque la particule va plus vite que la lumière (dans le milieu), un bang lumineux se produit (là où les ondes s'additionnent)

Analogies

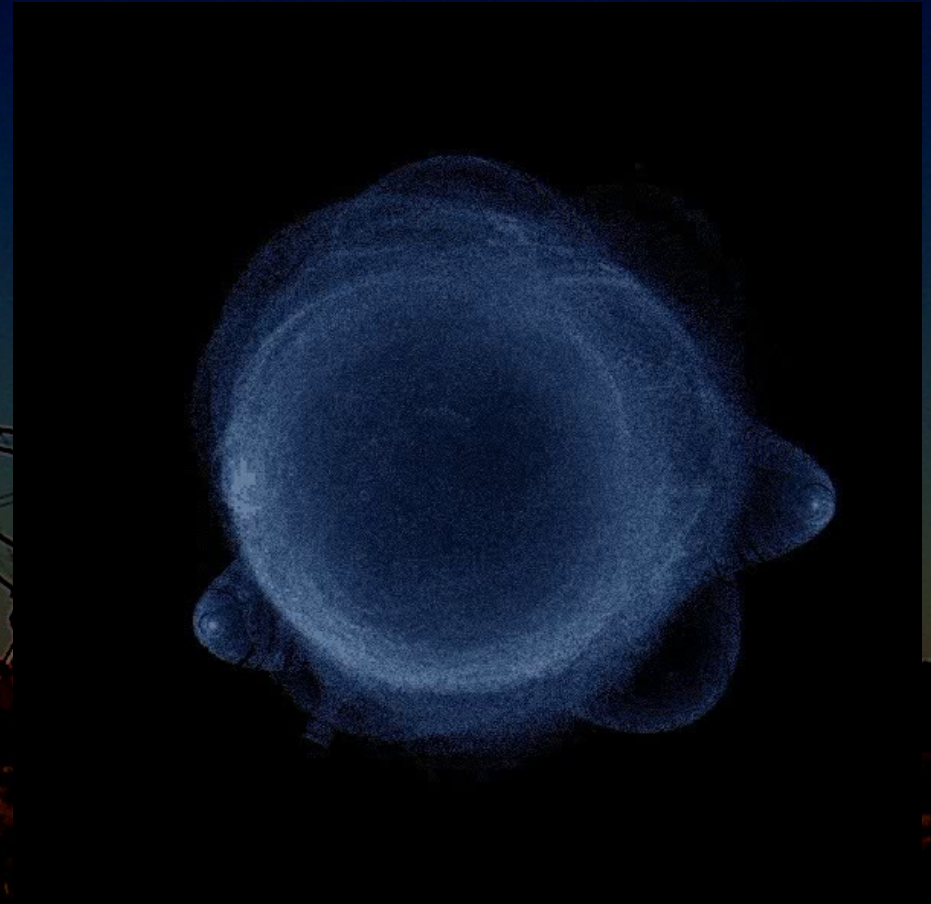


Émission Cherenkov des cascades

γ , 100 GeV



Protons, 500 GeV



← 300m →

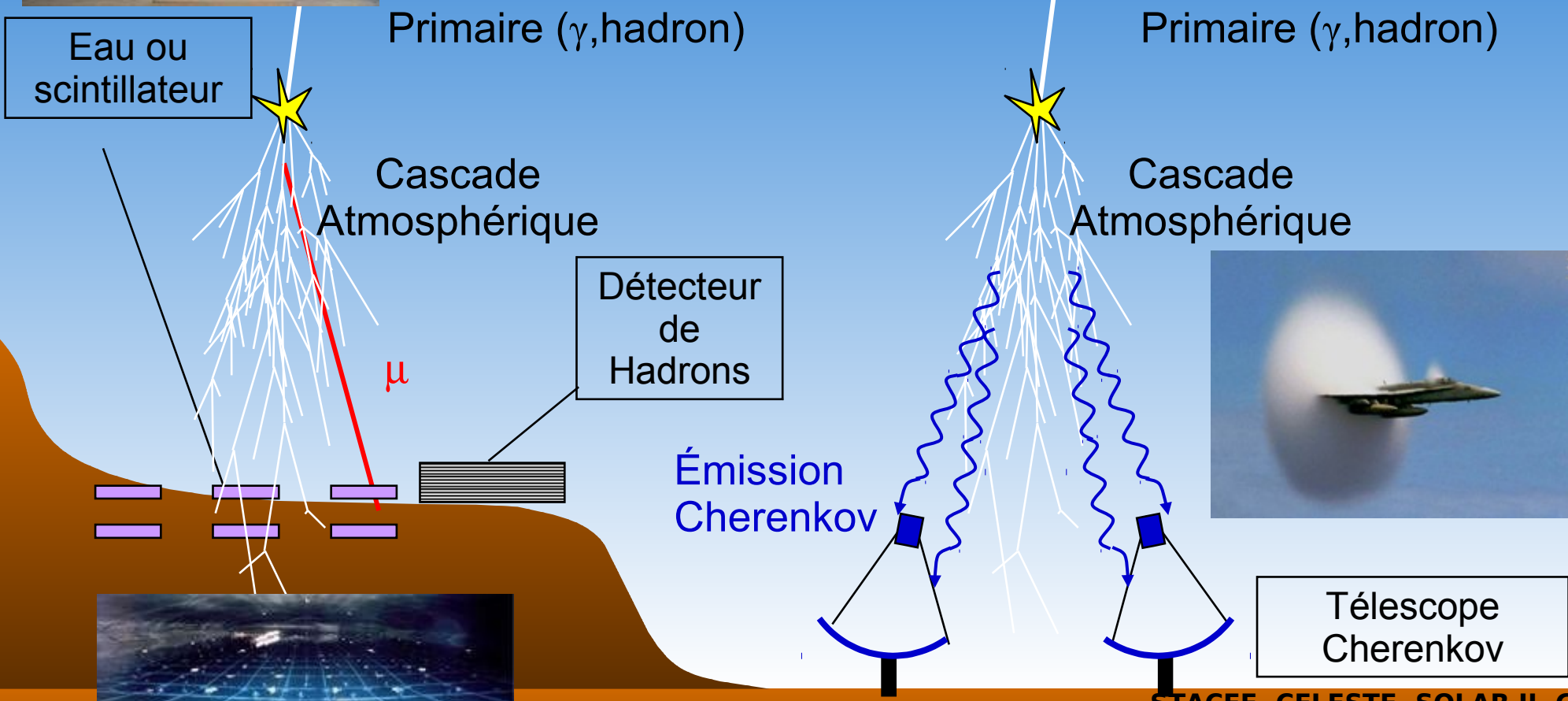
Simulations: K. Berlöhr

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

Techniques expérimentales



TIBET



MILAGRO

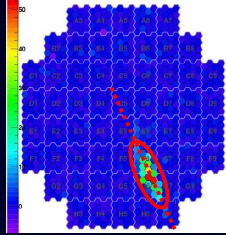
HESS, VERITAS, MAGIC, CANGAROO



STACEE, CELESTE, SOLAR II, GRAAL



Technique Cherenkov Atmosphérique



Sky & Telescope

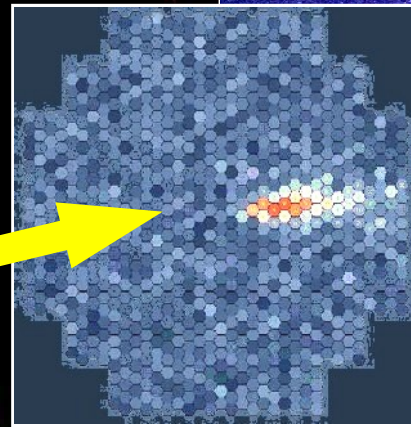
Cascade

γ
Rayon Cosmique

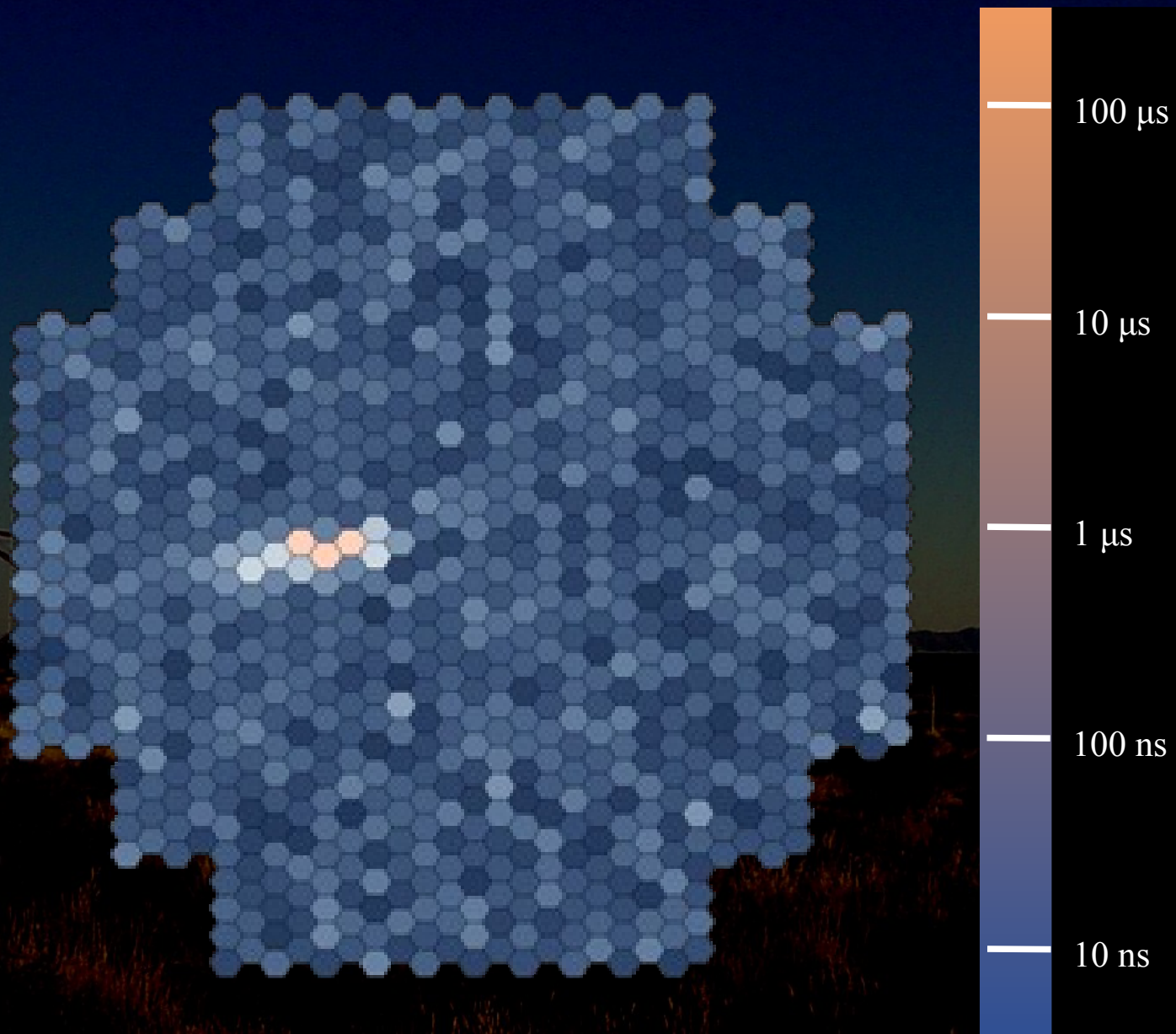
= 10 km

Lumière Cerenkovoy

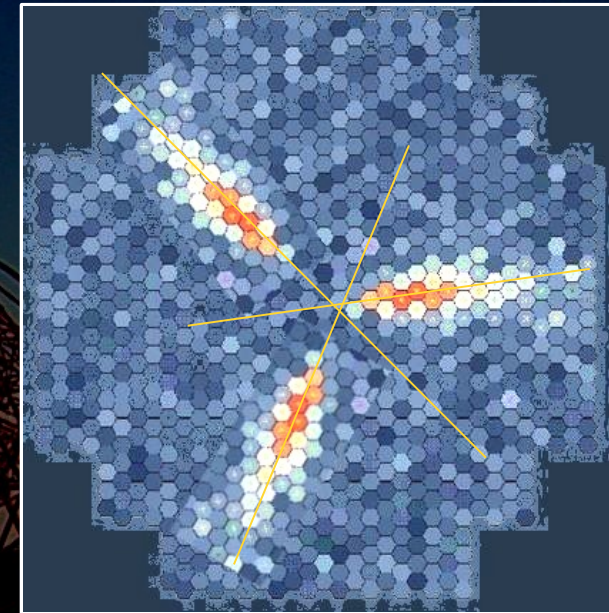
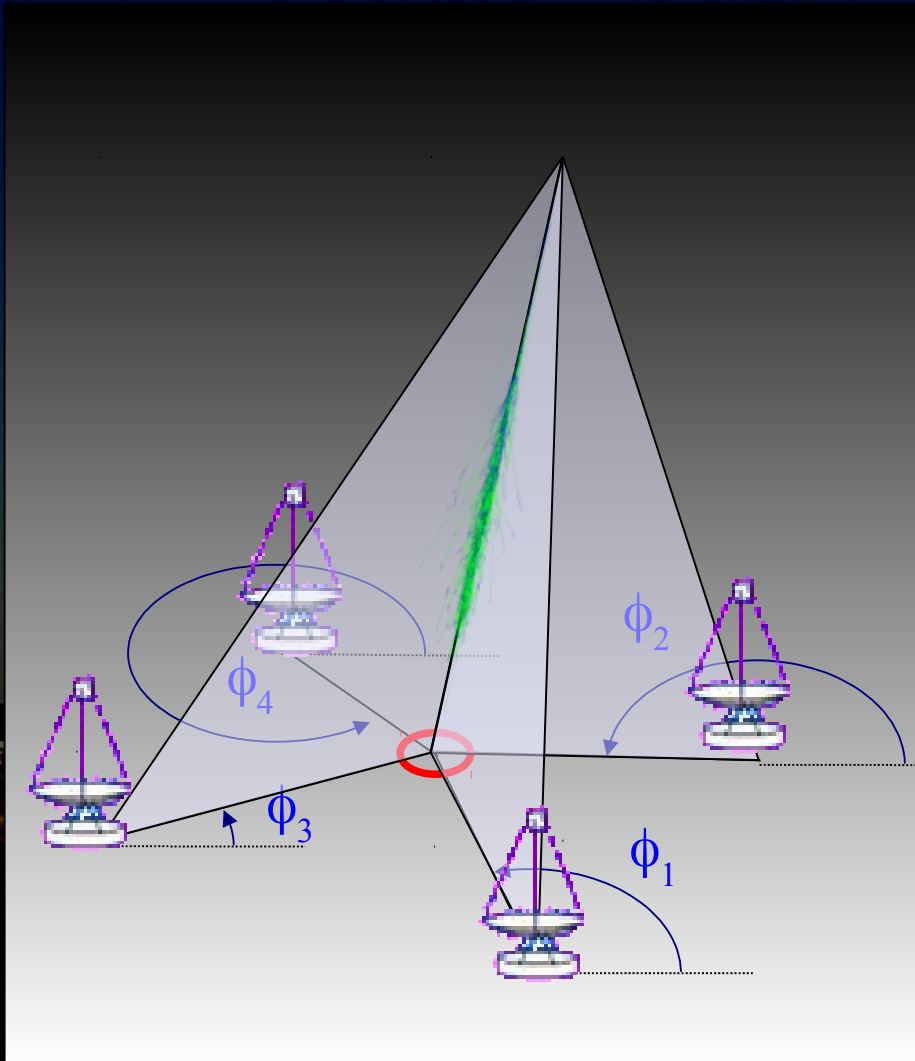
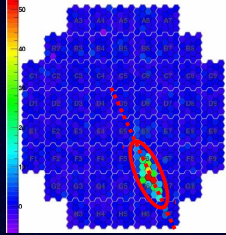
= 120m



Facteur clef : la rapidité



Vision stéréoscopique



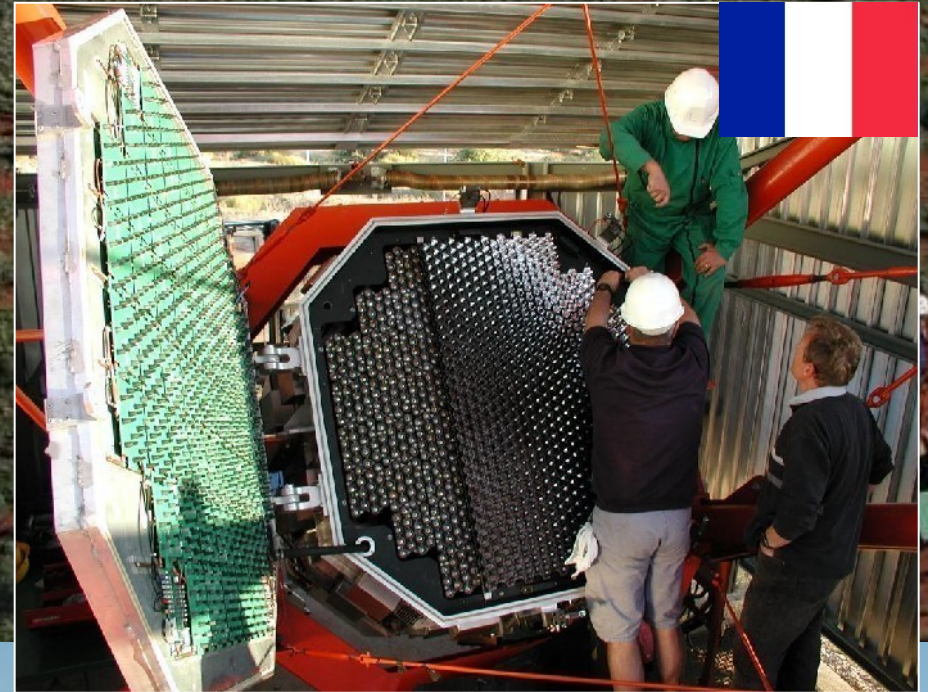
Images de 3 télescopes superposées

- 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

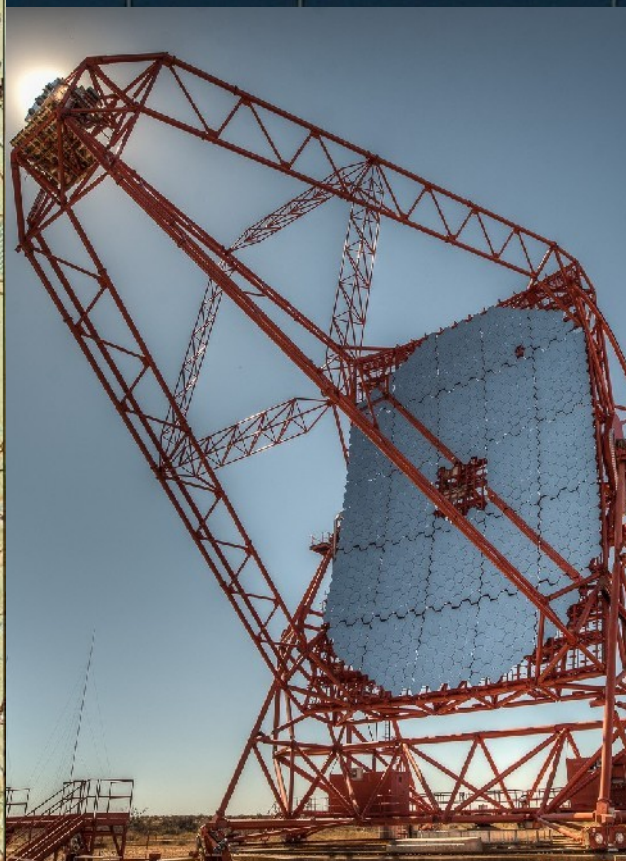
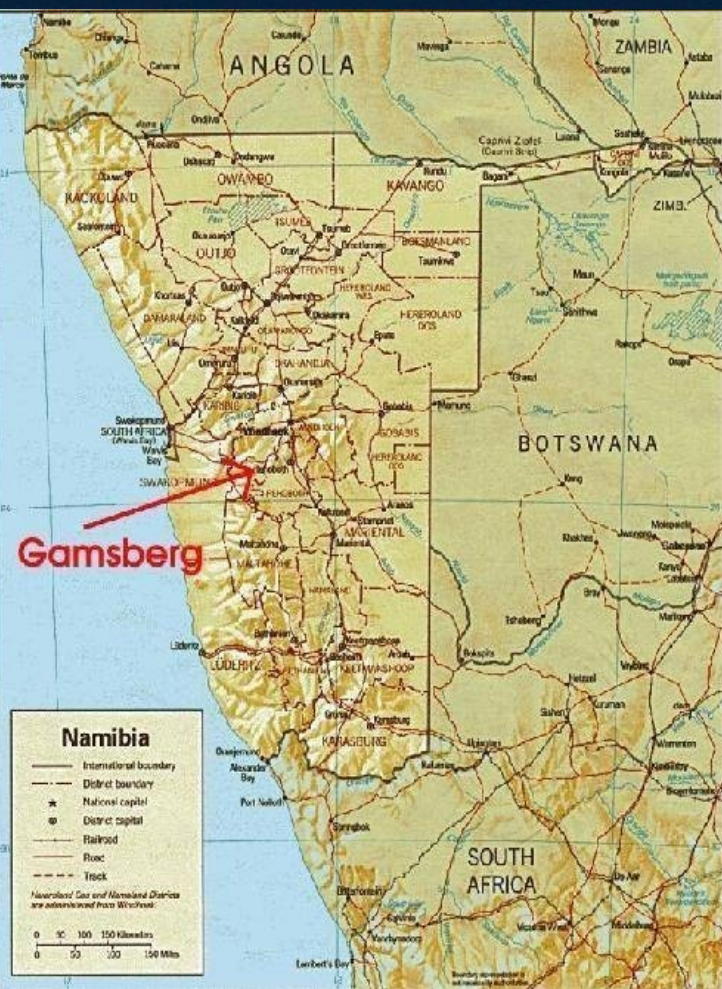


- ❑ 4 télescopes (en carré de 120 m)
 - ❑ Réflecteur de 12 m de diamètre, 15 m de focale
- ❑ Des caméras extrêmement rapides:
 - ❑ 960 pixels (PMT)
 - ❑ Échantillonnage à 1 ns
 - ❑ ~ 1 tonne
- ❑ Système complet depuis le 10/12/2003



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

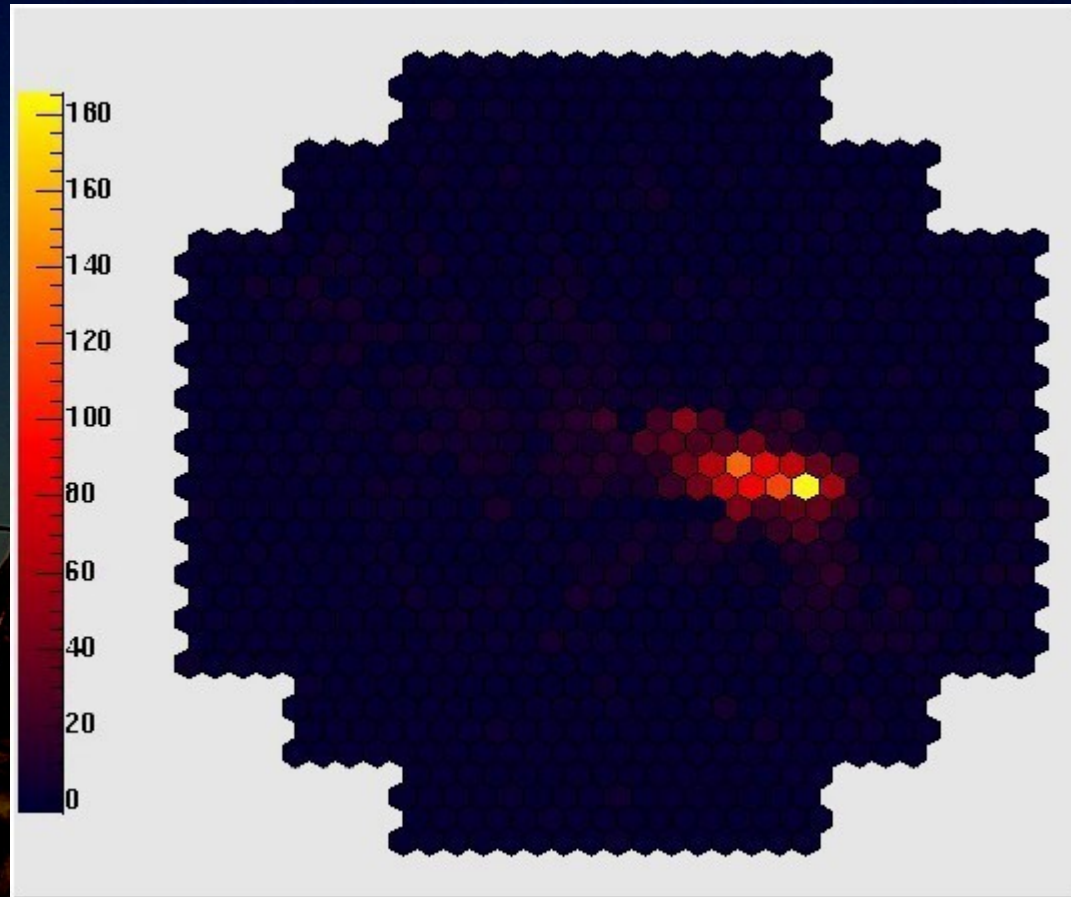


MPI Kernphysik, Heidelberg
Humboldt Univ. Berlin
Ruhr-Univ. Bochum
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
CEA Saclay
CESR Toulouse
LPTA Montpellier
LAOG Grenoble
LAPP Anecy
Observatoire de Paris
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies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

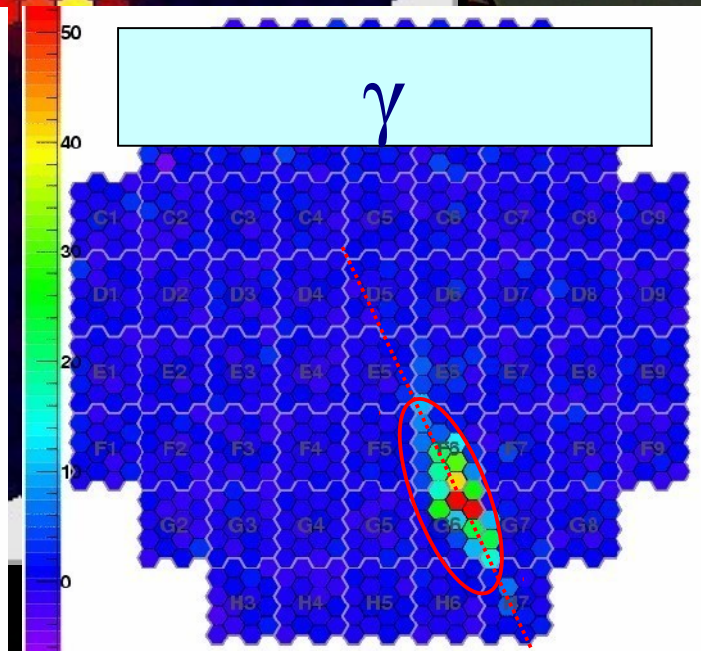
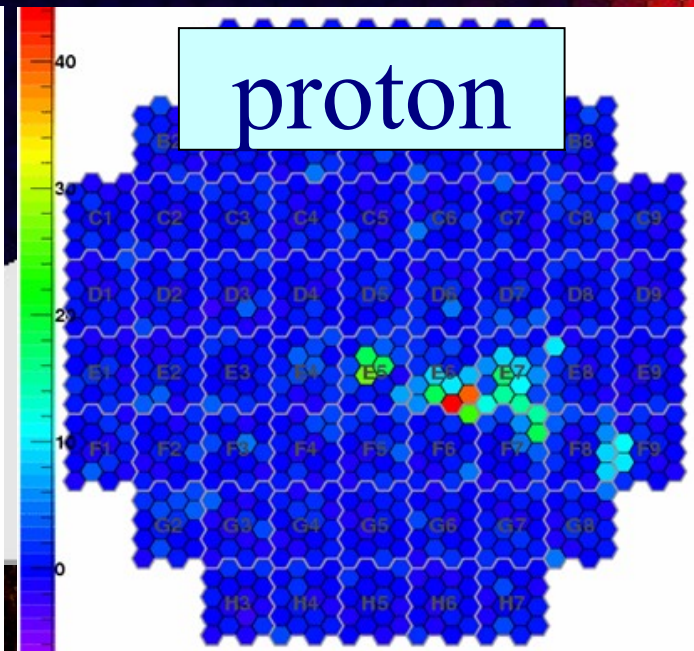
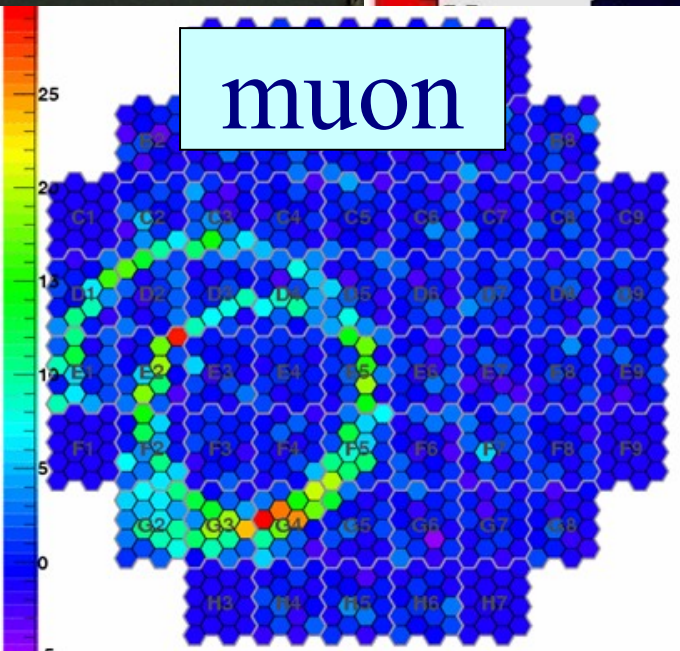
Le site



Événements



Événements

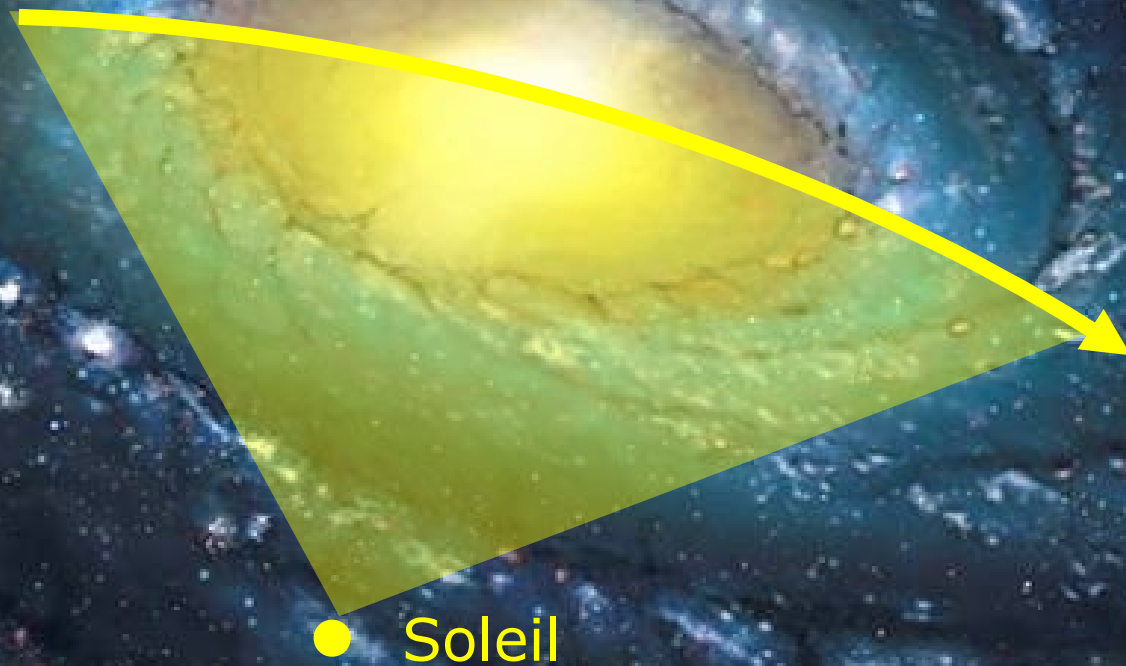




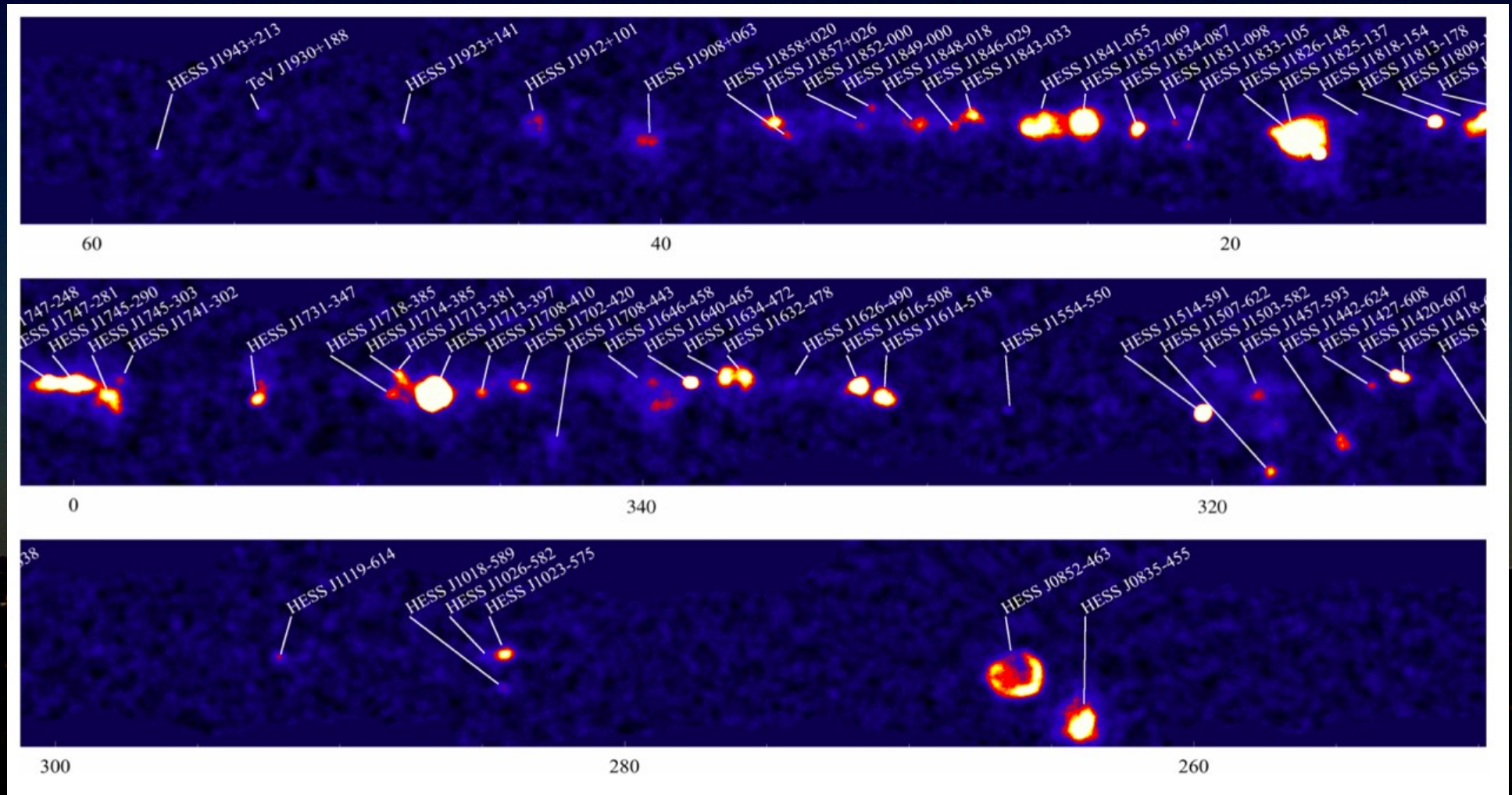
Quelques résultats

Cartographie des régions centrales

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



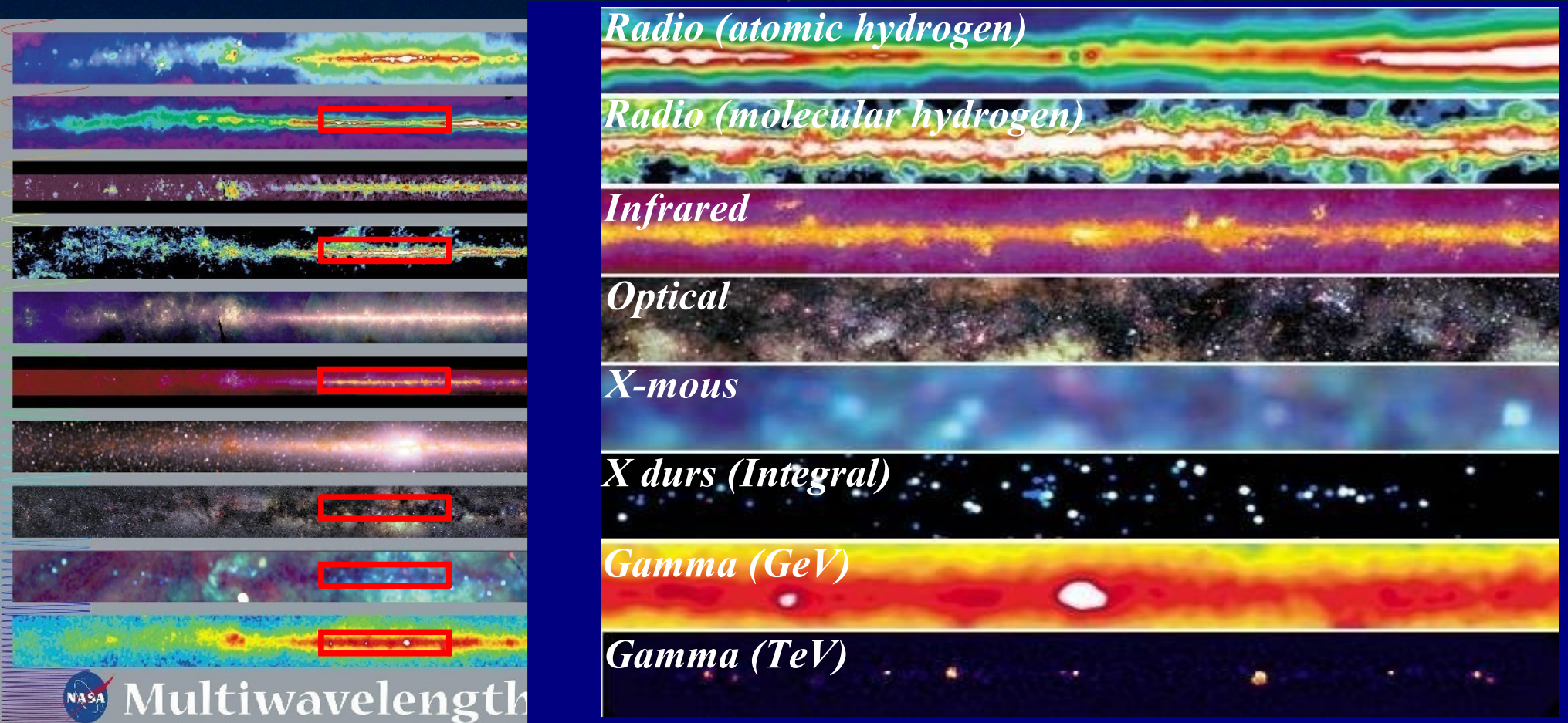
Une moisson impressionnante



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

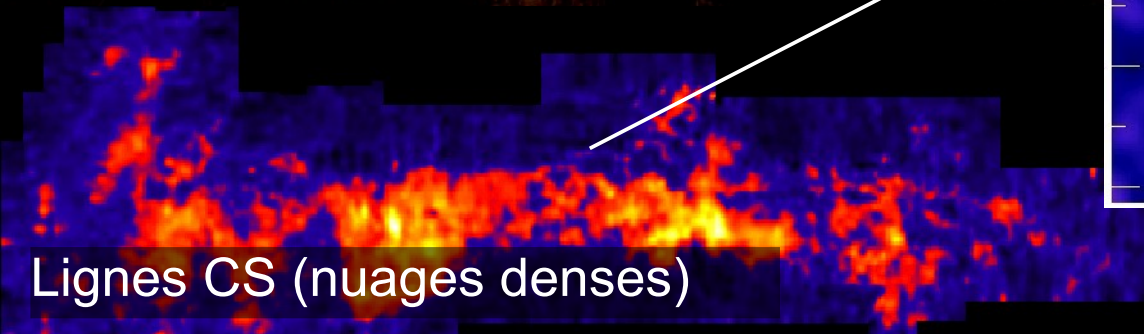
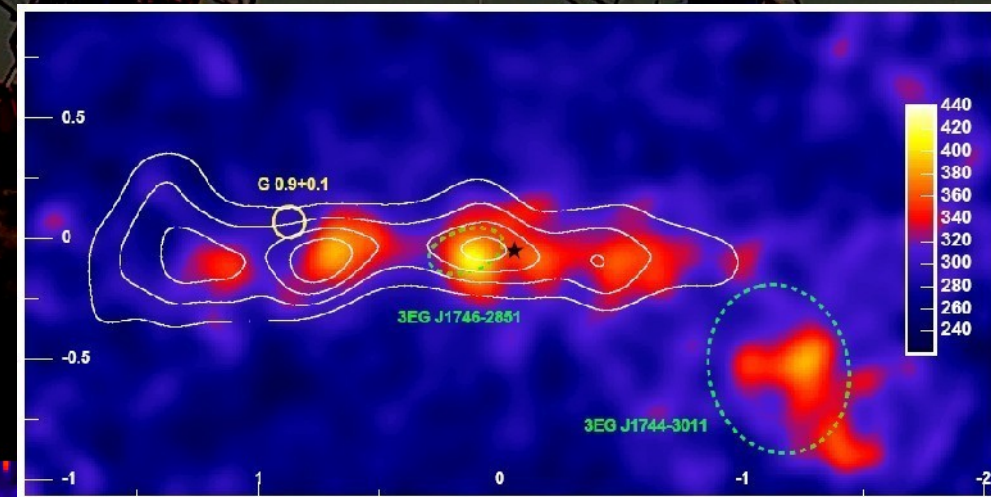
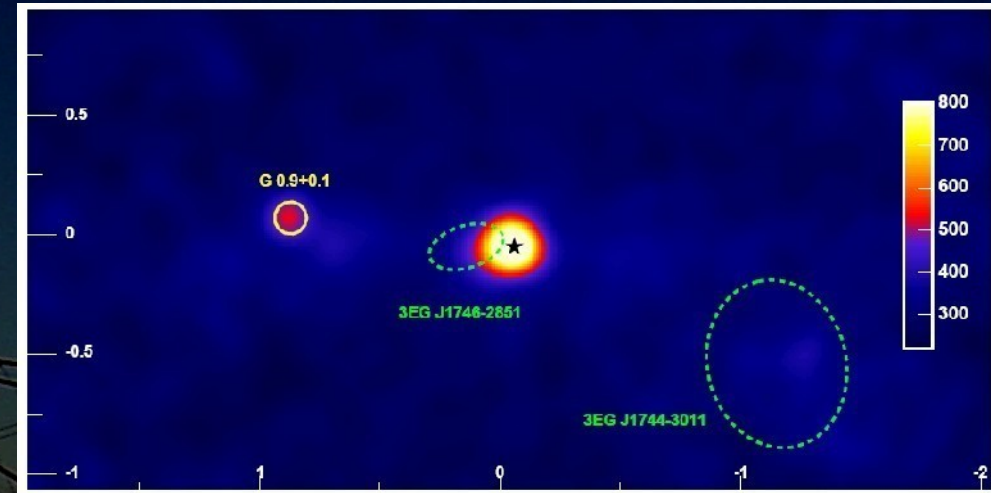
Cartographie des régions centrales

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



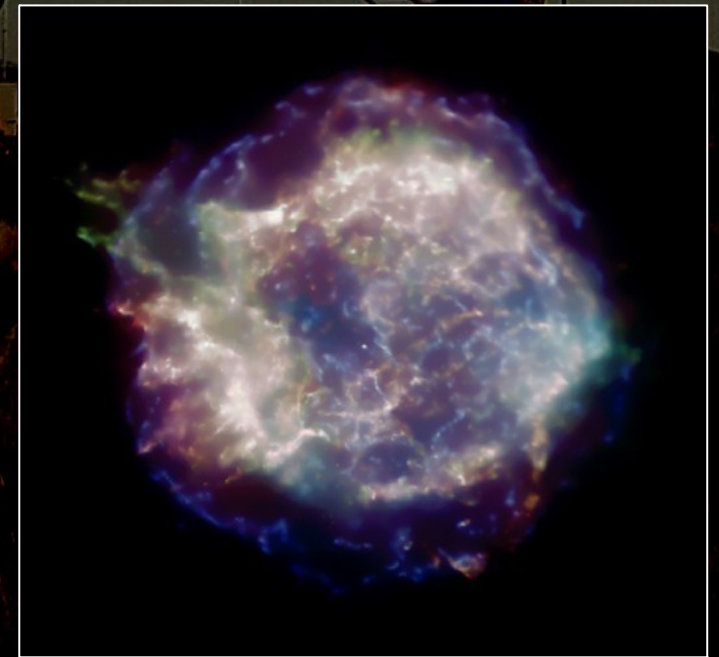
$pp \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma ?$

Restes de Supernovæ (en coquille)

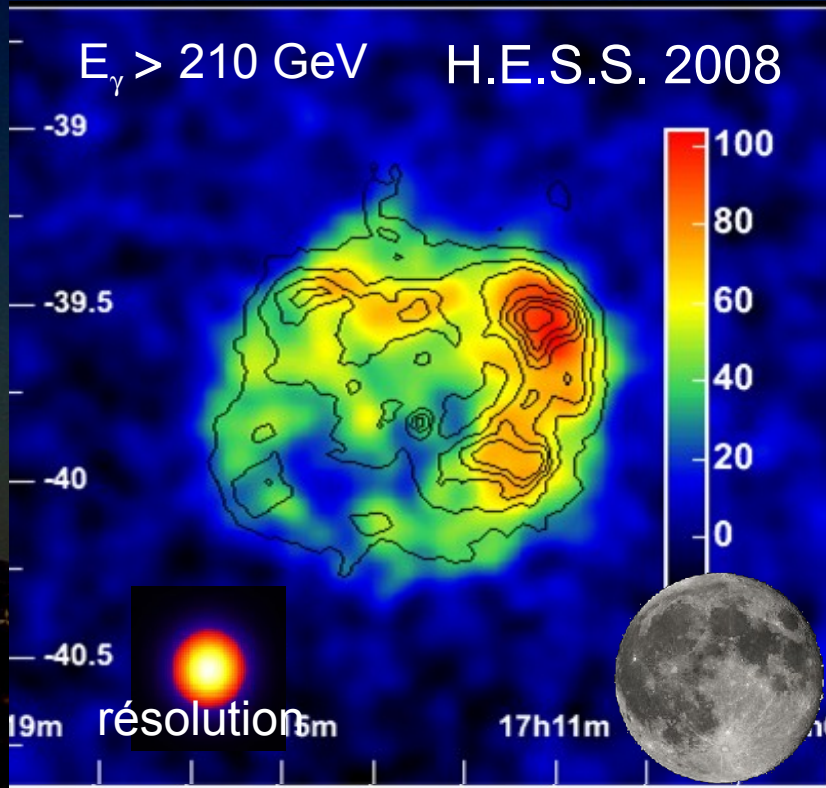
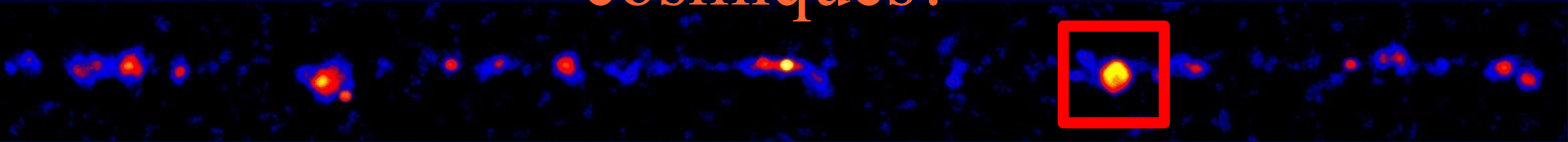
- ❑ Résidu d'explosion d'étoile massive
- ❑ Onde de choc balayant la matière interstellaire (> 1000 km/s), forme de coquille
- ❑ Intérieur très chaud: 1 million de degrés, énergie libérée gigantesque: 10^{44} J = 10^{16} Hiroshima
- ❑ Restes de Supernova sont les meilleurs candidats pour les rayons cosmiques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



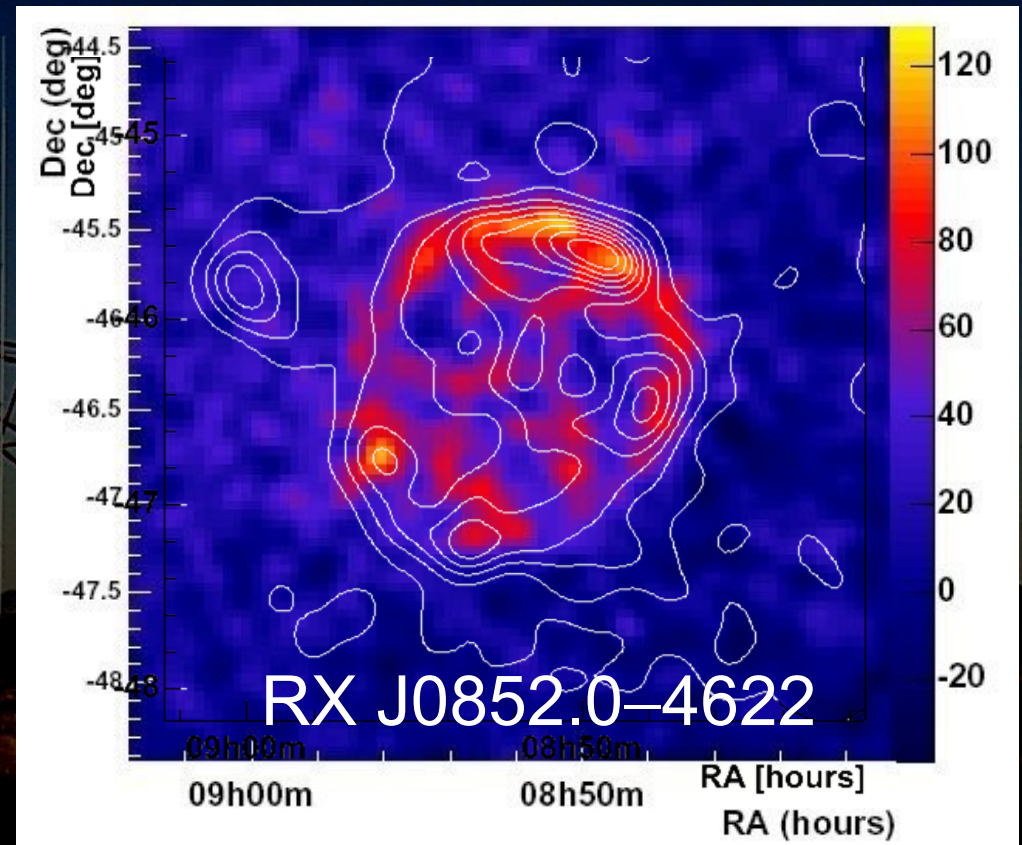
Vue d'artiste (ESA/Nasa)



Restes de supernovæ: des accélérateurs cosmiques?



RX J1713.7-3946

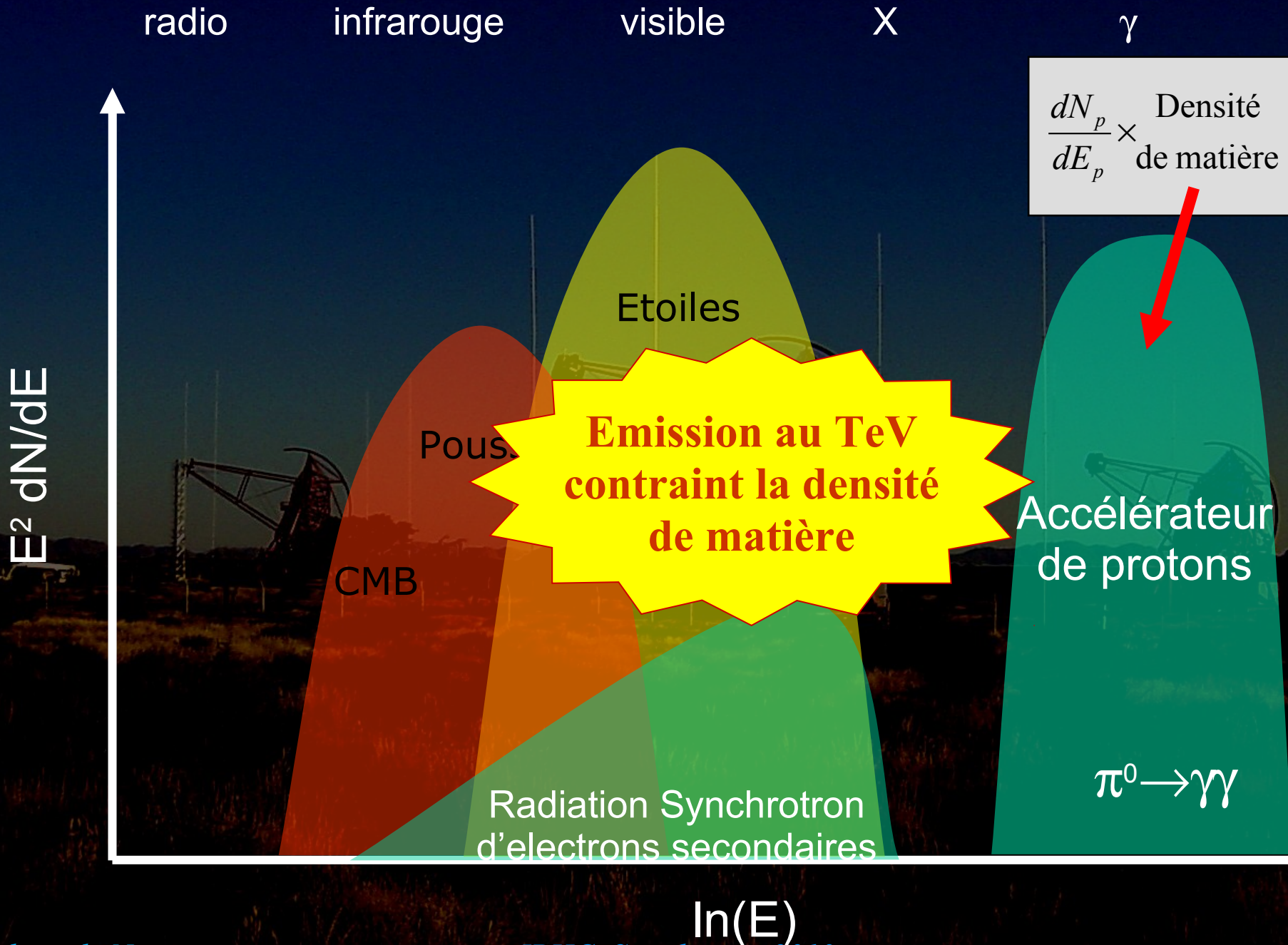


Corrélation très nette entre émission X et γ

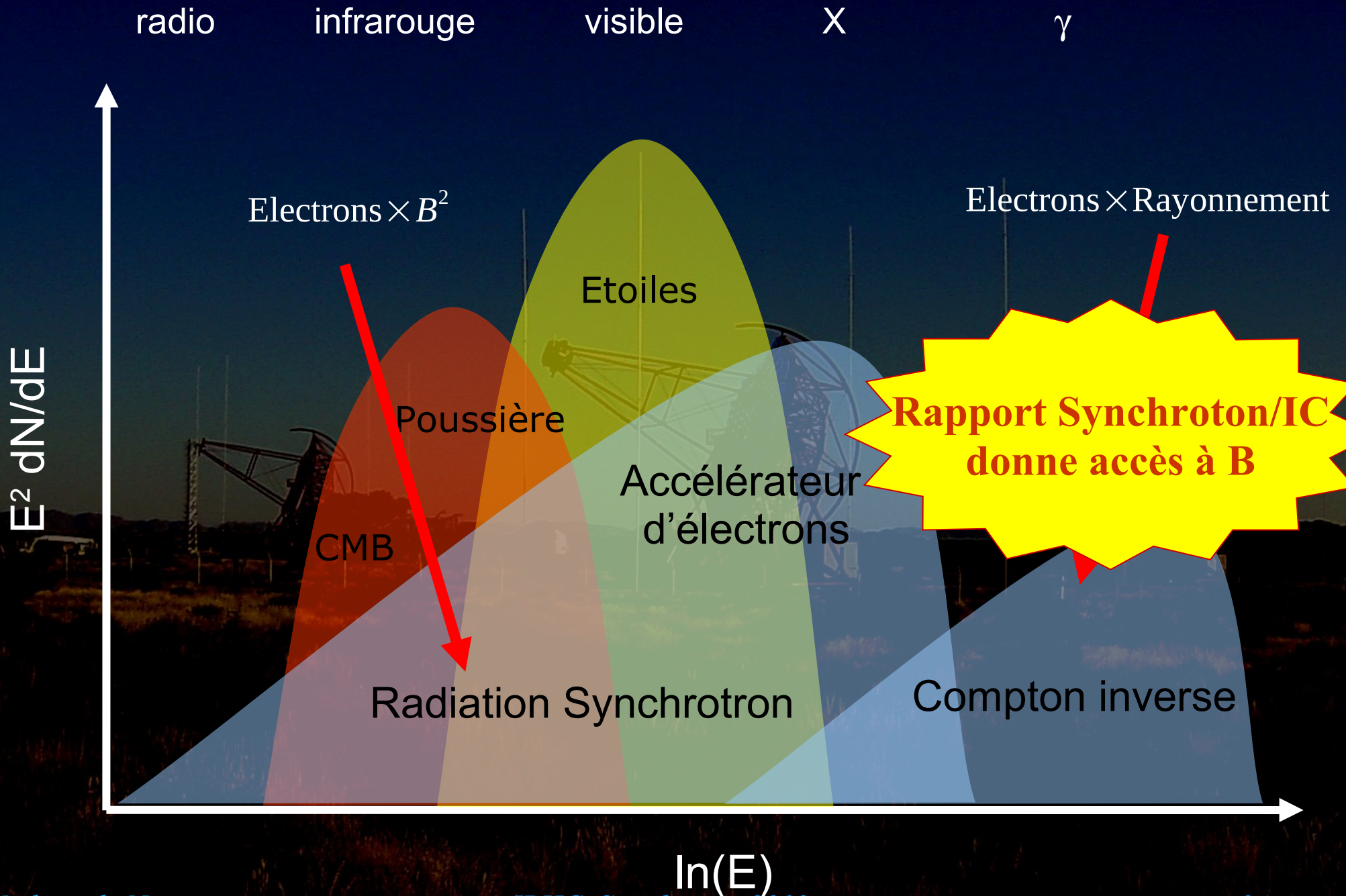
□ Les restes de SN accélèrent des particules au moins jusqu'à 100 TeV

⇒ Quel type de particules?

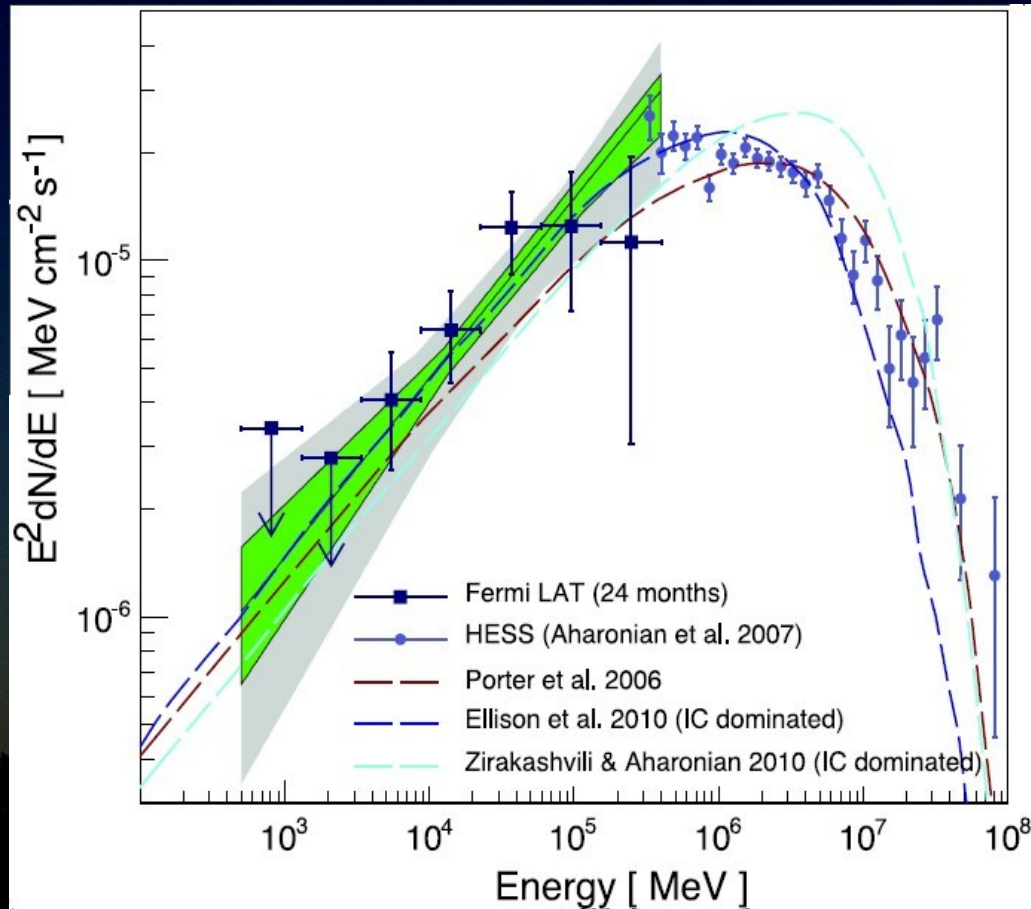
Electron ou Hadrons?



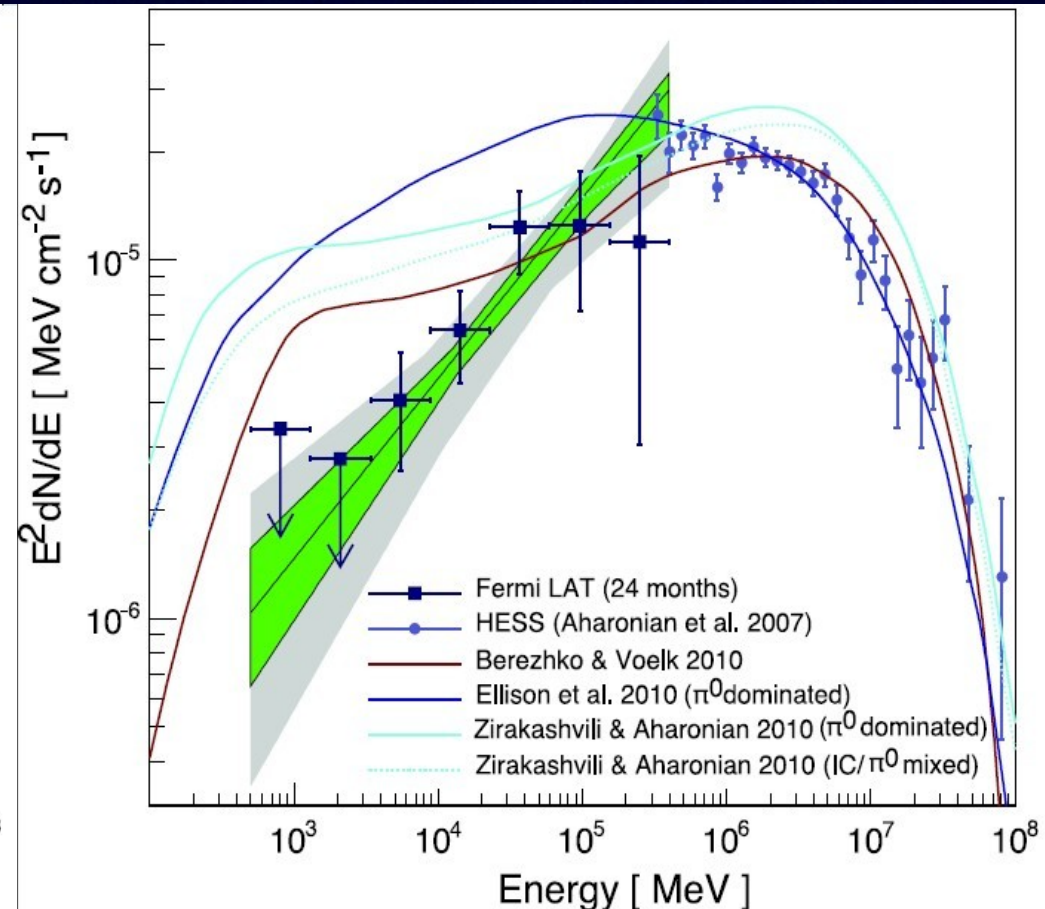
Electron ou Hadrons?



Où en est-on ?



Leptonique

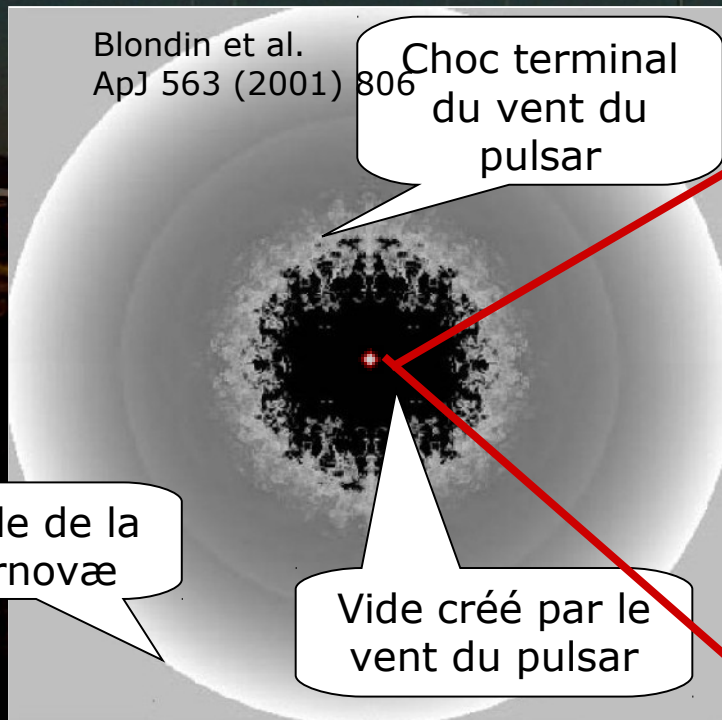


Hadronique

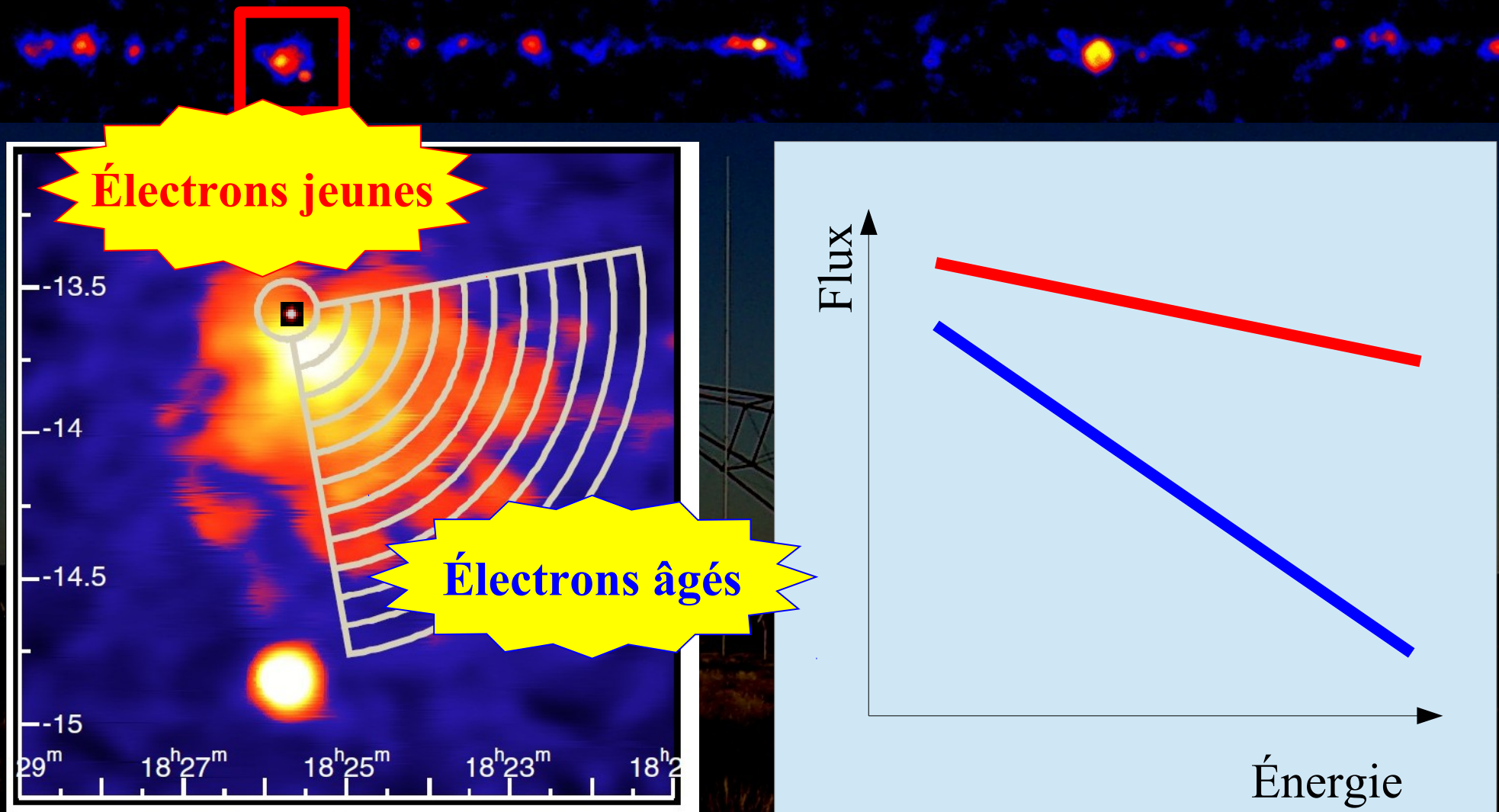
- ❑ Les modèles leptoniques reproduisent bien le domaine du GeV mais on du mal à haute énergie (coupure Klein Nishina)
- ❑ Les modèles hadroniques surestiment l'émission au GeV

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**)



Freinage des électrons en direct

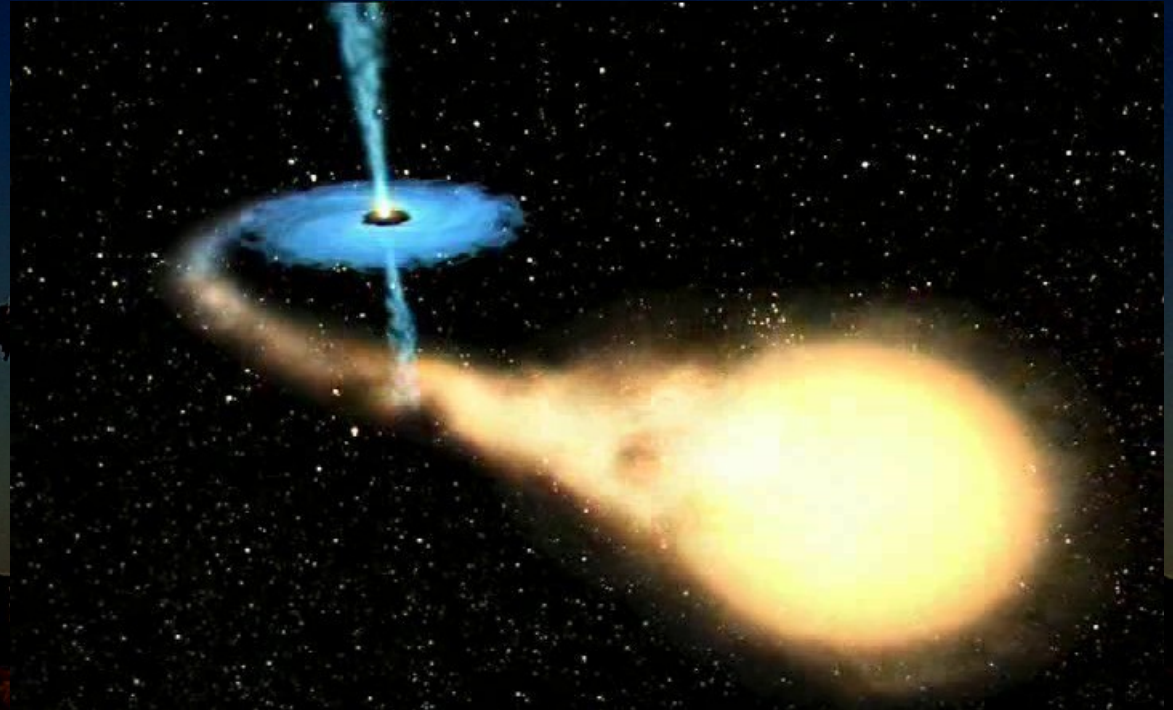


□ Énergie décroît lorsqu'on s'éloigne du pulsar

⇒ Première observation du refroidissement des électrons

Systemes binaires

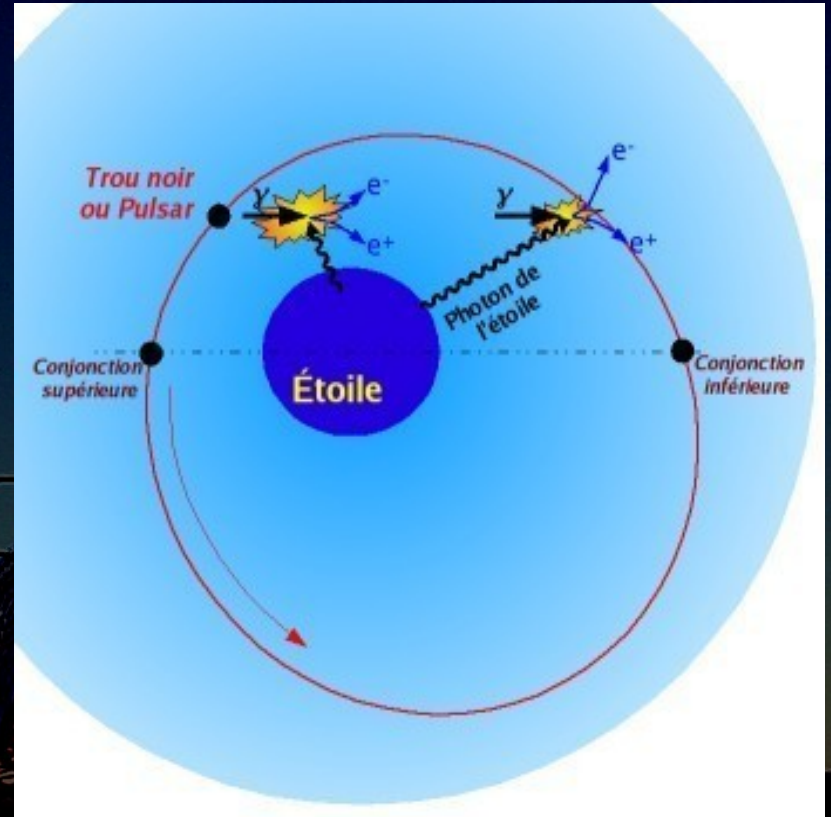
- ❑ Systeme forme de:
 - ❑ Un objet compact (trou noir ou etoile a neutron)
 - ❑ Une etoile compagne
 - ❑ Un disque d'accrétion
 - ❑ Des jets
- ❑ Accélération de particules dans les jets
- ❑ Émission très variable sur de nombreuses échelles de temps
- ❑ Permettent de comprendre les mécanismes d'accrétion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



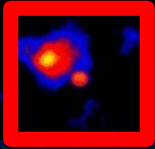
Vue d'artiste (ESA/NASA)

LS 5039 – Une binaire Gamma

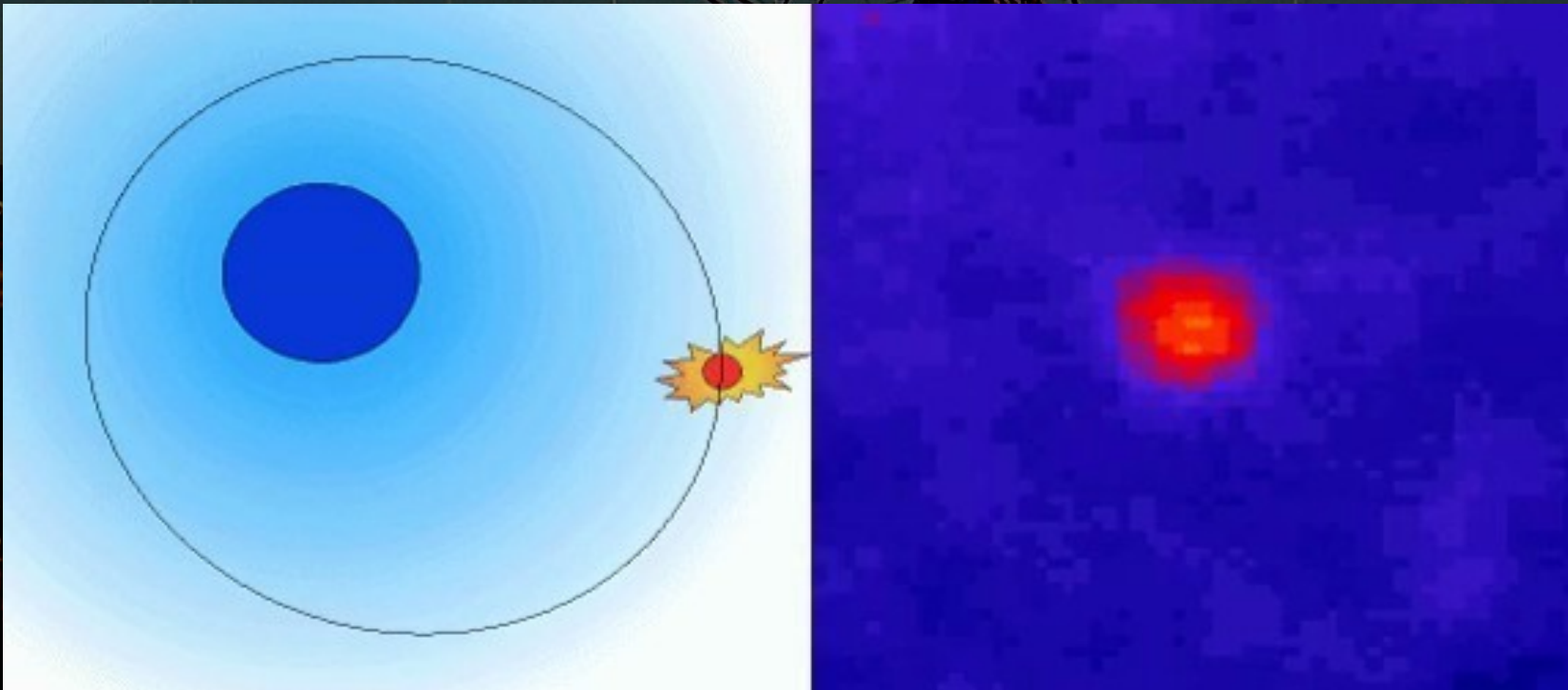
- ❑ Système binaire LS 5039:
 - ❑ Étoile massive ($20 M_{\odot}$) et très chaude, UV
 - ❑ Objet compact (trou noir ou étoile en neutron)
 - ❑ Orbite serrée ($d = [2 - 4.5] R_{\star}$)
 $0.1 \times$ (terre – soleil) !
 - ❑ Période orbitale 3.9 jours
- ❑ Jets observés en radio



Observations de LS 5039

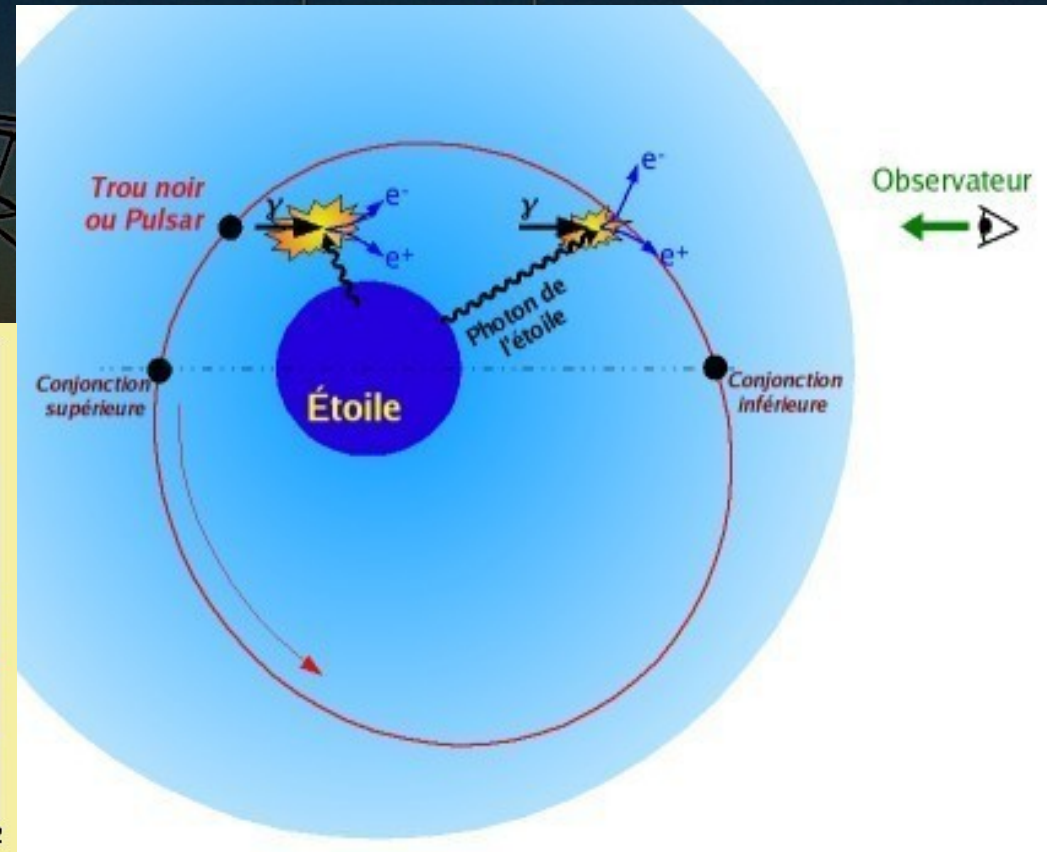
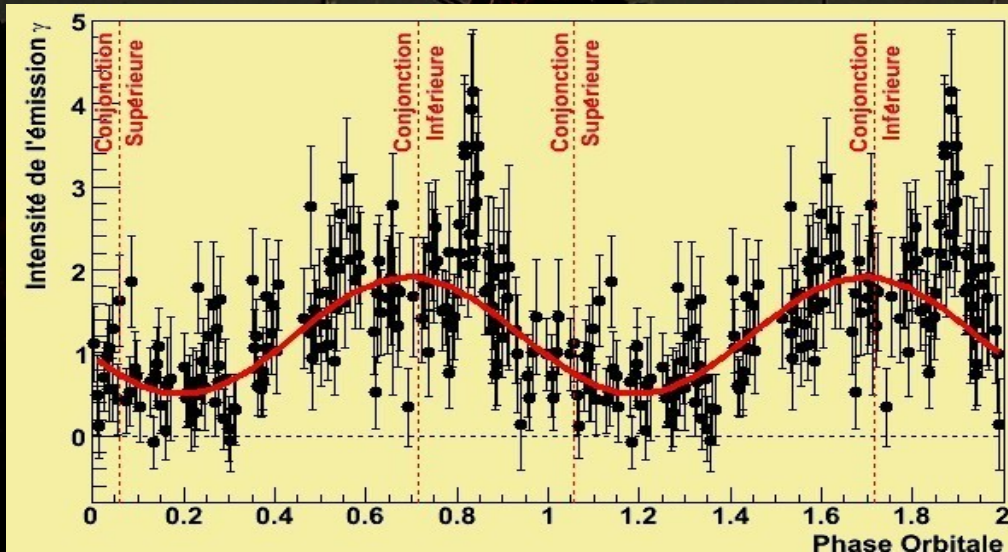


- ❑ Émission modulée à la période de 3.9 jours, modulation assez compliquée
- ❑ Première source périodique au TeV



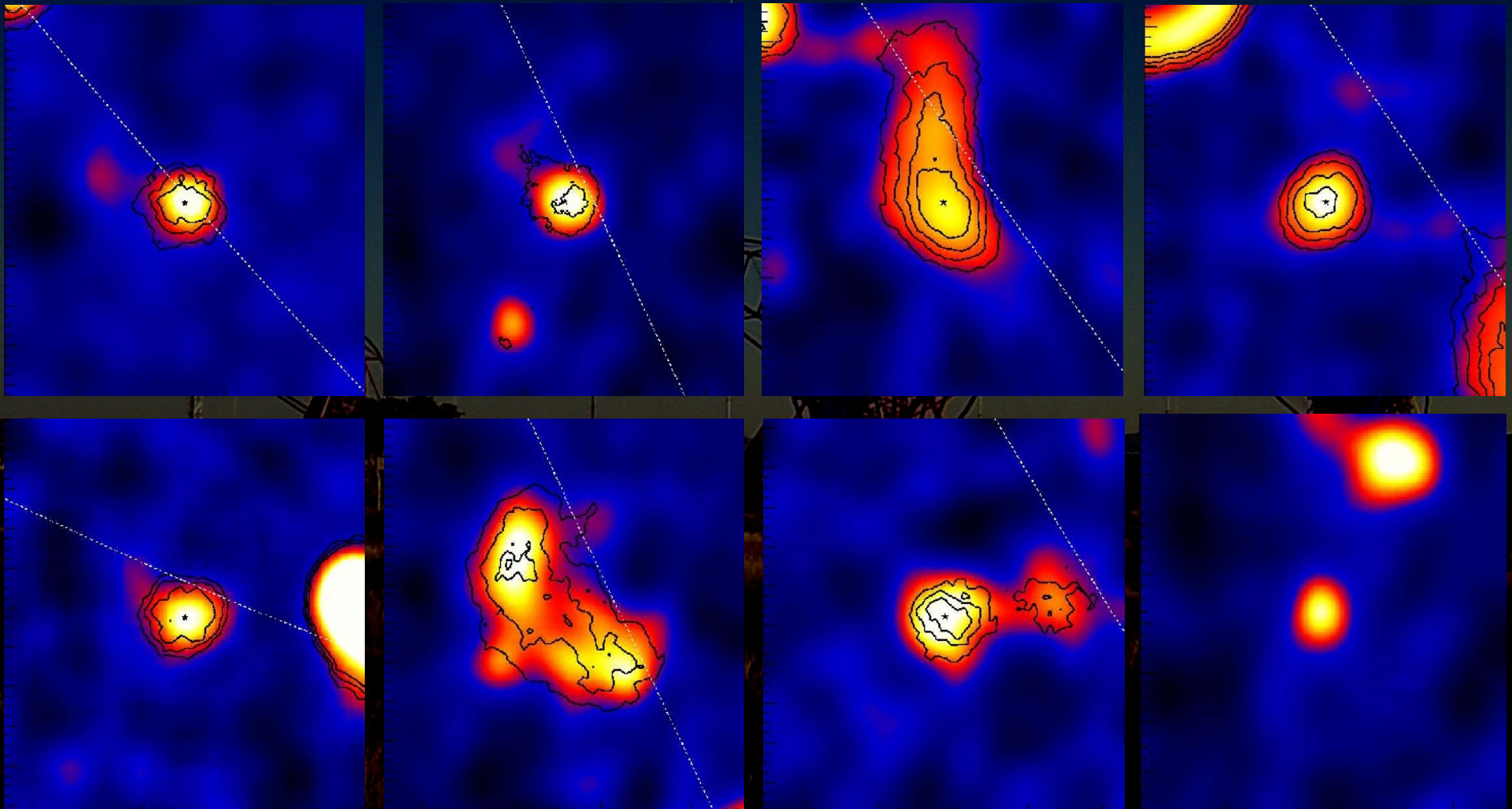
La lumière est opaque à la lumière !

- ❑ 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



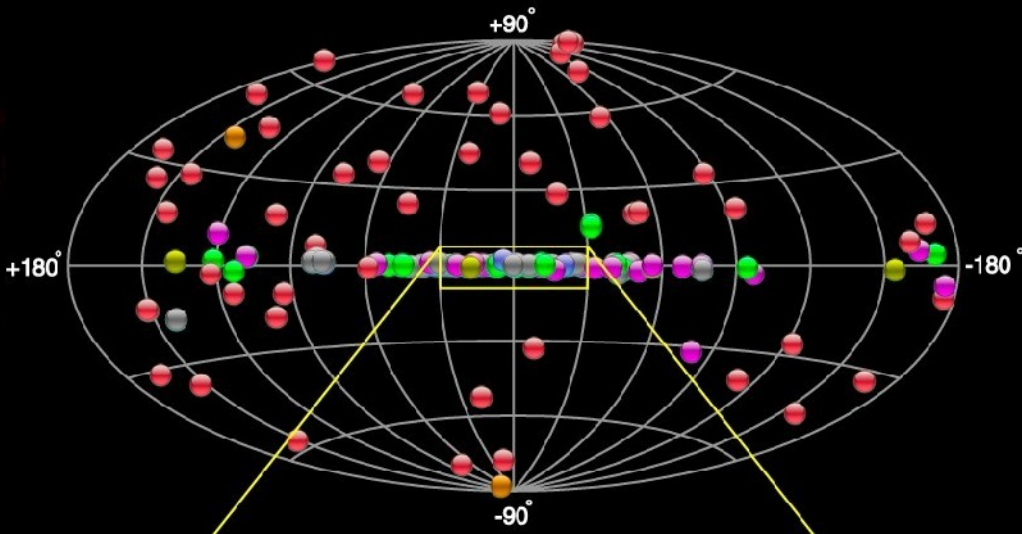
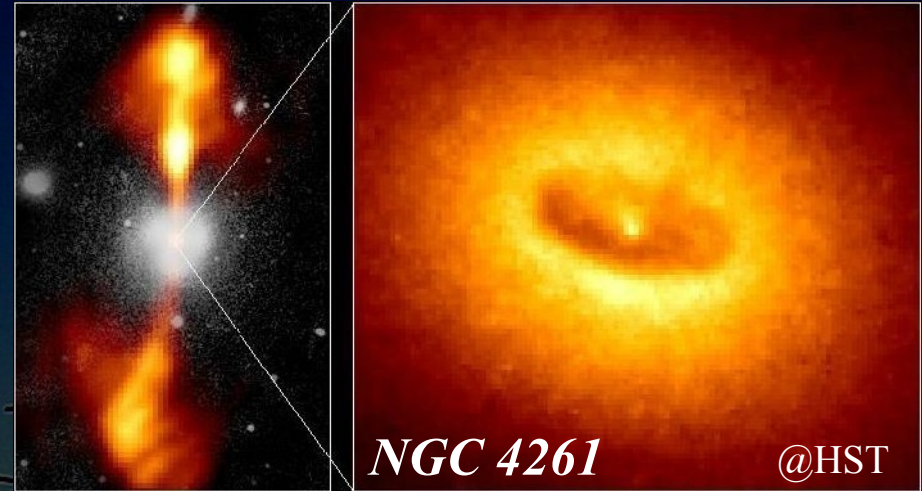
Accélérateurs sombres – Sans contreparties

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



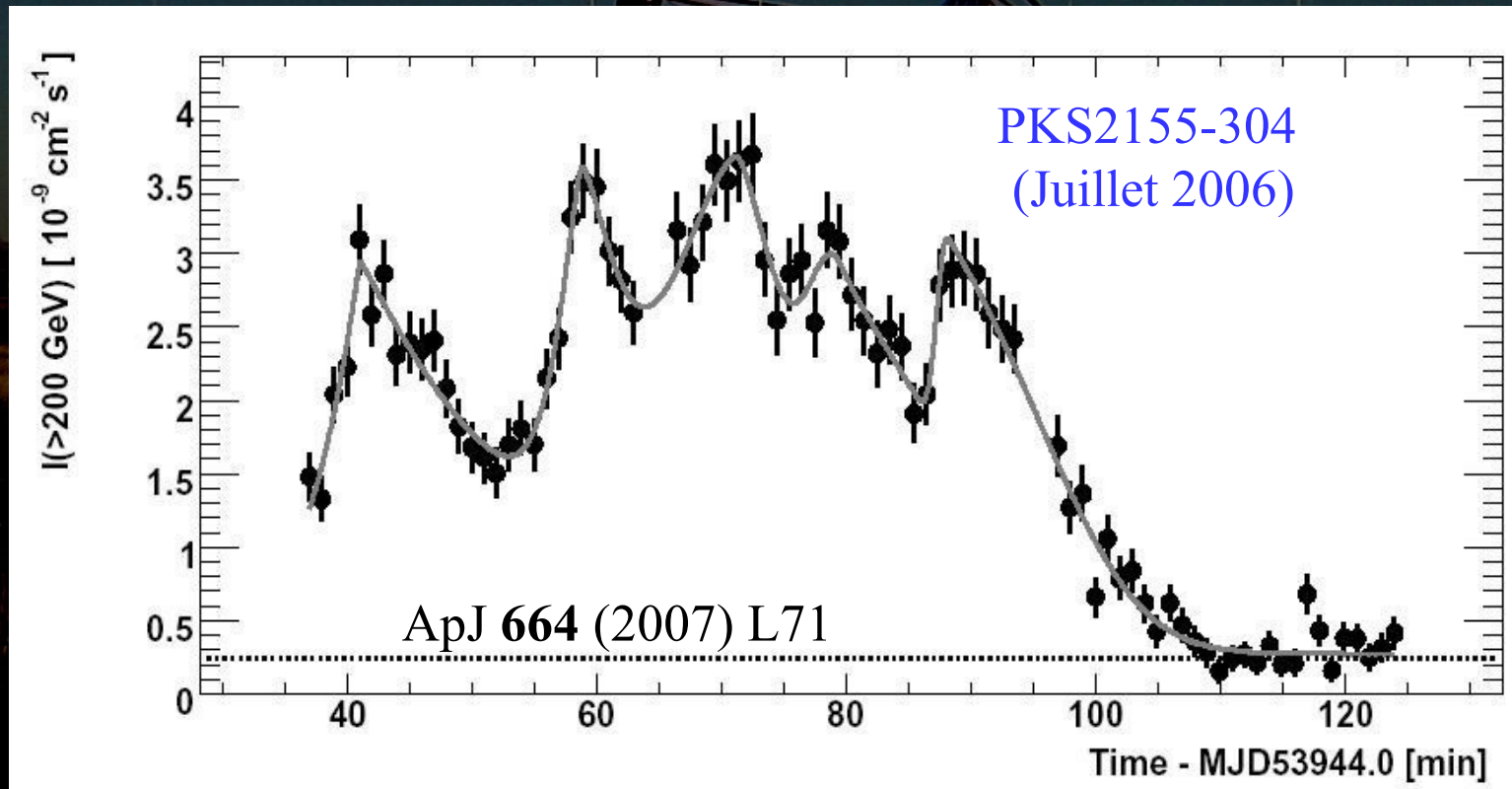
Noyaux Actifs de Galaxie

- ❑ 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

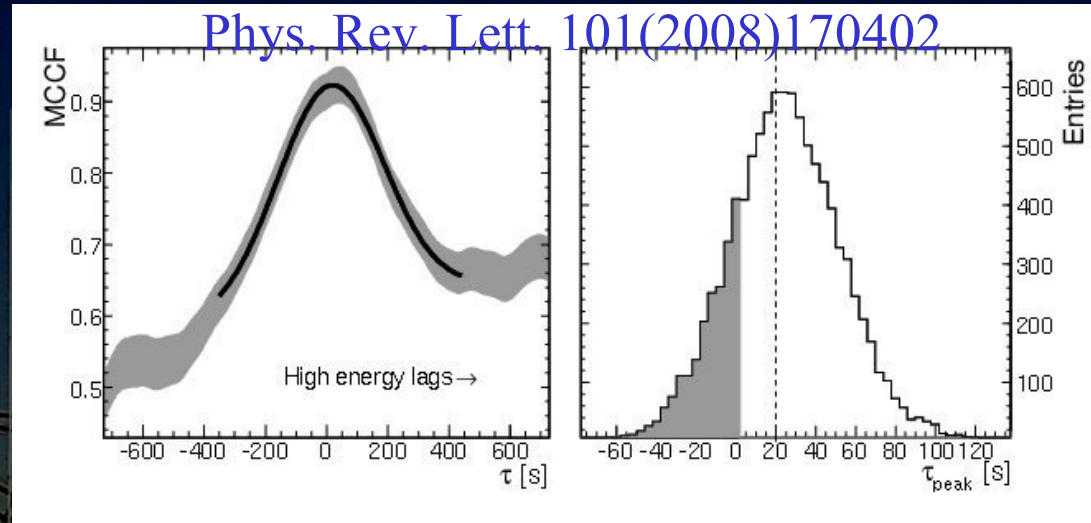


Tests de l'invariance de Lorentz

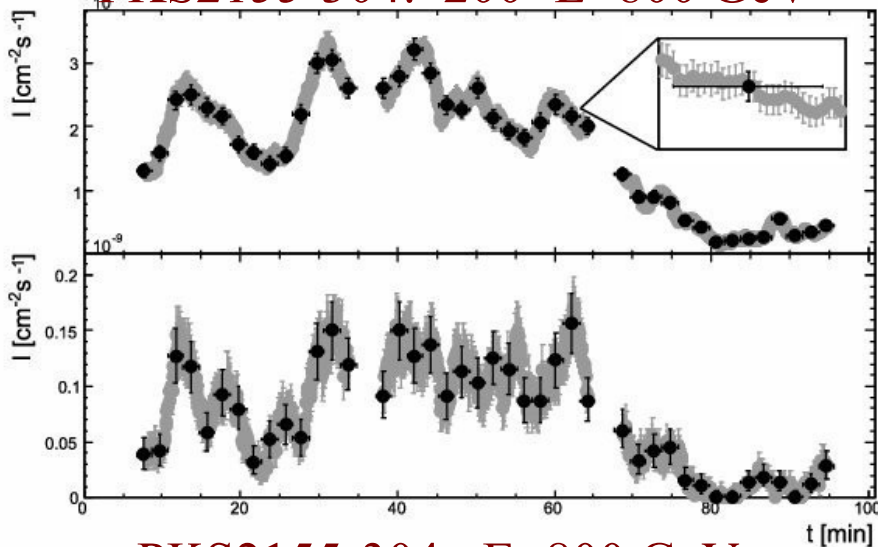
- Distances cosmologiques et variabilité permettent de tester la constance de « c »
- Recherche d'écart temporel entre différentes gammes d'énergie
- Limite: 73 s TeV^{-1} (95% CL)
- Limite inférieure sur l'échelle de la Gravité Quantique

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

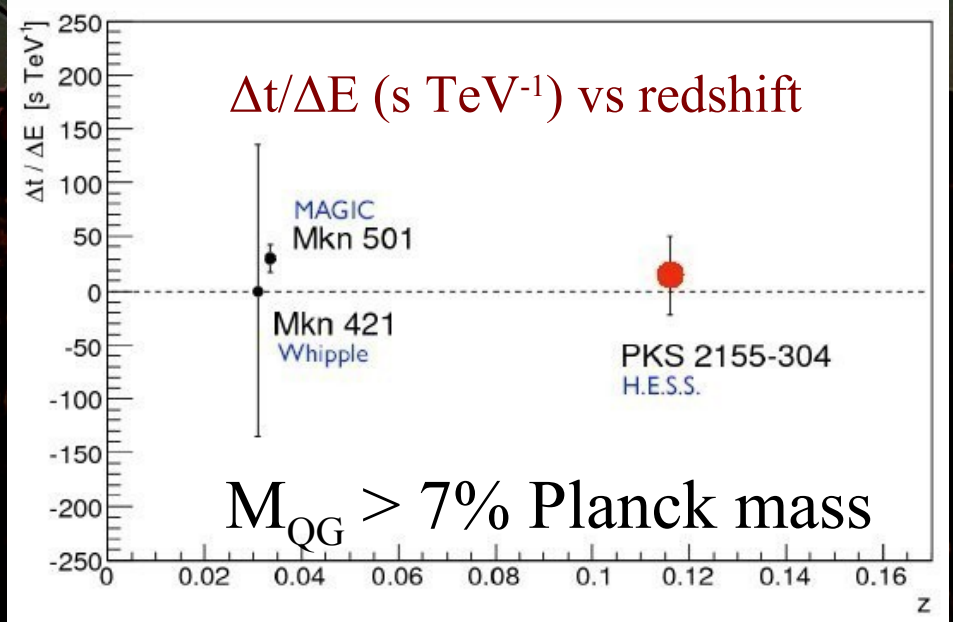
Phys. Rev. Lett. 101(2008)170402



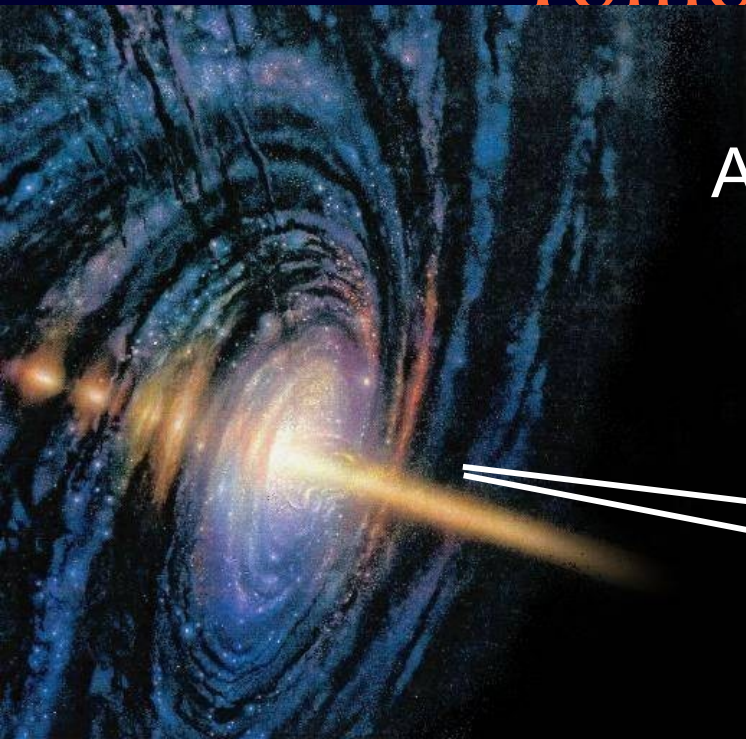
PKS2155-304: $200 < E < 800 \text{ GeV}$



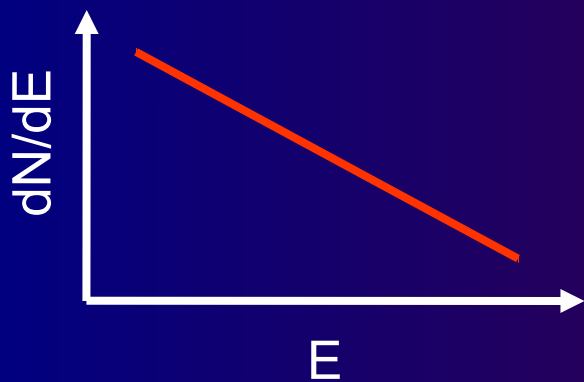
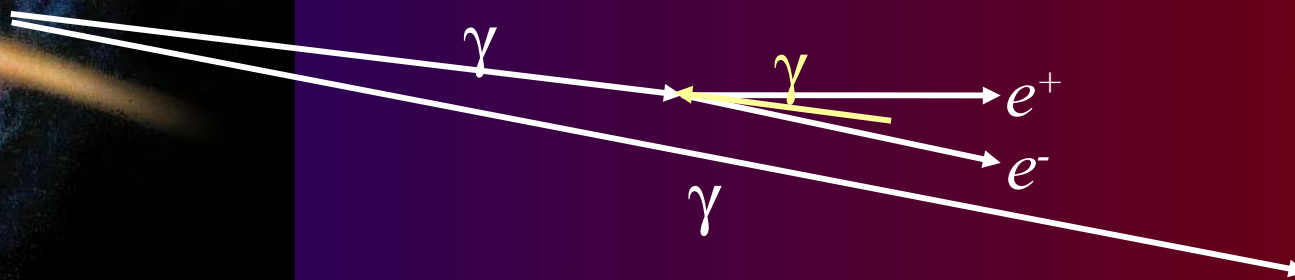
PKS2155-304: $E > 800 \text{ GeV}$



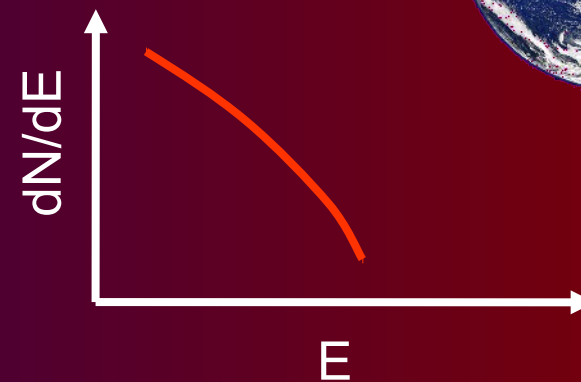
Tomographie de l'Univers



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



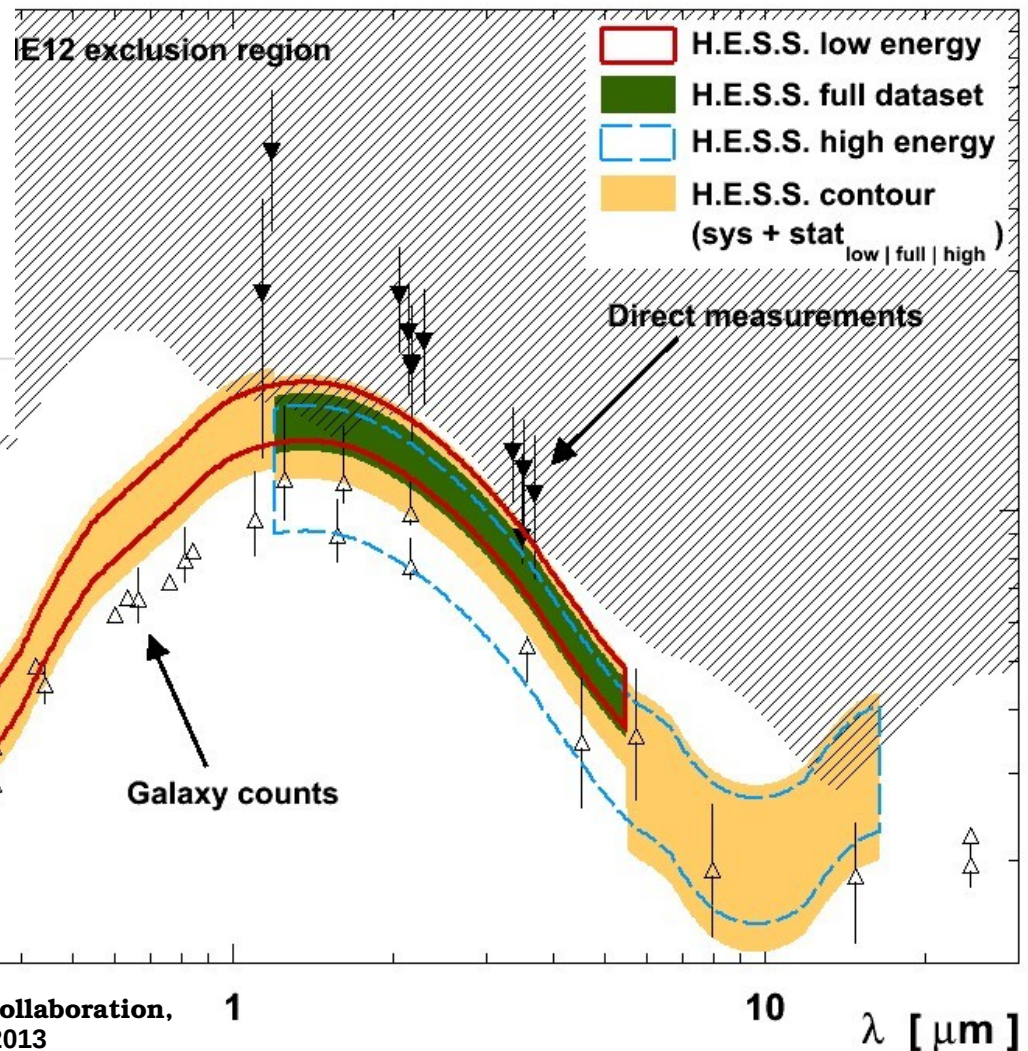
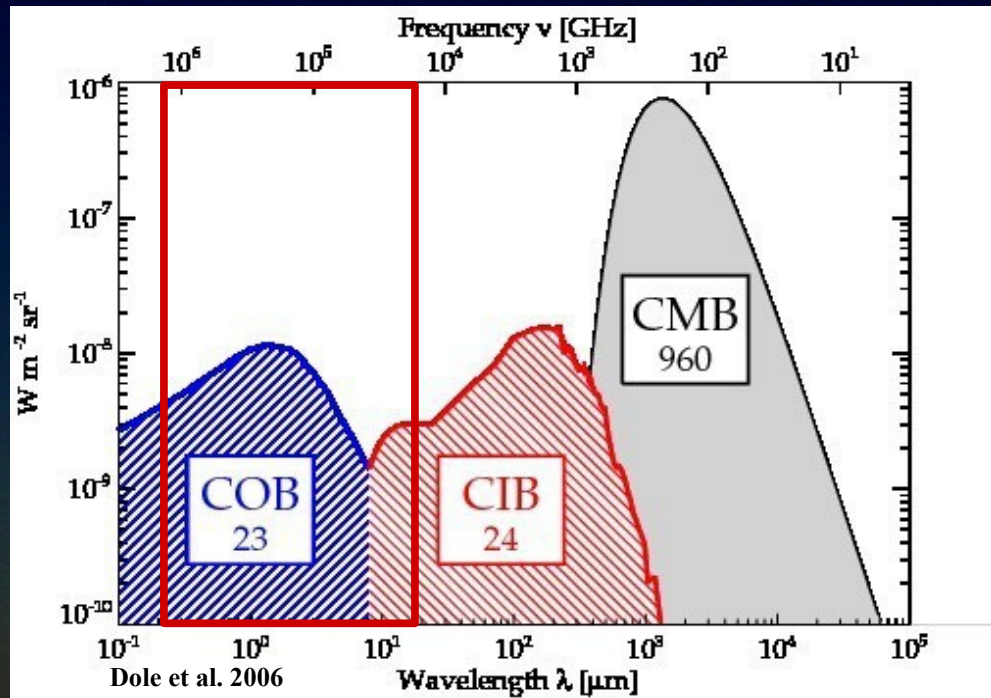
Physique des objets compacts,
accélération/absorption/jets,...



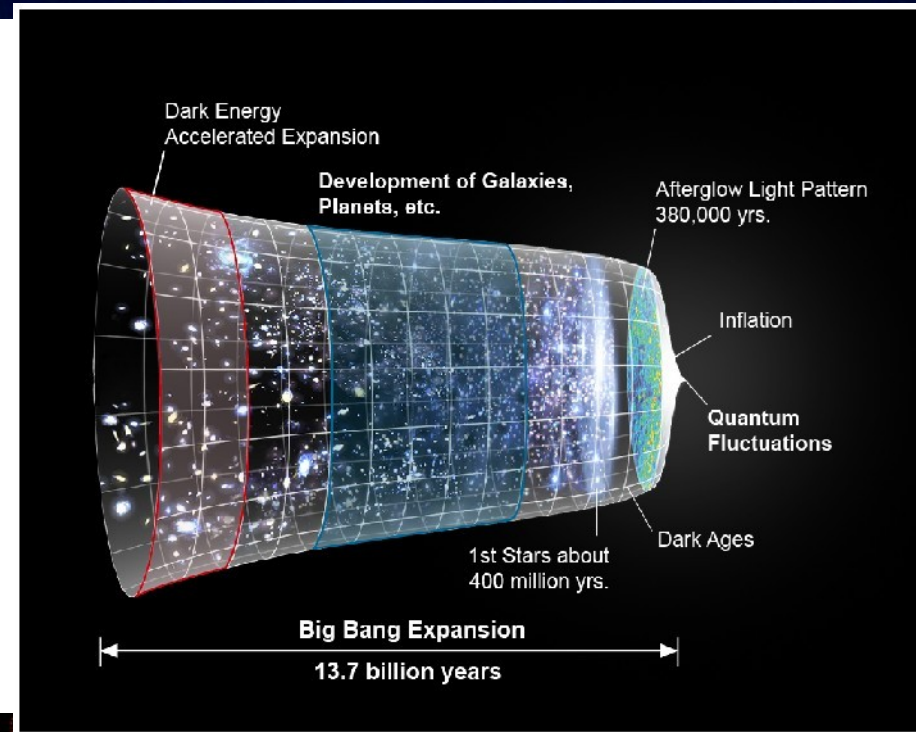
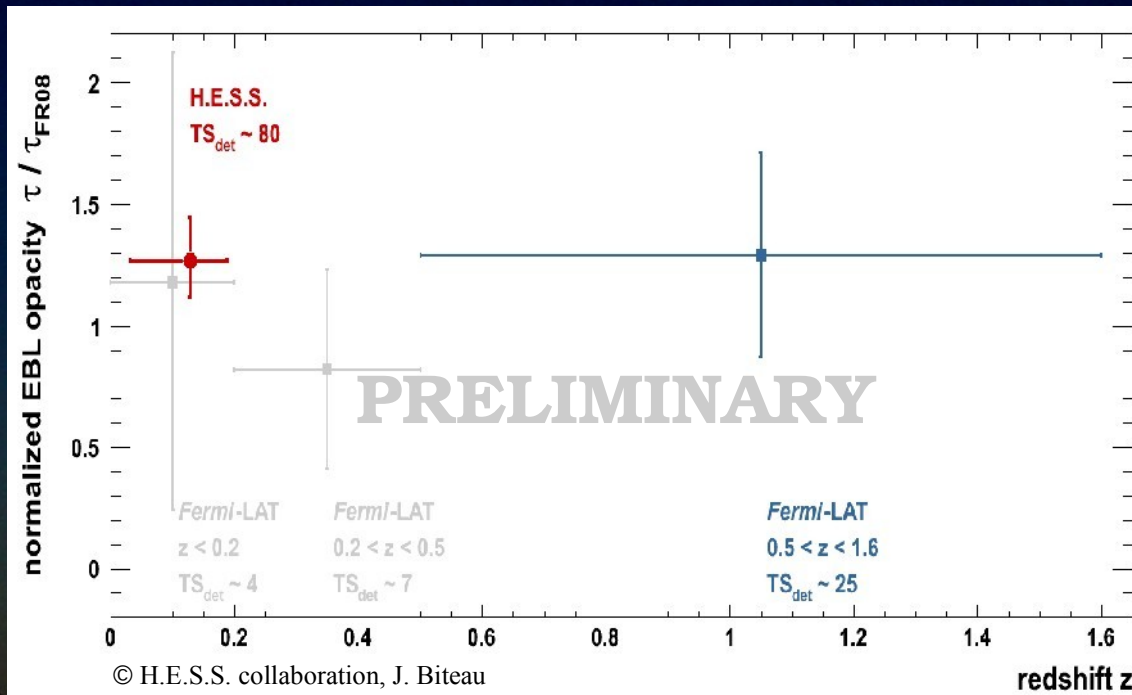
Mesure du fond infrarouge
(\rightarrow Cosmologie)

Mesure du fond EBL

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

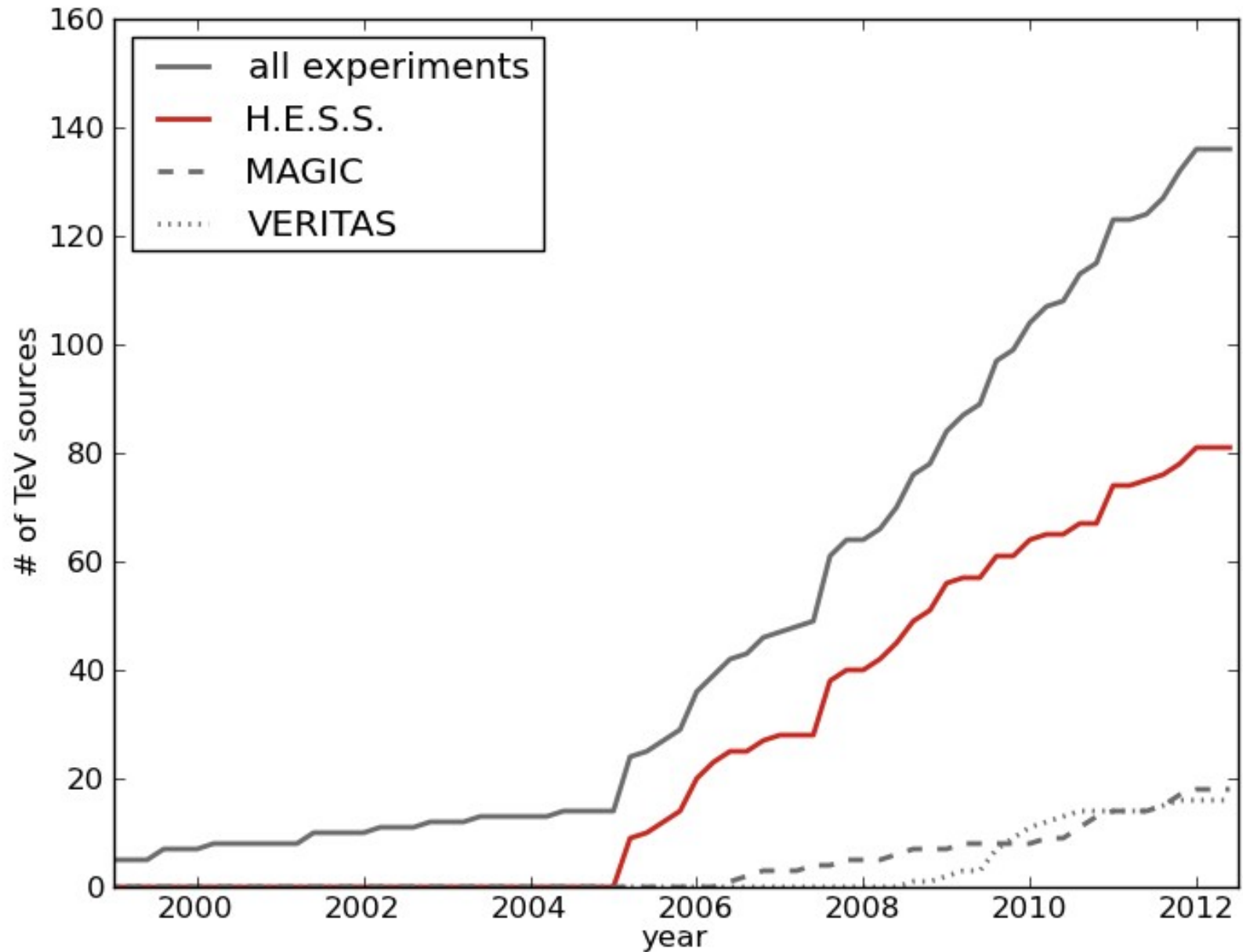


Un exemple de complémentarité



- 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



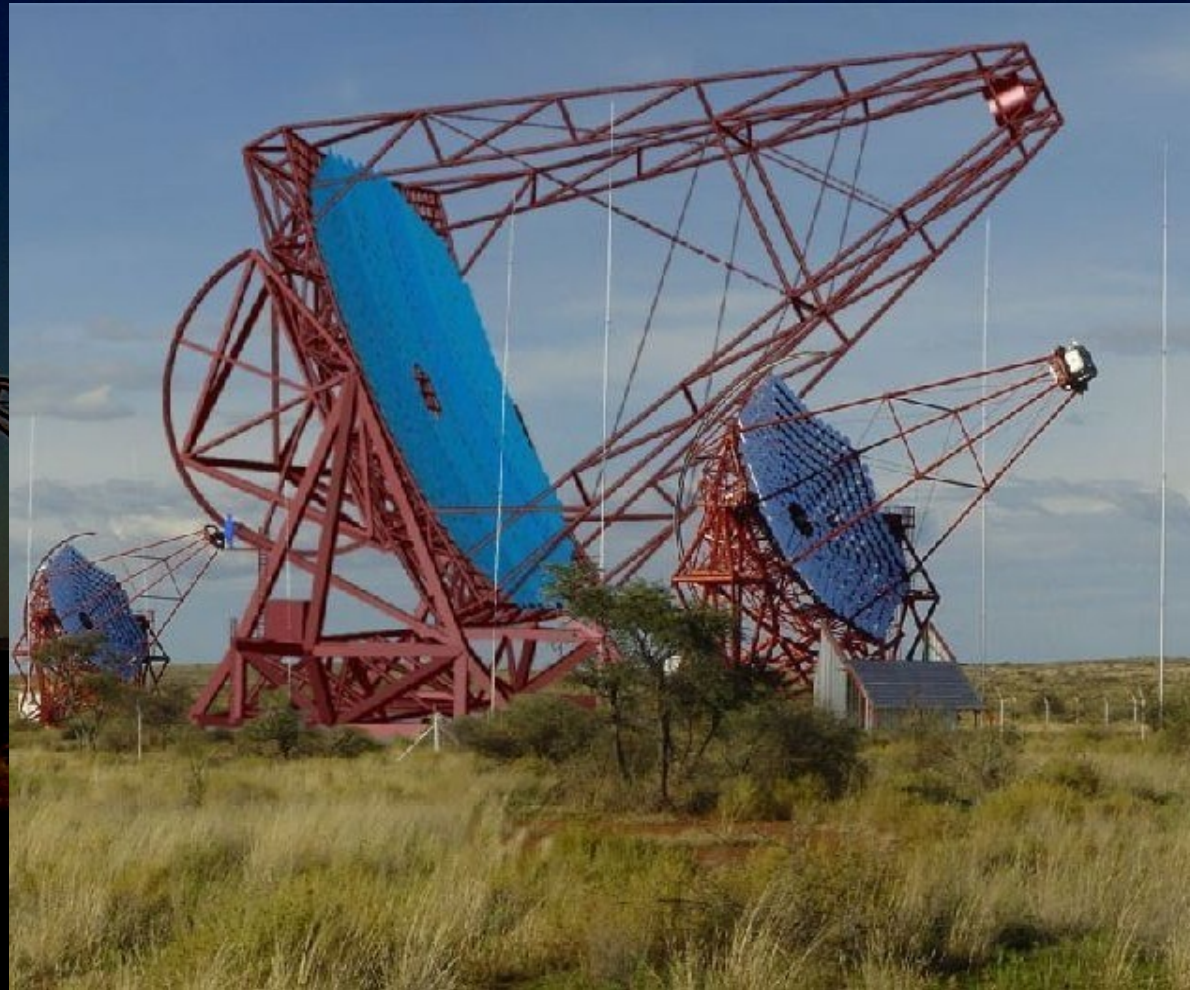


HESS-II

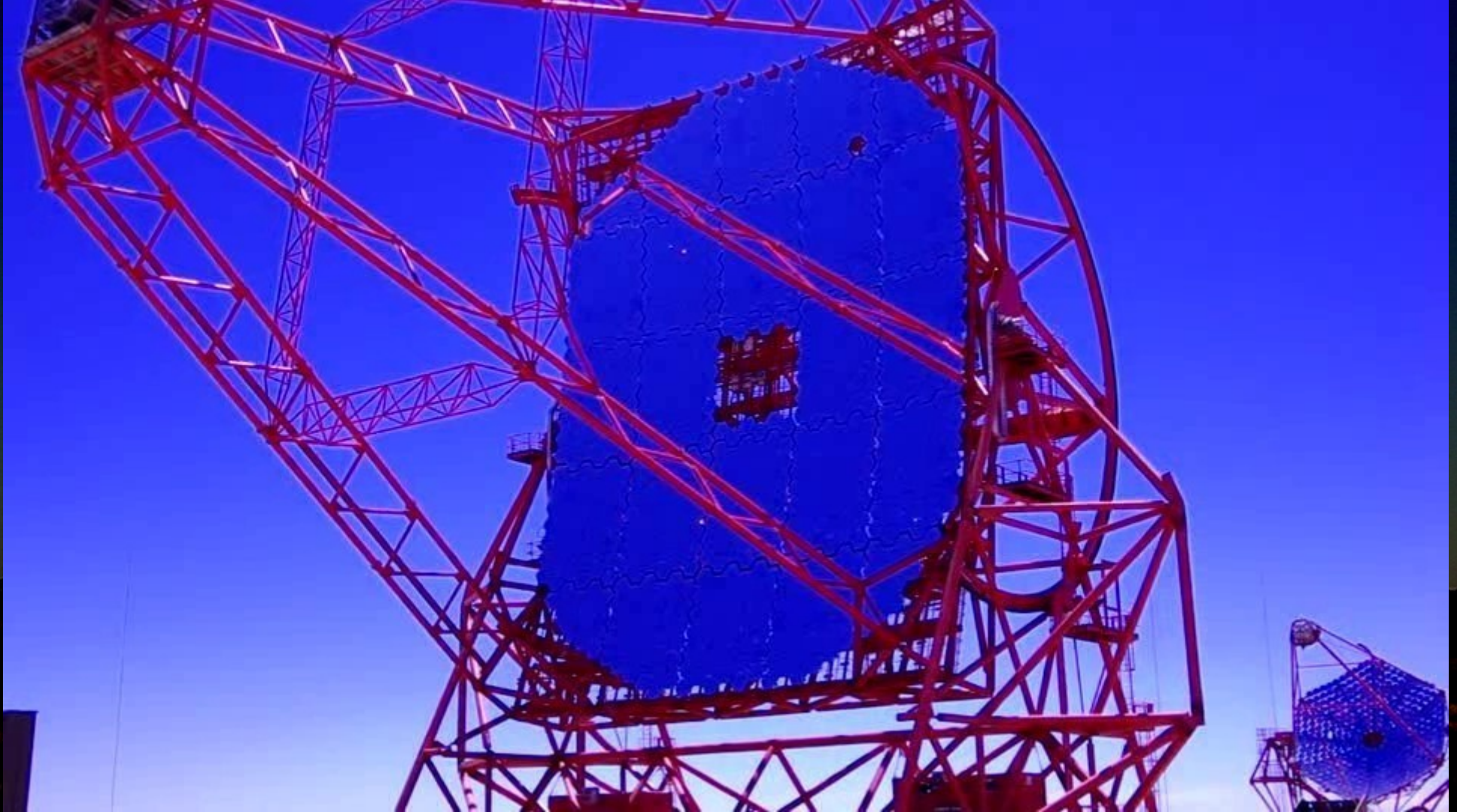
Un nouveau géant

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

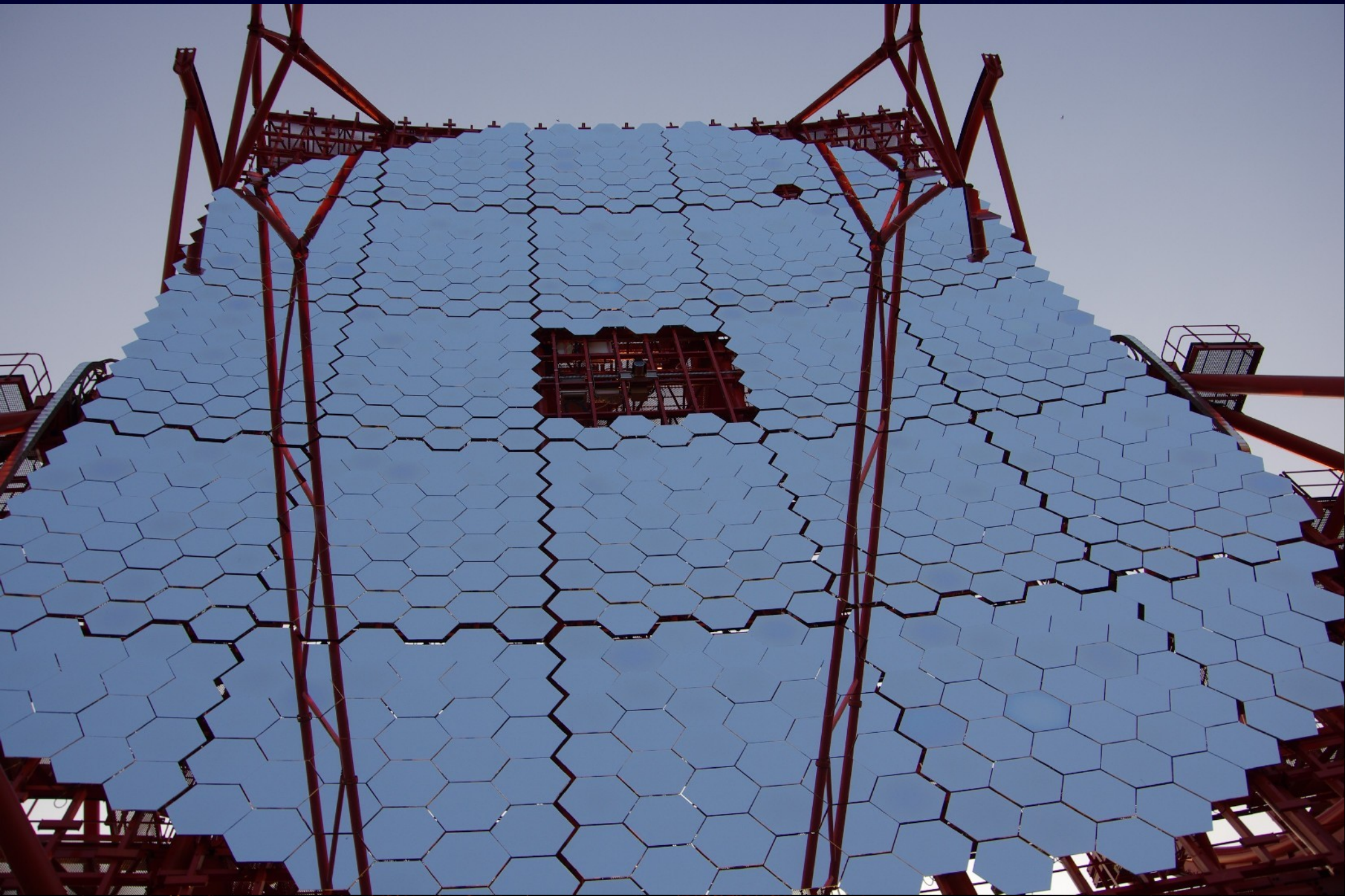


Le plus grand réflecteur optique au monde (600 m²)

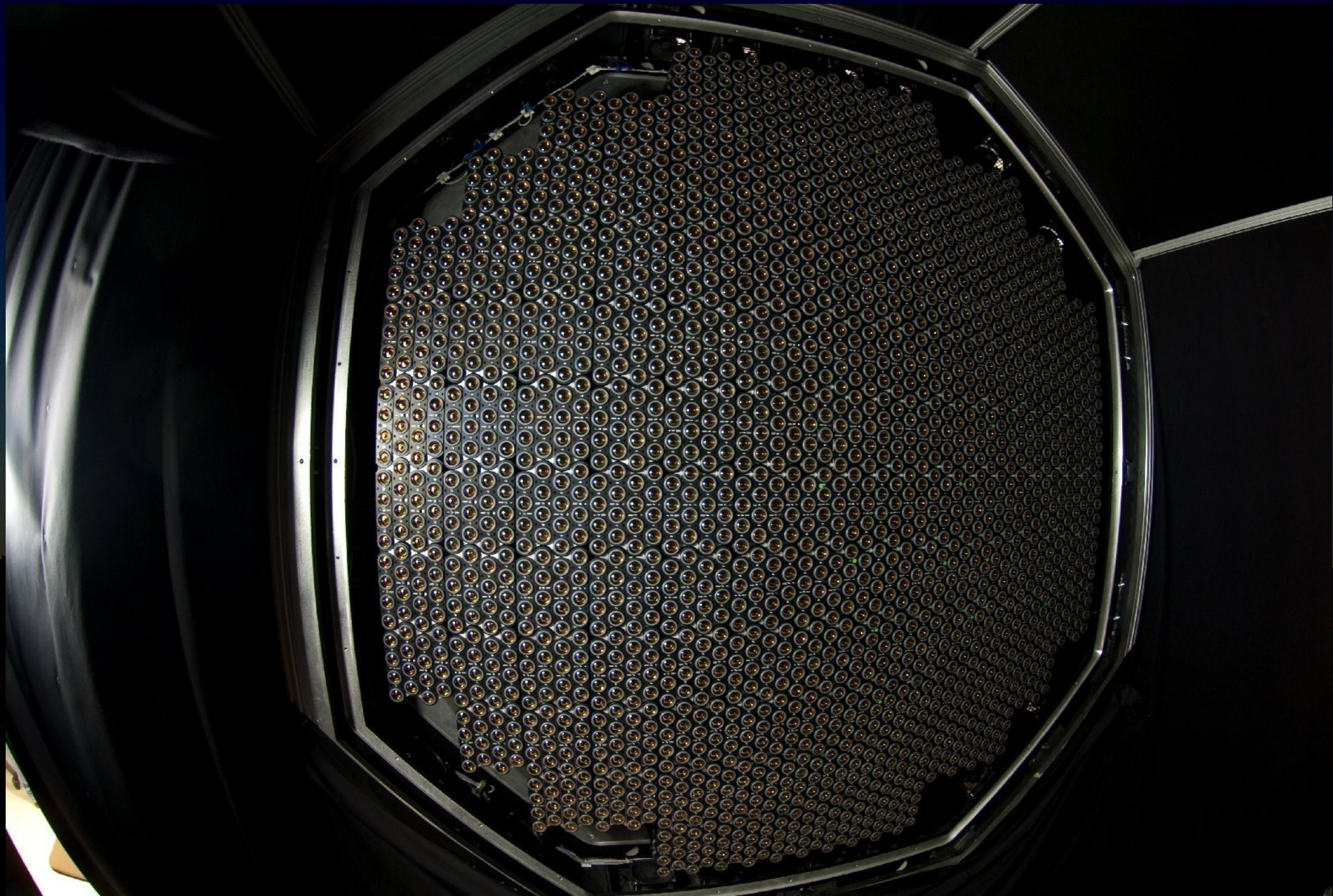
Structure porte-miroirs



Le miroir









L'inauguration – 27/09/2012

Cliché : C. Foehr
H.E.S.S. Collab.



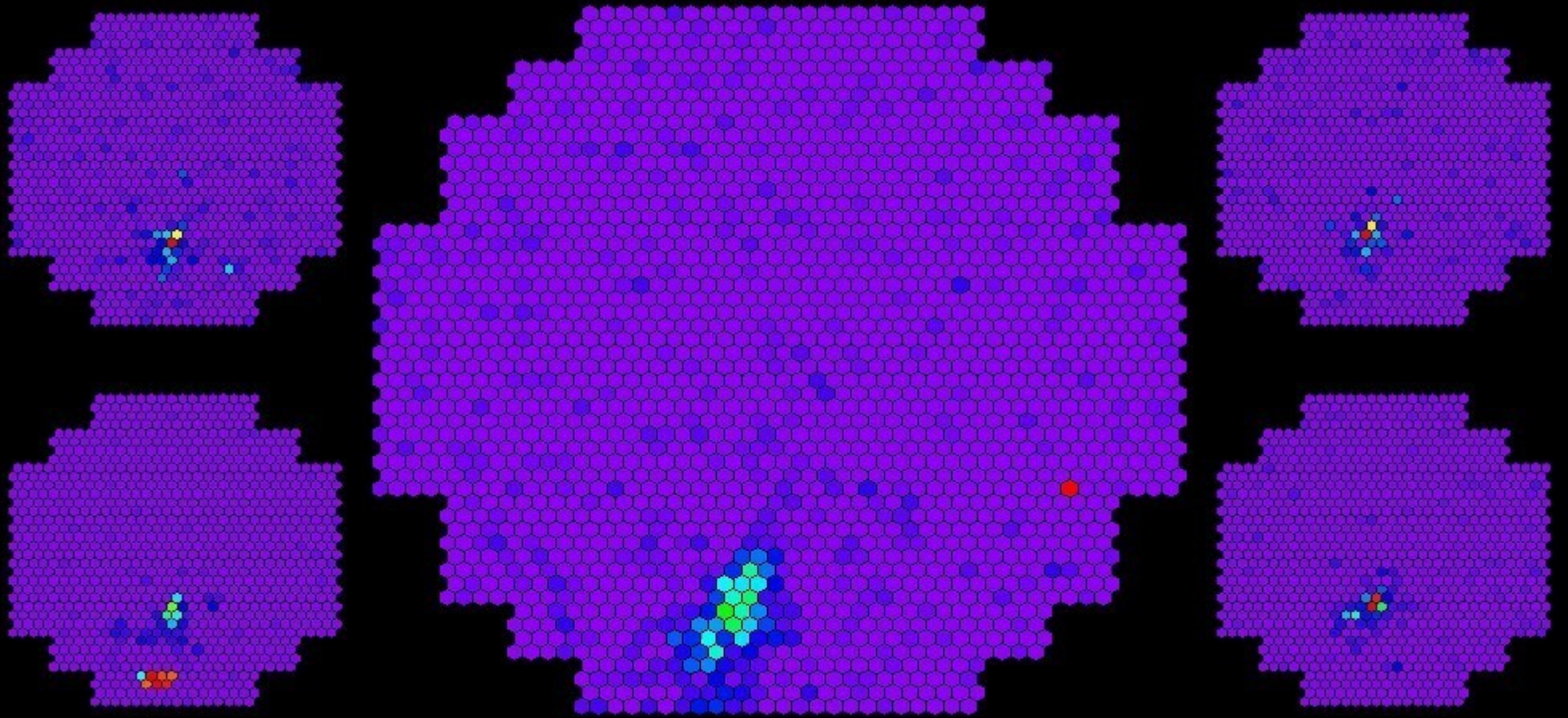
Journée portes ouverte

Cliché : C. Foehr
H.E.S.S. Collab.

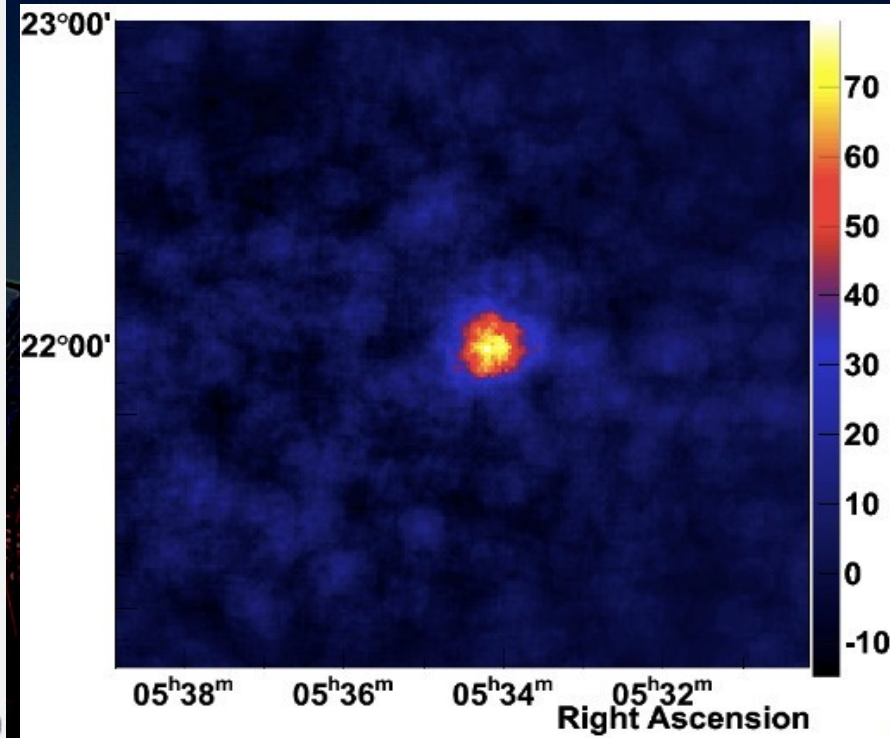
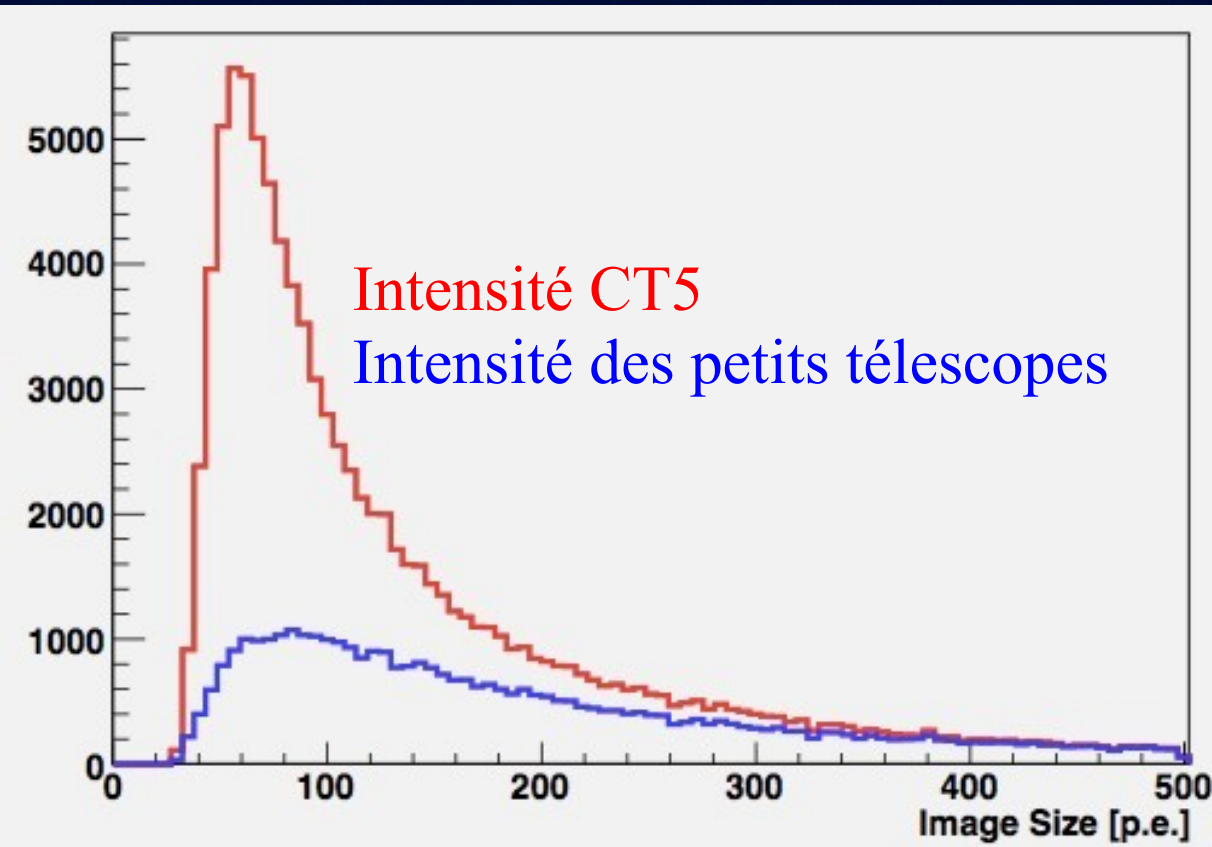




Les premiers événements



les premiers résultats – La nébuleuse du Crabe



Une page de pub



Merci



Backup

