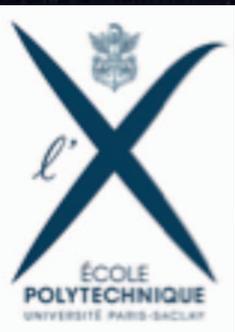


Introduction à l'astronomie gamma avec H.E.S.S.



LLR
Laboratoire
Leprince-Ringuet



Introduction à l'astronomie gamma avec H.E.S.S.

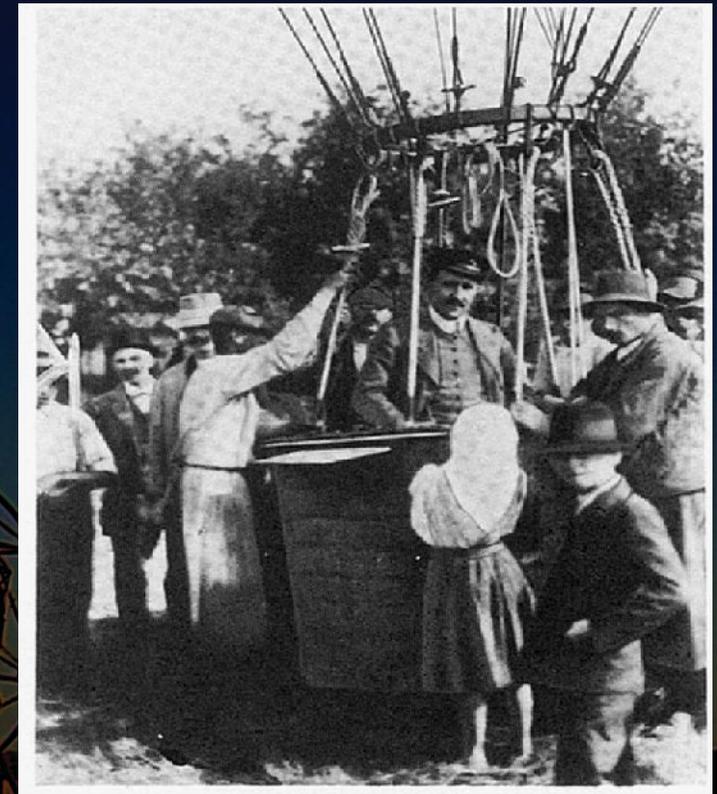
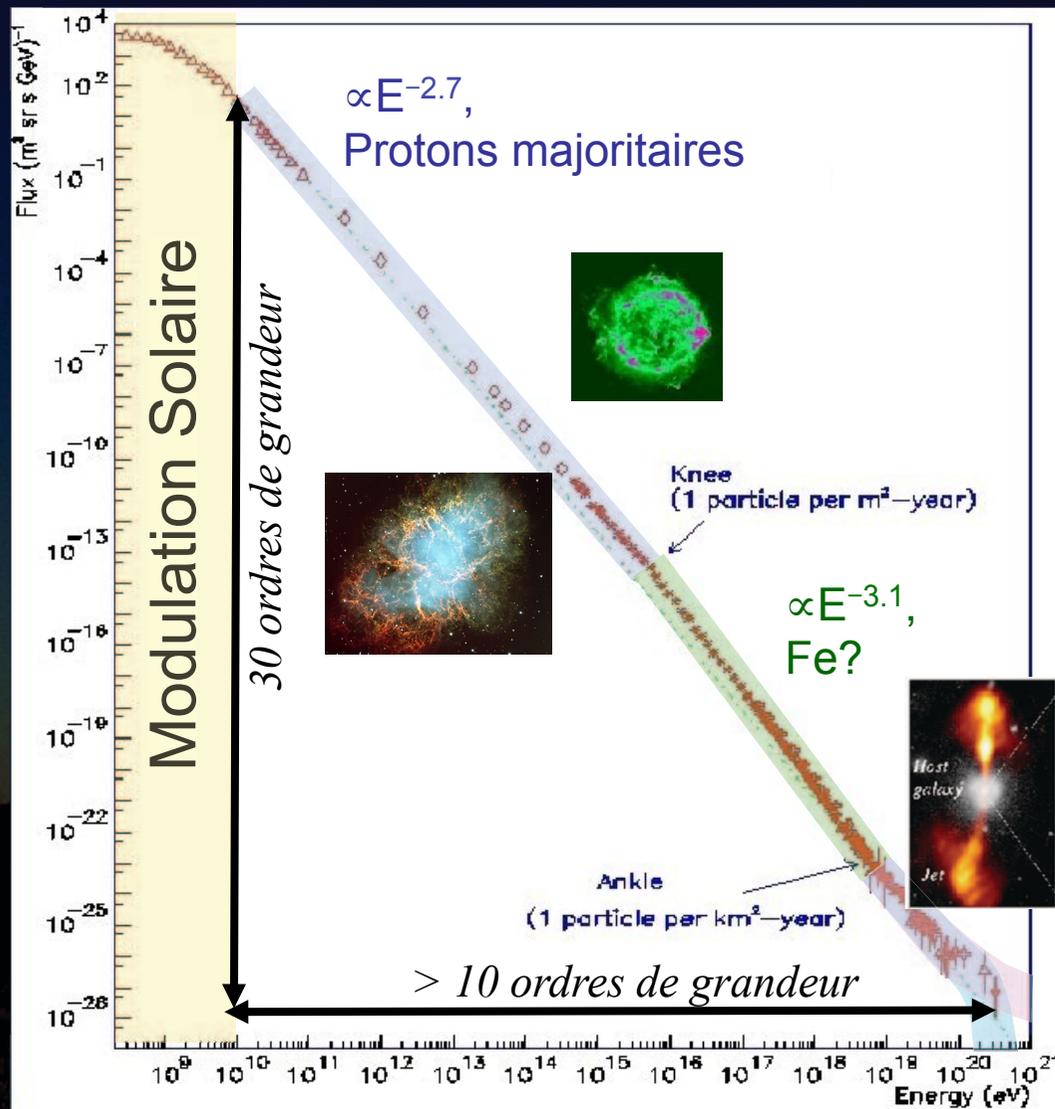
- Les objectifs scientifiques
- Les méthodes d'observation
- Les instruments





Pourquoi l'astronomie gamma ?

Le mystère des rayons cosmiques

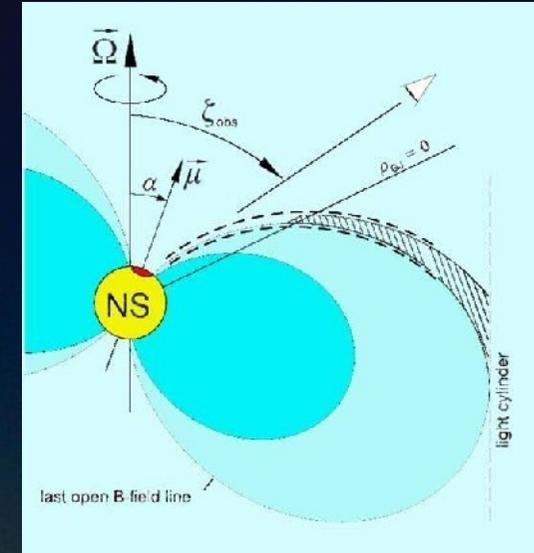


Découverte
Vol en Ballon
Victor Hess, 1912

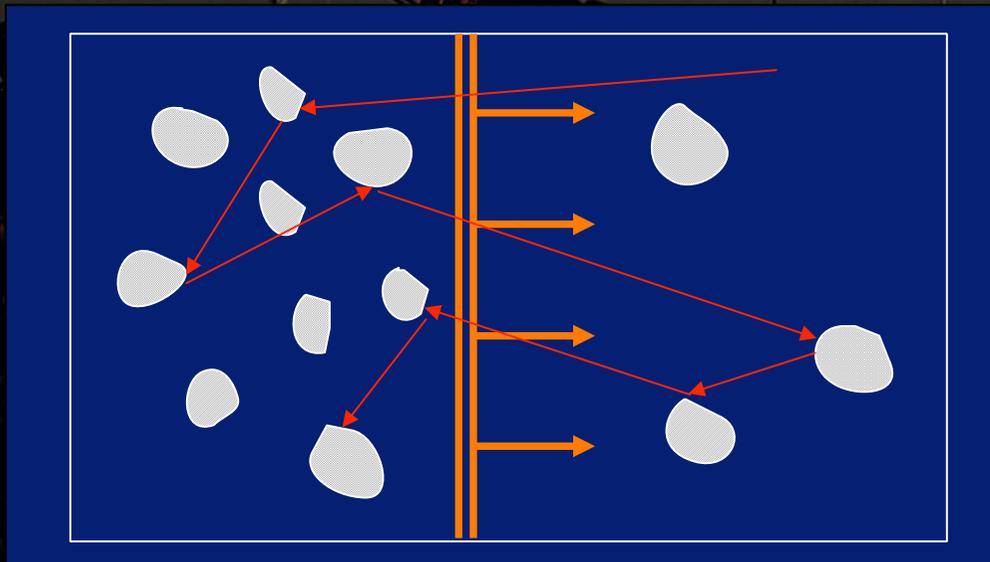
- ❑ Découverts en 1912 (Victor HESS)
- ❑ 10 ordres de grandeurs en énergie, 30 en flux
- ❑ Origine encore inconnue (galactique $< 10^{15}$ eV, extragalactique au dessus ?)

Comment accélérer des particules?

- Champs électriques intenses:
pulsars (Étoiles 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

$$\frac{dN_e}{dE_e} \propto E_e^{-2}$$

E

Comment lever le voile ?

Les suspects :

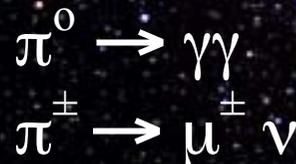
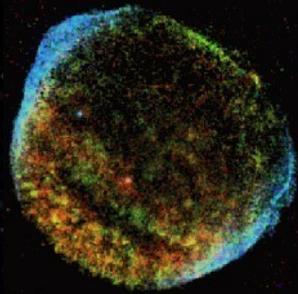
Restes de supernova,
noyaux actifs de galaxie,

Mais les rayons cosmiques
sont déviés...

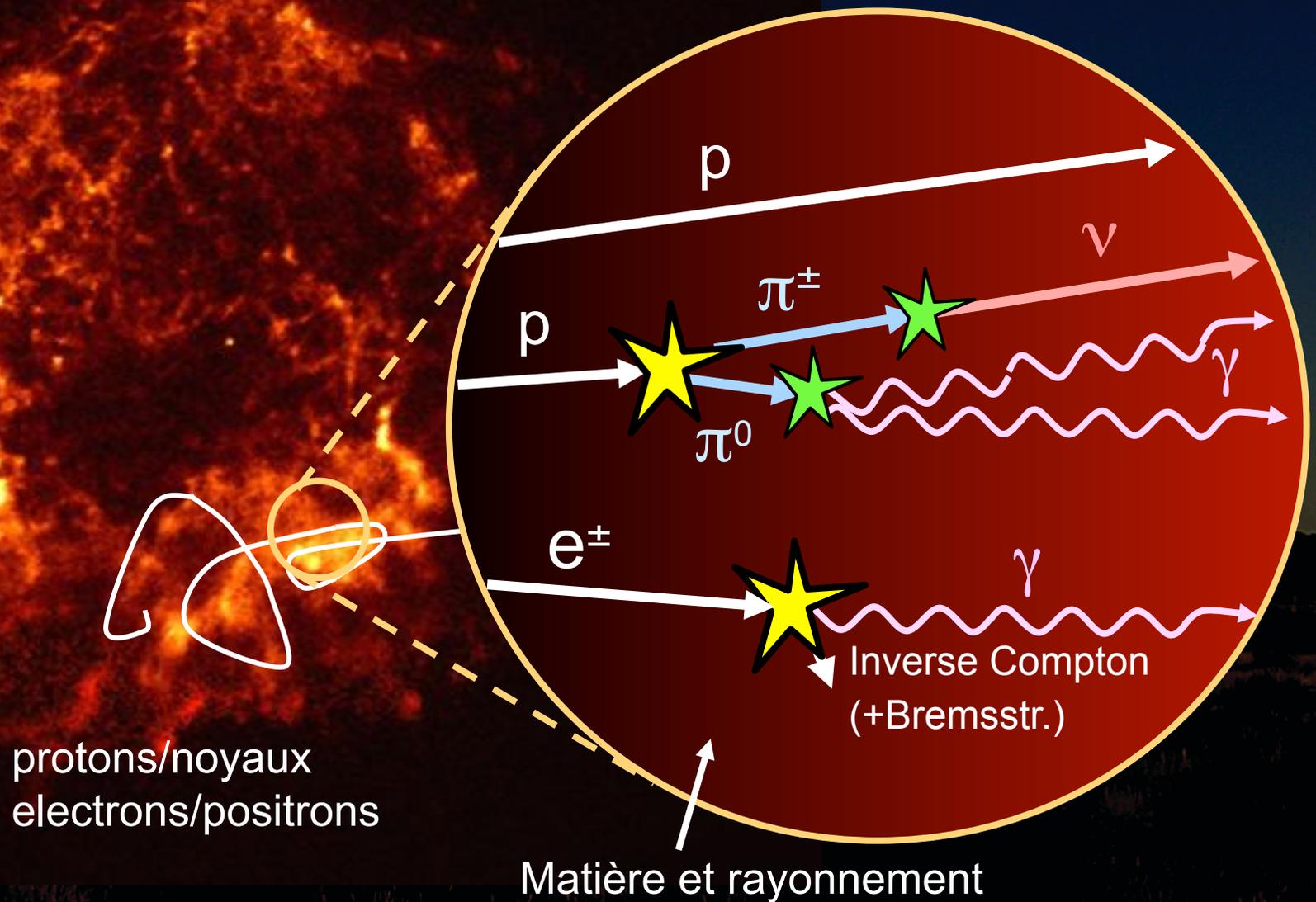
→ Utiliser des
messagers neutres
(secondaires)

Protons,
Noyaux
Électrons

~~Neutrons n~~
Neutrinos ν
Photons γ



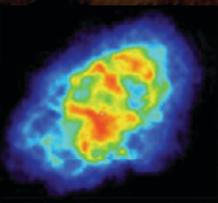
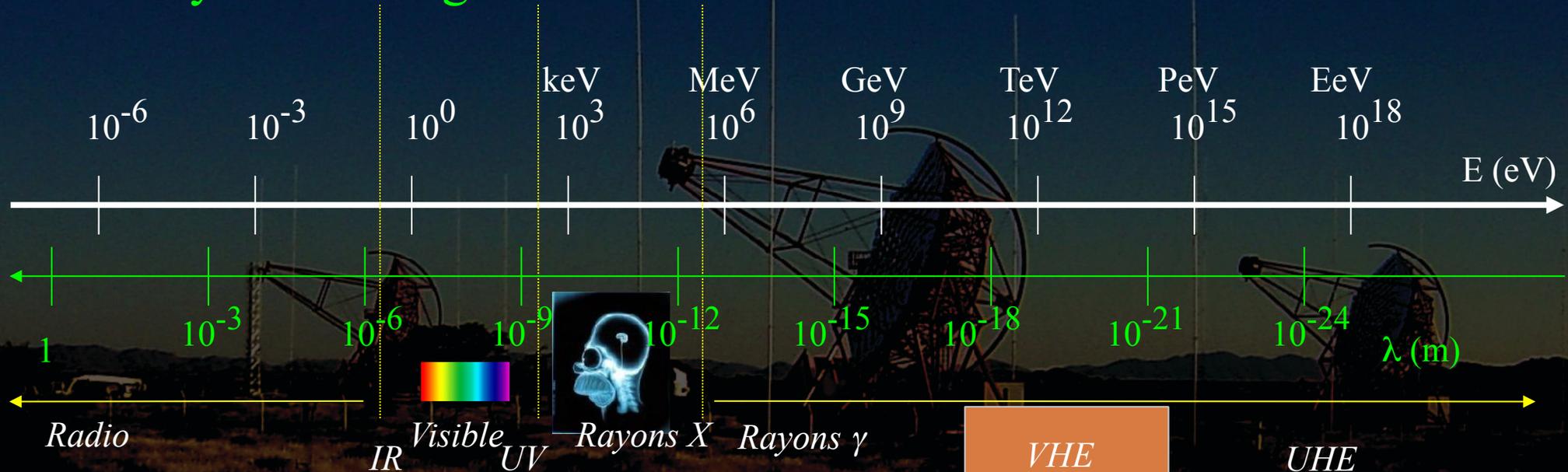
Emission Gamma



La lumière invisible



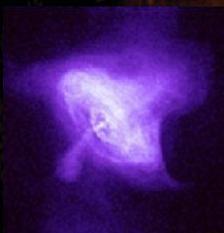
La lumière visible représente une octave sur près de 70 !
Le rayonnement gamma couvre 20 octaves à lui seul



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

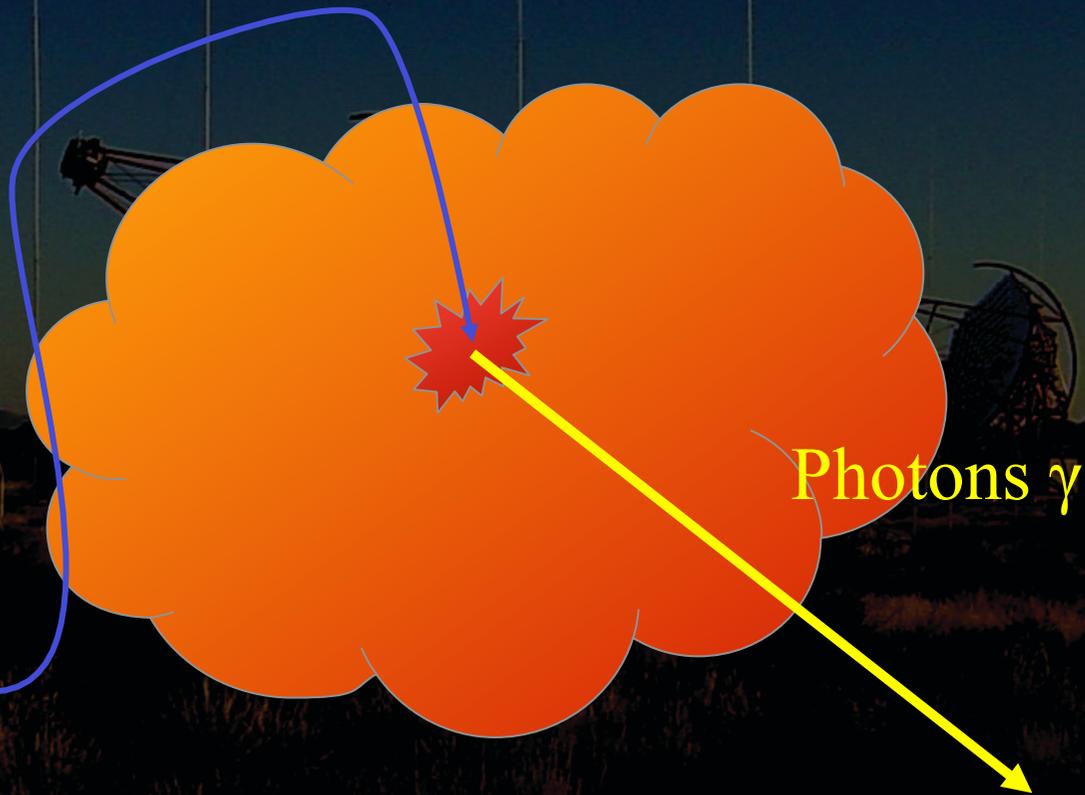
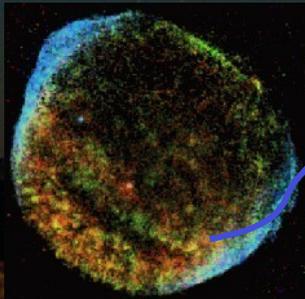


Objets extrêmement énergétiques, Processus non
thermiques (Accélération de particules dans des chocs)
Inverse Compton, Bremstrahlung, Annihilation,
Désintégration de Pions

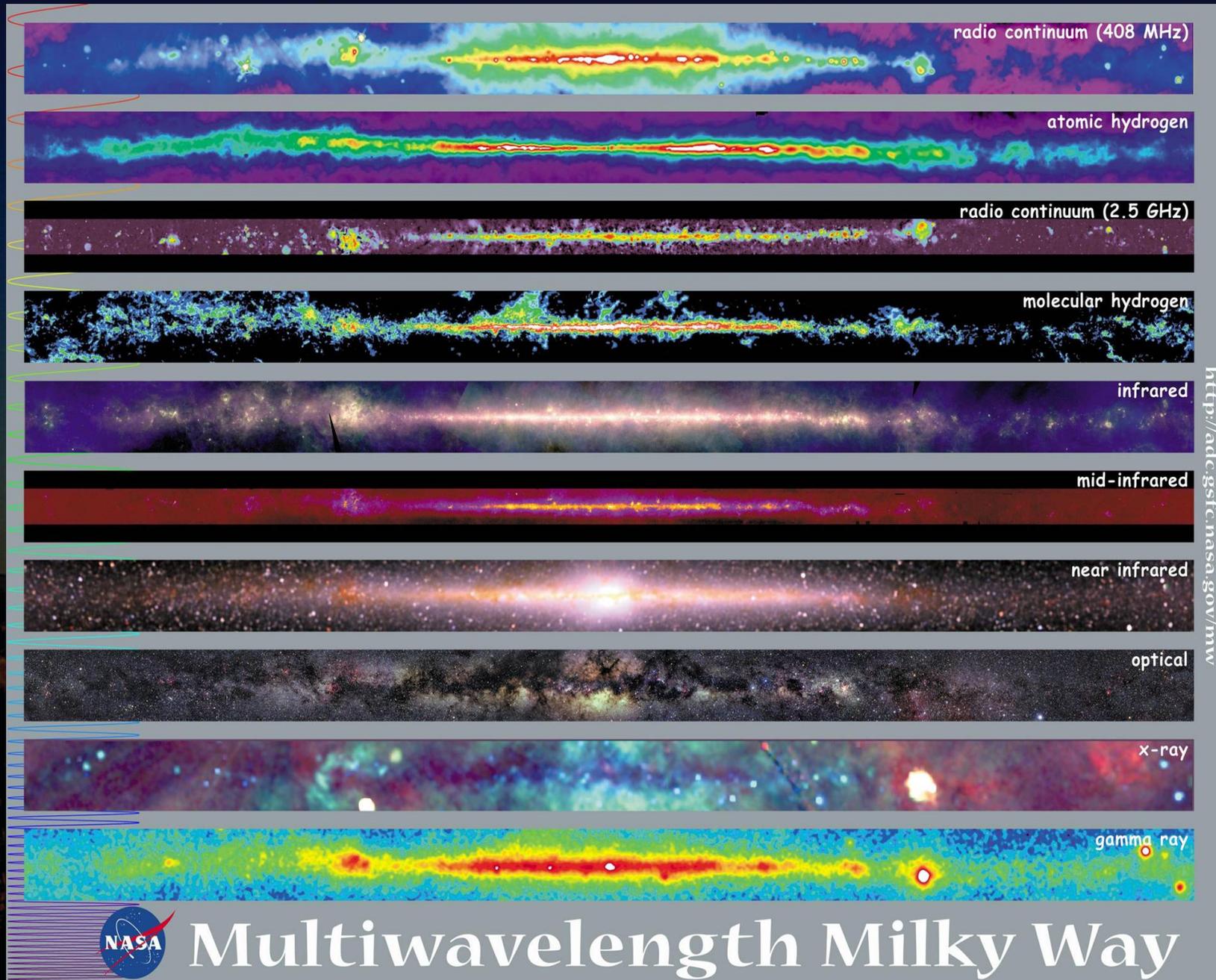


Une astronomie inhabituelle

- ❑ Les objets visibles ne sont pas forcément les sources de RC !
- ❑ Les protons peuvent voyager « discrètement » !
- ❑ Les électrons laissent toujours une trace (interaction avec le CMB)

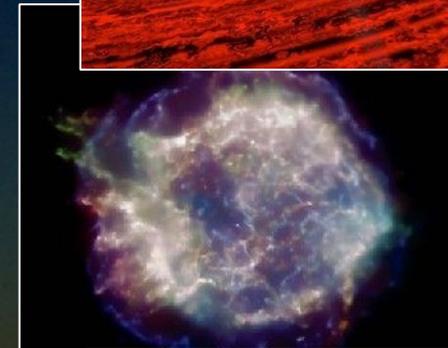
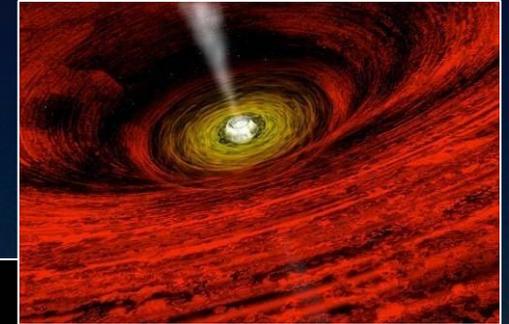
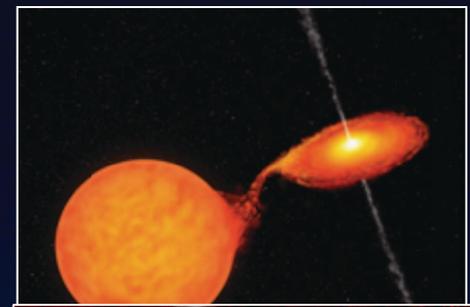


La voie Lactée en multi-longueur d'ondes



Questions Ouvertes

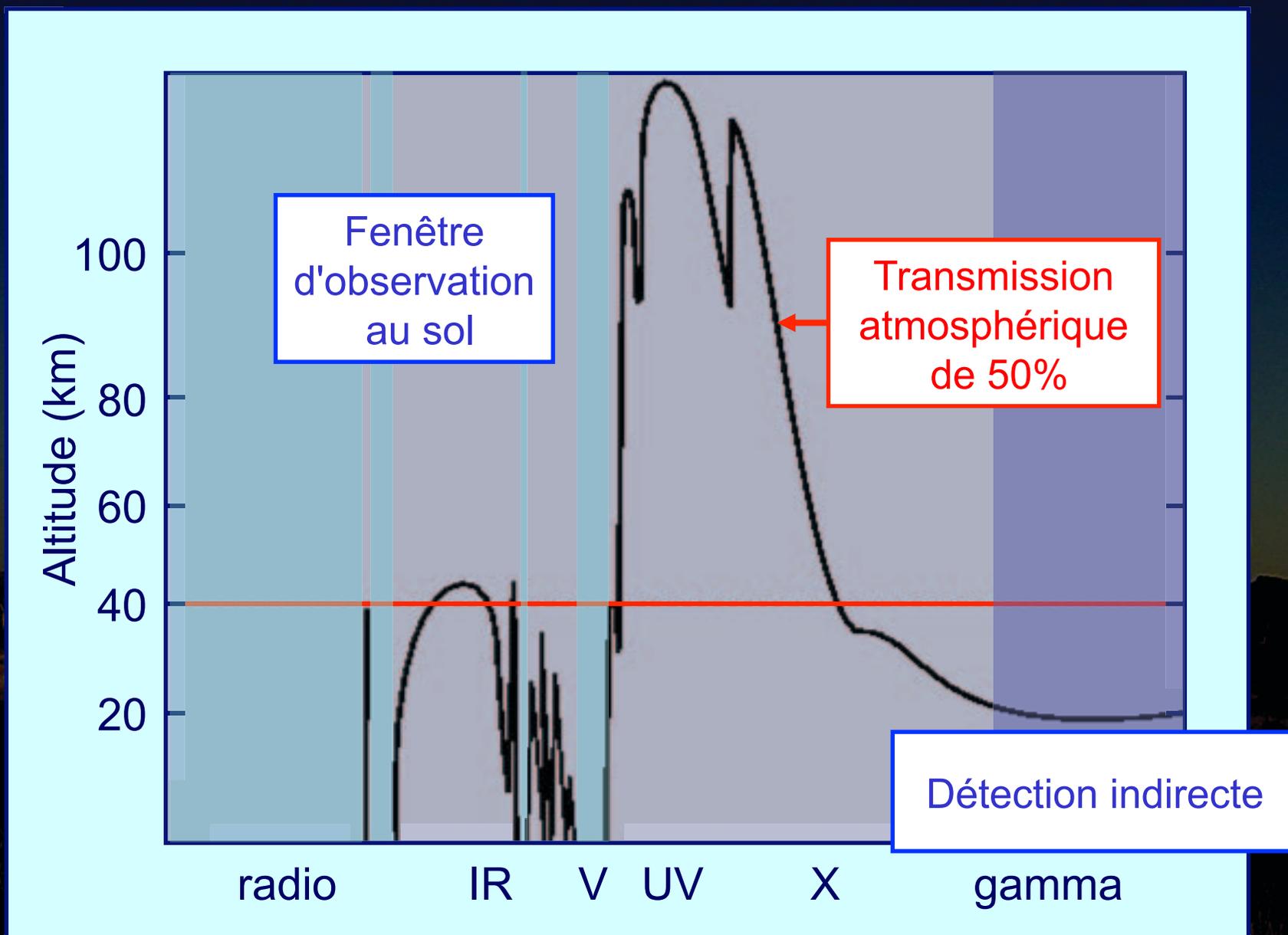
- ❑ Sources de rayons cosmiques
- ❑ Mécanismes d'accélération, type de particules
- ❑ Nouvelle physique ? (Matière noire, ...)
L'Univers comme un vaste laboratoire
- ❑ Propagation des particules dans l'Univers
(interaction avec la matière/rayonnement)
- ❑ Influence sur la formation des grandes structures, lien avec la cosmologie





Comment observer les gamma ?

Où observer?

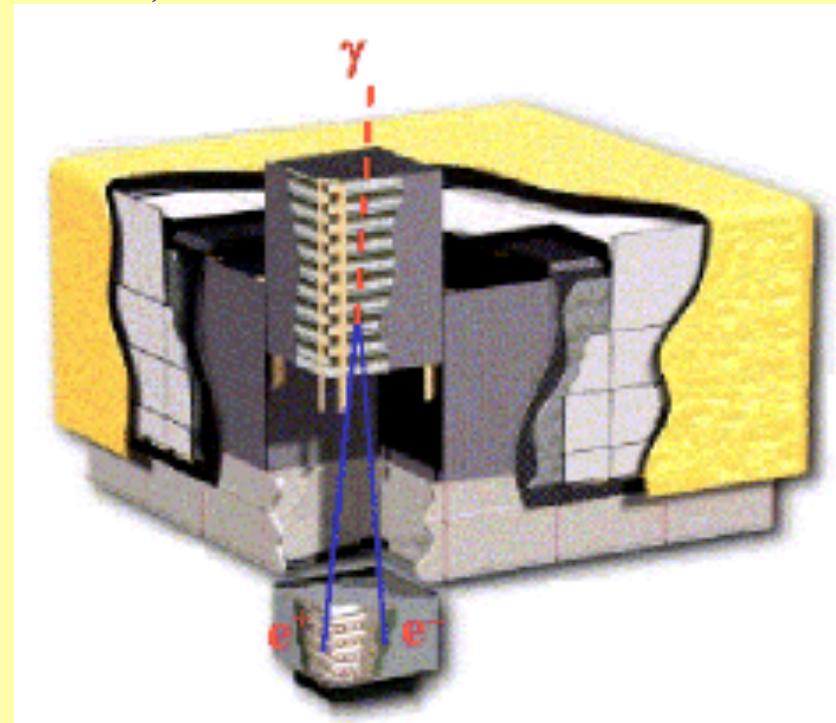


Les détecteurs spatiaux

Fermi et Agile ($20 \text{ MeV} < E < 300 \text{ GeV}$)

Trois composantes dans l'instrument

- ❑ **Dôme antikoïncidence**
→ élimine les particules incidentes chargées
- ❑ **Trajectographe** : empilement de plaques de matériau (W, Pb) pour la conversion du γ en paire e^+e^- et de plans de détecteur à pistes de silicium (18pl ans pour Fermi)
→ mesure de direction
- ❑ **Calorimètre** (CsI (Tl), $10 X_0$ pour Fermi) → mesure de l'énergie

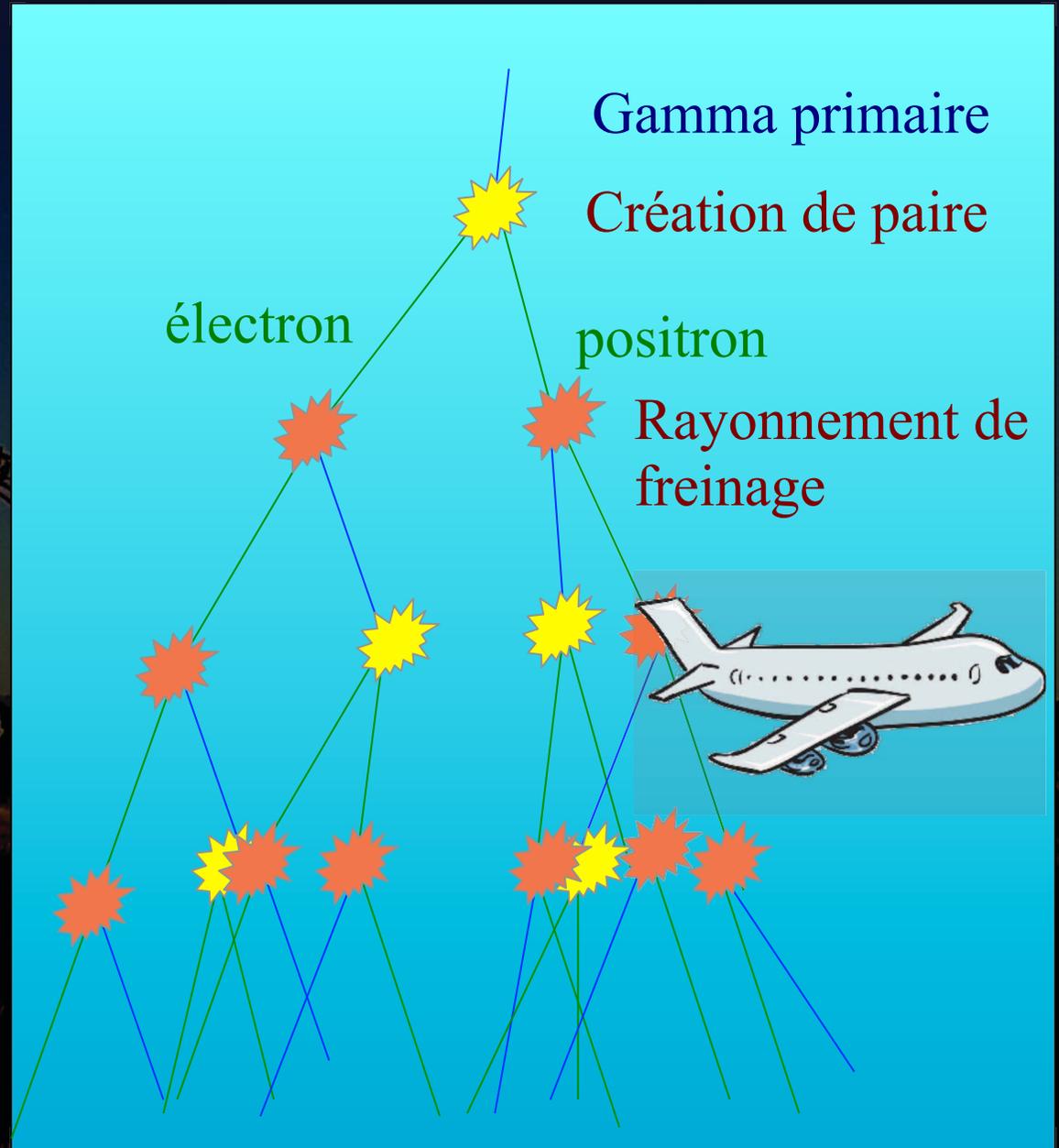


Large Area Telescope (LAT) du satellite Fermi ex GLAST (NASA)
lancé en Juin 2008

Limites en flux et en énergie induites par la taille et la masse du détecteur

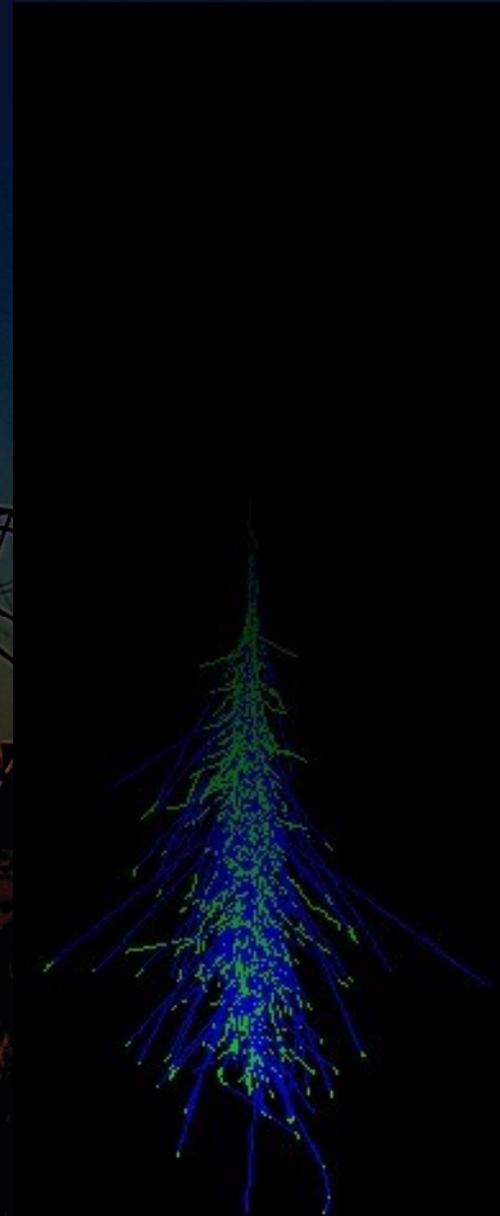
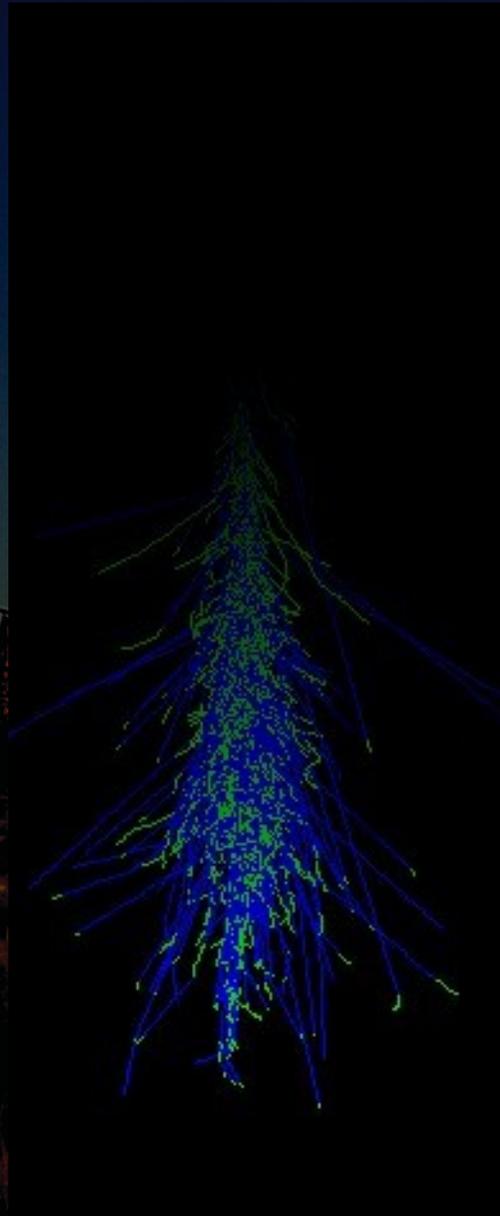
Cascades atmosphériques

- ❑ 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, ...)

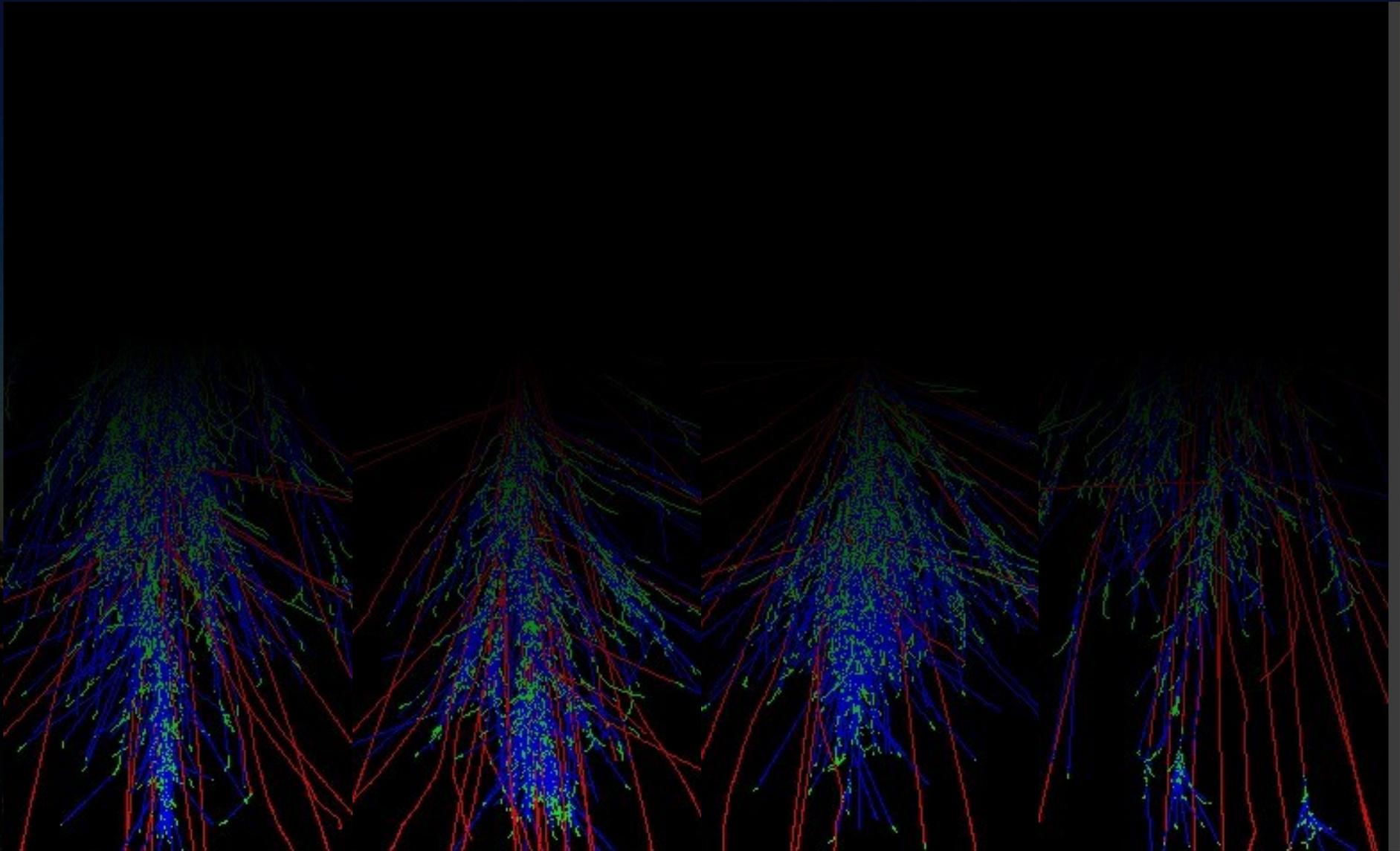


Cascades atmosphériques

γ , 200 GeV

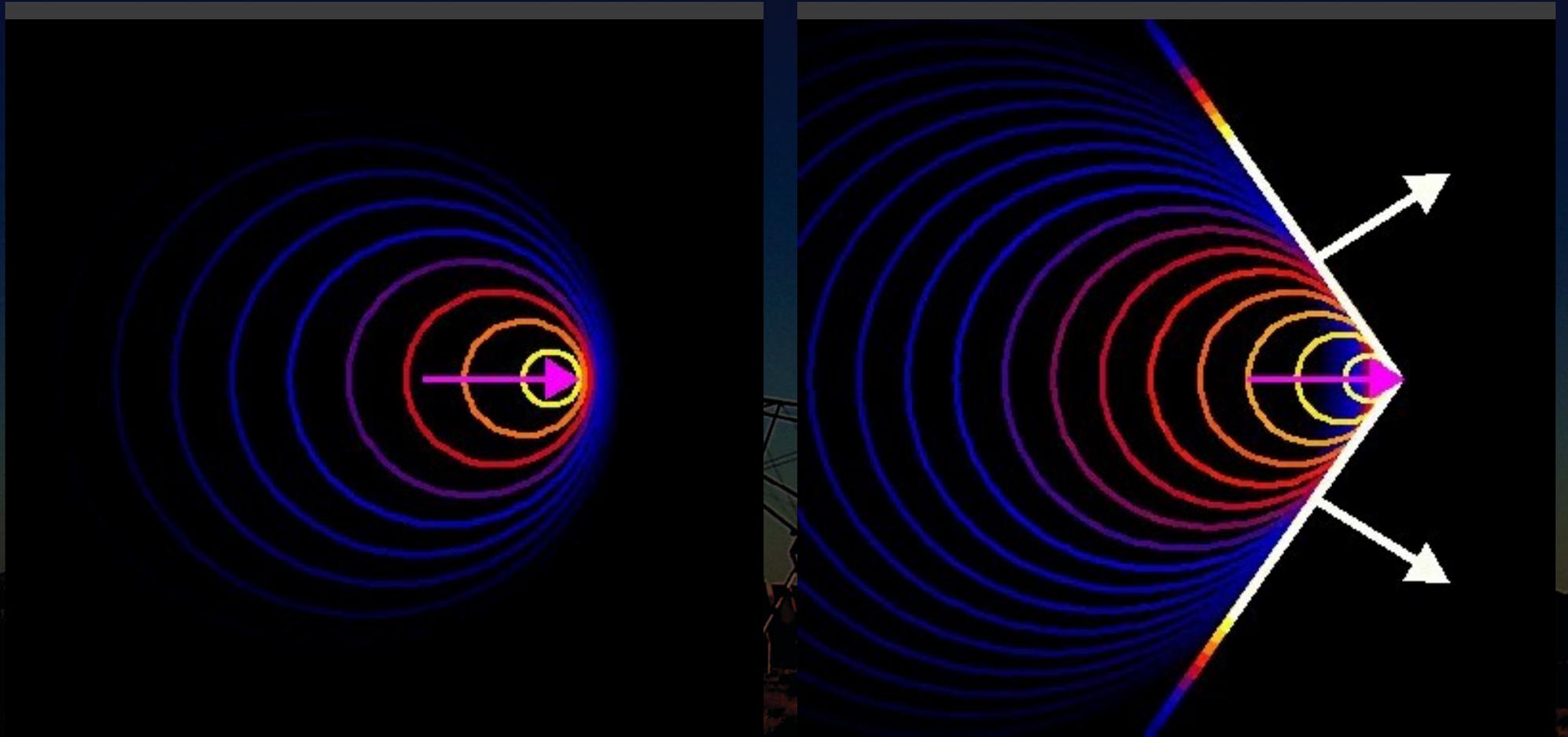


Cascades atmosphériques



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

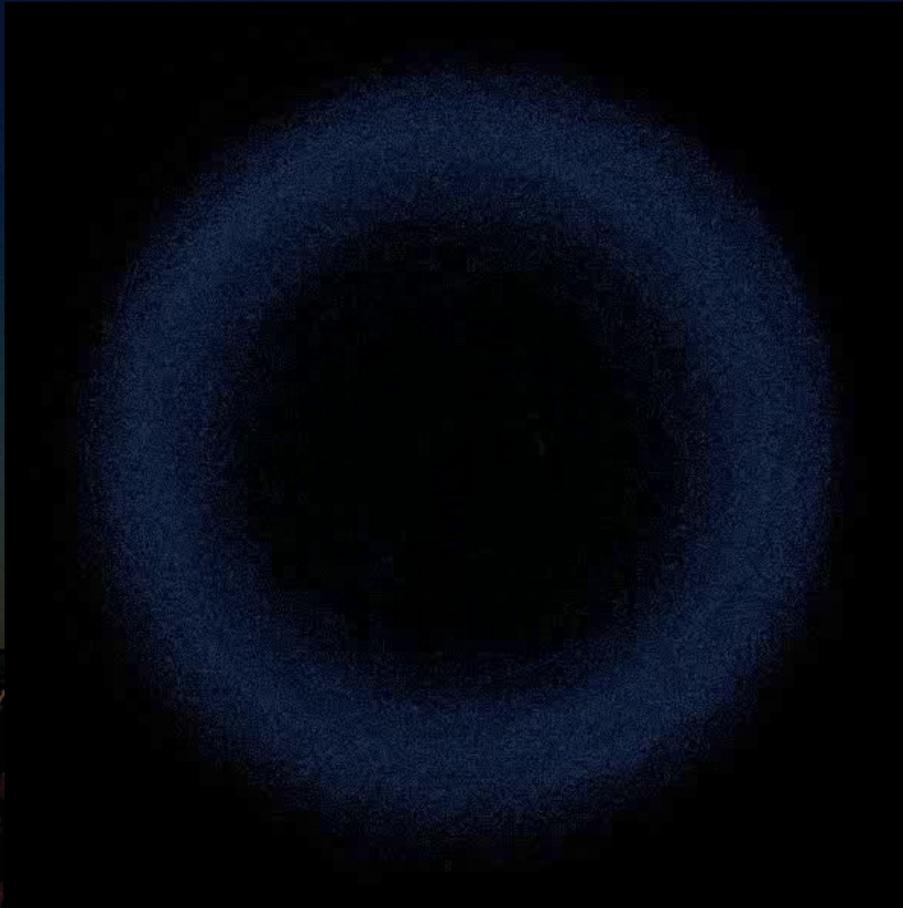
Émission Cherenkov



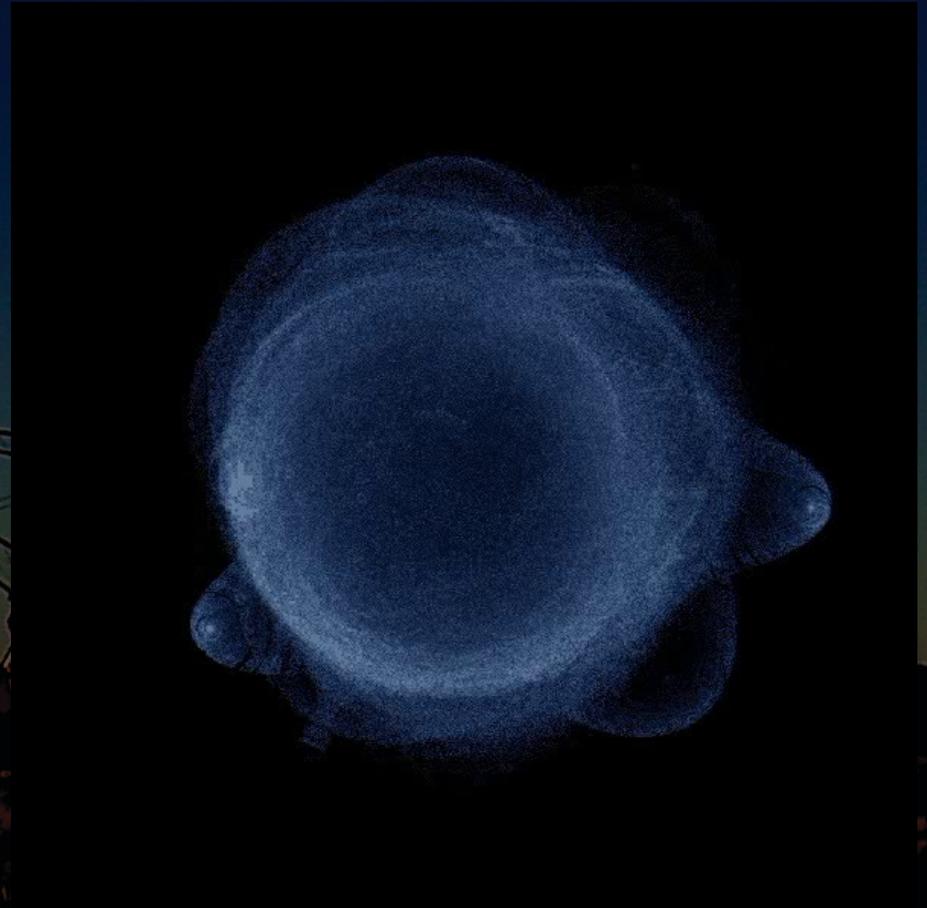
- ❑ Lorsque la lumière est ralentie dans le milieu, l'onde est comprimée à l'avant
- ❑ Lorsque la particule va plus vite que la lumière (dans le milieu), un bang lumineux se produit (là où les ondes s'additionnent)

Émission Cherenkov des cascades

γ , 100 GeV



Protons, 500 GeV

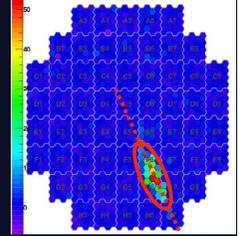


← 300m →

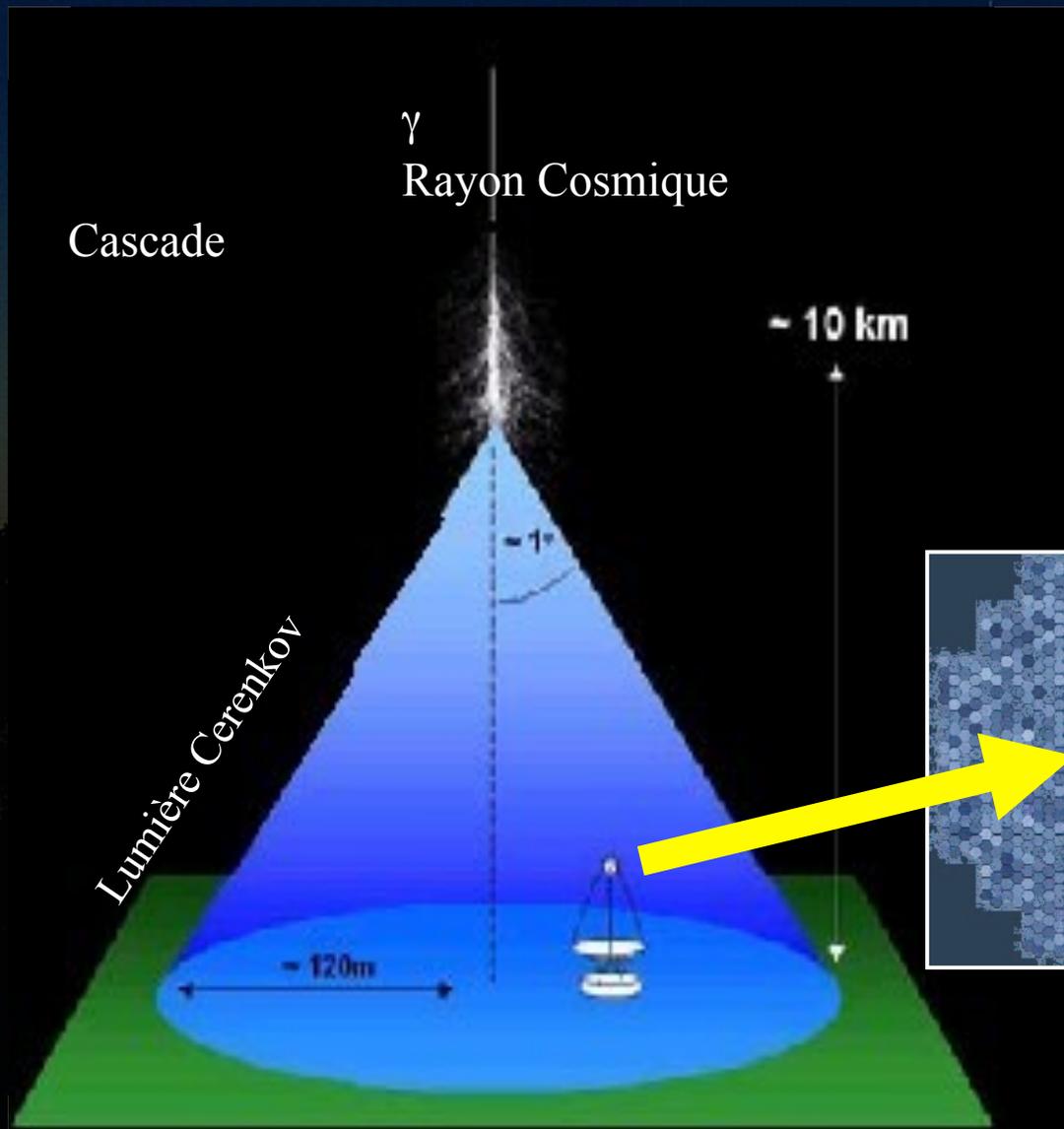
Simulations: K. Berlöhr

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

Technique Cherenkov Atmosphérique



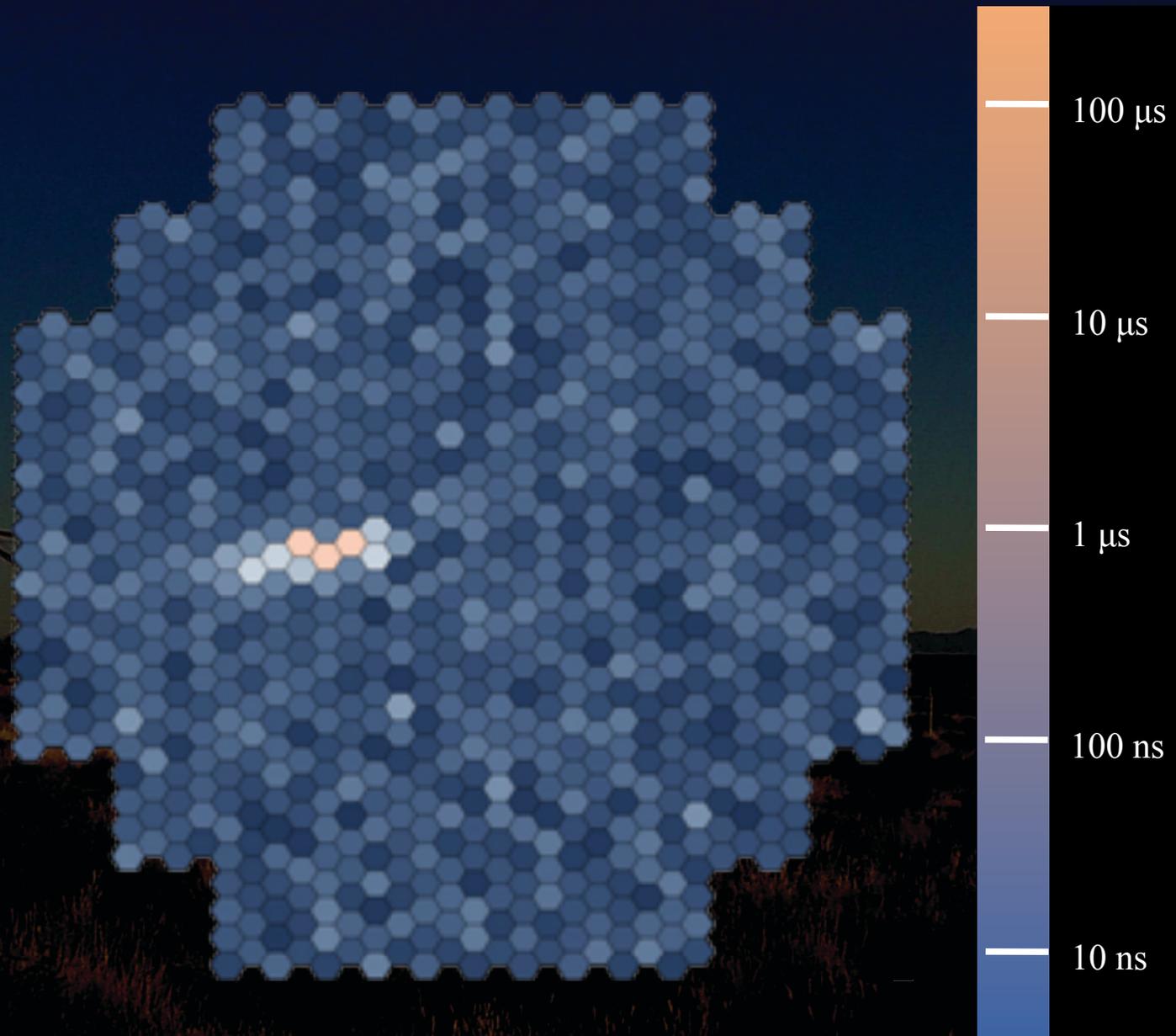
Avec 1 seul télescope



Sky & Telescope

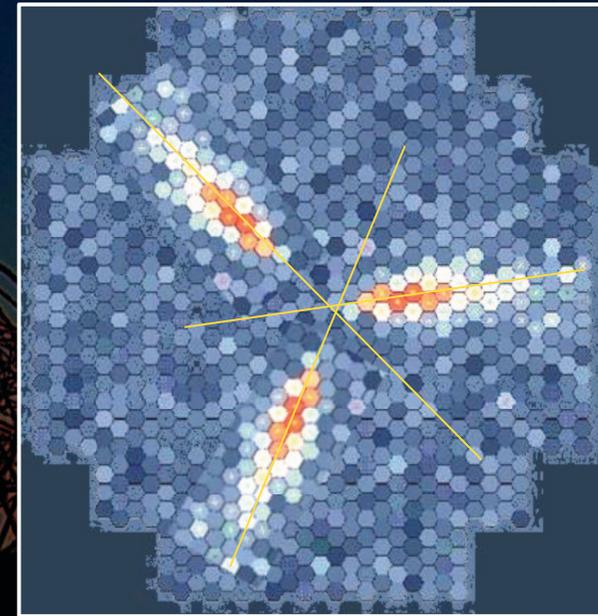
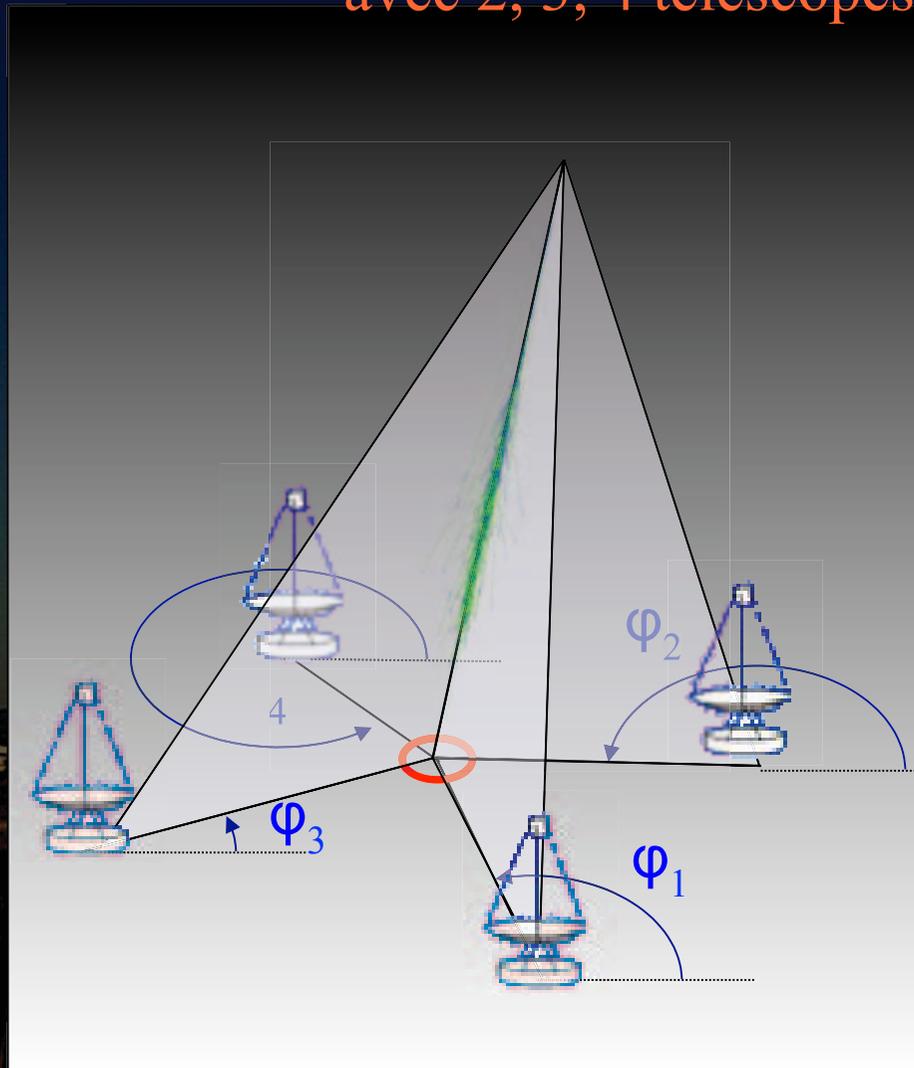
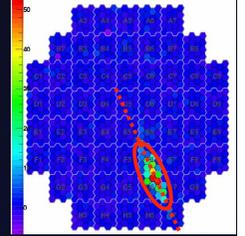


Facteur clef : la rapidité



Vision stéréoscopique

avec 2, 3, 4 télescopes ou plus ...

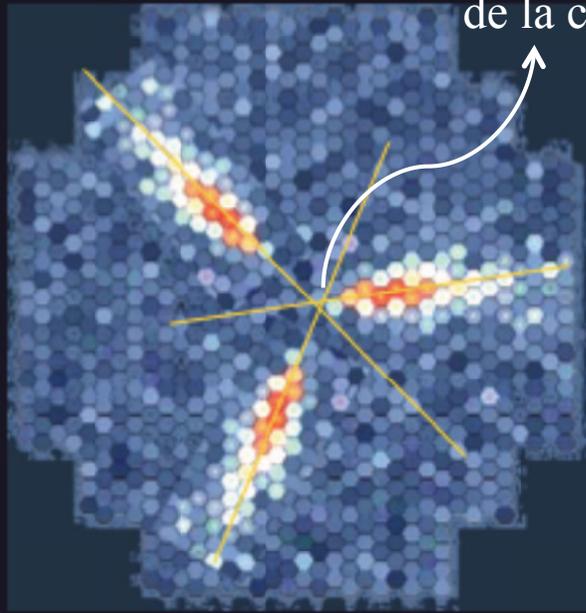


Images superposées de 3 télescopes
→ Reconstruction de la direction
d'un gamma détecté.

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

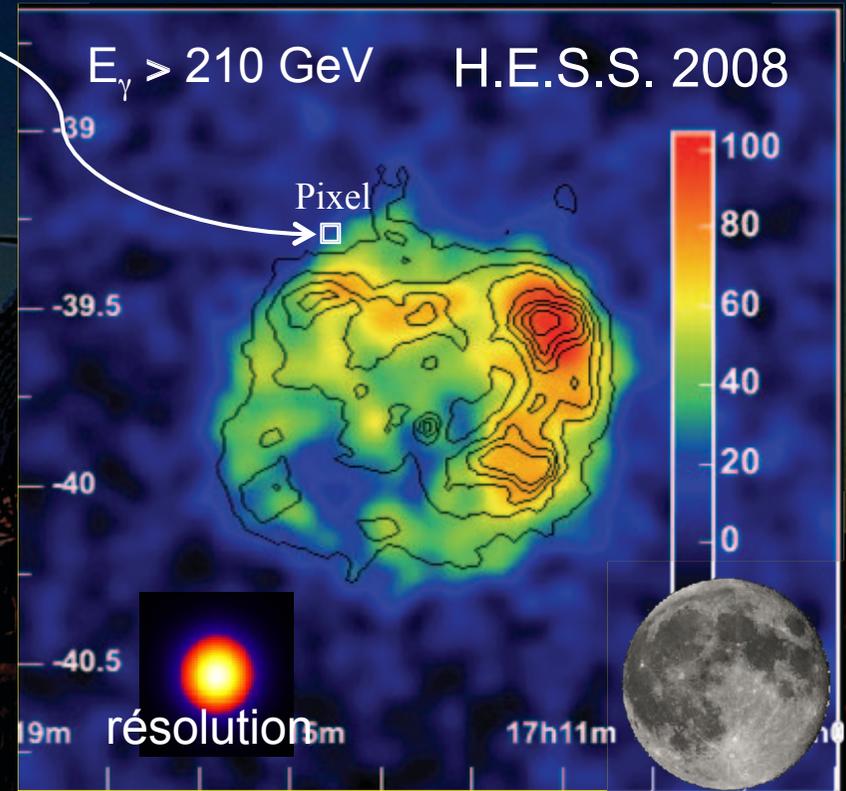
Des images des gerbes à la carte du ciel...

Compter le nombre de gamma dans un pixel de la carte du ciel



Images superposées de 3 télescopes
→ Reconstruction de la direction d'un gamma détecté, et donc de son origine sur la voûte céleste.

Répété des milliers de fois



RX J1713.7-3946



Des origines de l'astronomie gamma
jusqu'à H.E.S.S.
High Energy Stereoscopic System

Une brève histoire de l'astronomie gamma

□ Dans l'espace

- OSO-3 (1967-1968) : détection globale sans identifier de source
- SAS-2 (1972-1973) : émission gamma diffuse + 2 sources
- COS-B (1975-1982) : 25 sources
- EGRET (1991-2000) : 271 sources
- Fermi-LAT (2008-actuel) : plusieurs milliers de sources

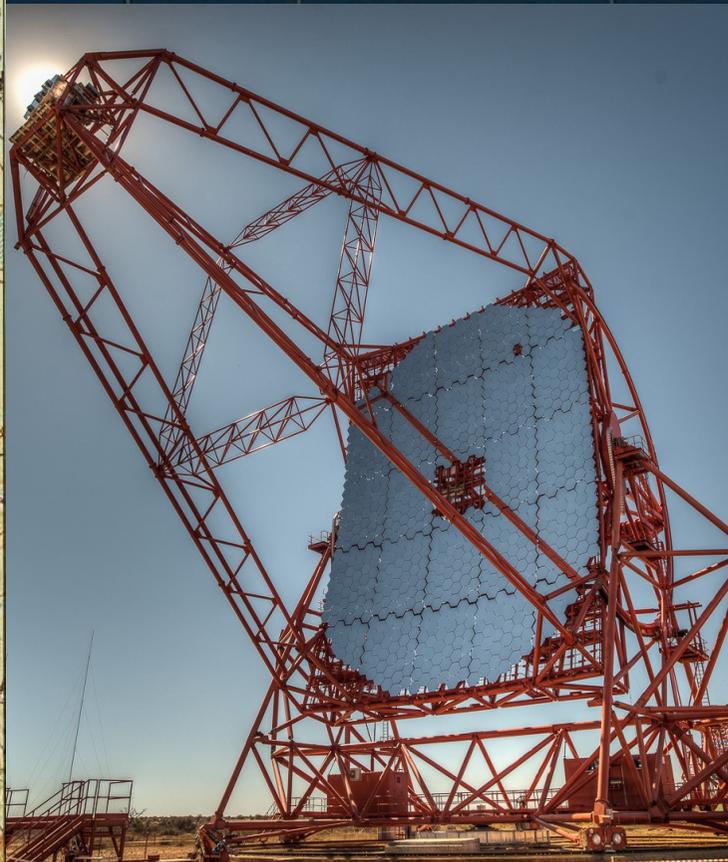
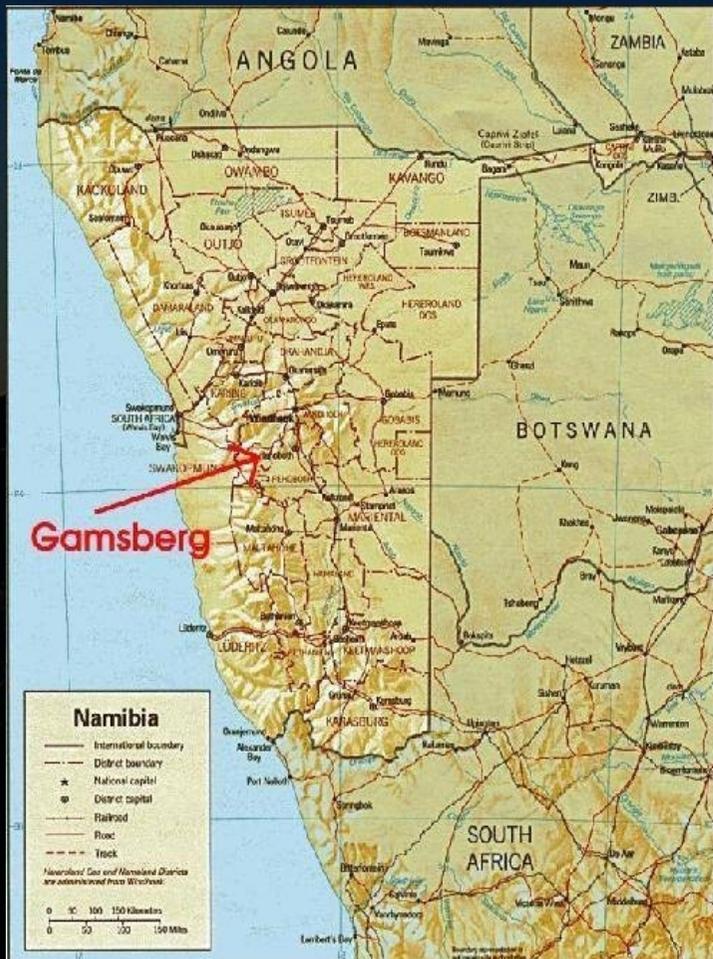
□ Au sol

- 1952 : première observation de l'émission Tcherenkov dans les gerbes atmosphériques
- 1968-1982 : longue traversée du « désert » pour lutter contre le fond des RC chargés,
1982-1987 : développement de l'imagerie des gerbes et des paramètres de Hillas (1985)
- 1989 : première observation de la nébuleuse du Crabe à 0,7 TeV au Whipple observatory
- Influence des annonces d'observation de Cygnus X-3 à 10^{15} eV en 1983
- Confirmation de la nébuleuse du Crabe par des méthodes d'échantillonnage du front d'onde (Themistocle, Asgat puis Celeste à Thémis dans les Pyrénées 1992-1993-2002)
- 1996-2002 : Introduction de la stéréoscopie (Hegra) et de l'imagerie fine et rapide (CAT)
- Aboutissement avec 3 projets majeurs : H.E.S.S. ≥ 2003 – MAGIC ≥ 2004 – VERITAS ≥ 2007

High Energy Stereoscopic System

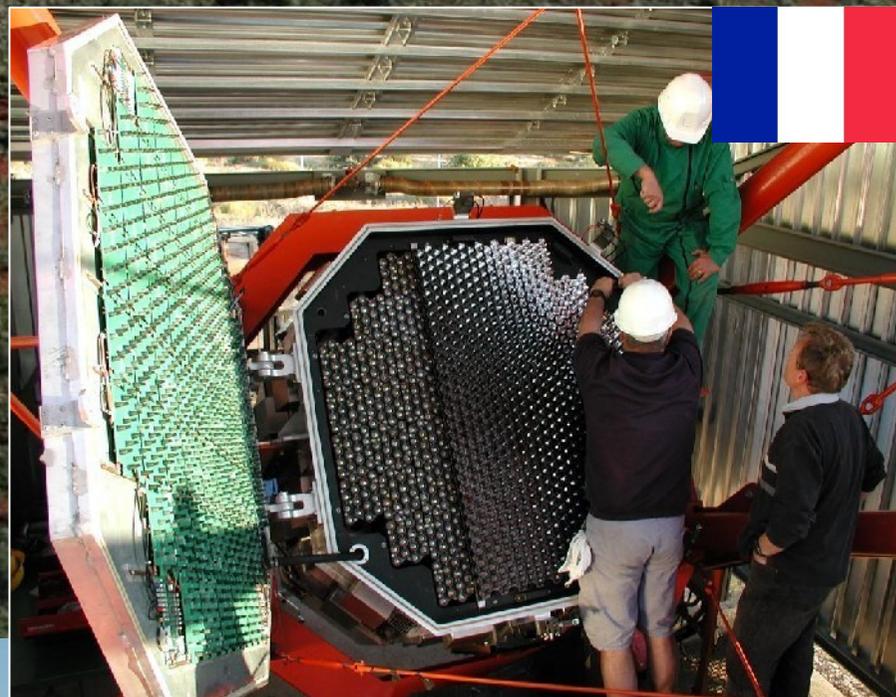
- Consortium international, mené par Allemagne + France
- Site: $23^{\circ}16''$ S, $16^{\circ}30''$ E, 1800 m asl, 100 km de Windhoek (Namibie)
 - très bonne qualité optique du ciel
 - hémisphère peu observé, grande partie du plan galactique observable

233 chercheurs au 18-mars-2018

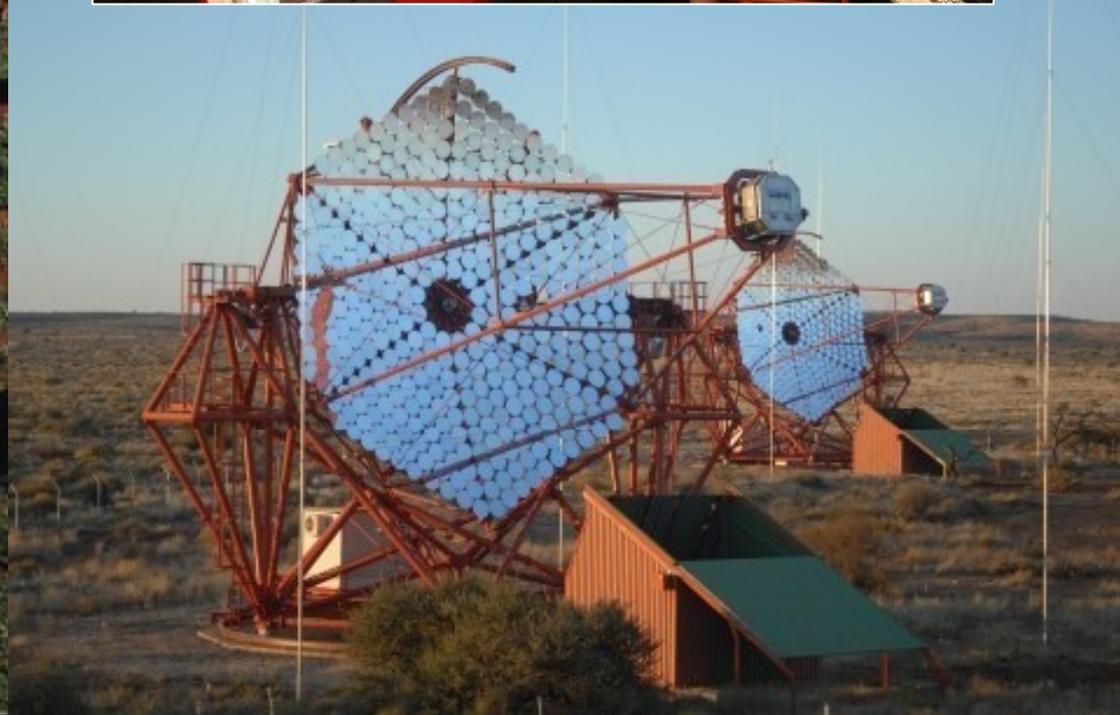


MPI Kernphysik, Heidelberg
DESY, Zeuthen & Univ. Potsdam
Humboldt Univ. Berlin
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Univ. Erlangen-Nuremberg
Univ. Tübingen
Ruhr-Univ. Bochum
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
LAPP Ancey
LUPM Montpellier
CENBG Bordeaux
CPPM Marseille
IPAG Grenoble
Observatoire de Paris
CEA Saclay
Univ. Innsbruck
Dublin Inst. for Adv. Studies
Univ. Leicester
Univ. Amsterdam
Polish consortium
Swedish consortium
Yerevan Physics Inst.
Univ. Adelaide
JAXA-Rikkyo (Japan)
South Africa consortium
Univ. of Namibia, Windhoek

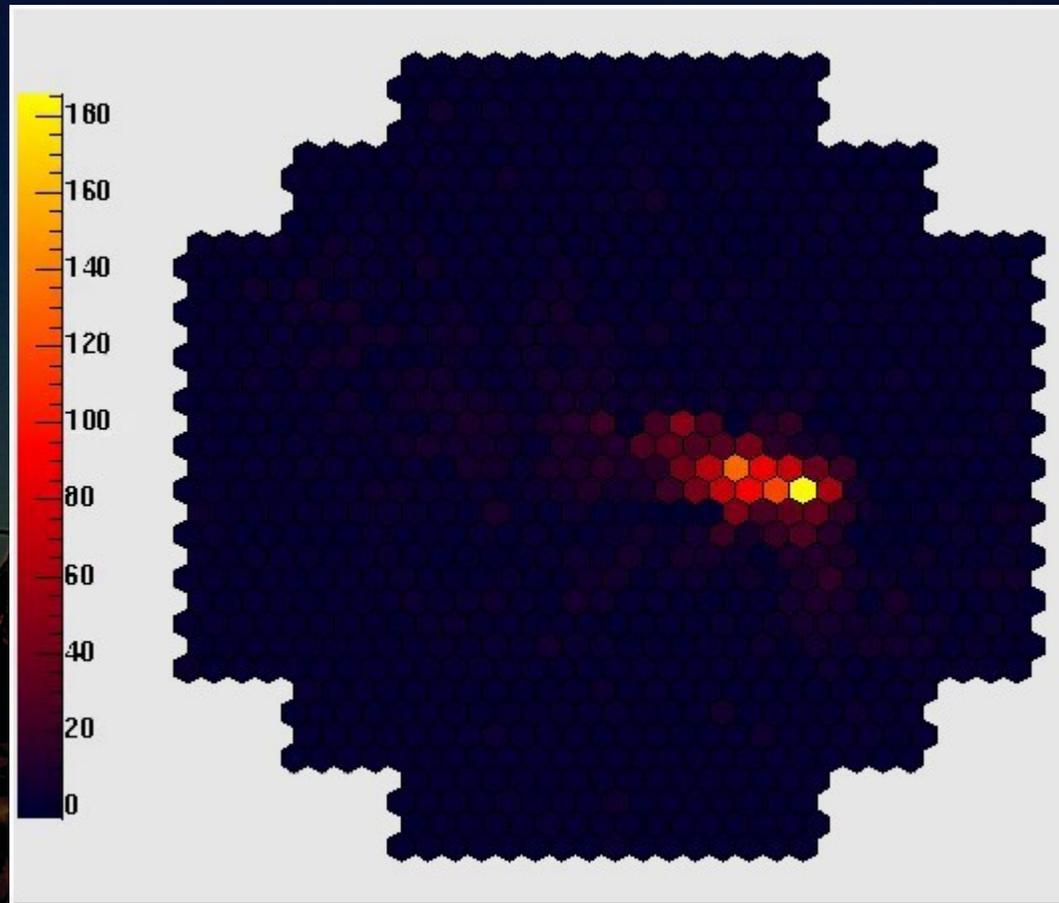
H.E.S.S. Phase I en Namibie



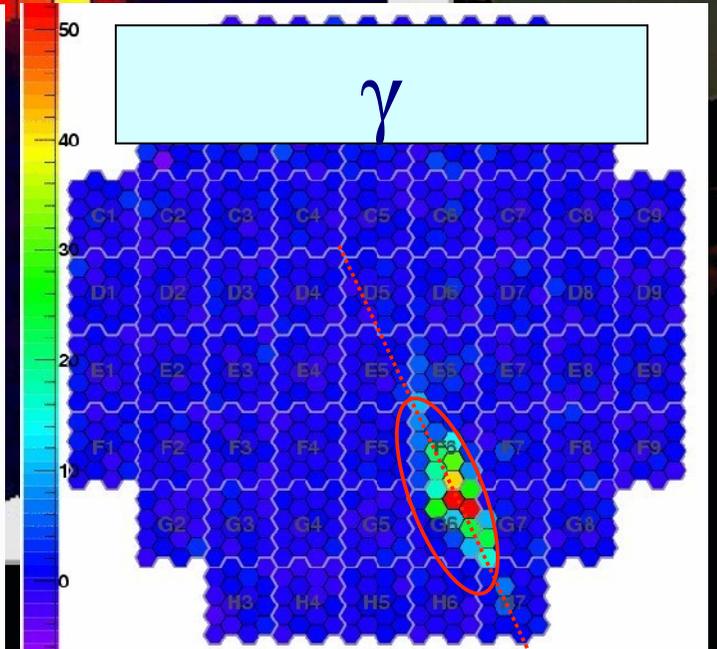
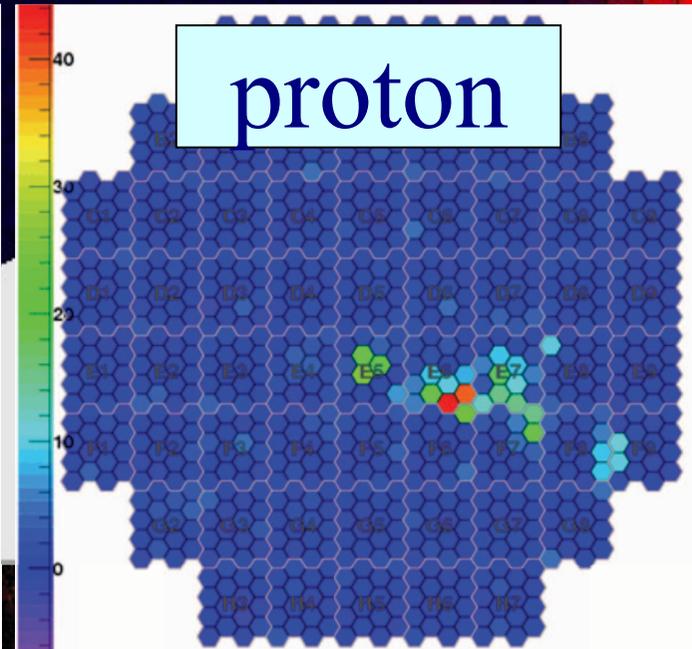
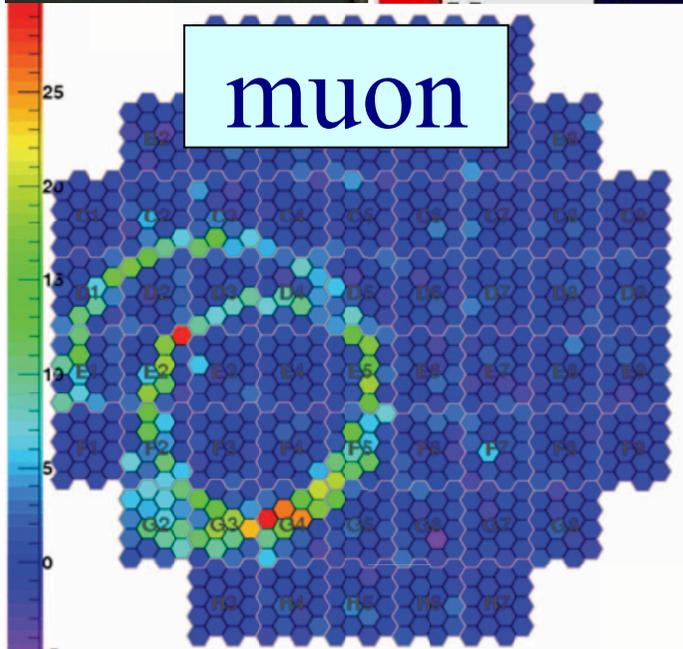
- ❑ 4 télescopes (en carré de 120 m)
 - ❑ Réflecteur de 12 m de diamètre, 15 m de focale
- ❑ Des caméras extrêmement rapides:
 - ❑ 960 pixels (PMT)
 - ❑ Échantillonnage à 1 ns
 - ❑ ~ 1 tonne
- ❑ Système complet depuis le 10/12/2003



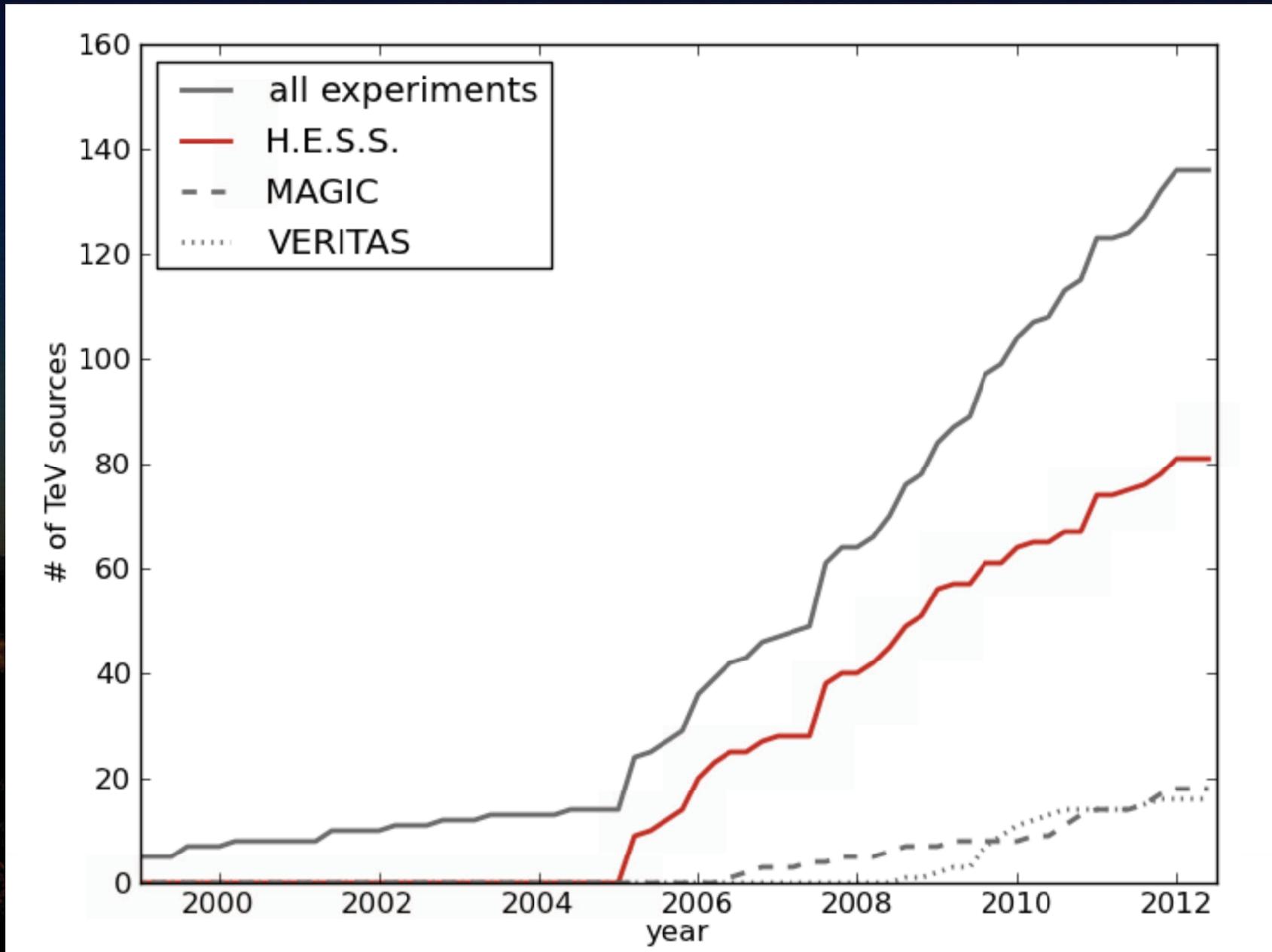
Événements



Événements



Une belle success-story

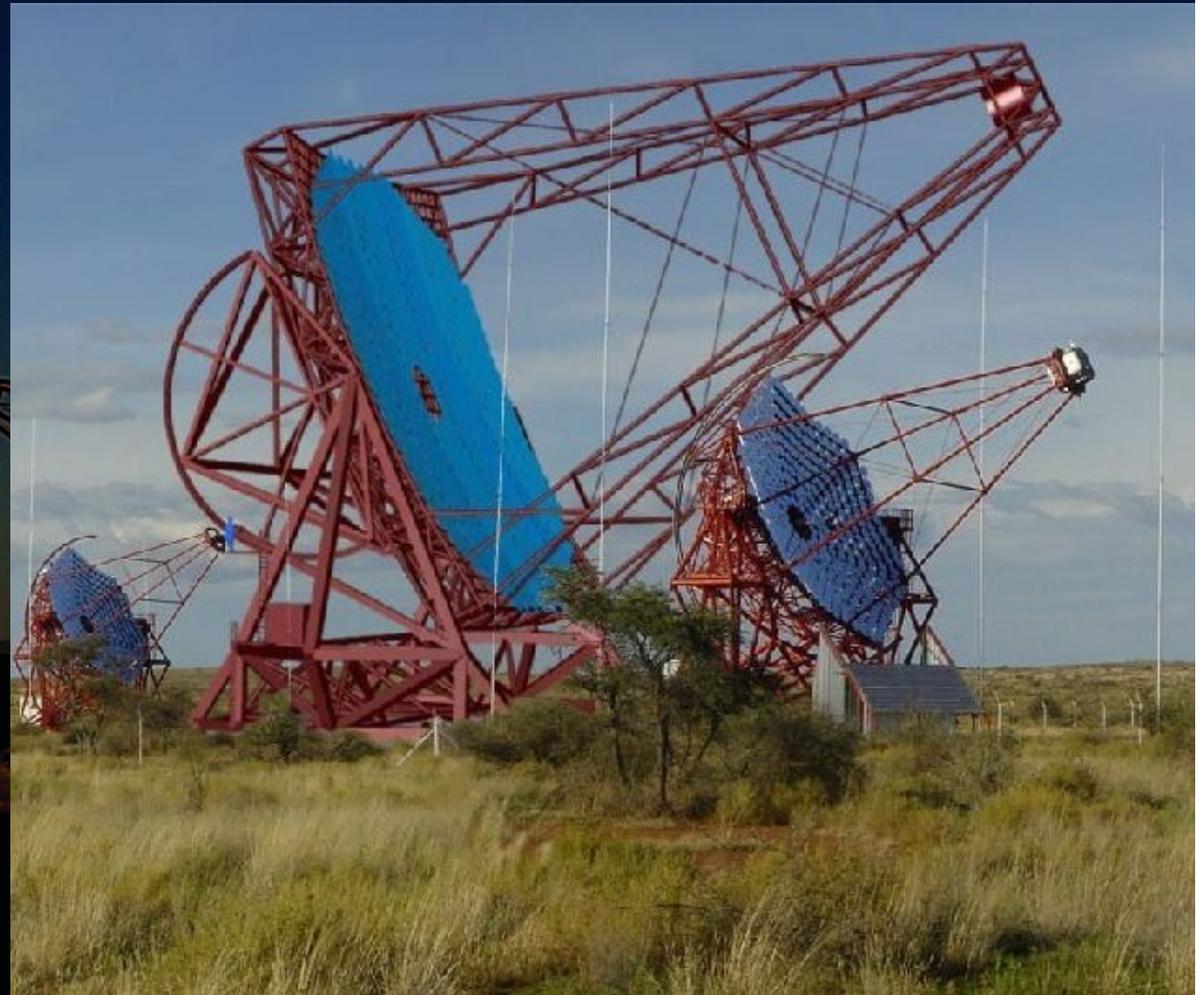


H.E.S.S. Phase II

□ 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 plus grand réflecteur optique au monde (600 m²)

HESS vu de l'espace



HESS-II

20 m
100 pièds



Des questions ?



L'avenir : CTA = Cherenkov Telescope Array

