

L'astronomie γ – aux sources des rayons cosmiques

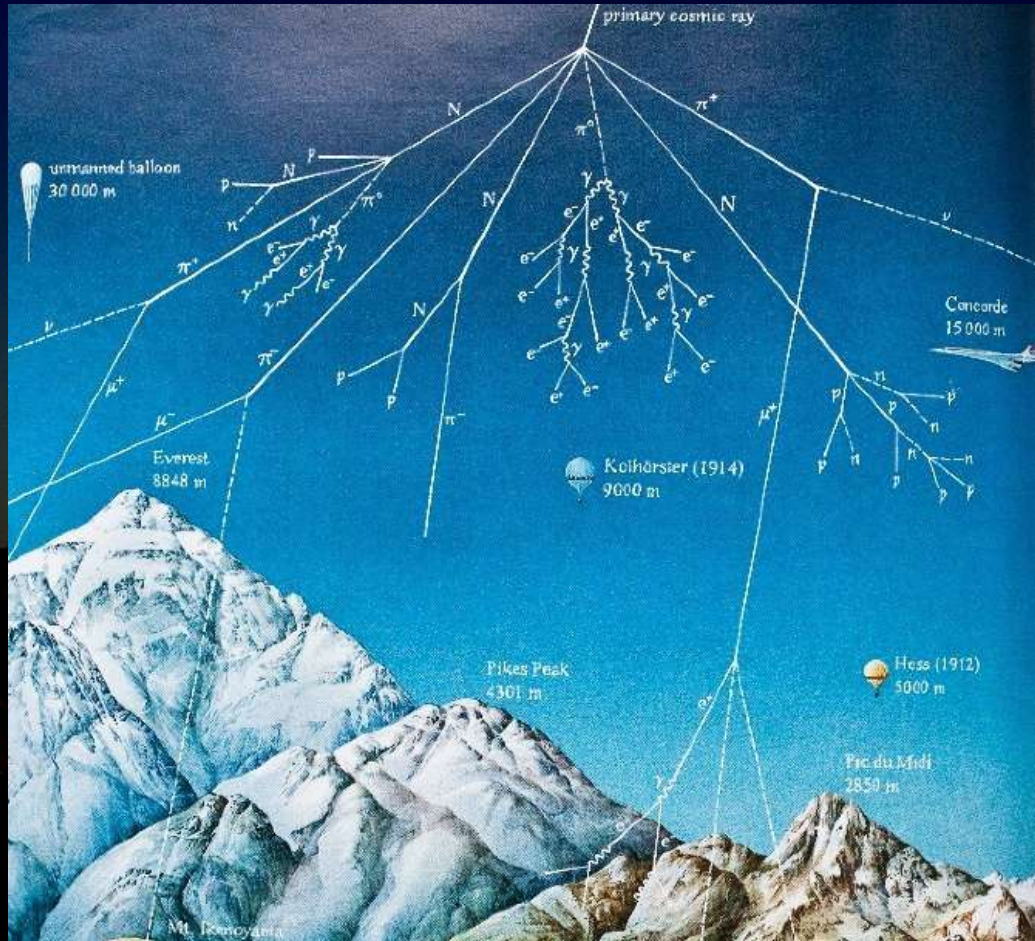
Mathieu de Naurois

Laboratoire Leprince-Ringuet
IN2P3-CNRS-École Polytechnique



Le mystère des rayons cosmiques

Les rayons cosmiques

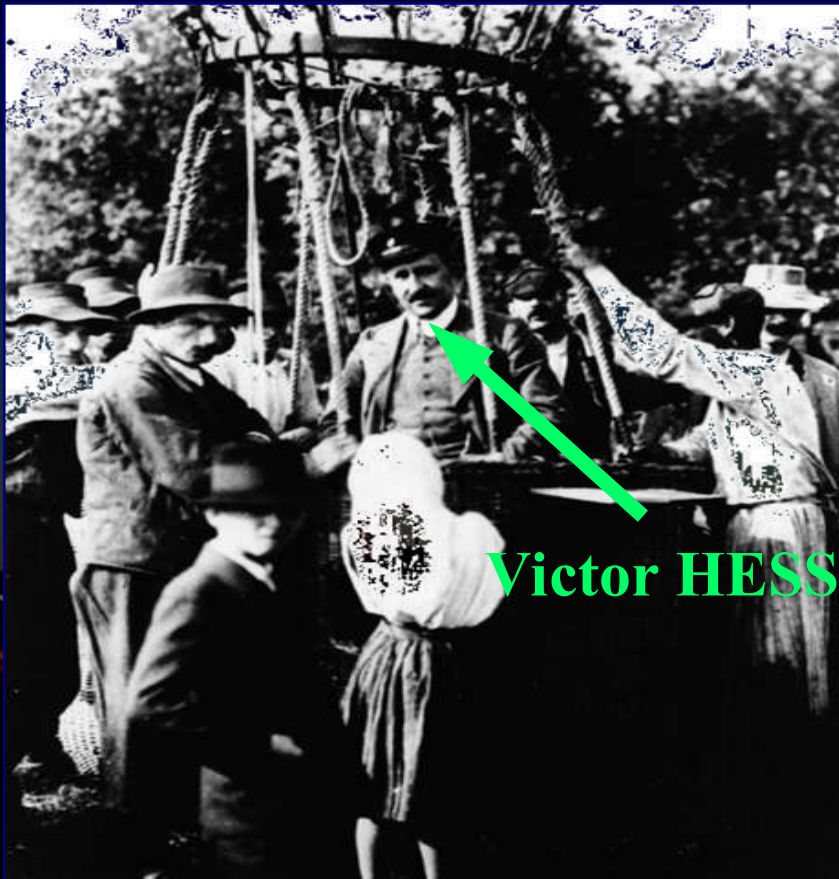


La terre est bombardée en permanence par des particules de haute énergie en provenance du cosmos (« Rayons Cosmiques »)

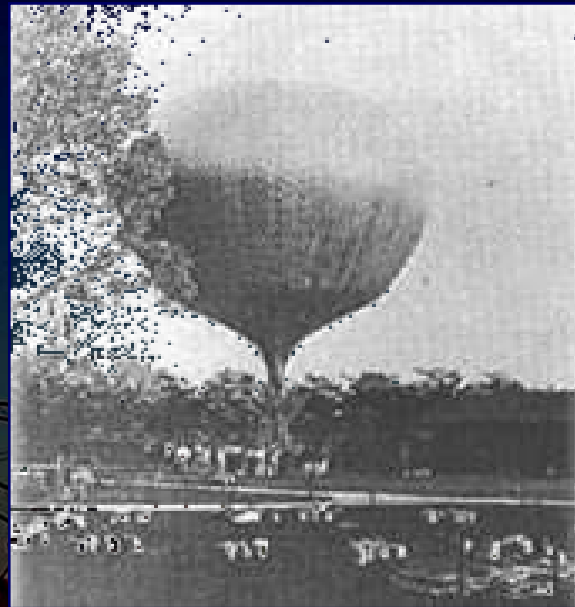
Implications nombreuses :

- Accélérateur d'évolution (mutations génétiques)
- Création d'isotopes radioactifs (¹⁴C)
- Nombreuses découvertes en physique fondamentale (e⁺, μ[±], K[±], Y, ...)
- Irradiation du personnel navigant
- Probable germe pour les éclairs
- Probable aide à la formation de nuages

Un problème centenaire

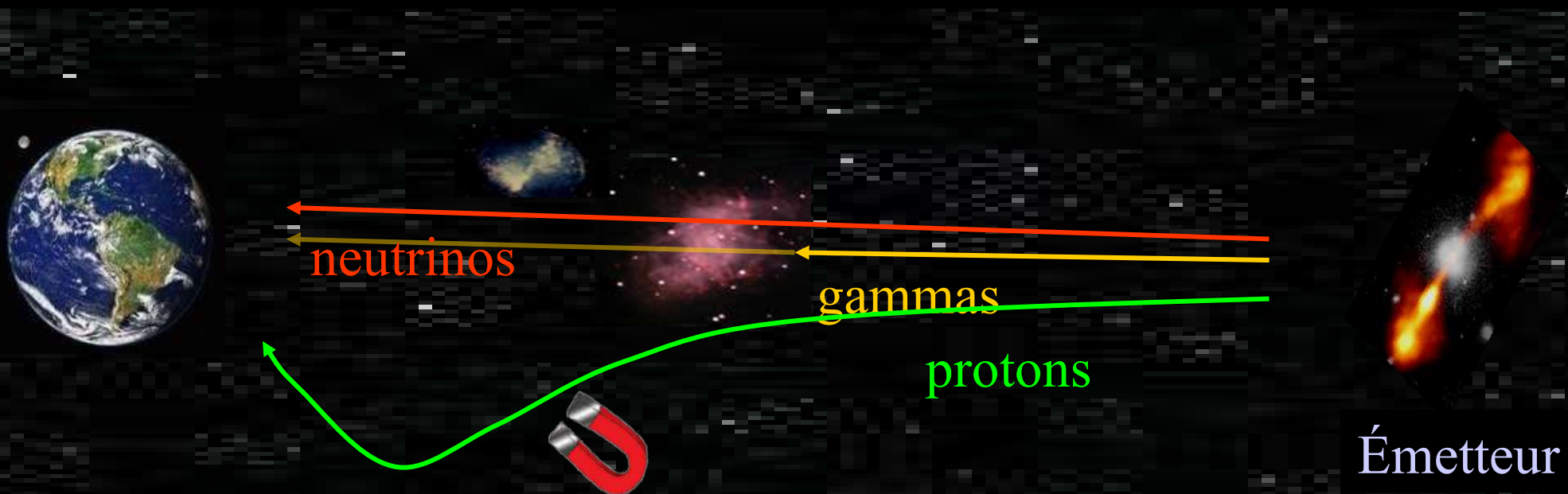


1912 : découverte par Victor HESS



- Parmi les nombreux contributeurs :
 - Pierre Auger : découverte des cascades atmosphériques
 - Louis Leprince Ringuet : mesure de la dépendance en latitude (en bateau)

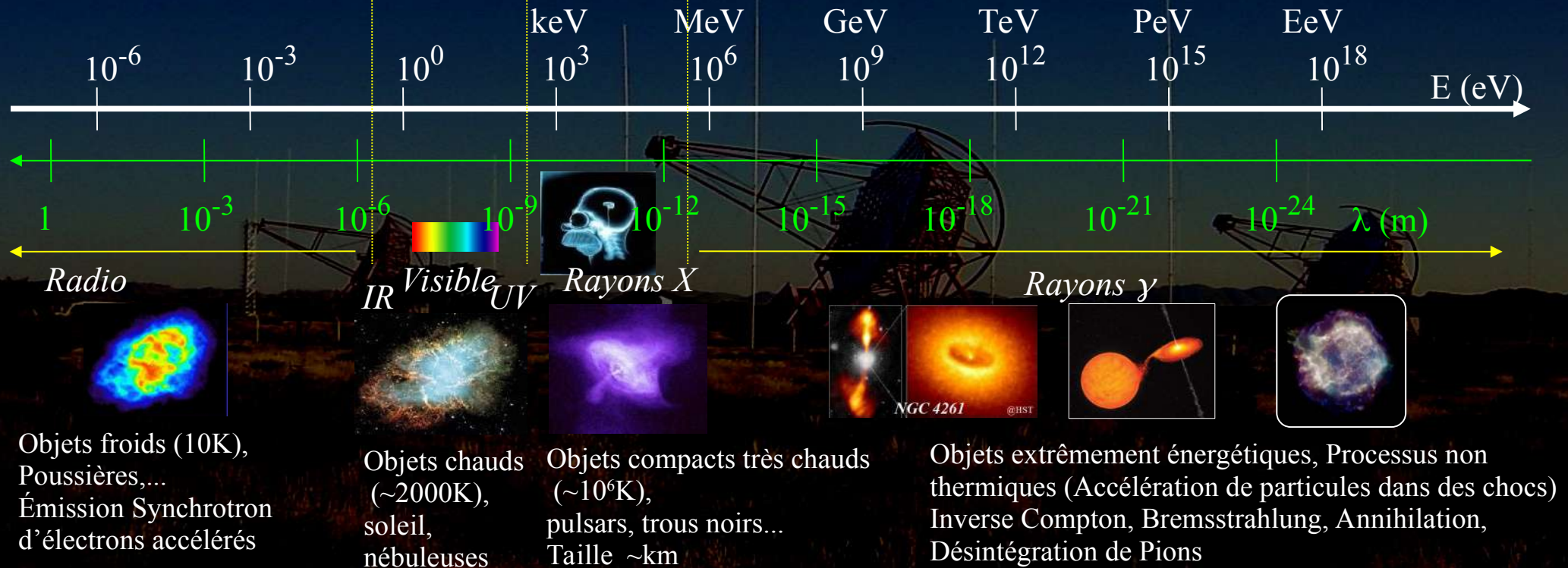
Les Messagers du Cosmos



- photons:** Absorbés par la poussière et le rayonnement
- protons/noyaux:** Déviés par le champs magnétique
- neutrinos:** Difficiles à détecter
- ondes gravitationnelles:** Technologie naissante

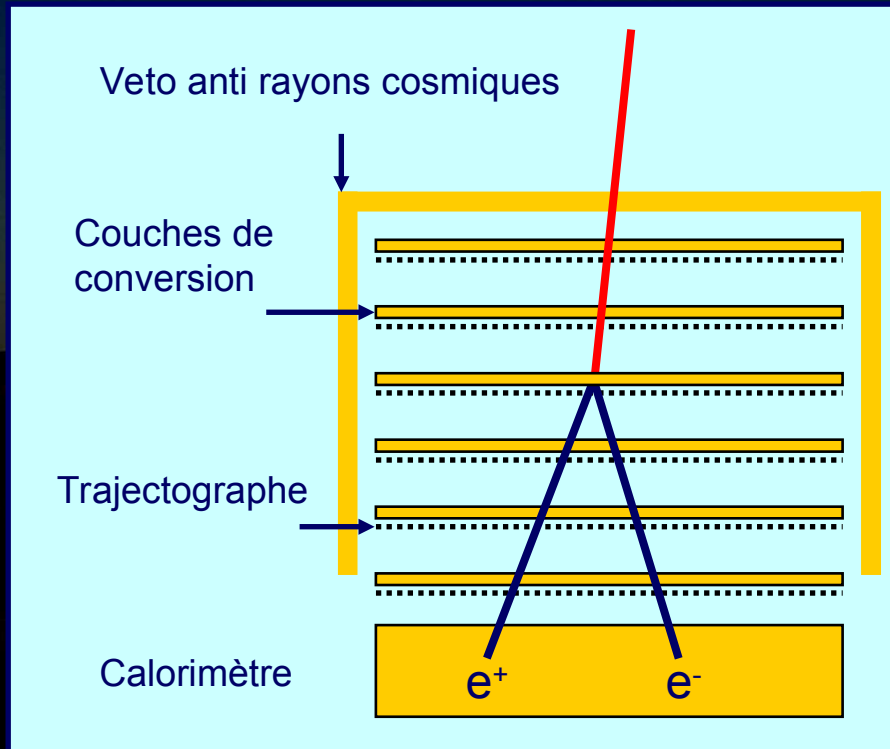
La lumière invisible

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



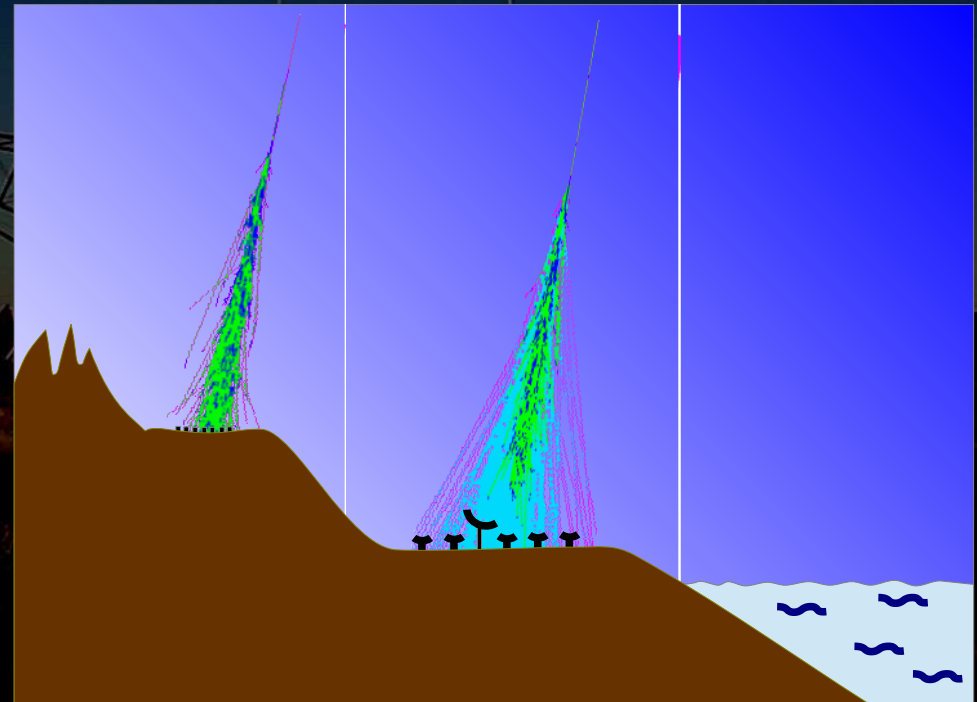
Techniques de détection

■ Détection directe (espace)



■ Détection indirecte directe (sol)

- Cascades atmosphériques
- Emission Cherenkov

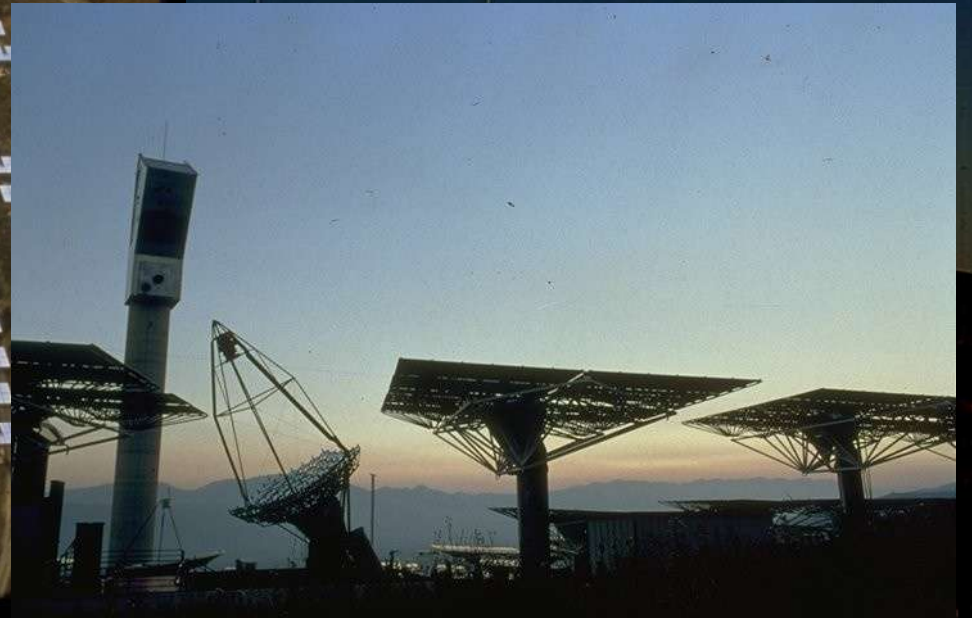




L'époque des pionniers

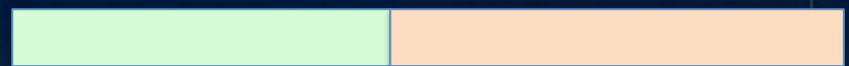
L'époque des pionniers

- Site de Thémis, Pyrénées orientales

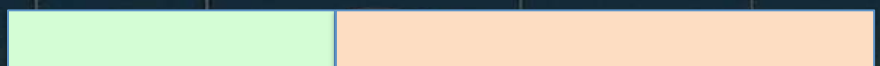


L'époque des pionniers

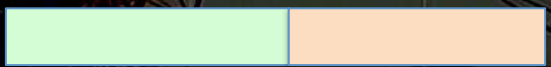
- 20 ans de développements sur le site de Thémis



THEMISTOCLE & ASGAT



CAT



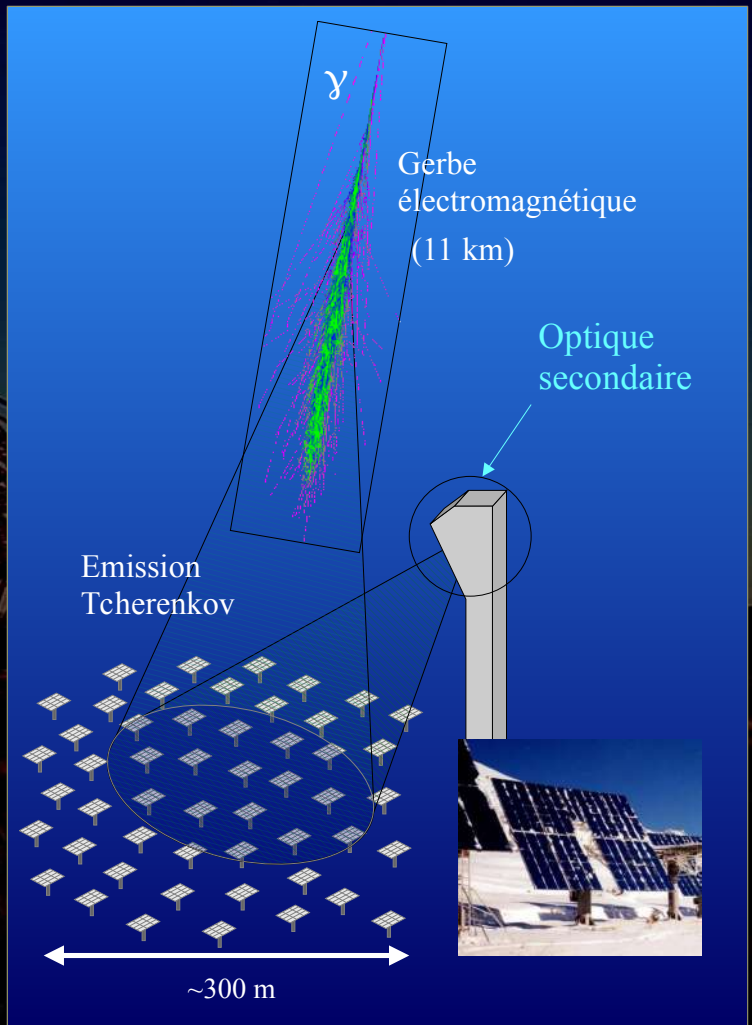
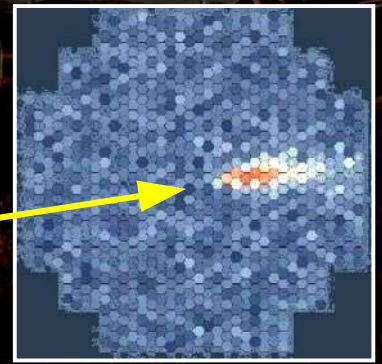
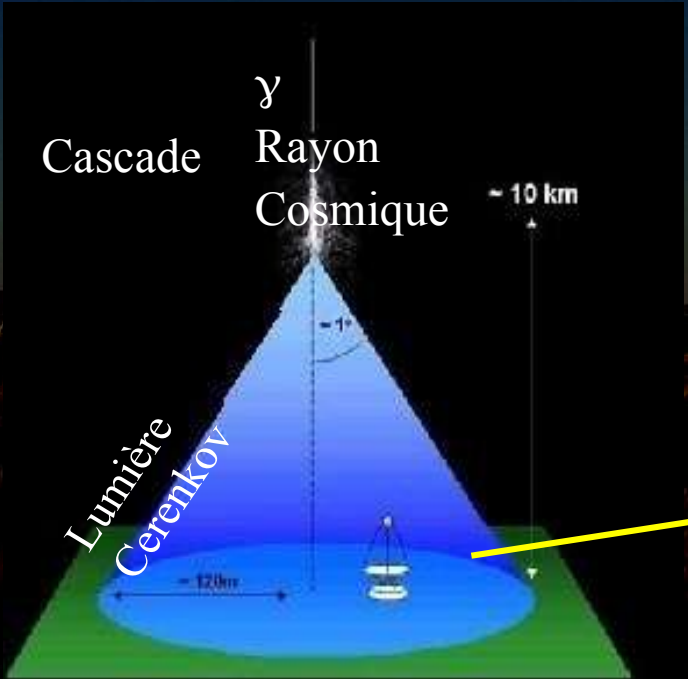
CELESTE

LLR
maître d'œuvre



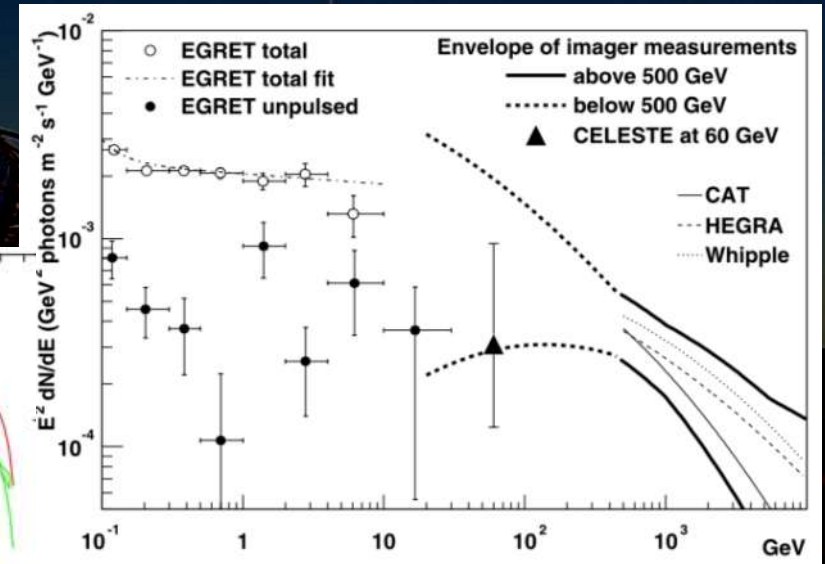
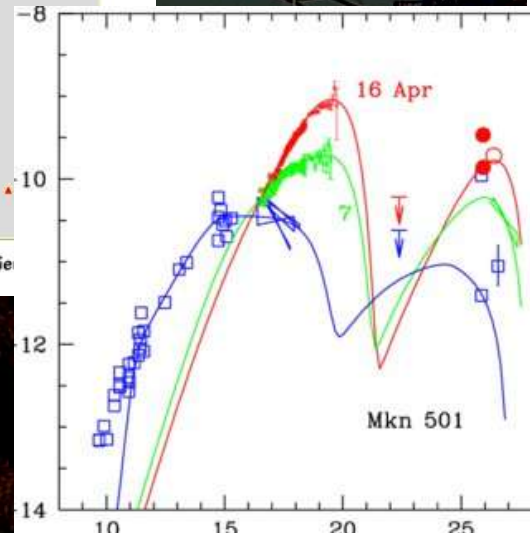
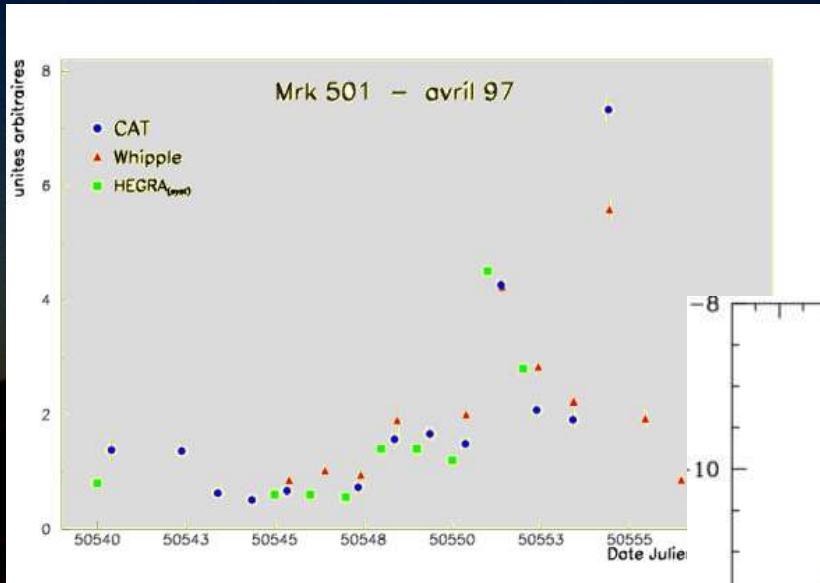
L'époque des pionniers

- Deux techniques très différentes :
 - Imagerie Cherenkov Atmosphérique
 - Échantillonnage spatio-temporel



Et les premiers résultats

- 1997 : Observation d'une éruption intense du noyau actif de galaxie Mrk 501
- Observation de la nébuleuse du Crabe (Supernova de 1054)



Héritage des pionniers

- L'échantillonnage à faible champs de vue ne permet pas de rejeter efficacement le bruit de fond hadronique
- Concept de réseau de 3^{ème} génération :
 - Miroirs de grande taille ($\geq 100 \text{ m}^2$) hérité de Whipple (US)
 - Observation stéréoscopique héritée de HEGRA (Allemagne)
 - Caméra rapide et finement pixelisée héritée de CAT



Pendant ce temps dans l'espace

- Plusieurs générations d'observatoires γ spatiaux :

- 1967-1968**, OSO-3

621 γ , émission de la Voie Lactée

- 1972-1973**, SAS-2,

~8,000 γ , 3 sources

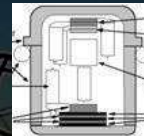
- 1975-1982** COS-B

~200,000 γ , 25 sources (3C 273)

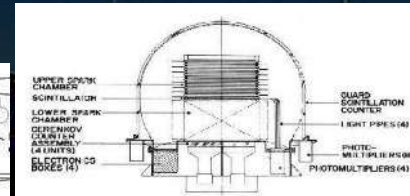
- 1991-2000** EGRET

$>1.4 \times 10^6$ γ , 271 sources

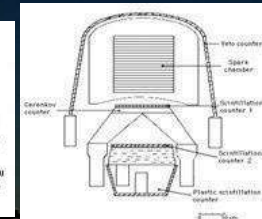
OSO-3



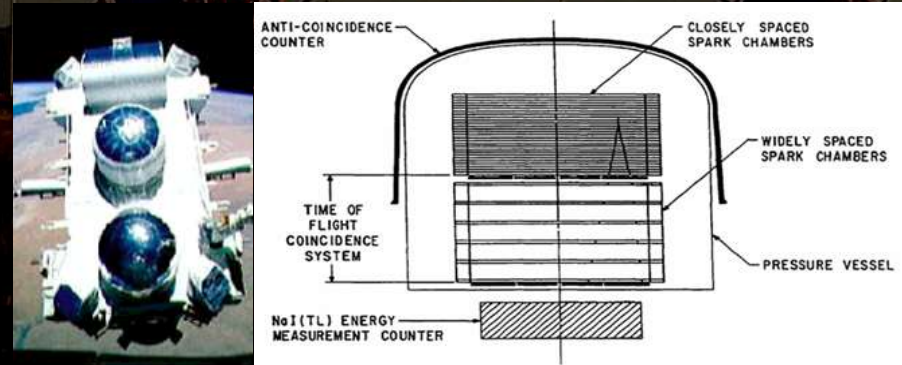
SAS-2



COS-B



EGRET





La révolution

High Energy Stereoscopic System – HESS

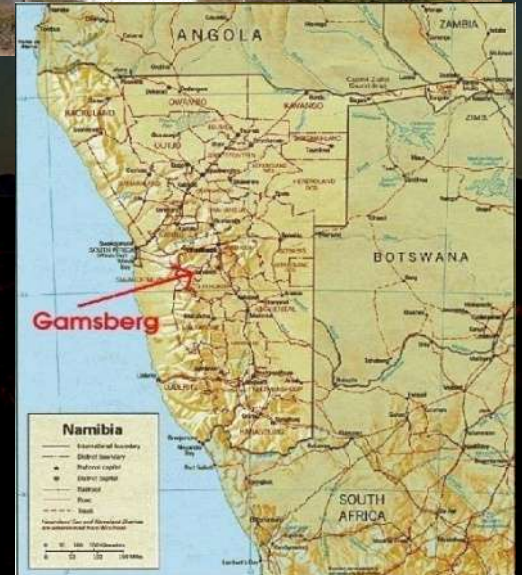


■ H.E.S.S. phase 1 (09-2002):

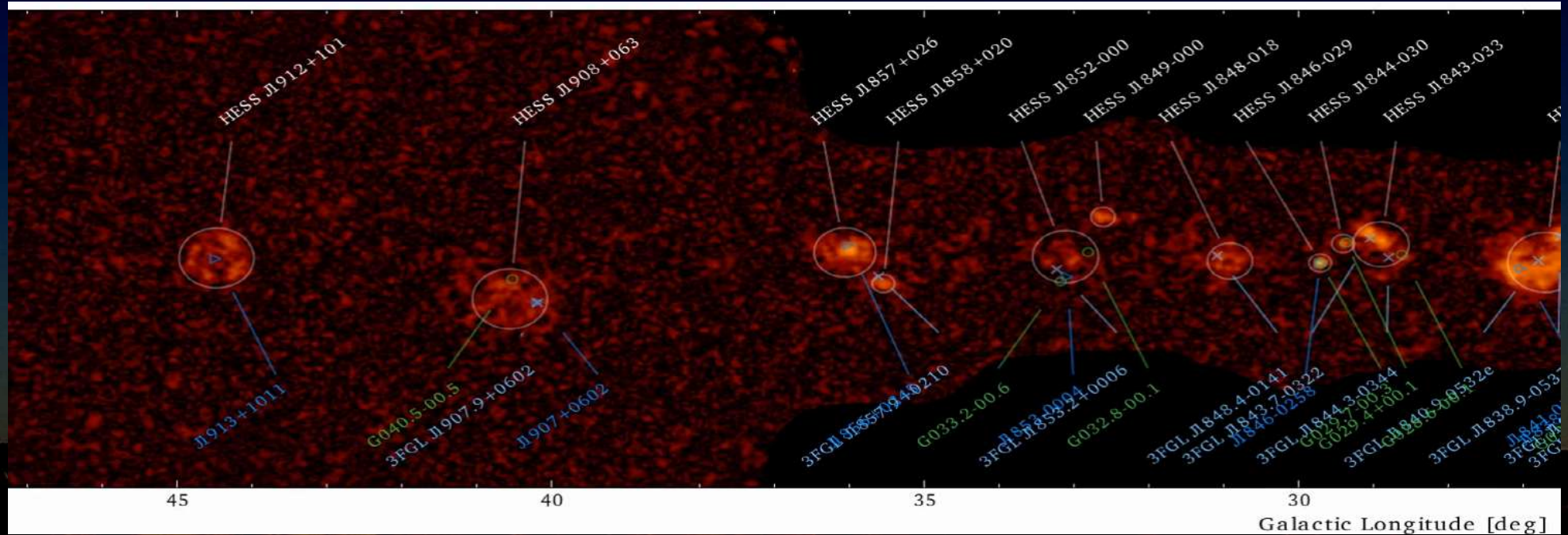
- 4 télescopes: \varnothing 12 m, 107 m²
- Reconstruction Stéréoscopique
- 960 Pixels/camera, FoV 5°

■ H.E.S.S. phase 2 (09-2012):

- 5^{eme} télescope, \varnothing 28 m, 600 m²
- 2048 pixels, FoV : 3.5°



Survol de la Voie Lactée



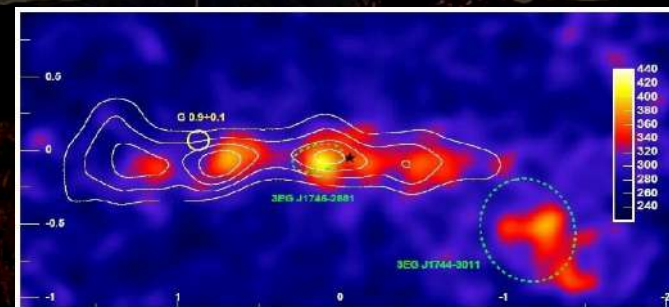
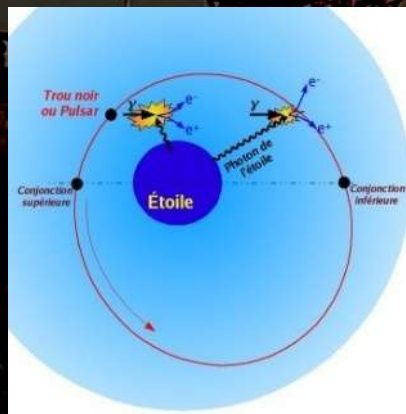
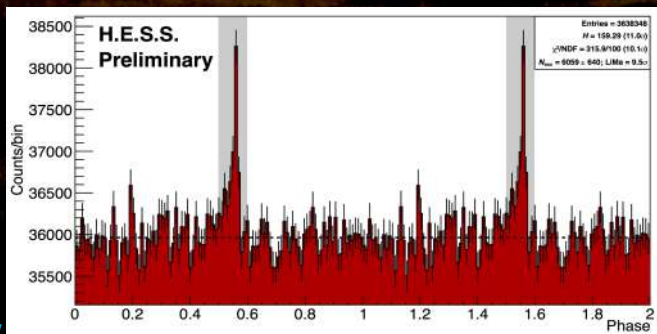
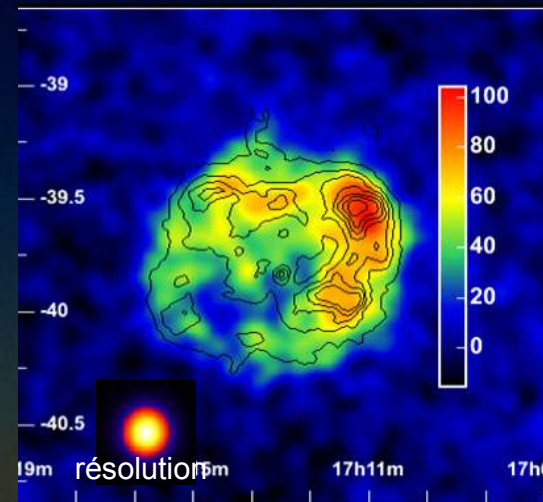
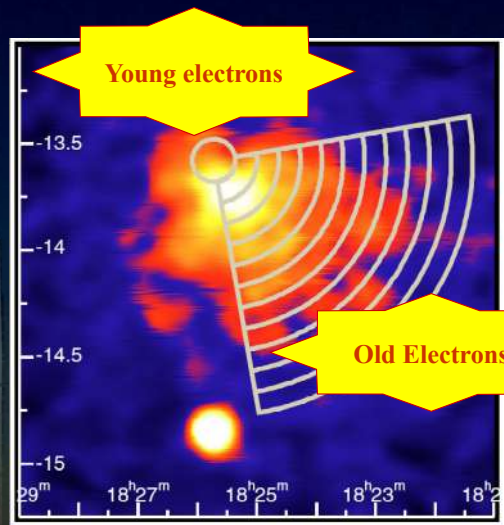
- De nombreuses sources, très concentrées sur le plan galactique
- Parfois très étendues (plusieurs degrés)
- Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Un bestiaire insoupçonné

Des sources très diverses

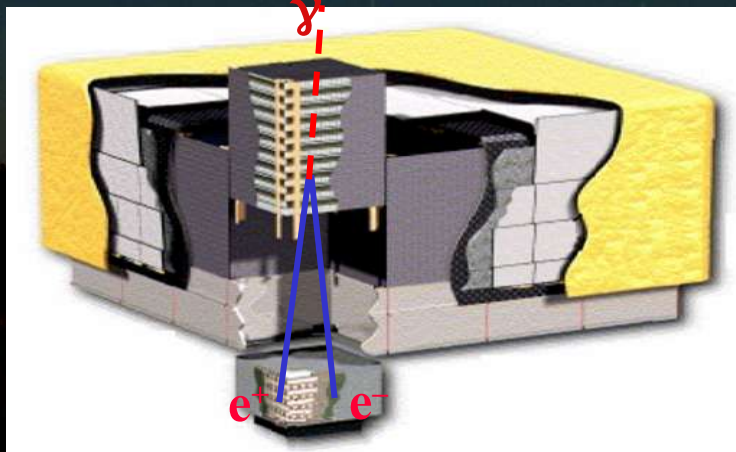
- Restes de supernova
- Pulsars et nébuleuses associées
- Systèmes binaires
- Trou noir galactique
- Interaction de vents stellaires

Autant de sujets d'étude !



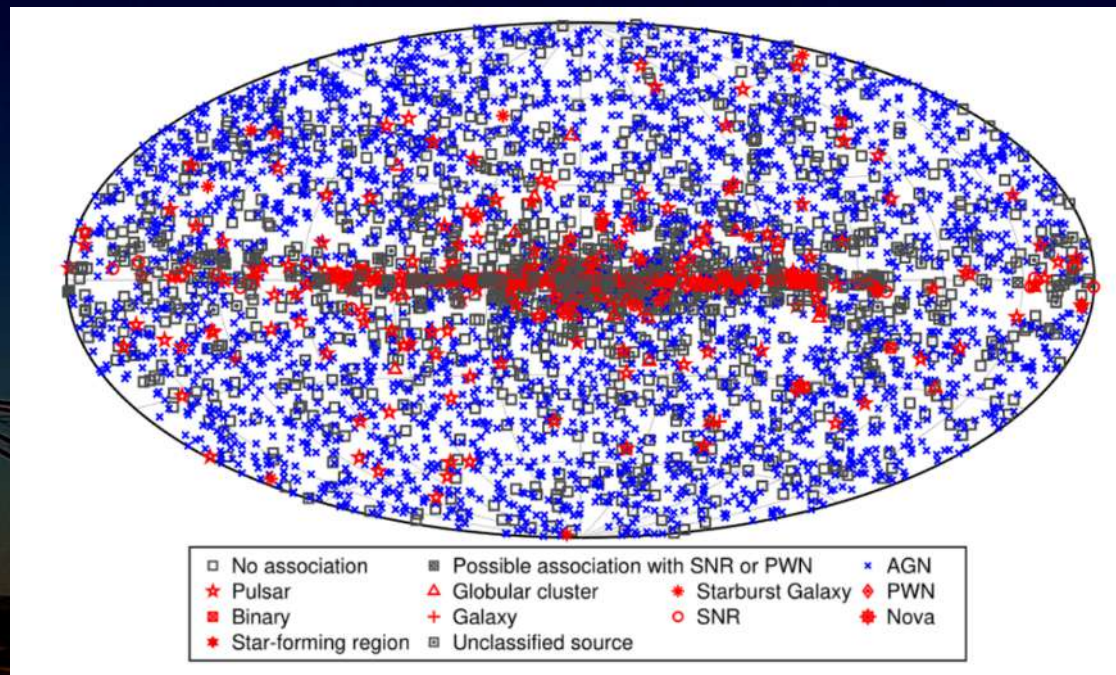
FERMI Large Area Telescope

- Télescope spatial de nouvelle génération
- Trajectographe de haute précision, pistes silicium
- Calorimètre hodoscopique à cristaux de CsI
- Lancé le 11 juin 2008



Une moisson de résultats

- 4ème catalogue (02/2019) :
5064 sources
 - 232 pulsars
 - 17 Nébuleuses à vent de pulsar
 - 40 Restes de supernova
 - 11 systèmes binaires
 - ~ 3130 noyaux actifs de galaxie
 - 42 galaxies radio
 - 7 galaxies à flambée d'étoiles
 - 15 amas globulaires
 - 1336 non associées



~60 publications associées par an

Le ciel gamma au GeV

- Une émission diffuse galactique très intense
- De nombreuses sources individuelles

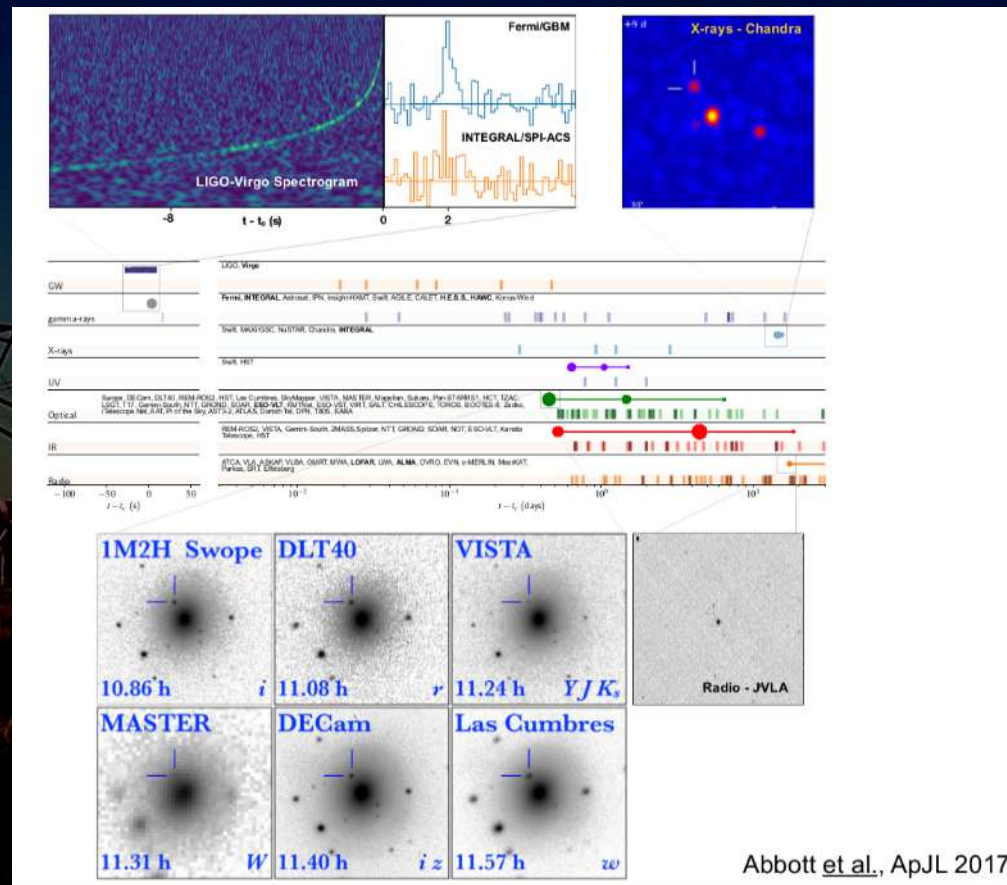
- De gigantesques bulles de plasma venant du centre galactique (trou noir?)

Naissance de l'astronomie multi-longueurs d'onde, multi-messagers - GW170817

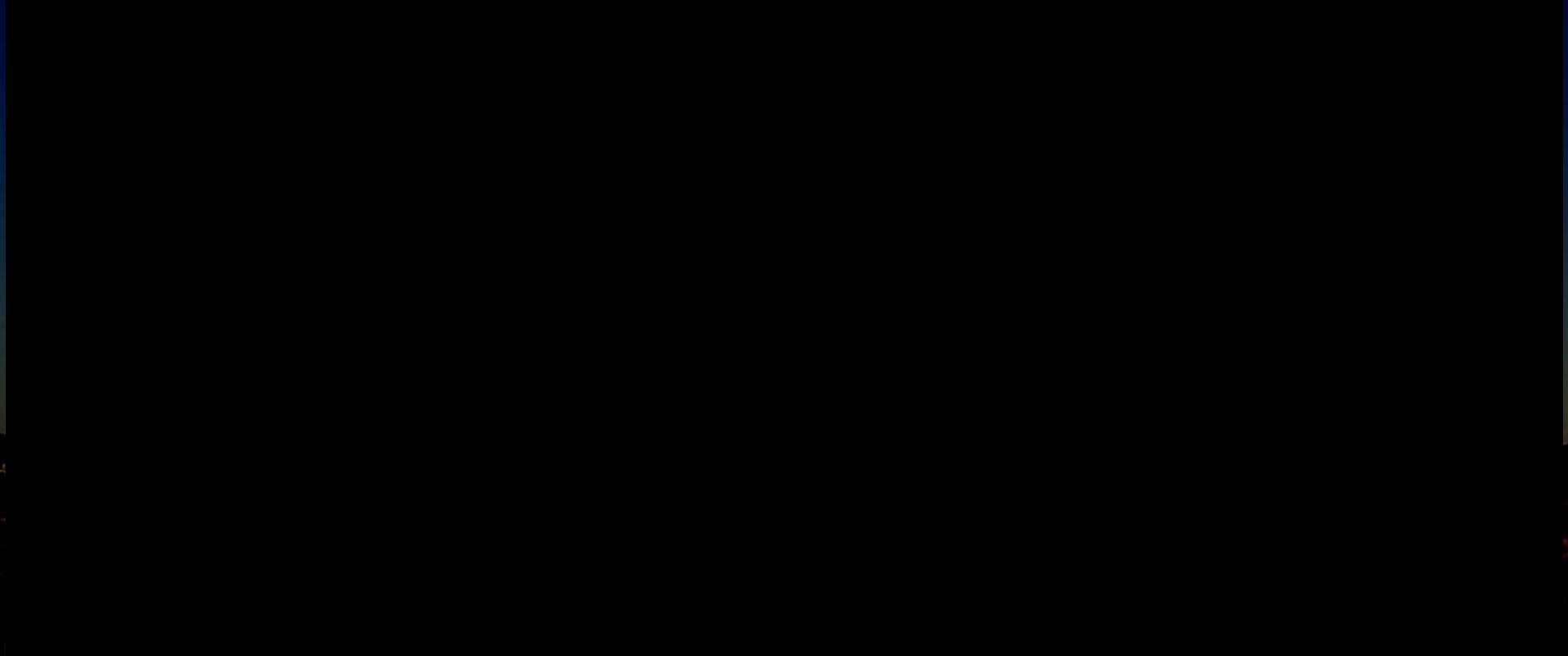
- Fusion d'étoiles à neutrons,
 - Ondes gravitationnelles
 - Sursaut γ à $t_0 + 2$ s
 - Emission rémanente de la kilonova (bleu \Rightarrow rouge)

■ Implications

- Confirmation de la vitesse de propagation des ondes
- Formation des éléments lourds
- Mesure de H_0
- ...

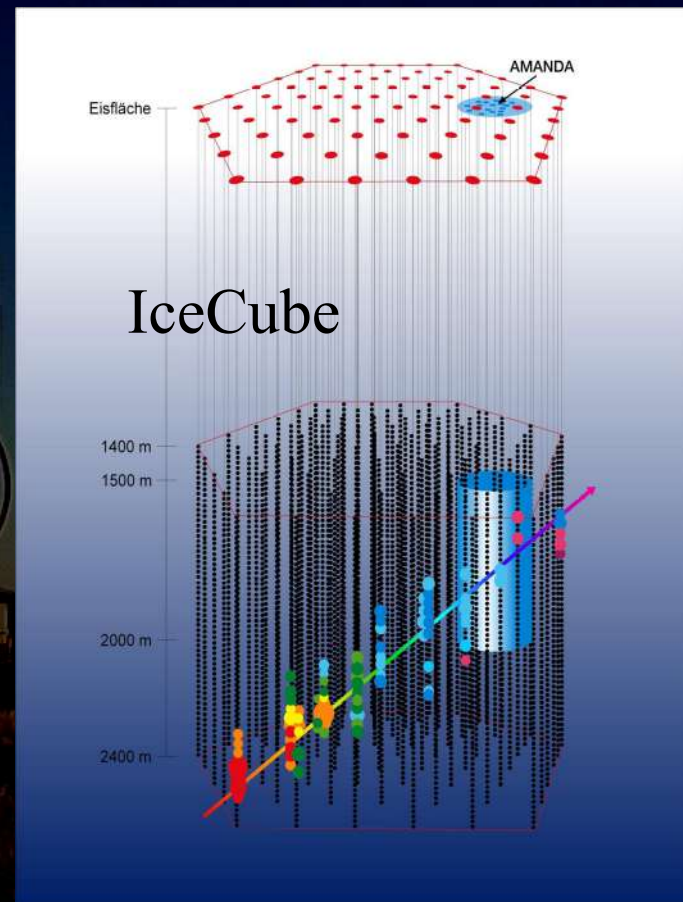
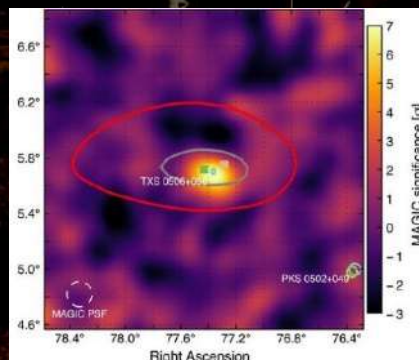
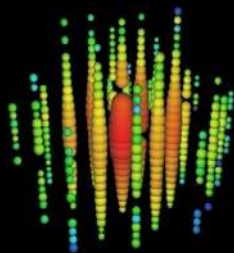


Fusion d'étoile à Neutrons – « Kilonova »



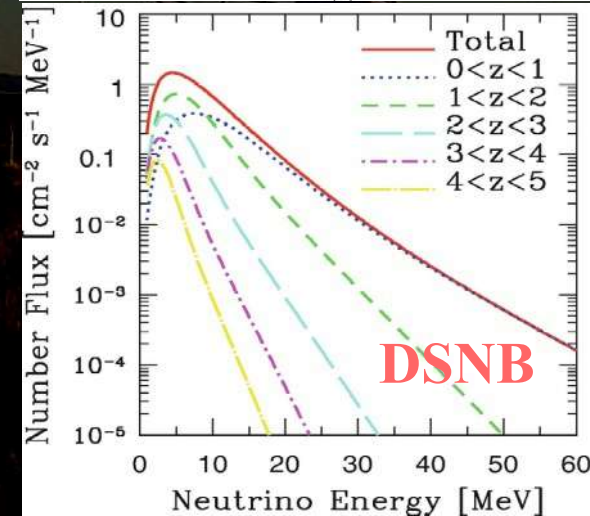
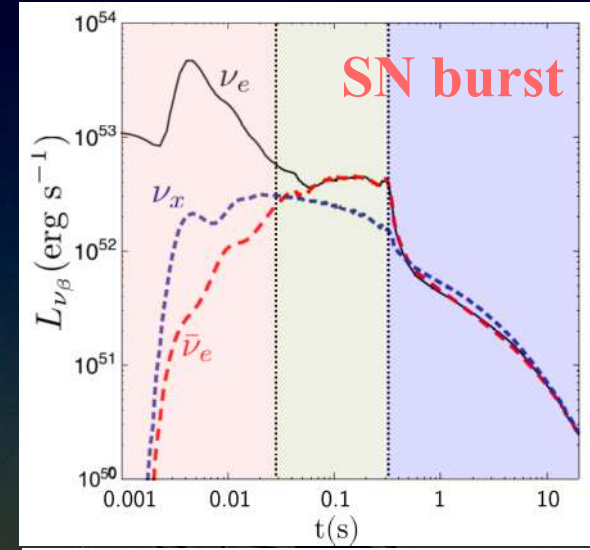
Multi-messagers - Quelques mots sur les neutrinos

- Particules élusives, voyageant sur de très longues distances
- Potentielles signatures de mécanismes d'accélération hadroniques
- Récentes avancées
 - Détection de neutrinos de très haute énergie (~ 100 TeV \Rightarrow 6 PeV) d'origine astrophysique
 - Possible association avec un noyau actif de galaxie (TXS 0506+056)



Astrophysique avec les neutrinos de Supernova

- Comprendre les mécanismes d'explosion et mesurer les propriétés des neutrinos
- Approches :
 - Observation d'une supernova proche (galactique), rare
 - Observation du fond diffus de neutrinos de supernova (DSNB), intégré sur l'histoire de l'Univers



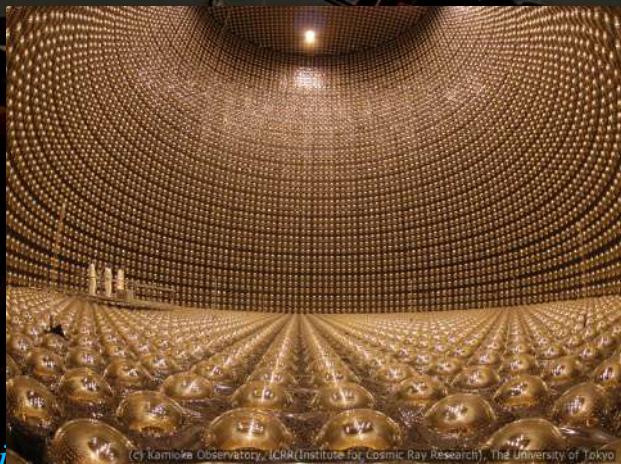
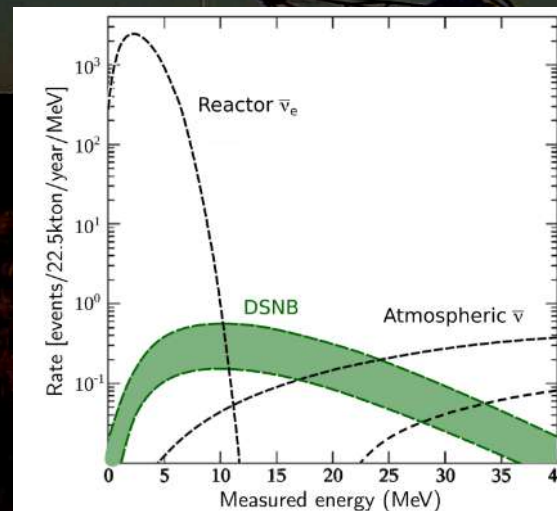
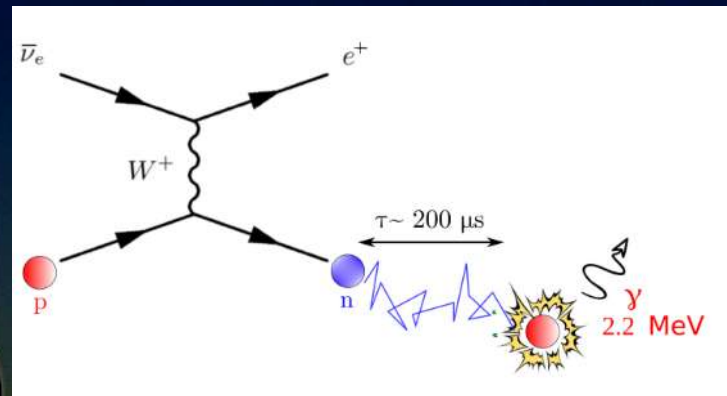
1987a

Avant et après explosion



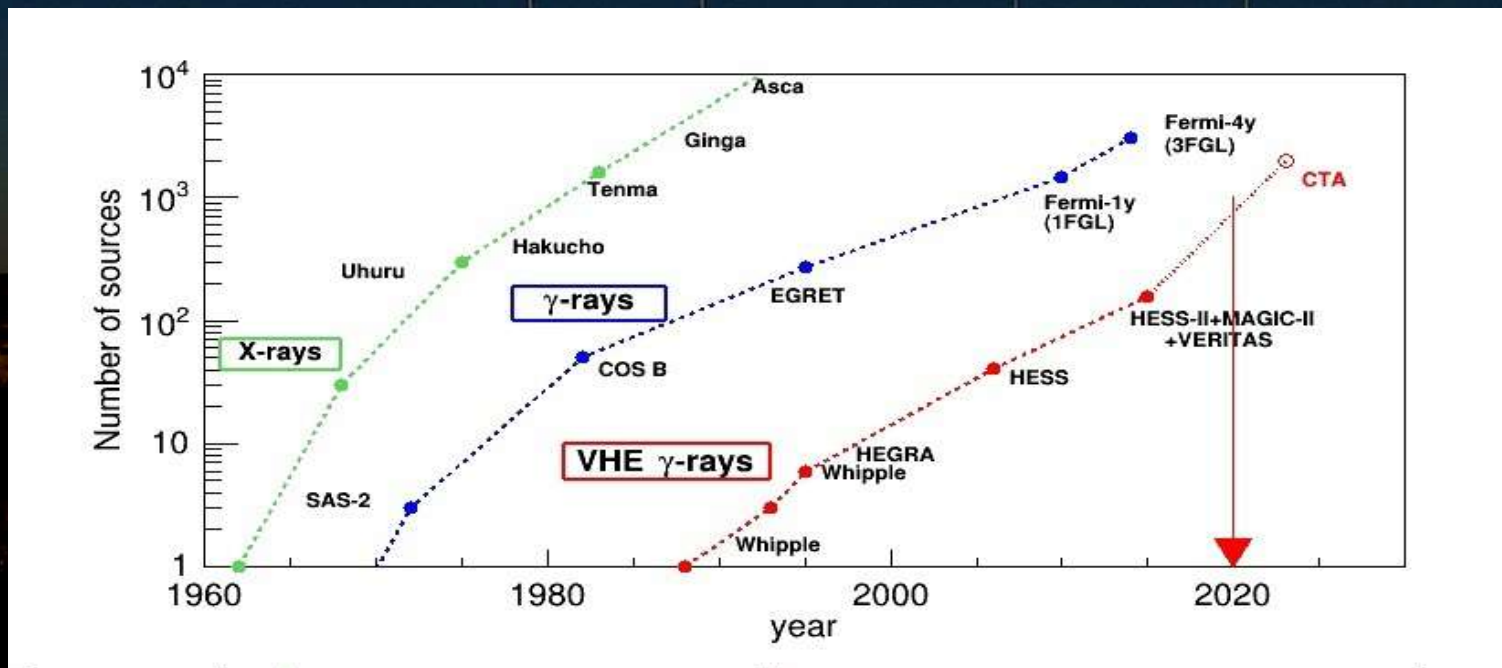
Détection du fond diffus avec Super-Kamiokande

- Canal de détection : réaction β inverse, avec identification du neutron émis (suppression du bruit de fond de spallation)
- Neutron identifié par capture sur du Gadolinium ($\tau \sim 30 \mu\text{s}$, 8 MeV)
- Gadolinium (0.01%) injecté dans Super-Kamiokande
- Analyses en cours



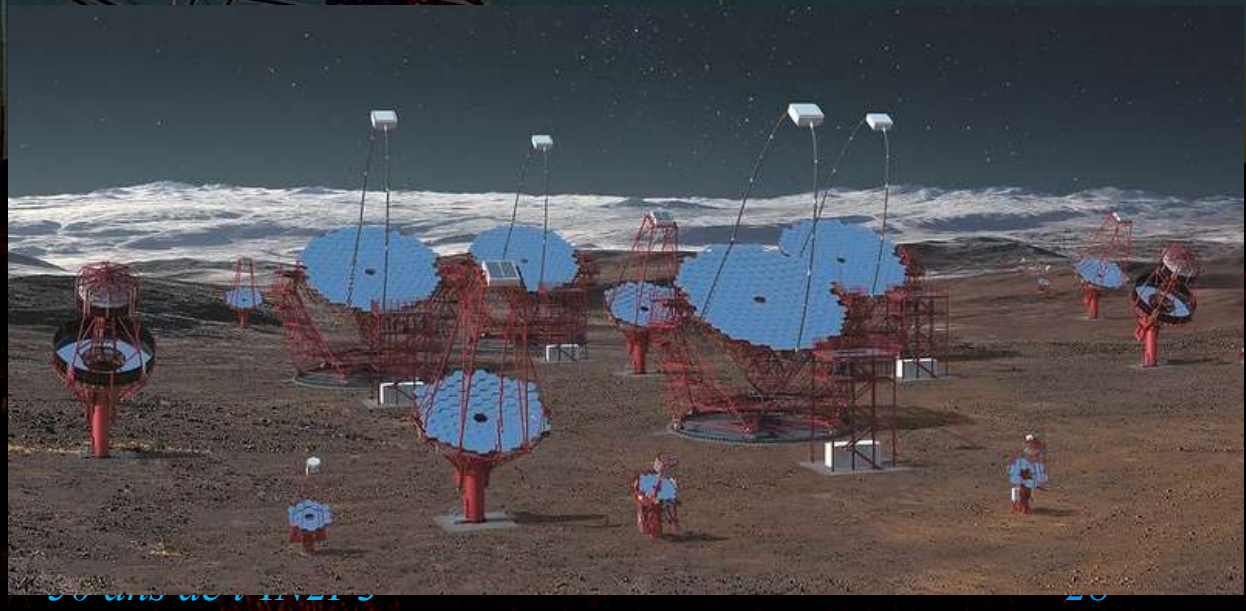
Evolution du Domaine

- L'astronomie de haute énergie évolue vers un domaine « Multi-Messenger, Multi-Longueur d'onde »
 - Photons, Neutrinos, Rayons cosmiques, Ondes Gravitationnelles
 - Observation simultanées de centaines d'observatoires

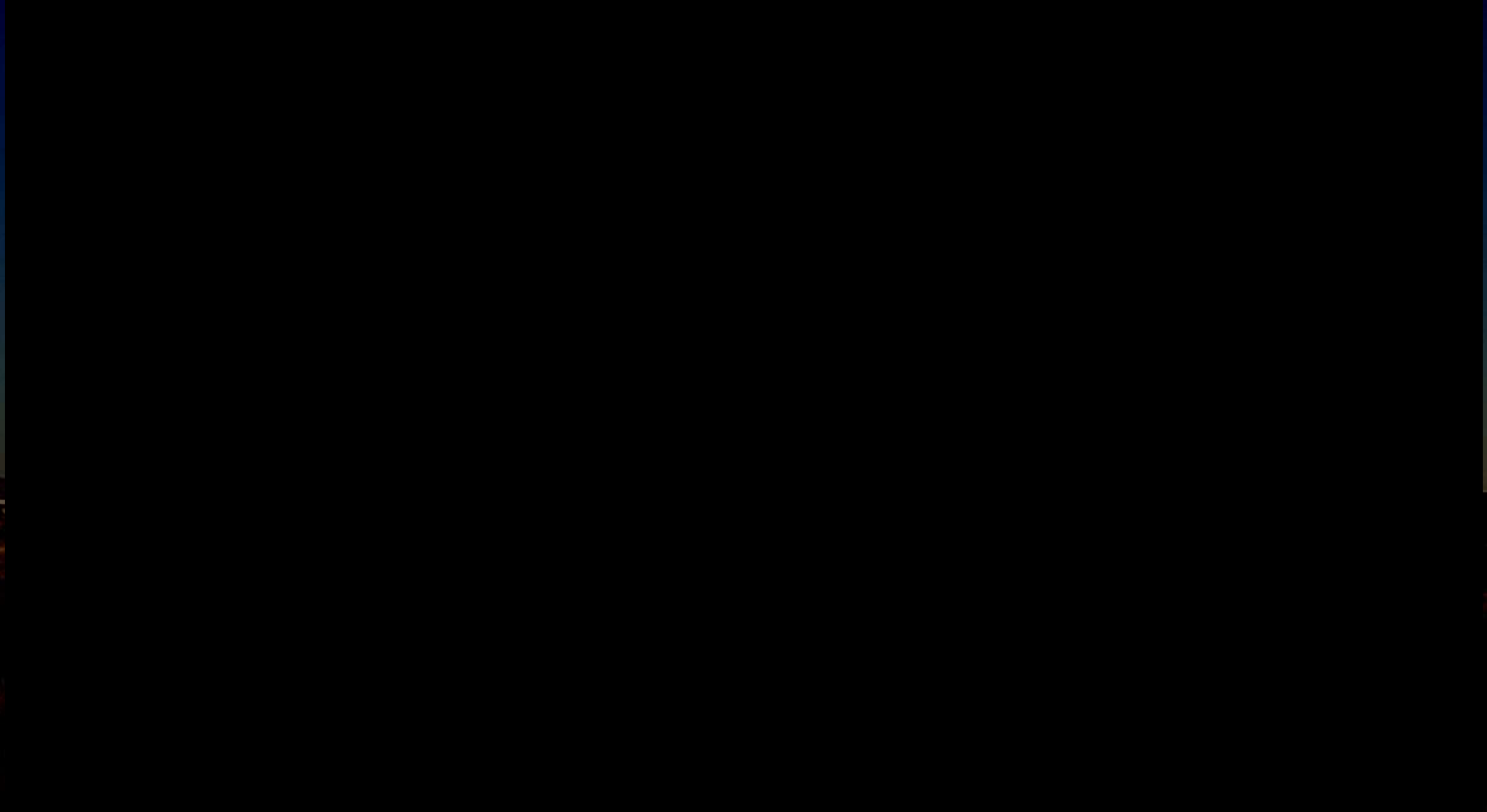


Cherenkov Telescope Array

- Réseau de prochaine génération, en cours de prototypage/construction
- O(100) télescopes, 3 tailles différentes, répartis sur 2 sites (Îles Canaries, Chili)
- Amélioration de la sensibilité d'un facteur ~ 10
- Fonctionnement en observatoire ouvert
- Le LLR participe à la conception d'un type de camera



Une nuit avec H.E.S.S.



© Vikas Chandler