

Enseigner les phénomènes astrophysiques énergétiques

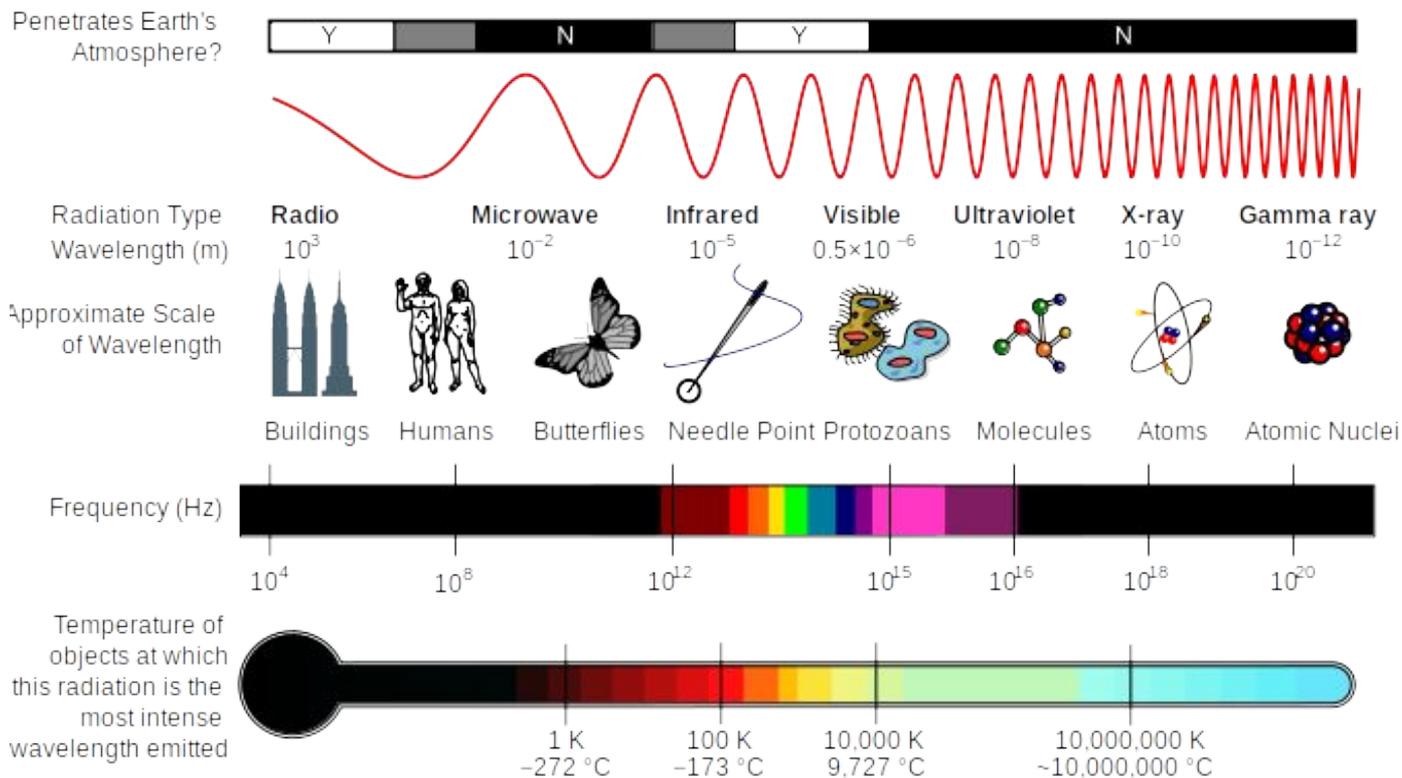
–

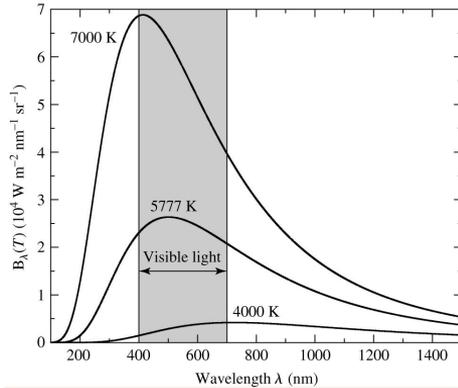
Yvonne Becherini
Université de Paris Cité
Laboratoire Astroparticule et Cosmologie
Data Intelligence Institute of Paris



Notions données ici :

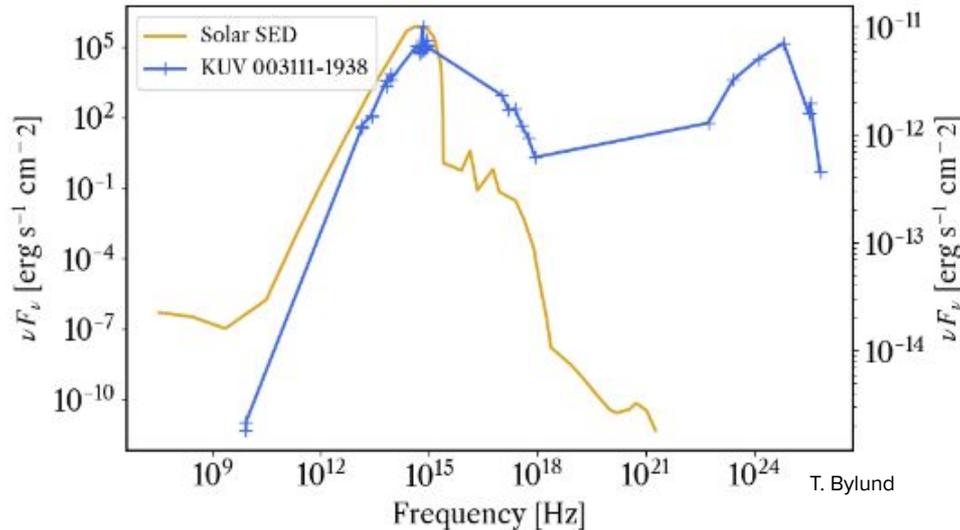
- Émission non thermique
- Physique de la création des photons énergétiques
- Accélération des particules
- La recherche autour de l'Astrophysique des hautes énergies
- Astronomie Gamma : le satellite Fermi, les télescopes H.E.S.S.
- Astronomie Neutrino : l'expérience IceCube en Antarctique, le télescope KM3NeT dans la mer
- Sources d'accélération des particules
- Résultats majeurs
- Questions ouvertes



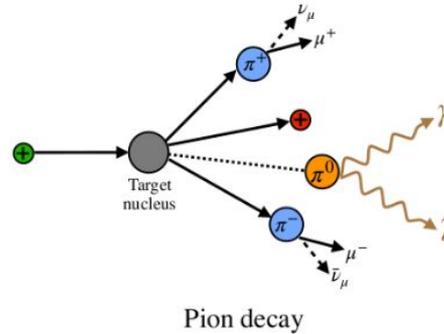
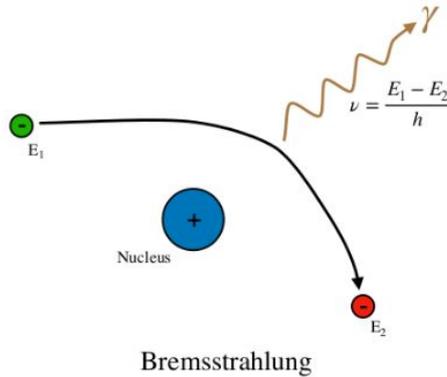
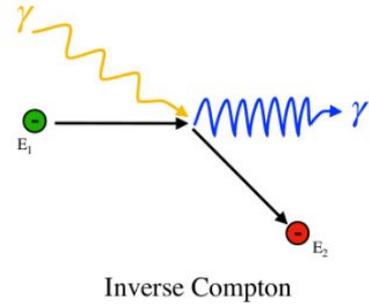
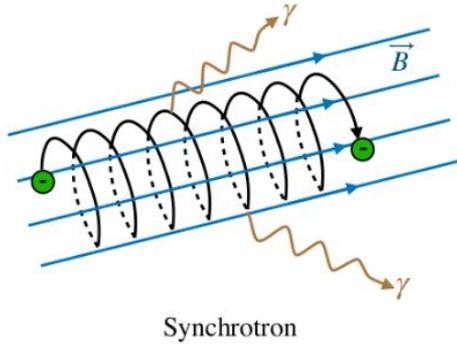


→ Émission thermique :
spectre de rayonnement
de corps noir typique
des étoiles

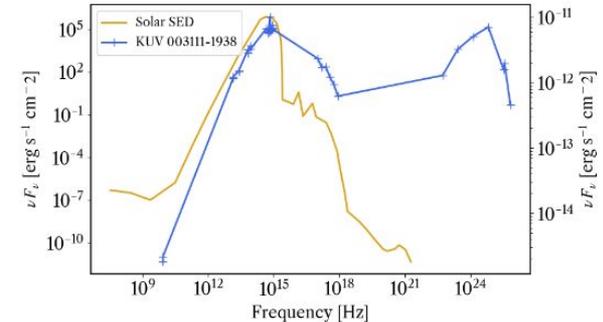
- Quelle est la **physique** derrière la création de ces photons de haute énergie ?
- Comment nous cherchons à comprendre l'Univers énergétique
- Quels sont les **objets** capables d'émettre ce type de radiation ?



→ Émission non thermique :
spectre à plus haute énergie



- La physique de particules rencontre l'Astrophysique
- Émission non thermique, quatre principaux mécanismes
 - Radiation de synchrotron
 - Radiation Compton Inverse
 - Bremsstrahlung (rayonnement de freinage)
 - Désintégration des pions
- À noter que le quatrième mécanisme produit aussi des neutrinos
- Pour obtenir des photons au-delà du keV, les électrons et les protons doivent être **relativistes**

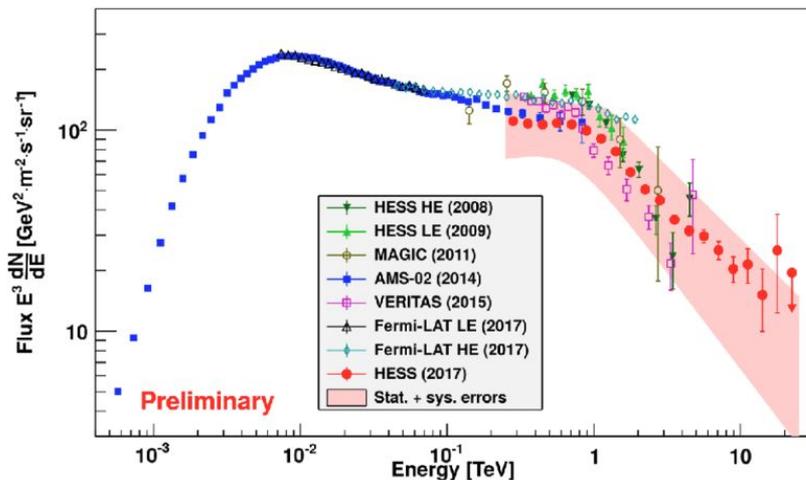


NSF/J. Yang

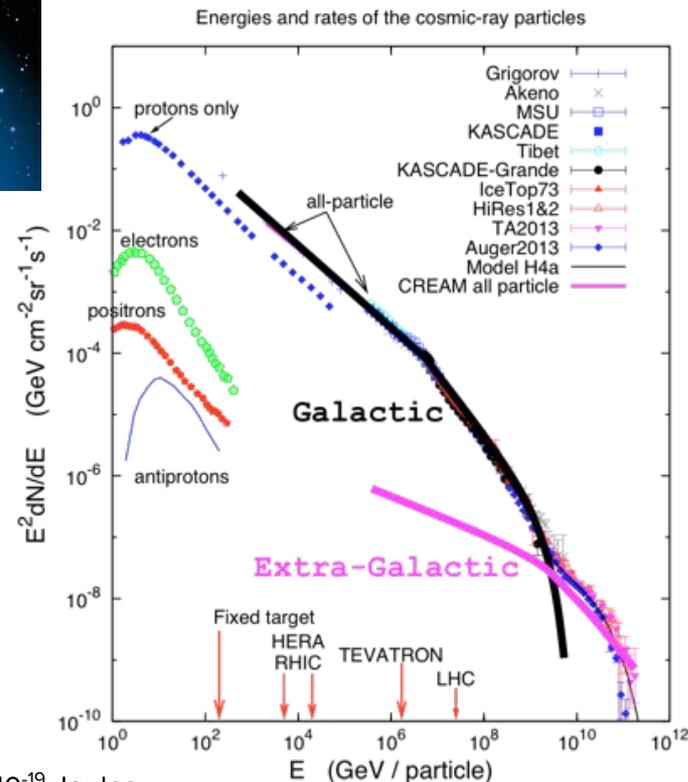
On observe des flux des photons qui arrivent à très haute énergie, mais aussi, on observe des flux des électrons et des protons qui arrivent sur la Terre



Spectre des électrons :

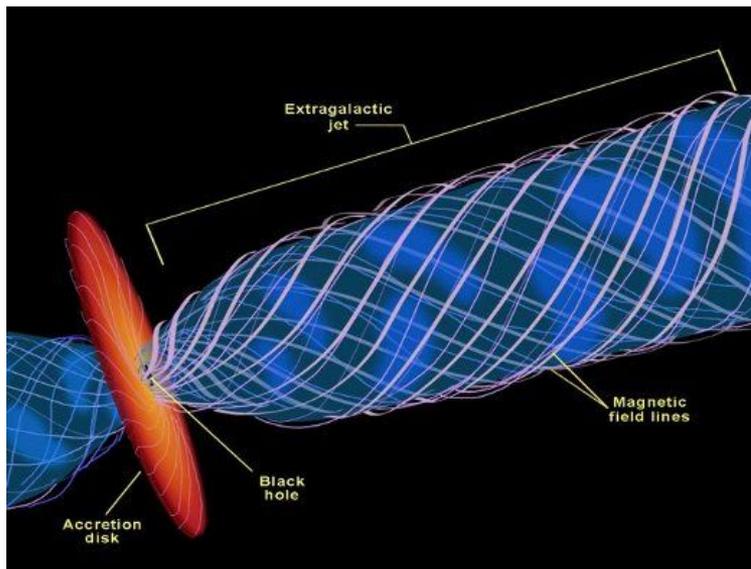


Spectre des protons/noyaux :



1 électronvolt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ Joules

Beaucoup de théories, toutes basées sur l'interaction des particules avec les champs électriques et magnétiques présents dans l'Univers



Champs électriques E et magnétiques B dans l'Univers

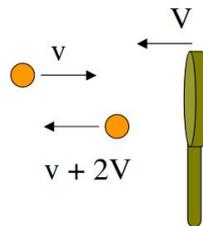
- Dans le milieu interstellaire
- Champs électriques transitoires : reconnexion magnétique (flares du soleil), ondes électromagnétiques
- Champ magnétique
 - Intergalactique
 - Plasmas astrophysiques (jets, disques d'accrétion, etc)

Comment sont générés ces champs magnétiques ?

E. Parizot

- Mouvements à grande échelle de milieux ionisés
 - Champs magnétiques, nuages magnétisés...
- Turbulence du milieu interstellaire
 - Turbulence magnétique, inhomogénéités du champ magnétique, ondes plasma etc.

Comment acquièrent les particules de l'énergie ?



Réflexion par un nuage magnétisé en mouvement
balle \rightarrow particule chargée
raquette \rightarrow "miroir magnétique"

Collision frontale \rightarrow gain d'énergie
Collision fuyante \rightarrow perte d'énergie

Gain d'énergie net, en moyenne (processus stochastique)

- **Astronomie Gamma**
- **Astronomie Neutrino**
- Ondes gravitationnelles
- Rayons cosmiques

Astronomie multi messagère

Photons

- Se propagent en ligne droite
- Origine des particules accélérés difficile à identifier
- Horizon limité

Neutrinos

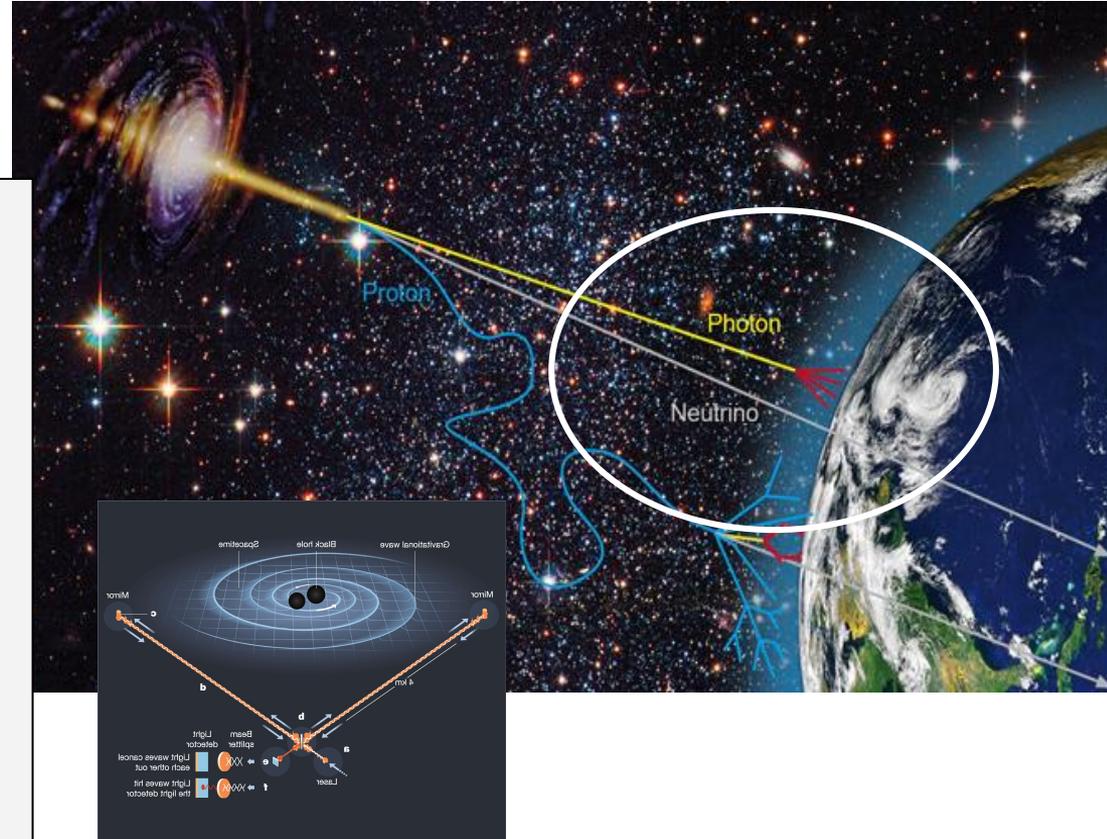
- Se propagent en ligne droite
- Difficiles à détecter, car ils interagissent très faiblement
- Si neutrinos présents, alors protons accélérés

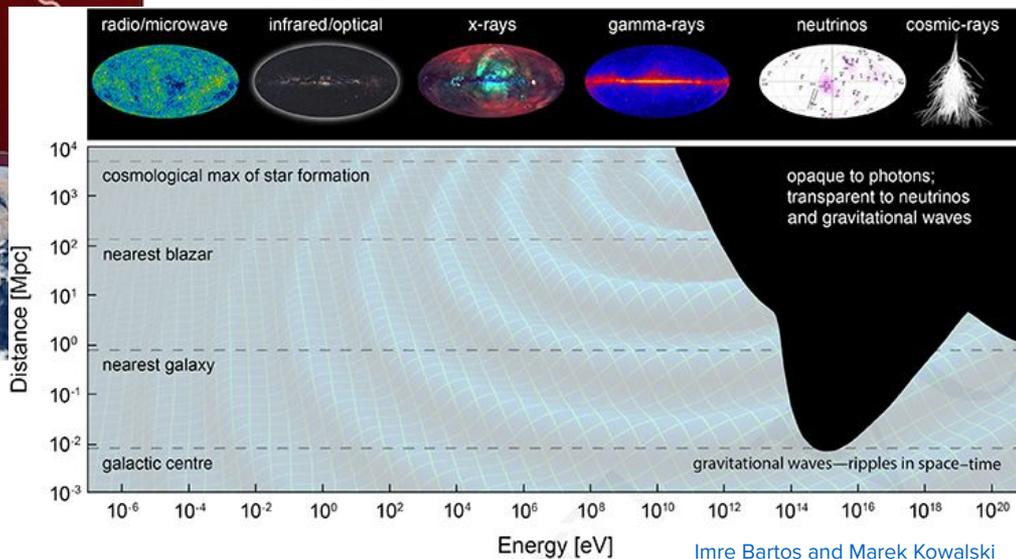
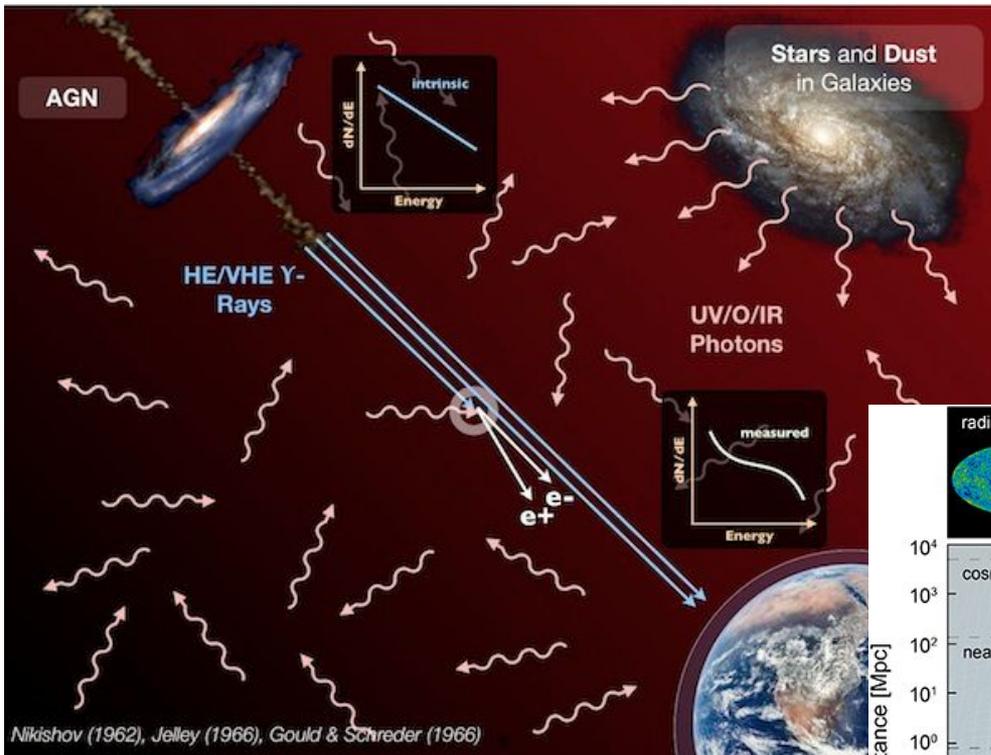
Rayons cosmiques

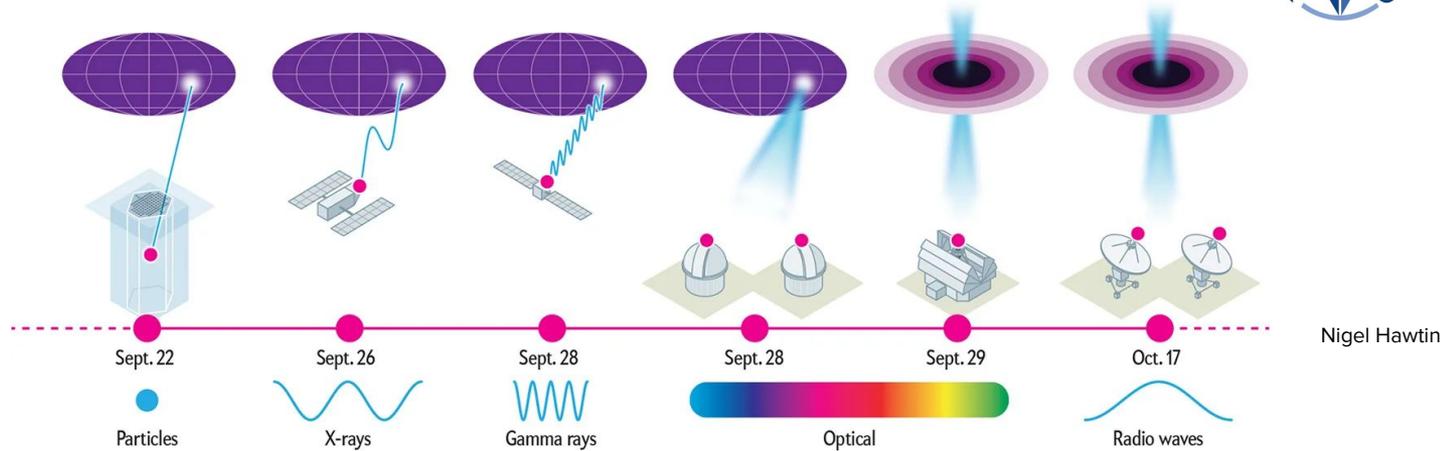
- Déviés par les champs magnétiques jusqu'à très haute énergie : ne pointent pas vers leur source
- À très haute énergie : très rares, nécessitent de très grandes surfaces de détection

Ondes gravitationnelles

- Présentes seulement pour certains types de phénomènes

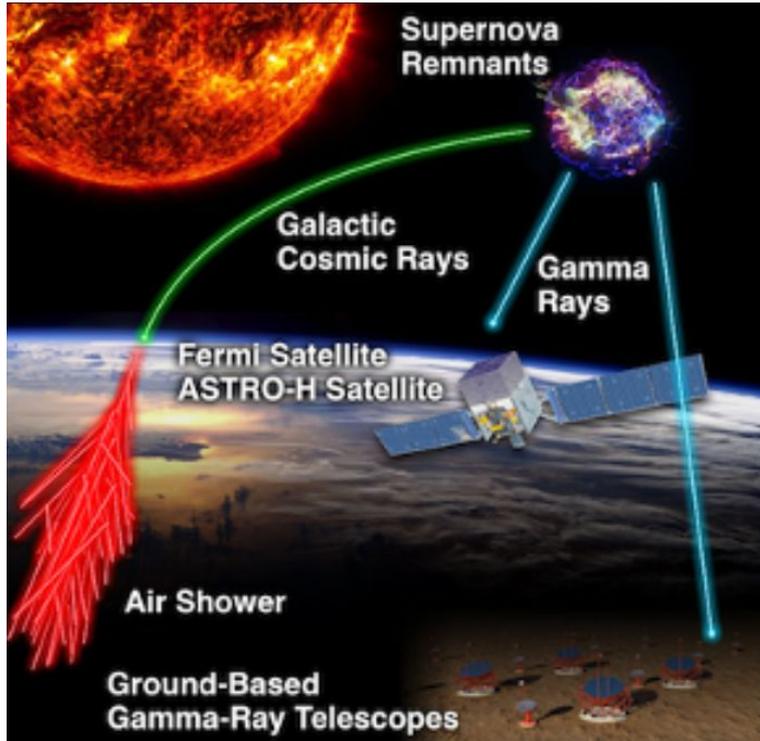






Plusieurs instruments, sensibles à différentes particules et gammes d'énergie, coordonnent leurs observations, s'échangent des données et les interprètent ensemble :

- Photons dans plusieurs bandes de longueurs d'onde (Astronomie multi-longueur d'onde)
- Neutrinos aux énergies MeV (neutrinos solaires et supernova) et TeV-PeV (accélérateurs cosmiques)
- Rayons cosmiques, observés sur 12 ordres de grandeur en énergie
- Ondes gravitationnelles, qui sont jusqu'à présent observées pour deux classes d'événements (fusion de deux trous noirs et fusion étoile à neutron-étoile à neutrons)

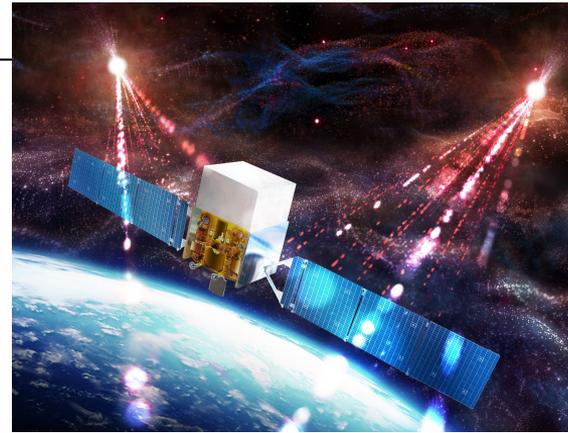


Dans l'espace :

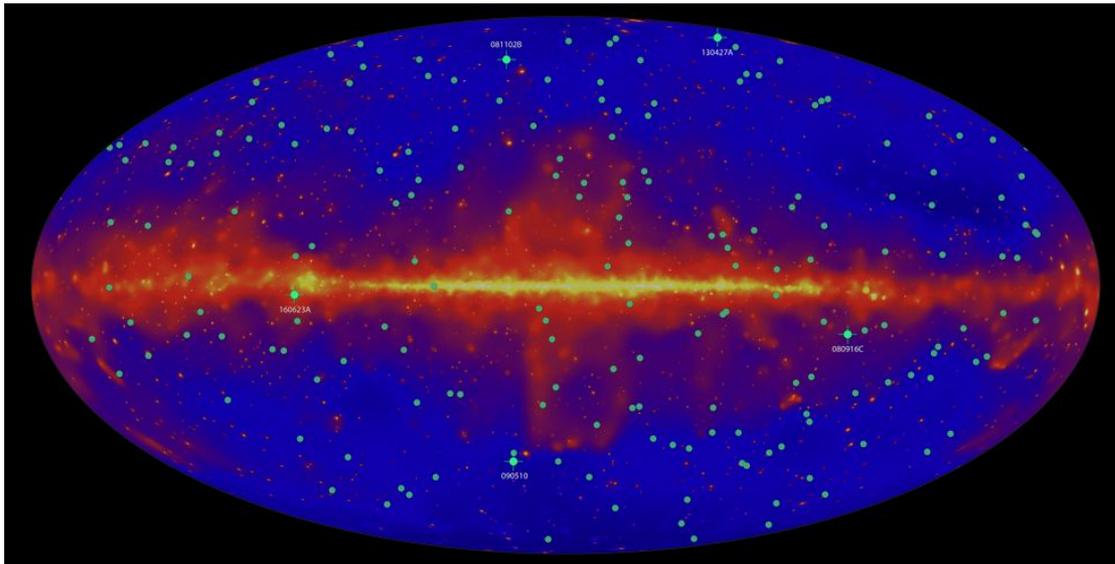
Satellite Fermi-LAT dans l'intervalle **50 MeV-1 TeV**

Au sol :

Télescopes à imagerie atmosphérique Tcherenkov, comme HESS, Veritas, MAGIC dans l'intervalle **50 GeV-100 TeV**



Intervalle d'énergie : **50 MeV-1 TeV**
En mission depuis 2008
La carte la plus complète de l'Univers gamma
à ces énergies

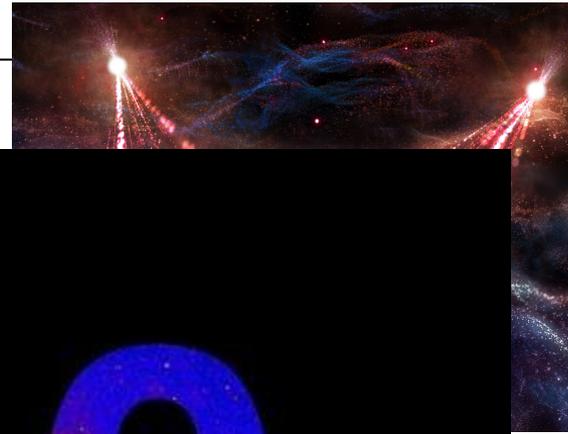


6659 accélérateurs de particules
trouvés en 12 ans de prise de
données

3743 "Blazars" : galaxies avec trou
noir supermassif au centre

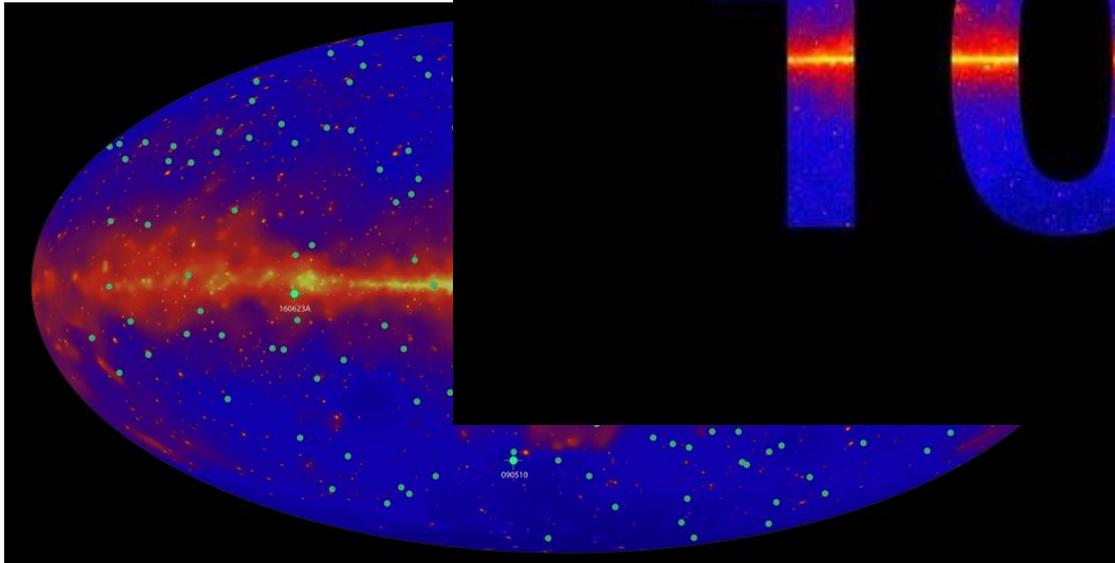
2157 sources sont non-associées
(pas de contrepartie connue)

186 Sursauts Gamma
(10 ans des données)



Intervalle d'énergie : 50 MeV à 300 GeV
En mission depuis 2008
La carte la plus complète de l'univers à ces énergies

10



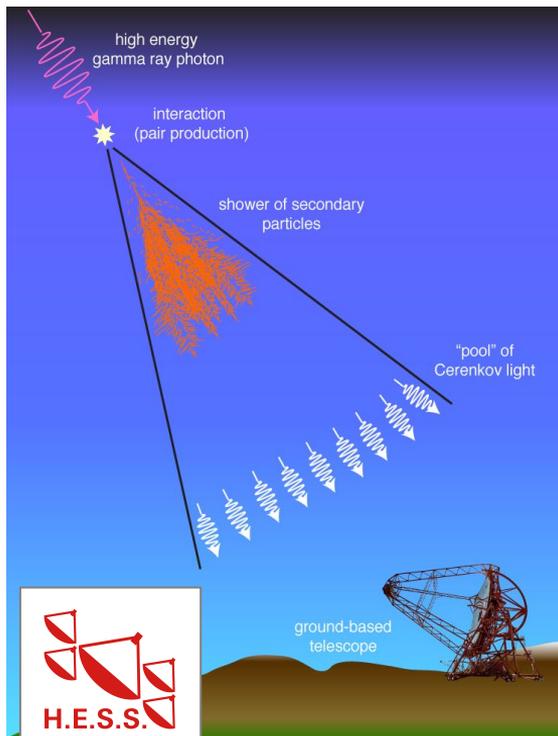
...teurs de particules
...ans de prise de

... : galaxies avec trou
...sif au centre

... sont non-associées
... (partie connue)

186 Gamma Ray Bursts
(10 ans des données)

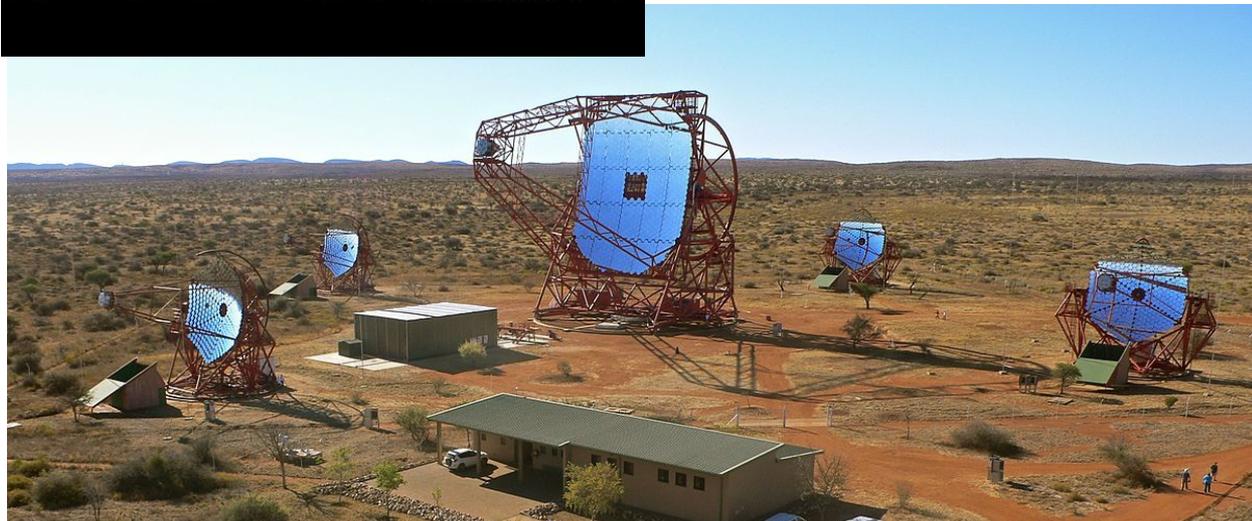
Intervalle d'énergie :
50 GeV-100 TeV
En activité depuis 2003 jusqu'à 2024

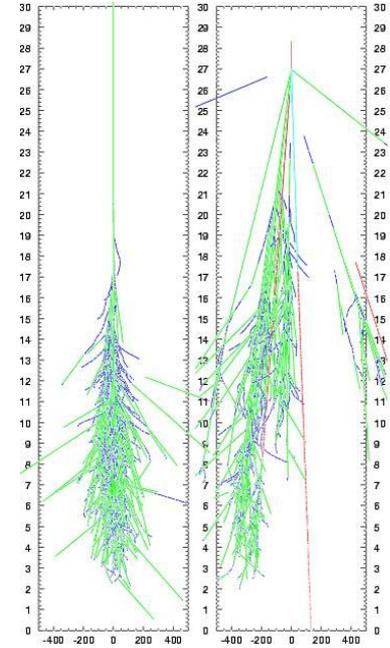
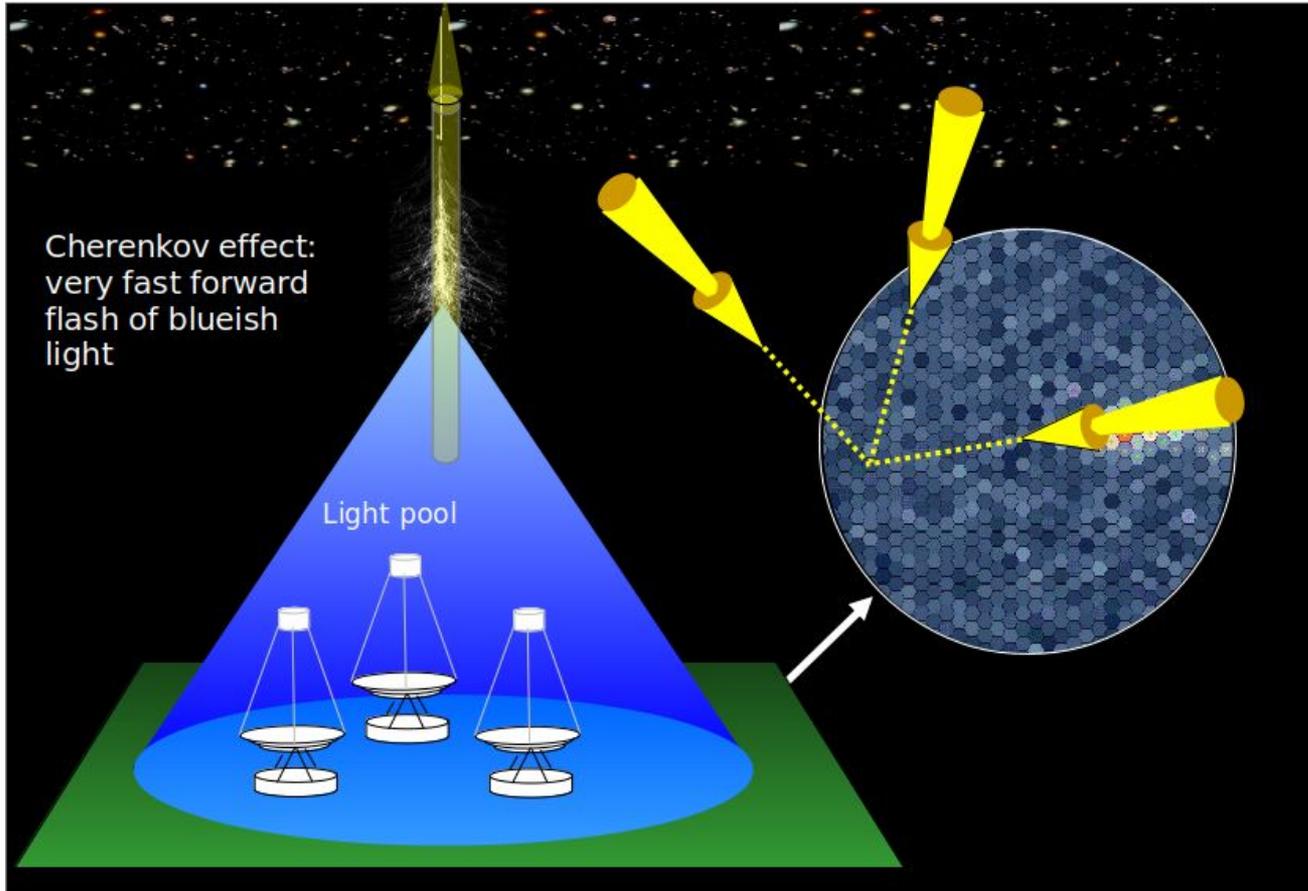


H.E.S.S. est un de trois observatoires gamma au sol existants

H.E.S.S. vient de fêter 20 ans d'activité dans l'astronomie gamma

Situé en Namibie à une altitude de 1800 m





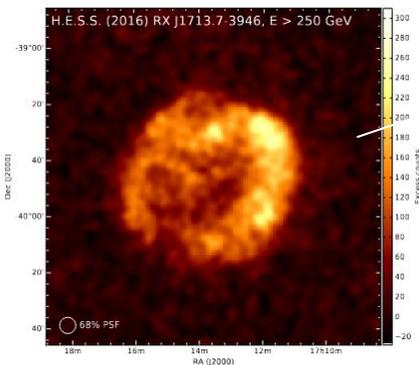
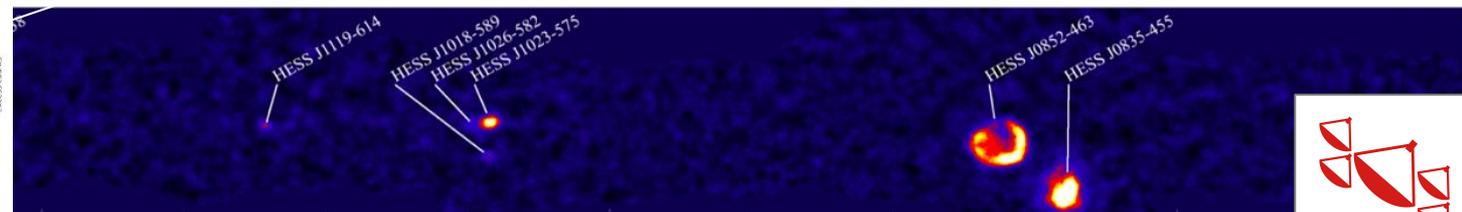
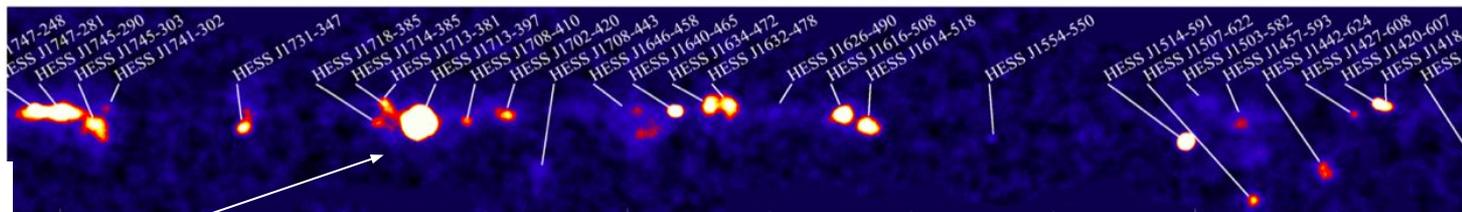
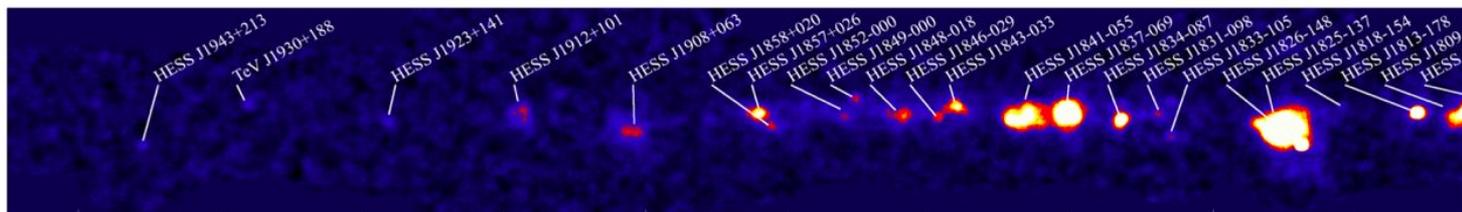
Citizen Science “Muon Hunter”

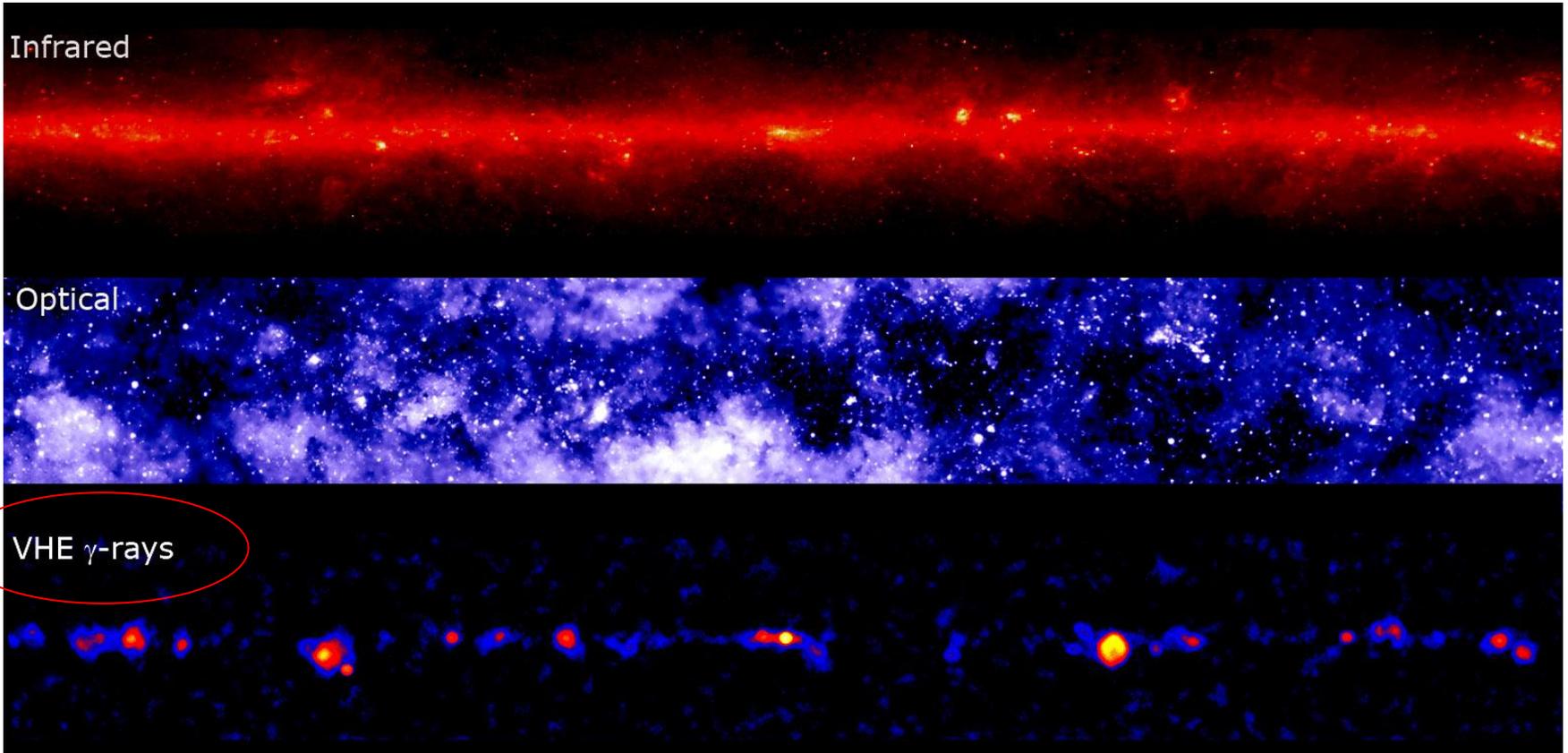
<https://www.zooniverse.org/projects/zooiniverse/muon-hunter-classic/>

Découverte de 252 sources d'accélération des particules de plusieurs types dans notre Galaxie et dans le domaine extragalactique

Dans notre **Galaxie** :

- Chocs de vents dans les régions de formation d'étoiles
- Restes de supernovæ
- Pulsar et leurs nébuleuses
- Systèmes binaires, Novæ



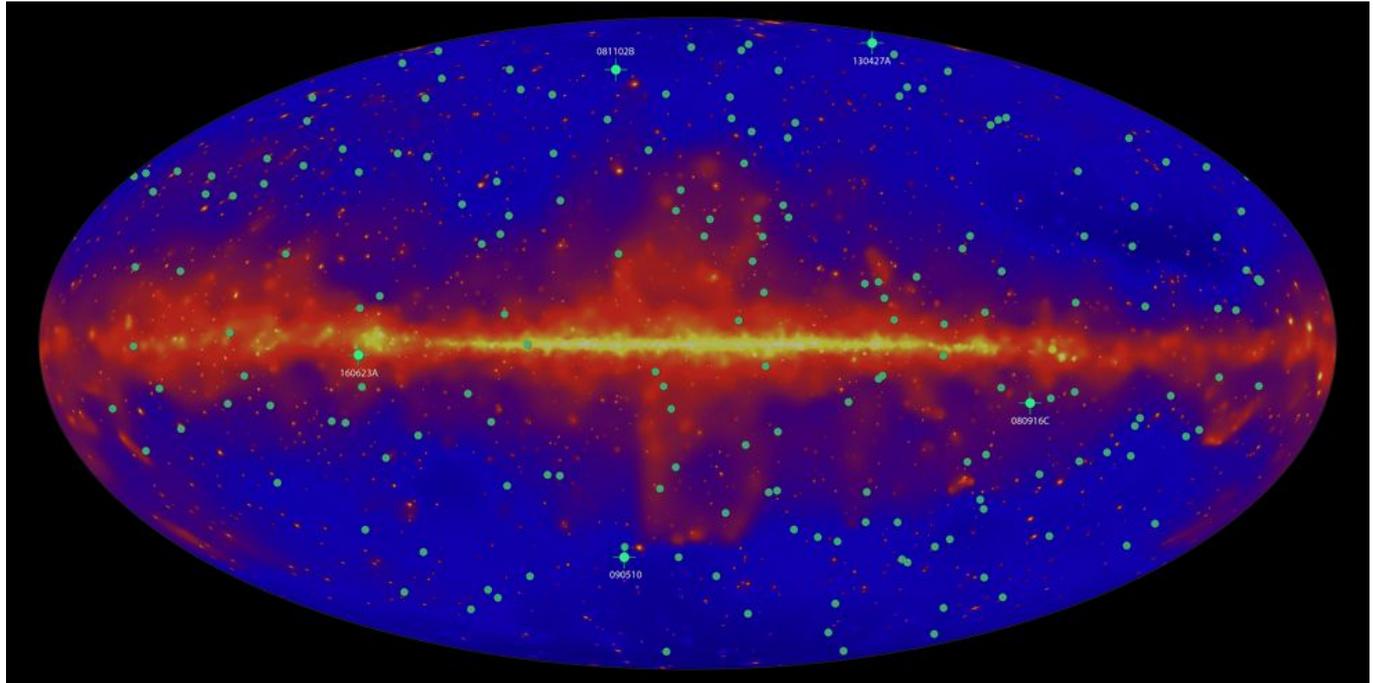




Au-delà de notre Galaxie :

- Noyaux actifs de galaxies
- Sursauts gamma
- Galaxies à flambé d'étoiles

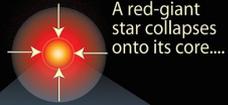
Fermi-LAT Collaboration



Gamma-Ray Bursts (GRBs): The Long and Short of It

Long gamma-ray burst

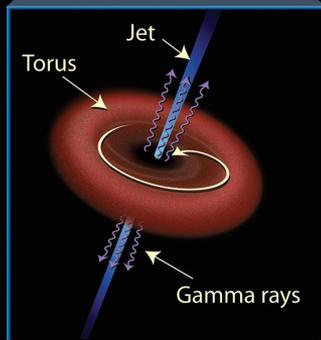
(>2 seconds' duration)



A red-giant star collapses onto its core....



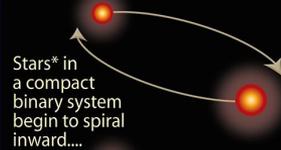
...becoming so dense that it expels its outer layers in a supernova explosion.



Gamma rays

Short gamma-ray burst

(<2 seconds' duration)



Stars* in a compact binary system begin to spiral inward....

...eventually colliding.

The resulting torus has at its center a powerful black hole.

*Possibly neutron stars.

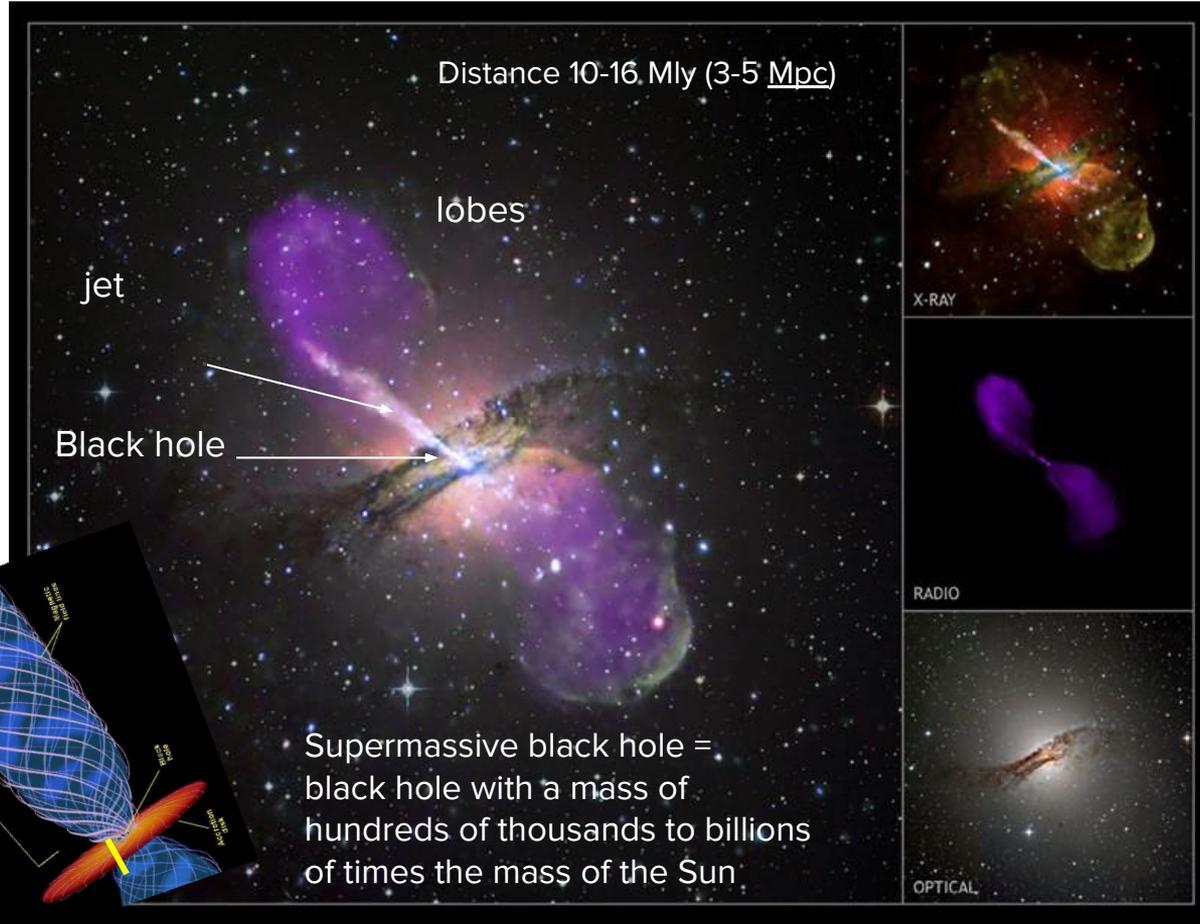
Sursauts très rapides et très puissants de lumière, résultant de deux possibles mécanismes :

- La mort d'une étoile massive par explosion de Supernova (Sursauts longs, plus que 2 secondes)
- Quand deux étoiles à neutrons fusionnent en formant un trou noir ou une étoile à neutrons (Sursauts courts, moins que 2 secondes, Kilonova)

Émission à toutes les longueurs d'ondes et génération d'ondes gravitationnelles dans le 2^e cas.

G. Ghisellini

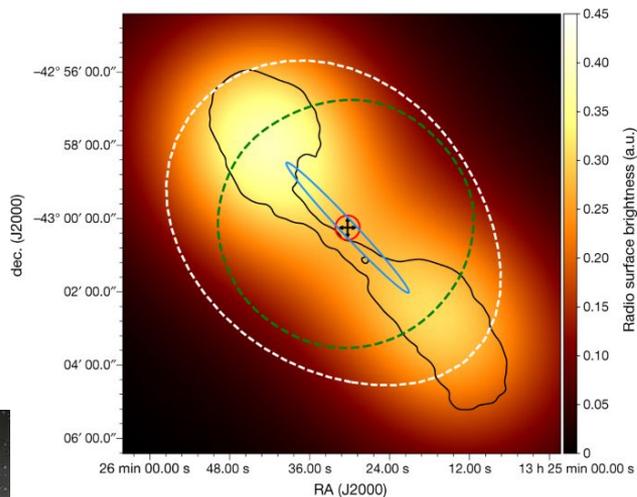
- **AGN:** $L < 10^{48}$ erg/s
- **SN:** $L < 10^{45}$ erg/s (in photons)
- **GRB:** $L < 10^{54}$ erg/s



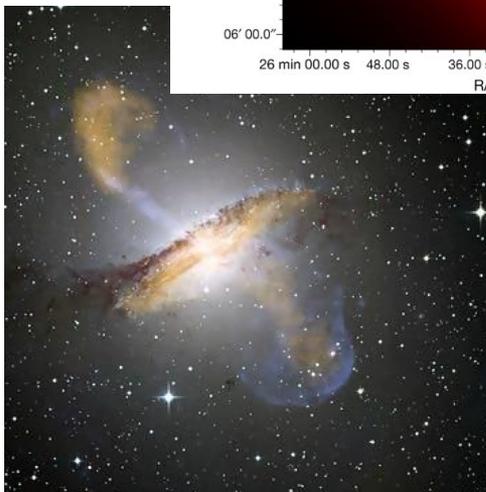
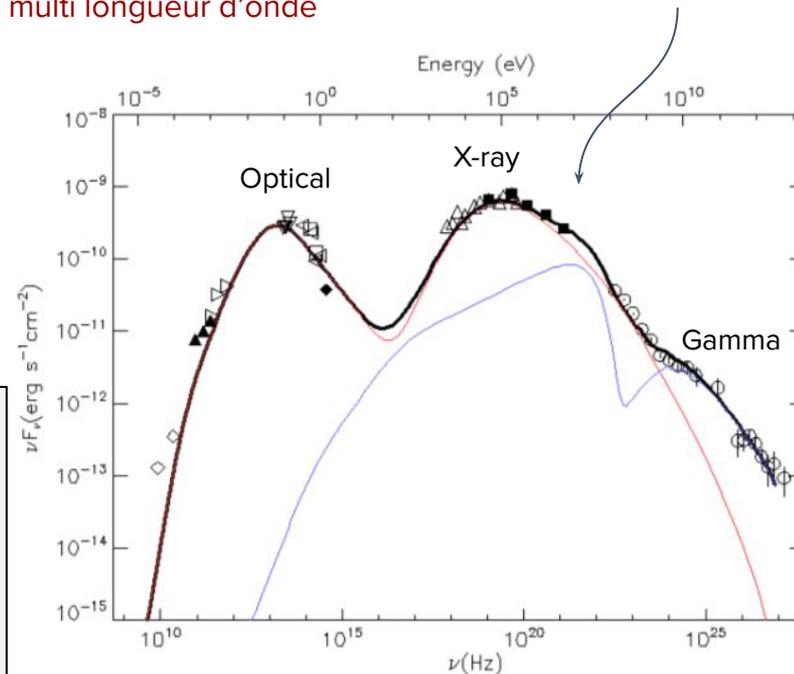
e- in a mag. field

e- in a mag. field

Host galaxy



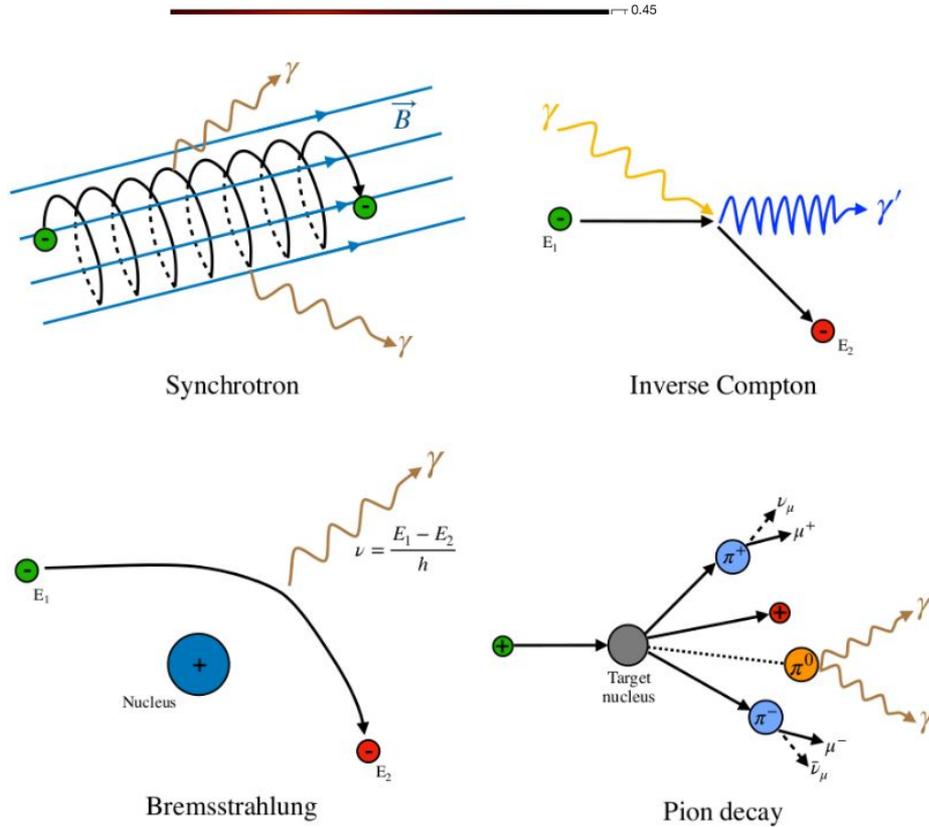
Compréhension des mécanismes d'accélération des particules à travers l'**astronomie multi longueur d'onde**



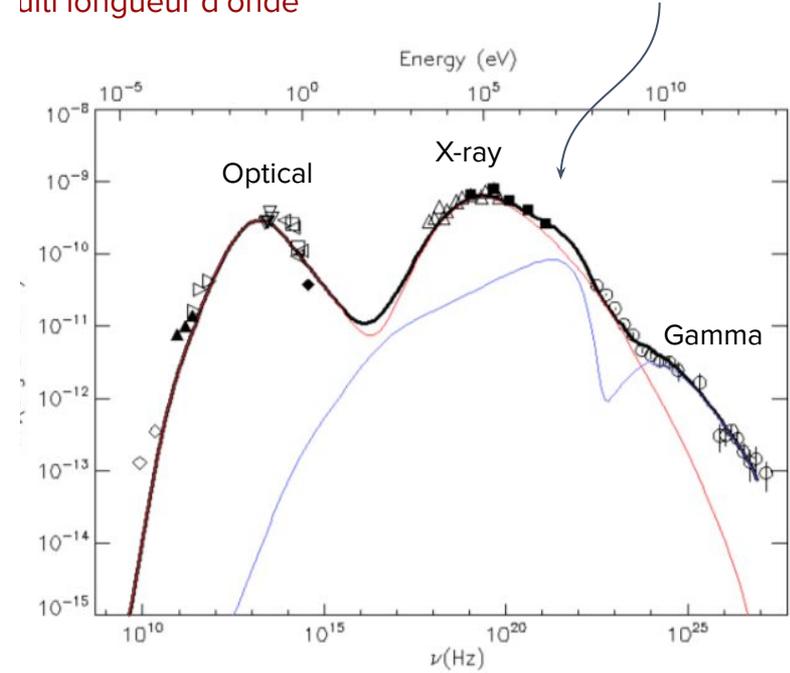
Quel est le mécanisme d'accélération ?

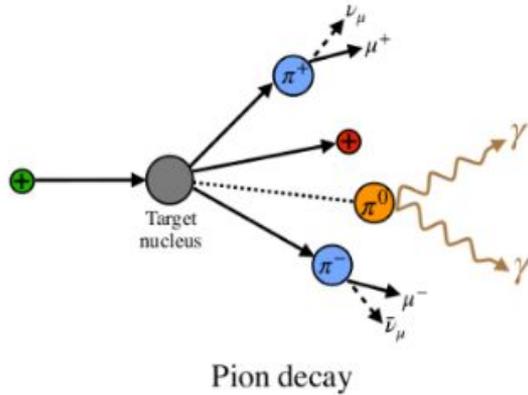
Dans la plupart des cas, cela peut être expliqué avec une population d'**électrons relativistes**

Difficile de distinguer entre électrons accélérés et protons accélérés en regardant seulement les spectres des photons



un des mécanismes
des particules à travers
multi longueur d'onde





Hypothèse de travail :

Si nous détectons rayons gamma et des neutrinos à la position des sources astrophysiques, cela va témoigner de la présence des protons accélérés.

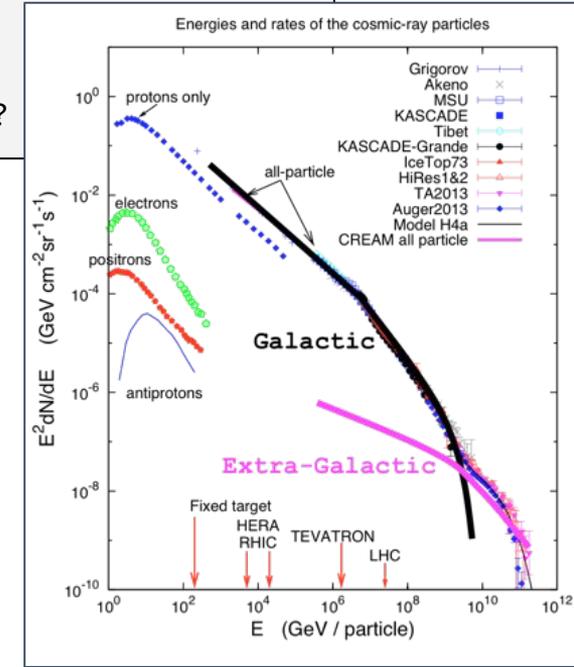
Si pas de neutrinos, le doute reste si la population de particules accélérées est composée exclusivement par des électrons.

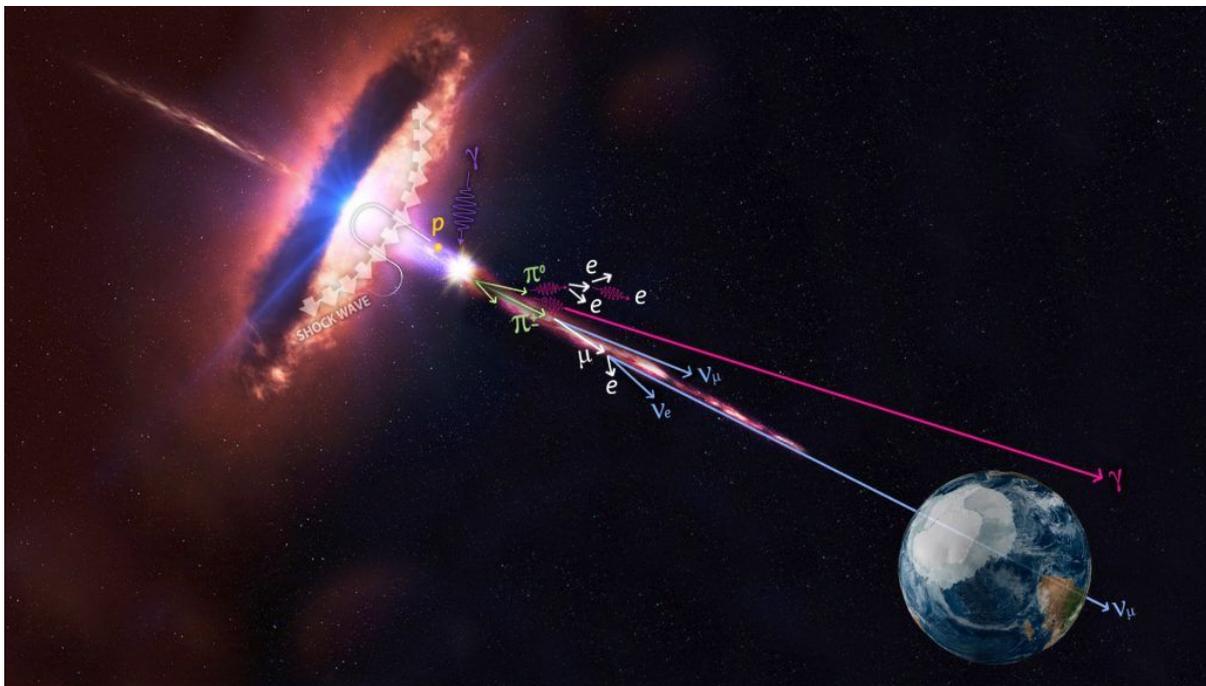
Mais alors, où sont accélérés tous ces protons ?

Grand effort depuis plus de **100 ans** sur la compréhension de l'origine des rayons cosmiques : où sont-ils créés et où sont-ils accélérés ?

Grand effort depuis au moins **50 ans** sur la possibilité de détecter les neutrinos cosmiques provenant des sources astrophysiques (**Astronomie Neutrino**)

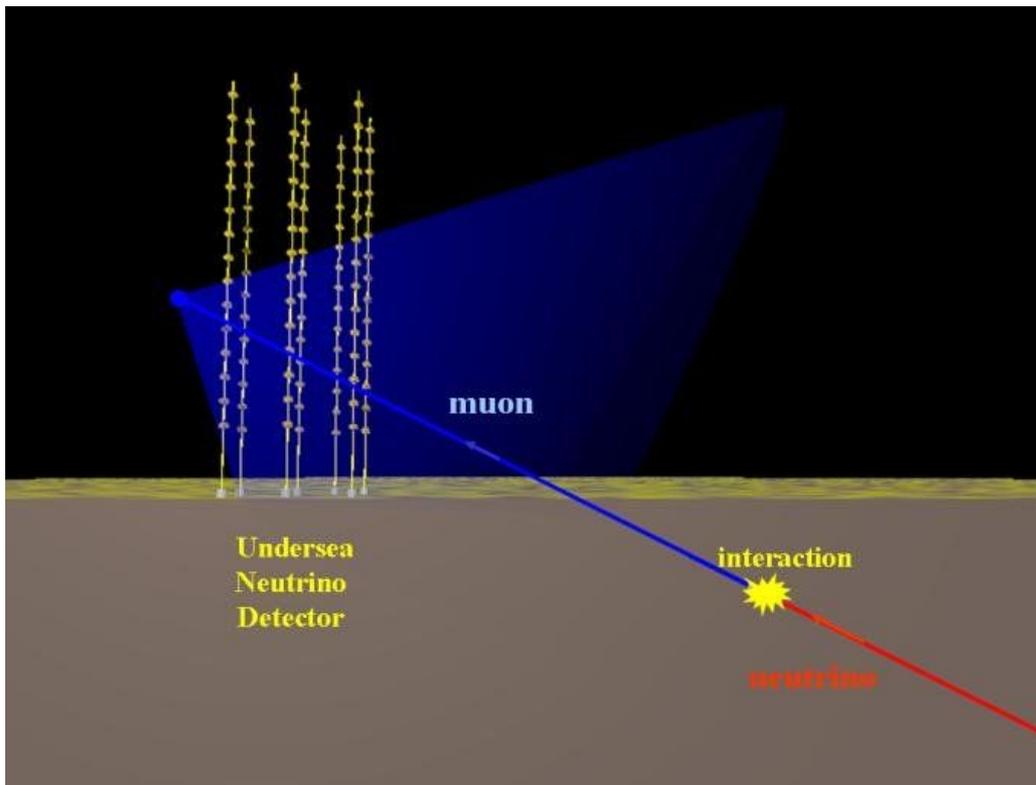
→ les neutrinos témoignent directement de la présence des protons





Les neutrinos permettent d'étudier les processus d'accélération et d'échappement des particules dans les sources astrophysiques

- Peuvent sonder le milieu interstellaire entre la source astrophysique et l'observateur.
- Peuvent révéler des informations cachées ou complémentaires



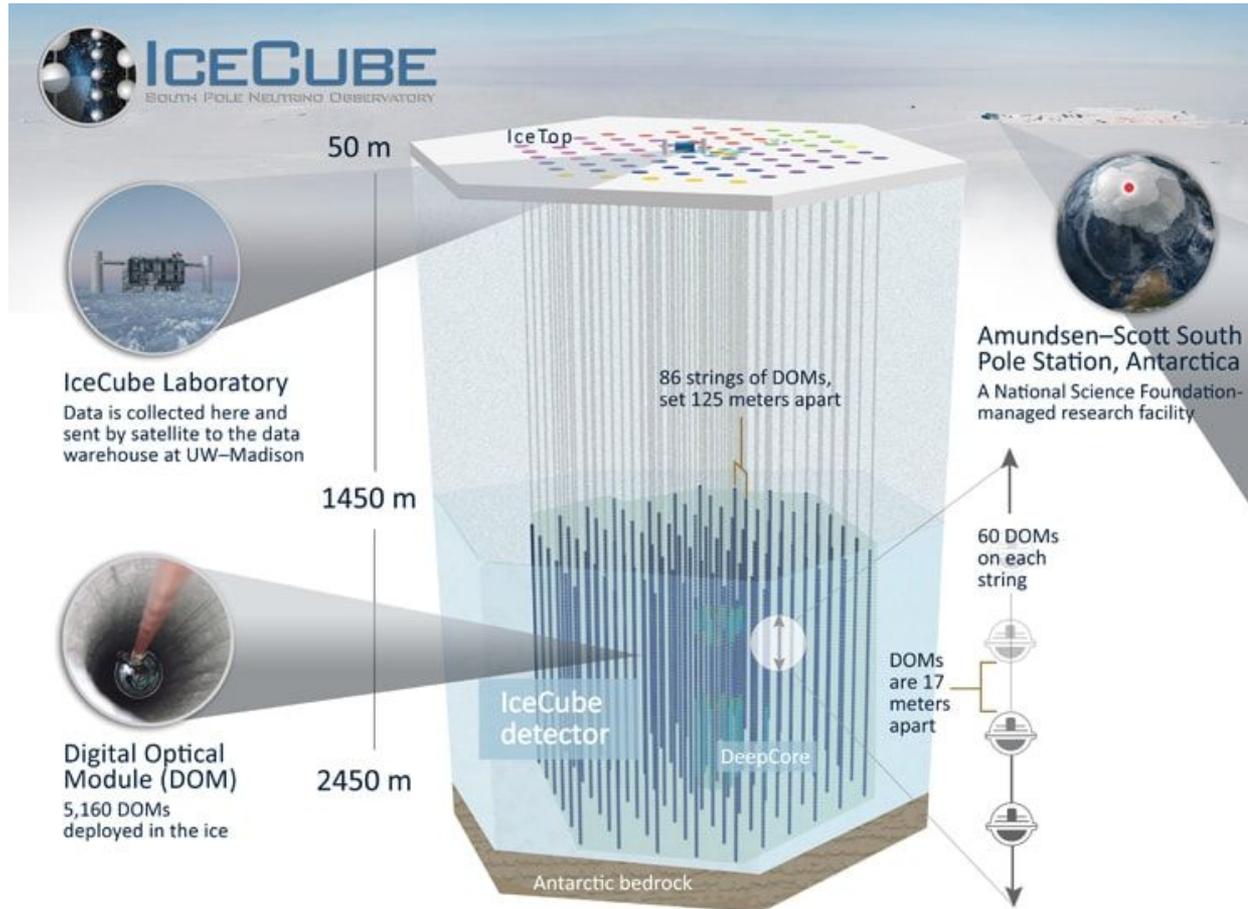
Les neutrinos interagissent faiblement avec la matière

Avec une certaine probabilité, ils peuvent interagir dans la roche ou dans l'eau, ou dans la glace et donner, par exemple :

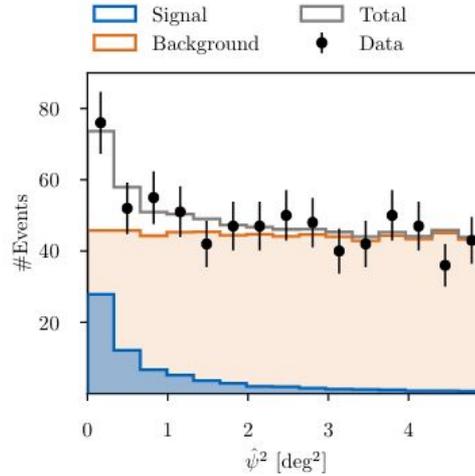
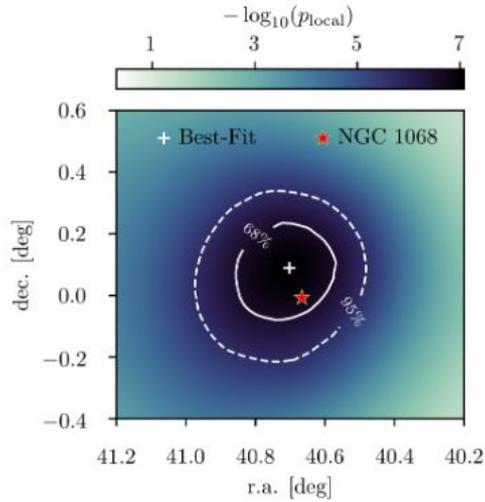
- Un muon dans le cas d'un neutrino muonique
- Si l'énergie du neutrino est > 1 TeV, alors la direction du muon sera très proche à celle du neutrino
- Le muon rentre dans l'eau ou la glace et suite à la polarisation du milieu, des photons Cherenkov sont générés.
- La lumière Tcherenkov va être détectée par des photomultiplicateurs installés sur des lignes

Points clefs :

- Taille du détecteur (grand)
- Transparence du milieu

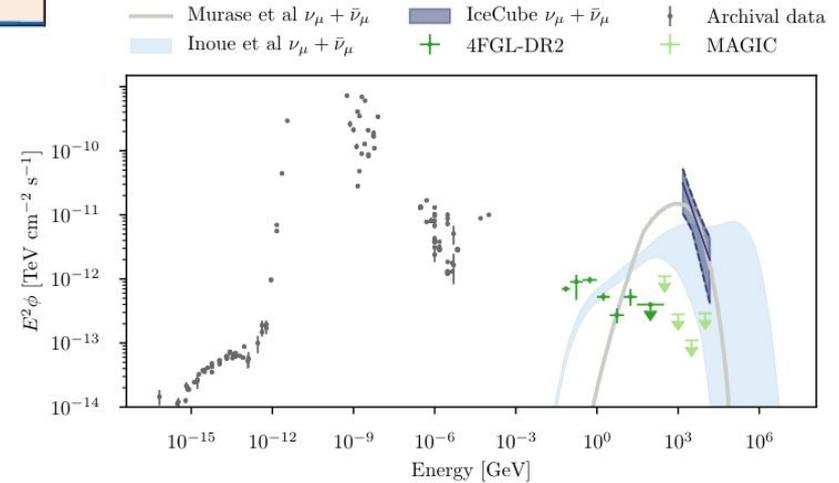


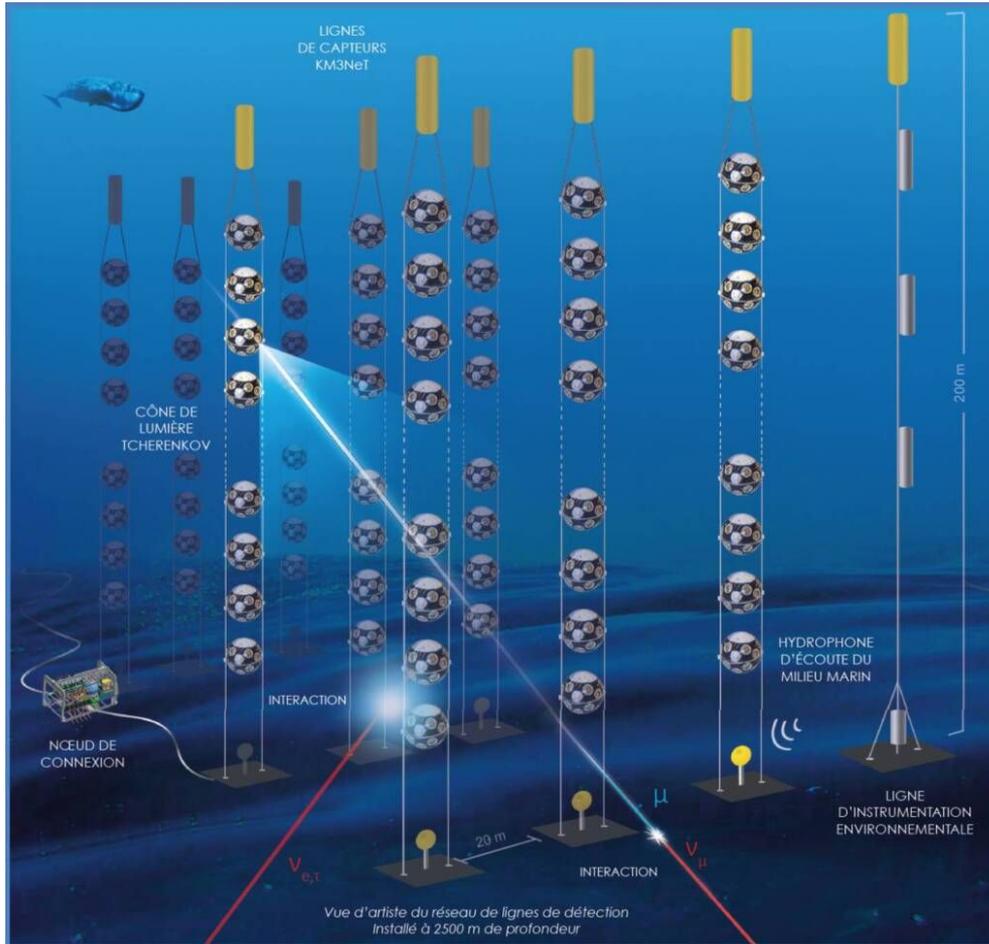
- En activité depuis 2009
- Taille : 1 KM³
- Des résultats commencent à arriver après plus que 10 ans de prise des données



“Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068”
Science, 2022

- Résultats de novembre 2022
- Significativité du signal 4.4 sigma
- La plus forte jusqu'à maintenant



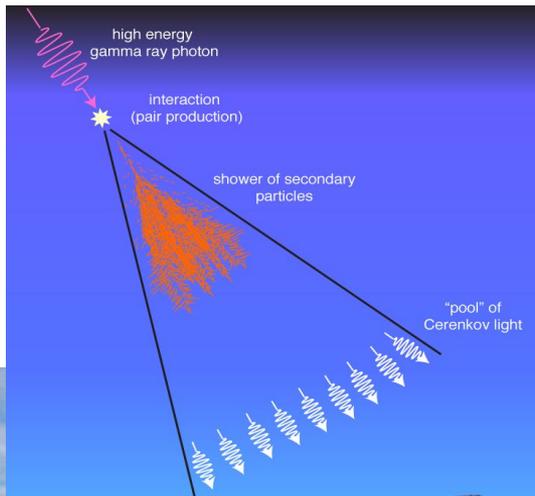


- En construction dans la Méditerranée sur deux sites : un en France (Toulon) et un en Italie (Sicile)
- La partie des neutrinos astrophysiques sera gérée par le site en Italie

- L'Univers est peuplé par des accélérateurs des particules
- La clef est l'Astronomie multi longueur d'onde et l'Astronomie multi messagère, qui demandent une coordination mondiale sur les observations
- Nous en découvrons de plus en plus avec les détecteurs gamma, mais nous arrivons à la limite de la sensibilité des télescopes actuels → Nouvelle génération de télescopes plus sensibles, nommée **Cherenkov Telescope Array (CTA)**
- Le satellite Fermi sera actif encore pour quelques années
- Beaucoup d'attente sur l'Astronomie Neutrino dans les prochaines années
- L'investigation des accélérateurs cosmiques continue ...

Merci de votre
attention





HAWC observatory
Mexico