

L'astronomie neutrino et le contexte multi-messenger



Fabian Schüssler
IRFU, CEA Paris-Saclay

Fabian Schüssler

IRFU, CEA Paris-Saclay

- Thèse: rayons cosmiques avec l'observatoire Pierre Auger
- Rayons gamma de haute énergie avec l'observatoire H.E.S.S. en Namibie et le futur Cherenkov Telescope Array
- Neutrinos de haute énergie avec l'observatoire ANTARES en Méditerranée
- Responsable des observations et analyses multi-messagers



L'astronomie neutrino

- Introduction
- Neutrinos
- Neutrinos à haute énergie
- Détection de neutrinos
- Recherche de sources de neutrinos
- Résultats récents: l'ère de l'astrophysique multi-messagers

L'astronomie neutrino

- Introduction
- Neutrinos
- Neutrinos à haute énergie
- Détection de neutrinos
- Recherches de sources de neutrinos
- Résultats récents: l'ère de l'astrophysique multi-messagers

Quel est le point commun entre le lac Baikal, l'Antarctique et la Côte d'Azur

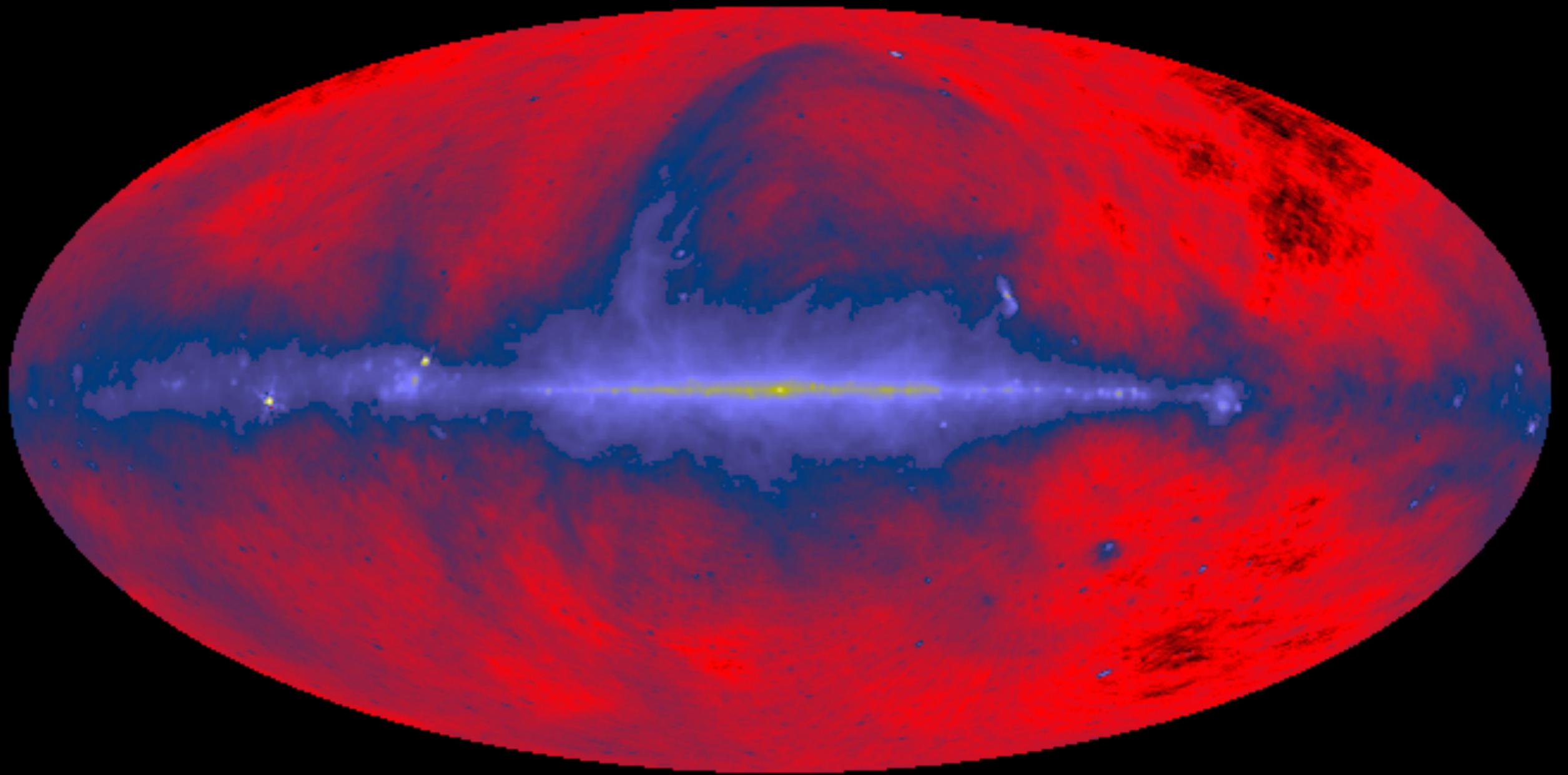
Pourquoi est-ce qu'on regarde vers le bas pour observer le ciel?

Quel est le message apporté par les neutrinos ?

Qu'est-ce qu'un blazar?

Qu'est que TXS 0506+056?

Le ciel radio

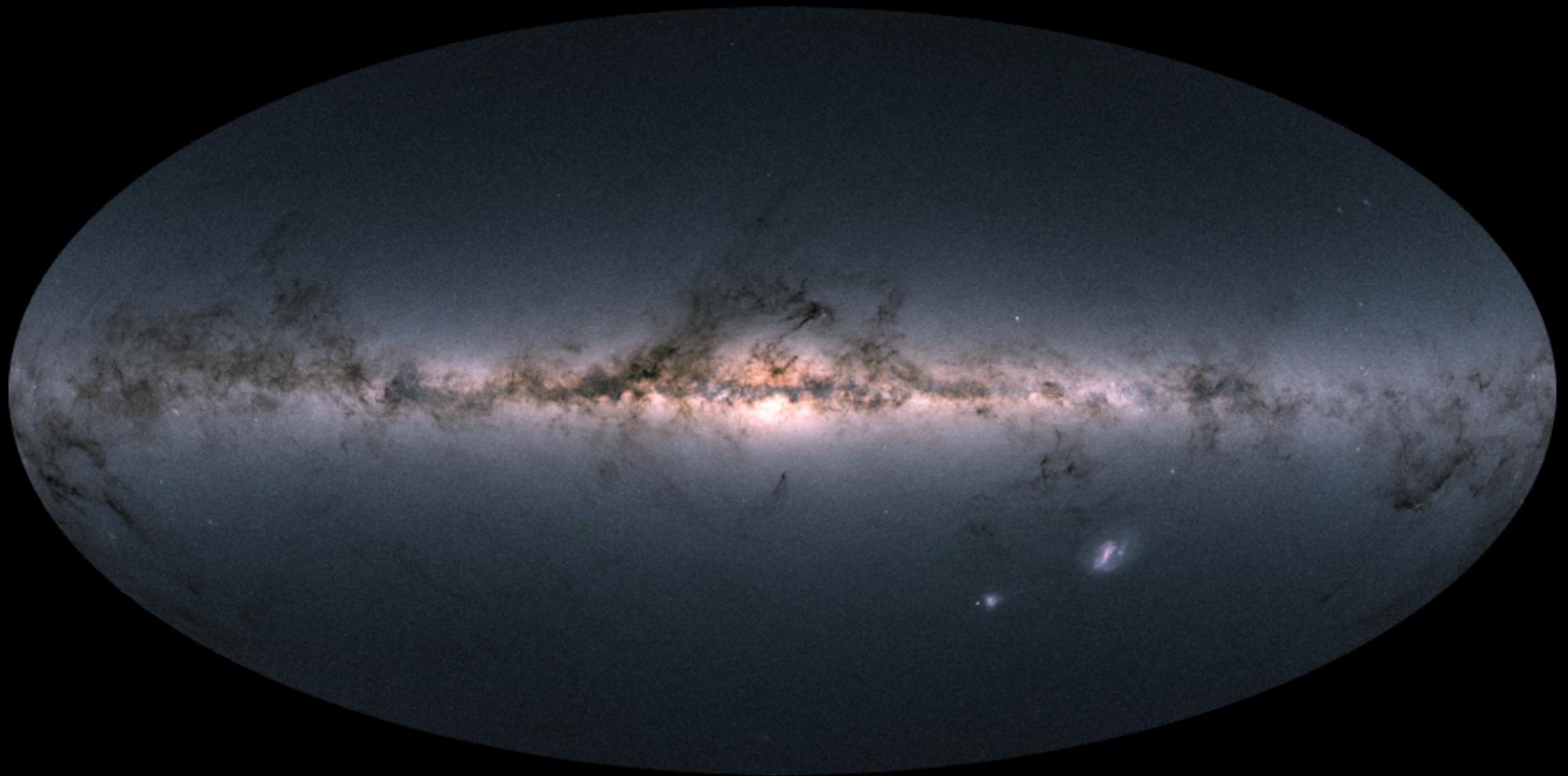


Energie $\approx 2 \times 10^{-6}$ eV

Fréquence $\approx 400 \times 10^6$ Hz (400MHz) / Longueur d'onde ≈ 70 cm



Le ciel visible

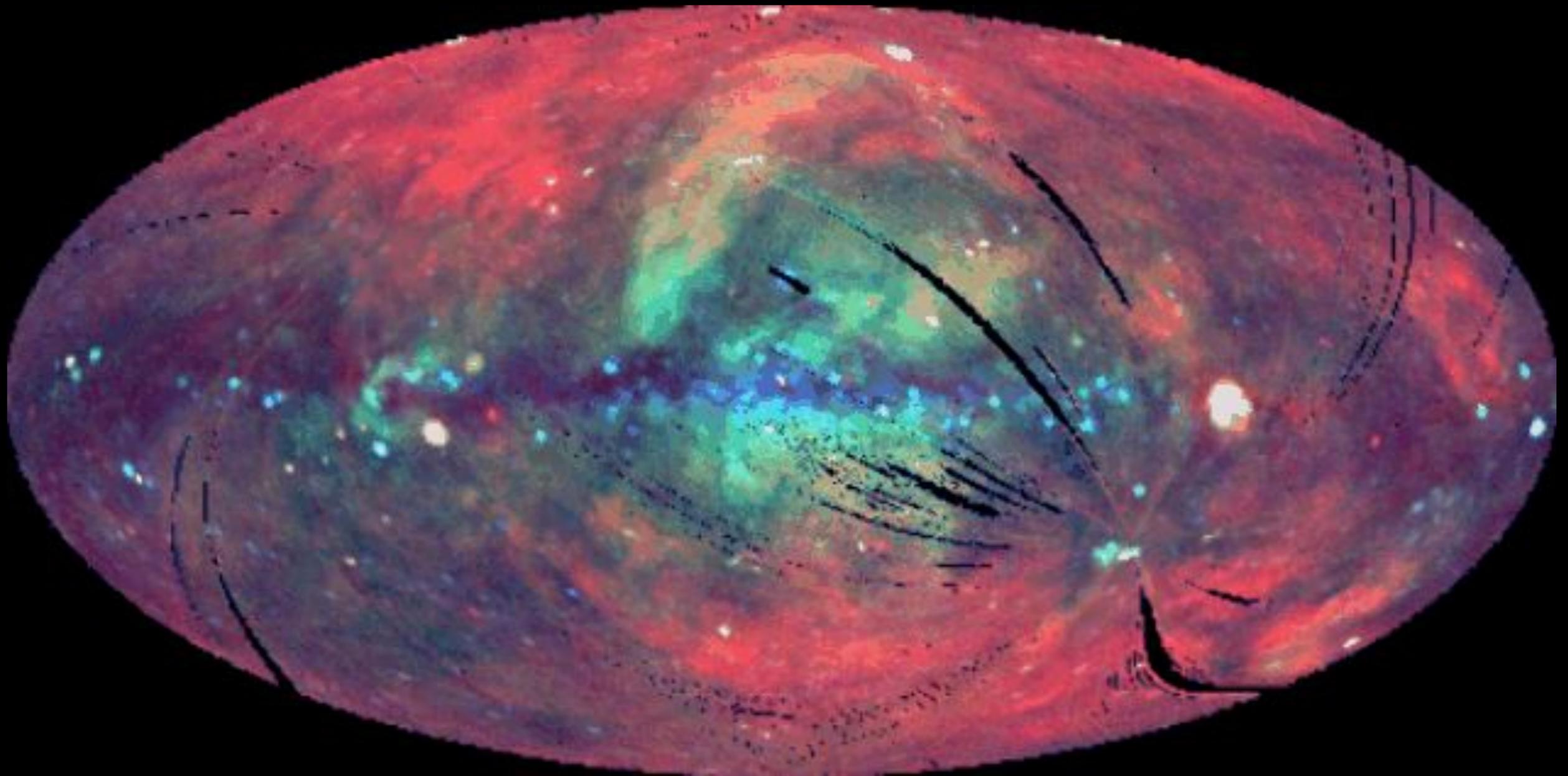


Energie ≈ 2.5 eV

Fréquence $\approx 600 \times 10^9$ Hz (600 THz) / Longueur d'onde ≈ 500 nm



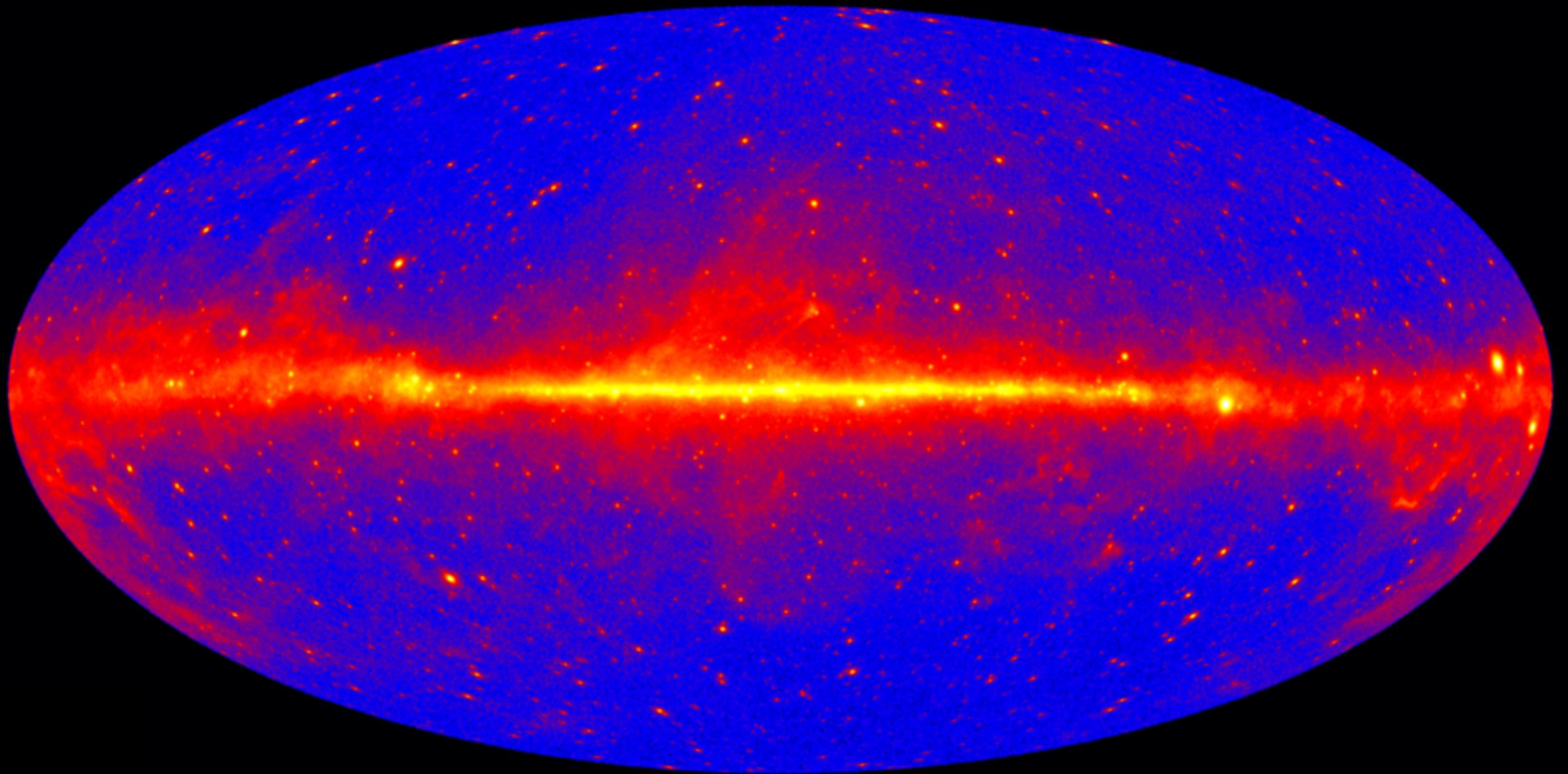
Le ciel en rayons X



Energie $\approx 100 \times 10^3$ eV (100 kilo-électronvolt, keV)
Fréquence $\approx 2.5 \times 10^{19}$ Hz / Longueur d'onde $\approx 1.2 \times 10^{-11}$ m



Le ciel rayons gamma

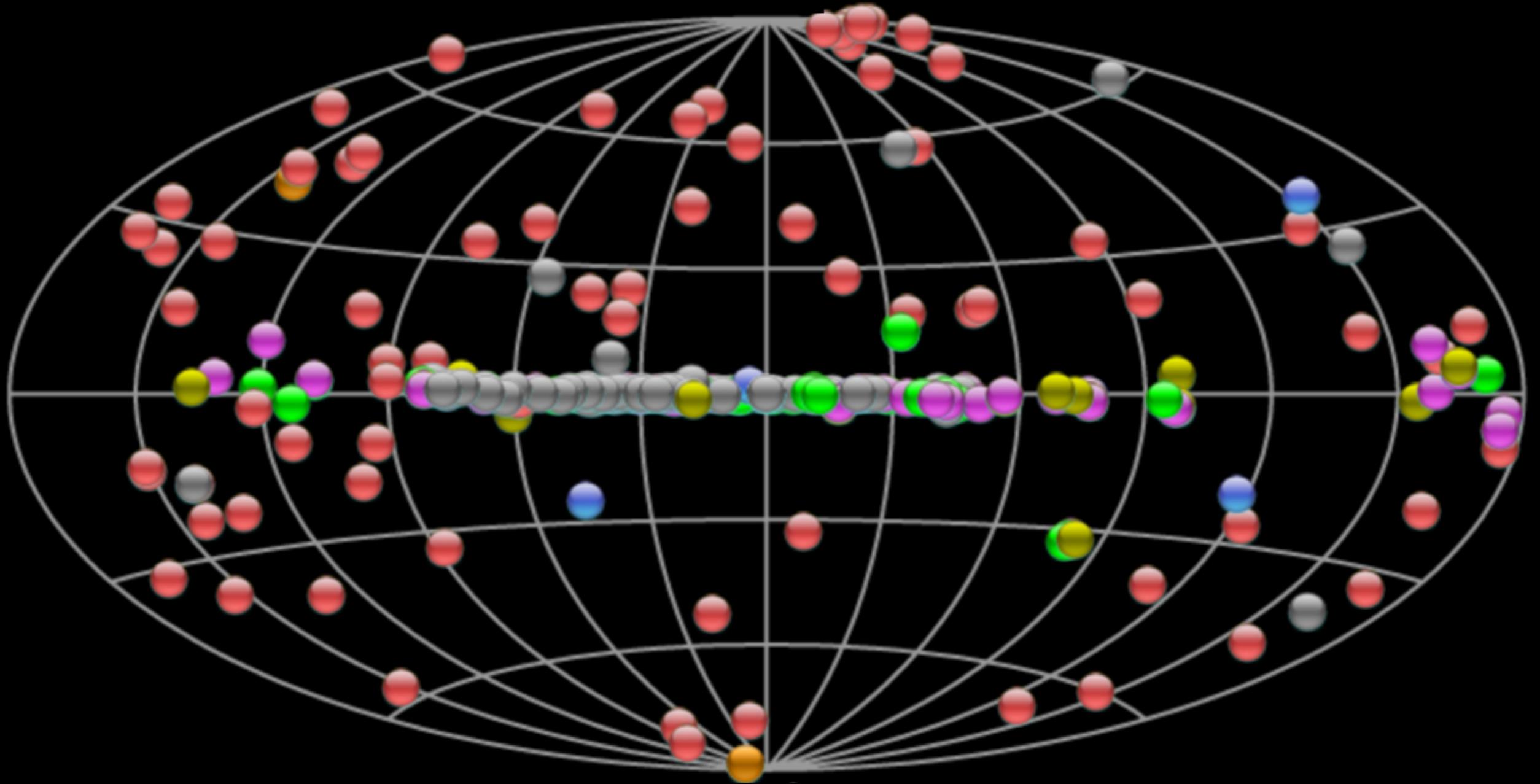


Energie $\approx 1 \times 10^9$ eV (1 Giga-Electronvolt, GeV)

Fréquence $\approx 2.5 \times 10^{23}$ Hz / Longueur d'onde $\approx 1.2 \times 10^{-15}$ m



Le ciel rayons gamma de haute énergie



Energie $\approx 1 \times 10^{12}$ eV (1 Téra-Electronvolt, TeV)

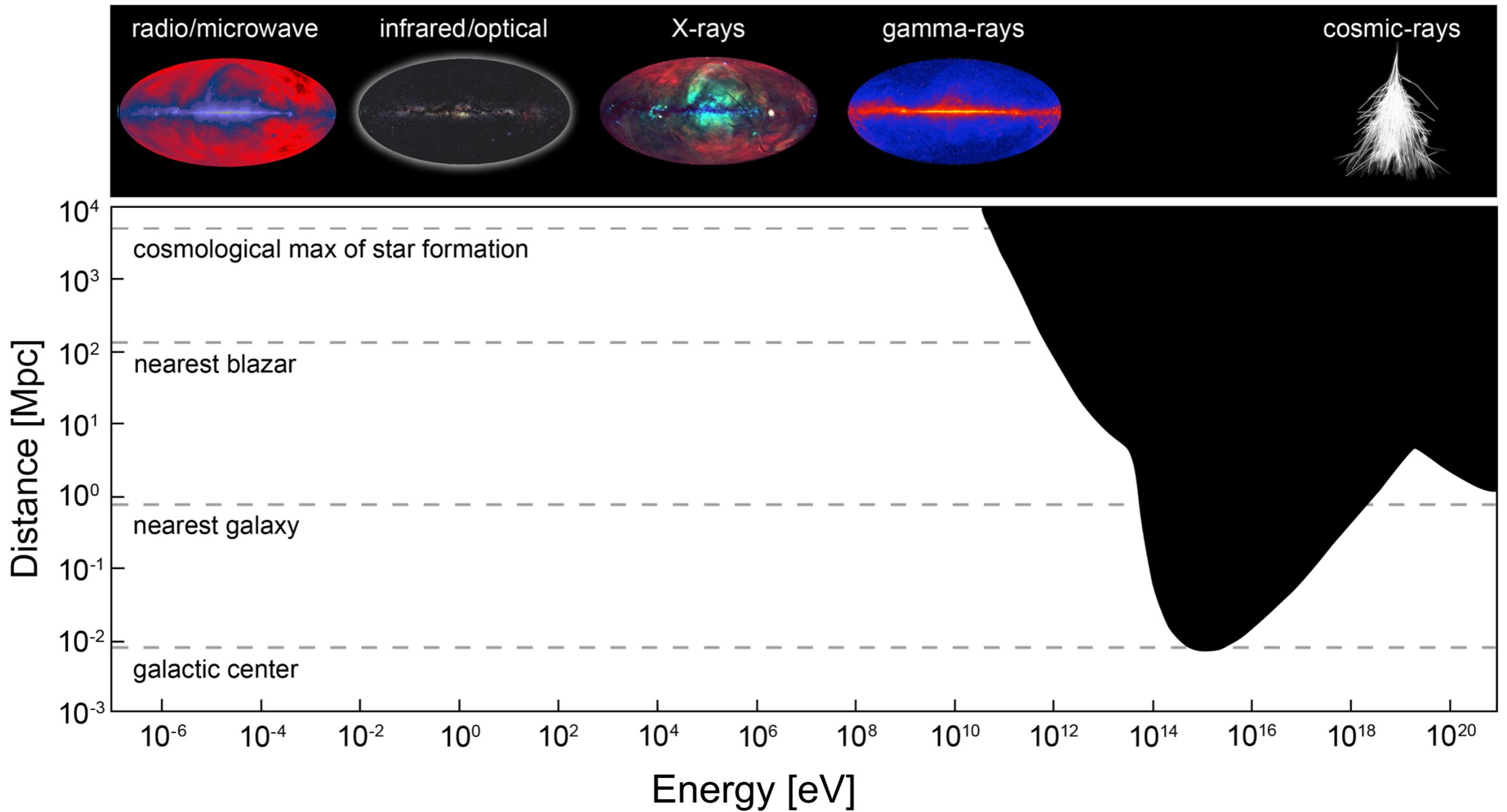
Fréquence $\approx 2.5 \times 10^{26}$ Hz / Longueur d'onde $\approx 1.2 \times 10^{-18}$ m

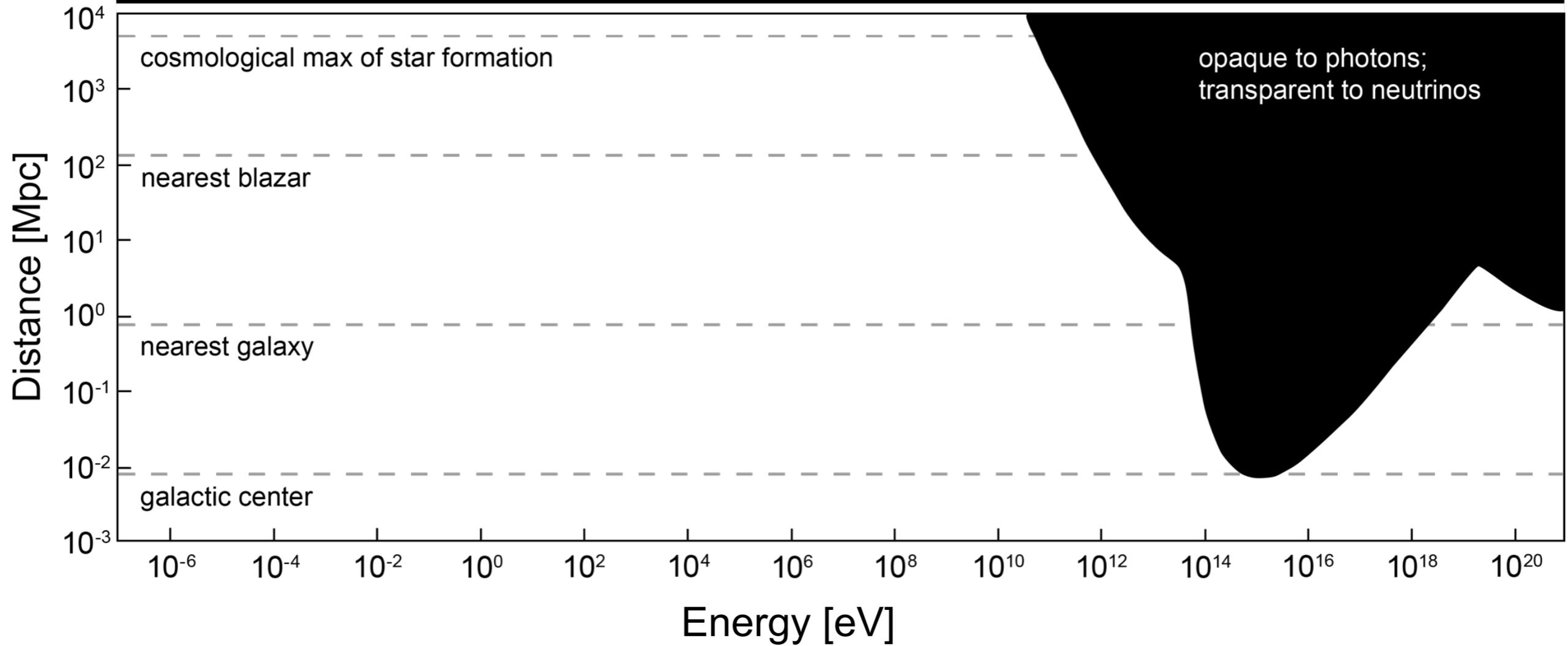
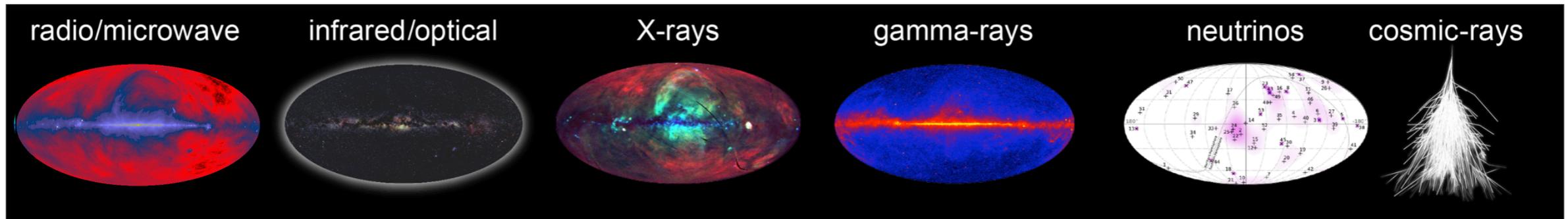


Le ciel à très haute énergie



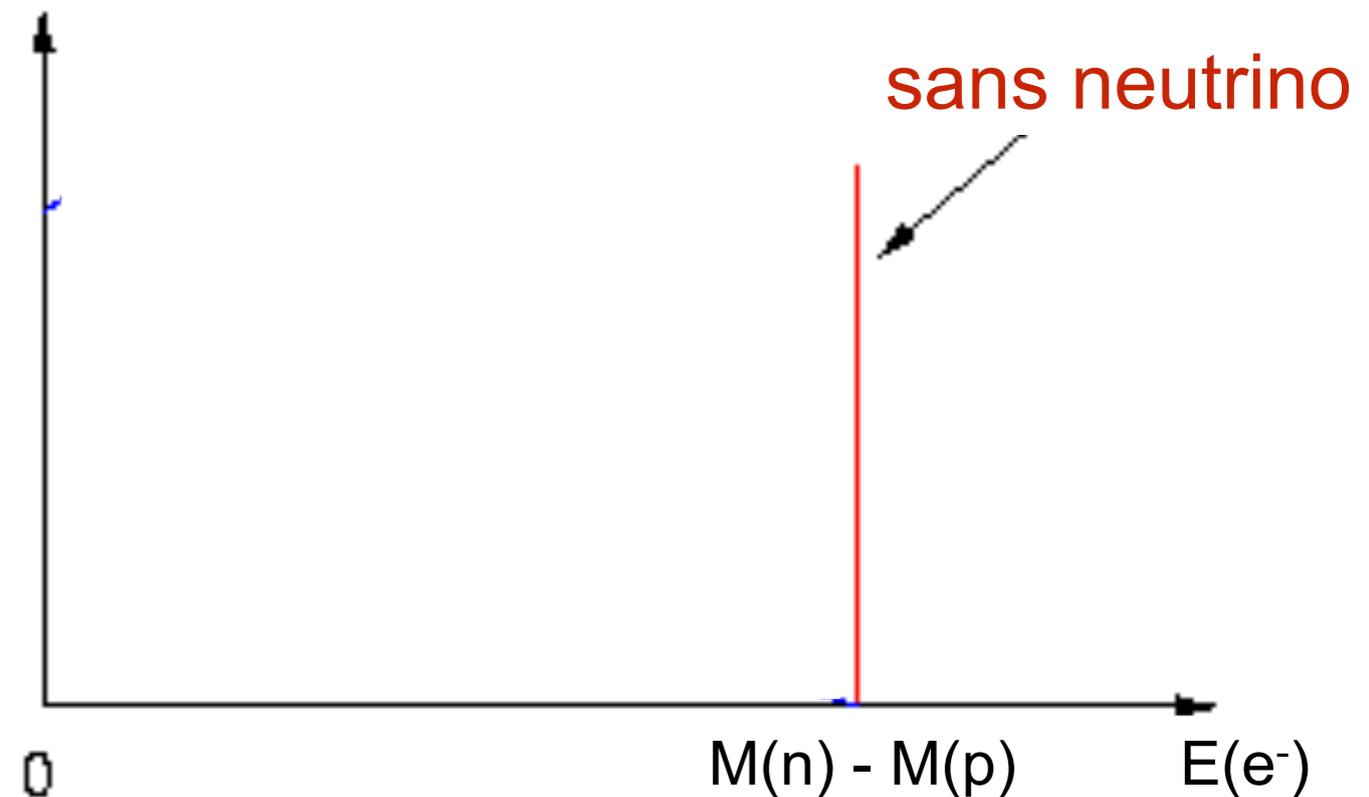
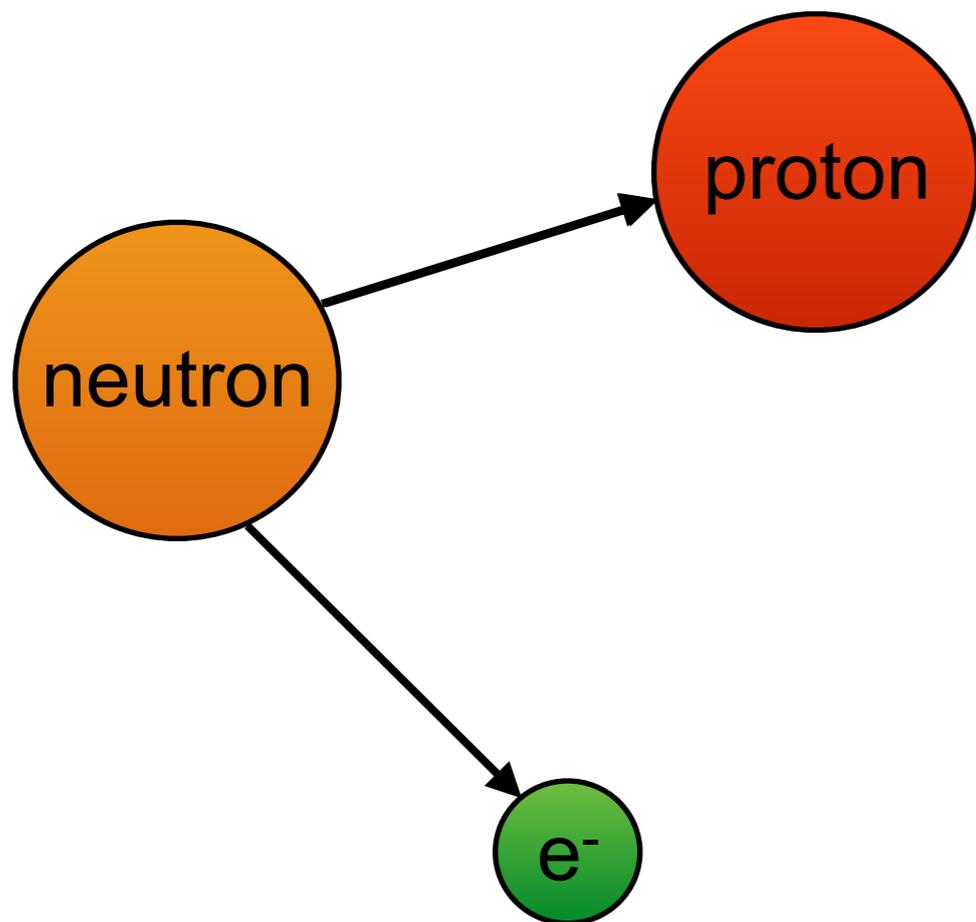
Energie $\approx 1 \times 10^{15}$ eV (1 Péta-Electronvolt, PeV)
Fréquence $\approx 2.5 \times 10^{29}$ Hz / Longueur d'onde $\approx 1.2 \times 10^{-21}$ m





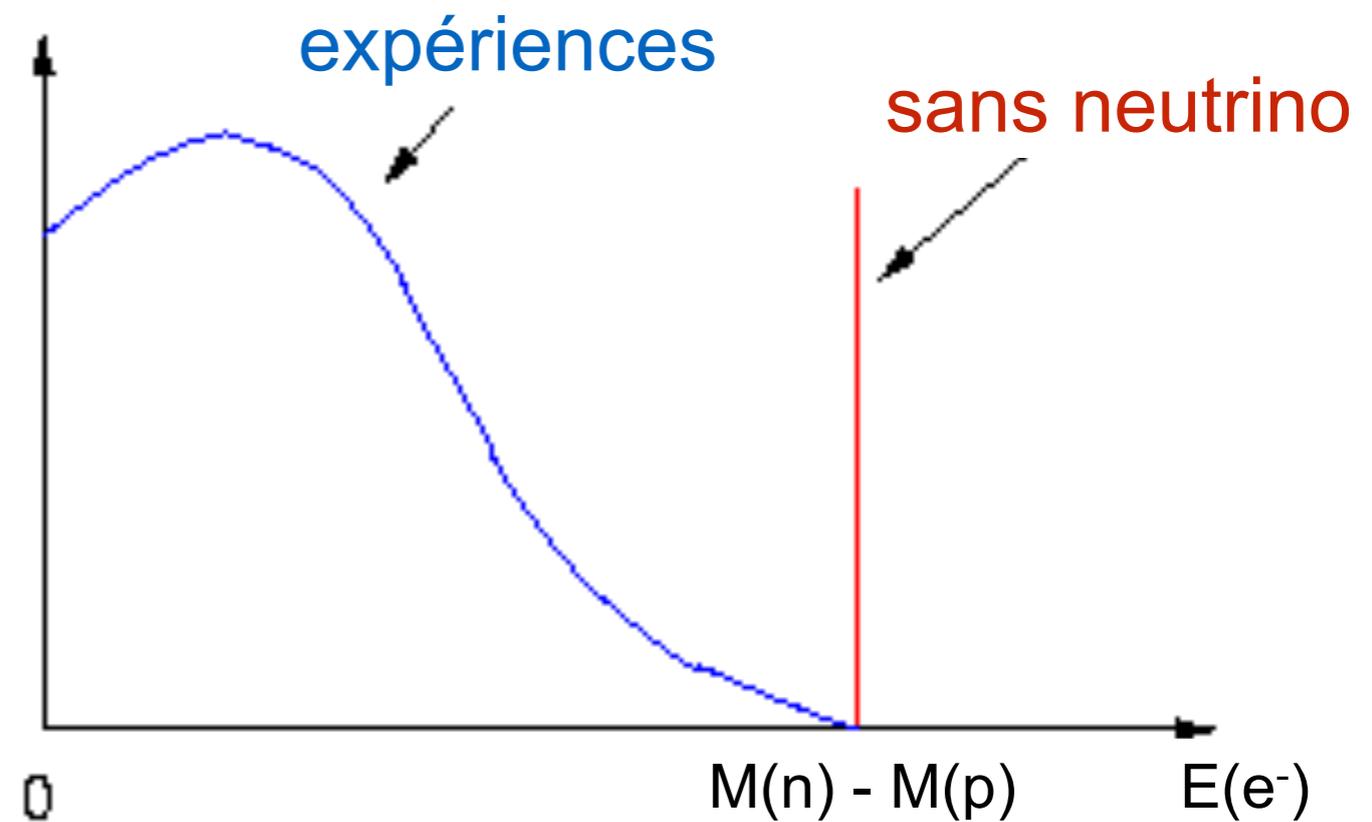
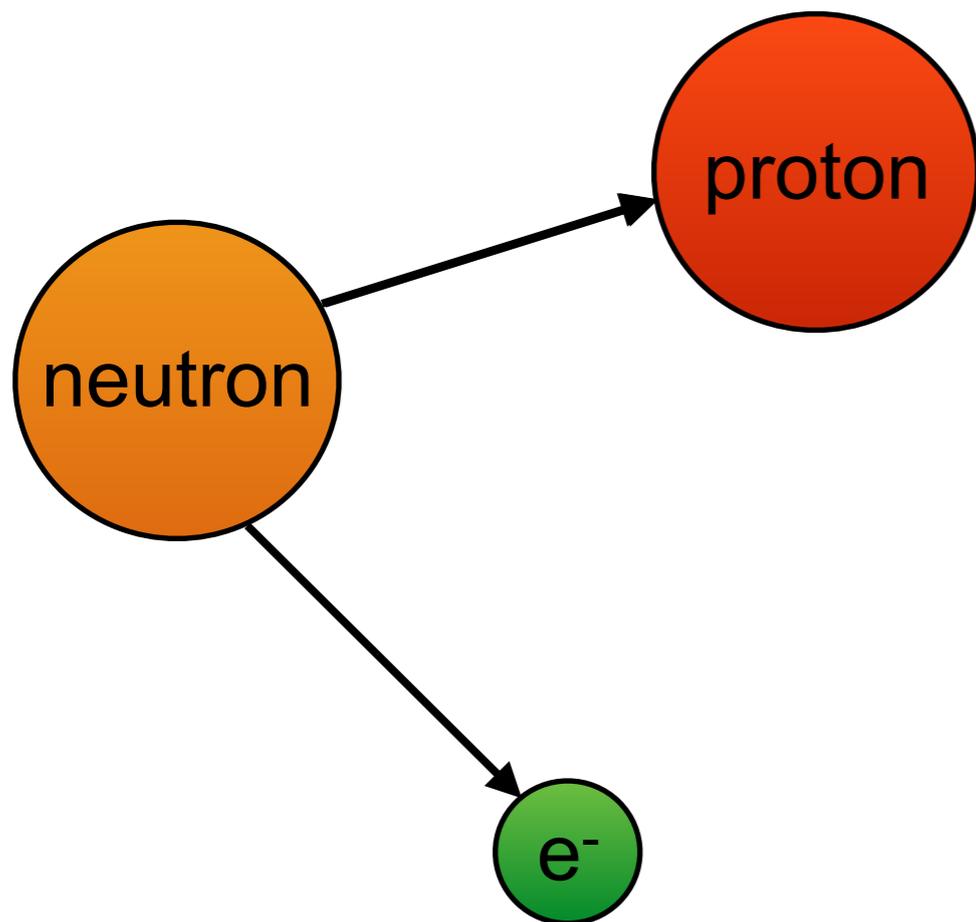
Neutrinos

- particules prédites par Wolfgang Pauli en 1930 pour expliquer certains résultats en physique des particules
- particules observées dans la désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^-$



Neutrinos

- particules prédites par Wolfgang Pauli en 1930 pour expliquer certains résultats en physique des particules
- particules observées dans la désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^-$

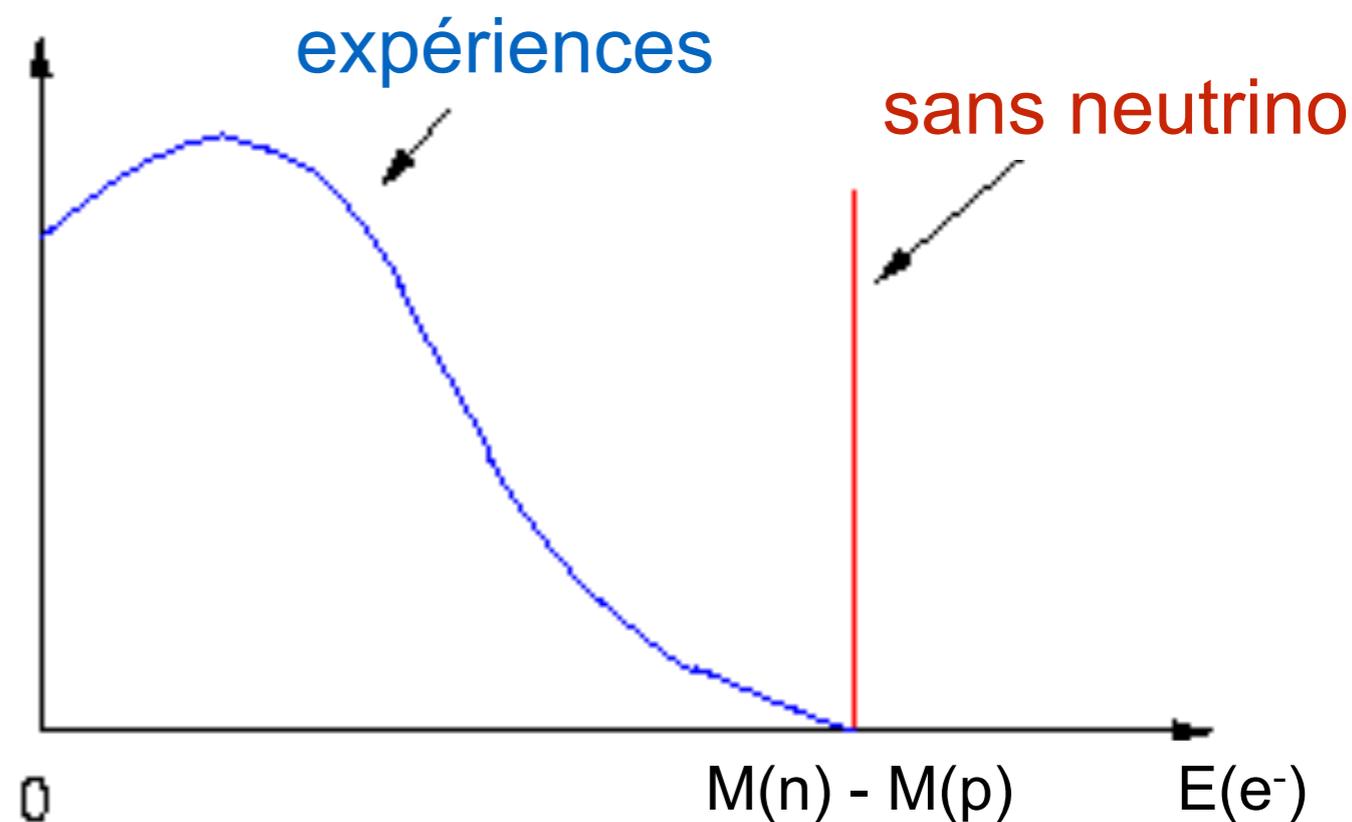
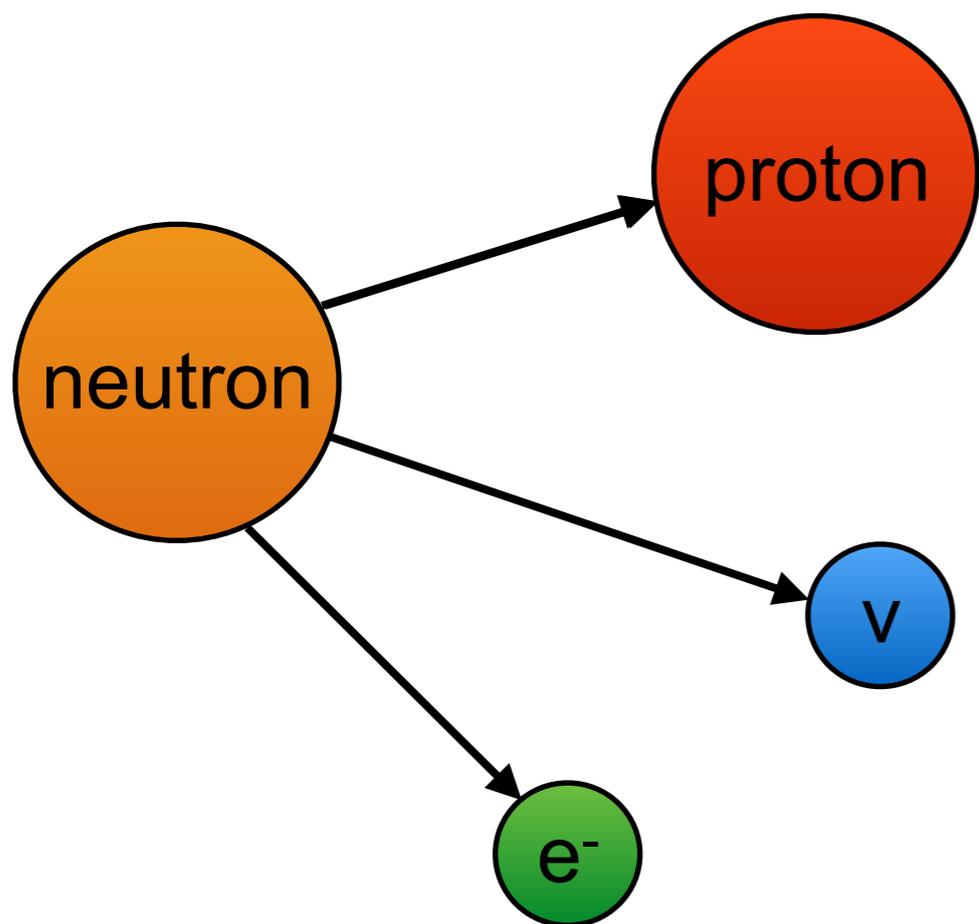


Neutrinos

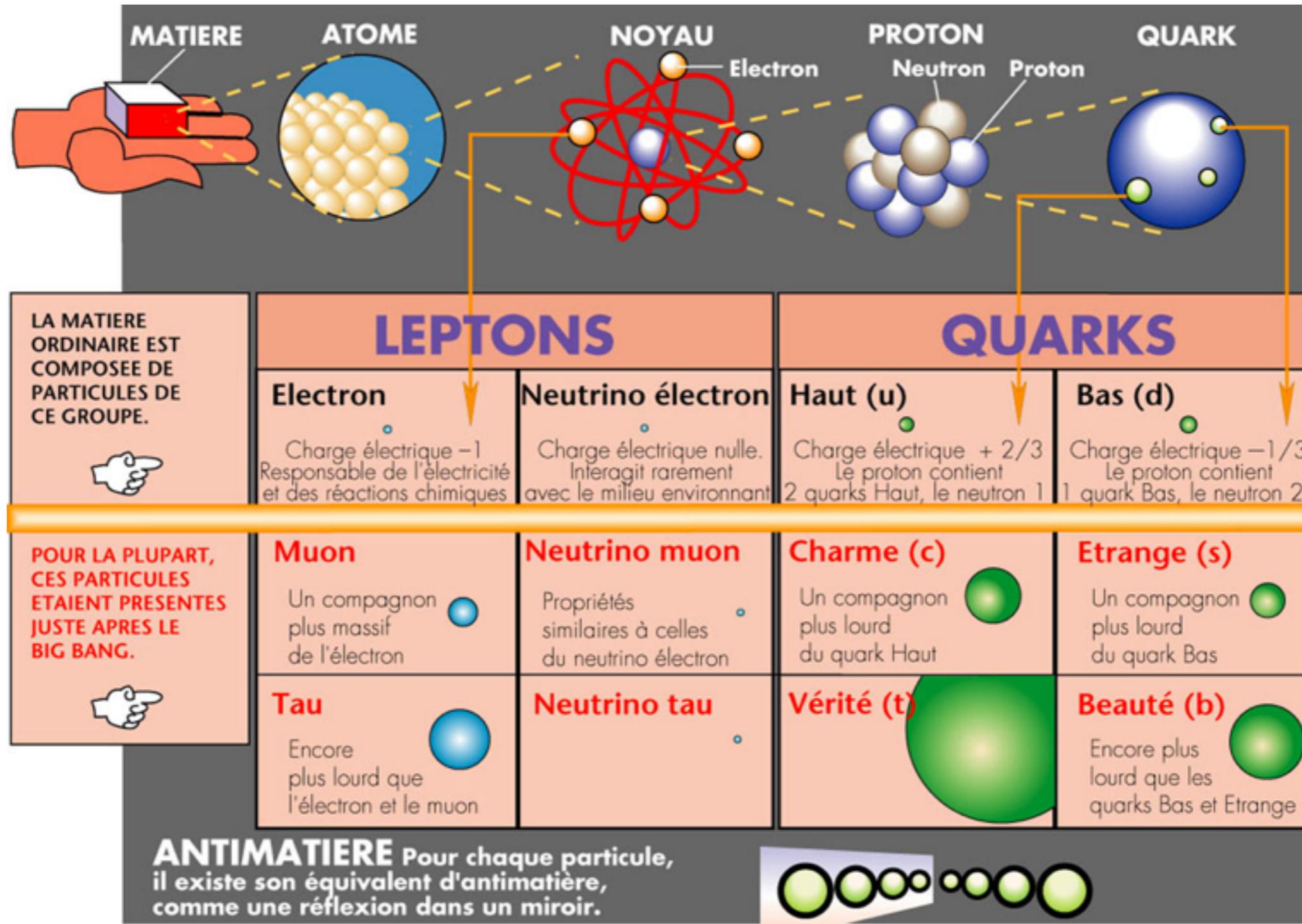
- particules prédites par Wolfgang Pauli en 1930 pour expliquer certains résultats en physique des particules

- particules observées dans la désintégration beta: ~~$n^0 \rightarrow p^+ + e^-$~~

- $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$

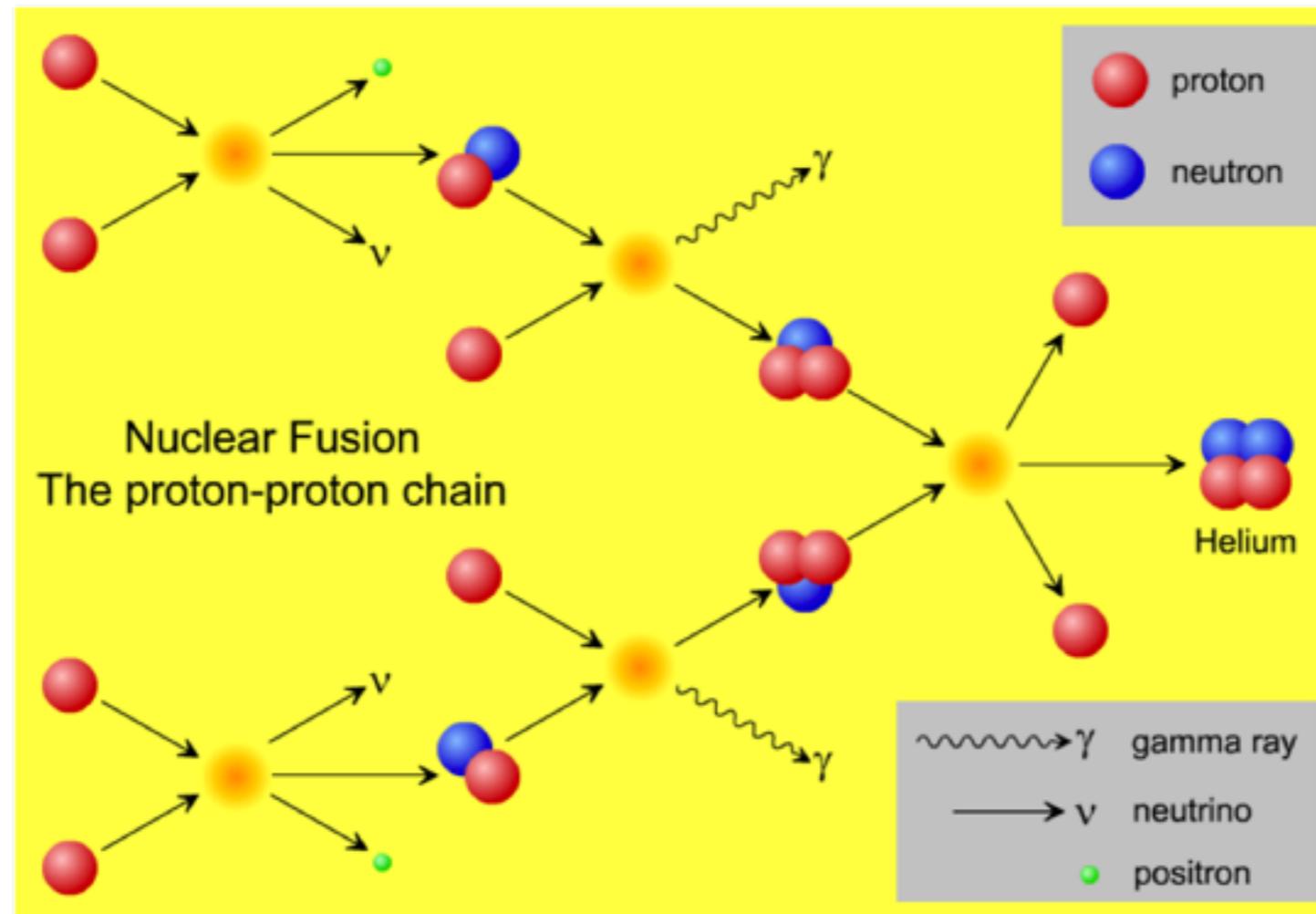
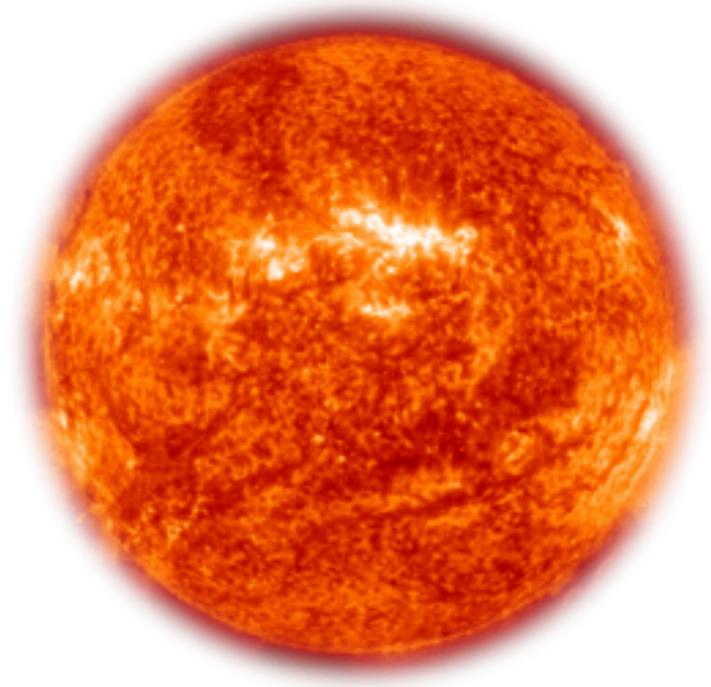


Les neutrinos dans le modèle standard de la physique des particules



Sources de neutrinos

- réactions nucléaires (avec les protons et les neutrons)
 - réacteurs nucléaires
 - soleil
- 65 millions par seconde à travers votre pouce

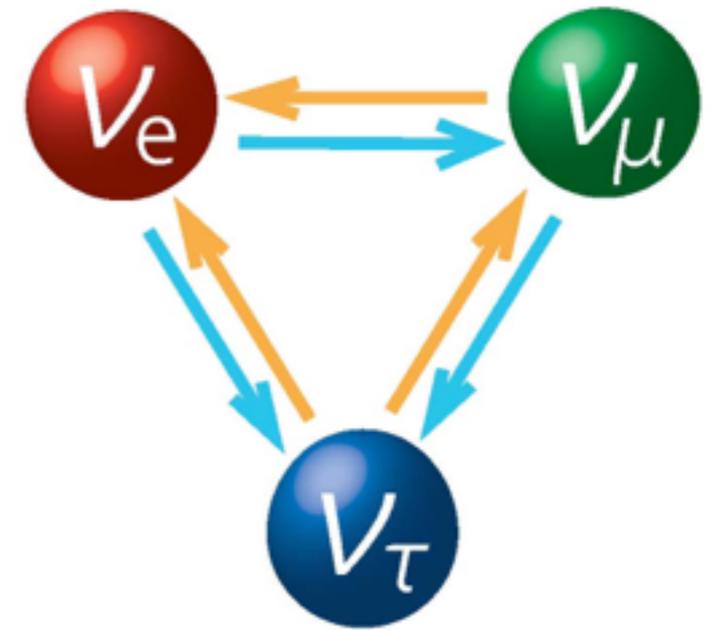


Hydrogen to Helium – Neutrino creation

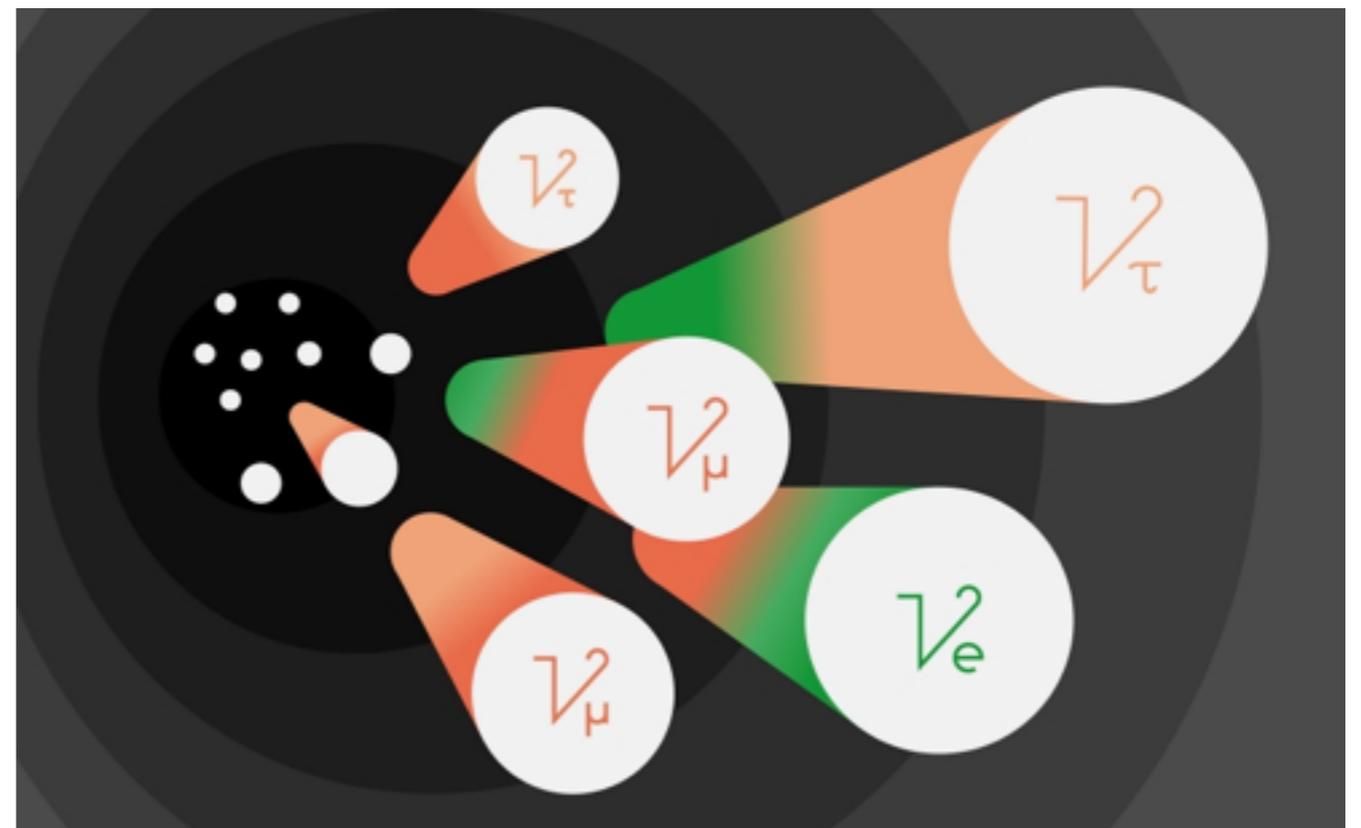
Image Credit – Randy Russell

Les oscillations des neutrinos

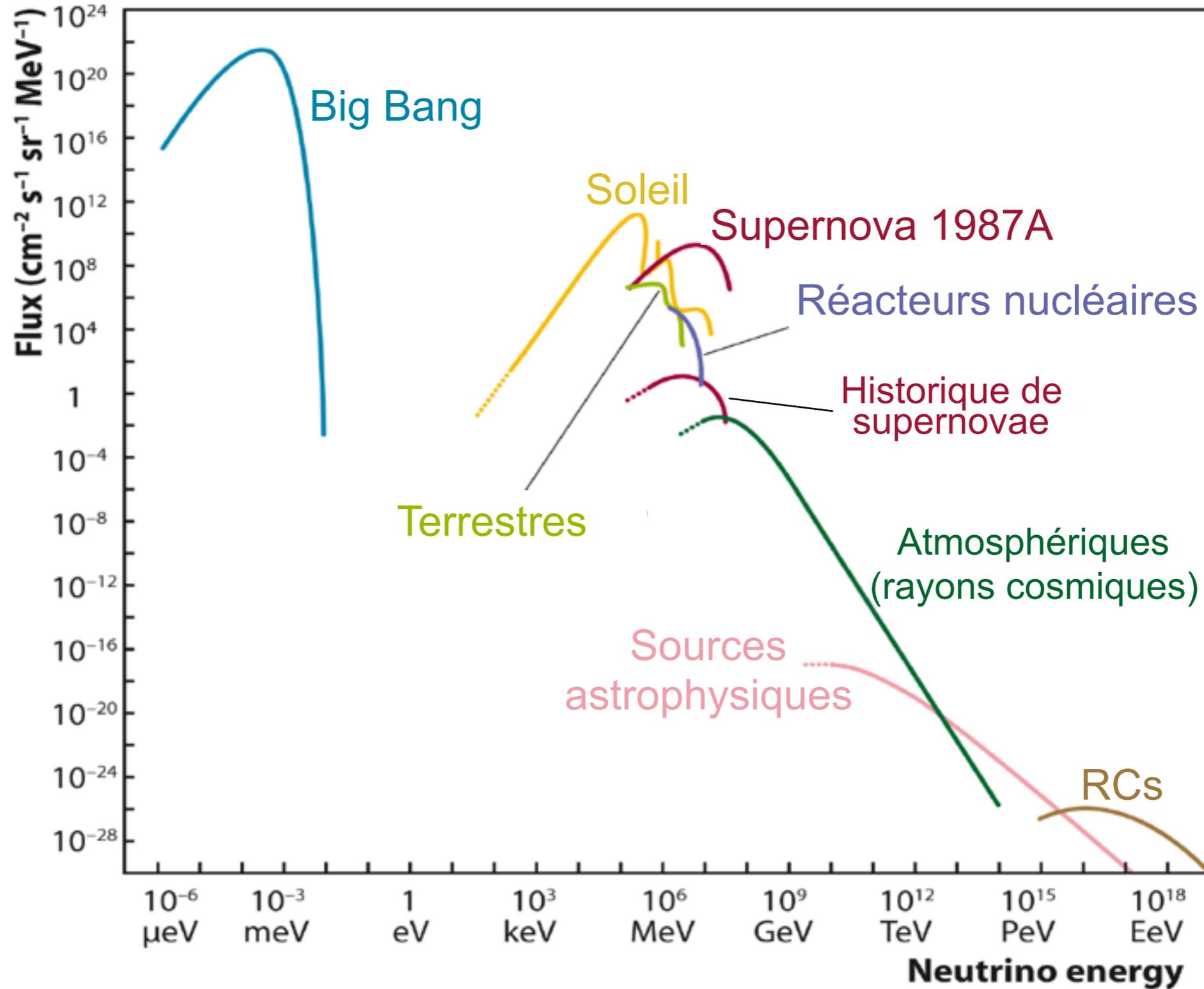
- Trois états de saveurs \neq trois états massifs
- création et détection des états de saveur (neutrino électronique/myonique/tauique)
- propagation en mélange d'états massifs



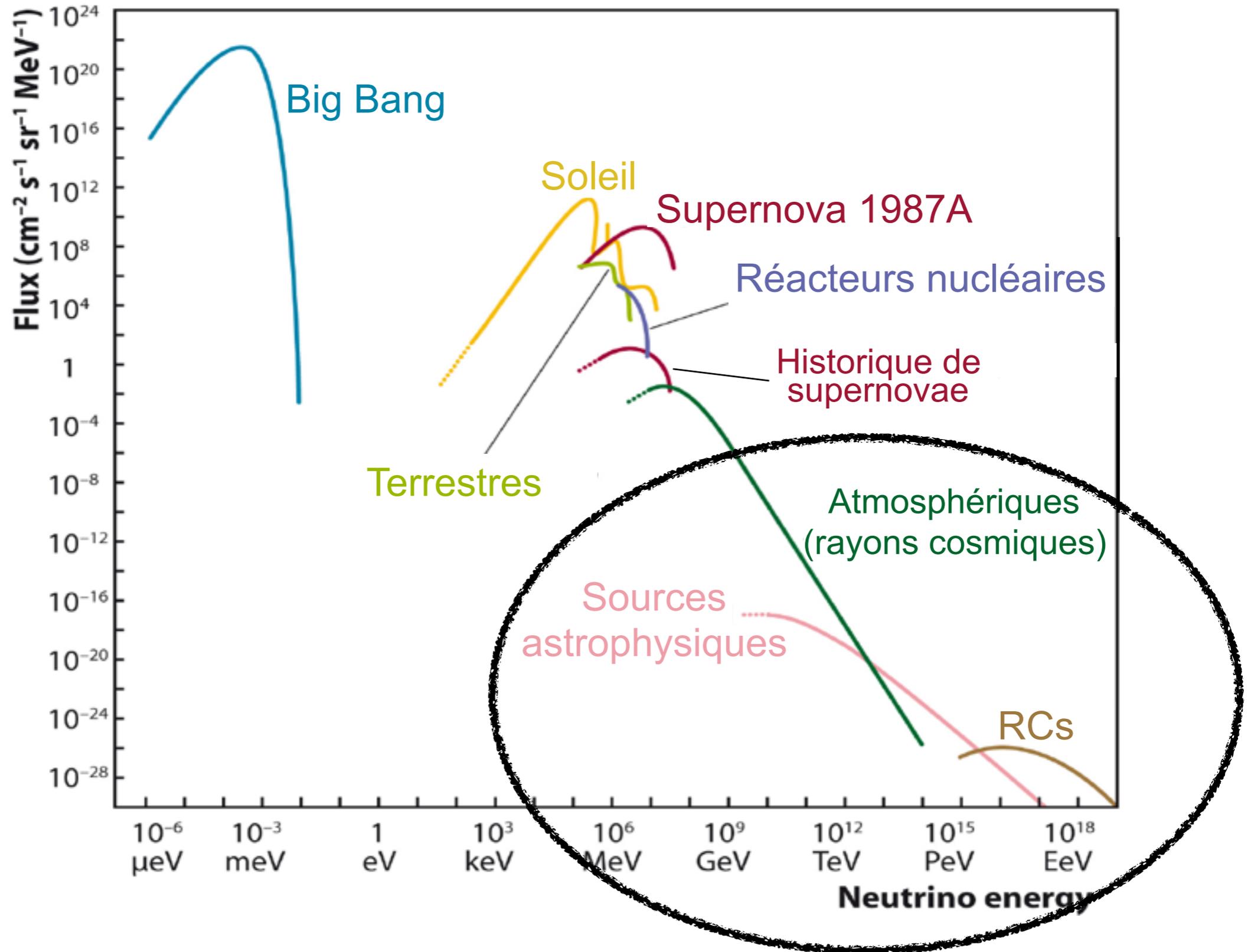
aucun changement
d'énergie ou de direction



Neutrinos de toutes les énergies



Neutrinos de haute énergie



Détection de neutrinos de haute énergie

- désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$

Détection de neutrinos de haute énergie

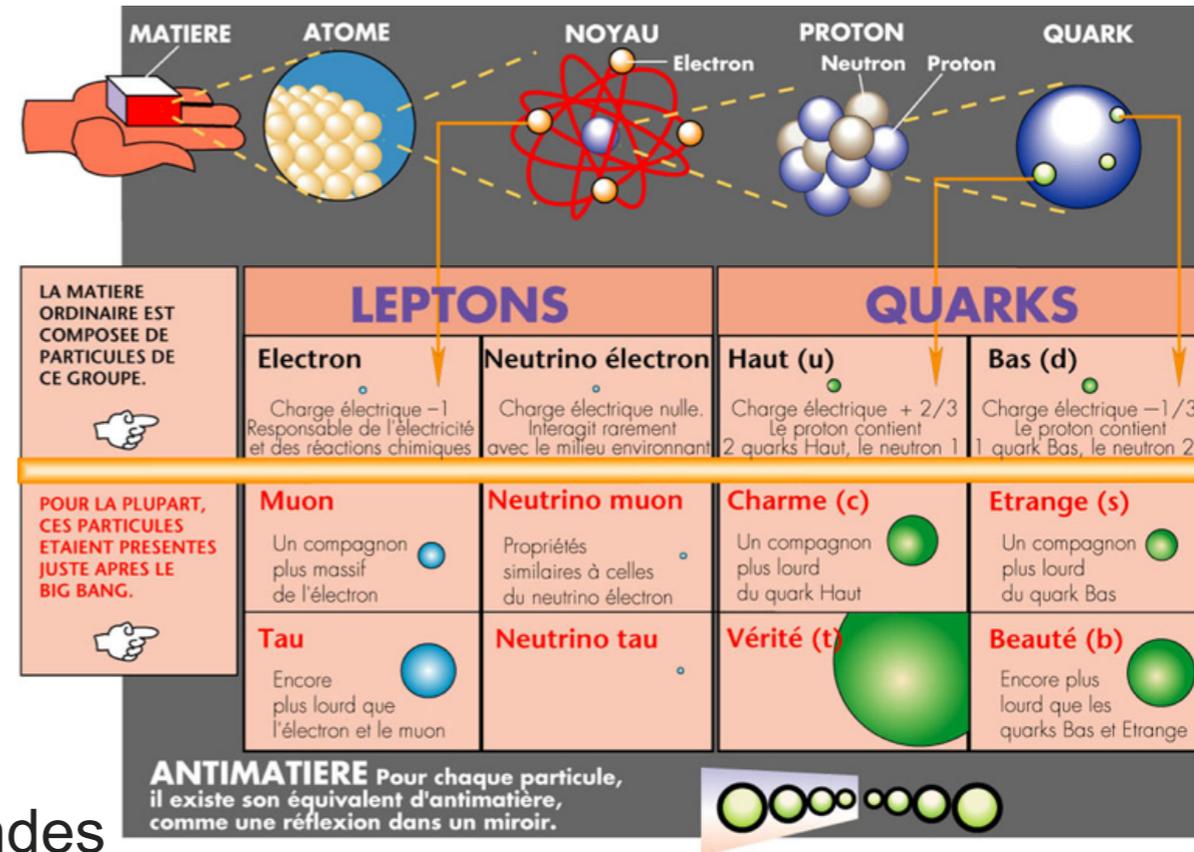
- désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$
- $\nu_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$

Détection de neutrinos de haute énergie

- désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$
- $\nu_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$
- $\nu_\mu + p^+ \rightarrow n^0 + \mu^+$

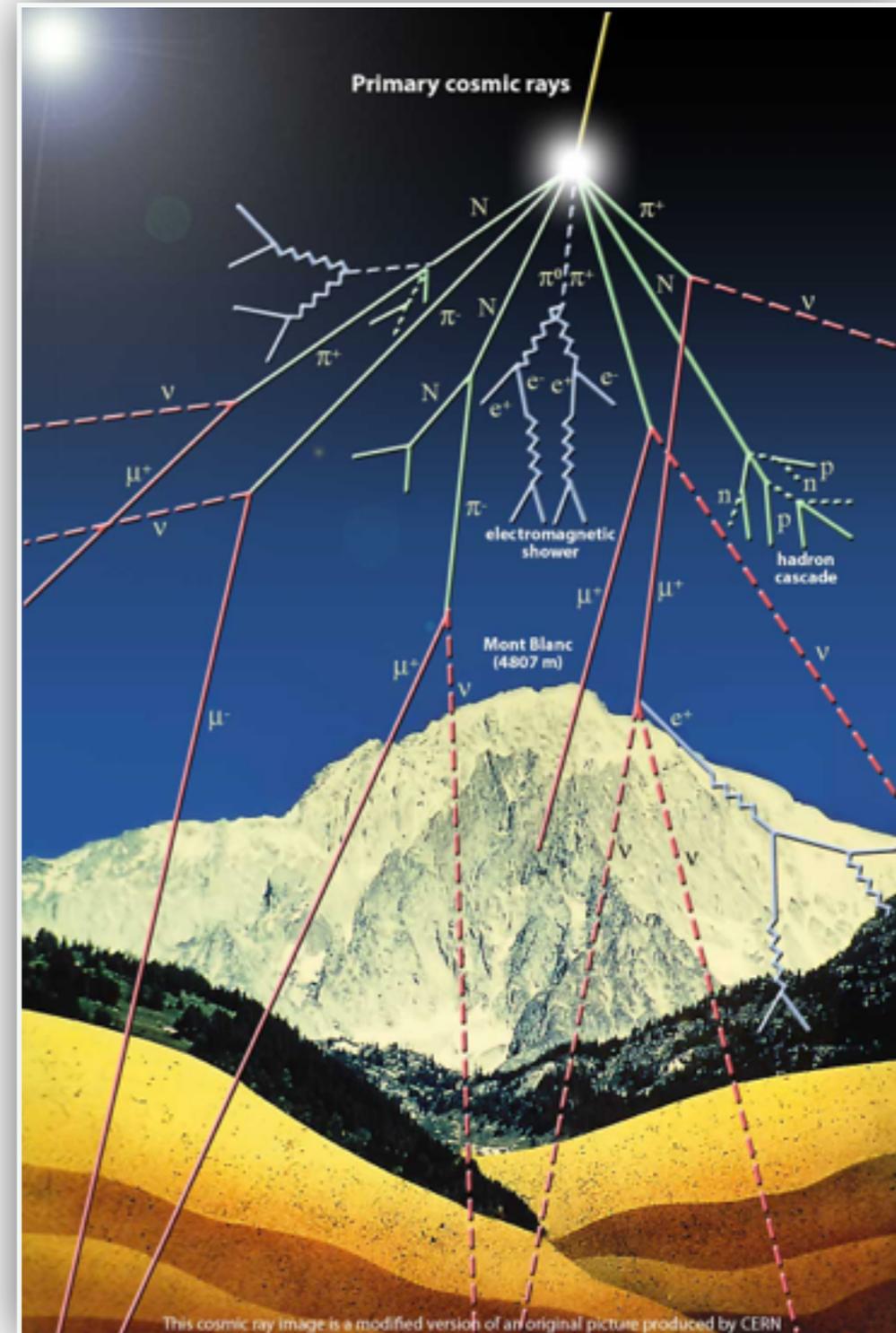
Détection de neutrinos de haute énergie

- désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$
- $\nu_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$
- $\nu_\mu + p^+ \rightarrow n^0 + \mu^+$
- le muon μ :
 - le grand frère de l'électron
 - plus lourd (~2000 fois la masse d'un électron)
 - temps de vie relativement long: deux microsecondes
 - relativité restreinte: à grande vitesse / grande énergie => durée de vie plus longue
 - les muons voyagent sur des kilomètres
 - ils sont très peu absorbés: ils pénètrent partout



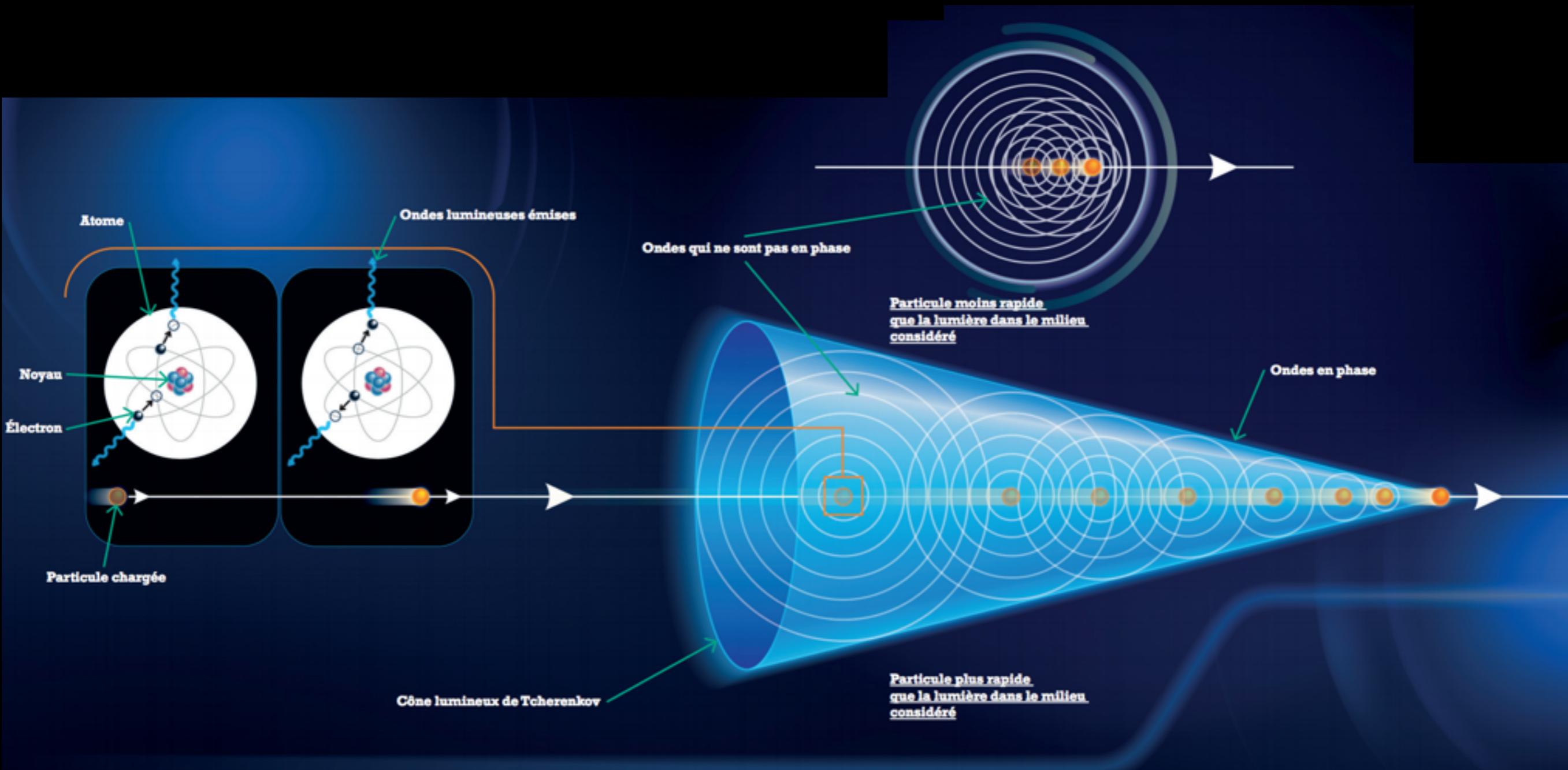
Détection de neutrinos de haute énergie

- désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e$
- $\nu_e + p^+ \rightarrow n^0 + e^+$
- $\nu_\mu + p^+ \rightarrow n^0 + \mu^+$
- le muon μ :
 - le grand frère de l'électron
 - plus lourd (~2000 fois la masse d'un électron)
 - temps de vie relativement long: deux microsecondes
 - relativité restreinte: à grande vitesse / grande énergie => durée de vie plus longue
 - les muons voyagent sur des kilomètres
 - ils sont très peu absorbés: ils pénètrent partout



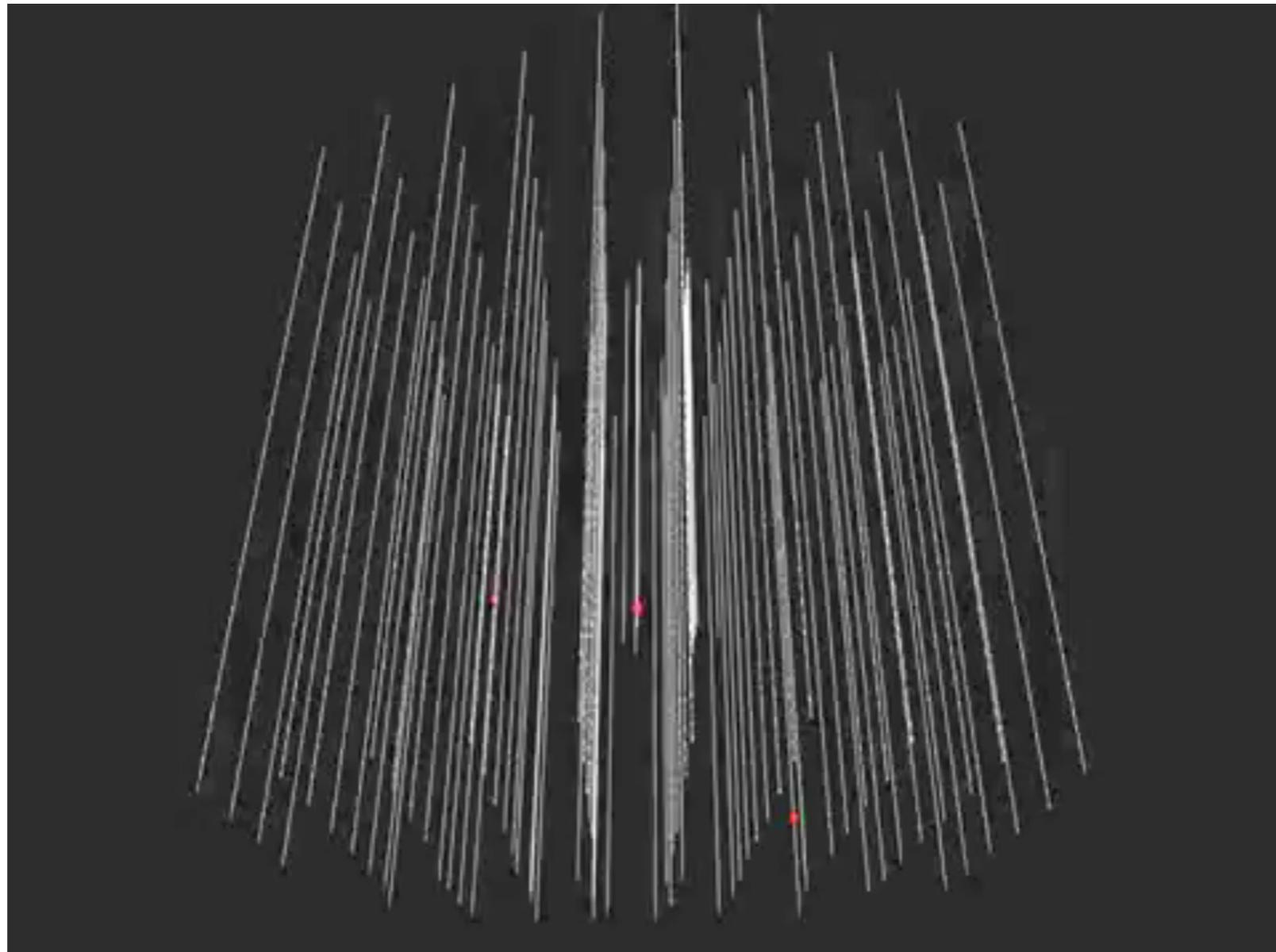
L'effet Tcherenkov

- une particule chargée dans un milieu transparent avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu



Détection de neutrinos de haute énergie

- réseau tridimensionnel de détecteurs de lumière dans un milieu transparent
- à l'abri / en grande profondeur (lumière + particules du rayonnement cosmique)
- volume nécessaire ~ 1 milliards $\text{m}^3 = 1 \text{ km}^3 \implies$ milieu naturel: eau, glace



Détection de neutrinos de haute énergie

Les télescopes à neutrino

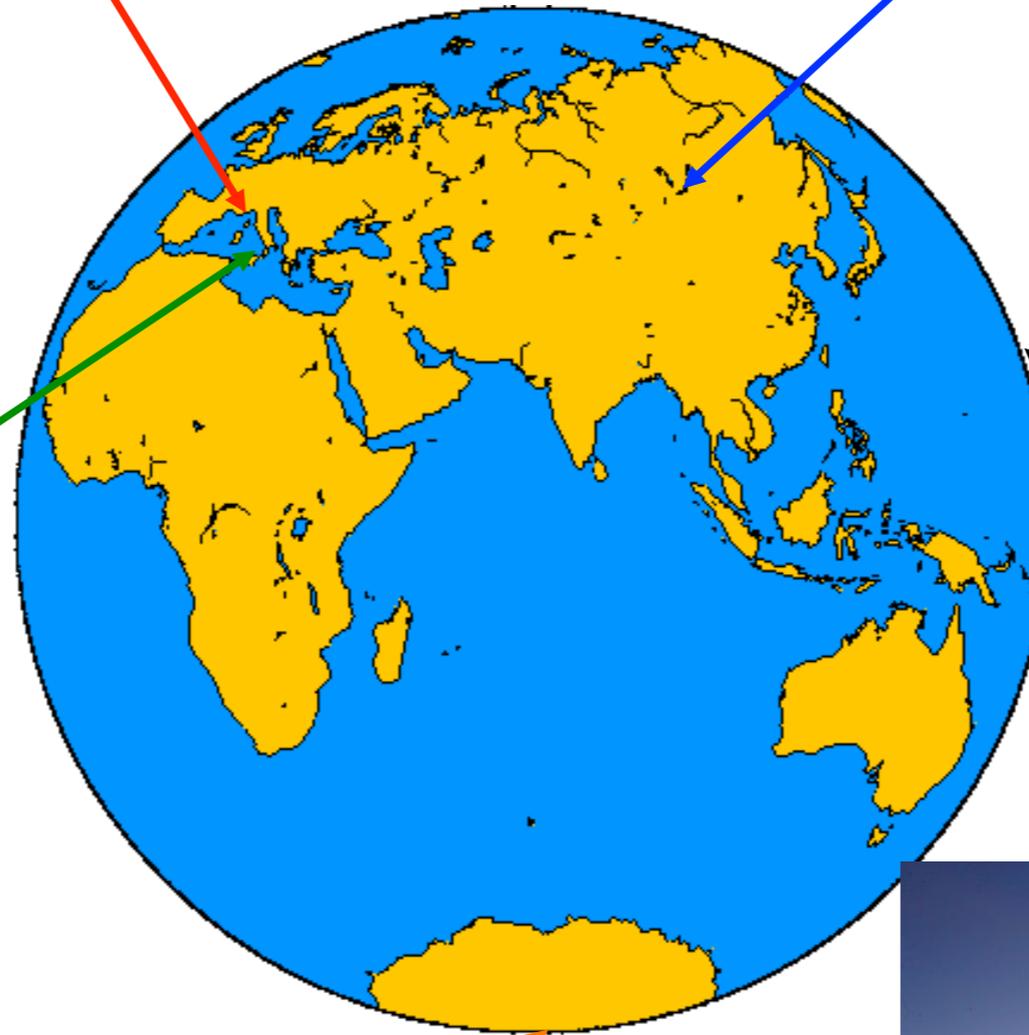
ANTARES: La-Seyne-sur-Mer, France



BAIKAL: Lake Baikal, Siberia



KM3NeT (Catania, Italy)



DUMAND, Hawaii
(cancelled 1995)

AMANDA/IceCube: Antarctica



Le lac Baïkal

- le plus ancien des télescopes à neutrino (lancé en 1980!)
- 1100m de profondeur + eau très claire

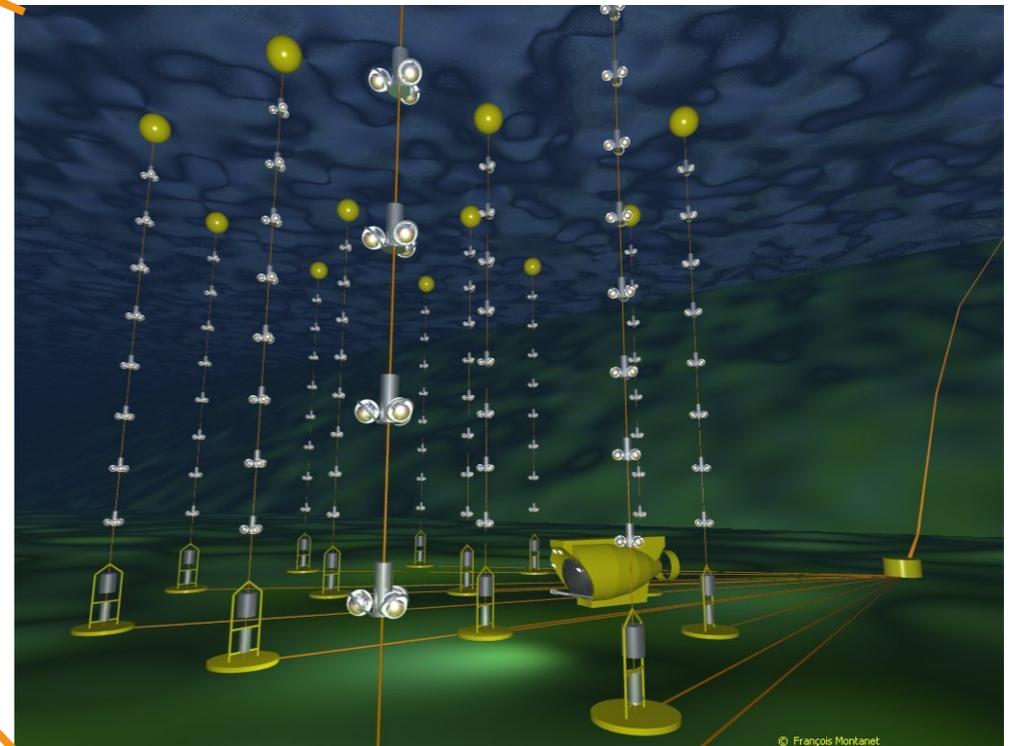
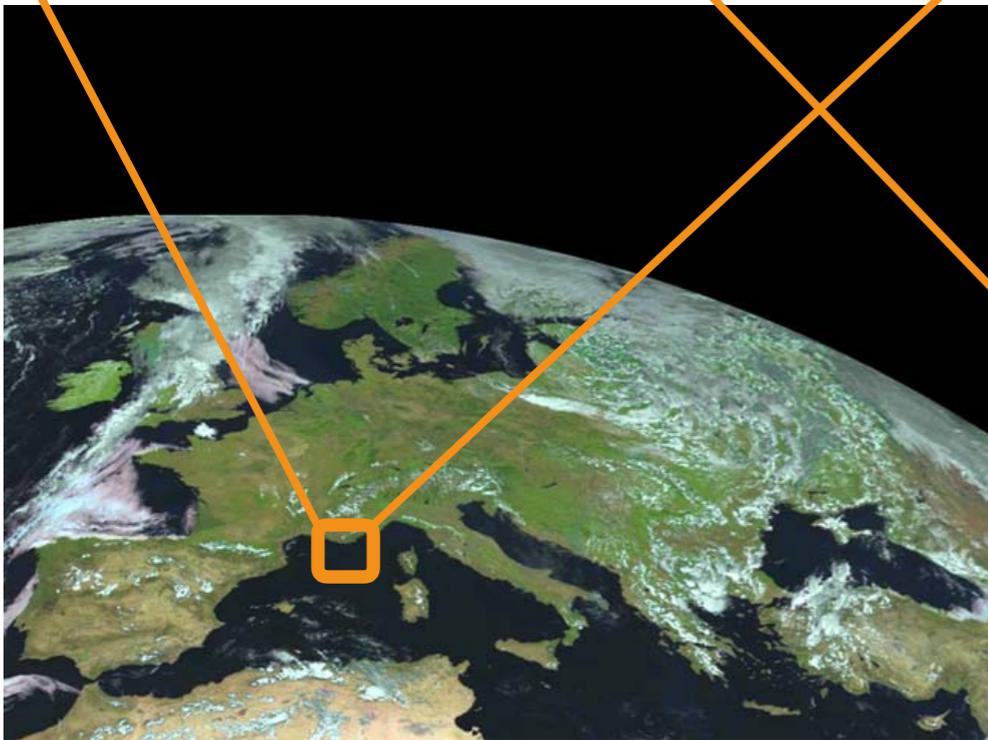


Le lac Baïkal

- le plus ancien des télescopes à neutrino (lancé en 1980!)
- 1100m de profondeur + eau très claire
- installation en hiver: quelques mètres de glace

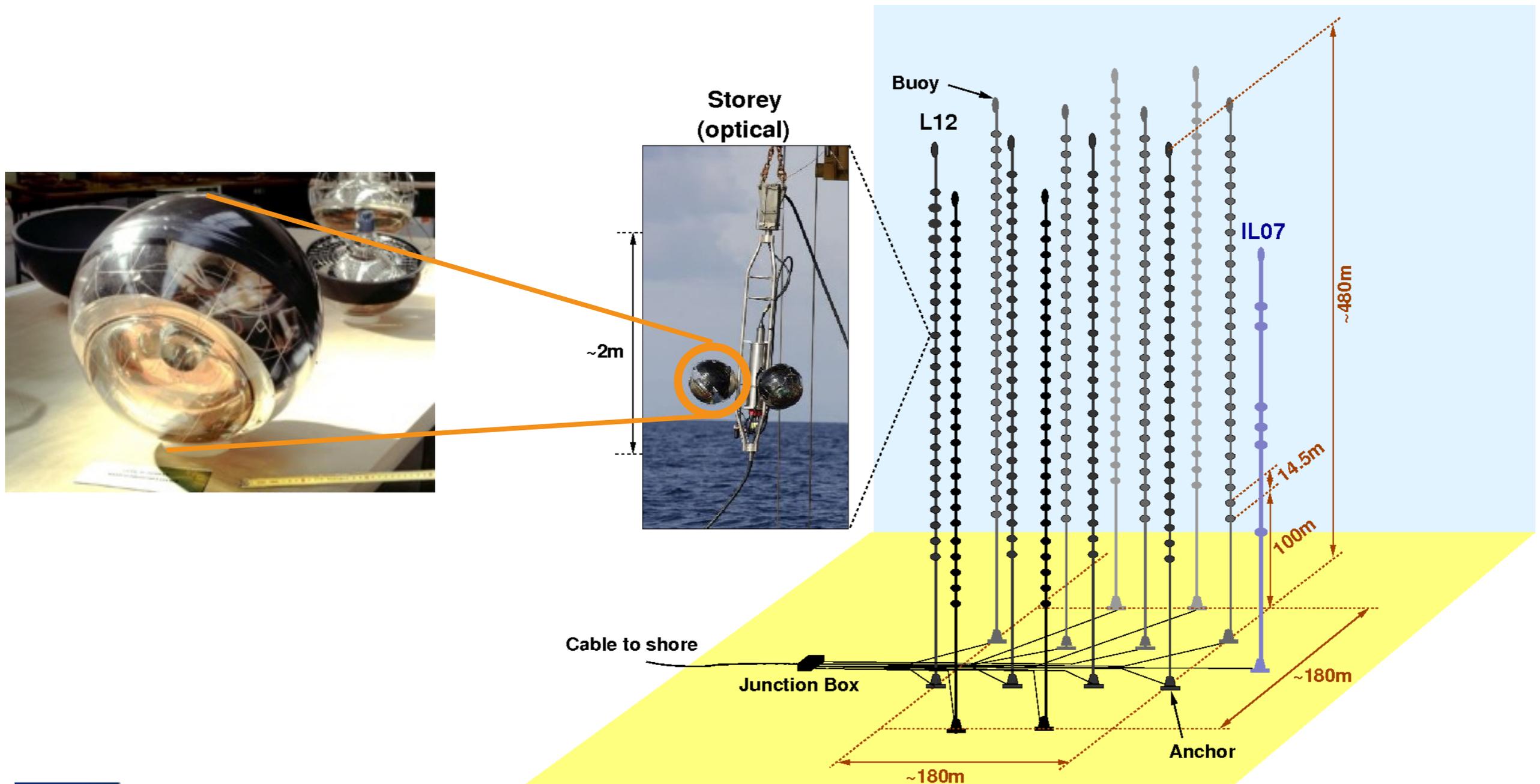


ANTARES



ANTARES

- début de l'installation en 2005 (terminée en 2007)
- 2800m de profondeur + eau très claire + température à 13,32 °C



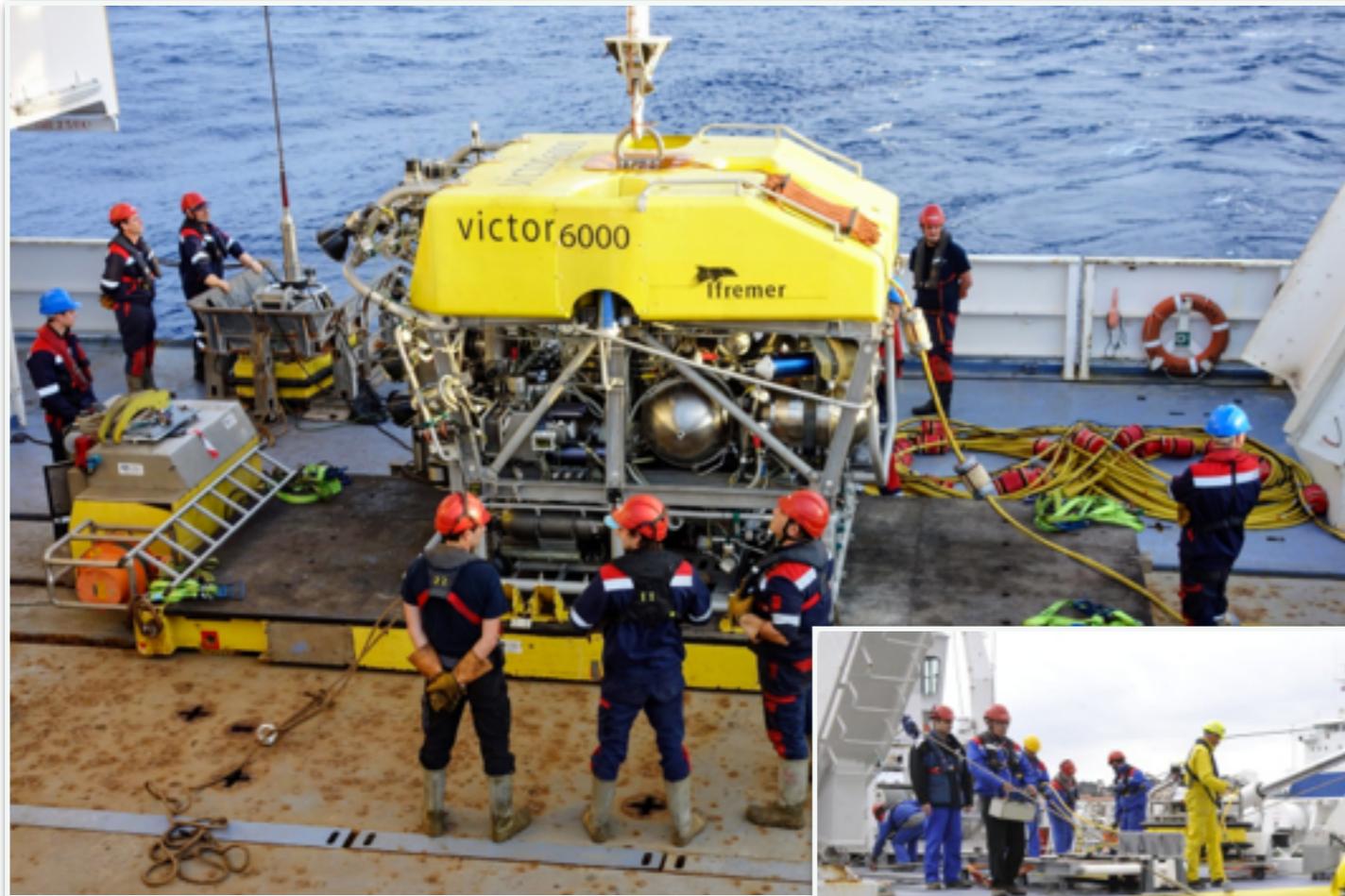
ANTARES

- 12 lignes de 450m de long
 - 25 étages avec 3 détecteurs de lumière



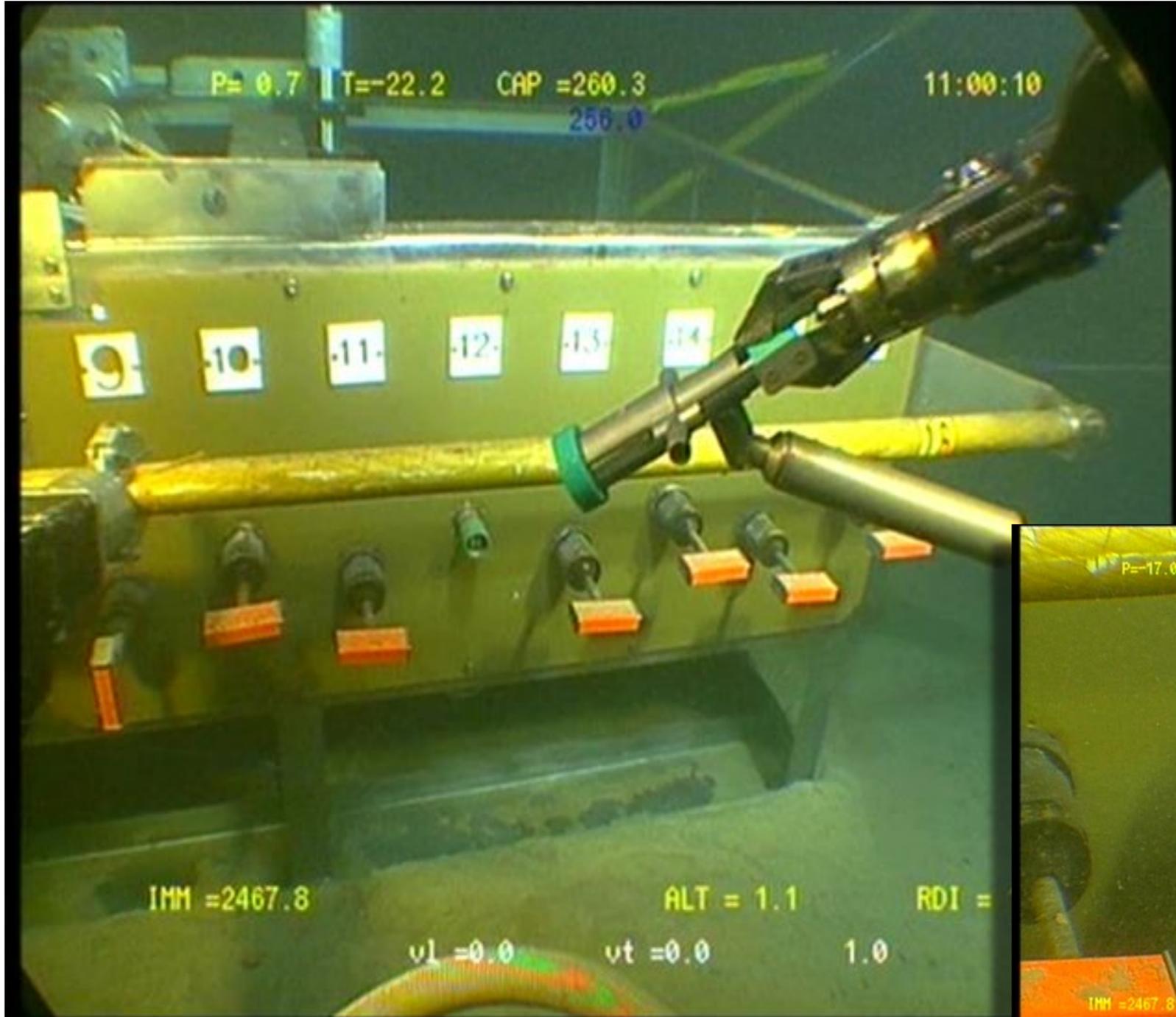
ANTARES

- connexion du détecteur avec les sous-marins d'Iframer



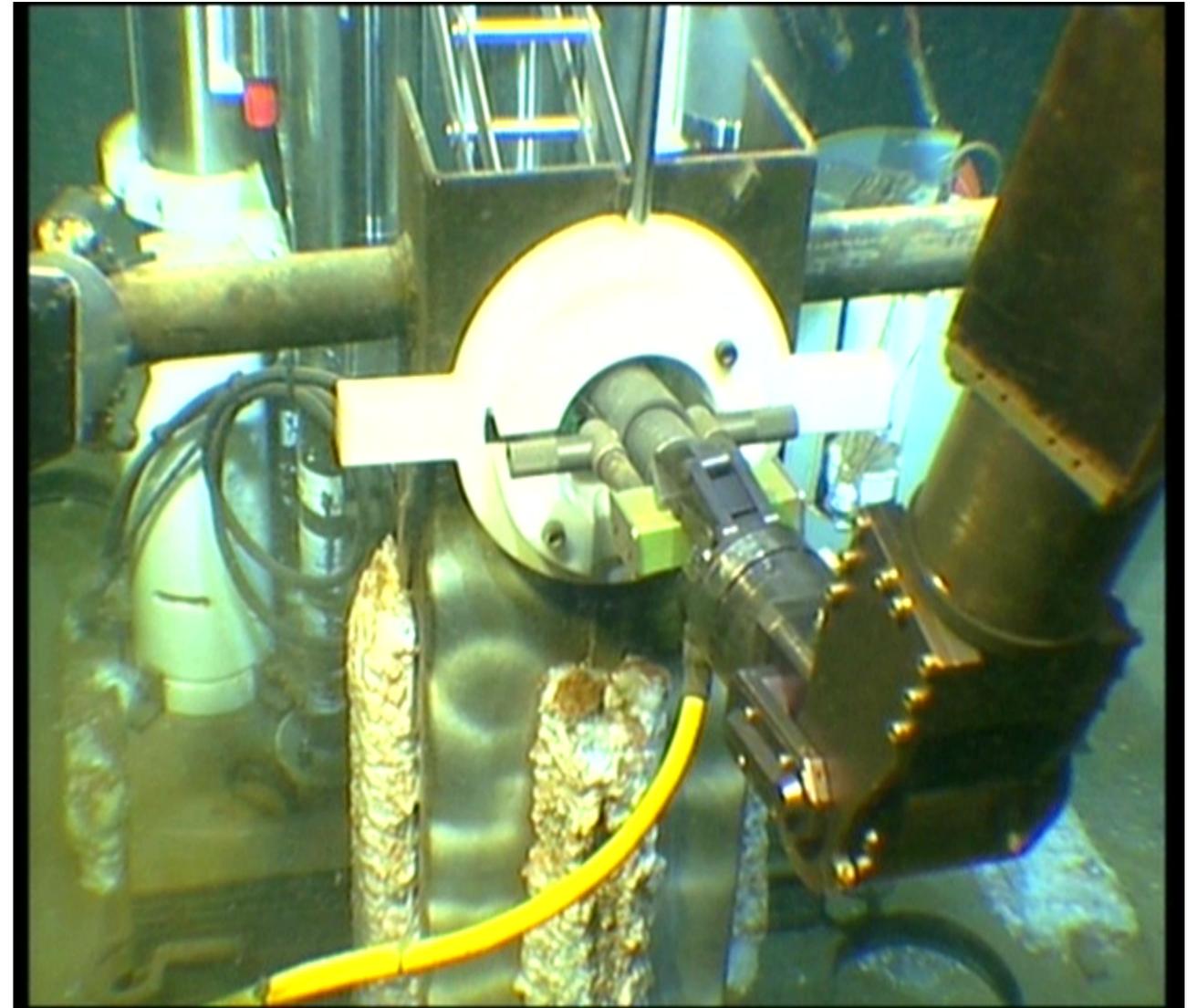
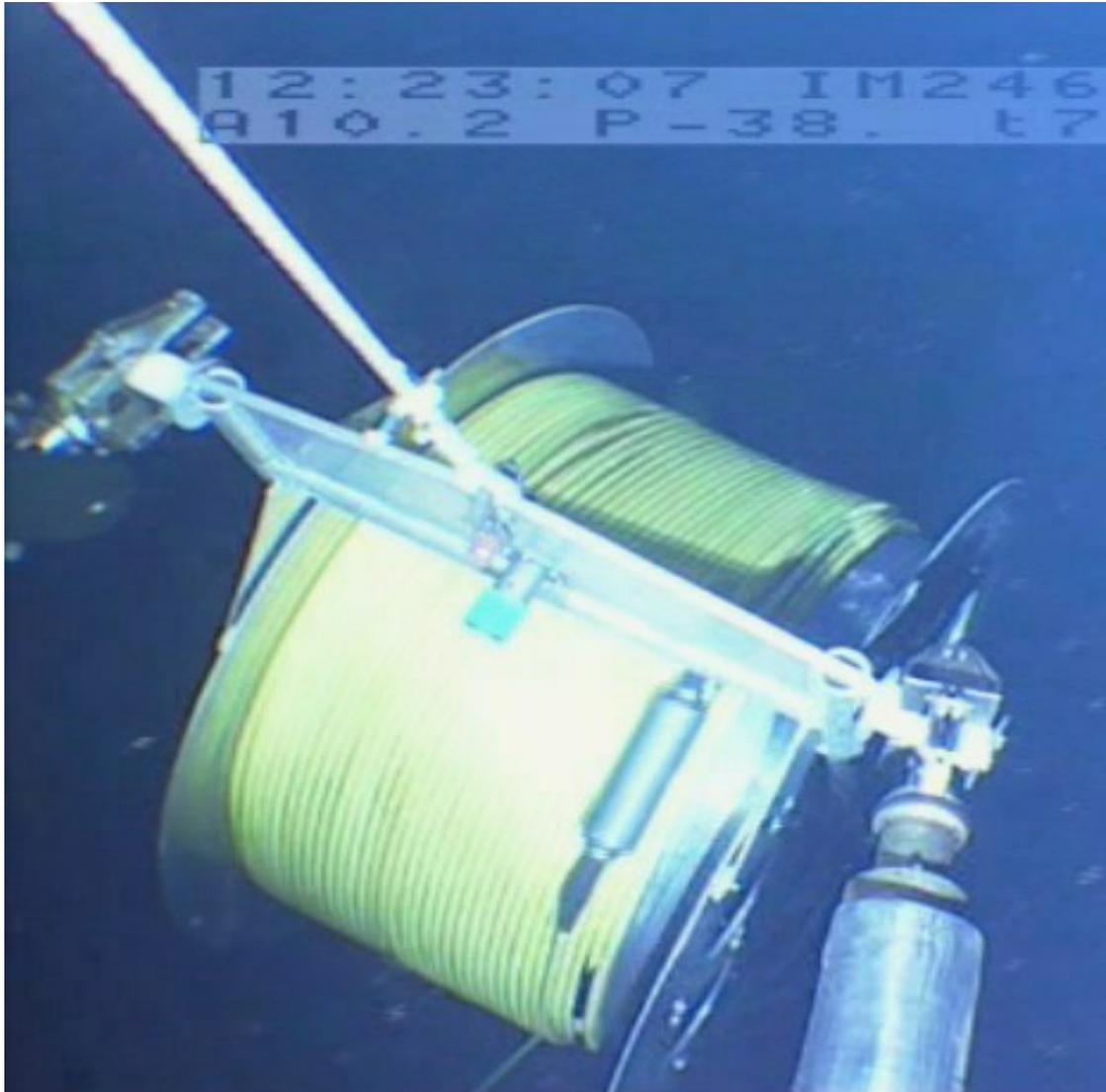
ANTARES

- connexion du détecteur avec les sous-marins d'Ifremer



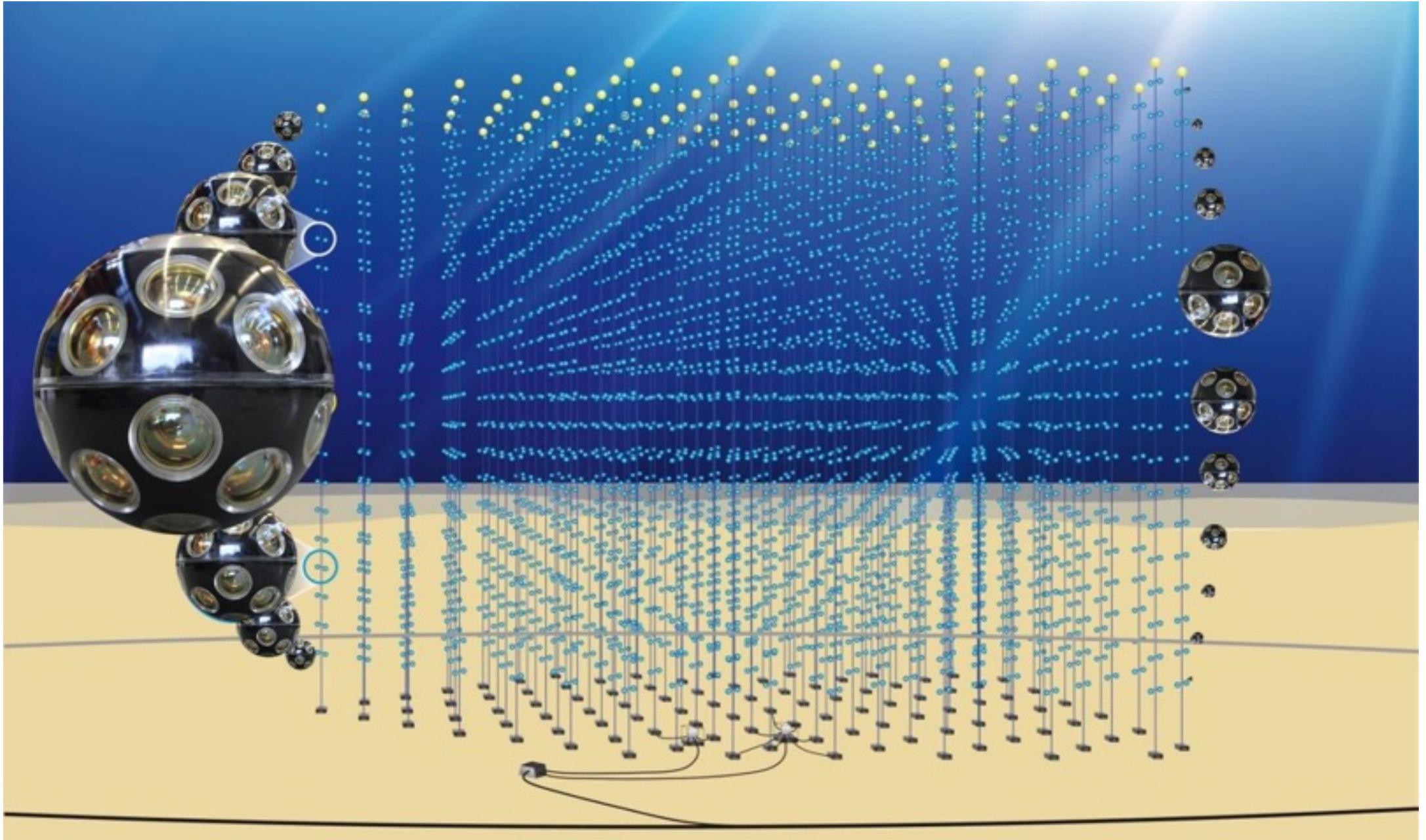
ANTARES

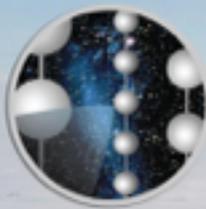
- connexion du détecteur avec les sous-marins d'Iframer



Le futur des télescopes à neutrino en Europe: KM3NeT

- deux sites: Toulon/France et Sicile/Italie
- construction en cours





ICECUBE

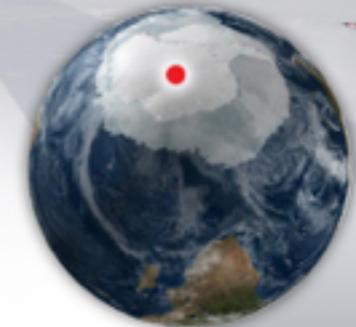
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

50 m

Ice Top



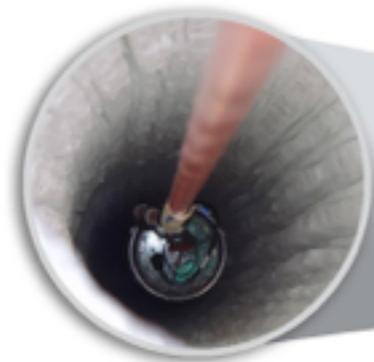
IceCube Laboratory
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility

1450 m

86 strings of DOMs, set 125 meters apart



Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs deployed in the ice

2450 m

IceCube detector

DeepCore

DOMs are 17 meters apart

60 DOMs on each string



Antarctic bedrock

L'astronomie au Pole Sud

Station Amundsen-Scott

IceCube

BICEP2

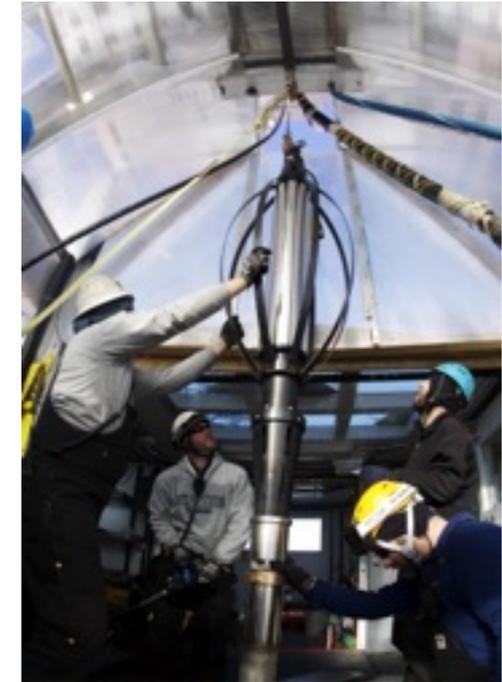
Keck Array

South Pole Telescope

IceCube: construire un télescope au Pole Sud



IceCube: construire un télescope au Pole Sud

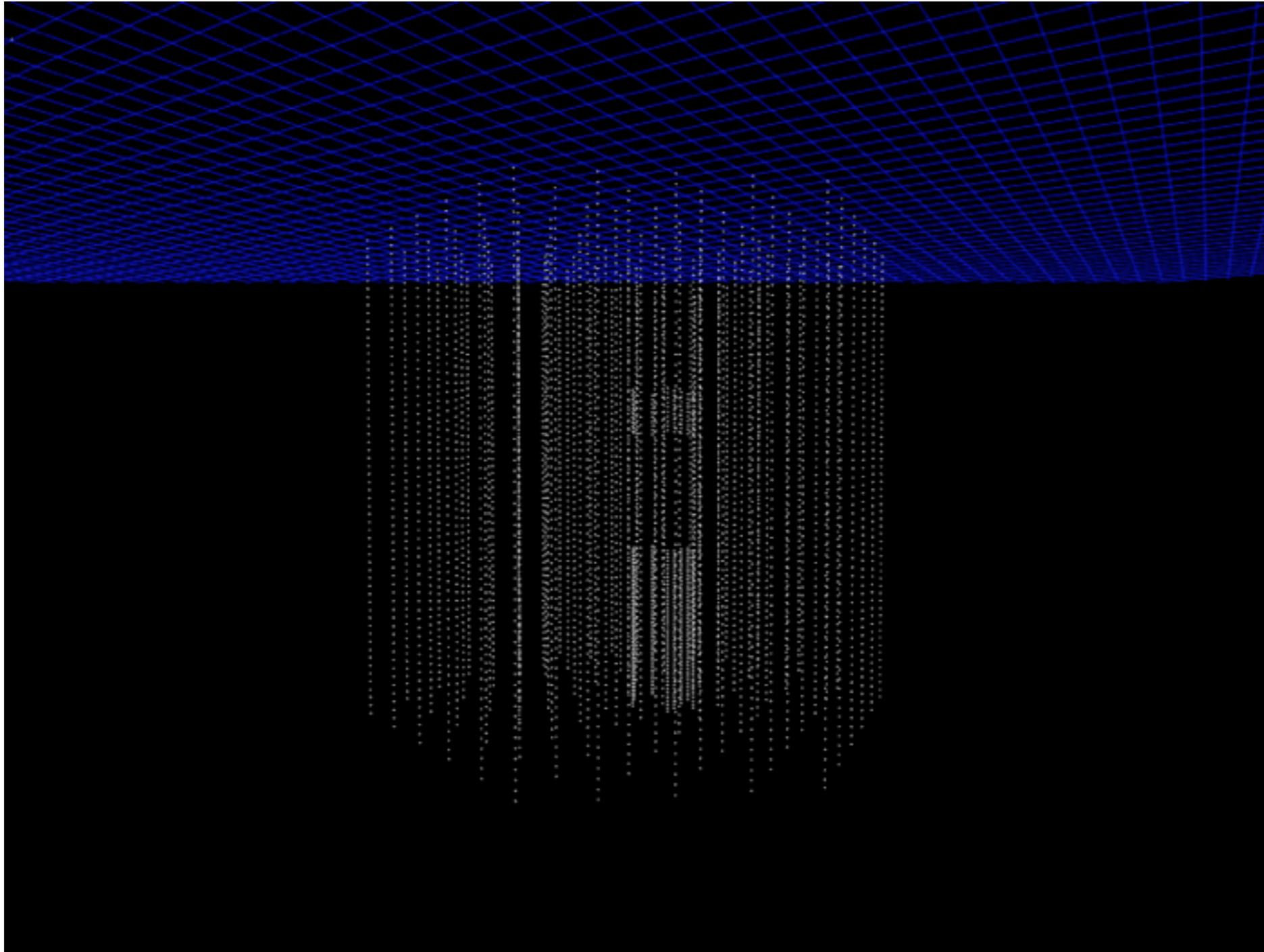


IceCube: construire un télescope au Pole Sud

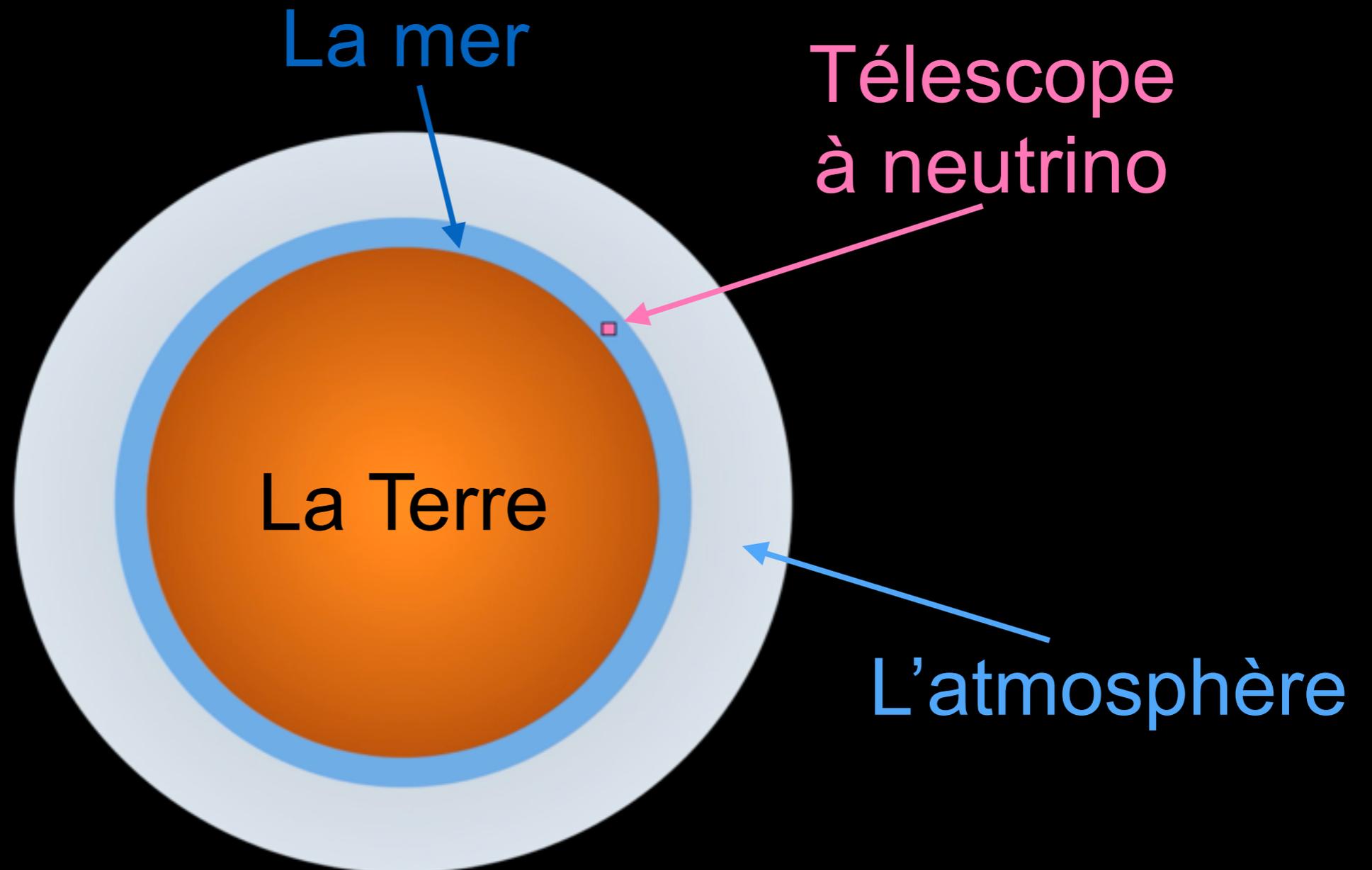


Les données recueillies par un télescope de neutrino

- 10 millisecondes (1/100 s) de données d'IceCube

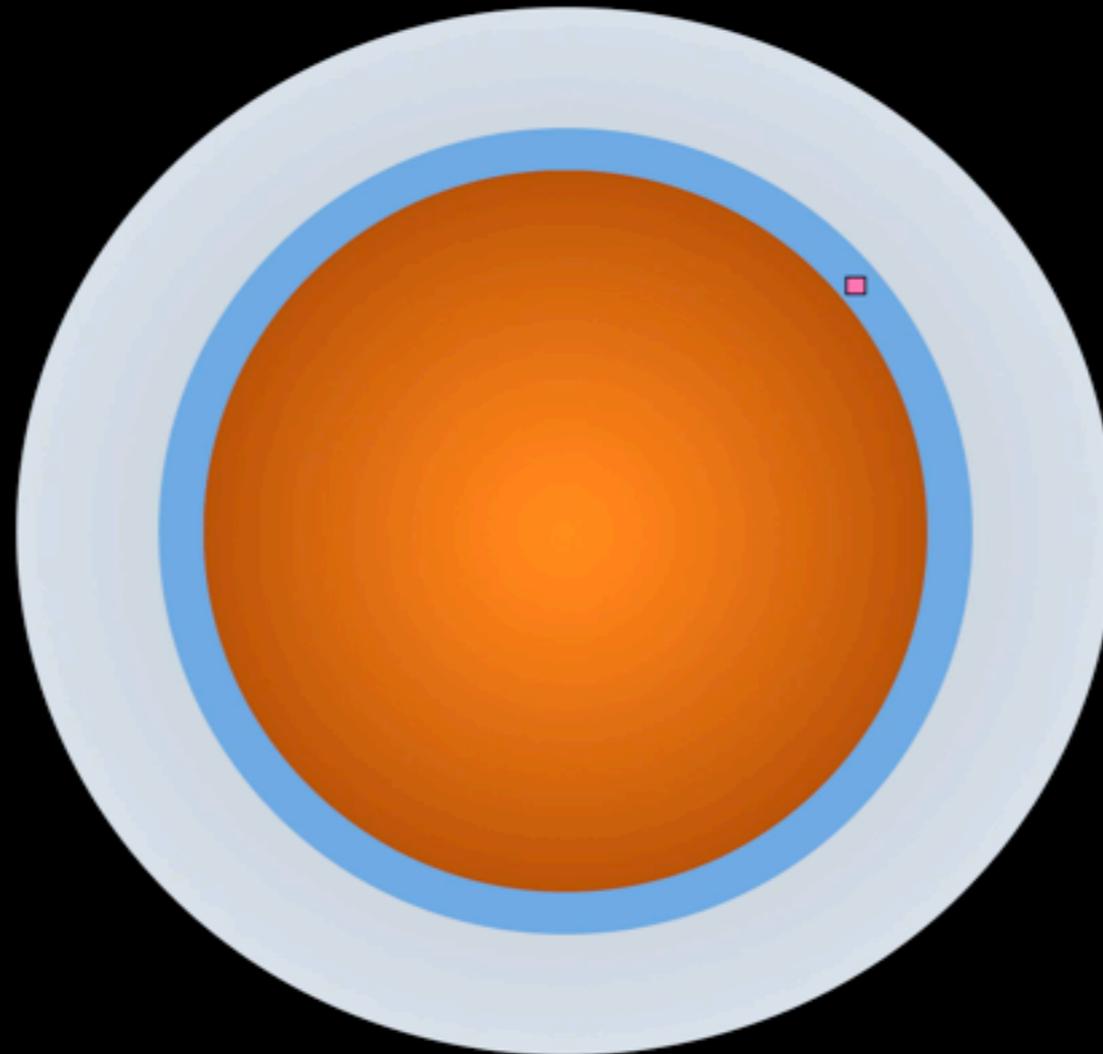


Les signaux reçus par les télescopes à neutrinos

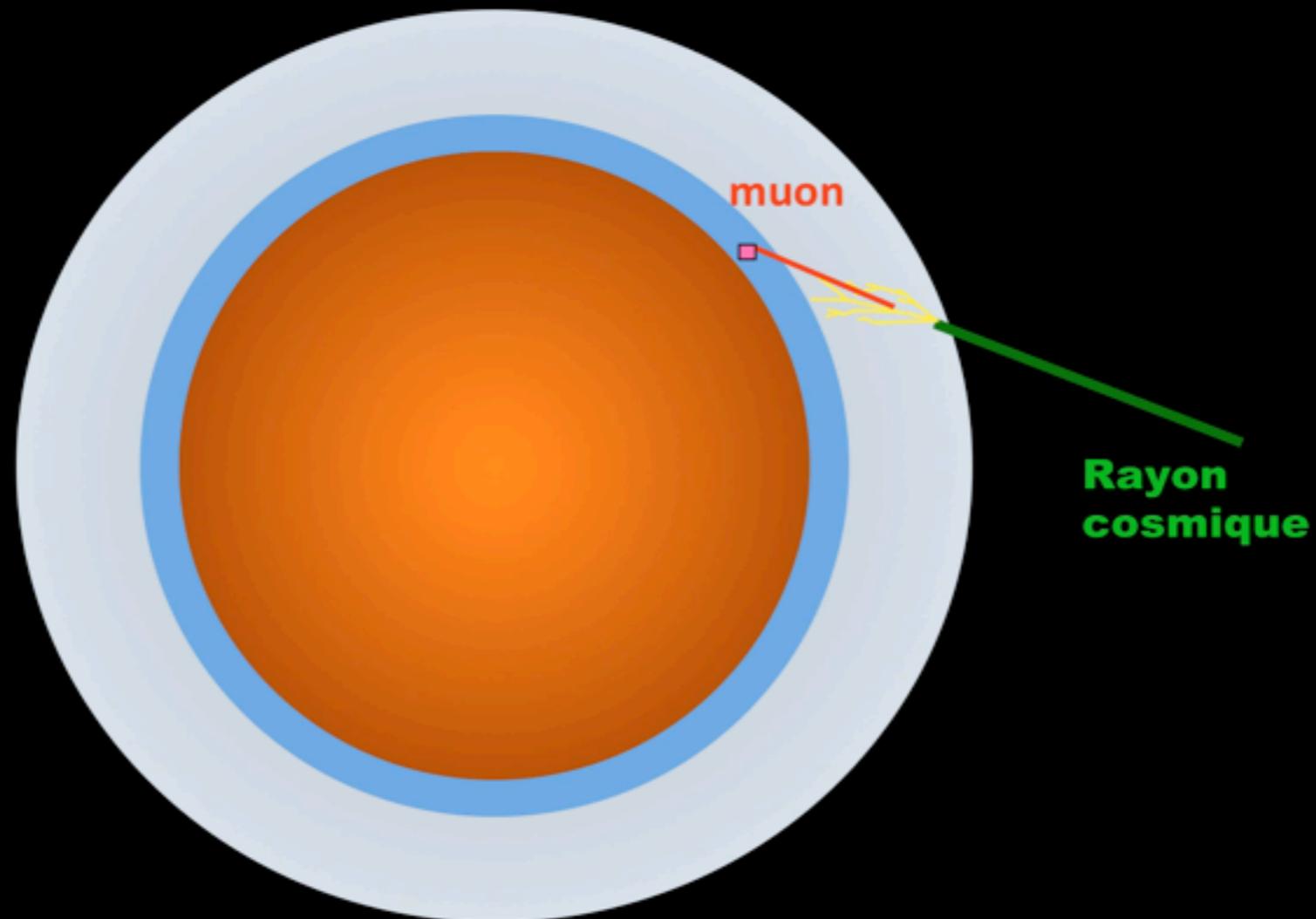


Les signaux reçus par les télescopes à neutrinos

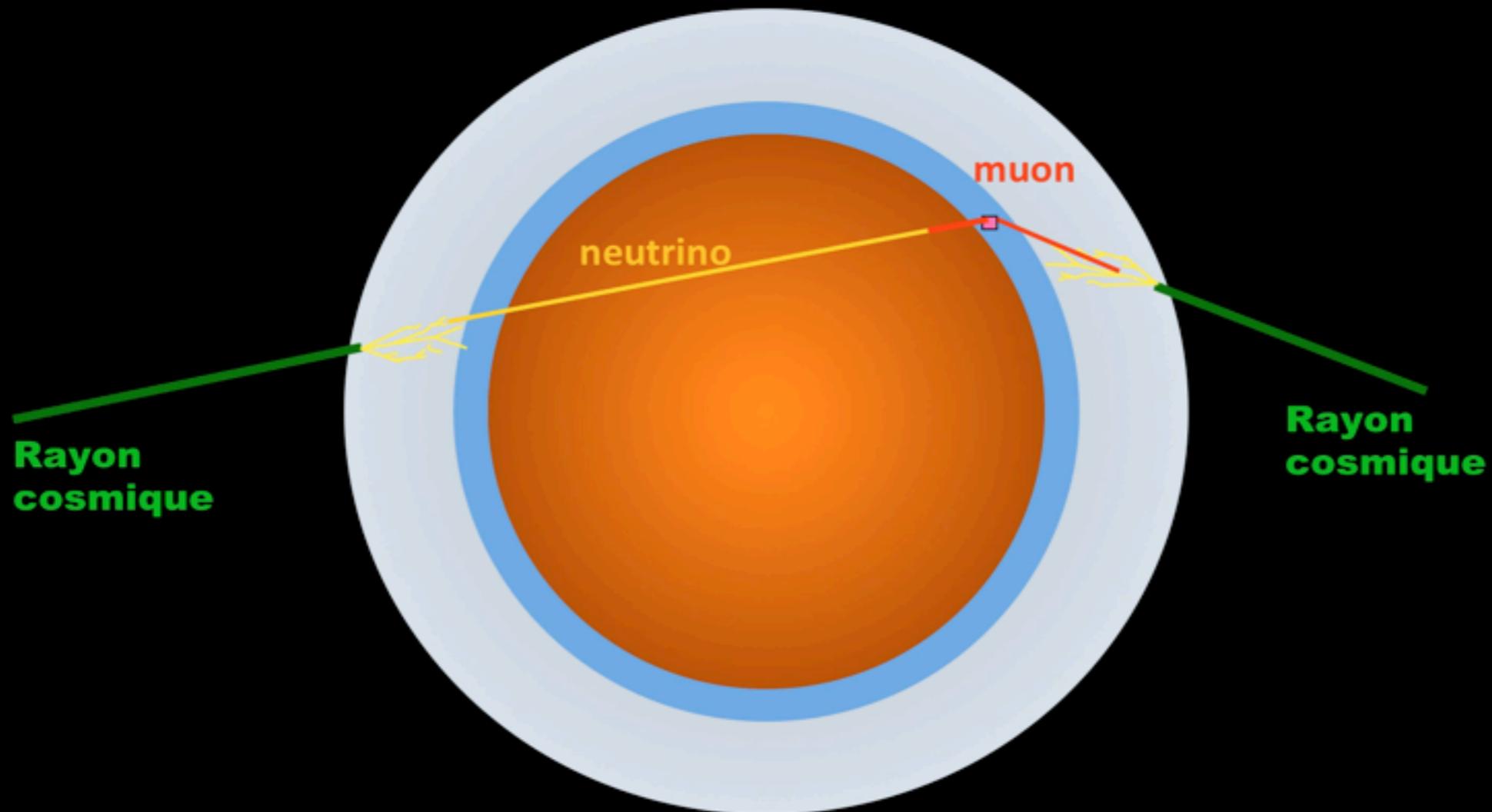
- plusieurs sources de signaux



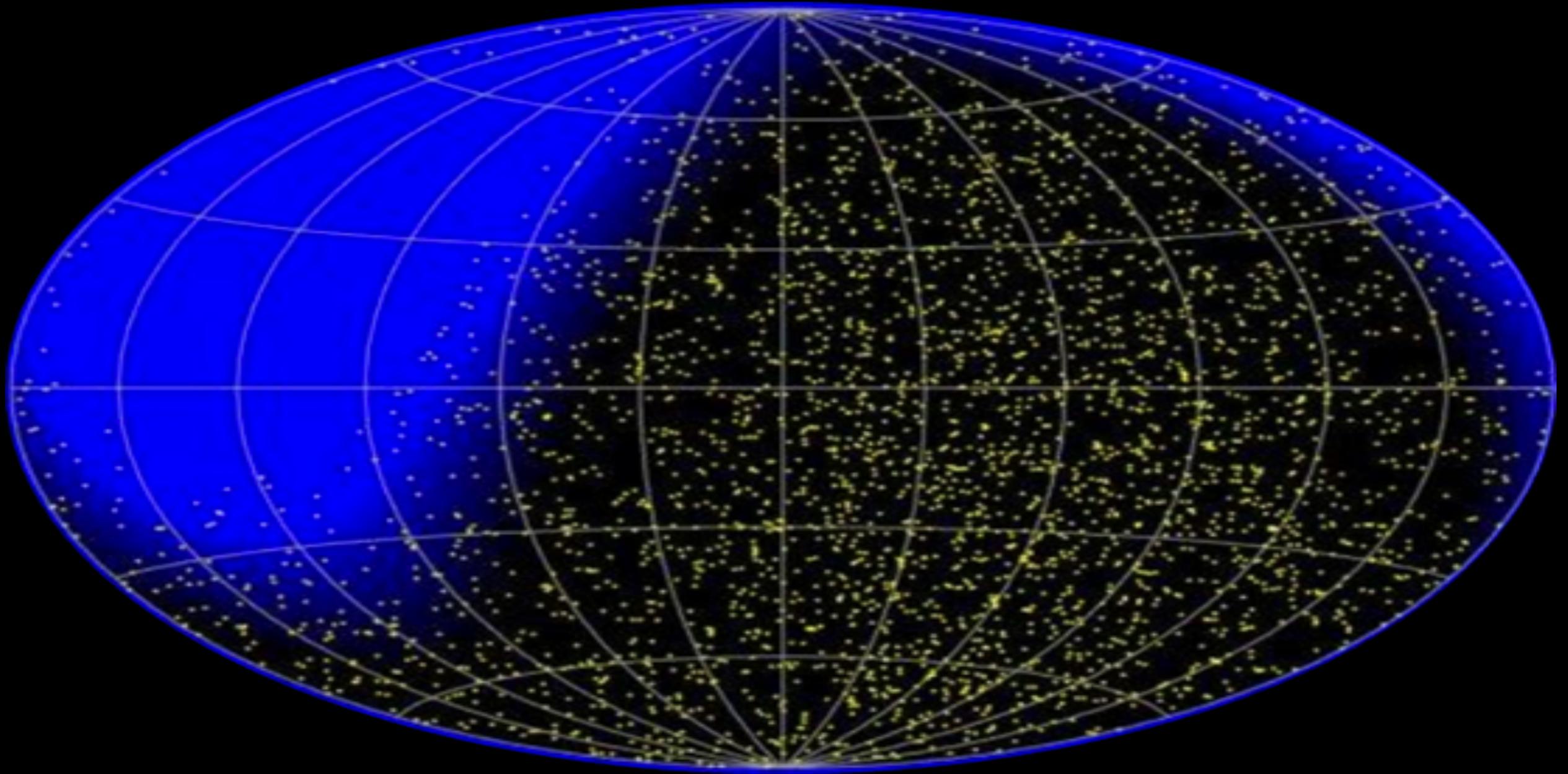
Les signaux reçus par les télescopes à neutrinos



Les signaux reçus par les télescopes à neutrinos



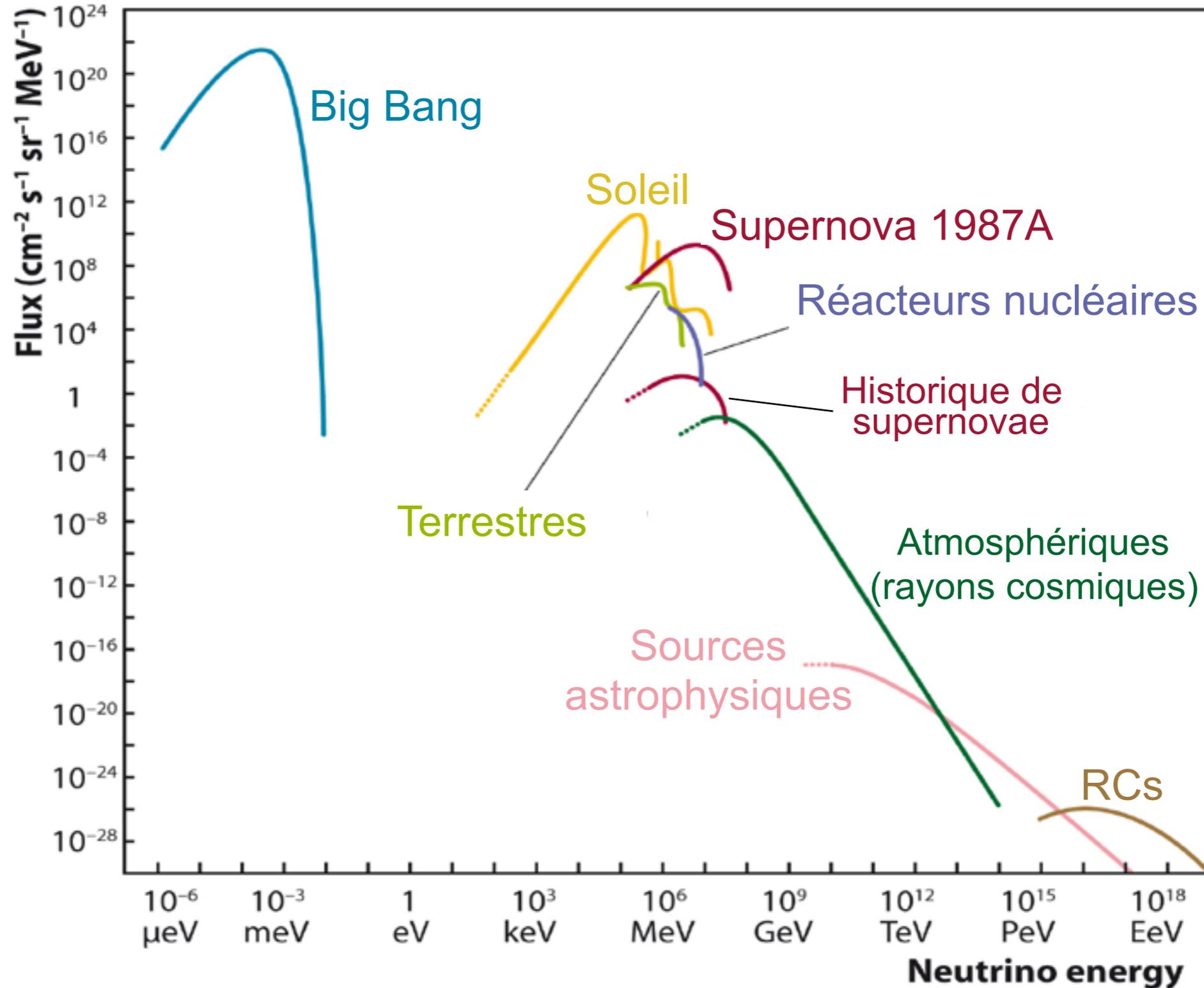
Le ciel vu en neutrinos de haute énergie



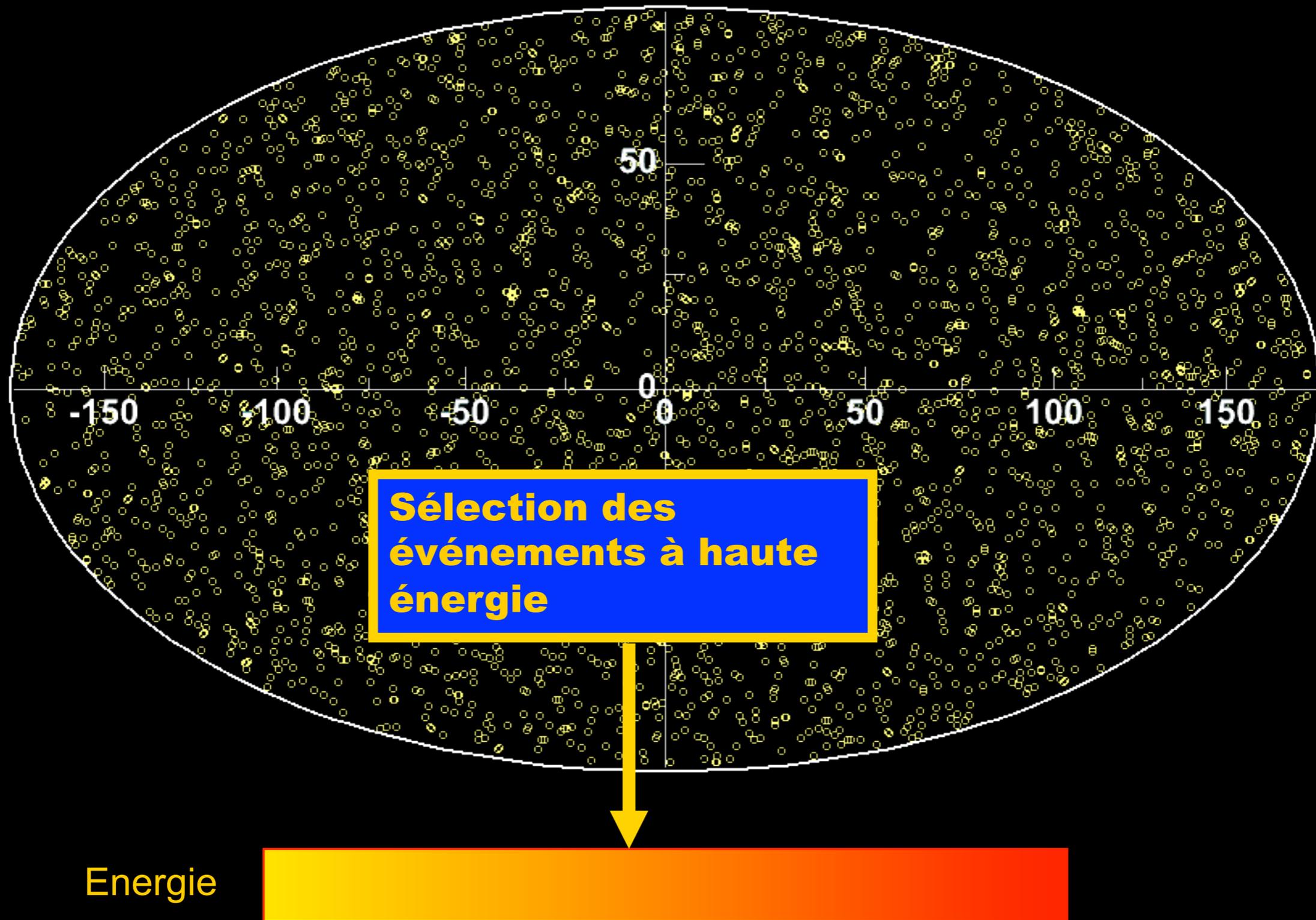
ANTARES



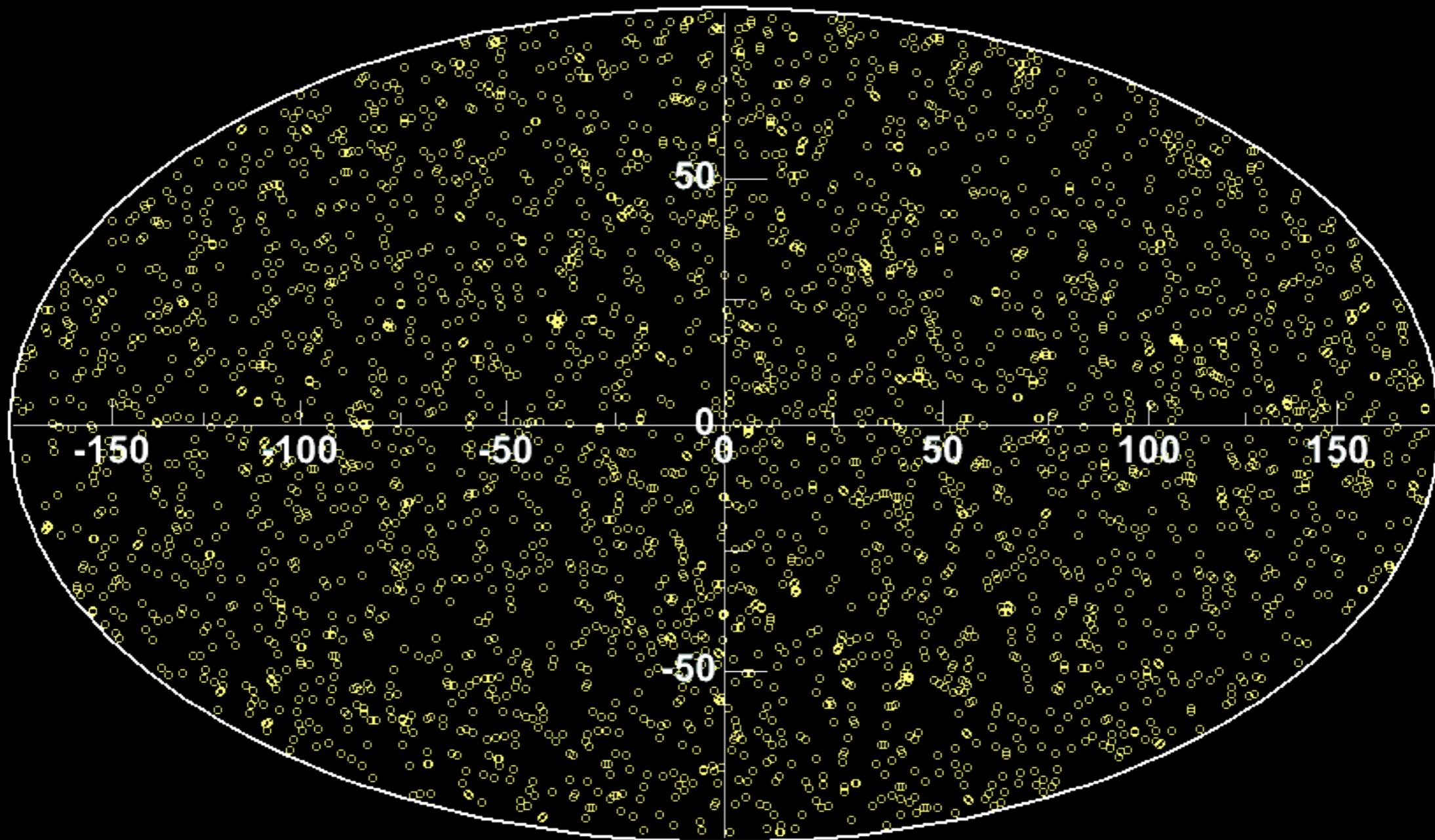
Neutrinos de toutes les énergies



A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



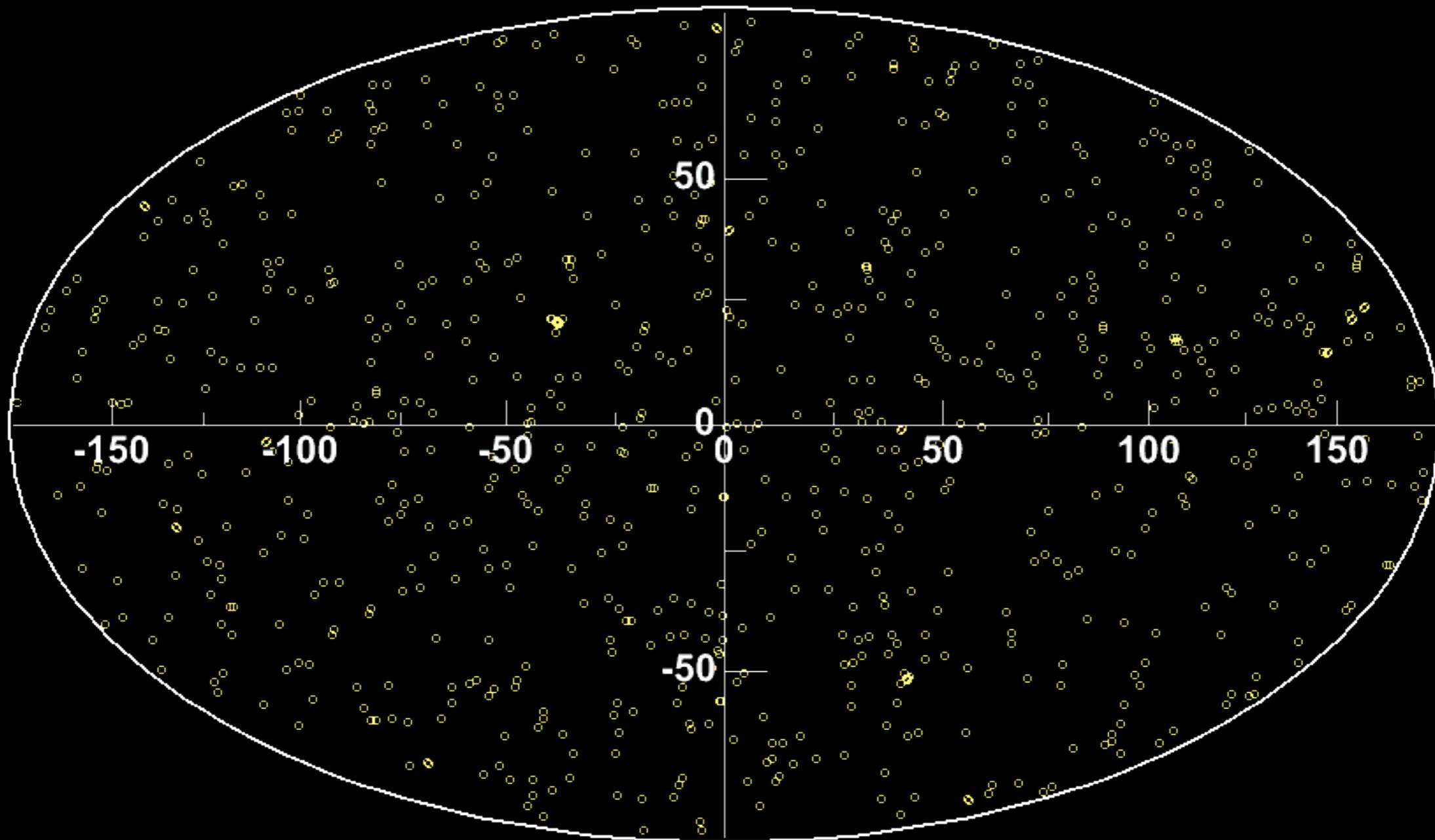
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



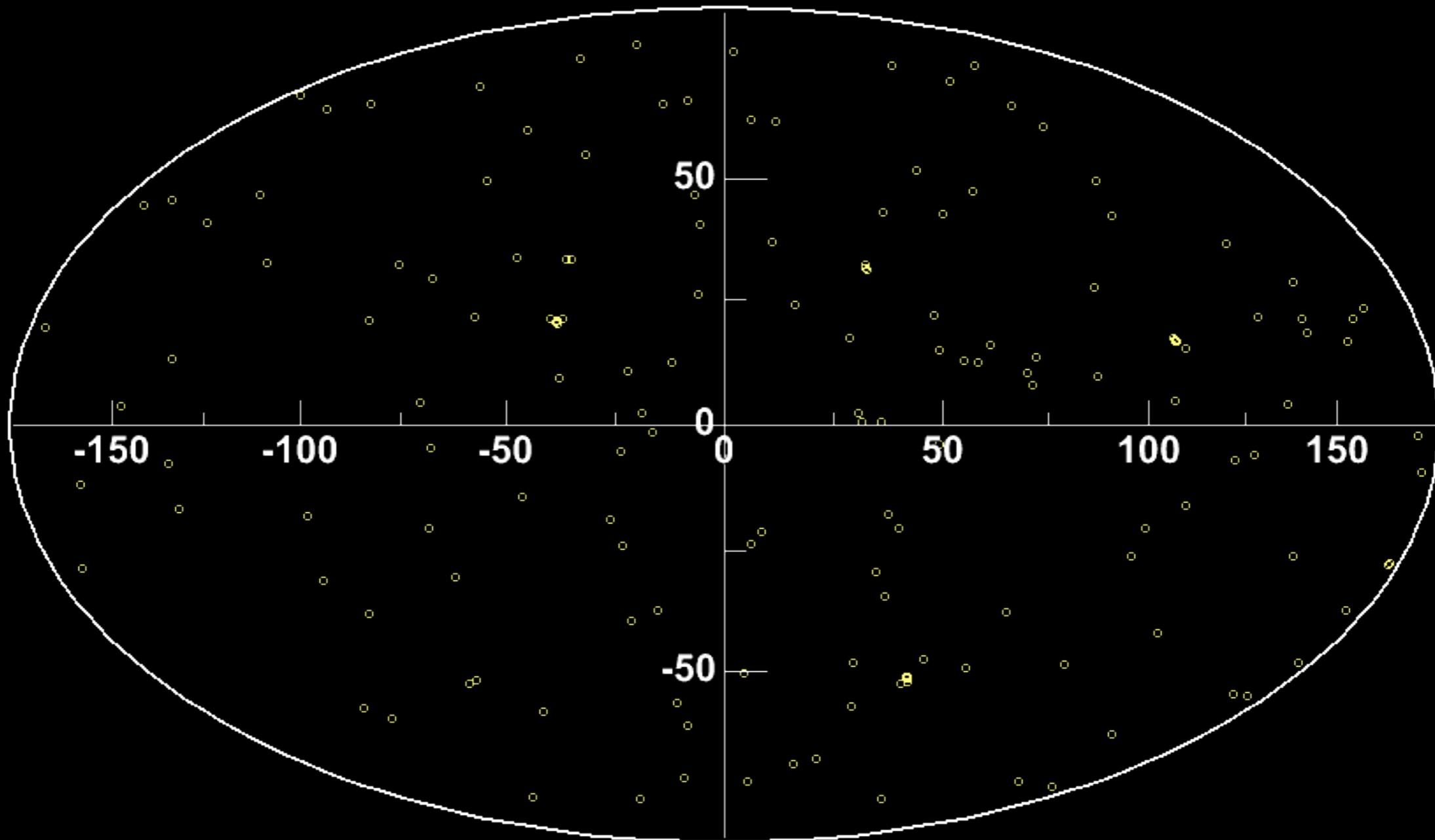
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



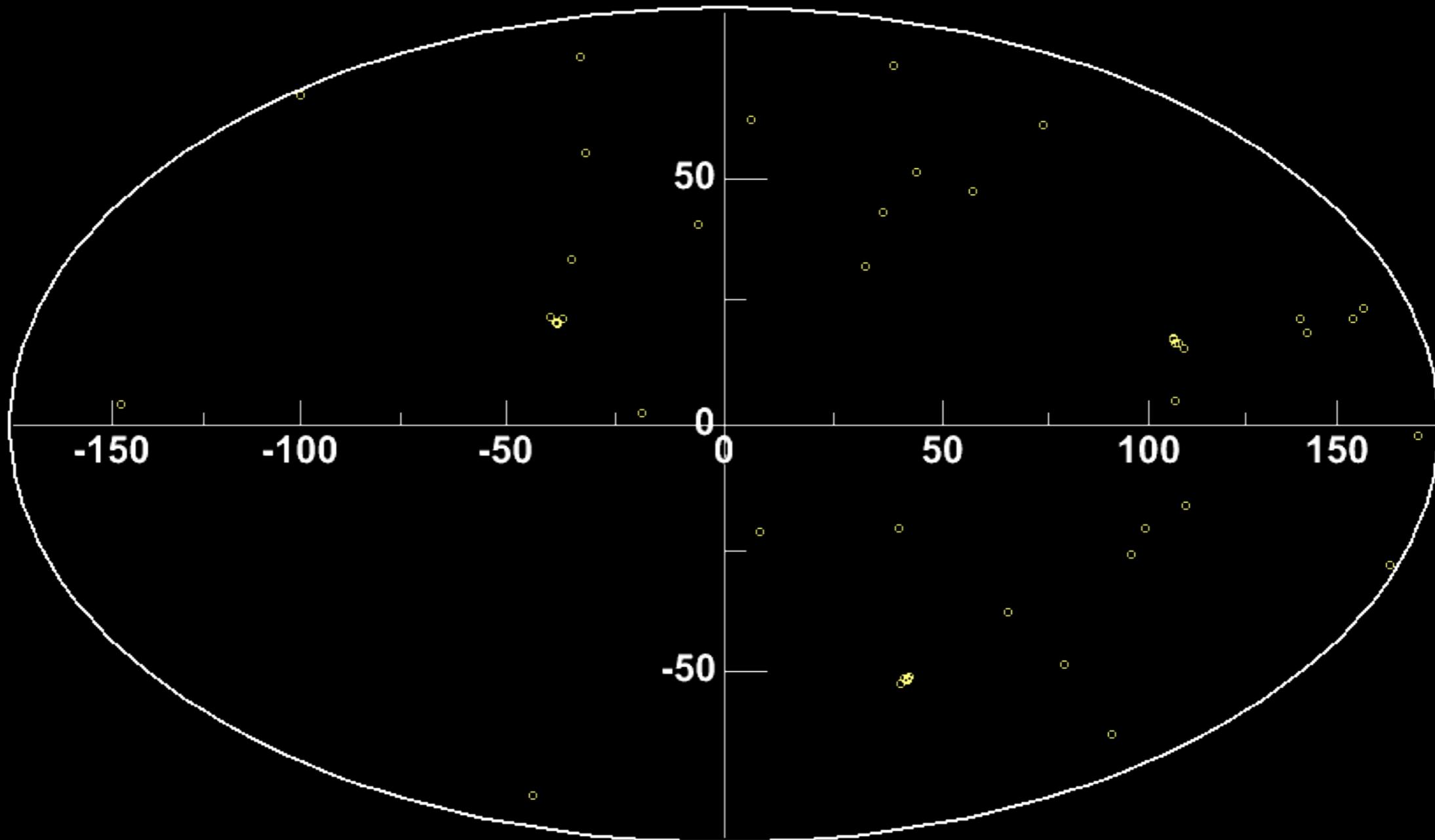
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



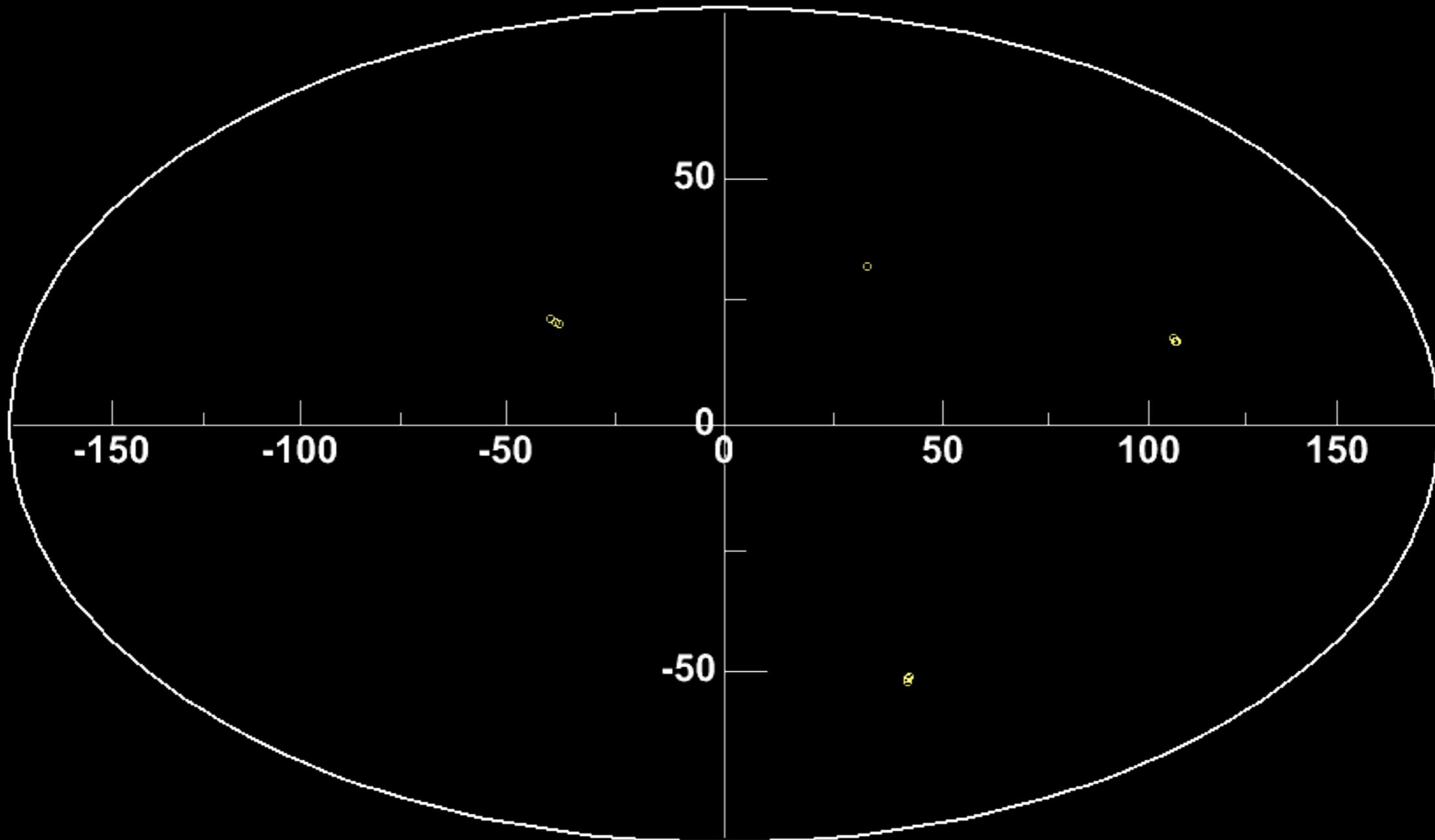
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



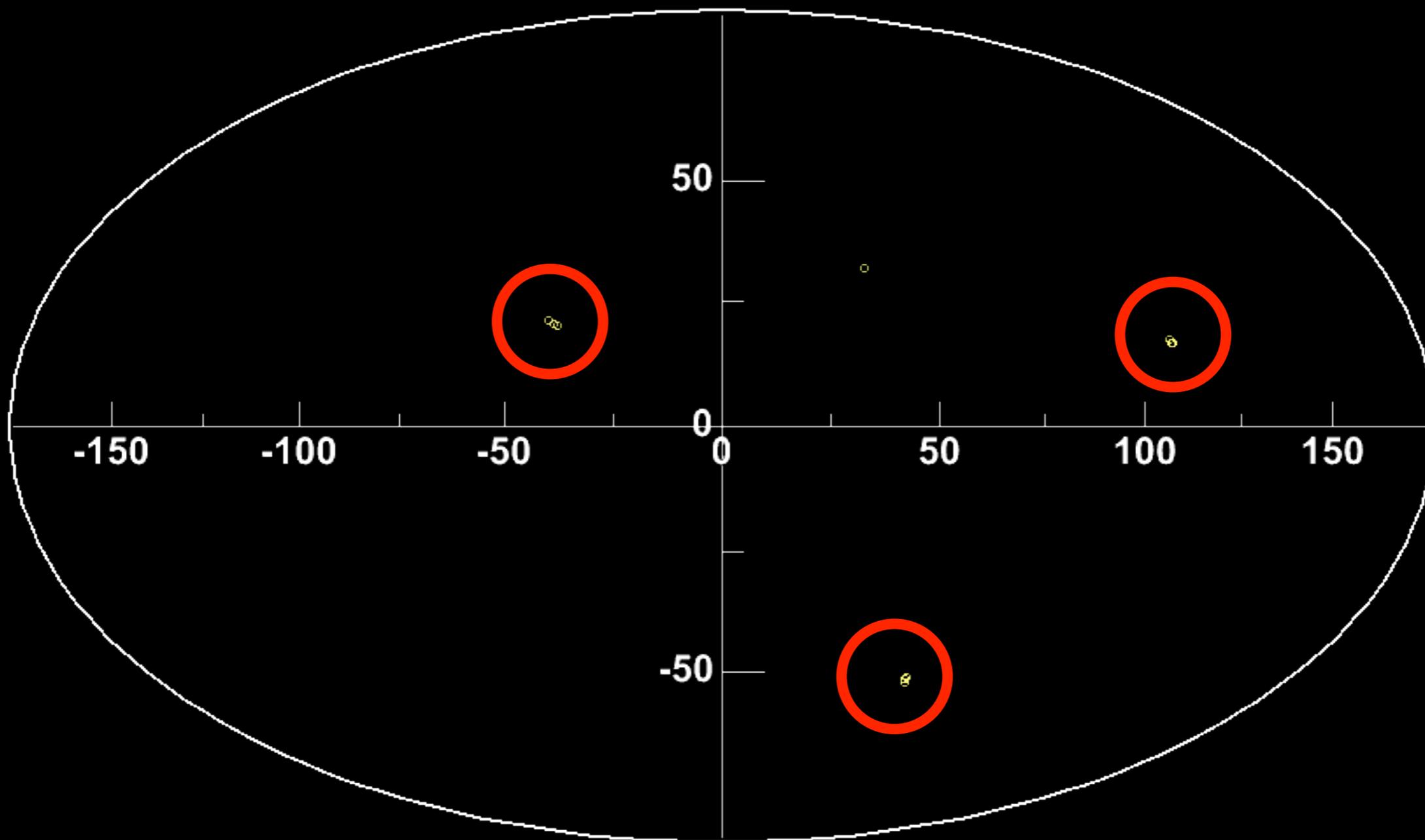
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



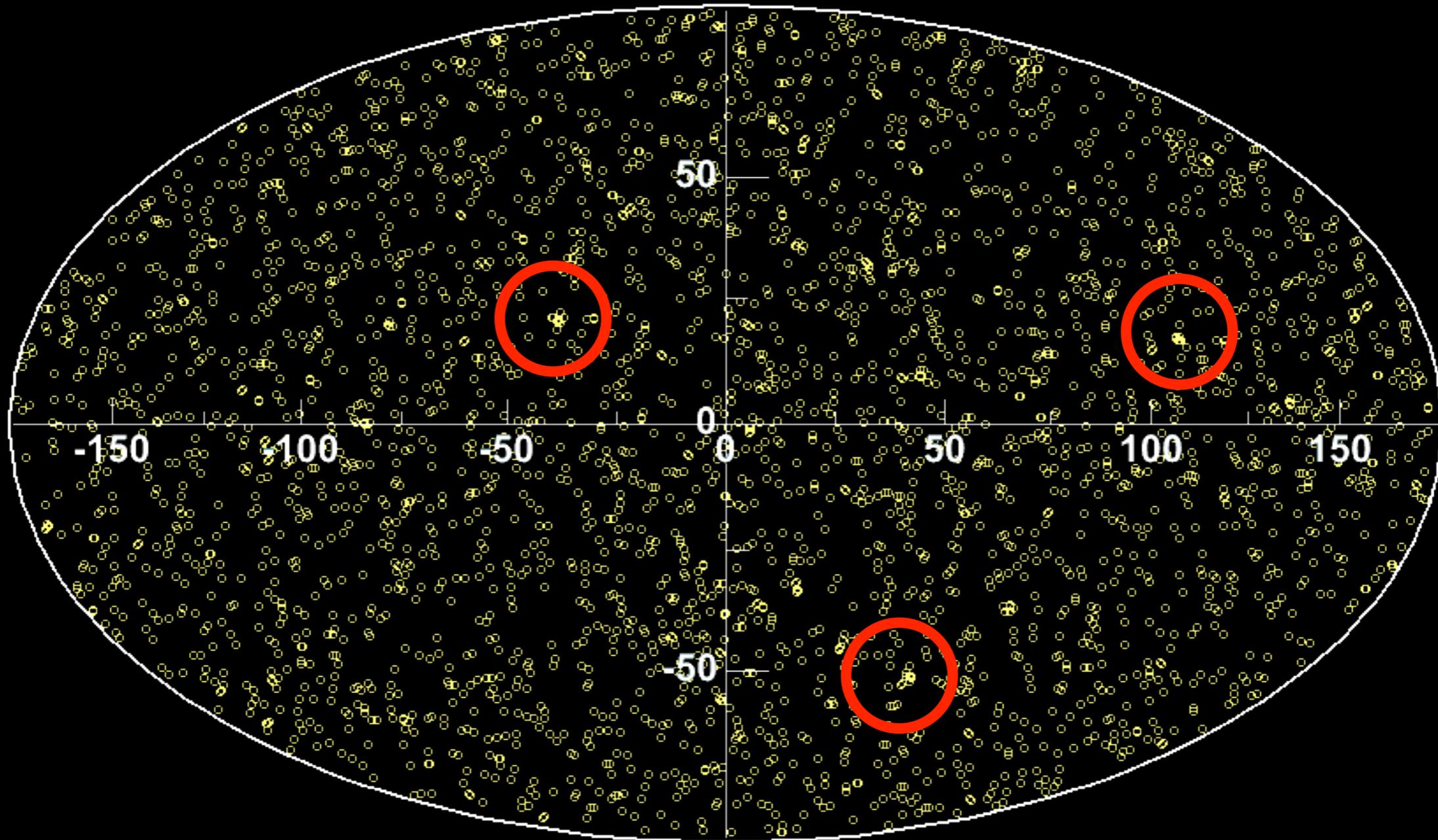
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



Energie



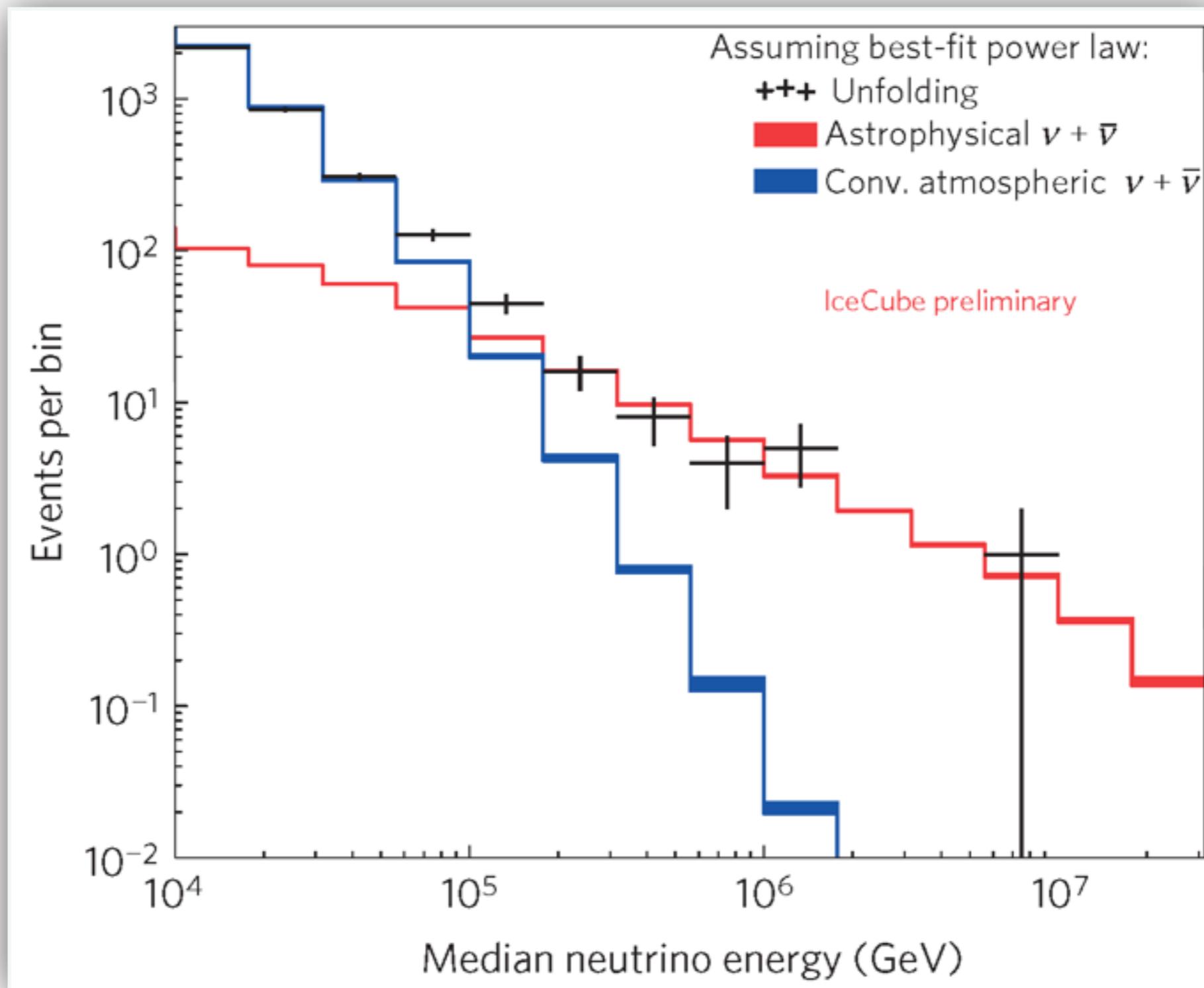
A la recherche des neutrinos d'origine astrophysique



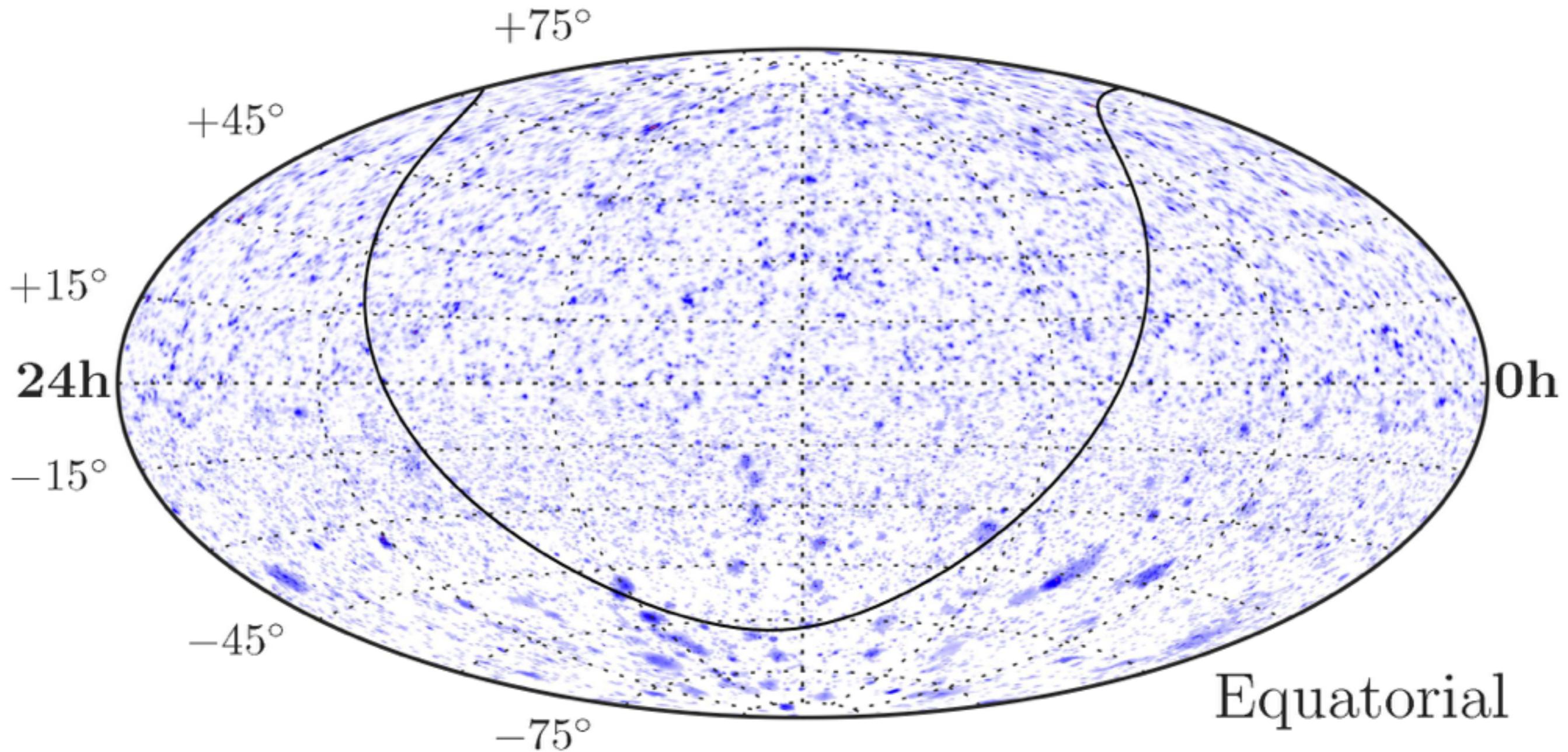
Energie



Flux de neutrinos astrophysiques: un excès à haute énergie

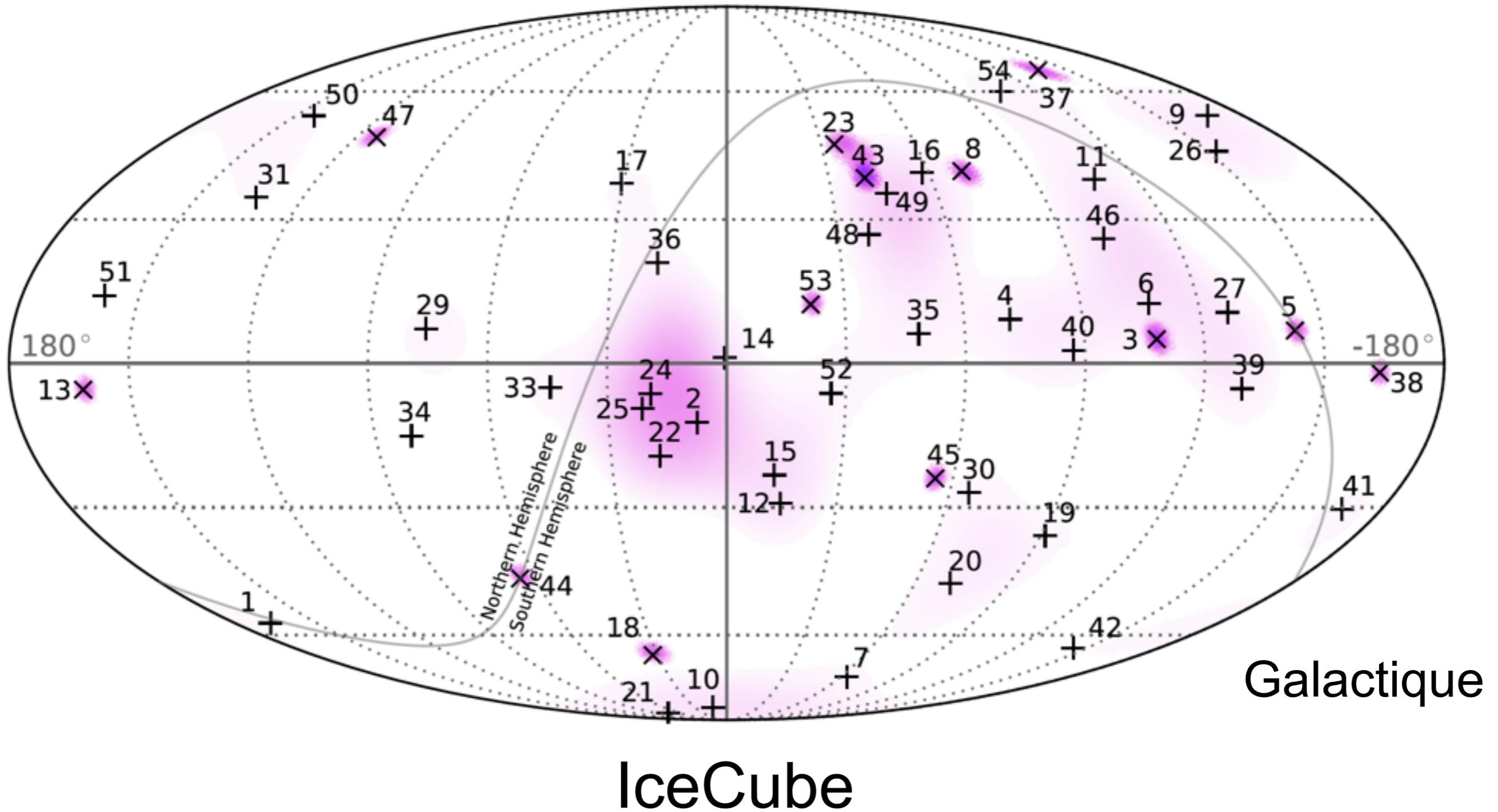


Le ciel vu en neutrinos de haute énergie

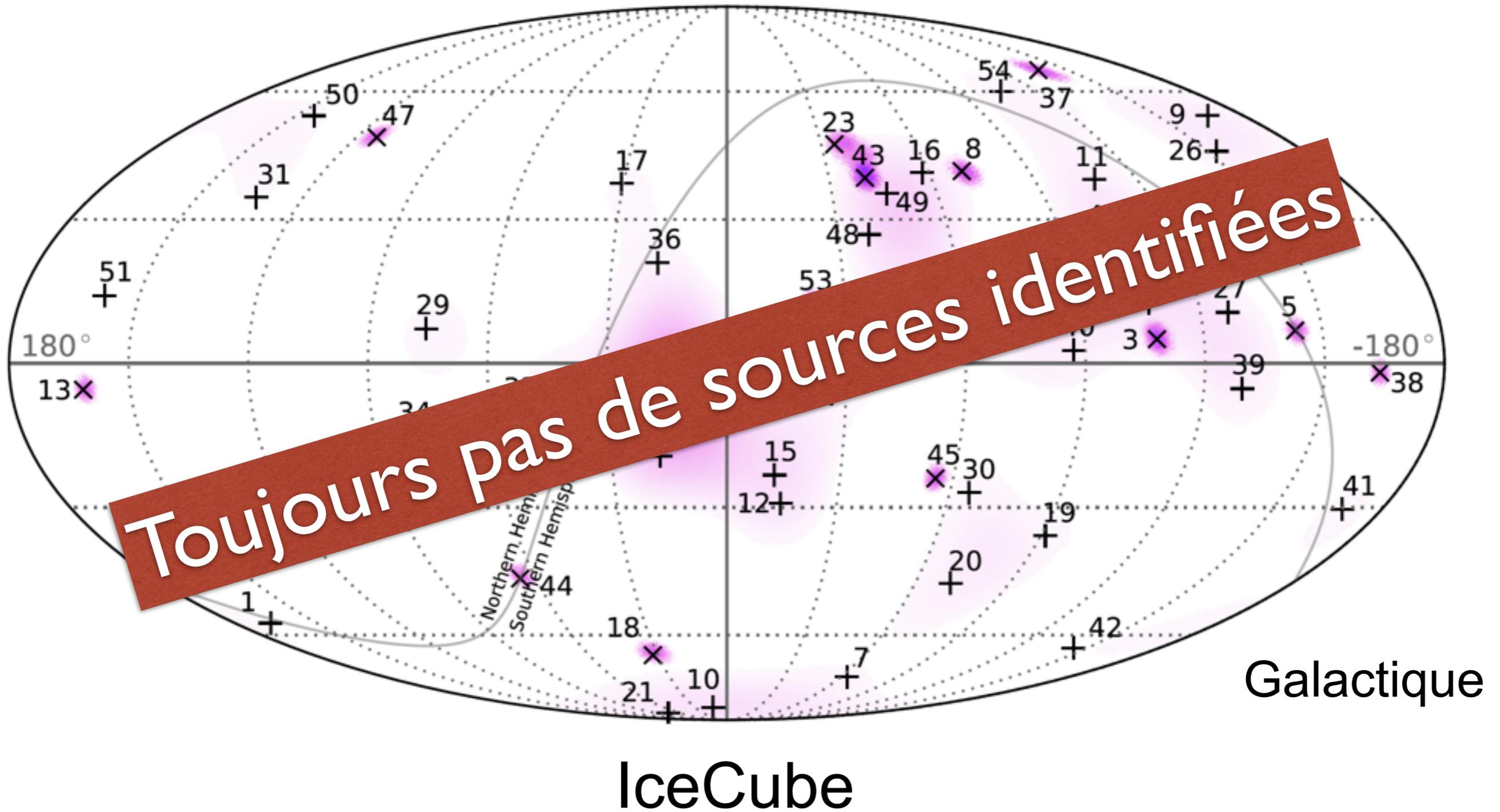


IceCube

Le ciel vu en neutrinos de haute énergie ($E \sim 100$ TeV)



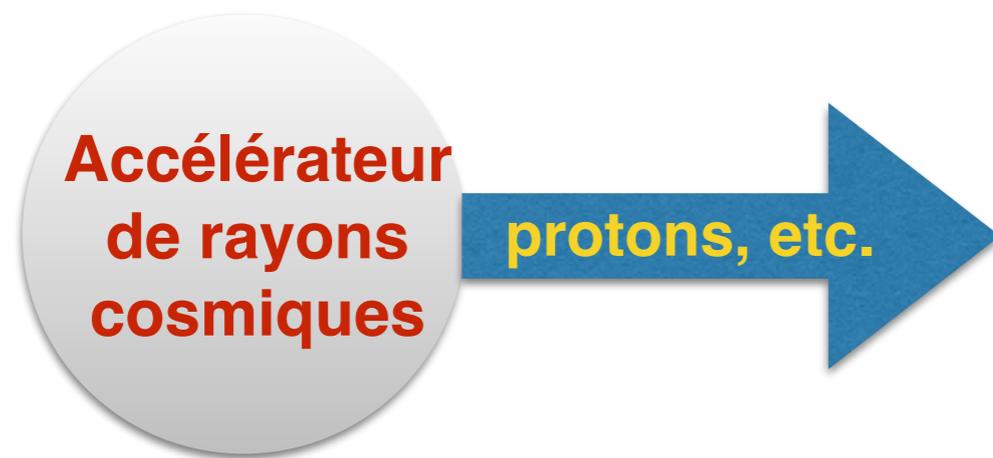
Le ciel vu en neutrinos de haute énergie ($E \sim 100$ TeV)



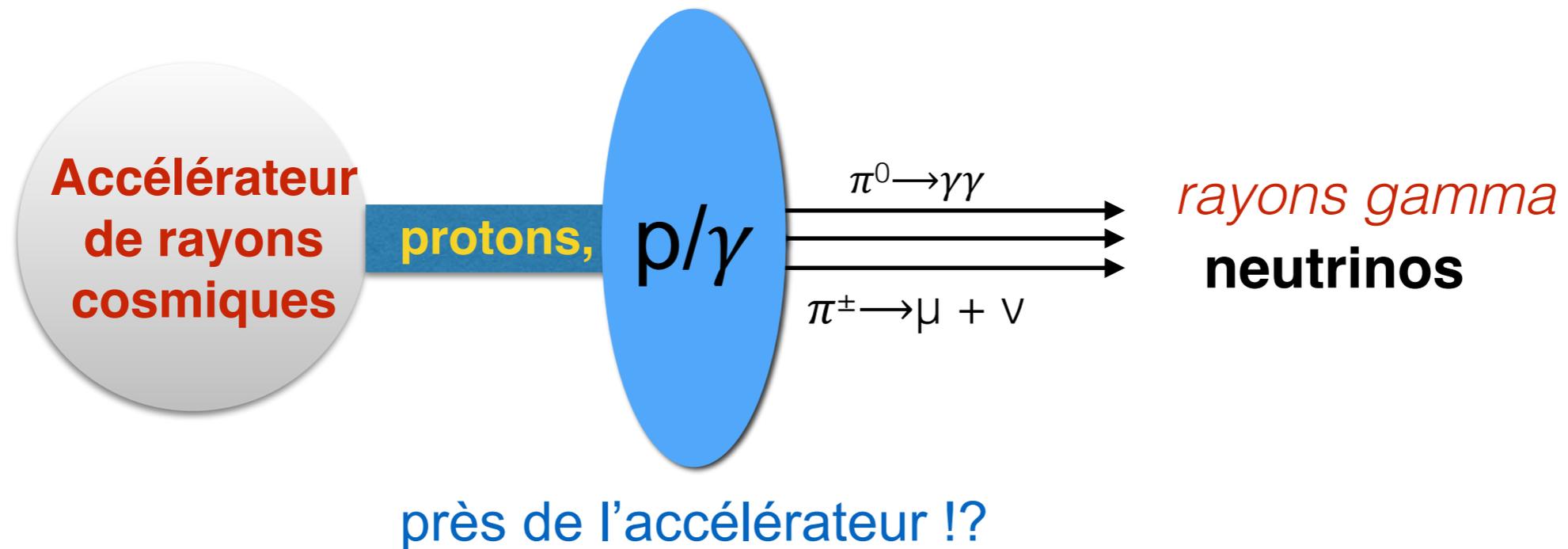
L'approche multi-messagers

- **Combiner des information (très souvent complémentaires) de plusieurs messagers de l'univers**

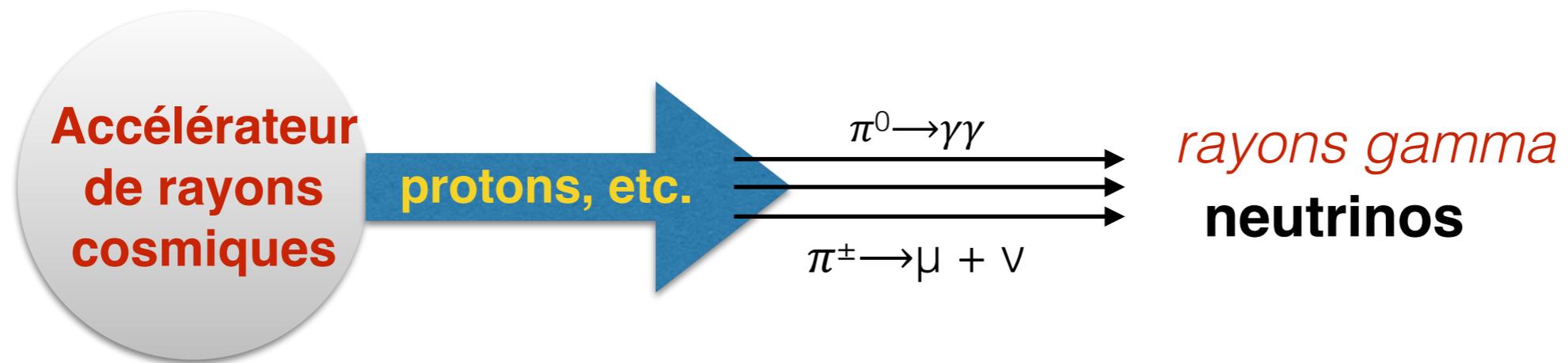
L'approche multi-messagers



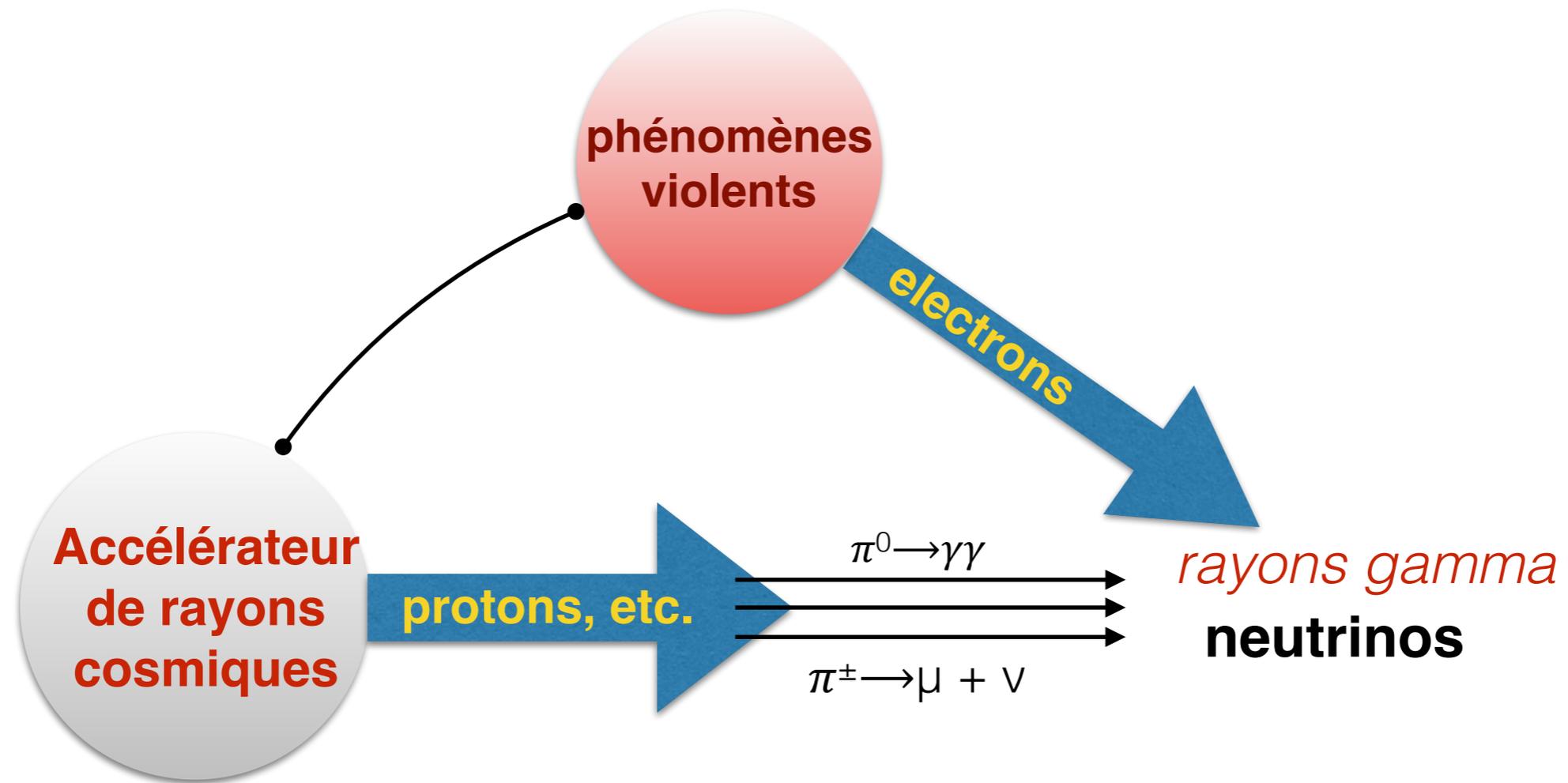
L'approche multi-messagers



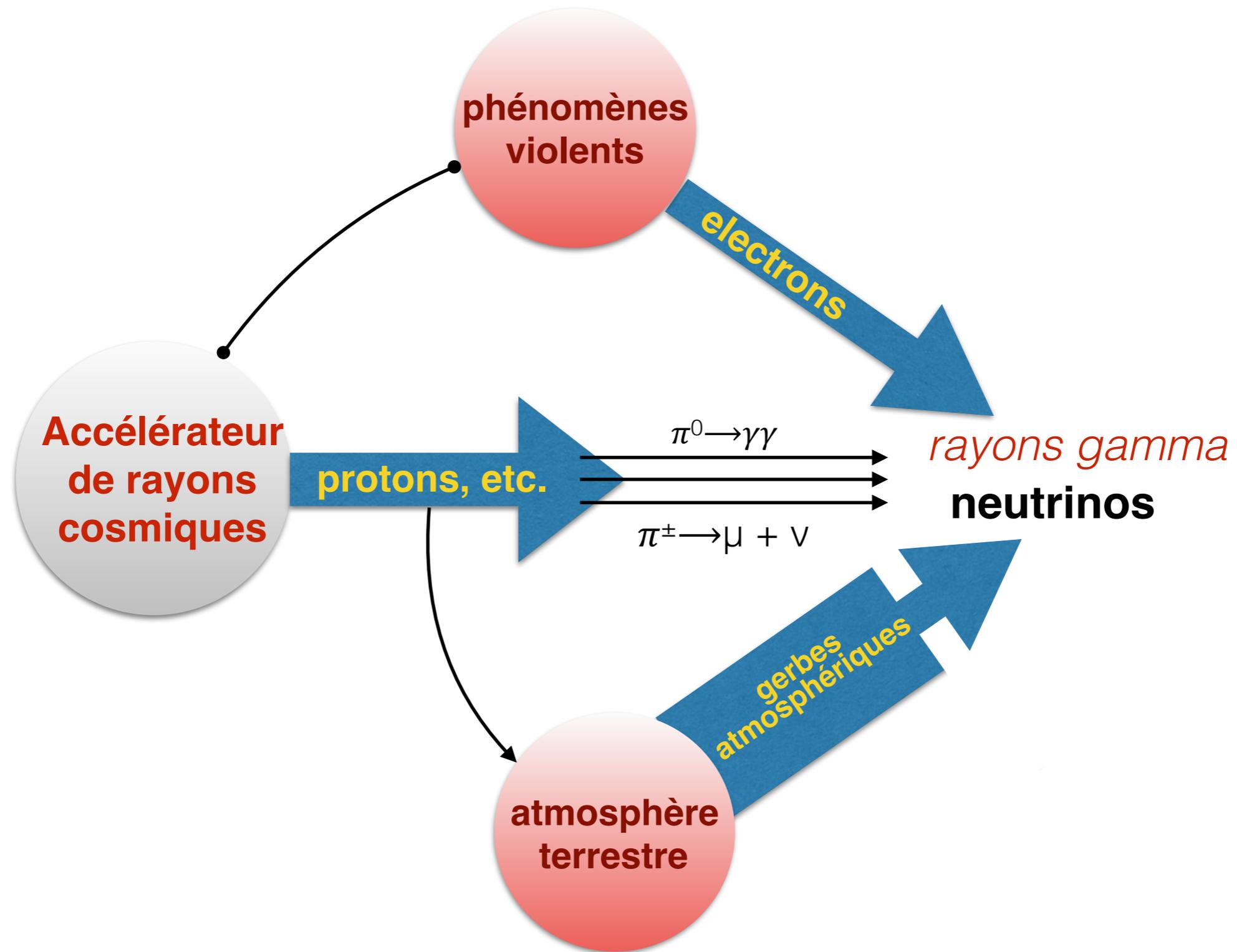
L'approche multi-messagers



L'approche multi-messagers



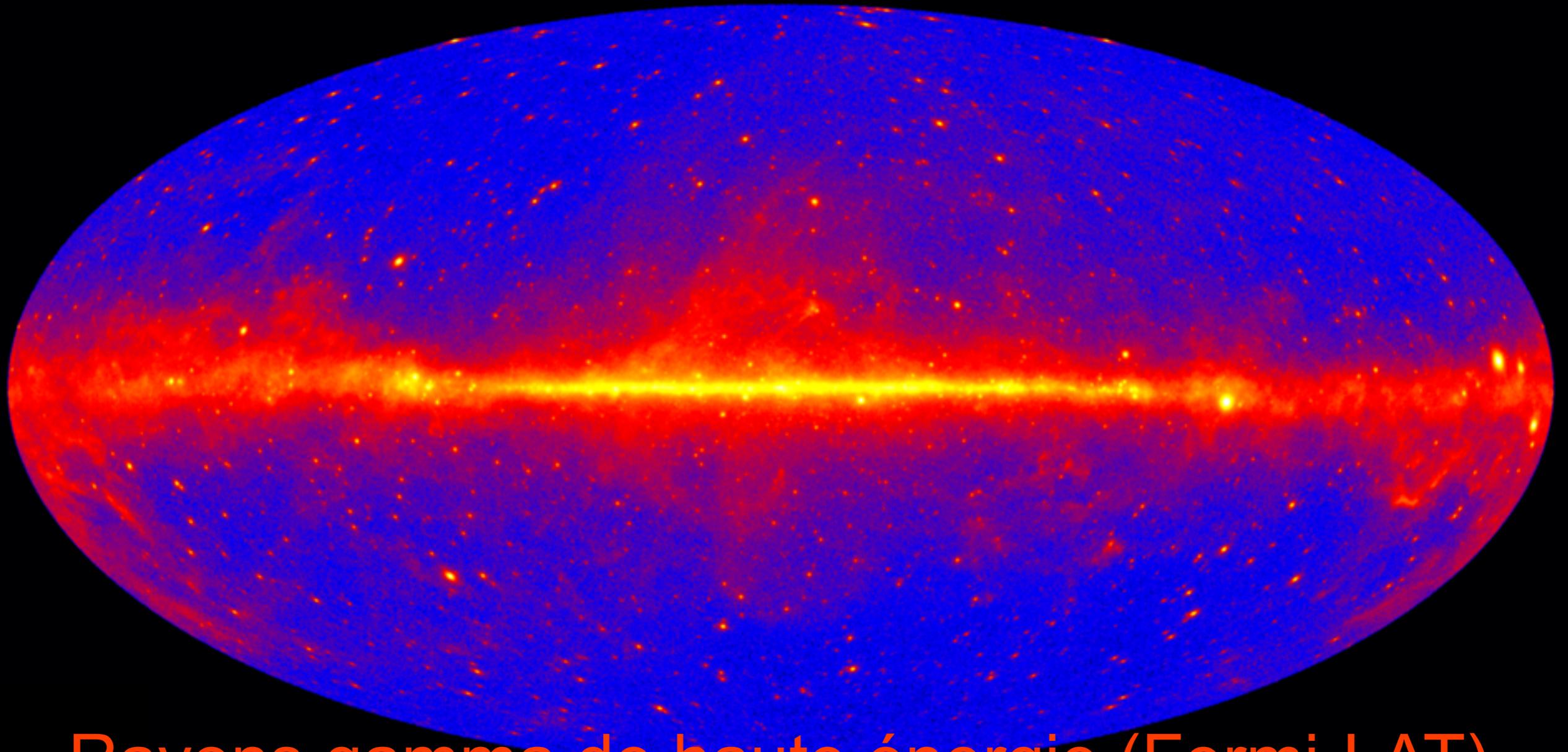
L'approche multi-messagers



L'approche multi-messagers

	Avantages	Inconvénients
Rayons gamma	détection facile localisation précise	origine incertaine propagation limitée
Neutrinos	origine connue (RCs) propagation illimitée	détection difficile localisation moyenne

L'approche multi-messagers



Rayons gamma de haute énergie (Fermi-LAT)

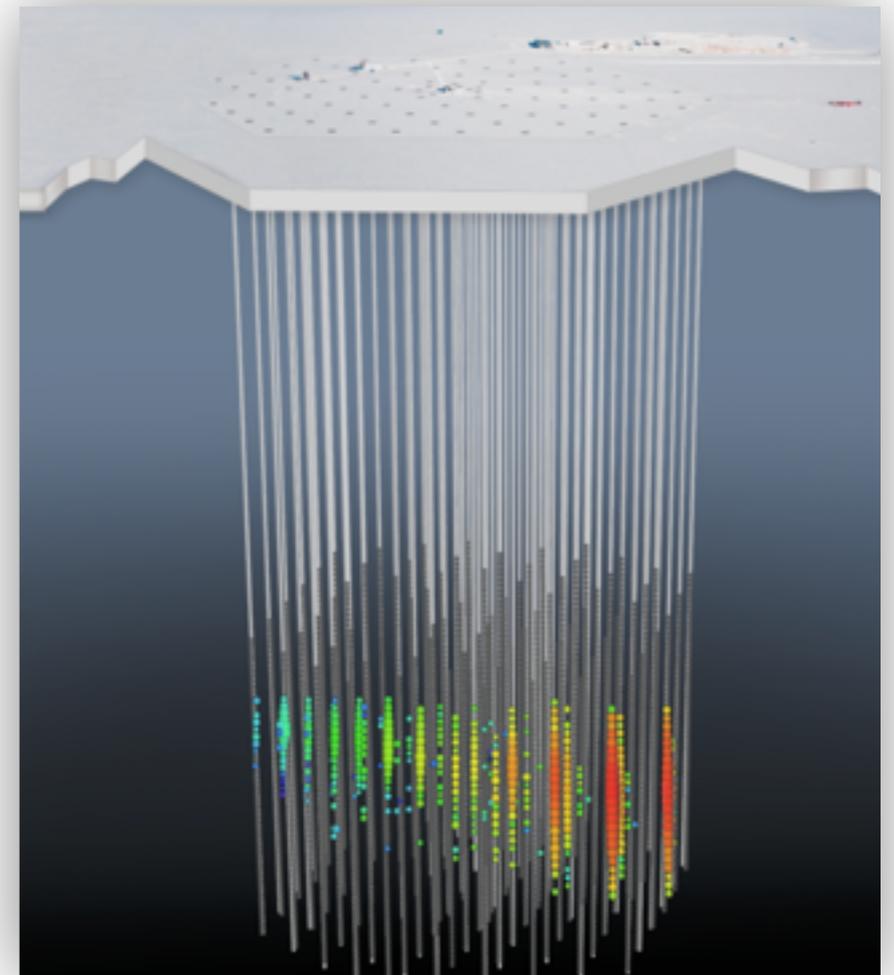
La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

- Le premier indice d'une source astrophysique de neutrinos de haute énergie
 - le premier indice d'une source de rayons cosmiques de haute énergie
- Publication (signé par ~1000 chercheurs d'une quinzaine d'expériences) publié le 13 Juillet 2018



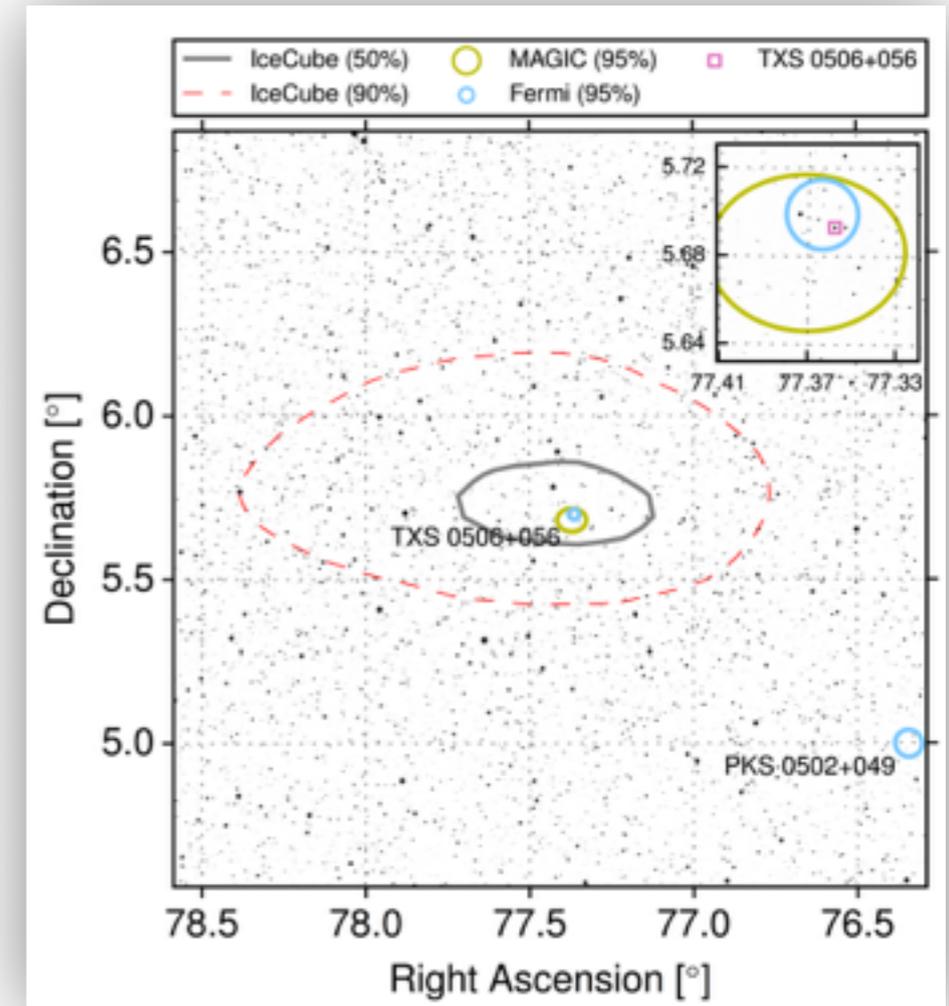
La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

- Le premier indice d'une source astrophysique de neutrinos de haute énergie
 - le premier indice d'une source de rayons cosmiques de haute énergie
- Publication (signé par ~1000 chercheurs d'une quinzaine d'expériences) publié le 13 Juillet 2018
- Détection d'un neutrino de haute énergie (~300 TeV) par IceCube: alerte automatique aux observatoires dans toutes les longueurs d'onde



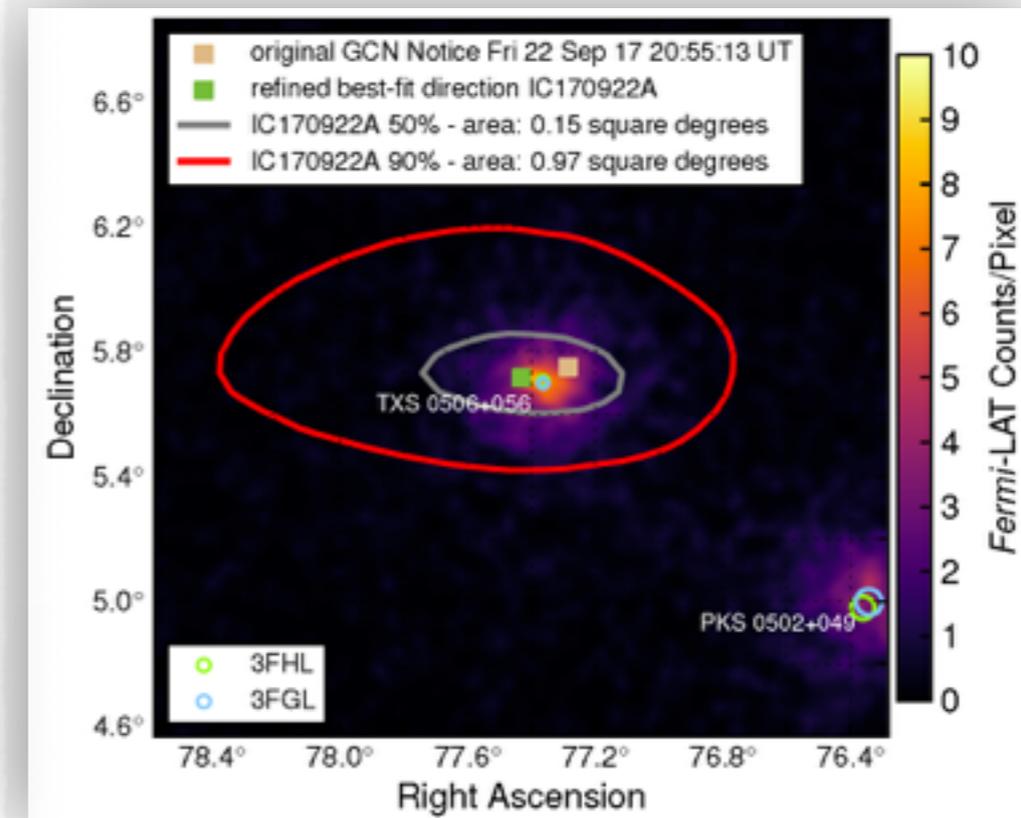
La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

- Le premier indice d'une source astrophysique de neutrinos de haute énergie
 - le premier indice d'une source de rayons cosmiques de haute énergie
- Publication (signé par ~1000 chercheurs d'une quinzaine d'expériences) publié le 13 Juillet 2018
- Détection d'un neutrino de haute énergie (~300 TeV) par IceCube: alerte automatique aux observatoires de toutes les longueurs d'onde
- Détection d'un blazar (noyau actif de galaxie possédant des jets de particules dirigés vers la Terre) dans la même direction



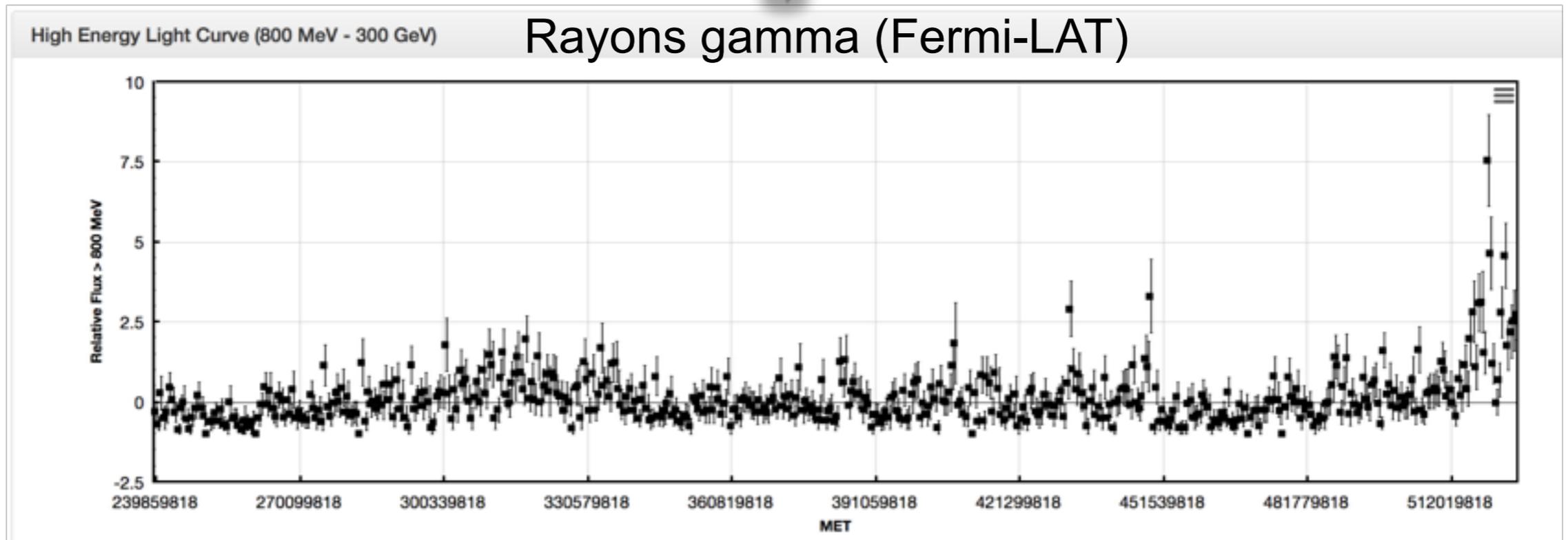
La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

- Le premier indice d'une source astrophysique de neutrinos de haute énergie
 - le premier indice d'une source de rayons cosmiques de haute énergie
- Publication (signé par ~1000 chercheurs d'une quinzaine d'expériences) publié le 13 Juillet 2018
- Détection d'un neutrino de haute énergie (~300 TeV) par IceCube: alerte automatique aux observatoires dans toutes les longueurs d'onde
- Détection d'un blazar (noyau actif de galaxie possédant des jets de particules dirigés vers la Terre) dans la même direction
- Détection d'une activité (visible - rayons X - rayons gamma) sans précédent du blazar pendant plusieurs semaines autour du temps d'arrivée du blazar

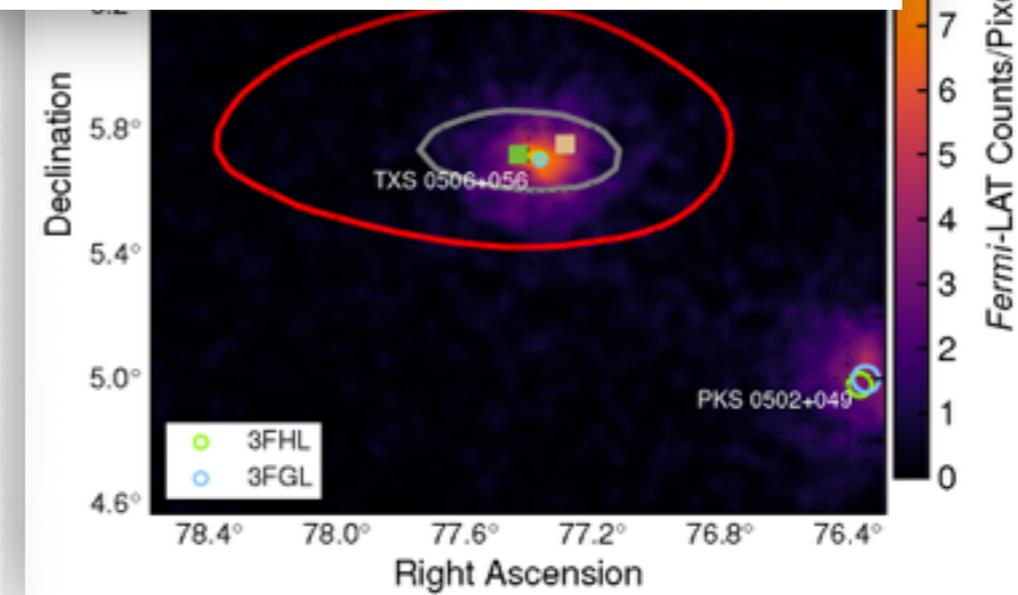


La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

- L
- F
- p
- D
- (
- a
- C

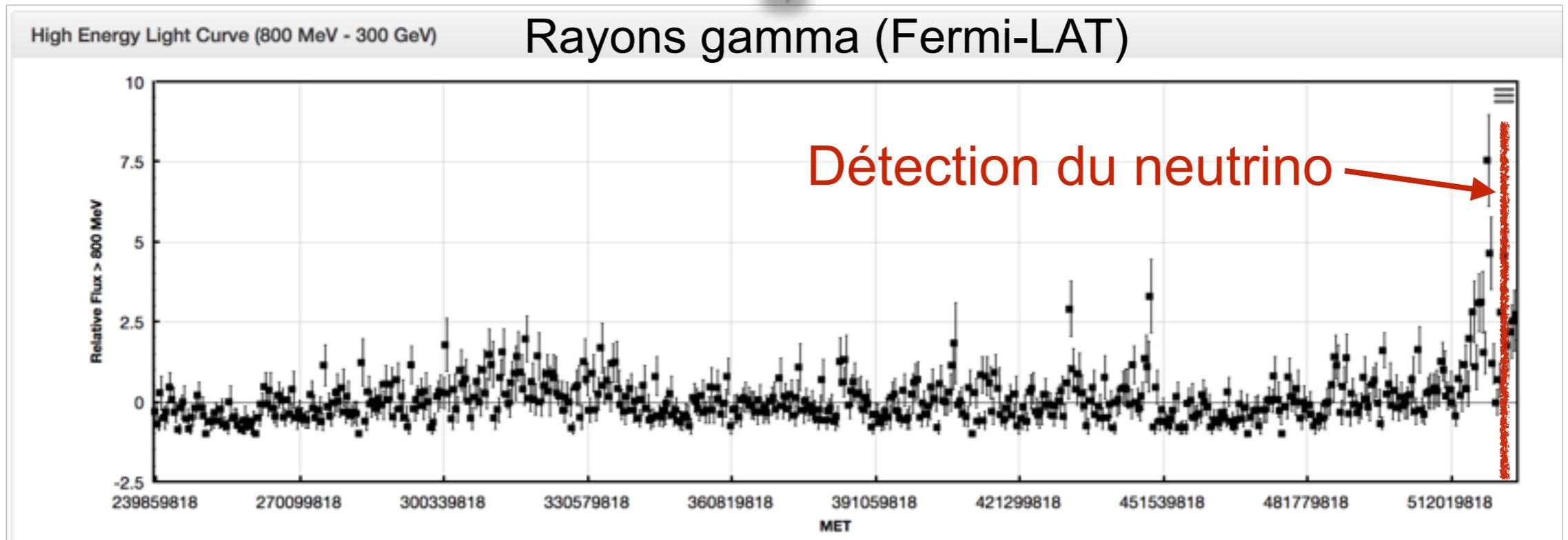


- Détection d'un blazar (noyau actif de galaxie possédant des jets de particules dirigés vers la Terre) dans la même direction
- Détection d'une activité (visible - rayons X - rayons gamma) sans précédent du blazar pendant plusieurs semaines autour du temps d'arrivée du blazar

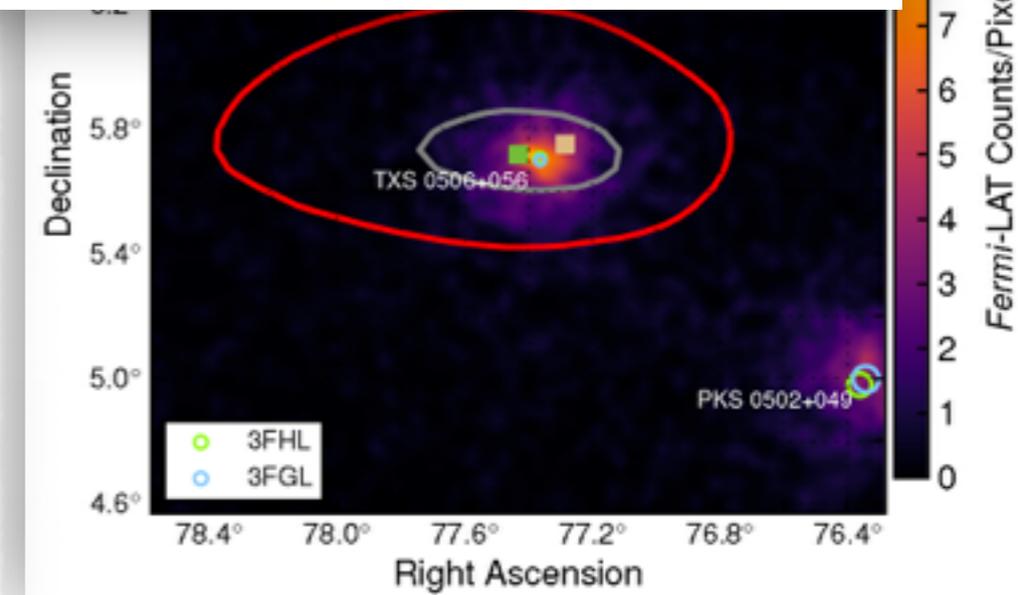


La deuxième révolution de 2017: IceCube-170922A

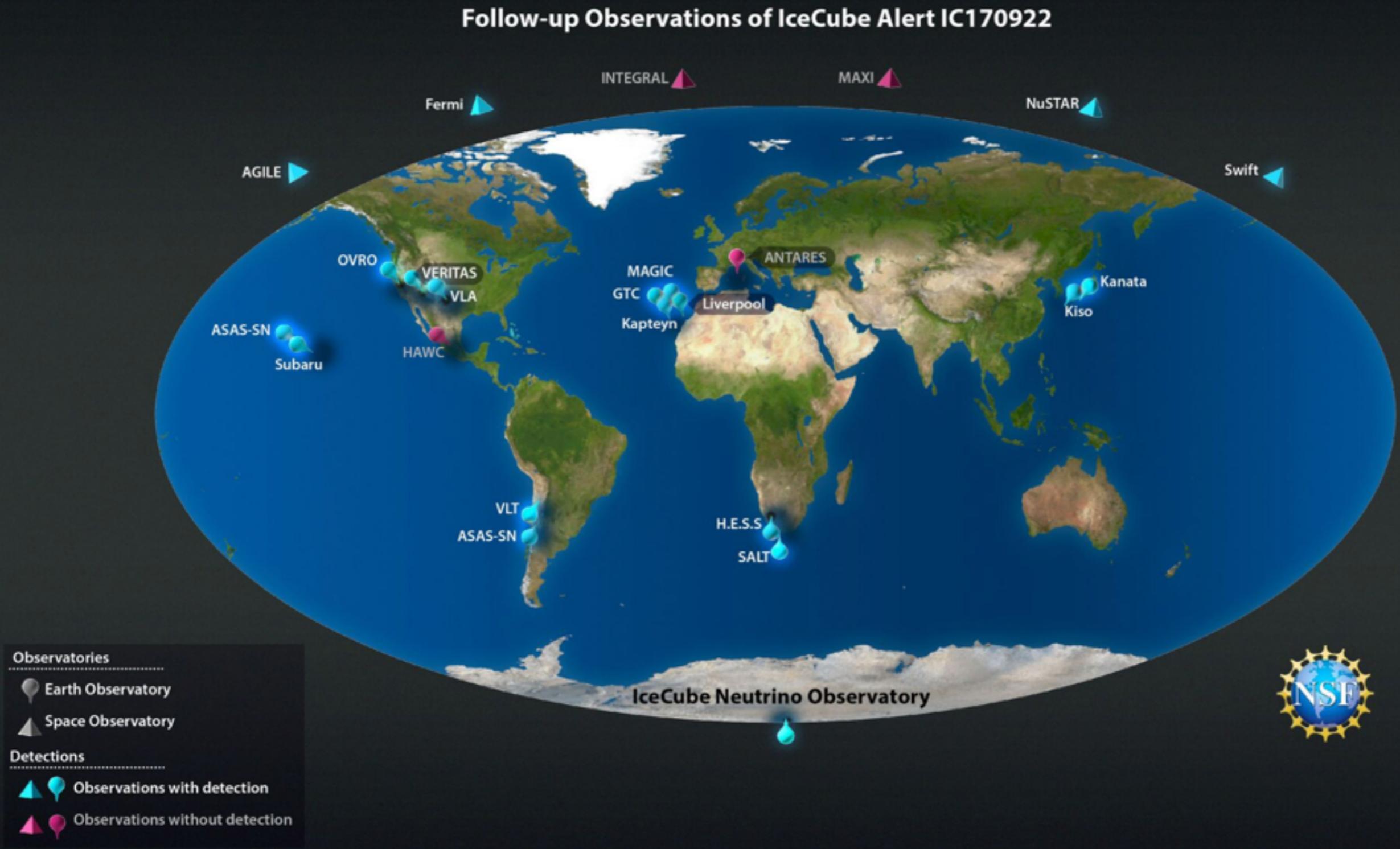
- L
- F
- p
- D
- (
- a
- C



- Détection d'un blazar (noyau actif de galaxie possédant des jets de particules dirigés vers la Terre) dans la même direction
- Détection d'une activité (visible - rayons X - rayons gamma) sans précédent du blazar pendant plusieurs semaines autour du temps d'arrivée du blazar



Une campagne d'observation mondiale



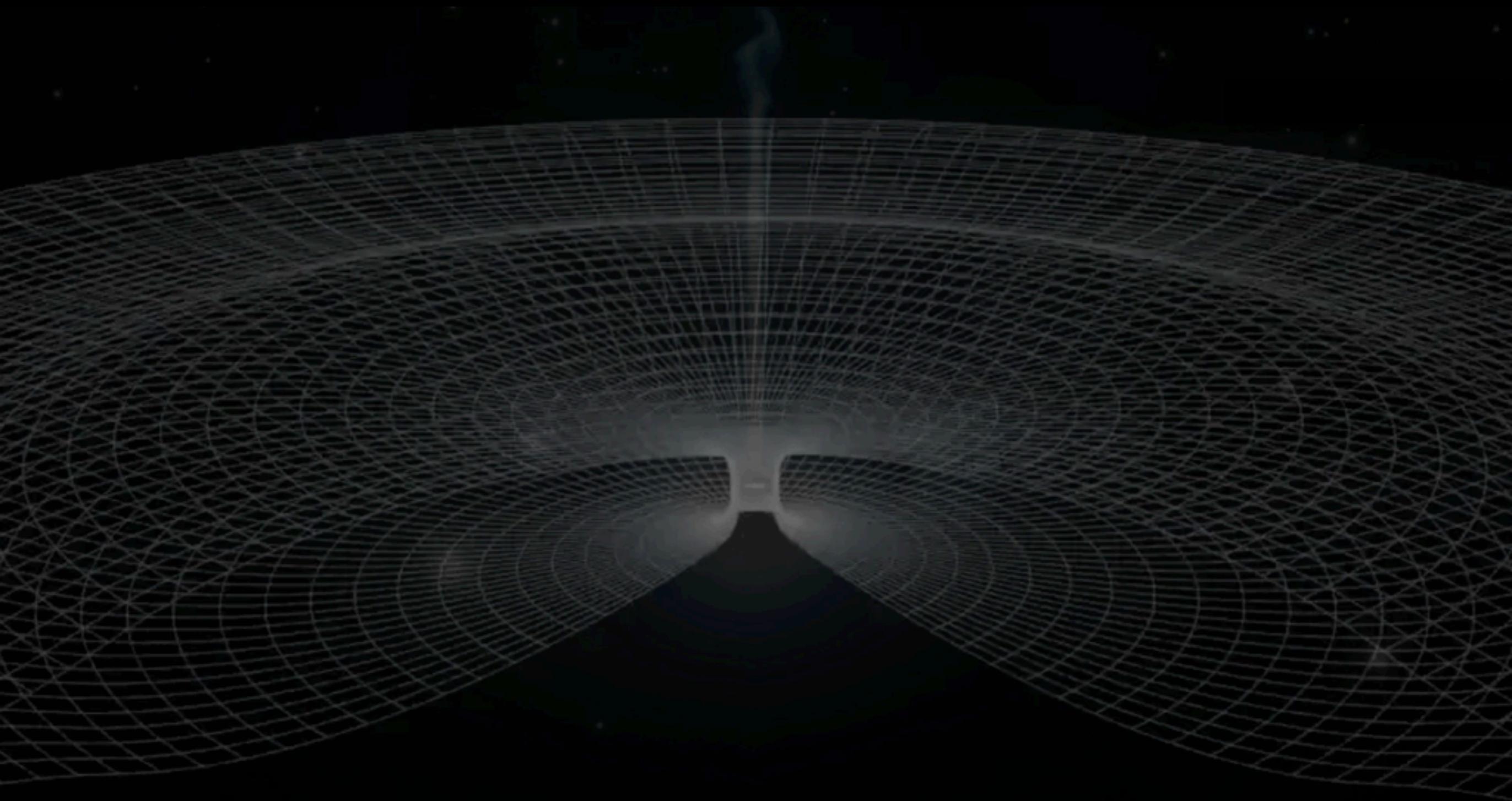
Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine...
plus exactement: 3.7 milliards d'années de lumière ($z=0.3365 \pm 0.0010$)



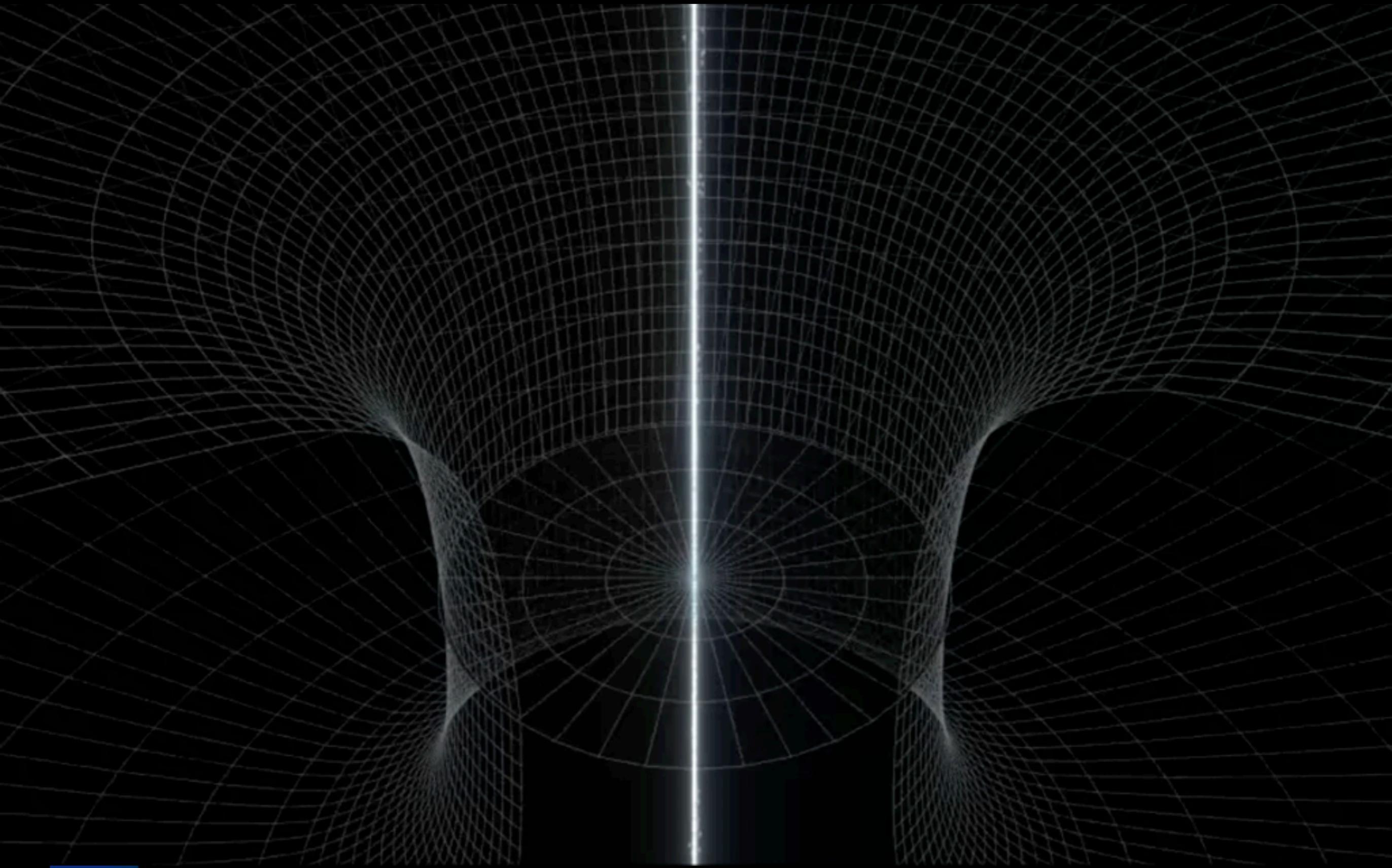
Une galaxie active, émettant des jets de matière



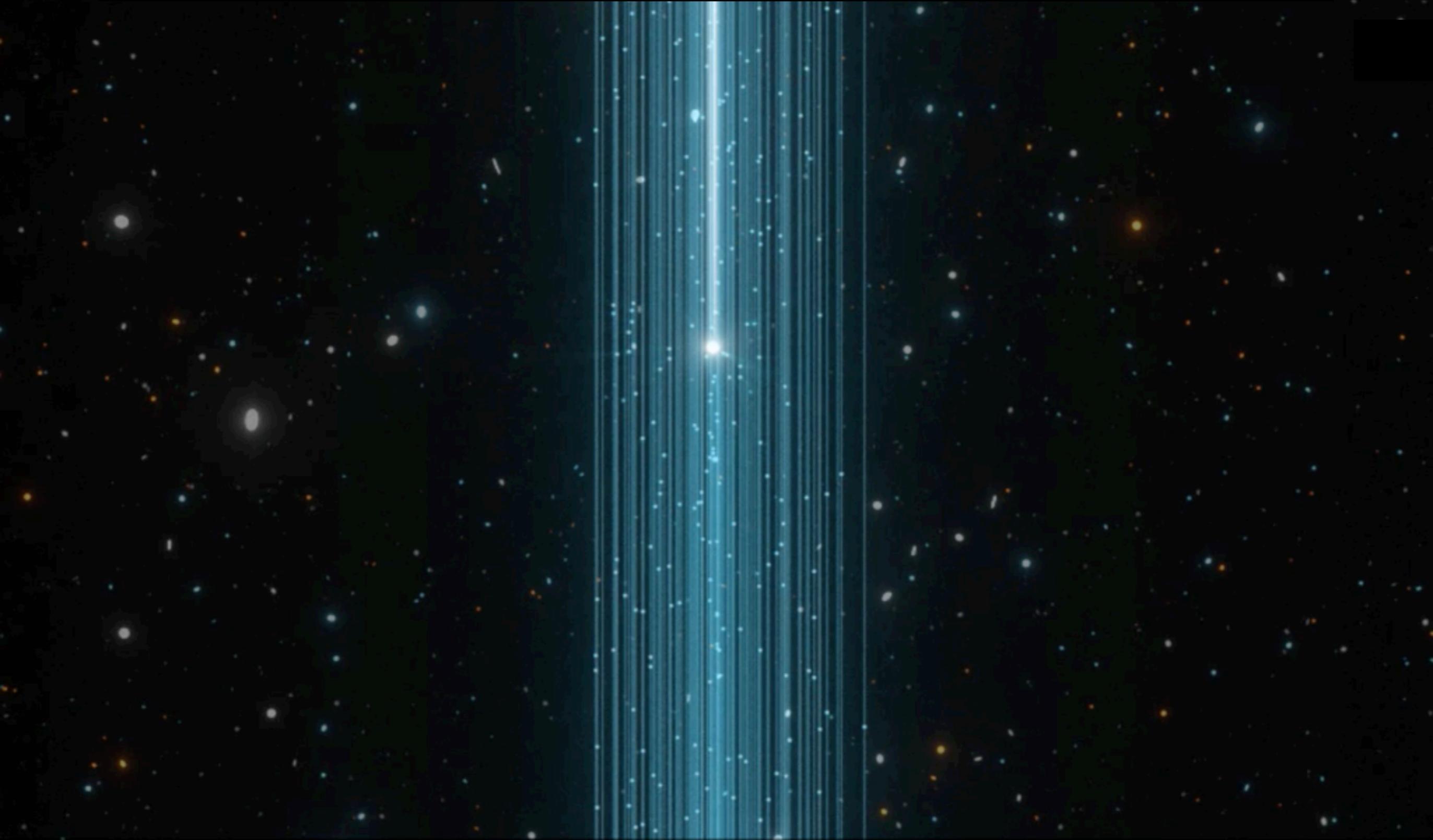
A l'origine: un trou noir supermassif au centre de la galaxie



Les jets contiennent des particules à très haute énergie



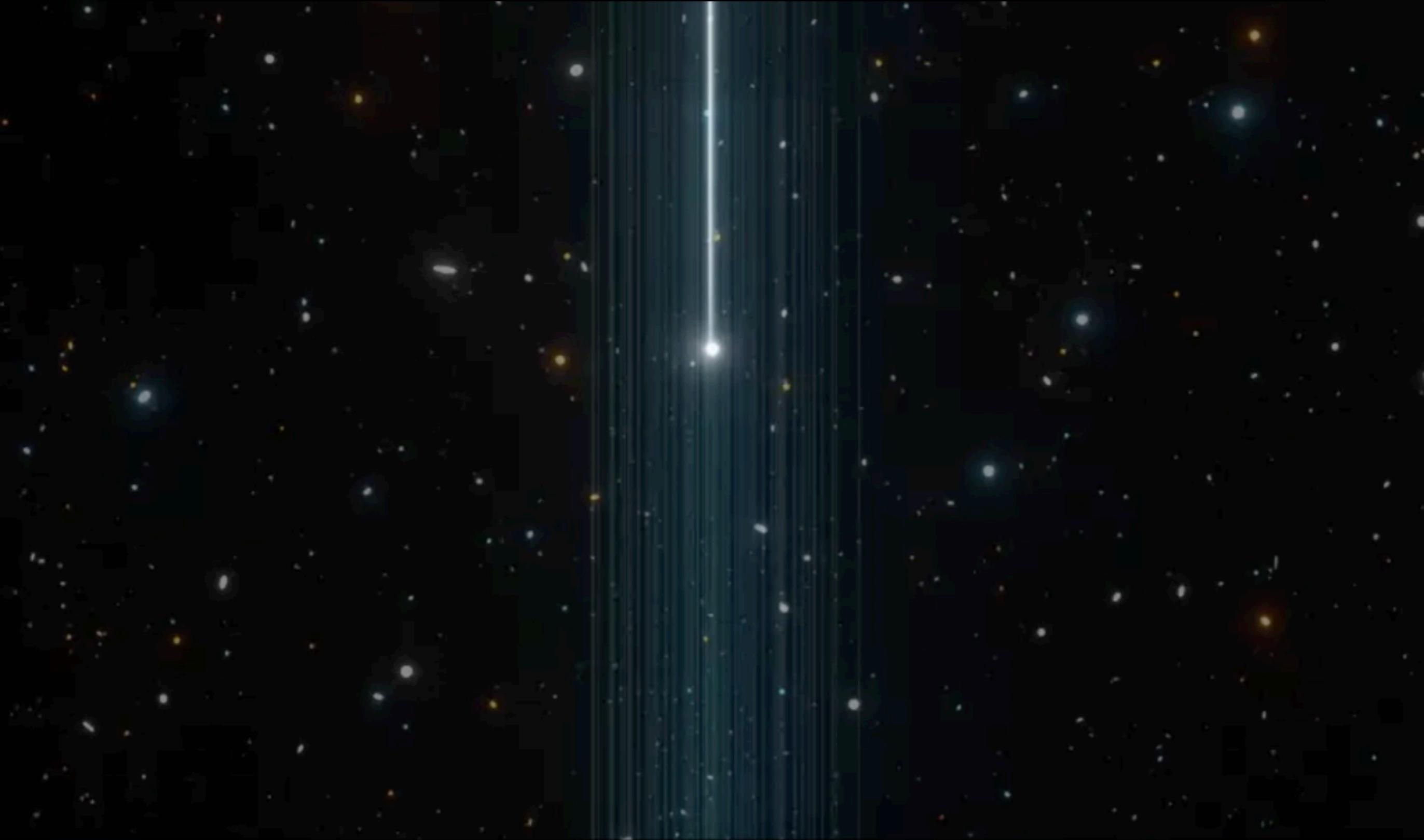
Les protons du rayonnement cosmique sont déviés par les champs magnétiques



Une fraction des rayons gamma perdent leur énergie (par interaction avec la lumière du fond extragalactique)

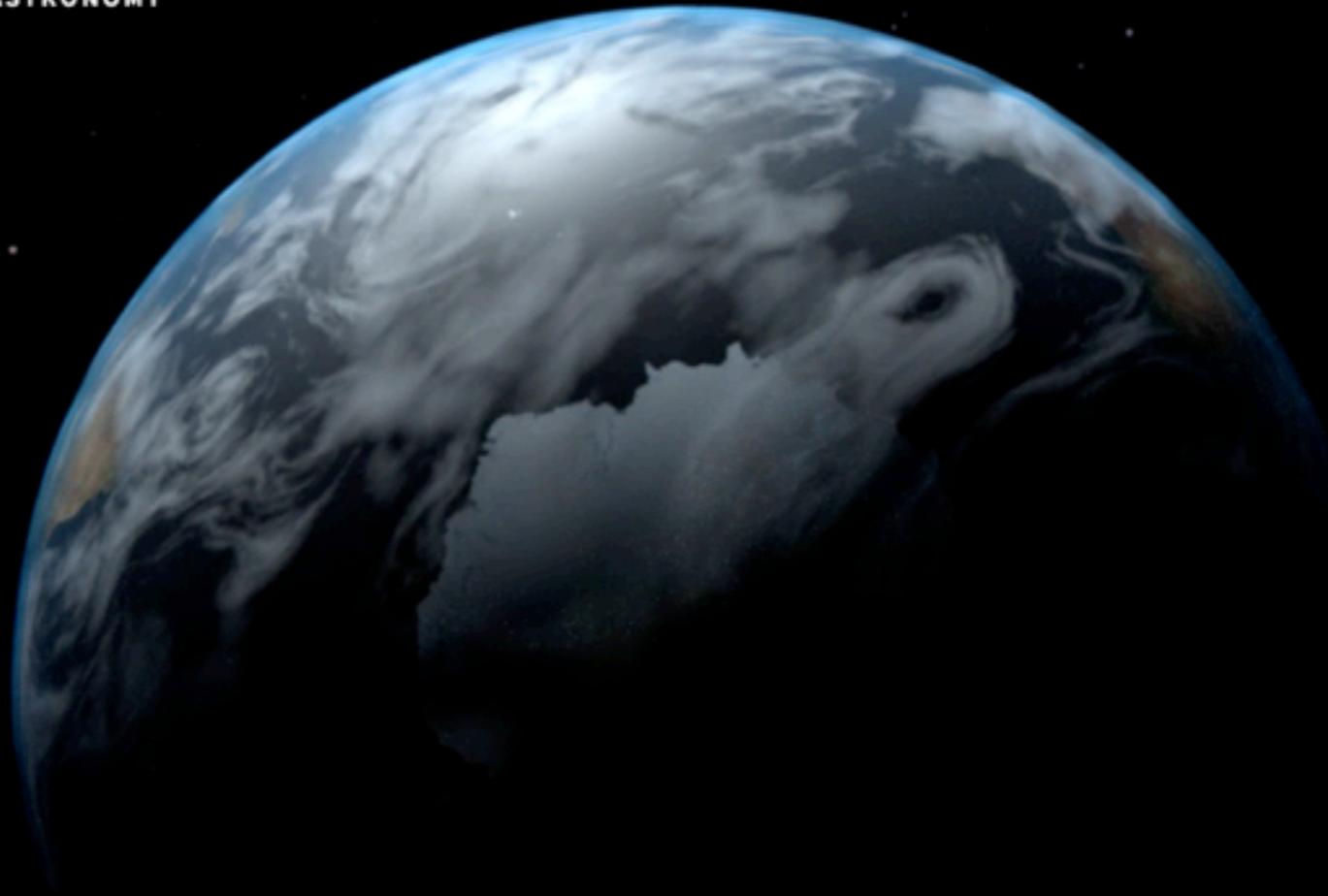


Les neutrinos oscillent entre plusieurs saveurs (mais gardent leur énergie et leur direction)



3,7 milliards d'année plus tard: le faisceau arrive sur Terre

MULTIMESSENGER ASTRONOMY



Un seul des neutrinos interagit avec la glace du Pole Sud: l'événement IceCube-170922A

MULTIMESSENGER ASTRONOMY



Les rayons gamma du faisceau sont enregistrés par le satellite Fermi
→ localisation de leur source: TXS 0506+056

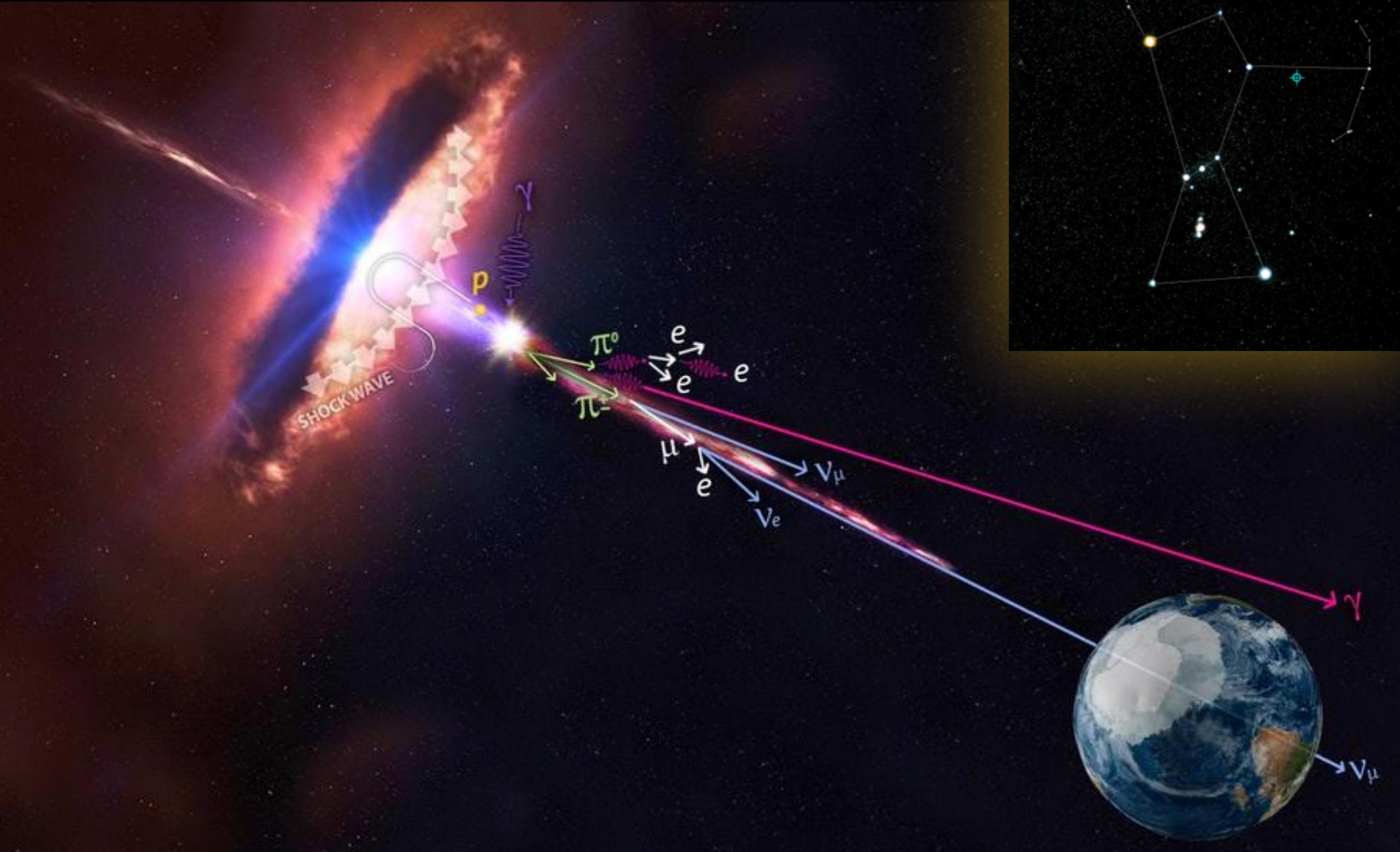
MULTIMESSENGER ASTRONOMY



Des rayons gamma de très haute énergie sont détectés
→ TXS 0506+056 est un accélérateur de particules



Le premier accélérateur de rayons cosmiques de très haute énergie?
TXS 0506+056 (sous le bras d'orion) est un très bon candidat
mais: probabilité de corrélation par hasard $\sim 1/1000$



Conclusions

- Les neutrinos sont produits dans des interactions nucléaires
 - Ils nous apportent des indications sur les sources du rayonnement cosmique
- Leur détection est difficile et nécessite des instruments pharamineux (dans les lacs profonds, les océans et dans la glace de l'Antarctique)
- Les neutrinos sont les seules particules qui peuvent traverser la Terre
 - Les télescopes à neutrinos regardent le ciel à travers la Terre
- La détection d'un blazar en activité émettant en même temps des neutrinos et de la lumière à toutes les longueurs d'ondes jusqu'aux rayons gamma de très haute énergie est un premier indice sur les sources du rayonnement cosmique
- Début de l'ère de l'astrophysique multi-messager avec les neutrinos



Conclusions

Quel est le message apporté par les neutrinos ?

- Ils nous apportent des indications sur les sources du rayonnement cosmique
- Leur détection est difficile et dans des interactions nucléaires (dans les lacs profonds, les océans et dans la glace de l'Antarctique)
- Les neutrinos sont les seules particules qui peuvent traverser la Terre

Quel est le point commun entre le lac Baikal, l'Antarctique et la Côte d'Azur

Pourquoi est-ce qu'on regarde vers le bas pour observer le ciel?

- La détection d'un blazar en activité émettant en même temps des neutrinos et de la lumière à toutes les longueurs d'ondes jusqu'aux rayons gamma de très haute énergie est un premier indice sur les sources du rayonnement cosmique

Qu'est-ce qu'un blazar?

- Début de l'ère de l'astrophysique multi-messagers

Qu'est que TXS 0506+056?



MERCI

LIST OF PARTIES INVOLVED

Observatories:

IceCube
MAGIC
H.E.S.S.
VERITAS
HAWC
ASAS-SN
The Liverpool Telescope
Kanata-Telescope
Kiso Observatory
SALT
Subaru
Very Large Telescope
Karl G. Jansky Very Large Array (VLA)
ANTARES

Satellites:

Fermi Gamma-ray Space Telescope
Neil Gehrels Swift Observatory
NuSTAR
AGILE
Integral

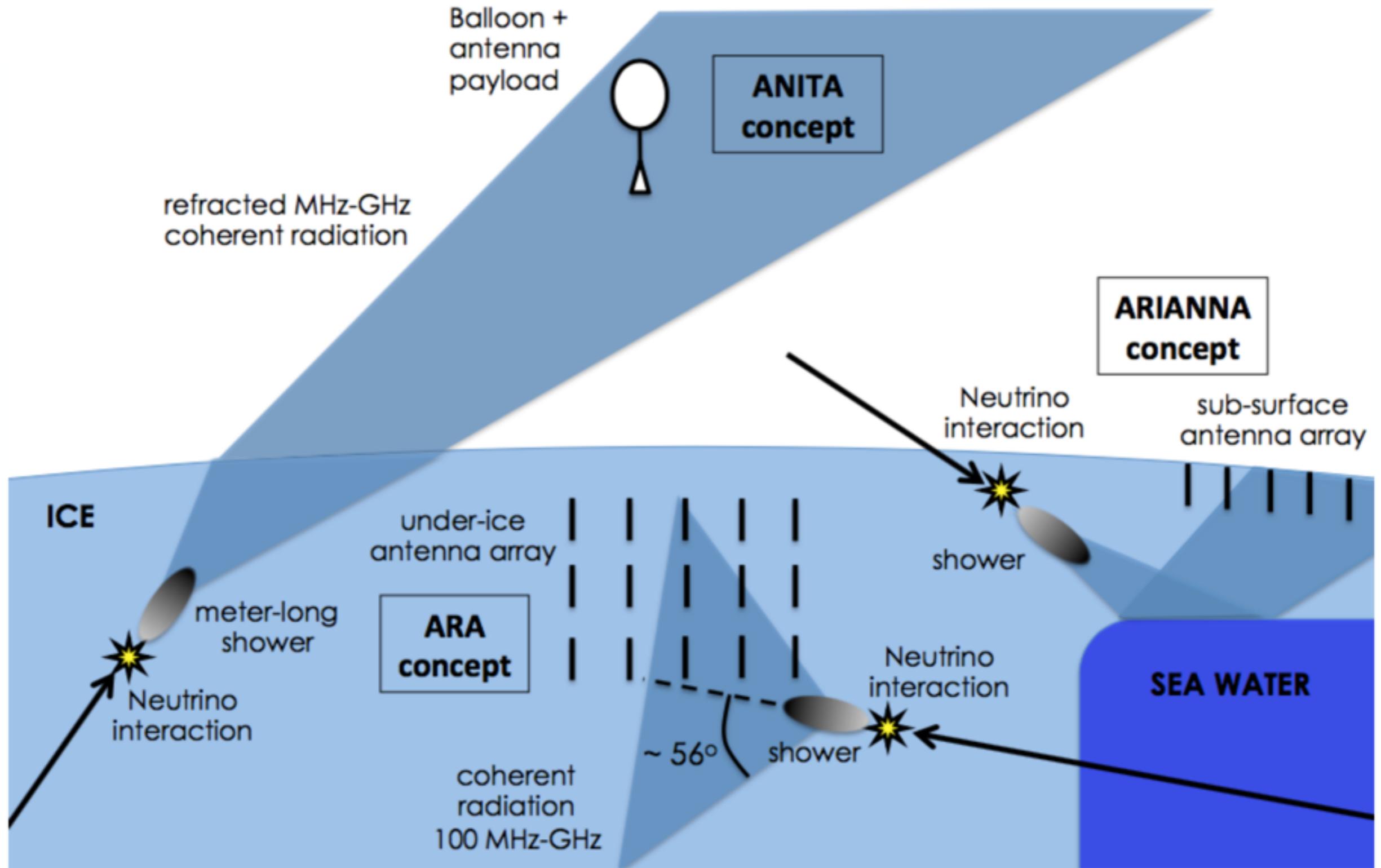
Ch. Spiering (flux des neutrinos)
Th. Stolarczyk (animation sources neutrinos)
Les défis du CEA (effet Cherenkov)

CREDITS

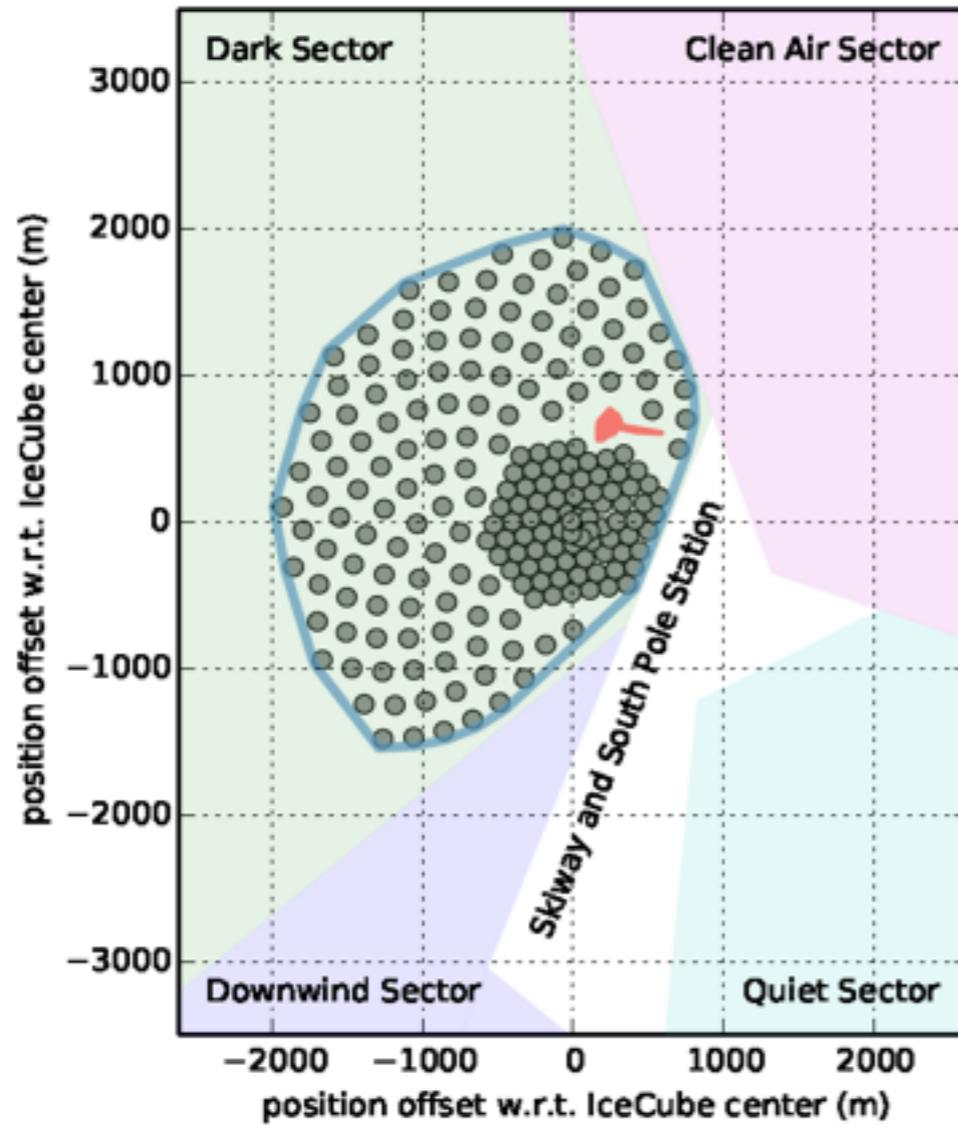
Developed by: Science Communication Lab
Scientific advice: Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY



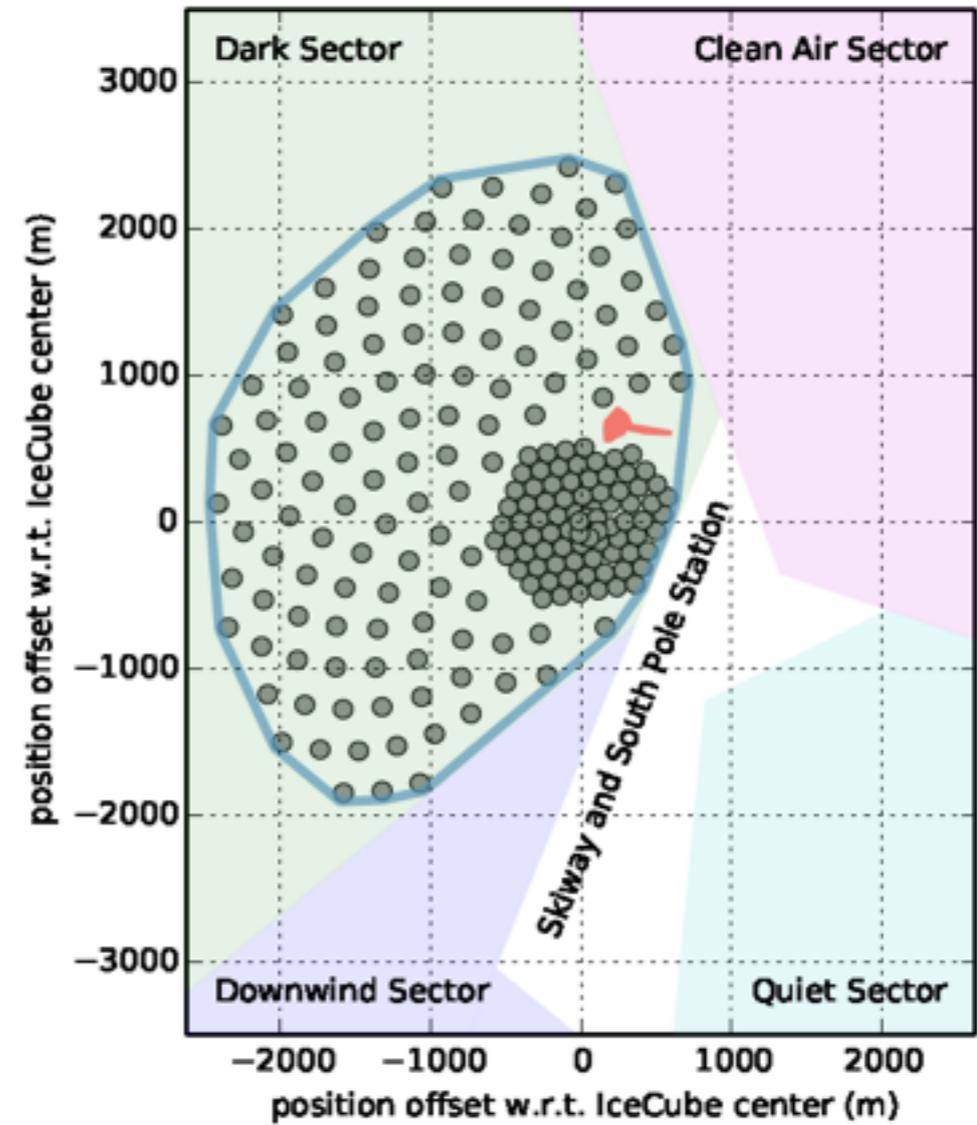
Astronomie neutrino: détection radio



IceCube-Gen2

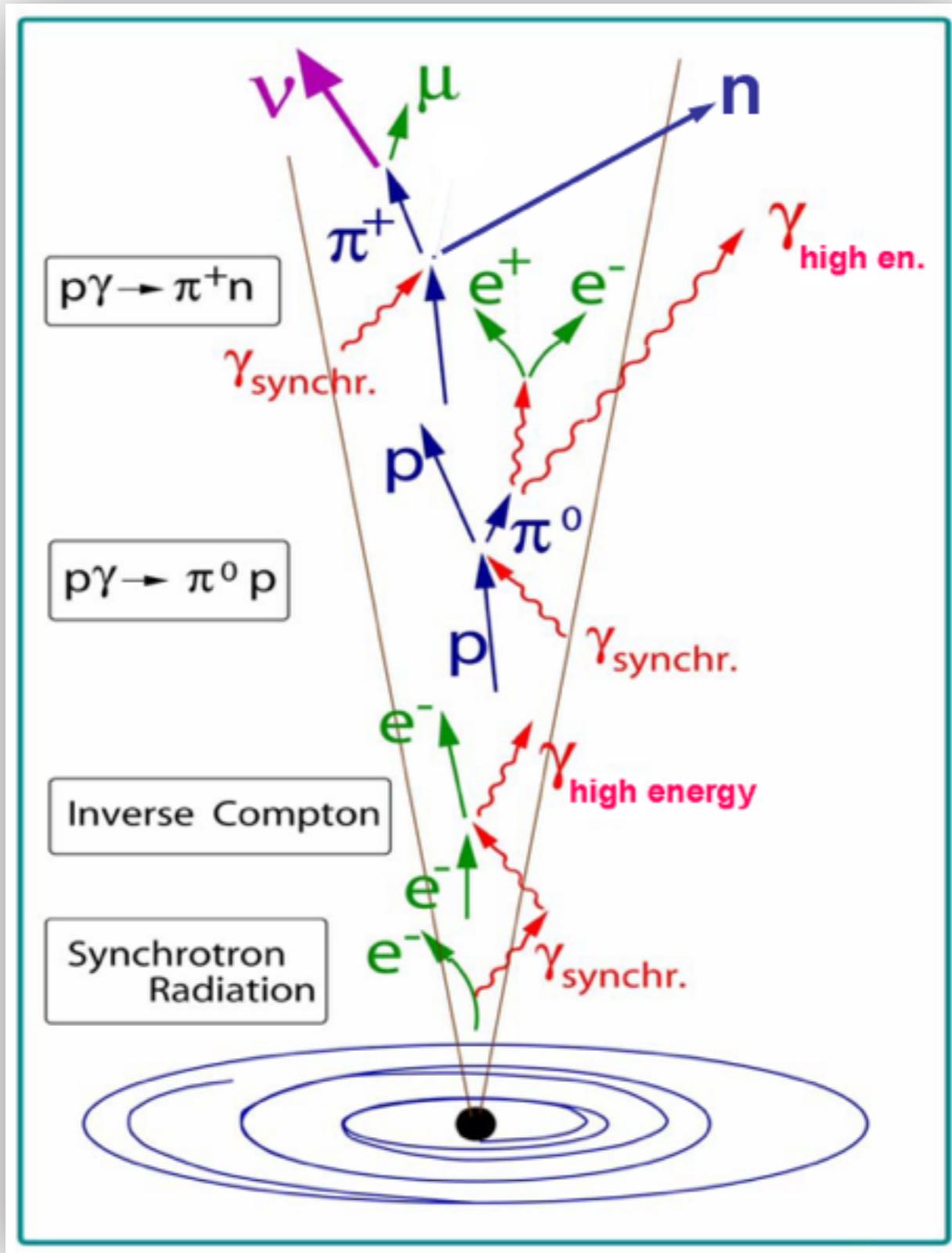


(a) 240 m string spacing (“benchmark”)



(b) 300 m string spacing

IceCube: 125m entre les lignes



Le lien entre neutrinos et rayons gamma

