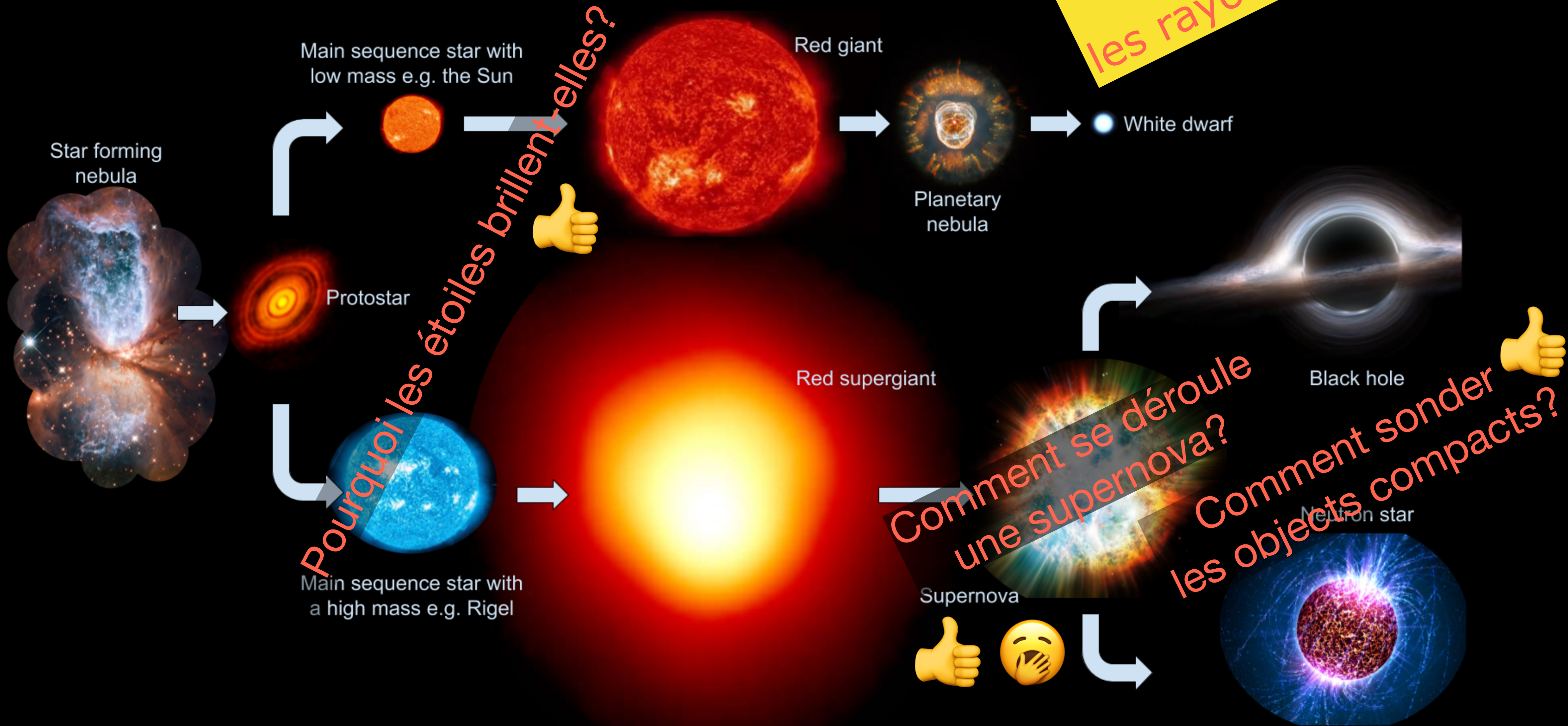


Astroparticules et Neutrinos

Neutrinos de haute énergie et multi-messenger

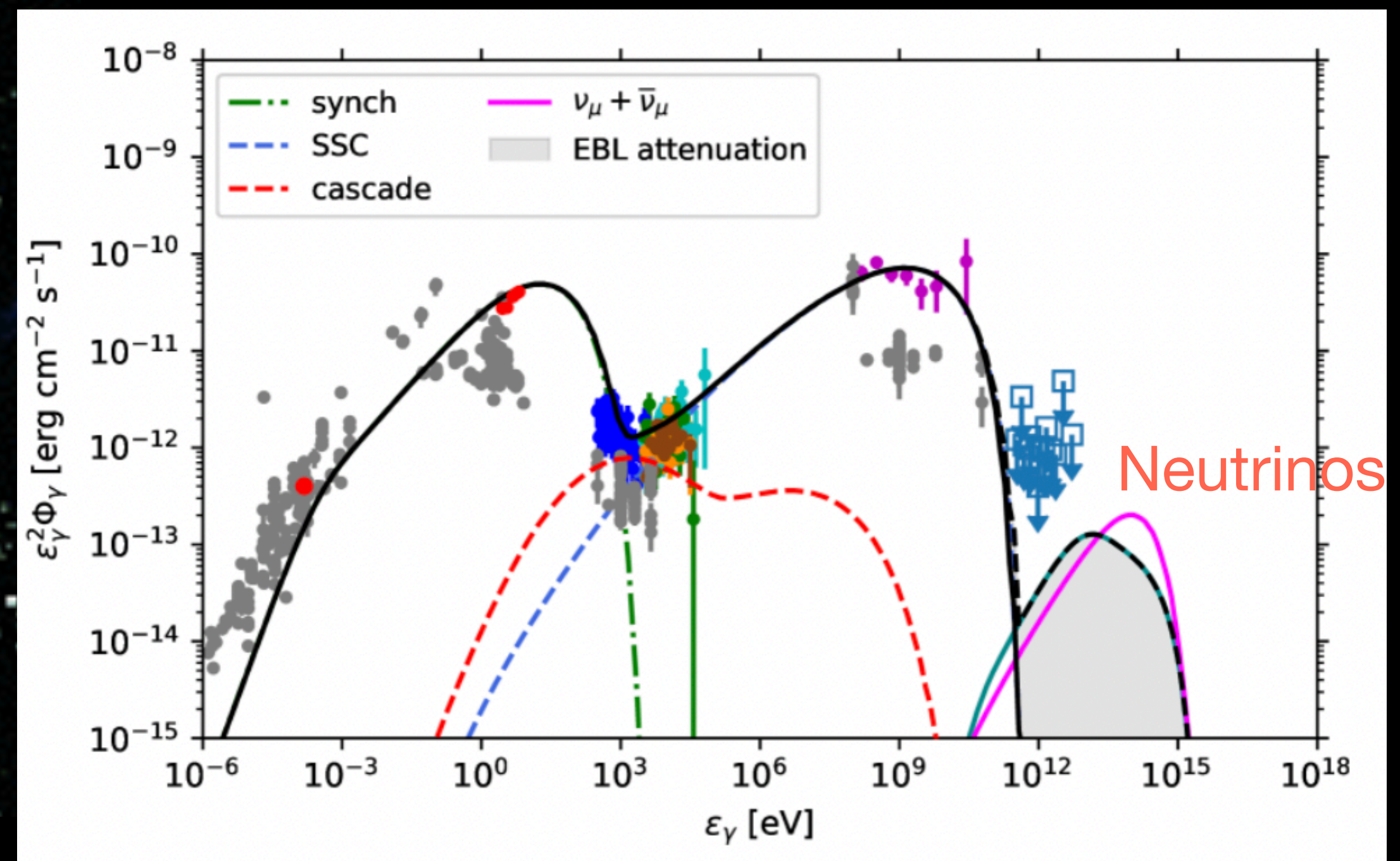
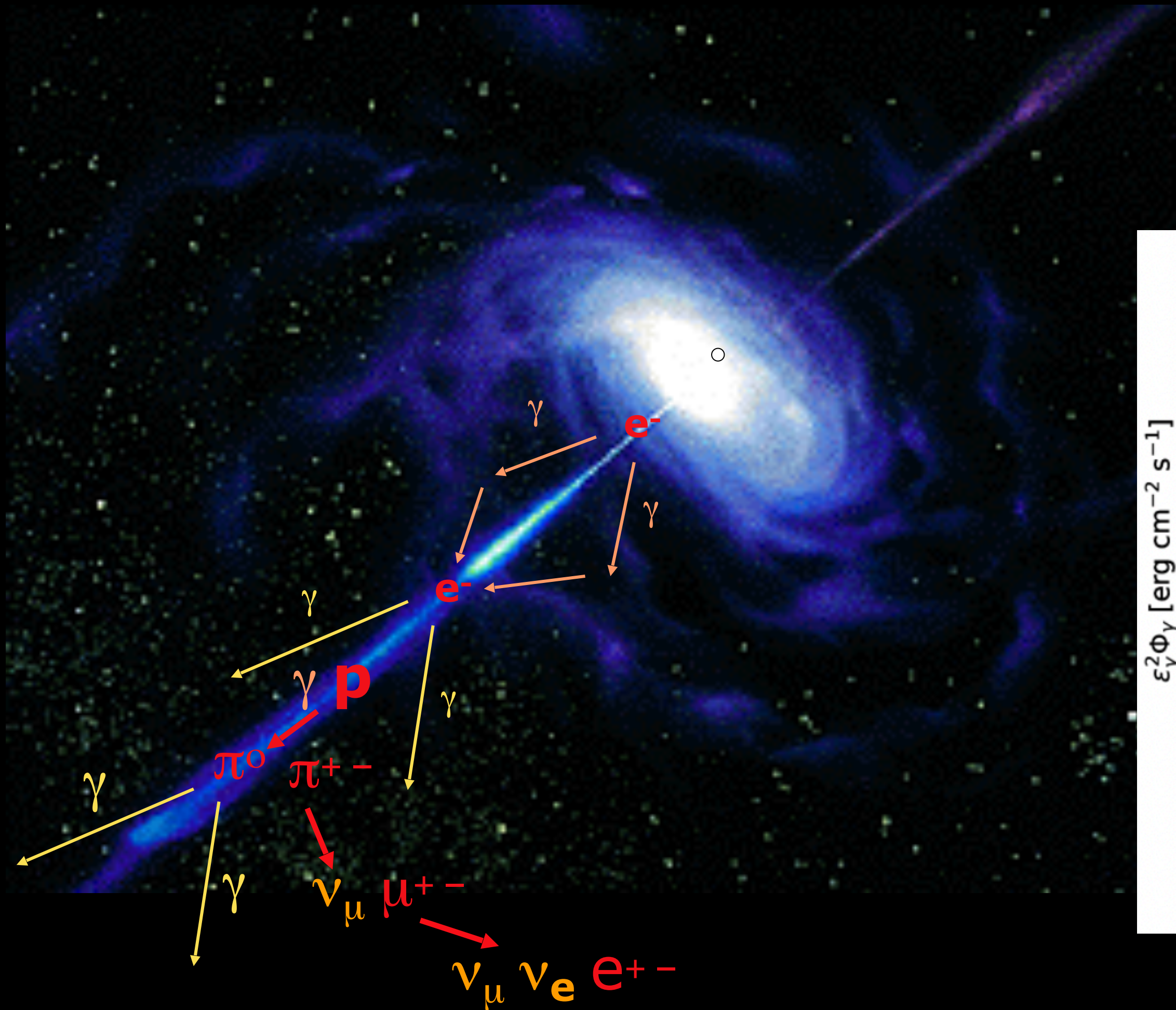
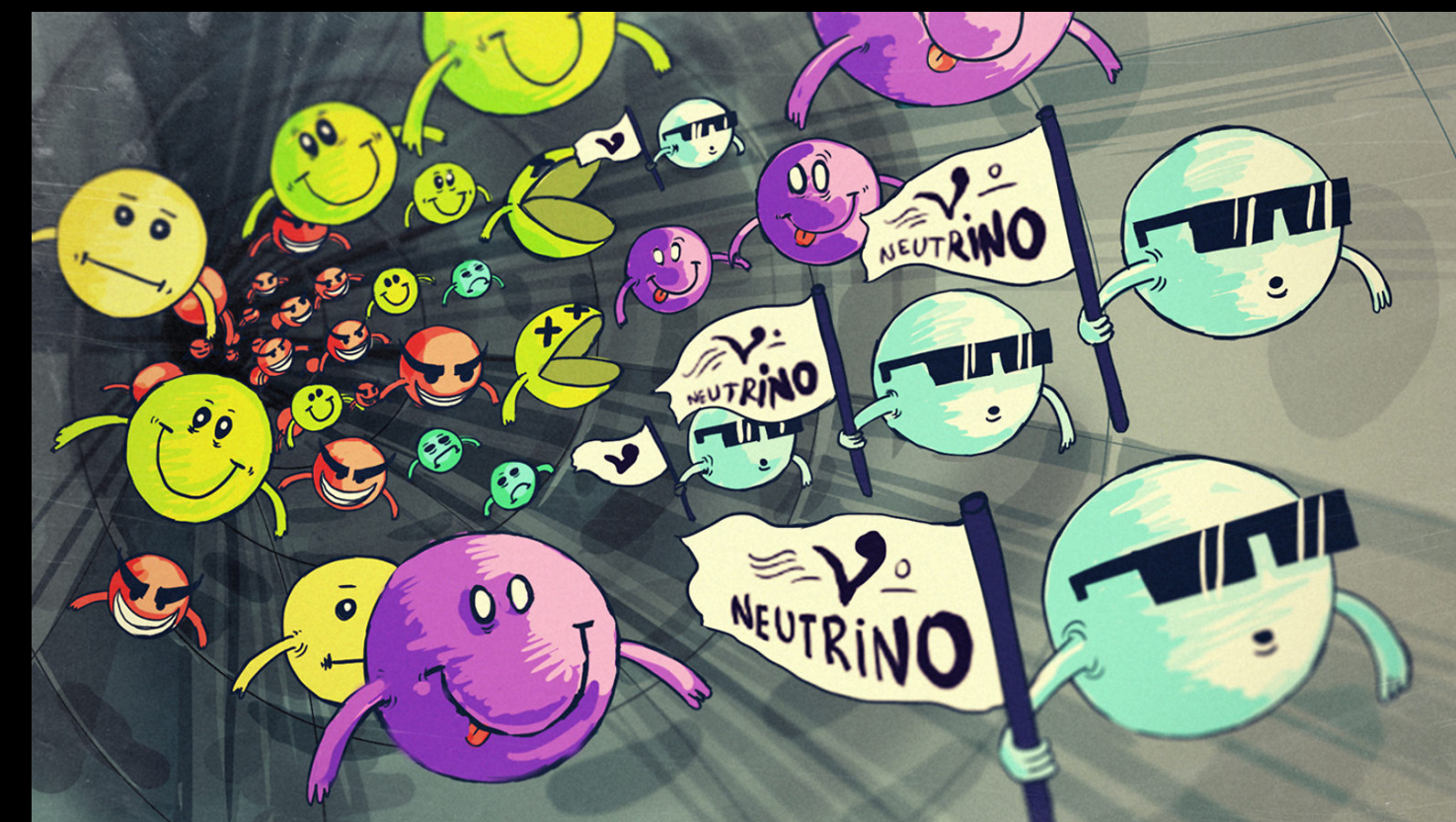
Sonia El Hedri – De la Physique au Détecteur 2024

Précédemment



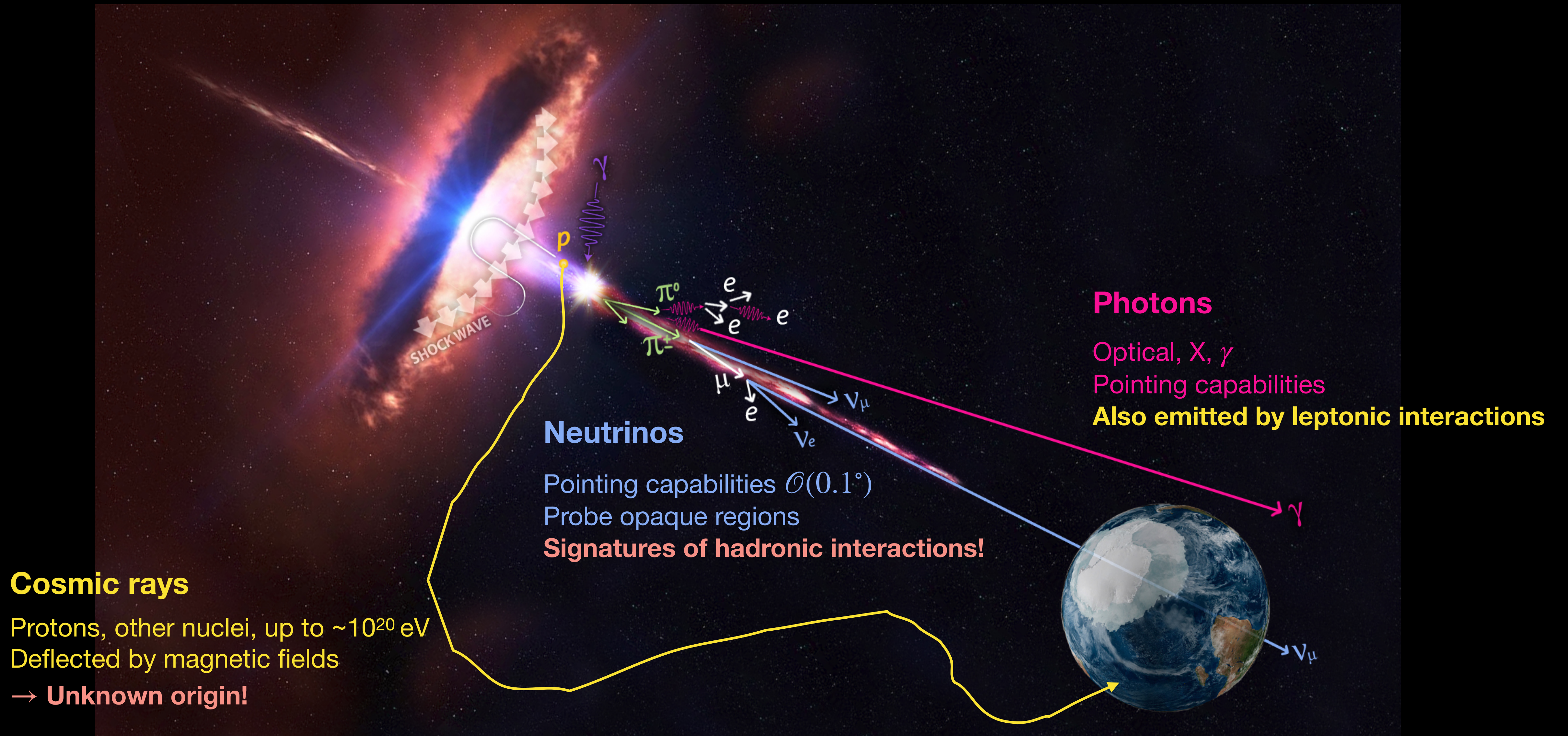
Rayons cosmiques et neutrinos

Interactions hadroniques?

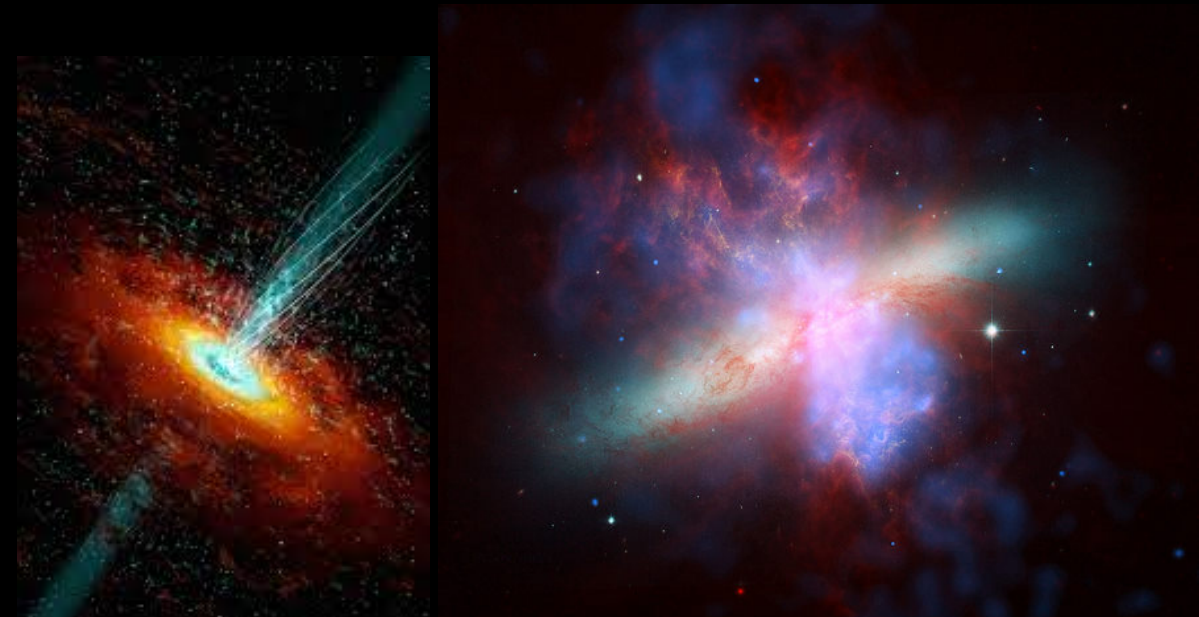


Contribution hadronique?

Neutrinos and the origin of cosmic rays

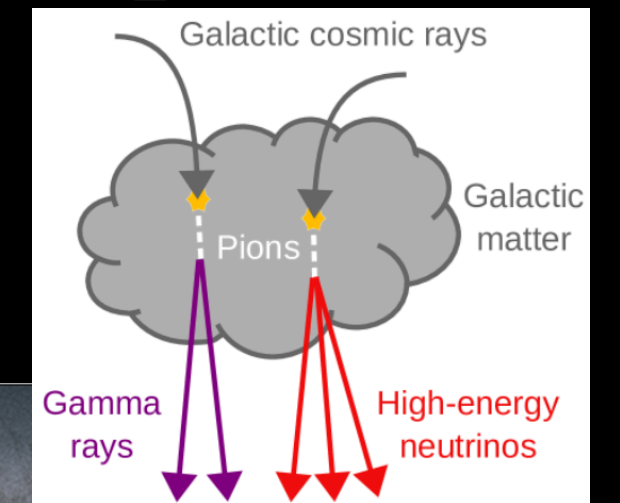
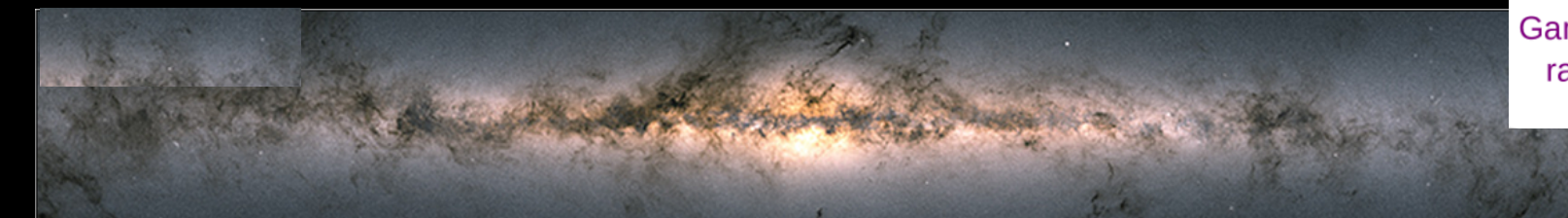
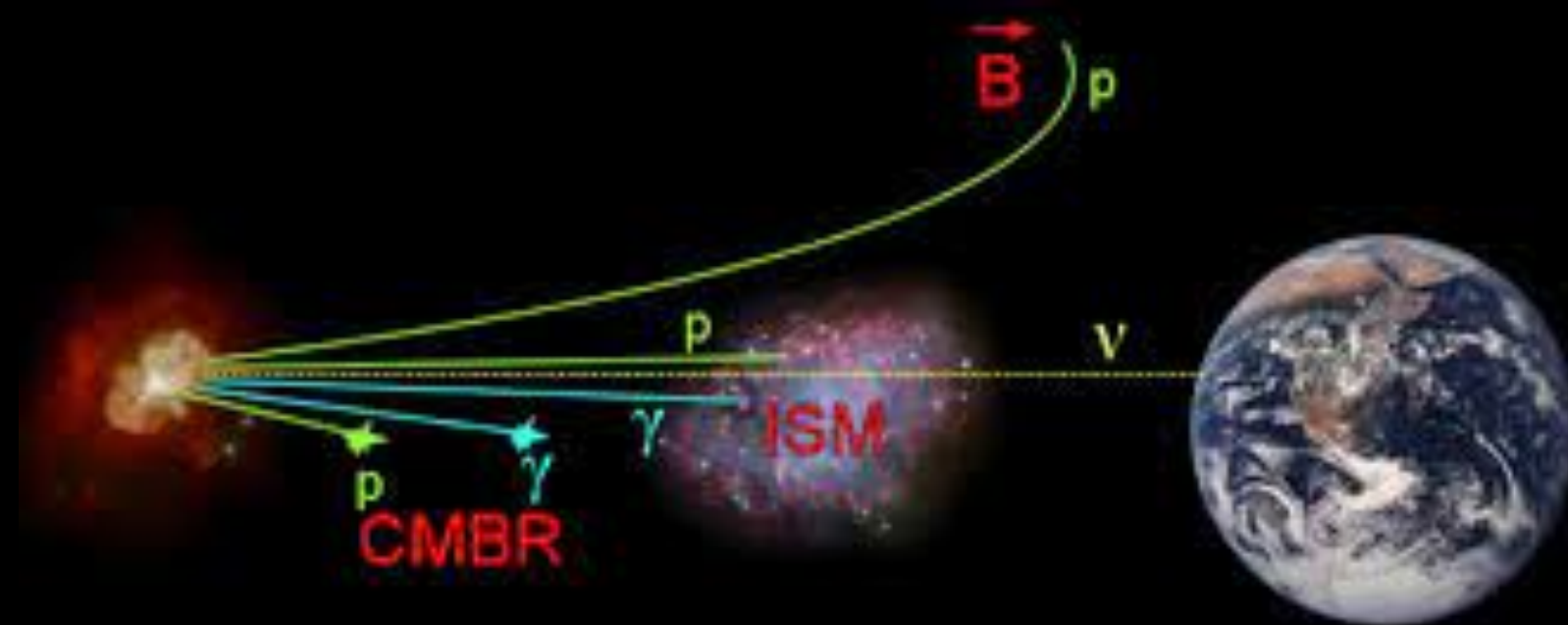


Sources des neutrinos de rayons cosmiques



Sources de rayons cosmiques (TeV-PeV)

- Identifier l'origine des rayons cosmiques
- Etudes multi-messager (γ , OG, CR)



“Réservoirs de rayons cosmiques” (TeV-PeV)

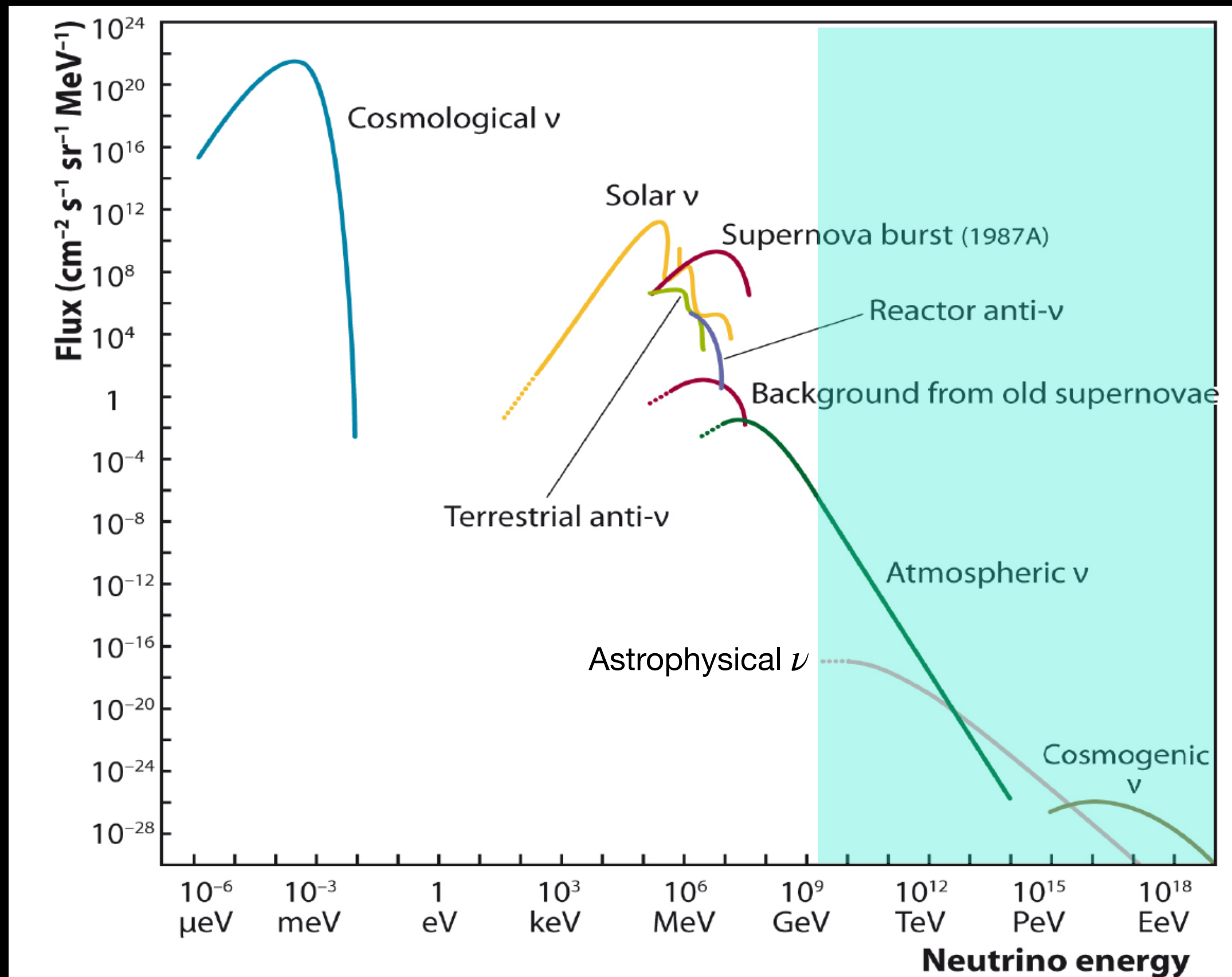
- Galaxies (Voie Lactée), amas de galaxies
- Rayons cosmiques piégés, sources anciennes
- Etudier la propagation des rayons cosmiques

Photons dans le milieu intergalactique (100 TeV-EeV)

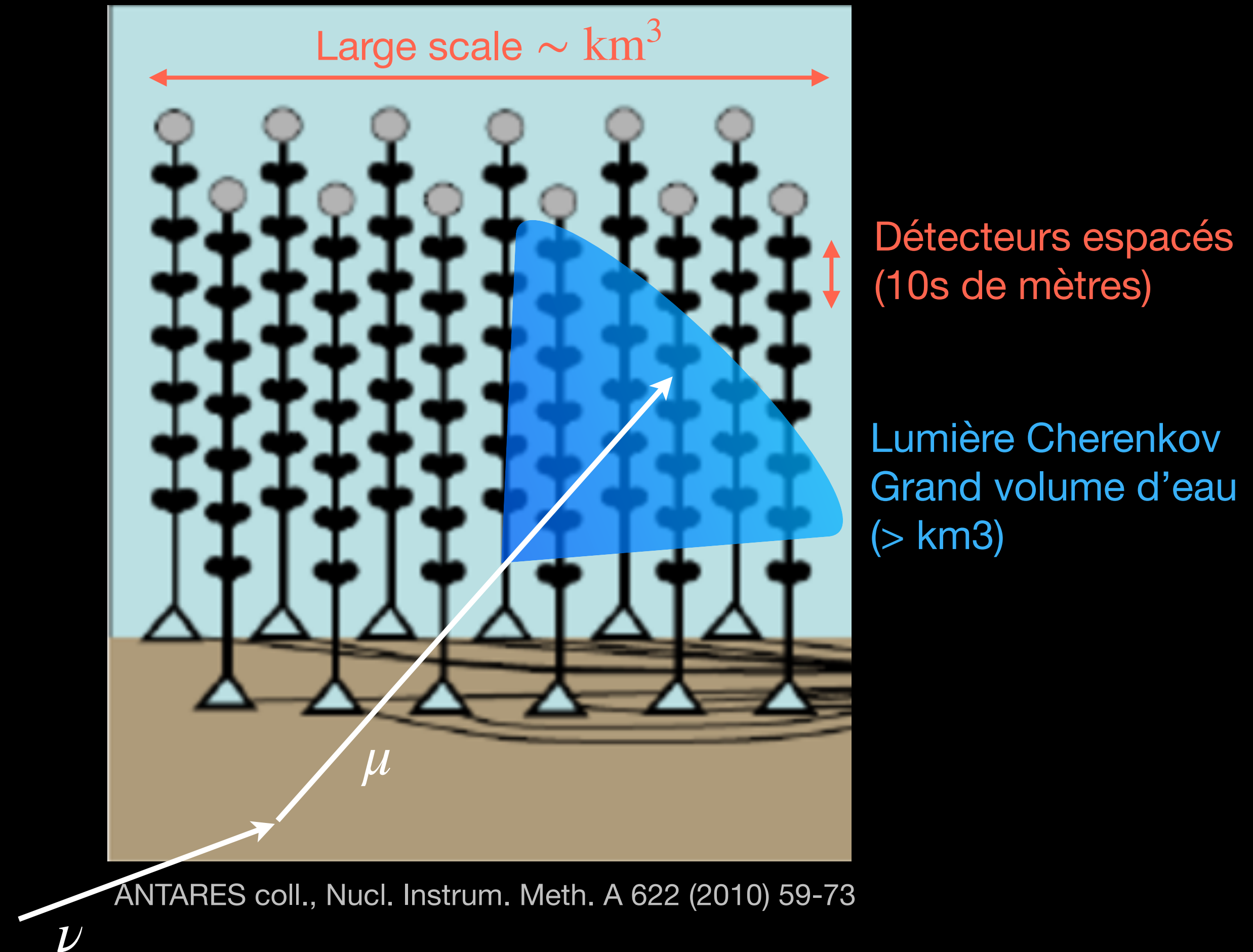
- Interactions de rayons cosmiques avec le CMB (GZK) et les photons ambiants

Neutrinos de haute énergie: détection

Compromis: Flux faible, haute énergie



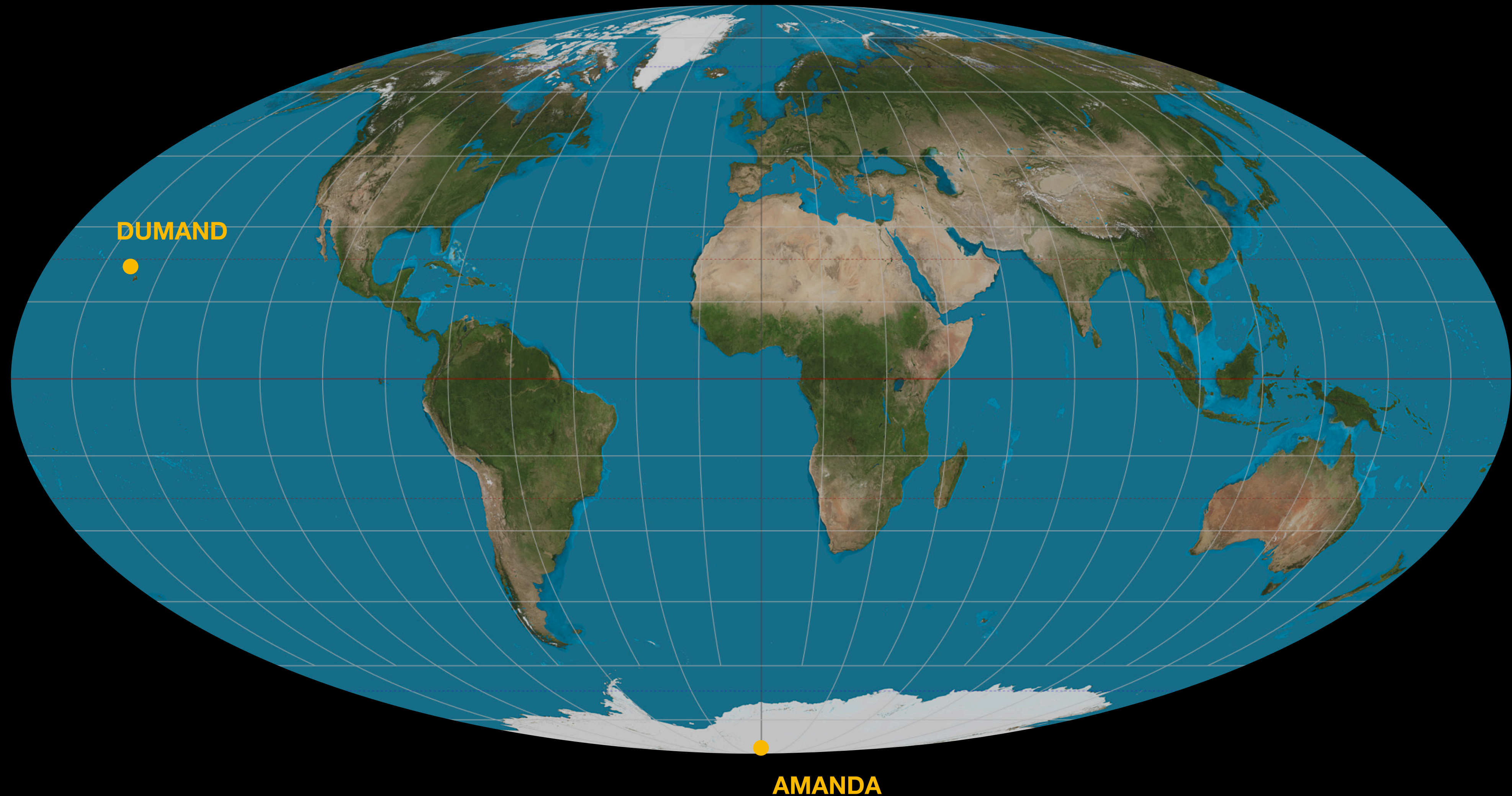
U. F. Katz, Prog. Part. Nucl. Phys. 67 (2012) 651-704



ANTARES coll., Nucl. Instrum. Meth. A 622 (2010) 59-73

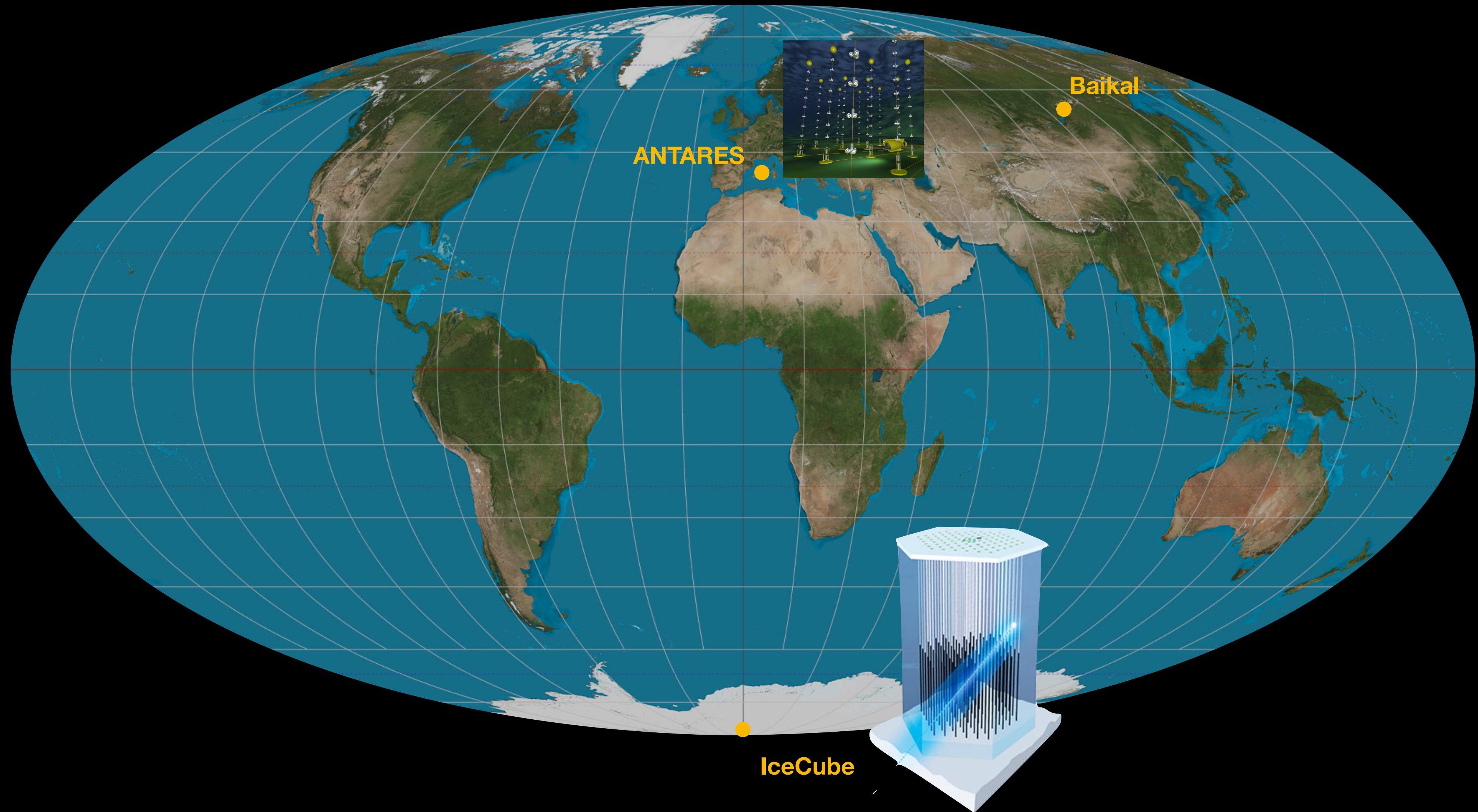
Détection de neutrinos de haute énergie

Le début — 1976 à 2005



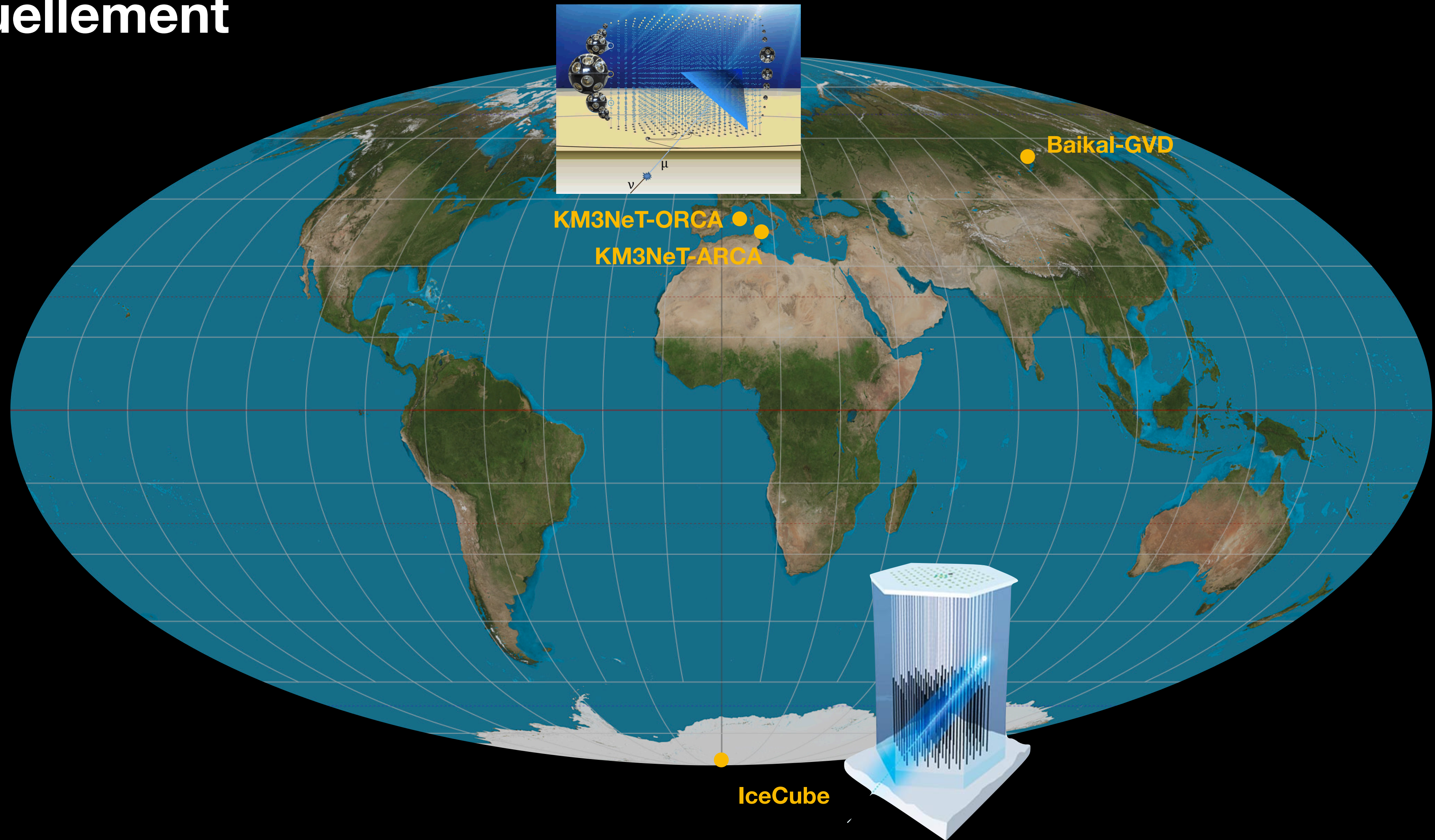
Détection de neutrinos de haute énergie

20 dernières années



Détection de neutrinos de haute énergie

Actuellement





ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY



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



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

50 m

Ice Top

1450 m

2450 m

86 strings of DOMs,
set 125 meters apart

IceCube detector

DeepCore

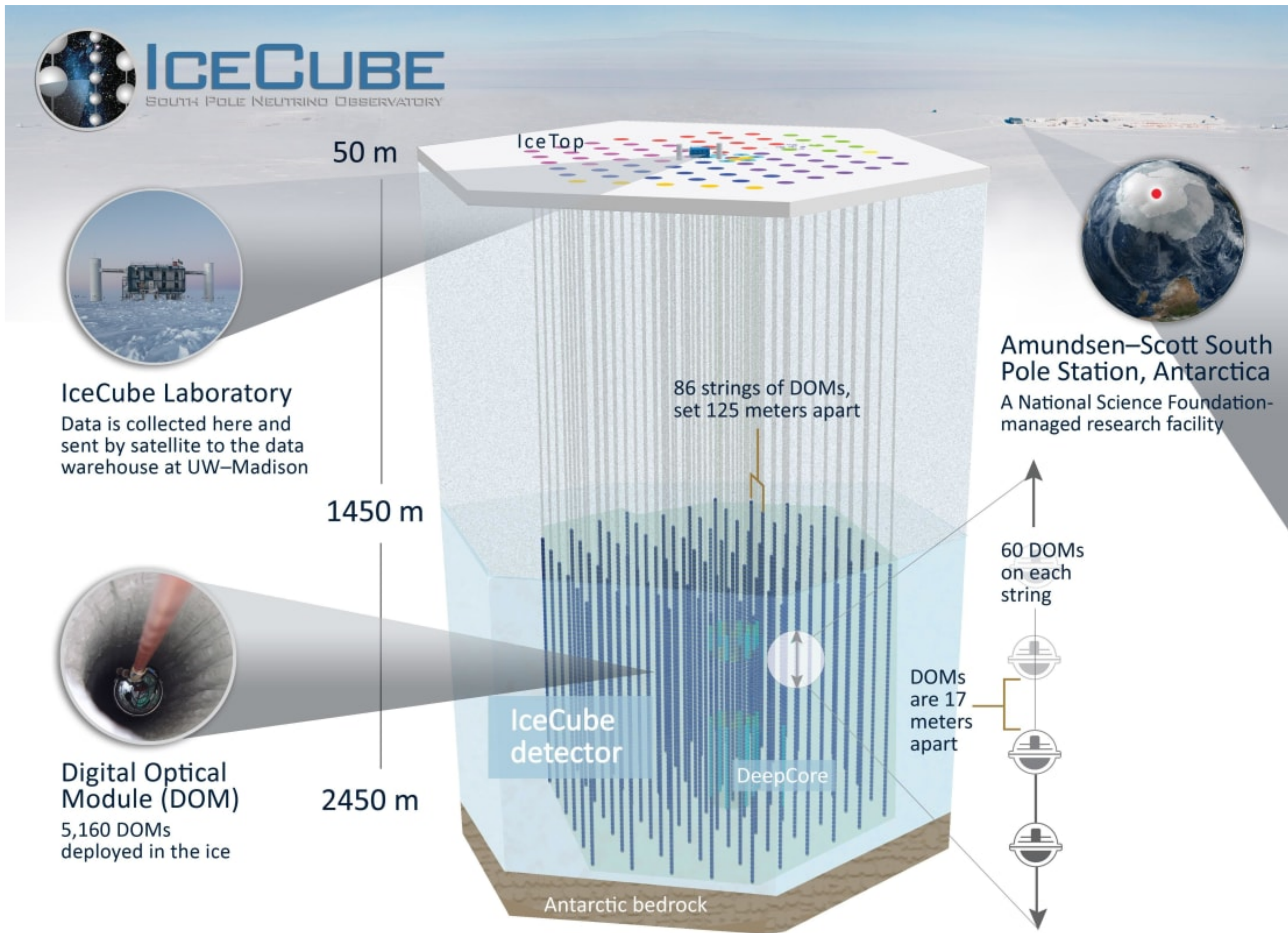
DOMs are 17 meters apart

60 DOMs on each string

Antarctic bedrock



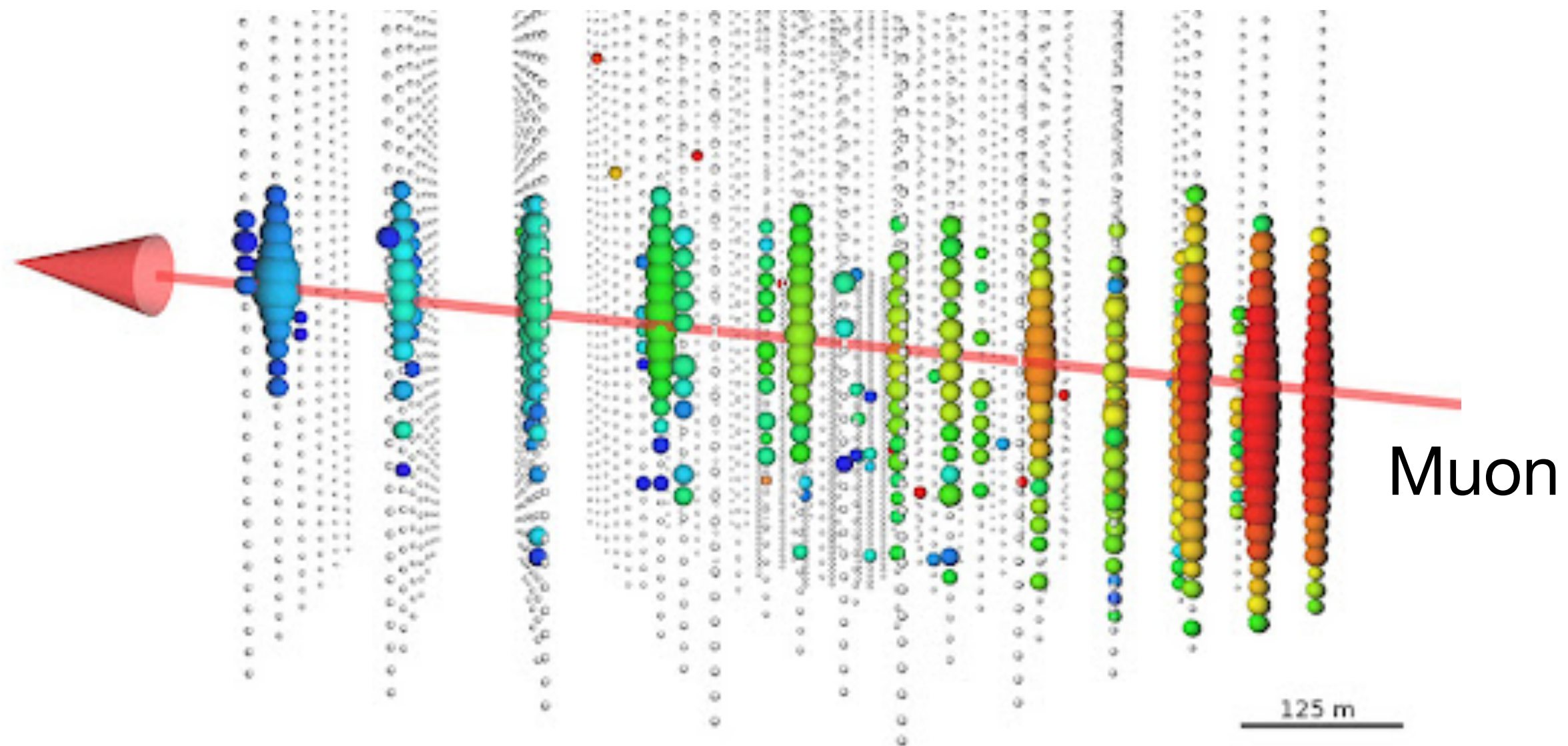
Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility



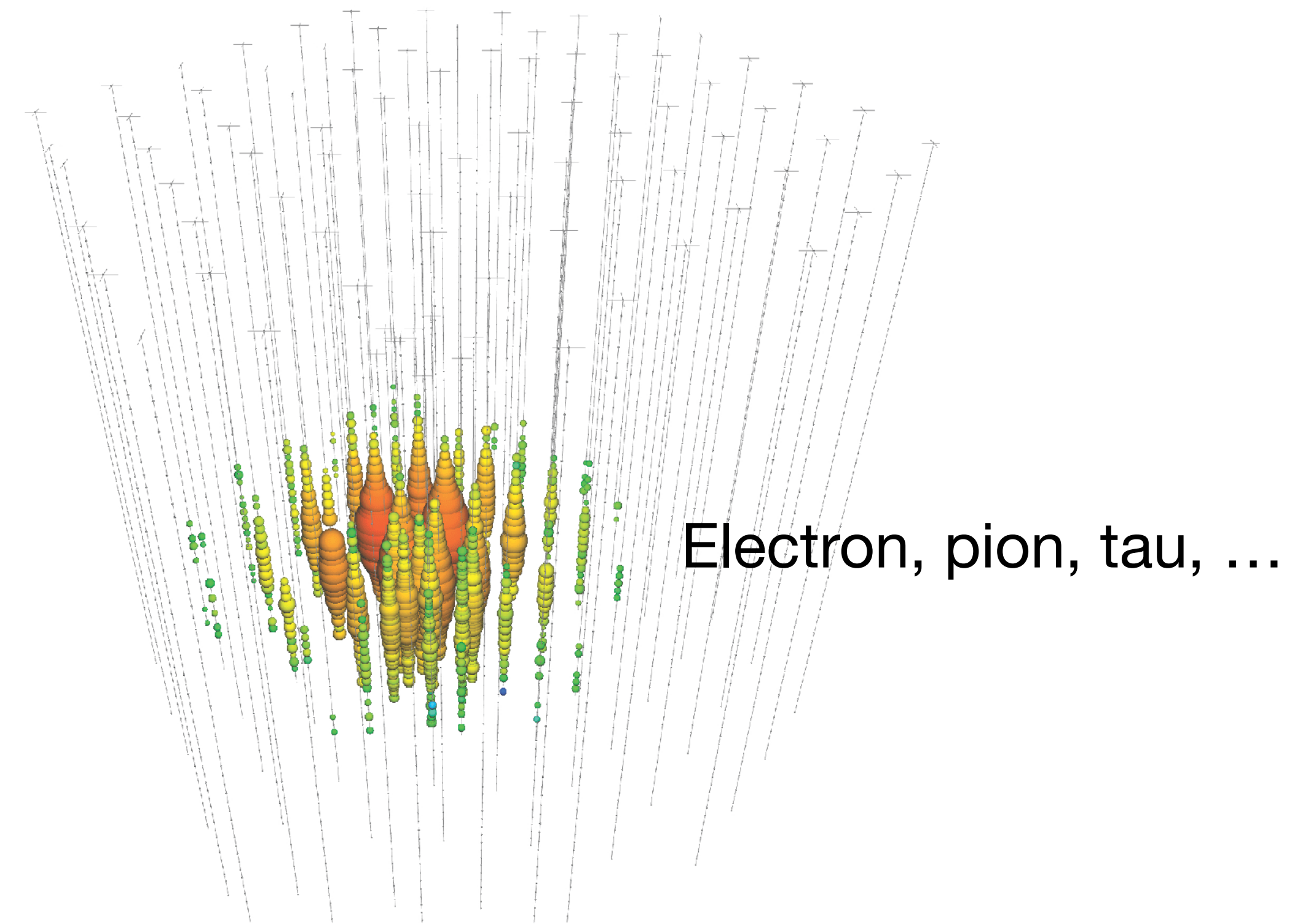
Neutrinos dans IceCube

Topologies d'événements les plus fréquentes

Traces



Gerbes/Cascades



Excellente résolution angulaire

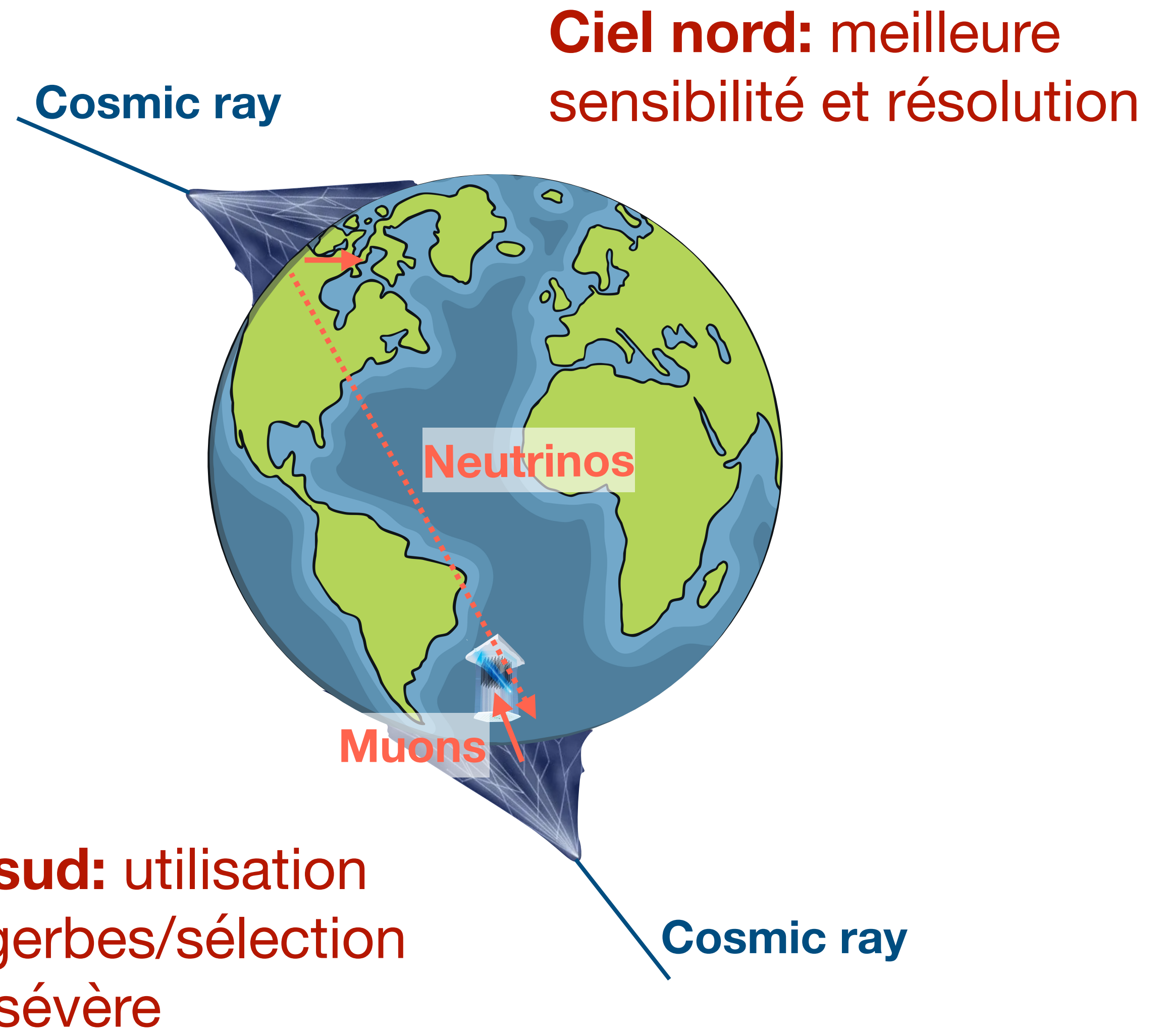
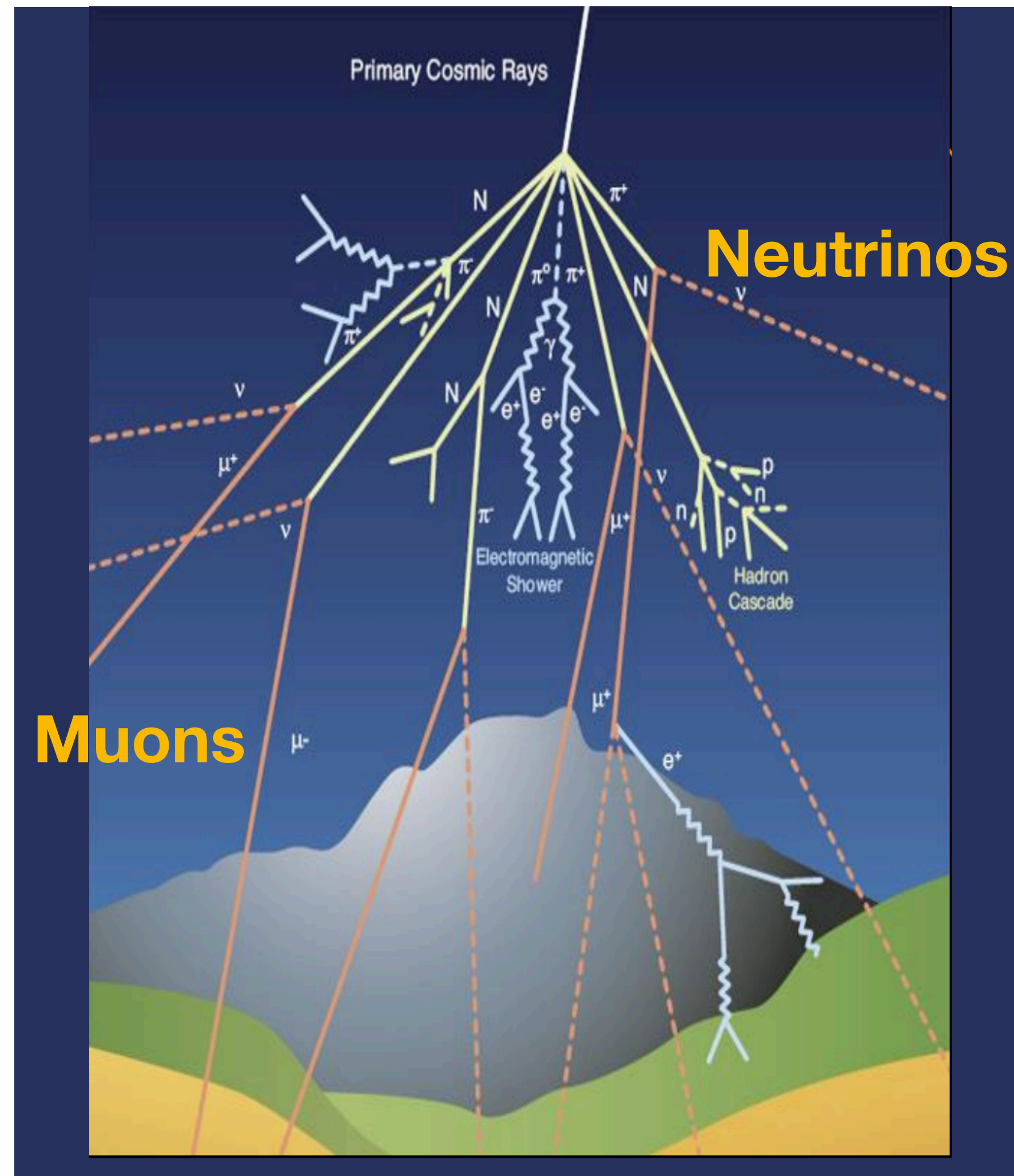
→ Idéal pour la recherche de sources

Bonne résolution en énergie

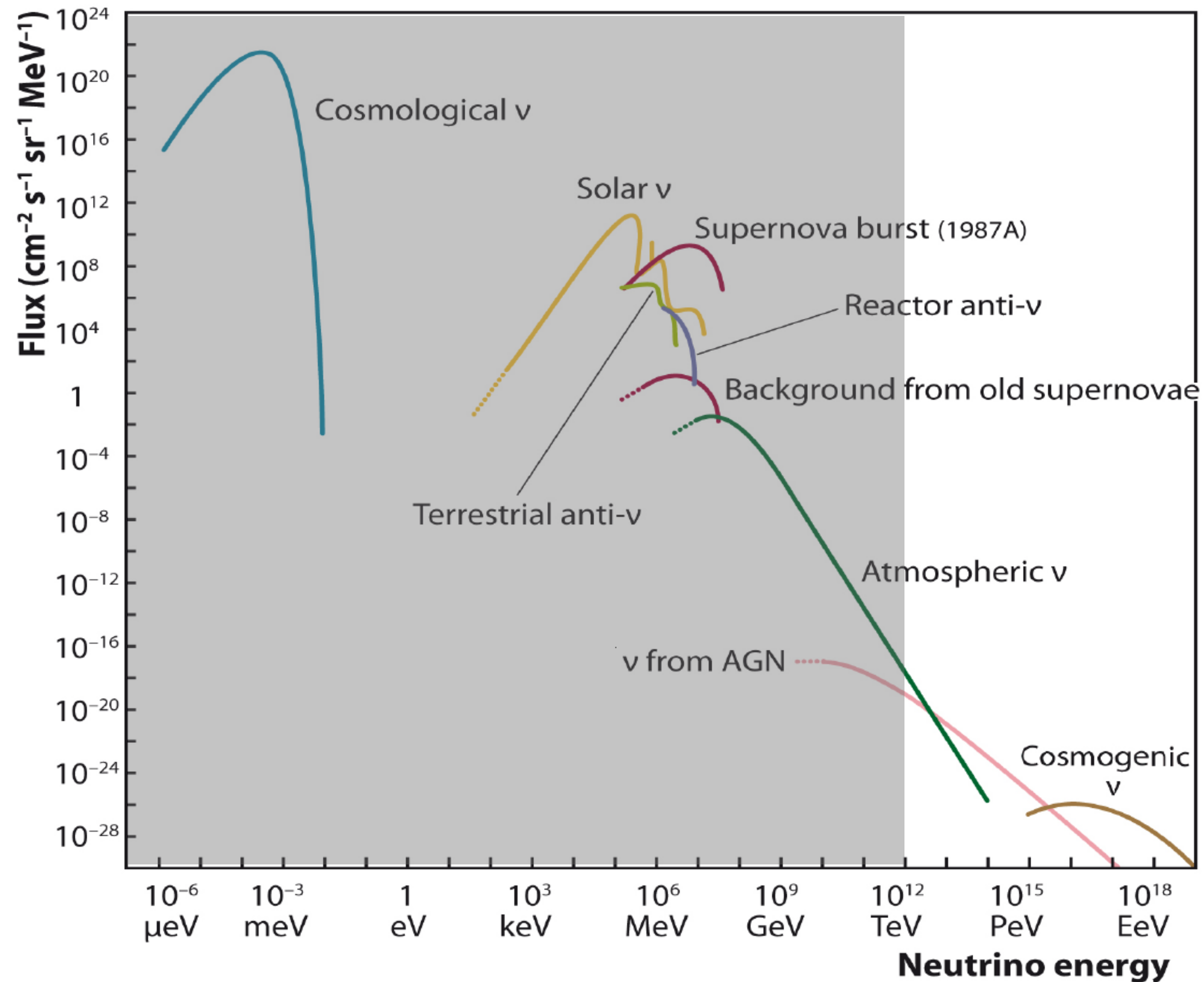
→ Signal propre pour études de flux diffus

Réduire les bruits de fond

La Terre comme bouclier



Réduire les bruits de fonds — Energie et temps

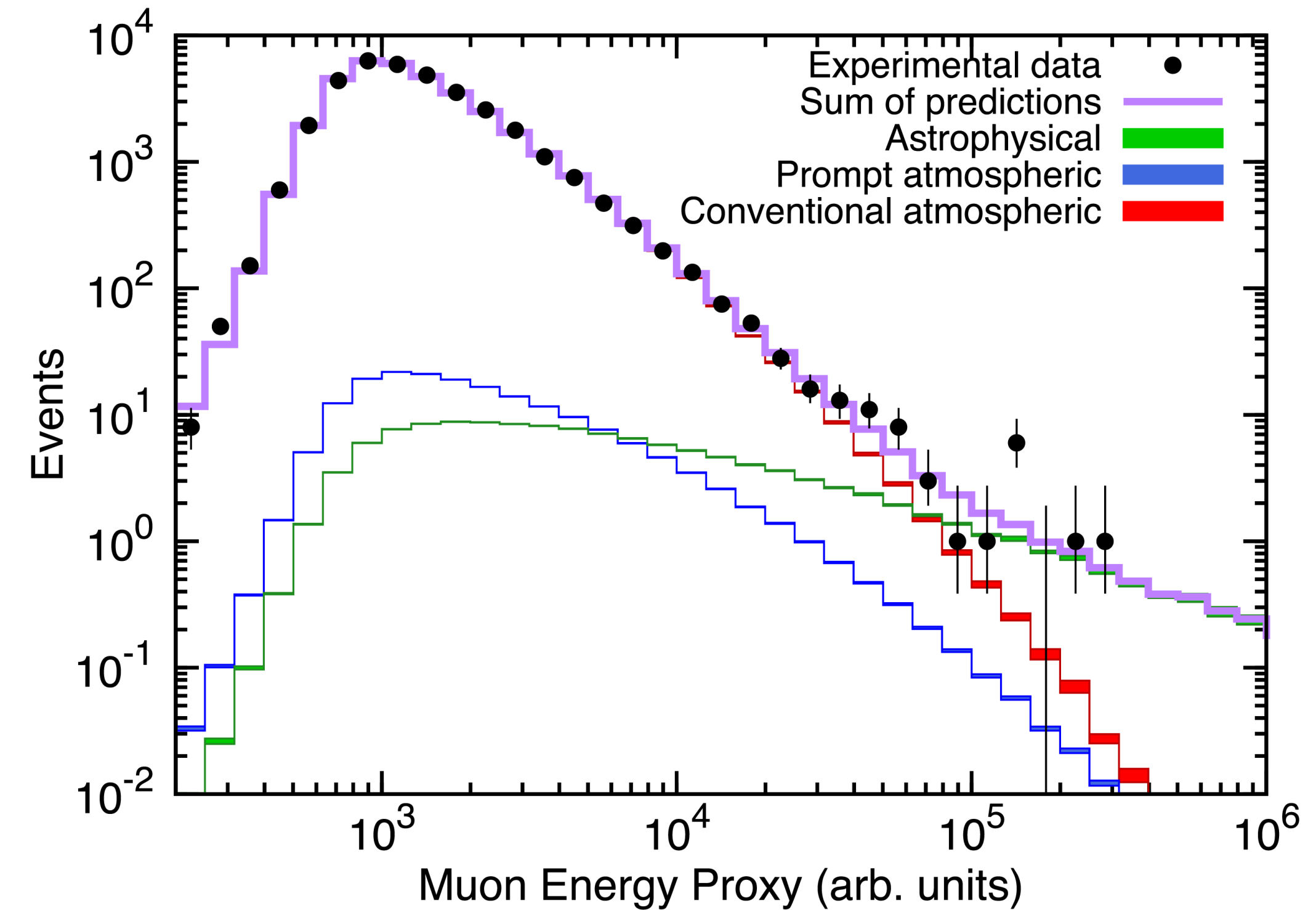
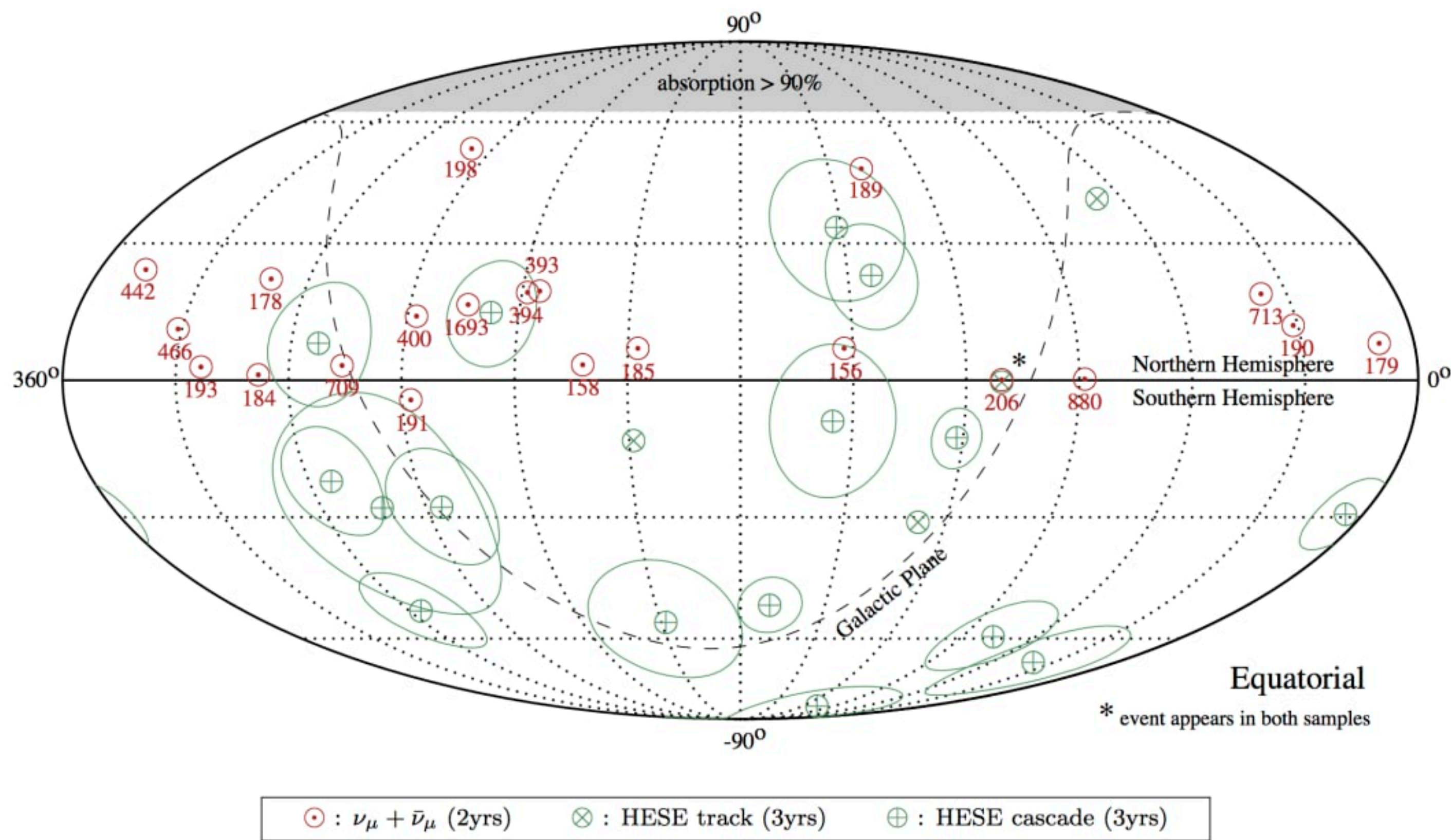


Chaque année @ IceCube
100,000 neutrinos atmosphériques
~100 neutrinos cosmiques

Neutrinos $>$ TeV
... ou émission intense de
courte durée

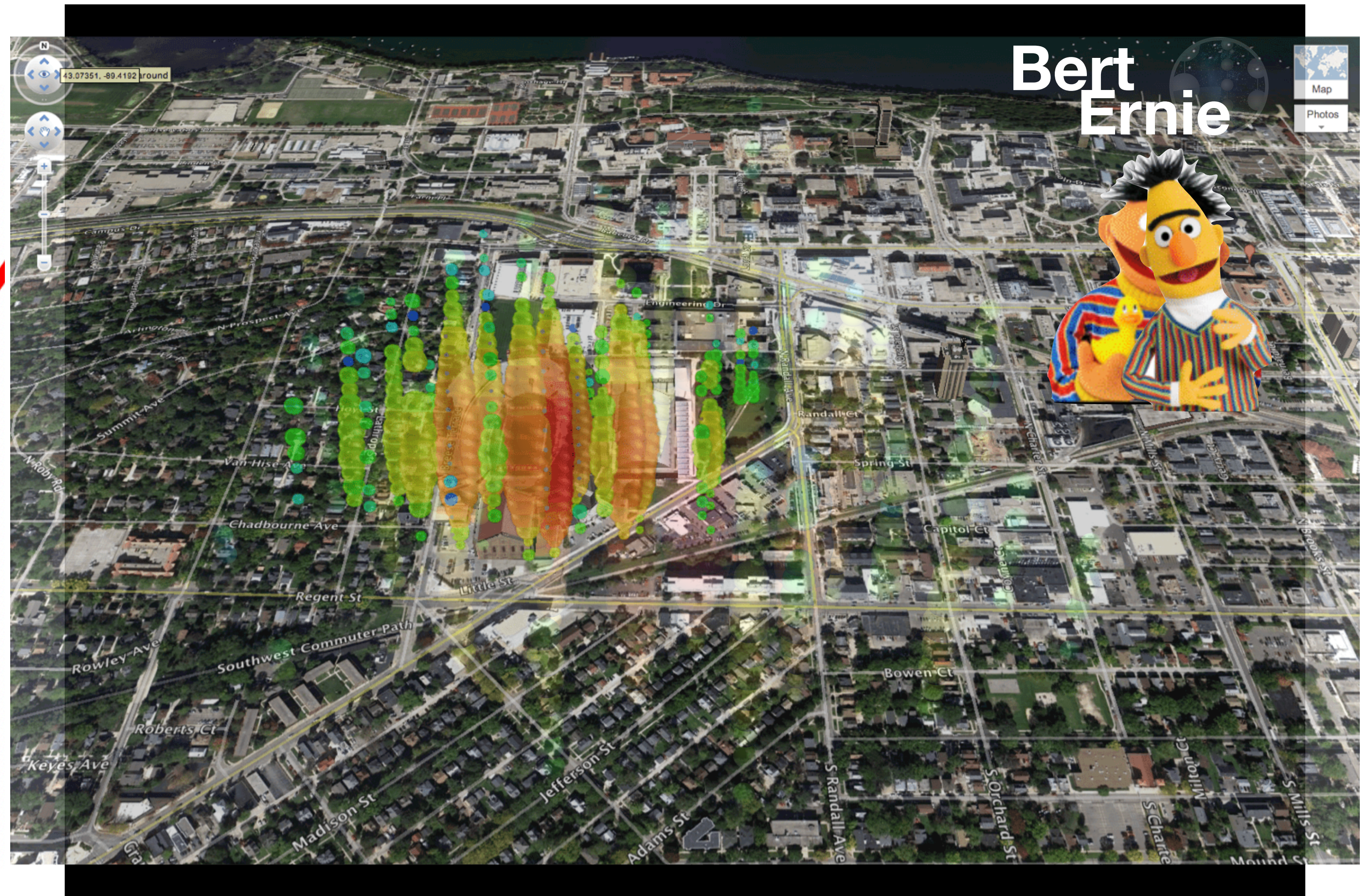
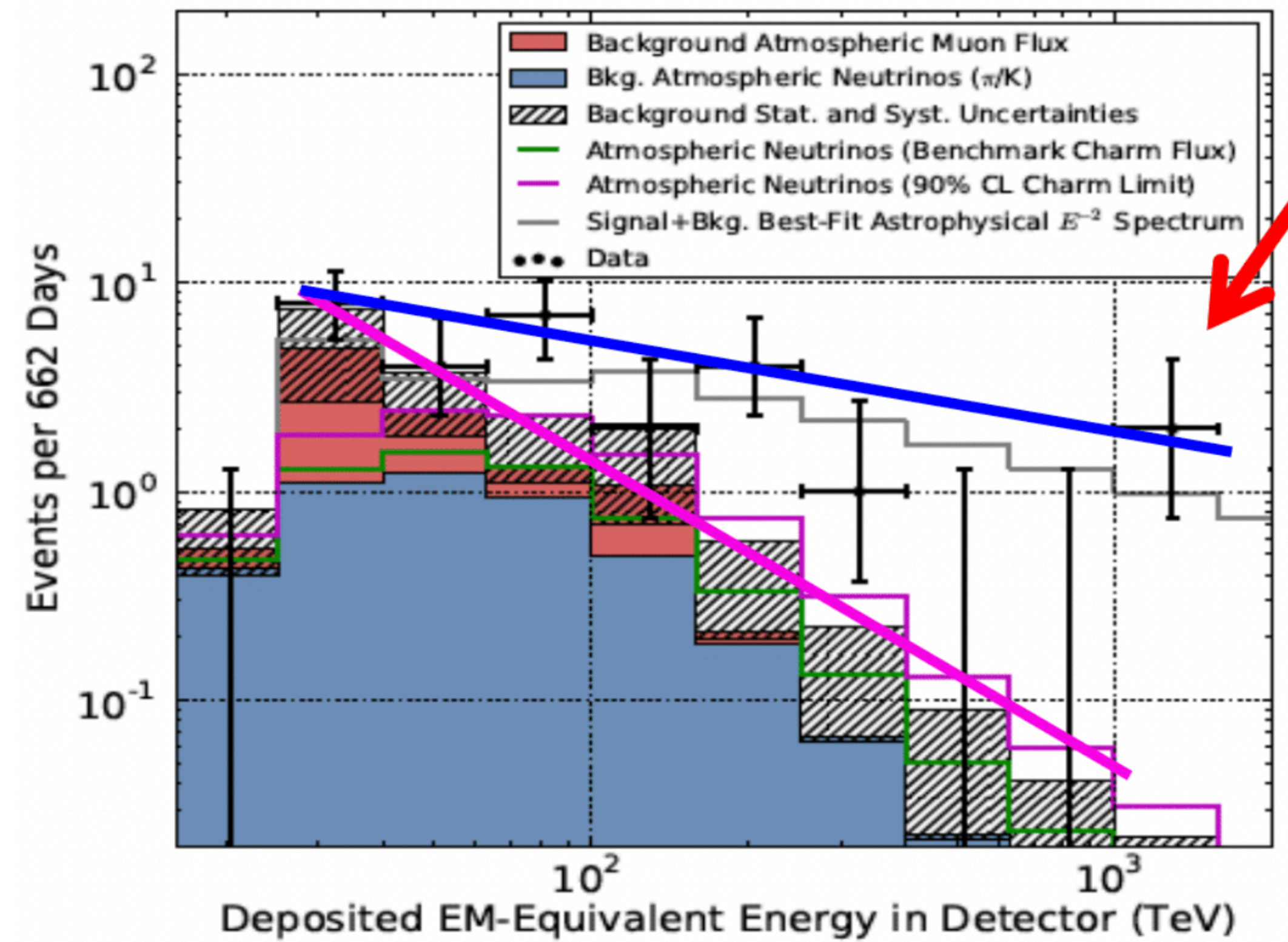
Découverte des neutrinos astrophysiques!

Flux diffus venant de tout l'Univers



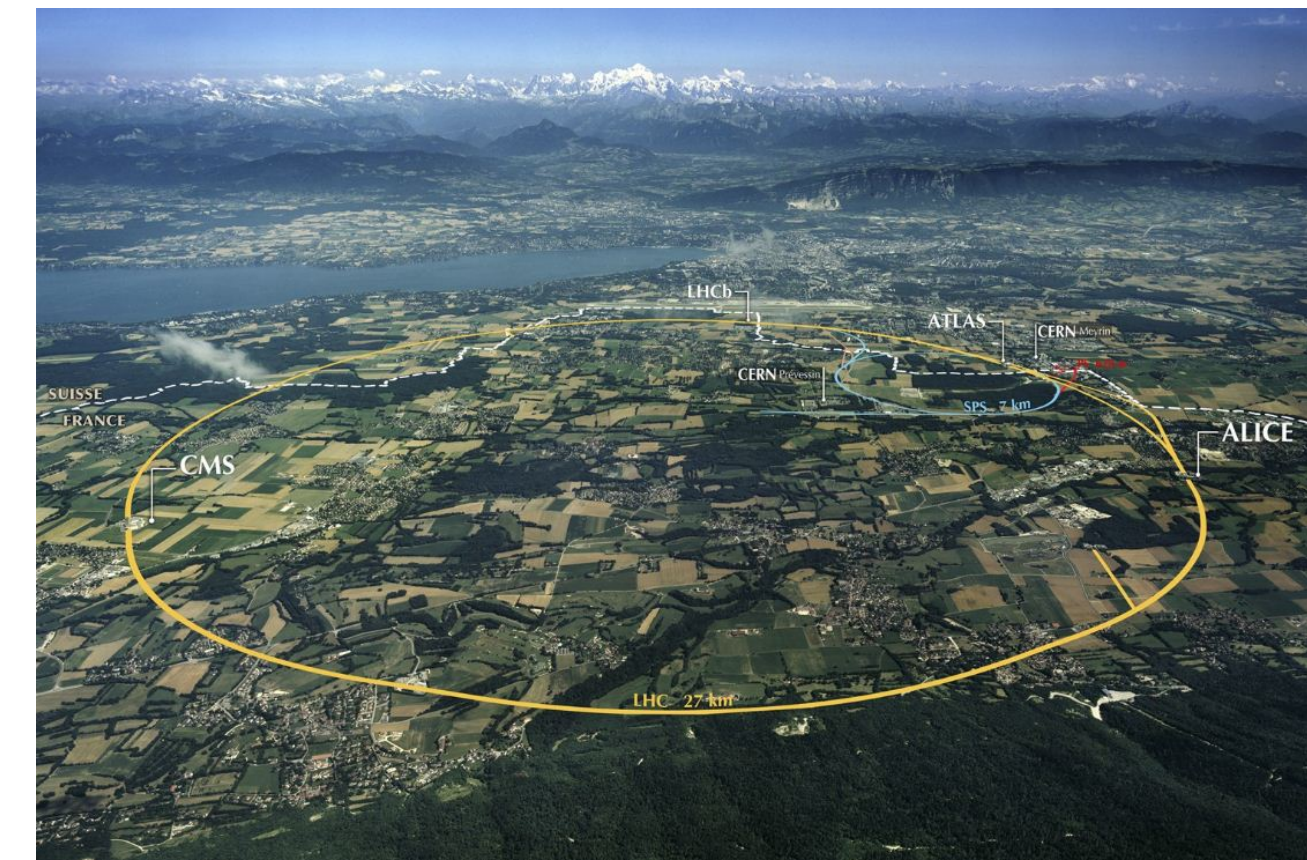
Explorer les très hautes énergies

Ernie et Bert – Les premiers neutrinos cosmiques

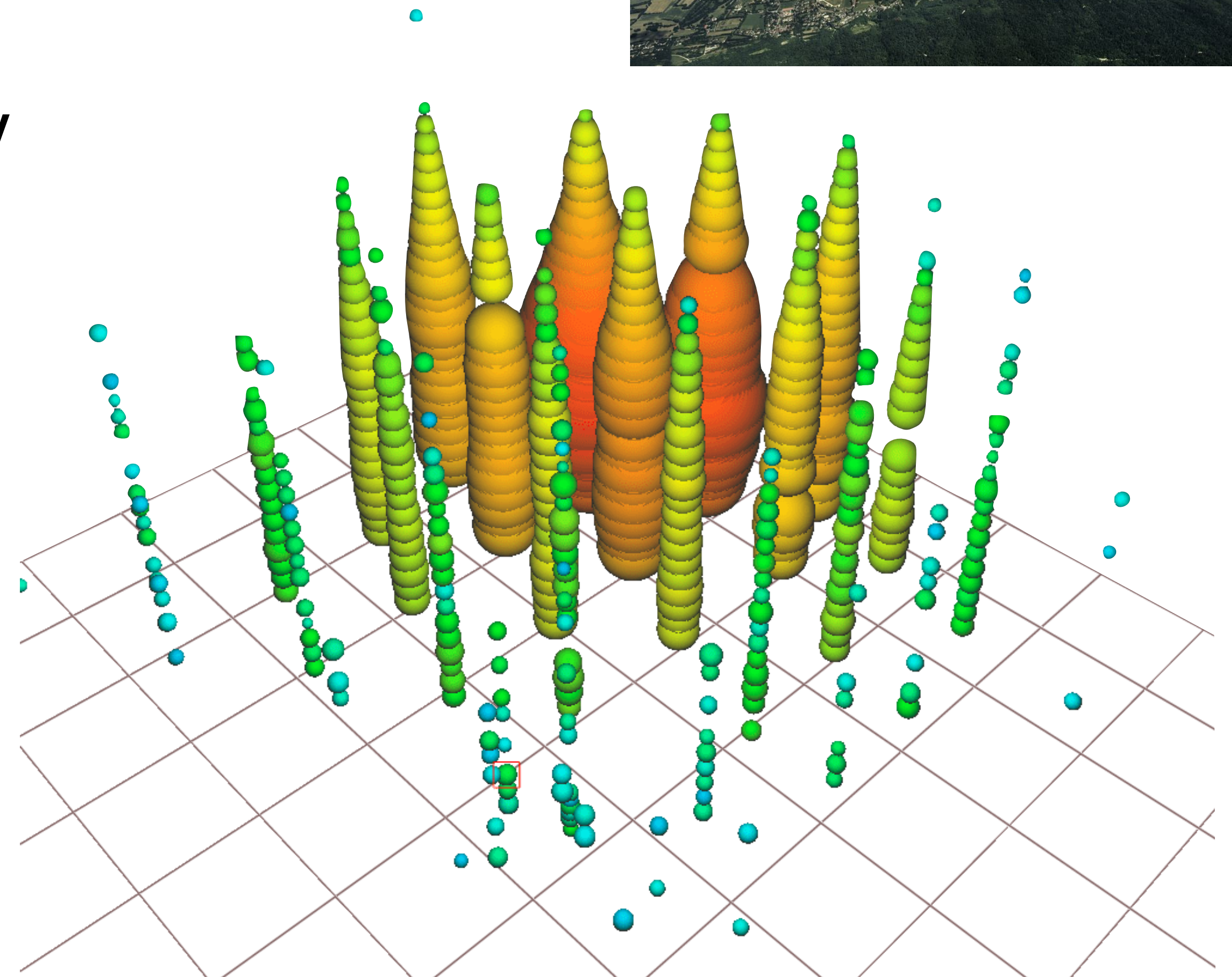
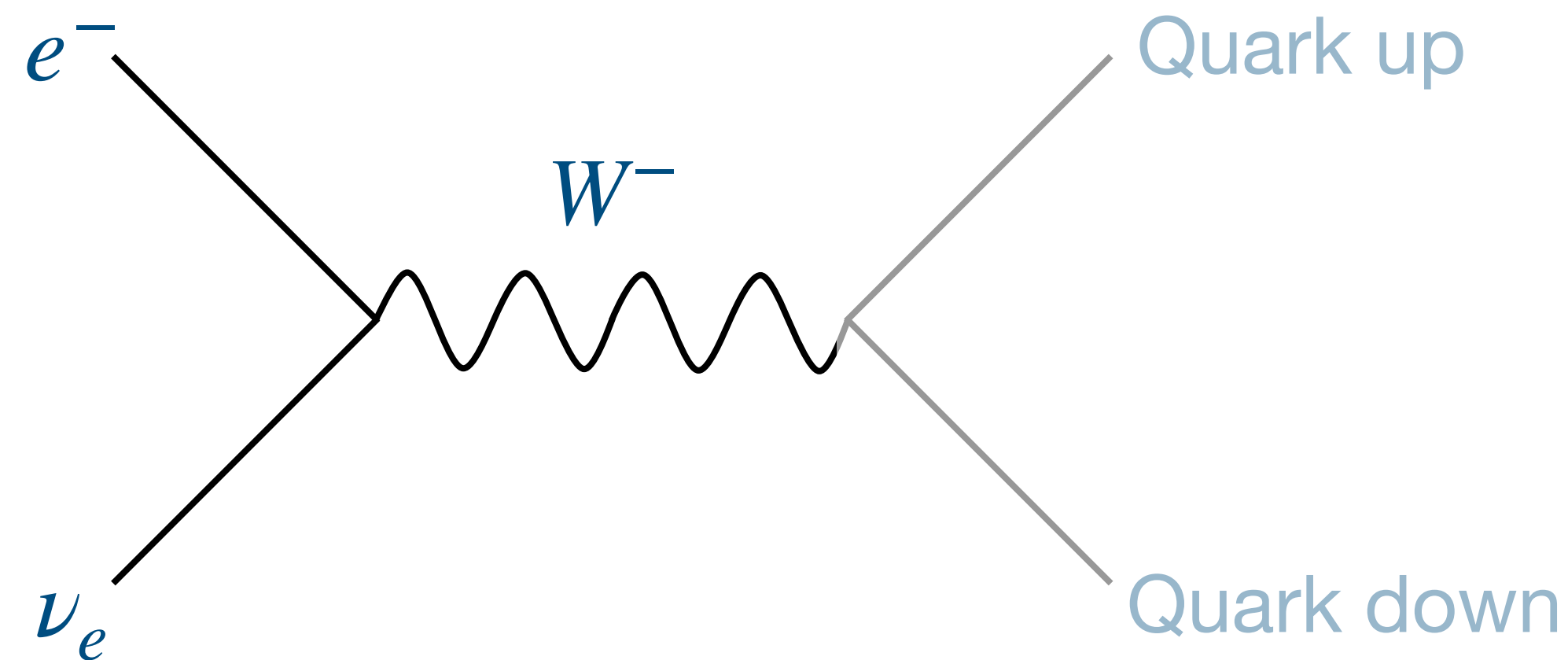


De l'astrophysique aux particules

Résonance de Glashow

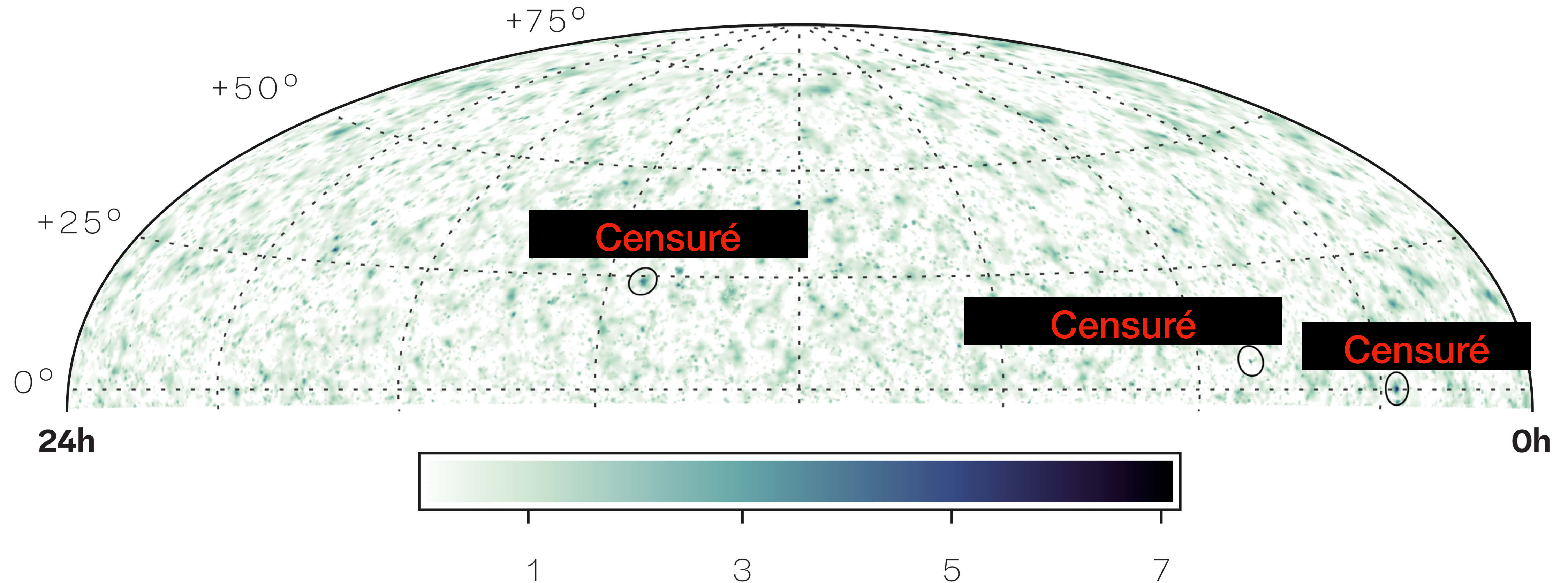


- Production **résonante** d'un boson W par interaction d'un neutrino de 6.3 PeV
- Prédit par le Modèle Standard mais jamais observé jusqu'alors



Rechercher des sources ponctuelles?

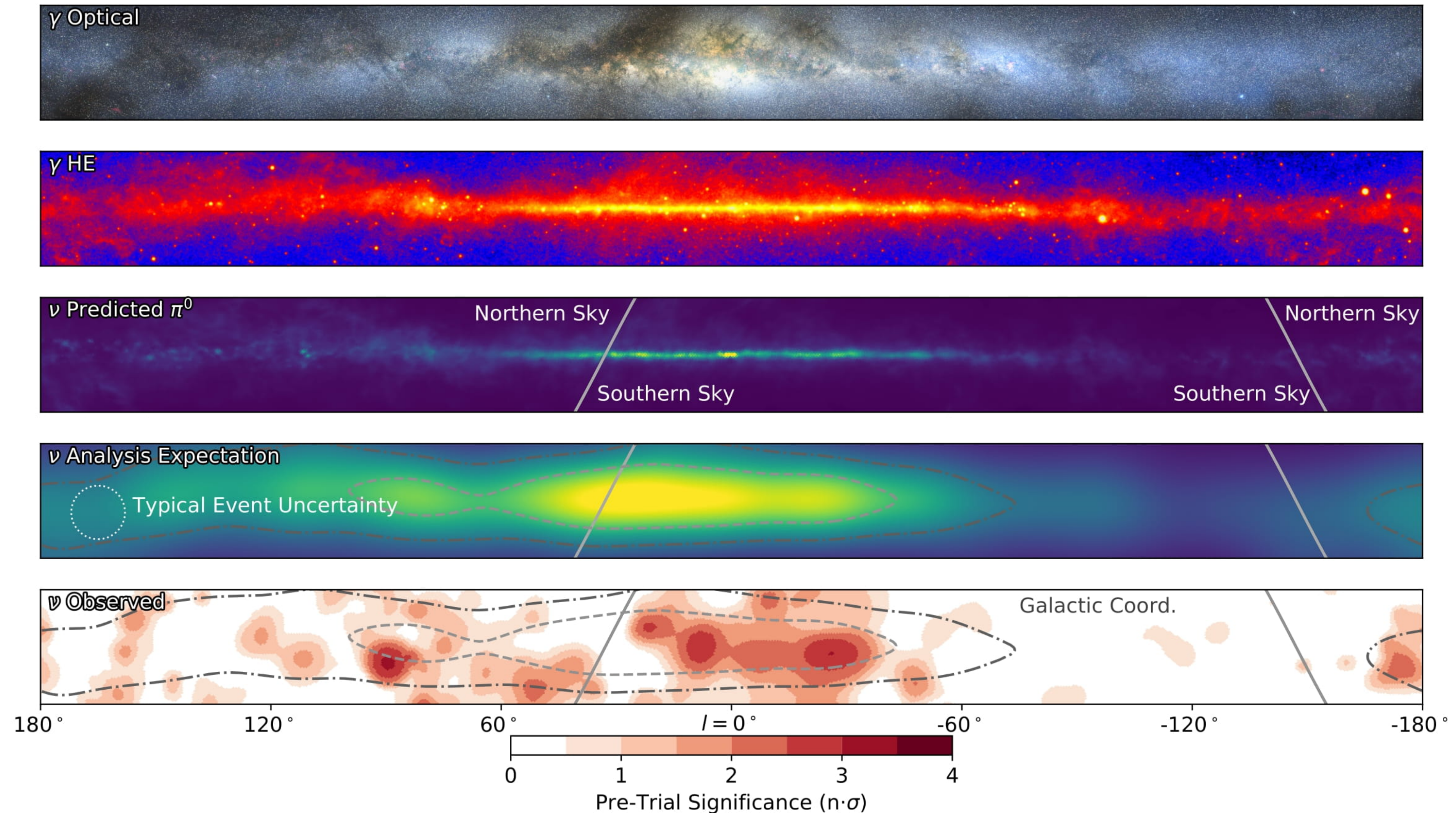
Identification de clusters de neutrinos



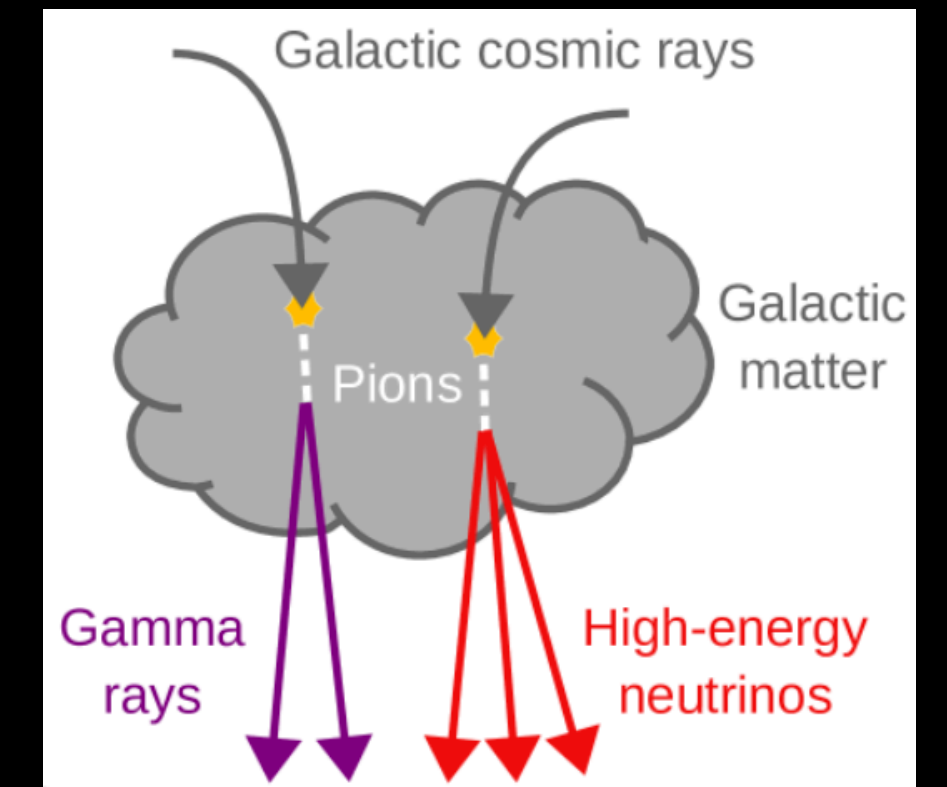
- Excès de 5.3 sigma **localement**
- Avec facteur d'essai, plus que 2 sigma... Trop de possibilités testées!

Neutrinos dans notre galaxie

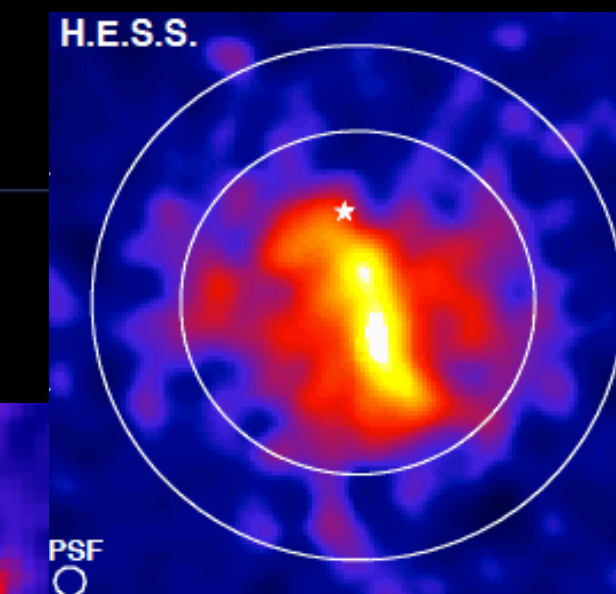
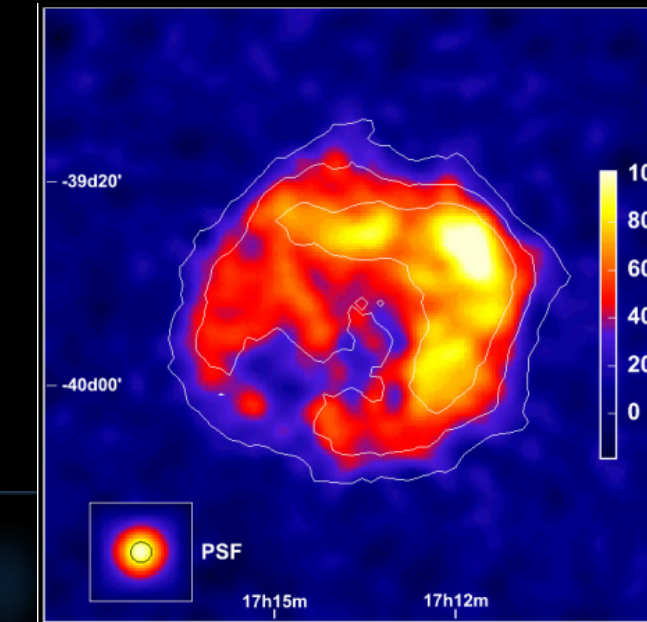
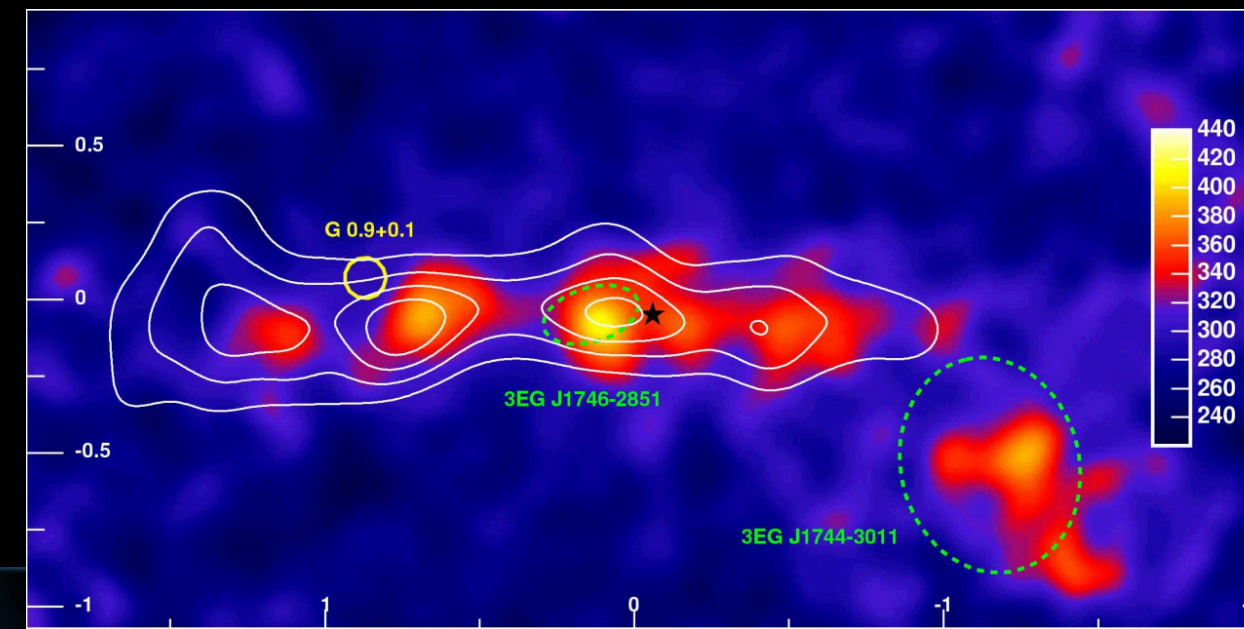
Découverte de neutrinos produits dans la Voie Lactée — 2023



Les neutrinos du plan galactique



Pictures by the H.E.S.S. collaboration



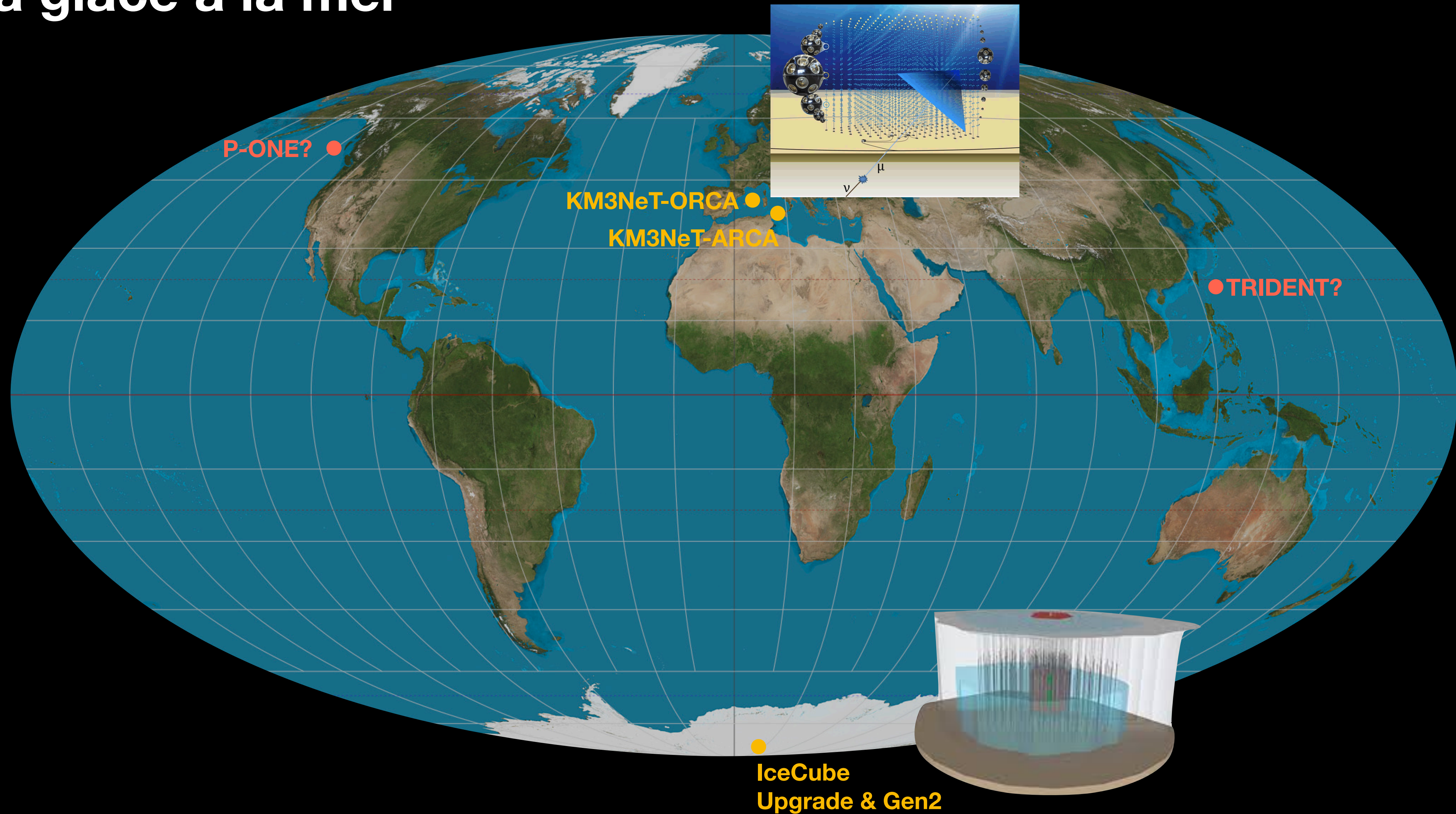
NEUTRINOS

Flux entièrement diffus?

- Sources anciennes, rayons cosmiques piégés
- Sources “récentes”
(restes de supernovae, nébuleuses de pulsars, etc..)
- Problème: ciel sud → utilisation des cascades (résolution faible)

La prochaine génération de télescopes à neutrinos

De la glace à la mer



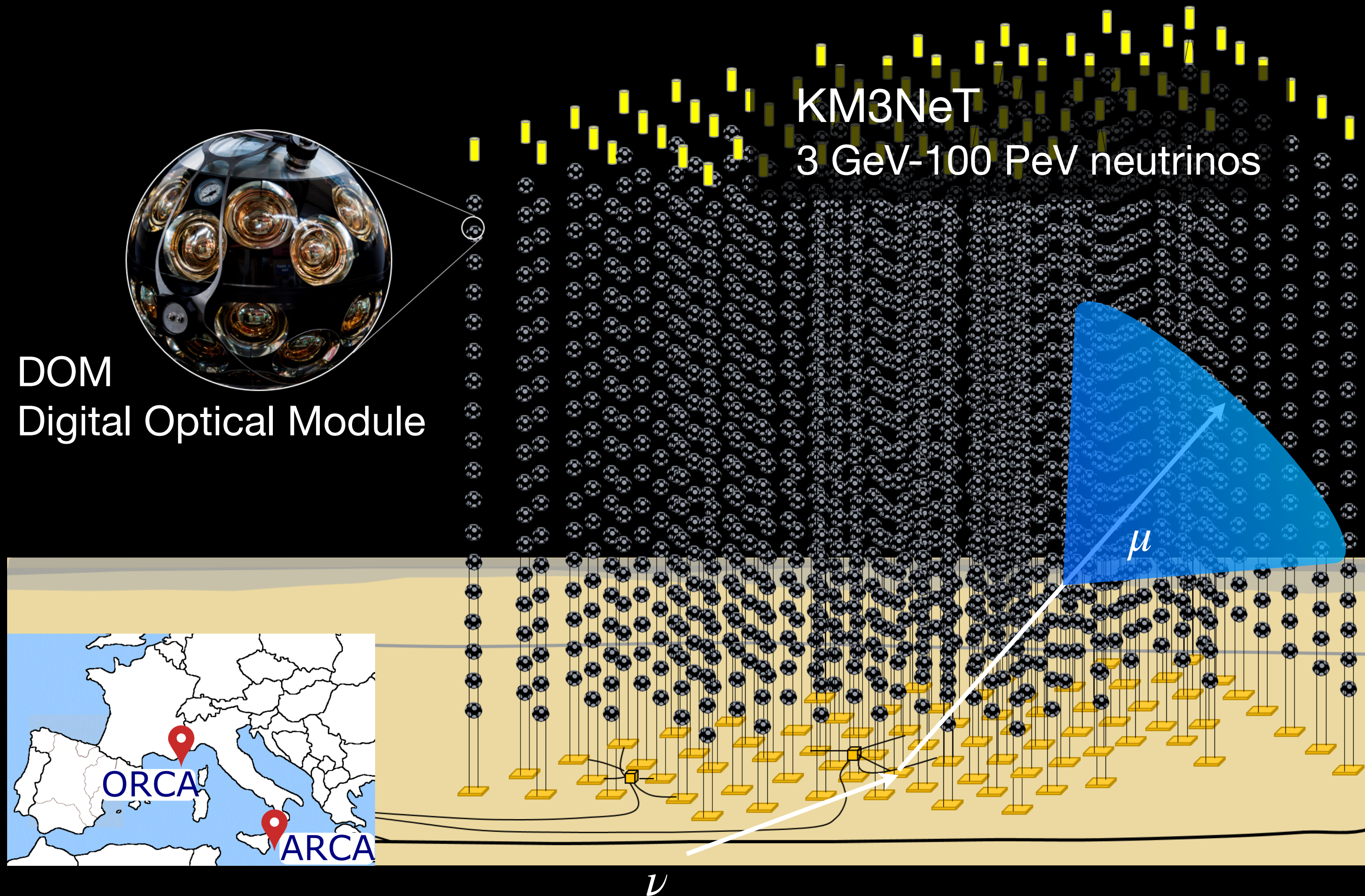
L'expérience KM3NeT

Detecteur à effet Cherenkov – Mer Méditerranée



DOM
Digital Optical Module

KM3NeT
3 GeV-100 PeV neutrinos



ARCA et ORCA

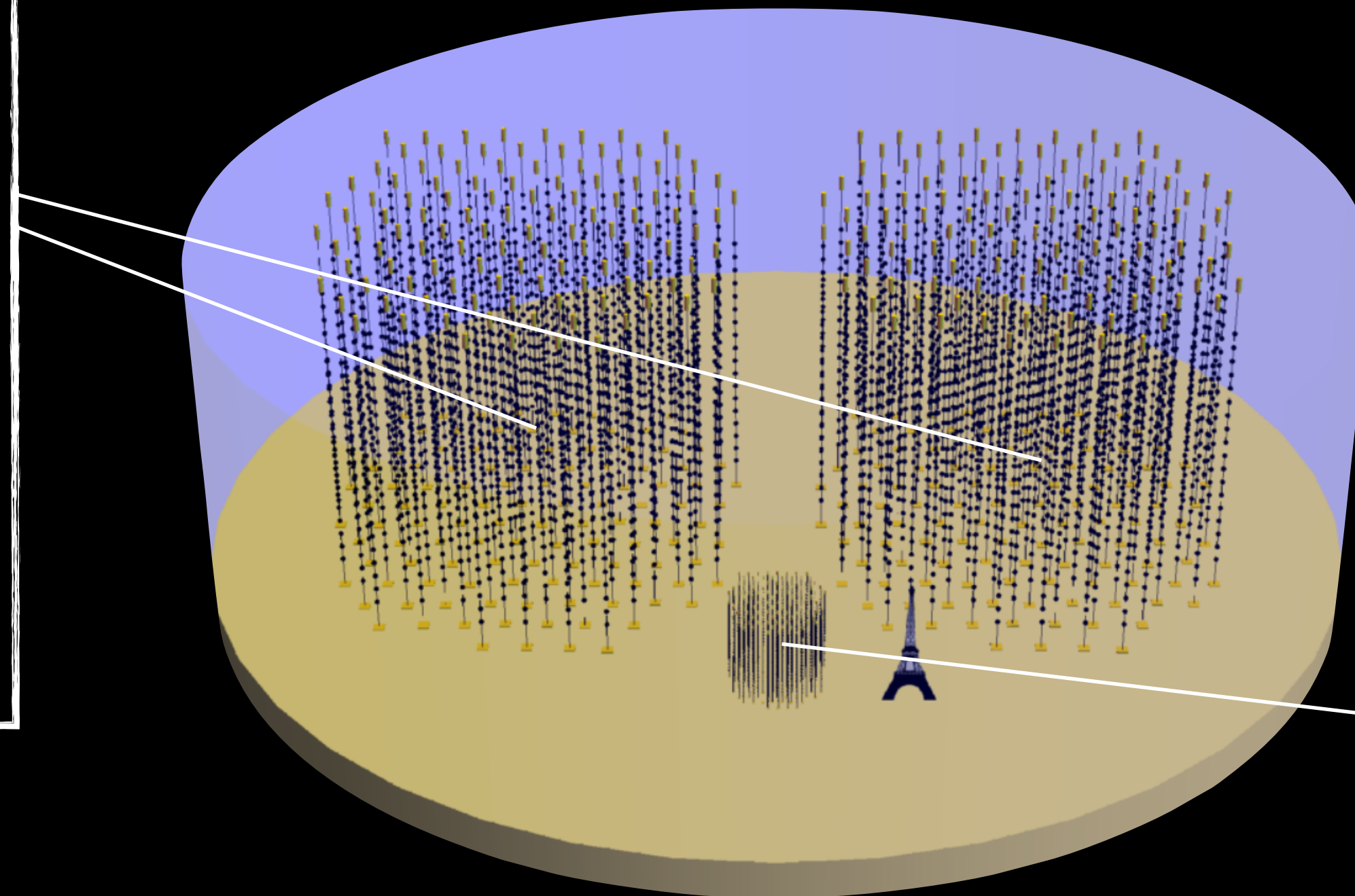


ARCA

100 GeV — 100 PeV
3500m de fond — 1km³

90m entre les lignes
36m entre les DOMs

Actuel: 28 lines
Final (2027): 230 lines



ORCA

3 GeV — 100 GeV
2500m de fond — 7 Mt

28m entre les lignes
9m entre les DOMs

Actuel: 23 lines
Final (2027): 115 lines

KM3NeT — Les difficultés d'un détecteur marin

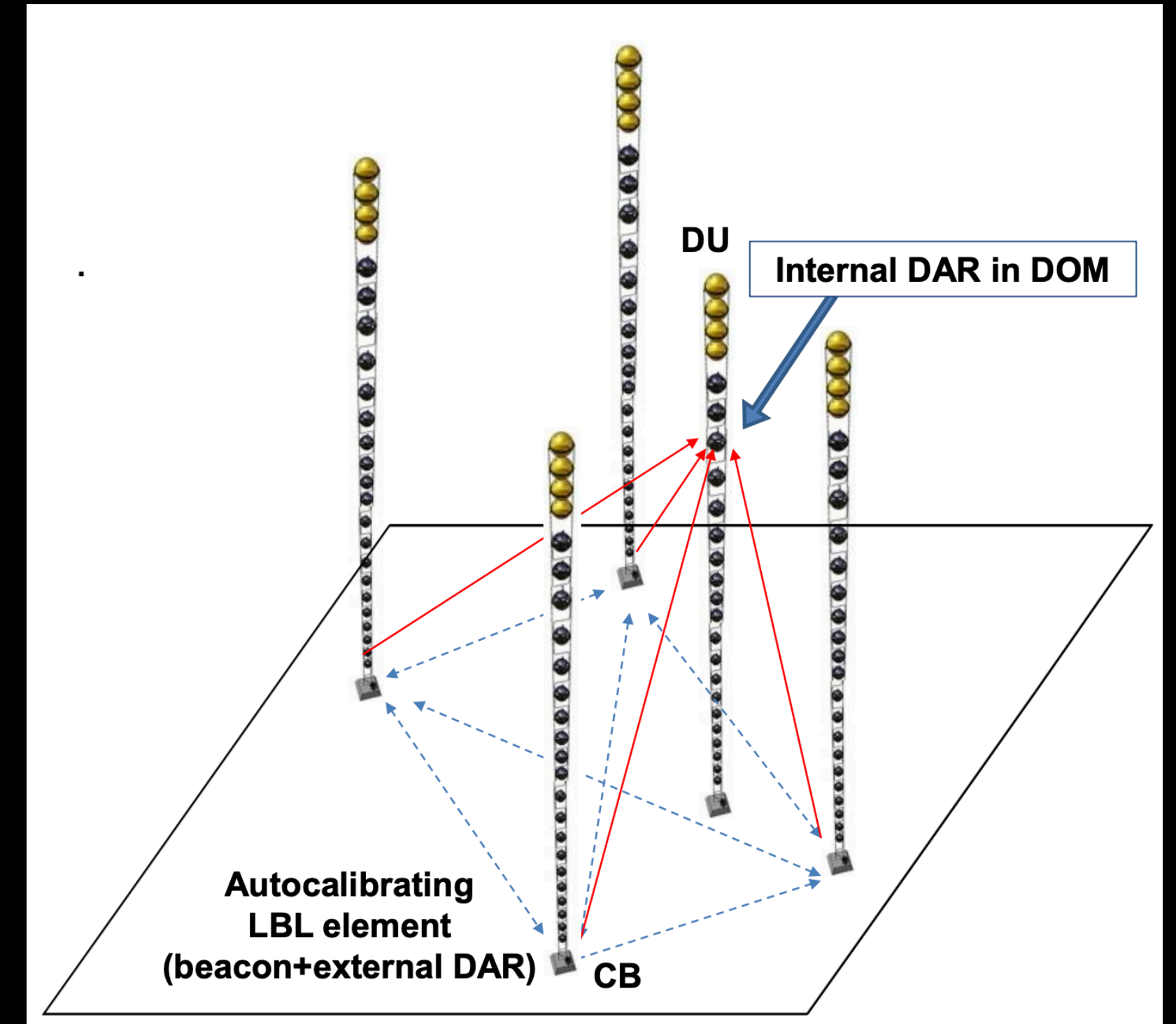


Bioluminescence

Plancton, etc...
(Exemple au Mexique)

Radioactivité

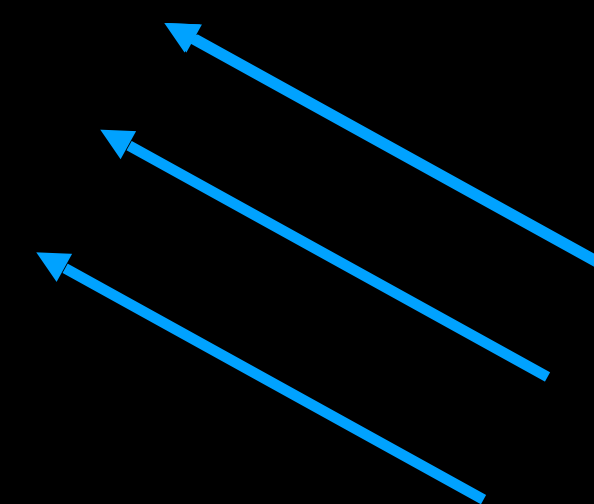
Potassium 40, etc...



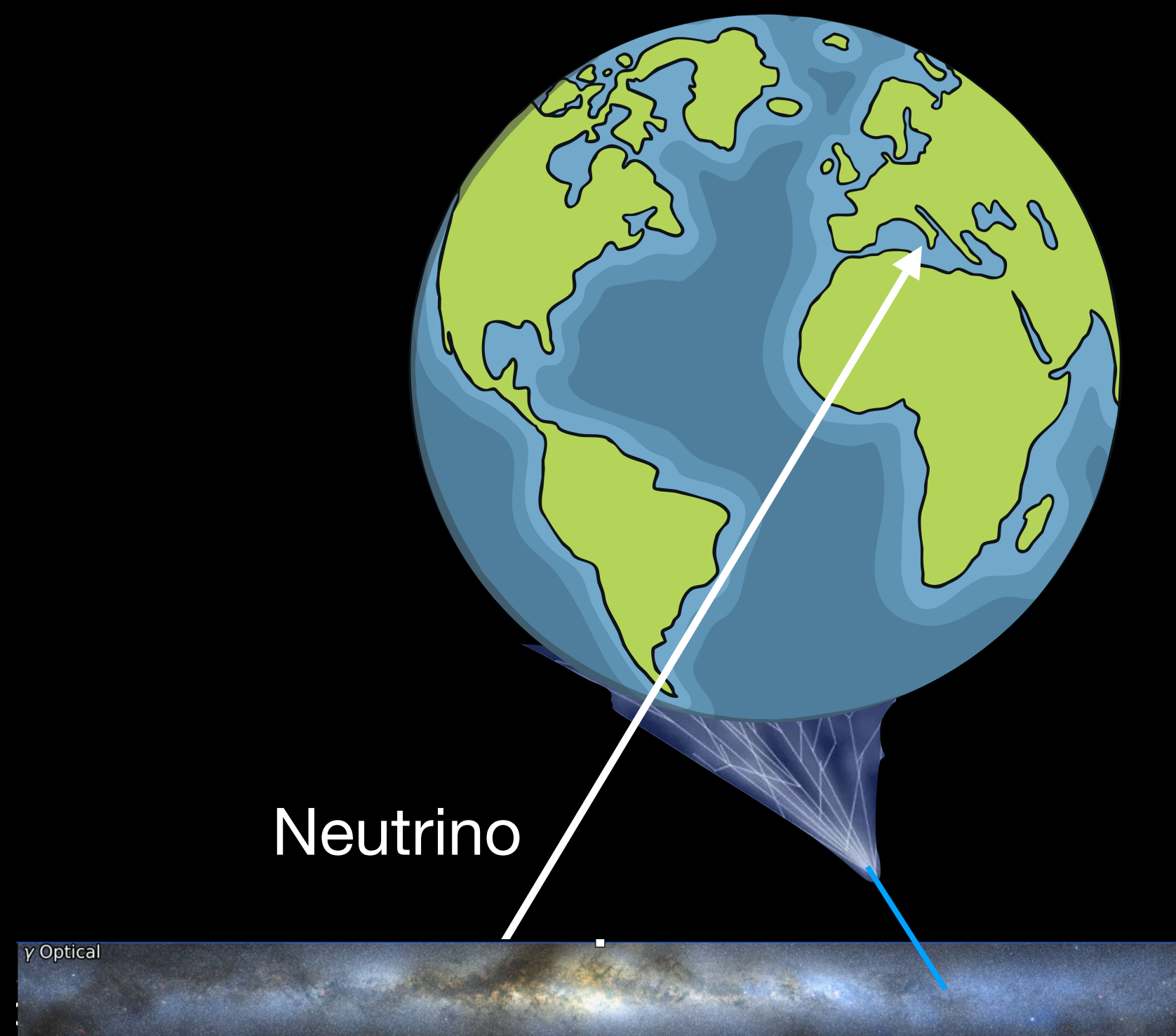
Courants marins

Balises acoustiques

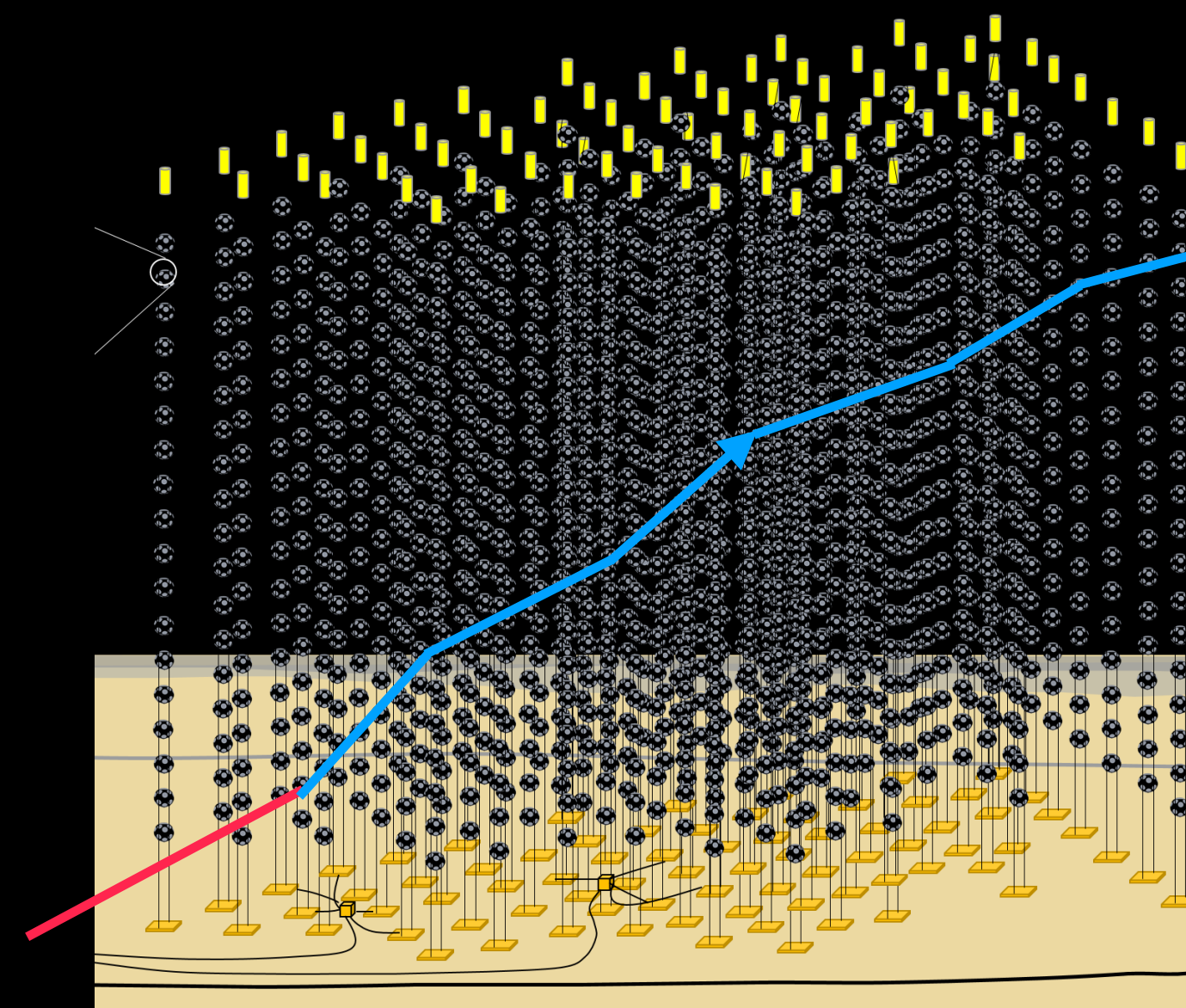
Radioactivité neutrons
Plusieurs 0ms en 10ns



KM3NeT – Les avantages

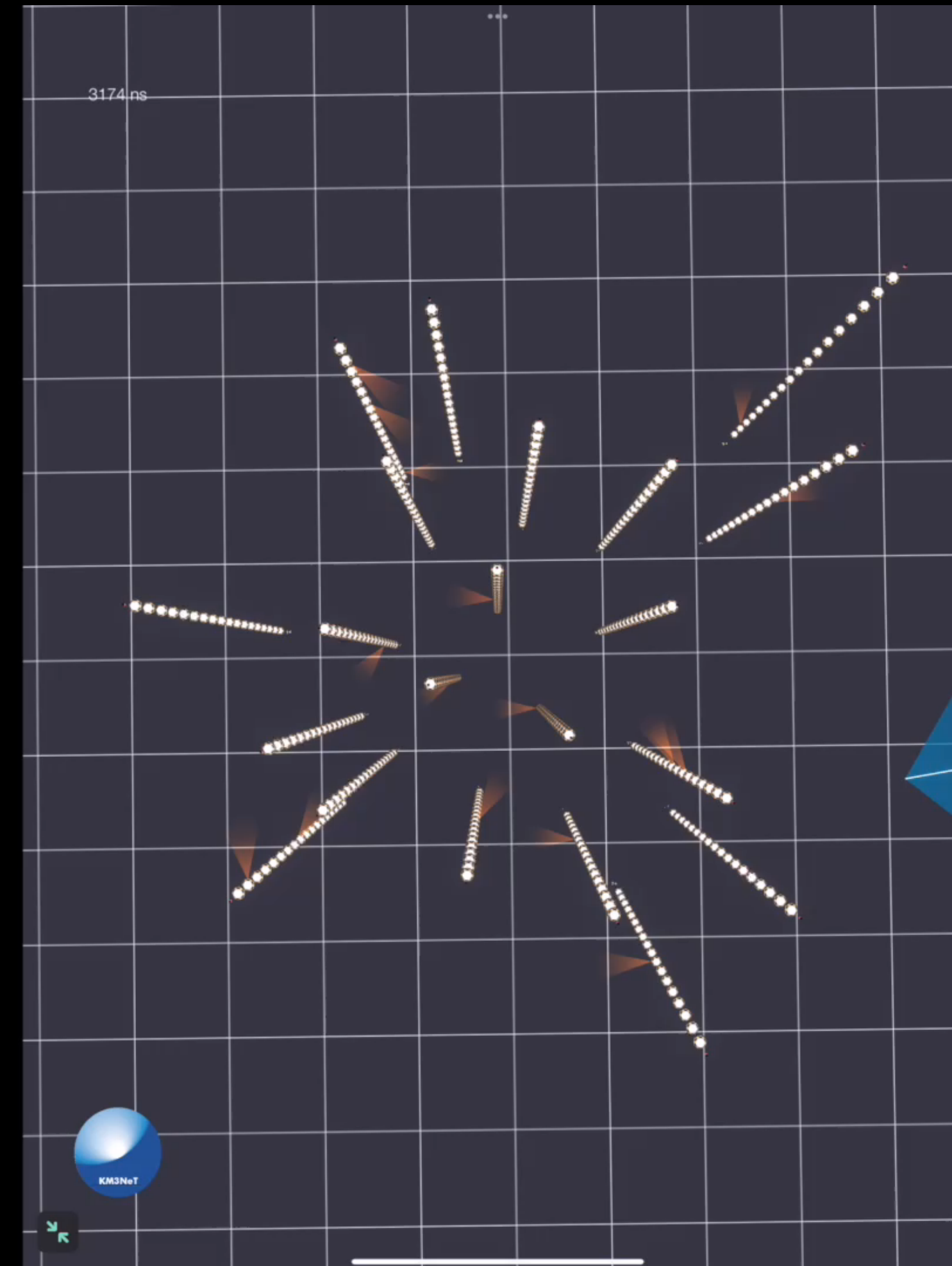
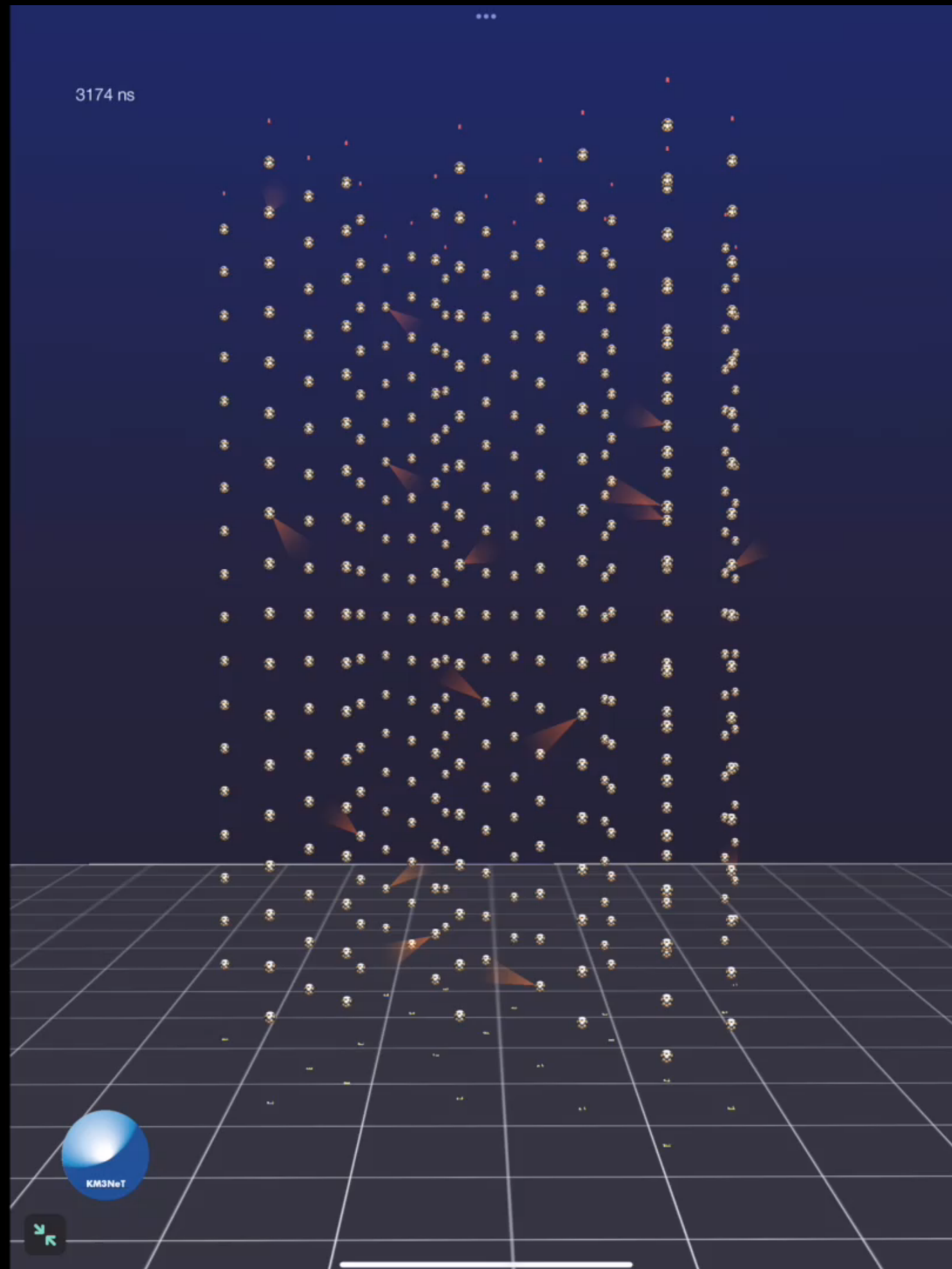


Sensibilité accrue au ciel sud
(plan galactique)



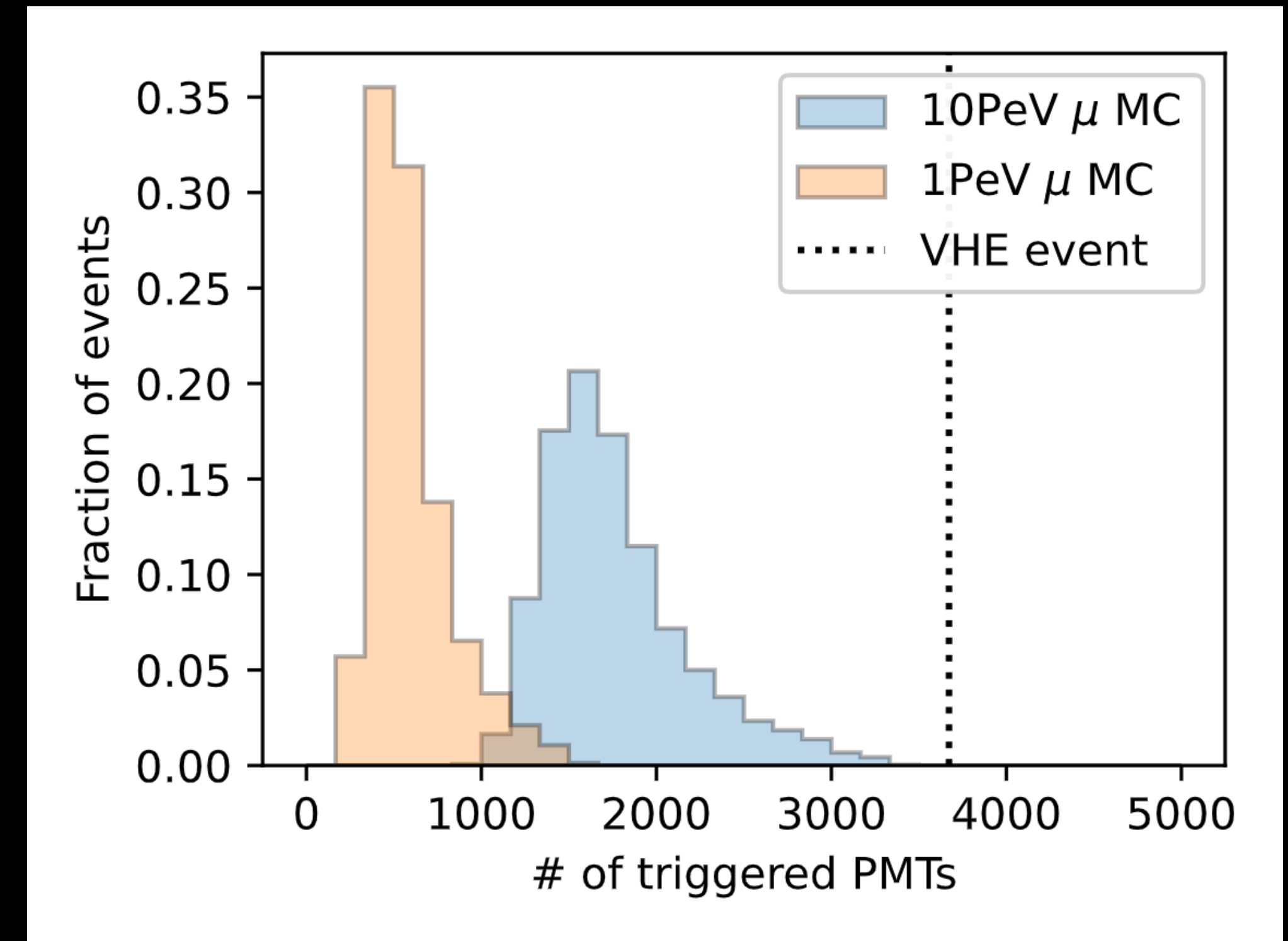
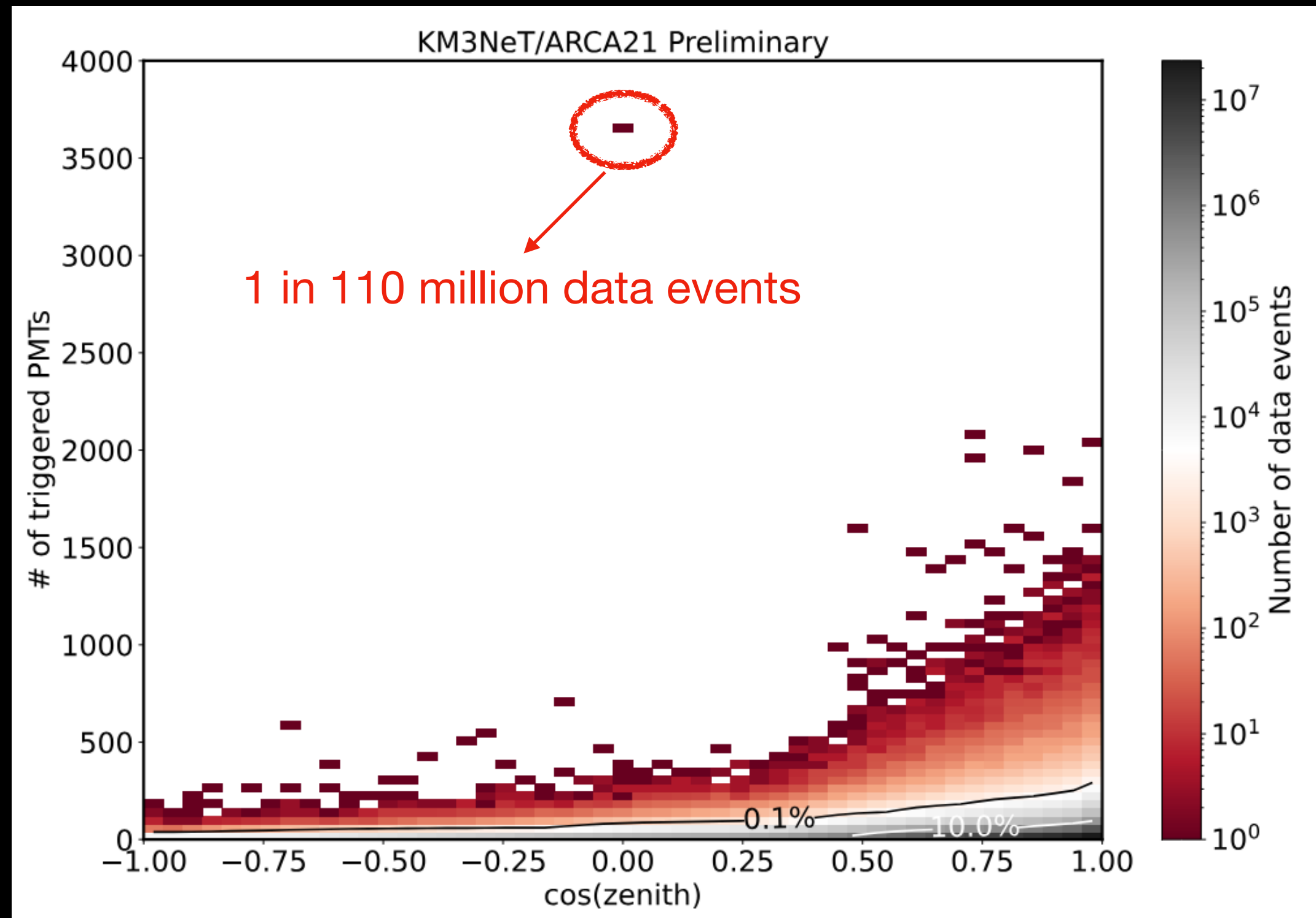
Meilleure résolution angulaire
(eau de mer vs glace)

KM3NeT – Un événement très énergétique



Un événement très énergétique

35% des photomultiplicateurs d'ARCA (3672)

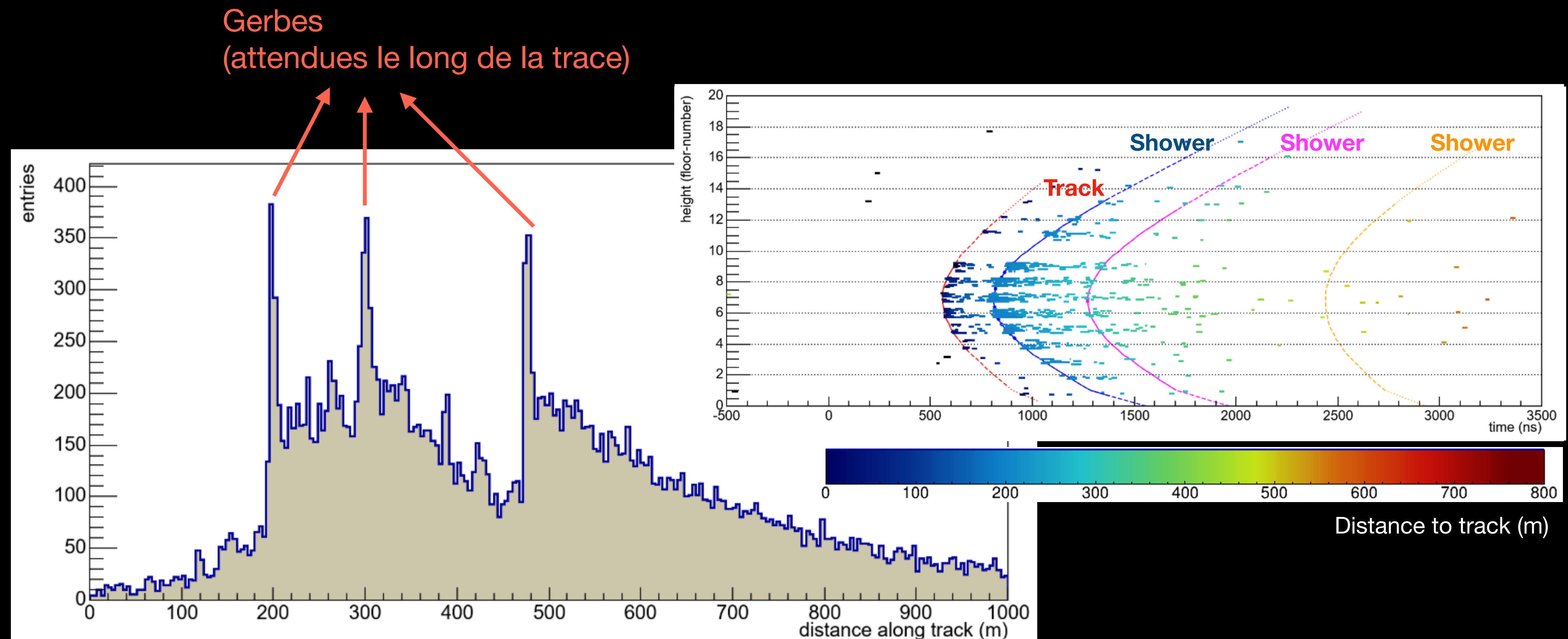


J. Coelho, KM3NeT Coll., Presentation @ Neutrino 2024

Energie de l'événement > 10 PeV
1° au dessus de l'horizon (~horizontal)

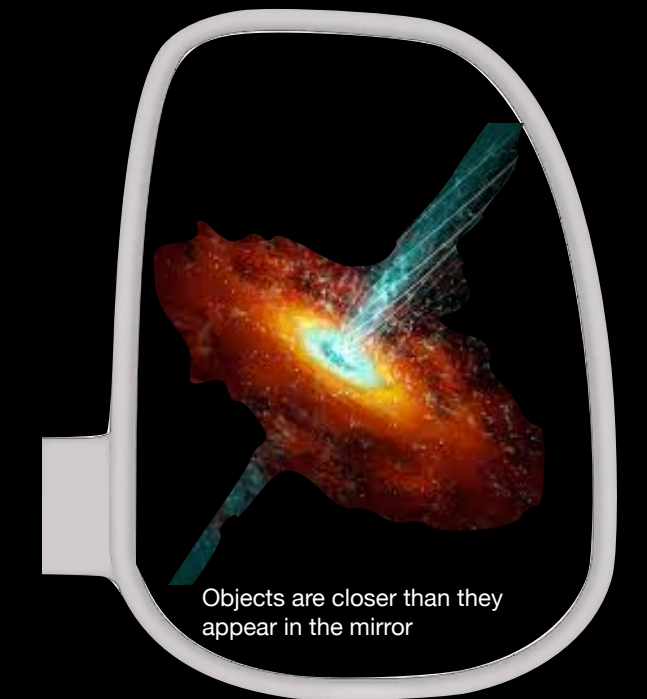
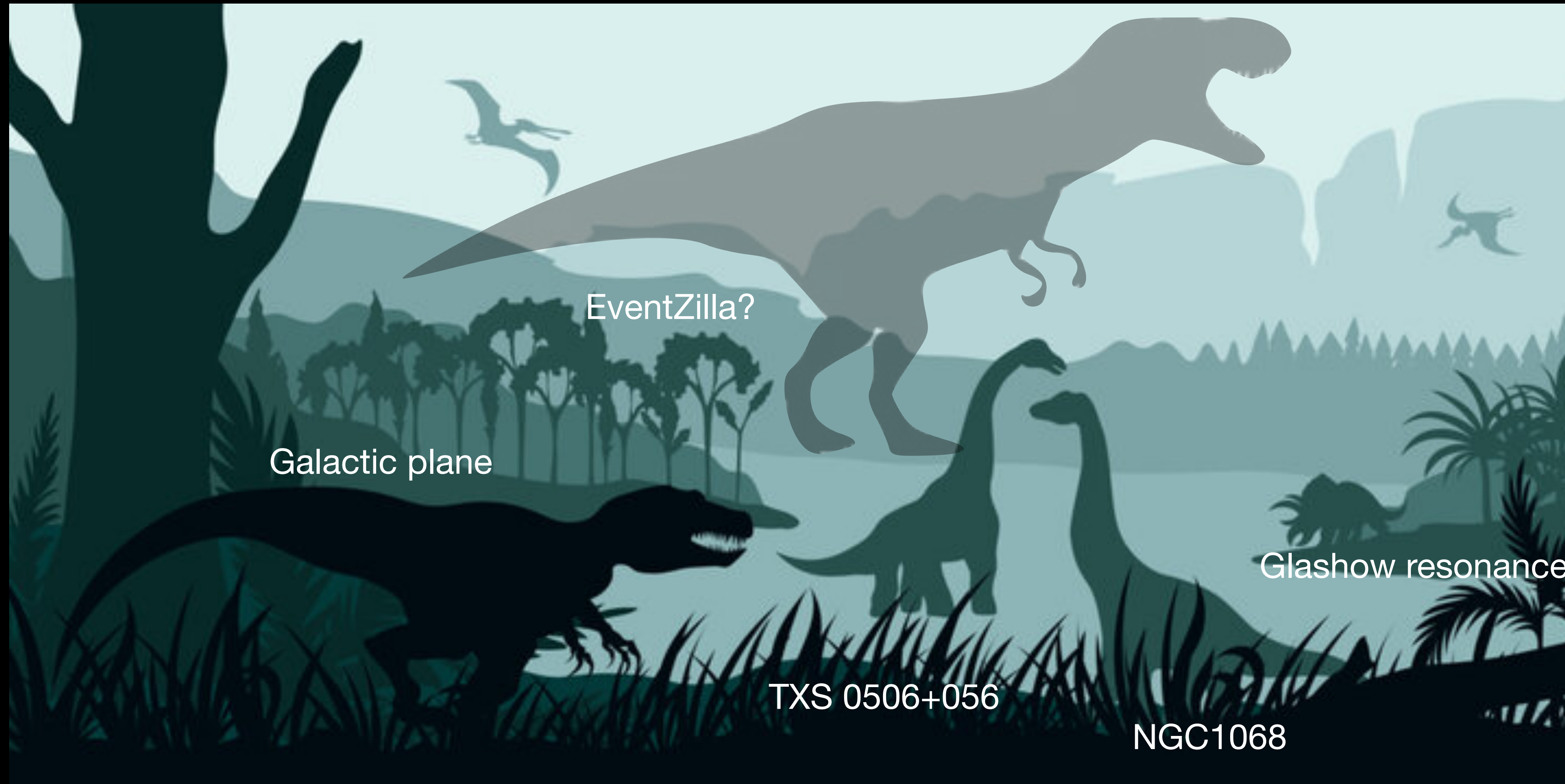
Regarder la structure de l'événement

Trace de muons accompagnée de gerbes



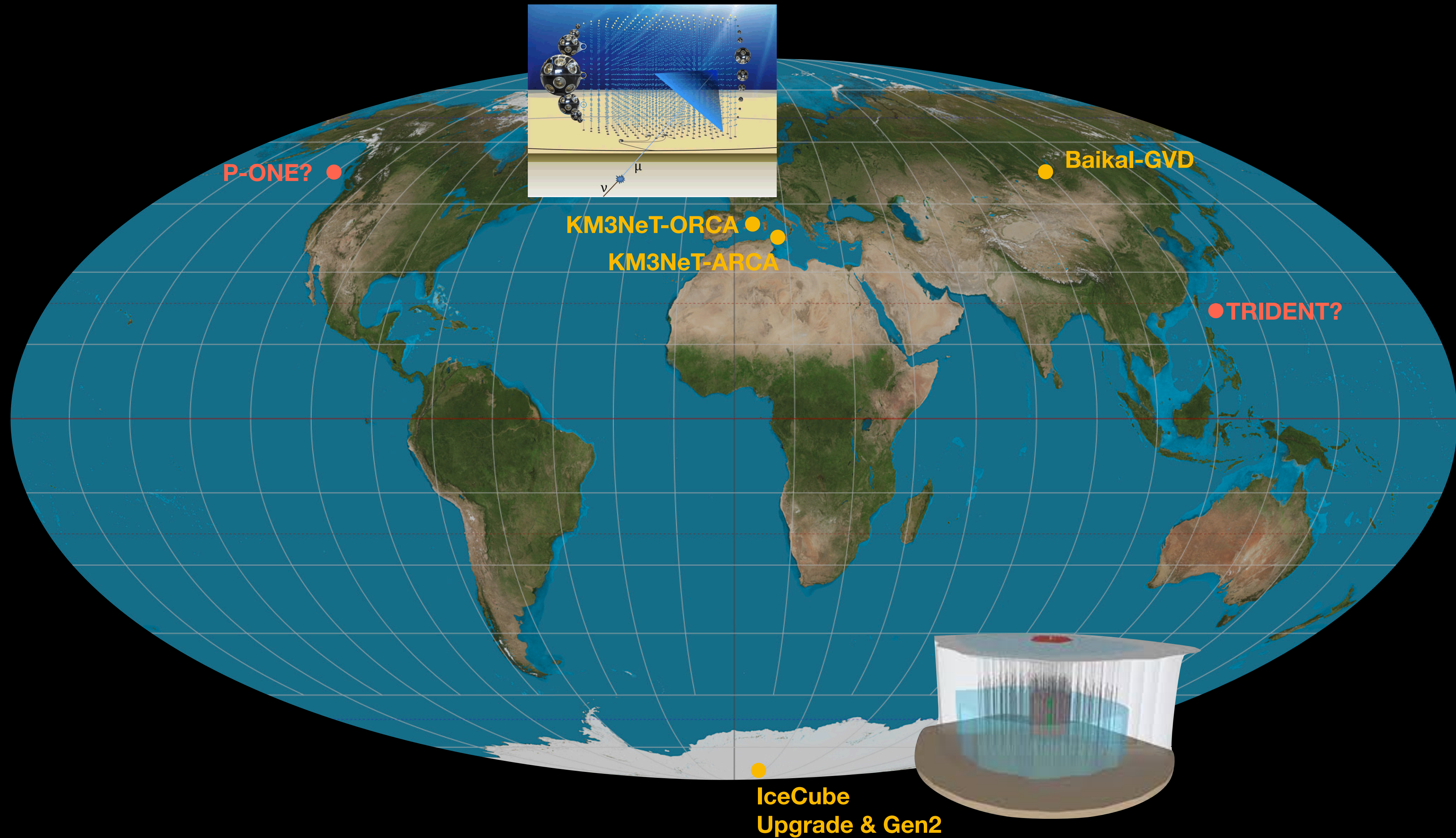
Conclusion – Outlook

The astrophysical neutrino fauna: from shadows to pictures

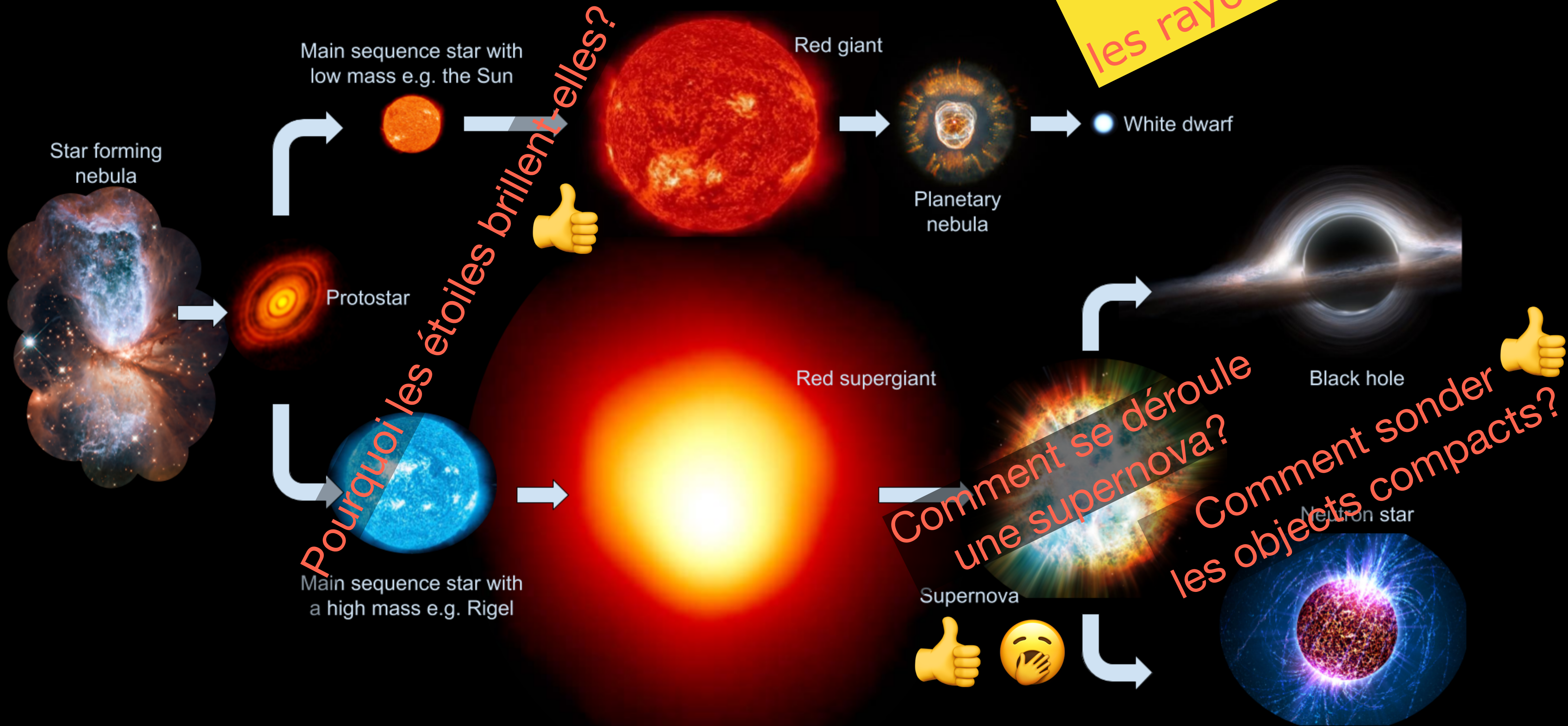


Discoveries can be closer than they appear...

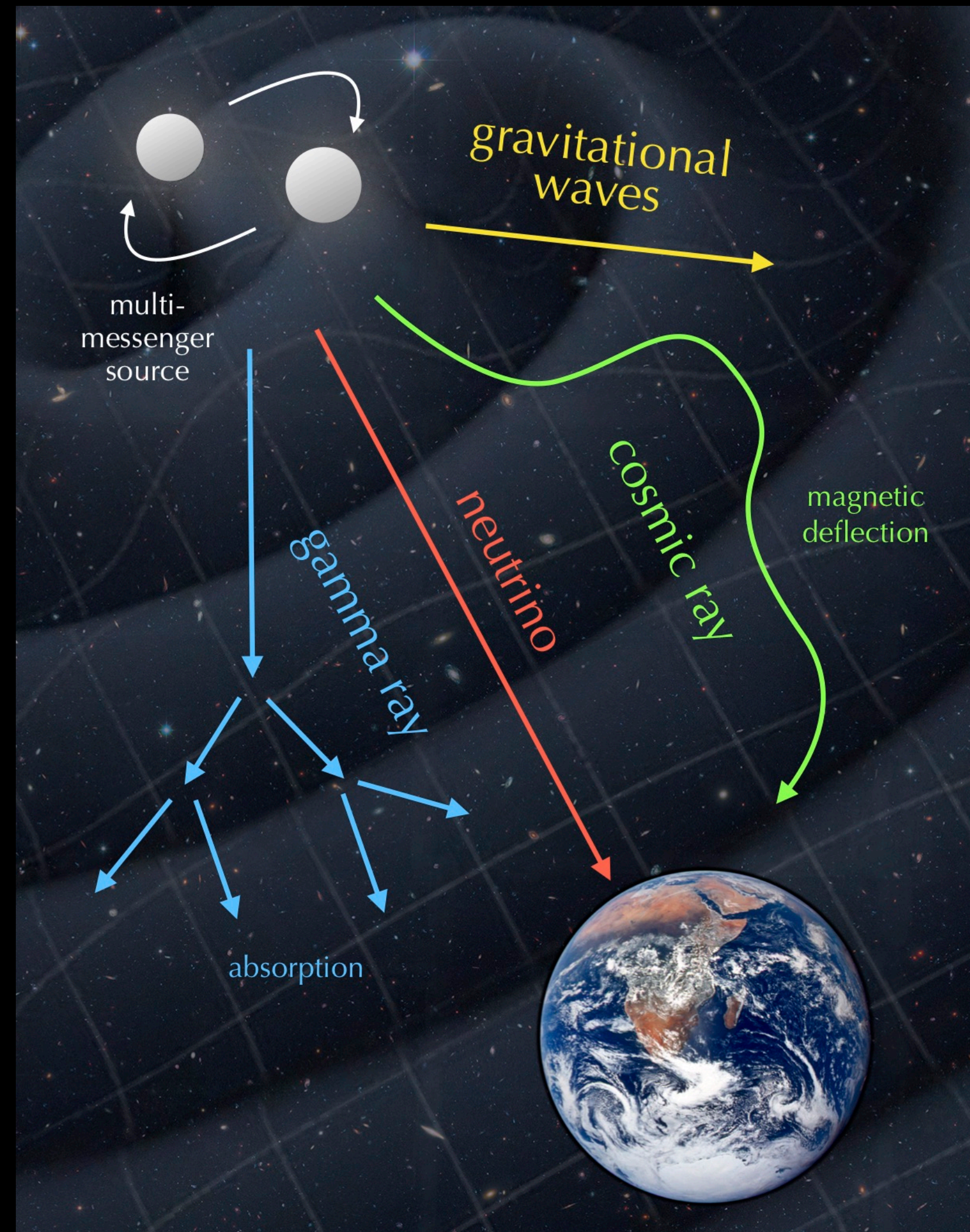
Les détecteurs futurs



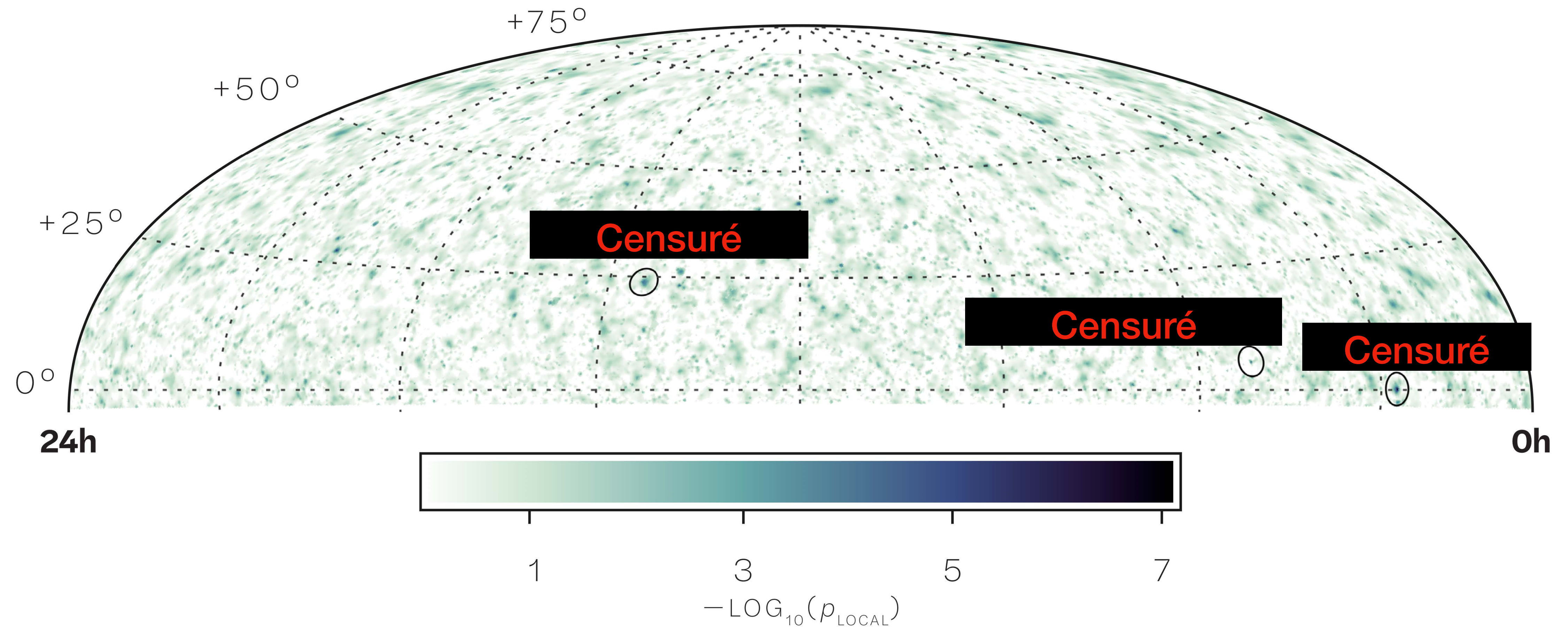
Que nous reste t'il?



L'avènement du multi-messenger



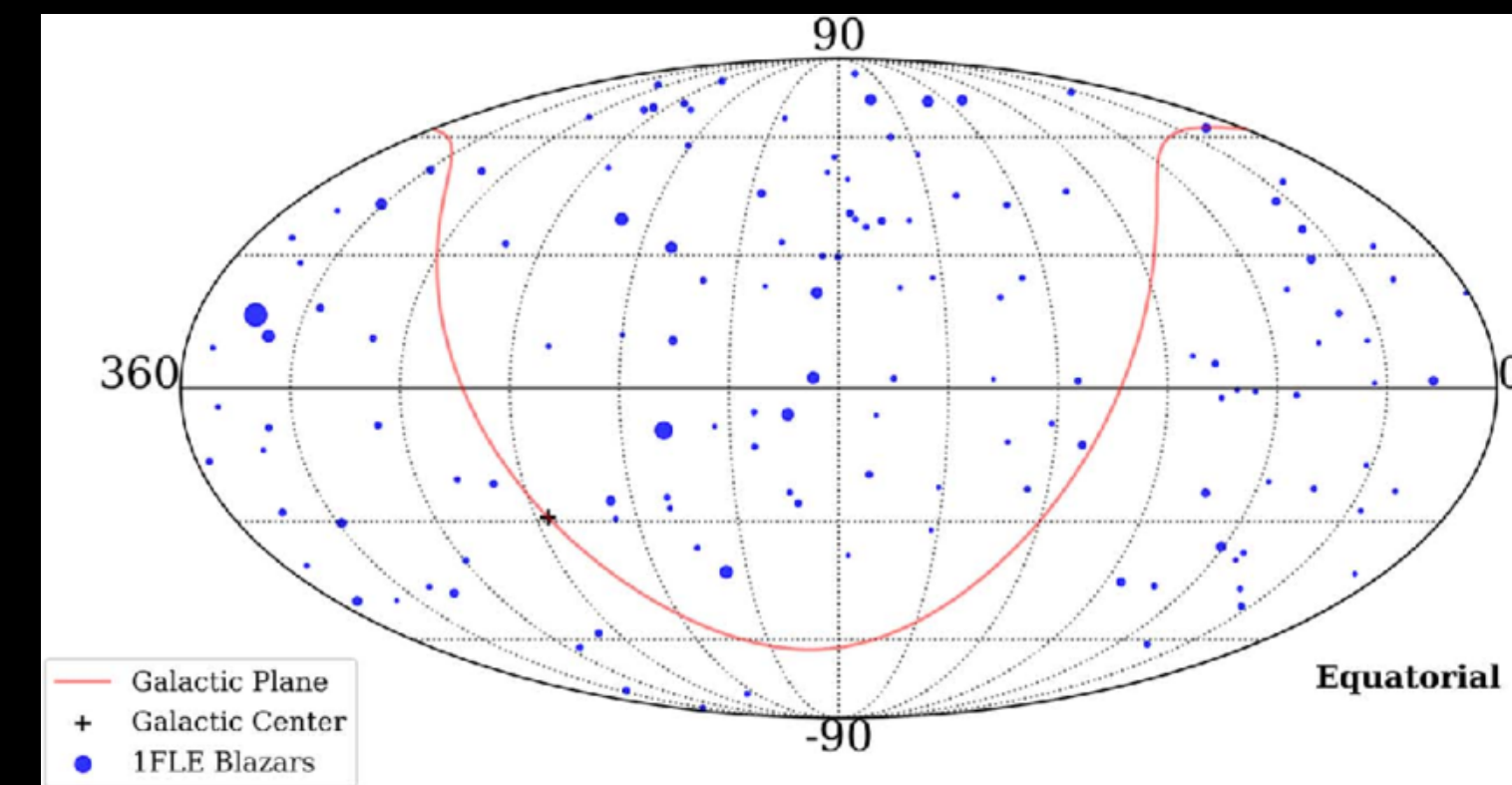
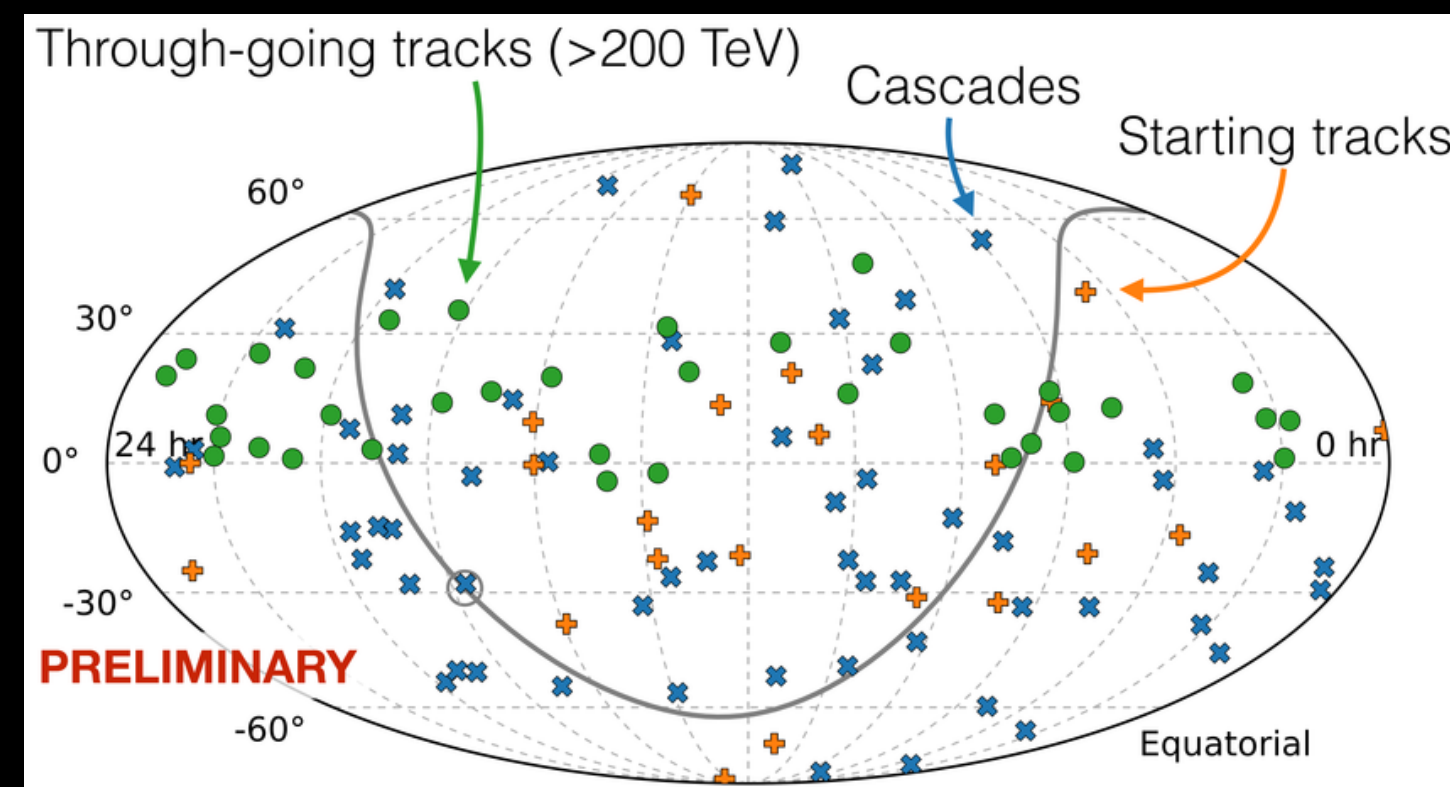
Rechercher des sources – IceCube seul



- Aucun cluster significatif...facteur d'essai trop grand

Suivi d'observations — Les neutrinos

Comparer les positions et temps des neutrinos et d'autres messagers



IceCube

Traces, ciel nord, 3186 jours

- 670,000 neutrinos
- 0.4° résolution @ 100 TeV

Recherche de coïncidences

Coïncidence significative?

FERMI-LAT

Sources ponctuelles

- > 1GeV, 110 sources
- 95 blazars, 5 AGNs

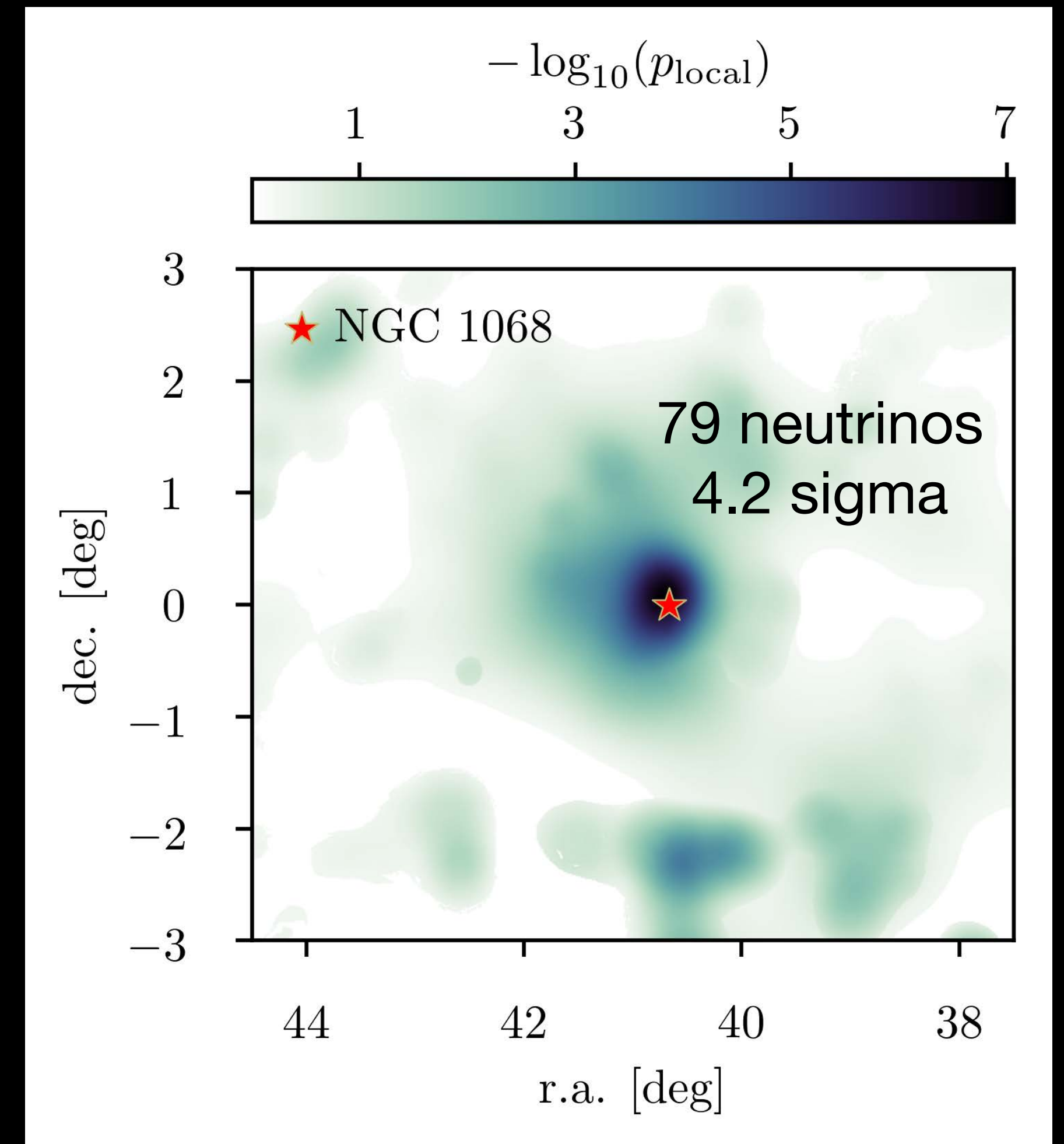
Une source de rayons cosmiques?

IceCube et la galaxie NGC 1068 (Novembre 2022)

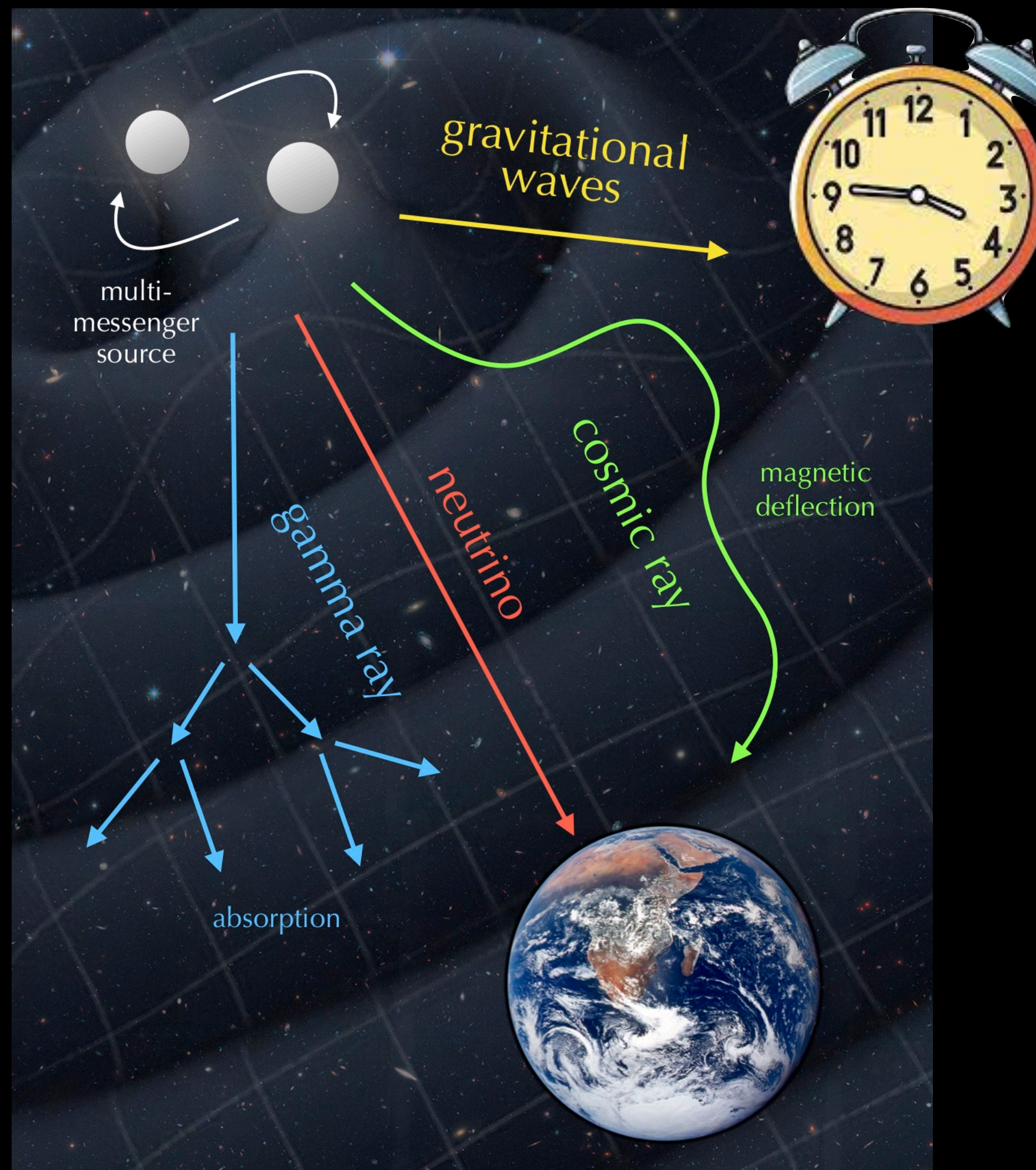


Noyau actif de galaxie
Importante formation d'étoiles

- Origines différentes des neutrinos et rayons γ
- Neutrinos produits à <100 Schwartzchild radii du trou noir?

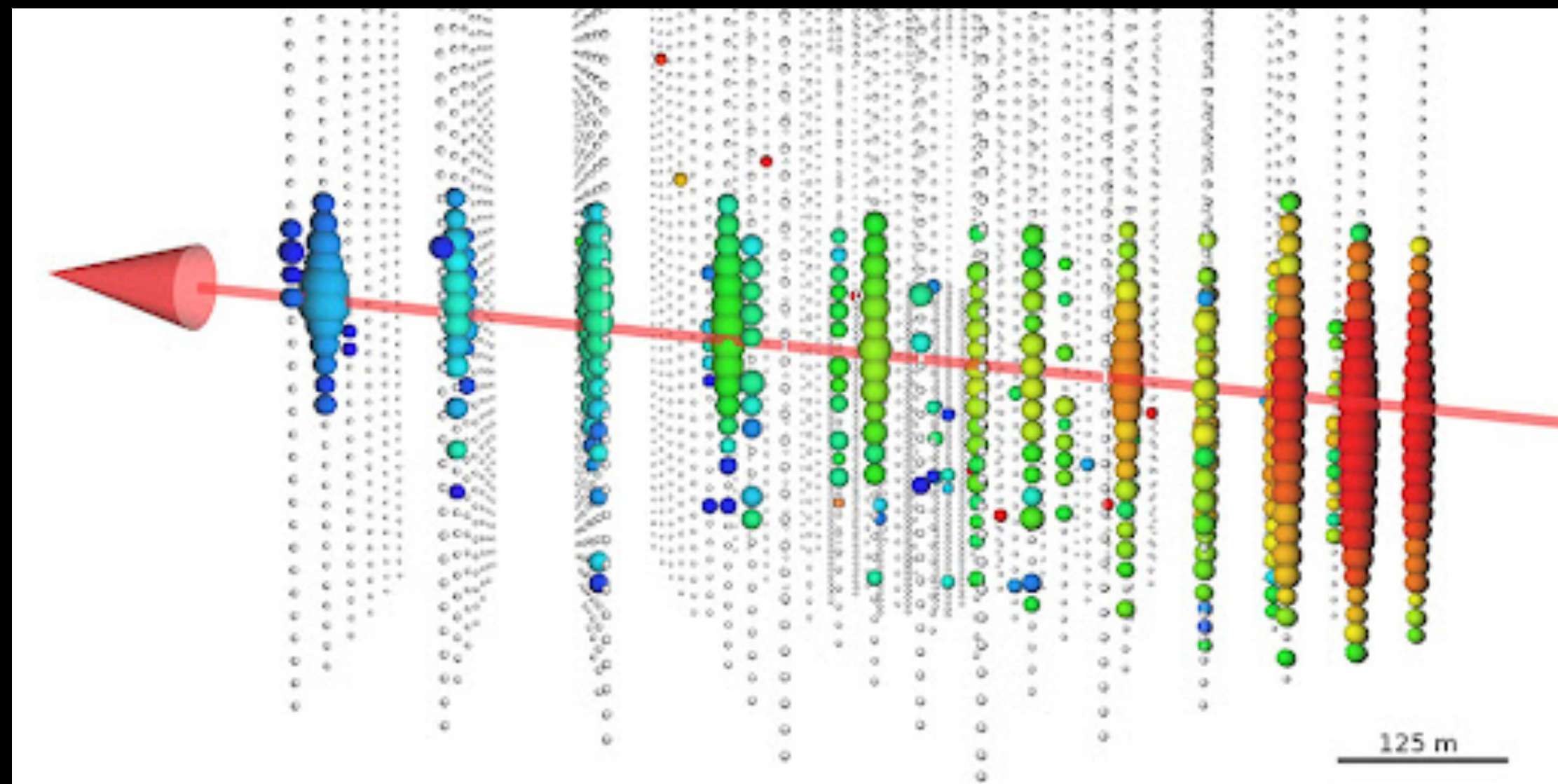


Le multi-messenger en temps réel?



Première observation en temps réel

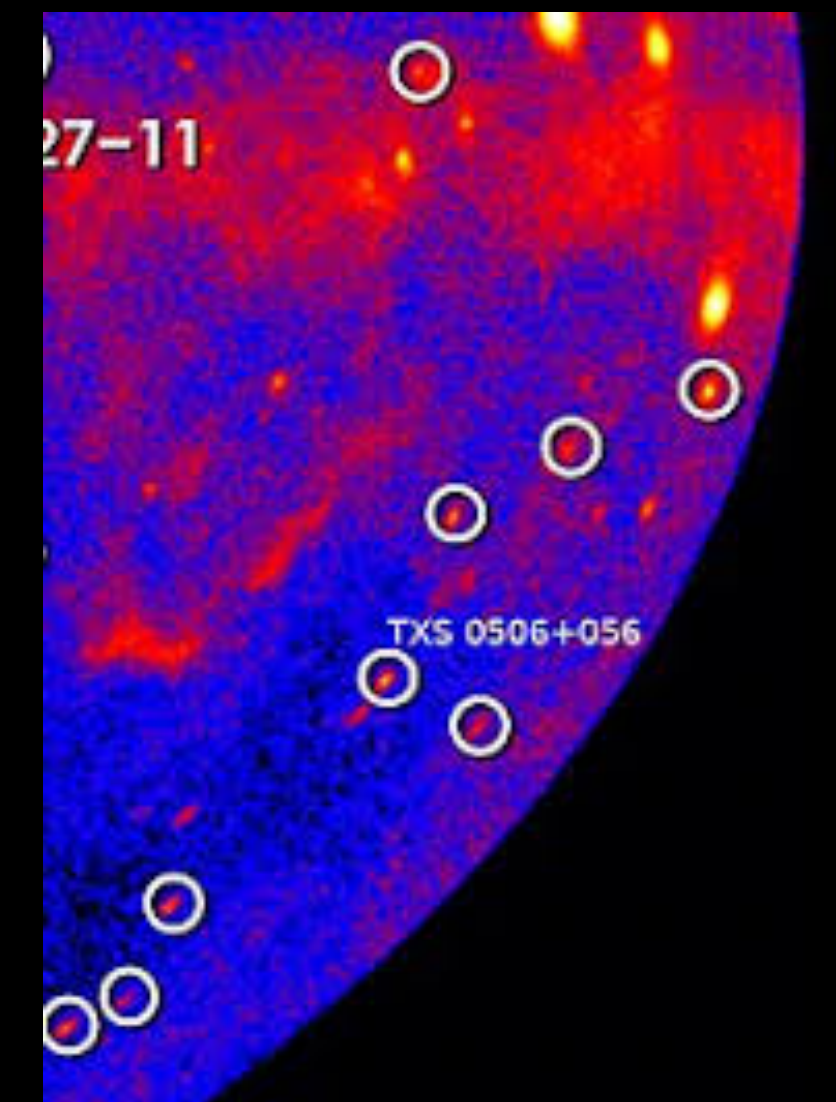
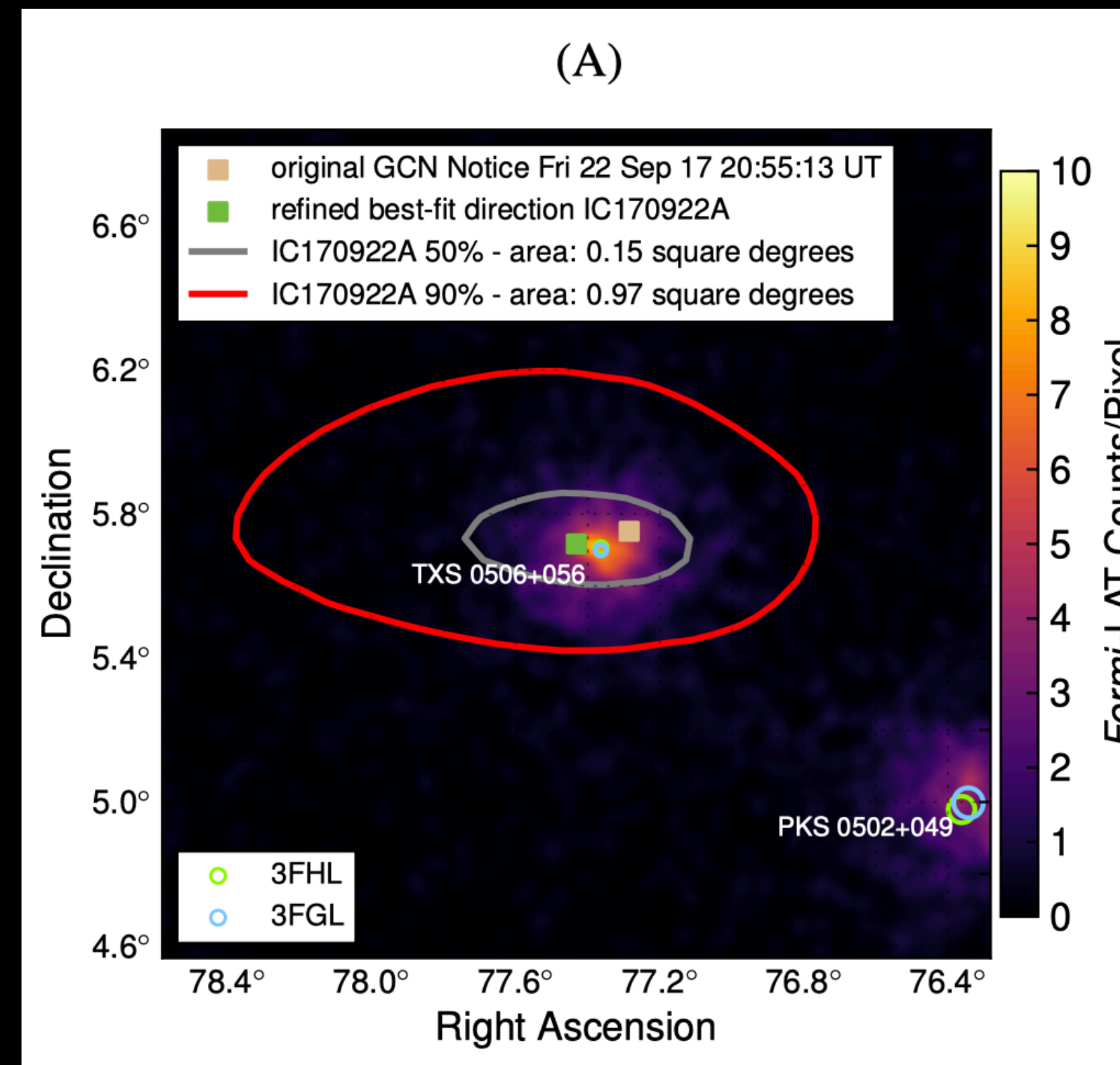
IceCube et le blazar TXS 0506+056



22 Septembre 2017 20:54:30 UTC

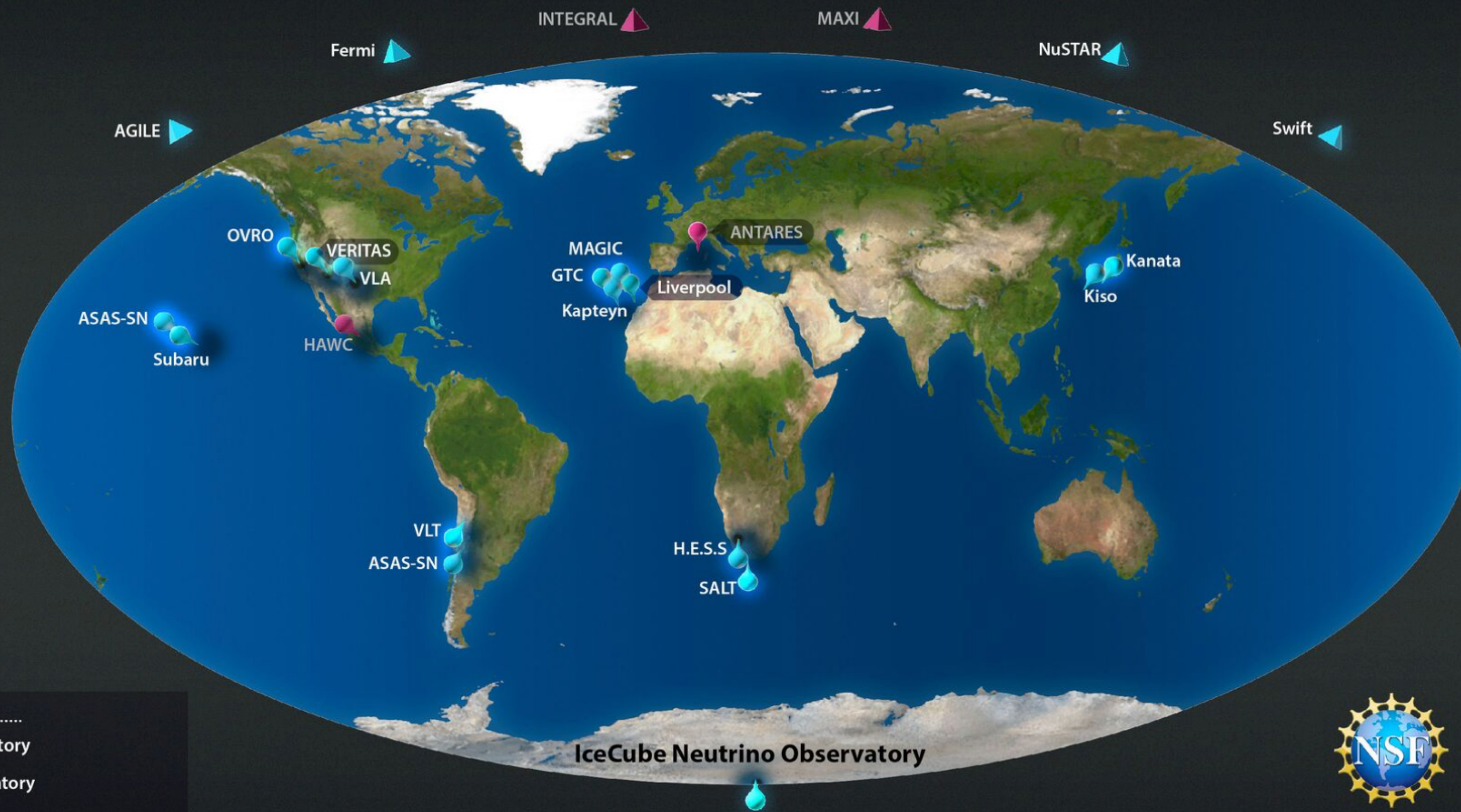
Alerte envoyée 43s plus tard

Coordonnées révisées 4h plus tard



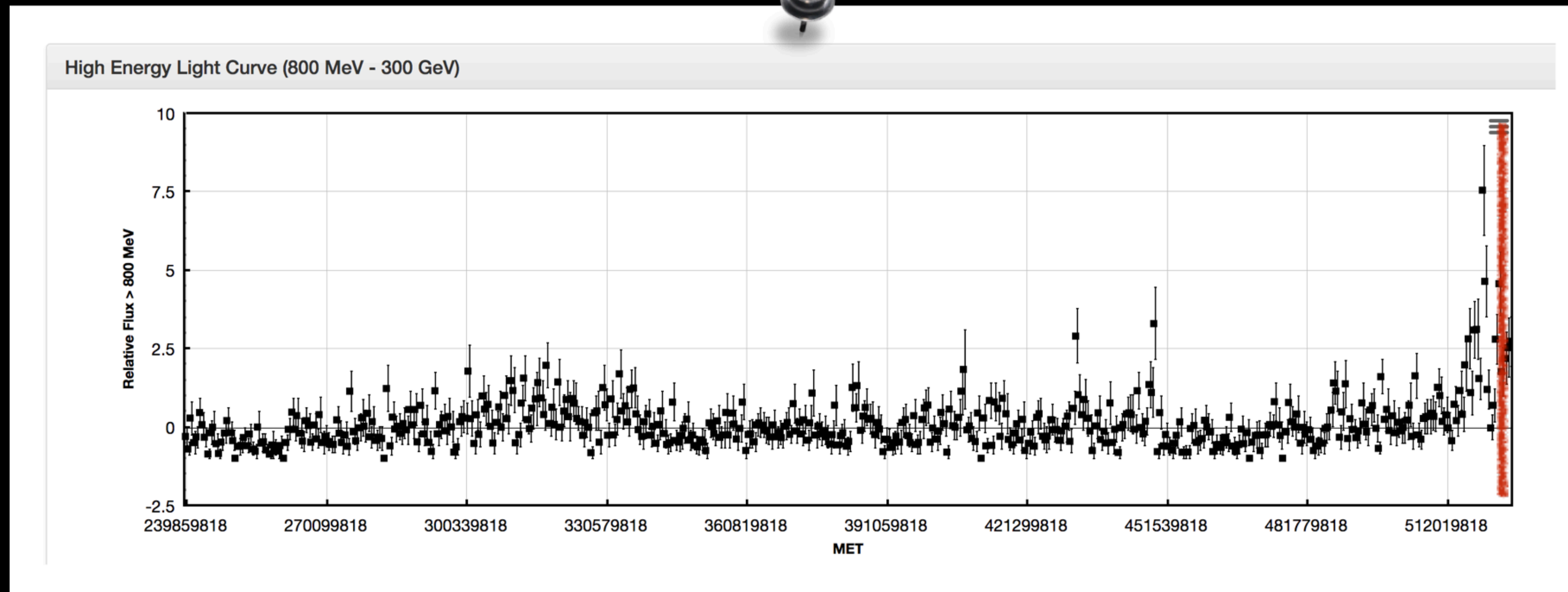
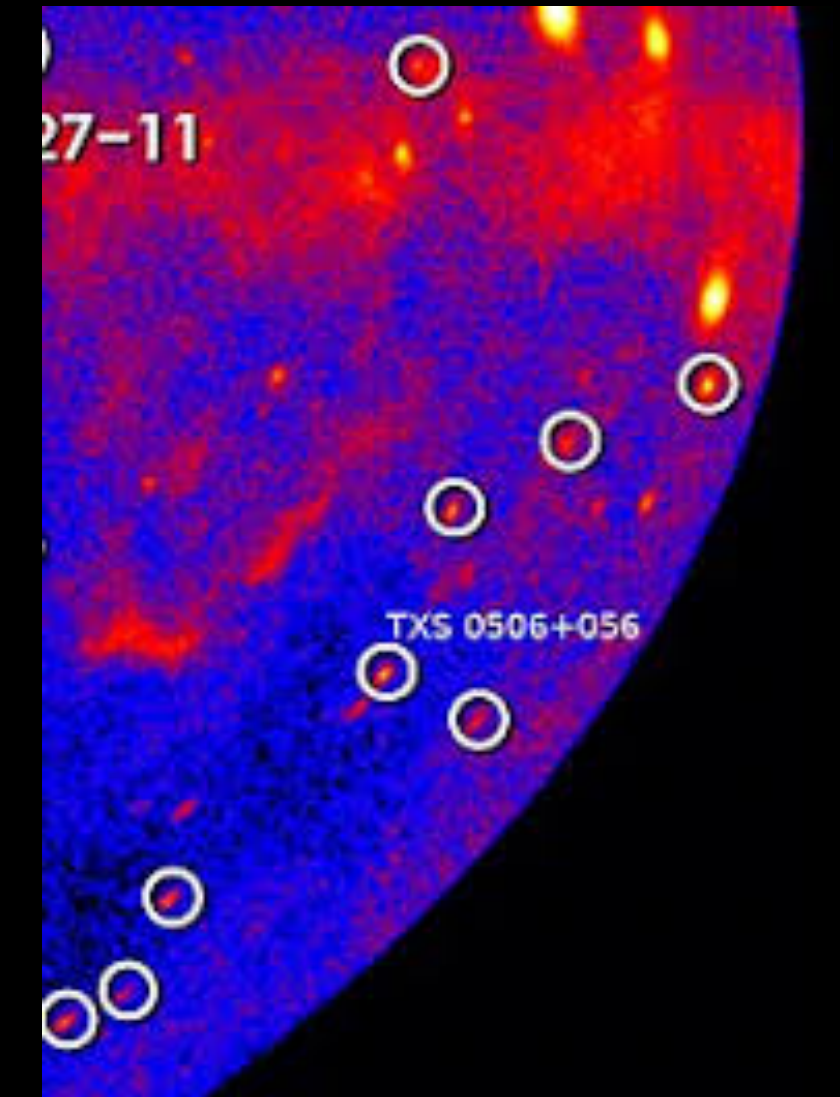
Des télescopes dans le monde entier

Follow-up Observations of IceCube Alert IC170922



Une coïncidence temporelle?

Période d'activité intense en gamma

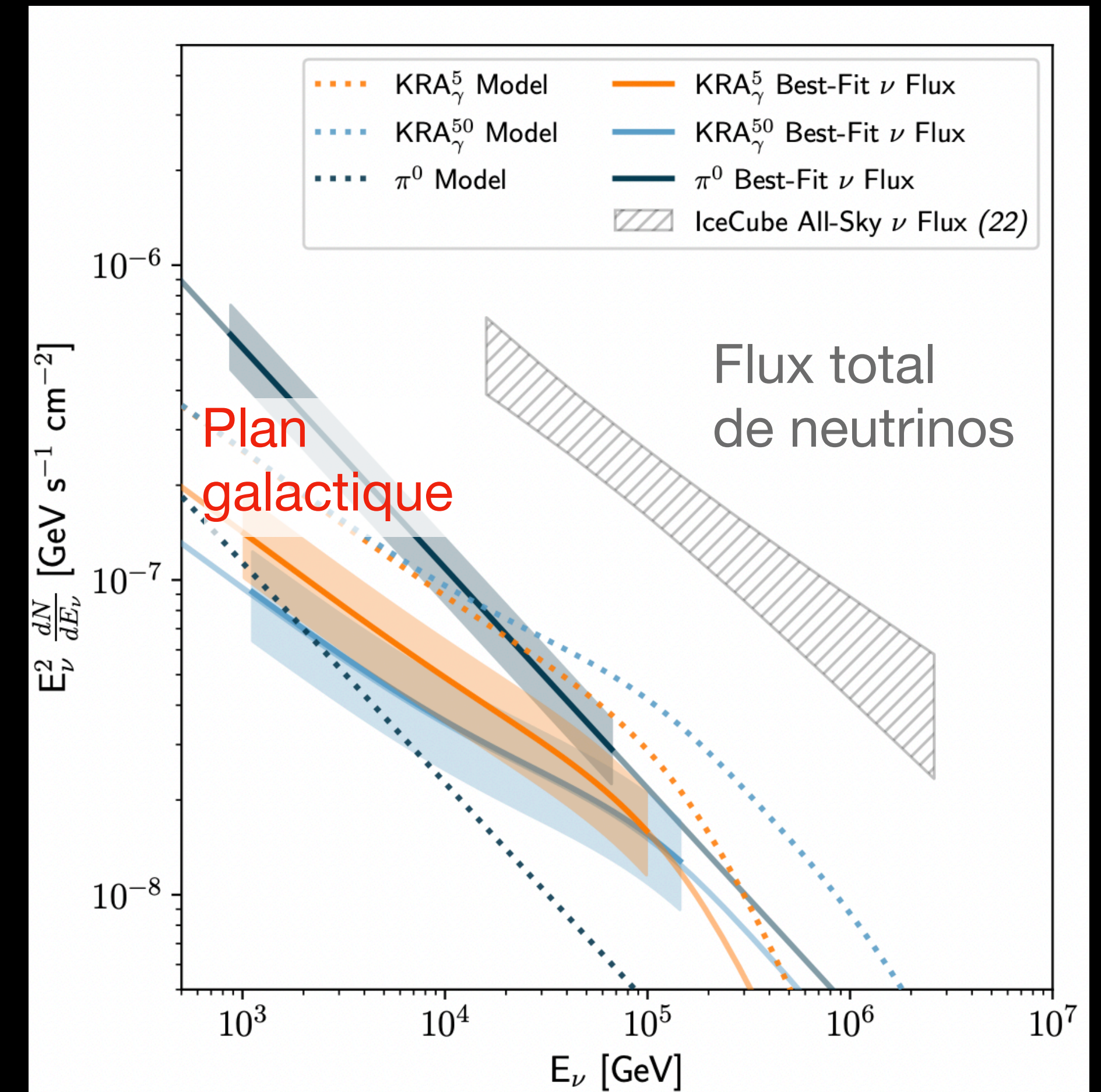
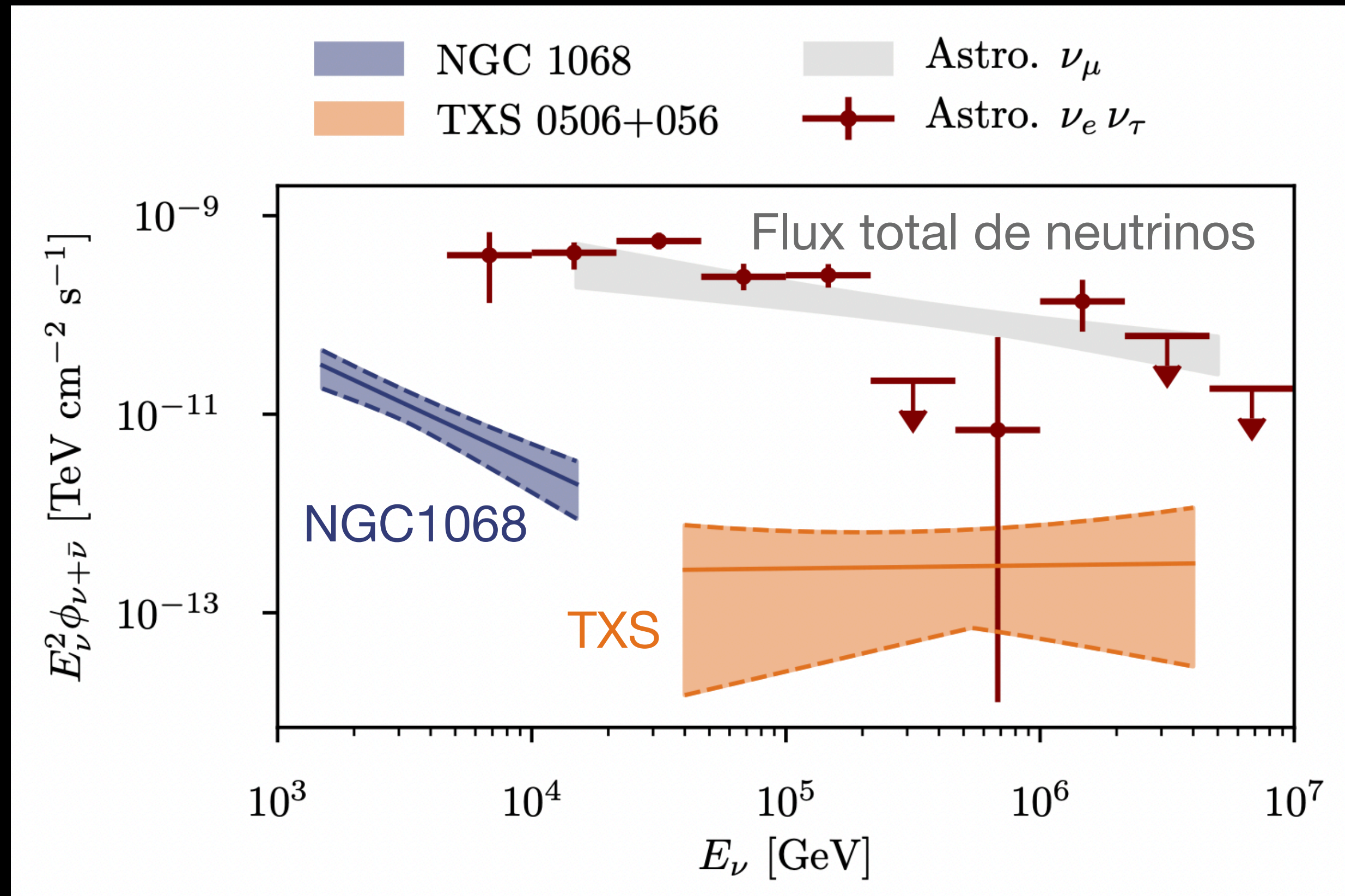


“Such flaring is not unusual for a BL Lac object and would not have been followed up as extensively if the neutrino were not detected.”

Science 361 (2018) 6398

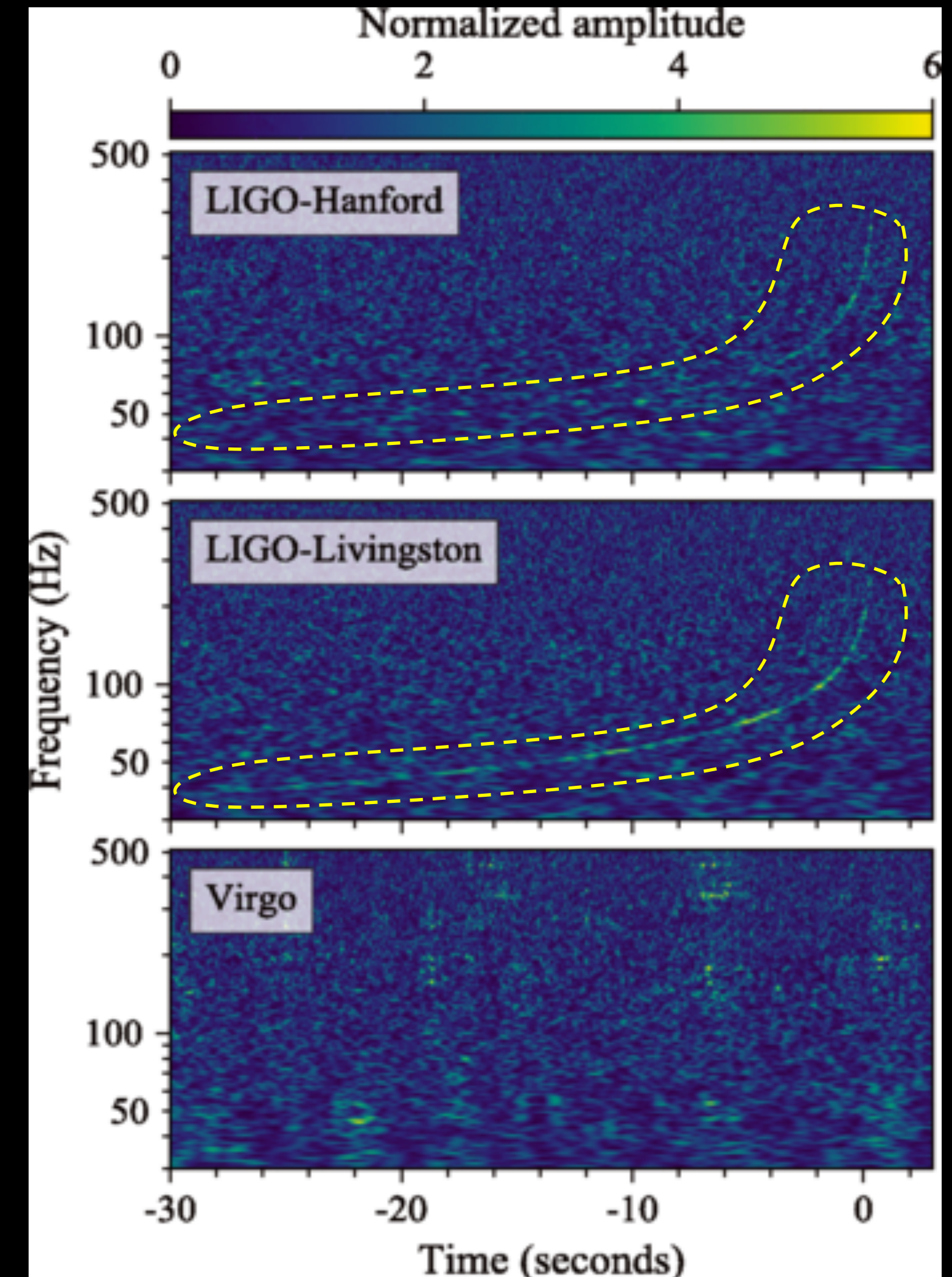
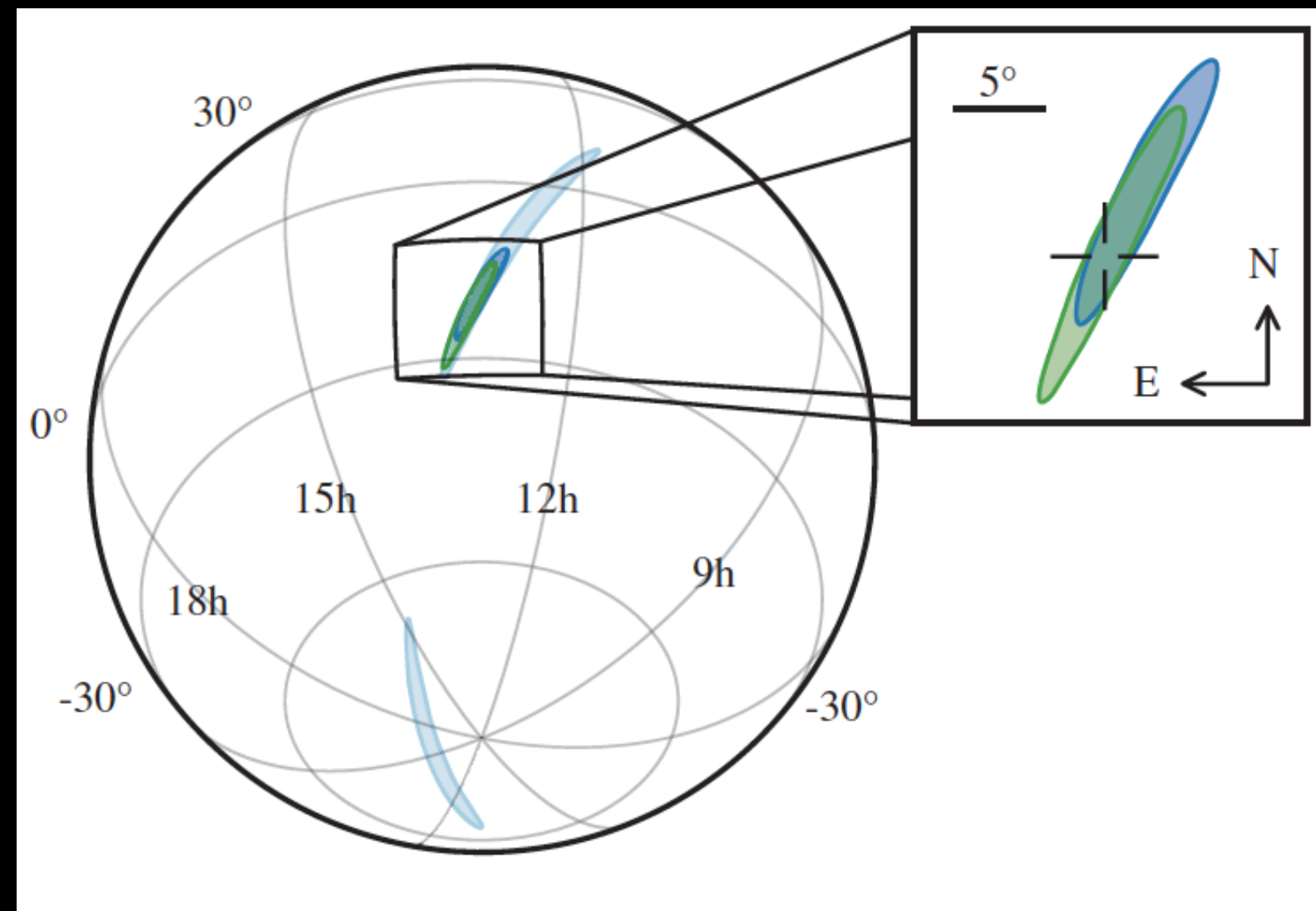
De nombreuses sources encore à découvrir...

Origine de la plupart des neutrinos astrophysiques non identifiée



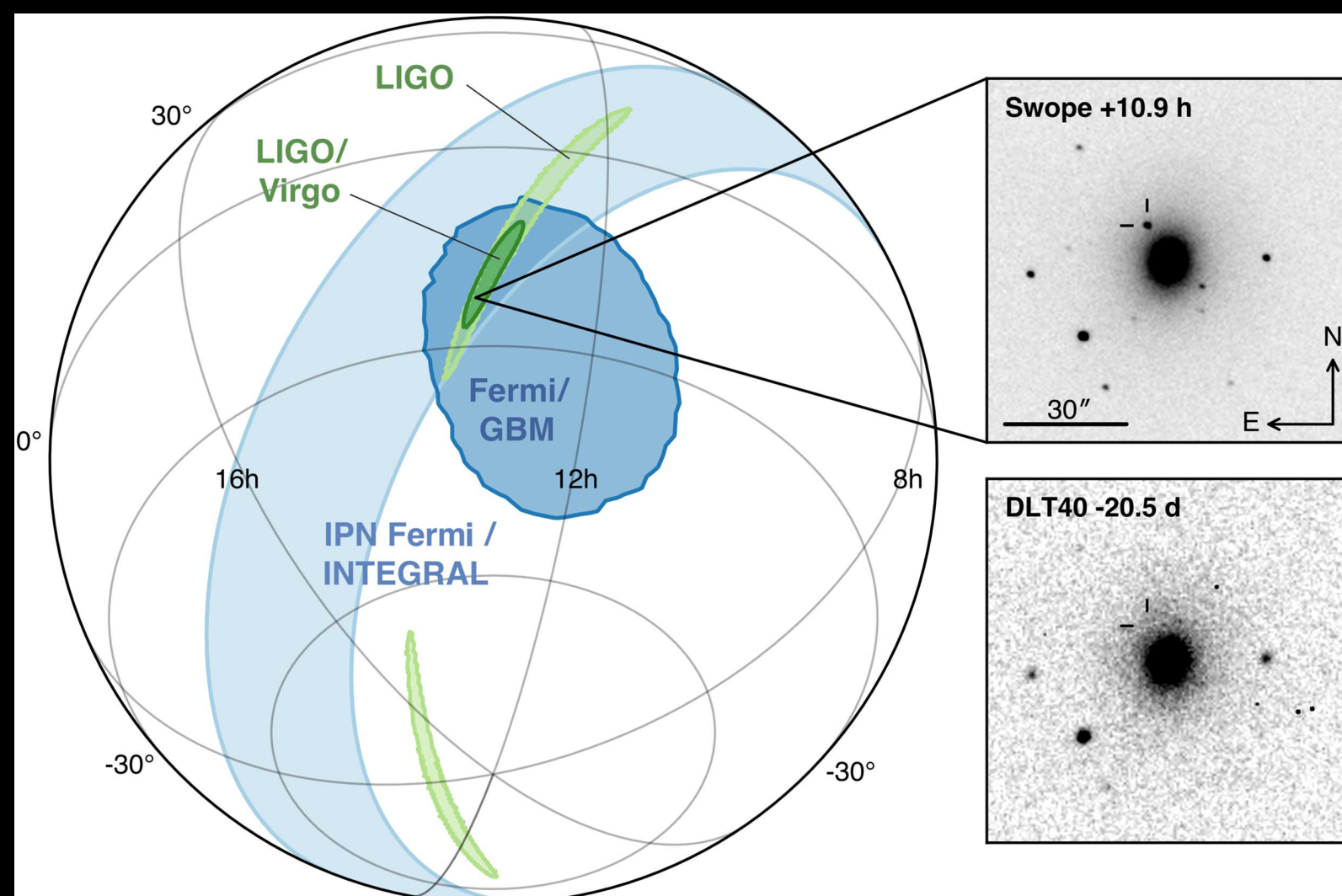
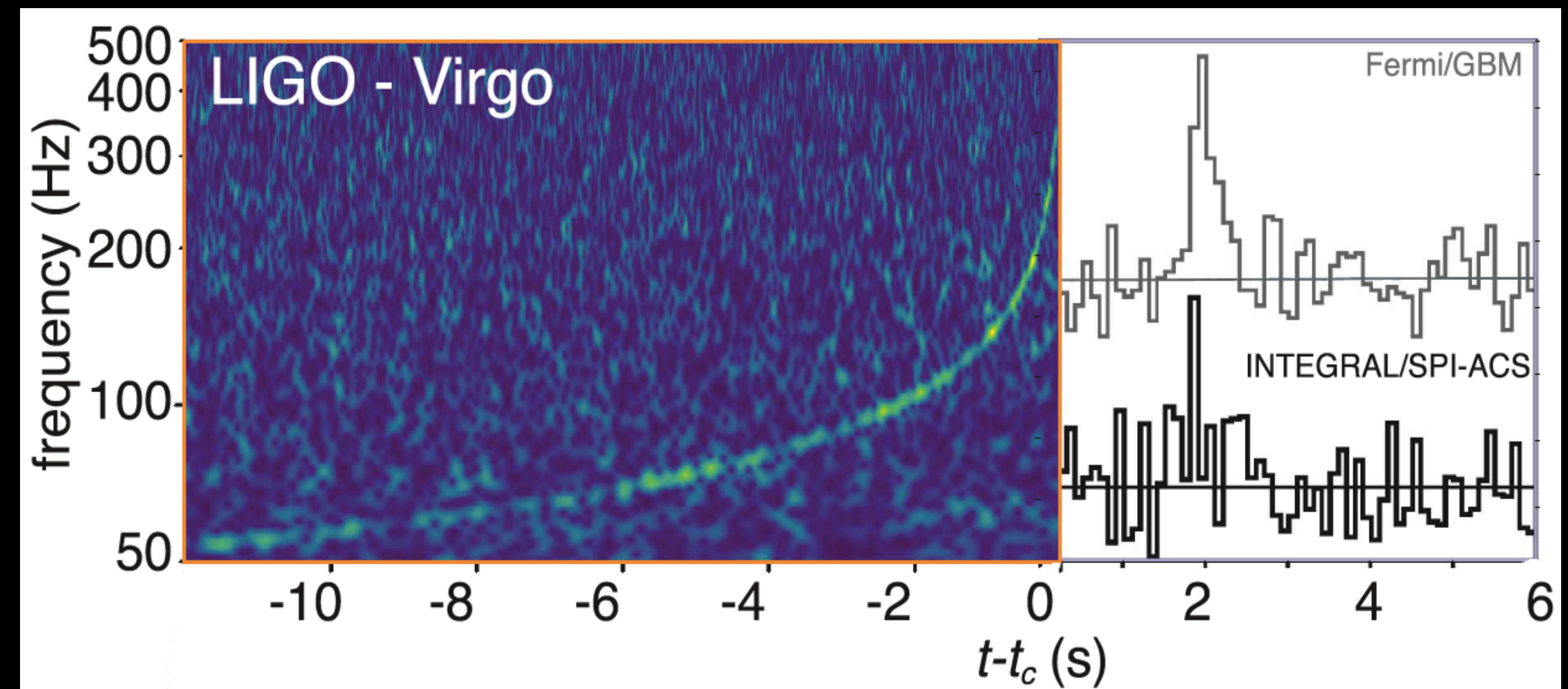
La consécration du multi-messenger: GW170817

- Fusion d'étoiles à neutrons (40 Mpc)
Trou noir de 3 masses solaires
- Durée: 100 secondes
- LIGO+VIRGO \rightarrow $30^{\circ 2}$ localisation (vs $200^{\circ 2}$)



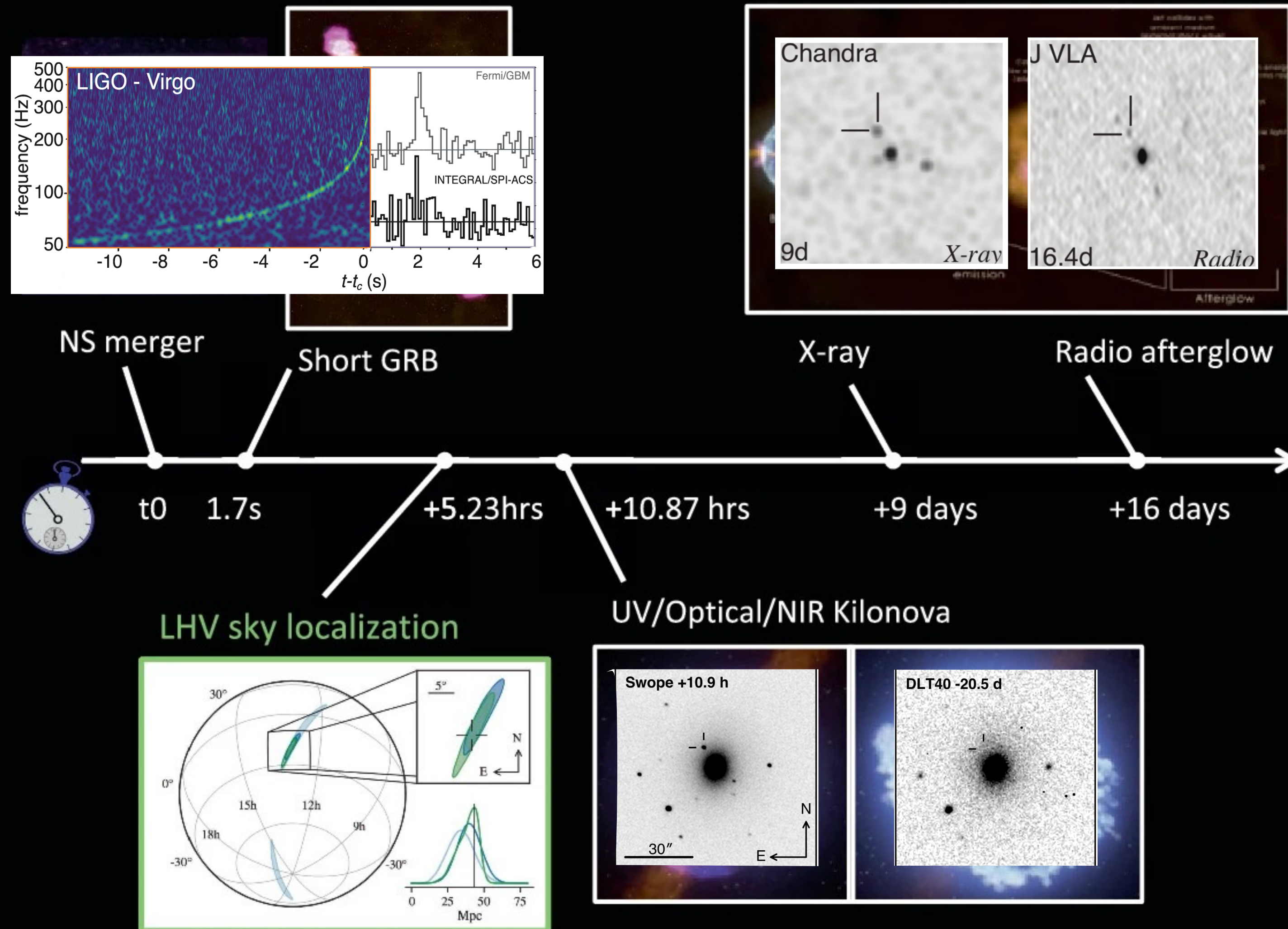
Fusion d'étoiles à neutrons et sursaut gamma

- 1.7s plus tard, sursaut gamma
- Observation indépendante d'INTEGRAL et FERMI



Amélioration de la localisation
⇒ Suivi optique, X, radio
(qq heures à plusieurs semaines)

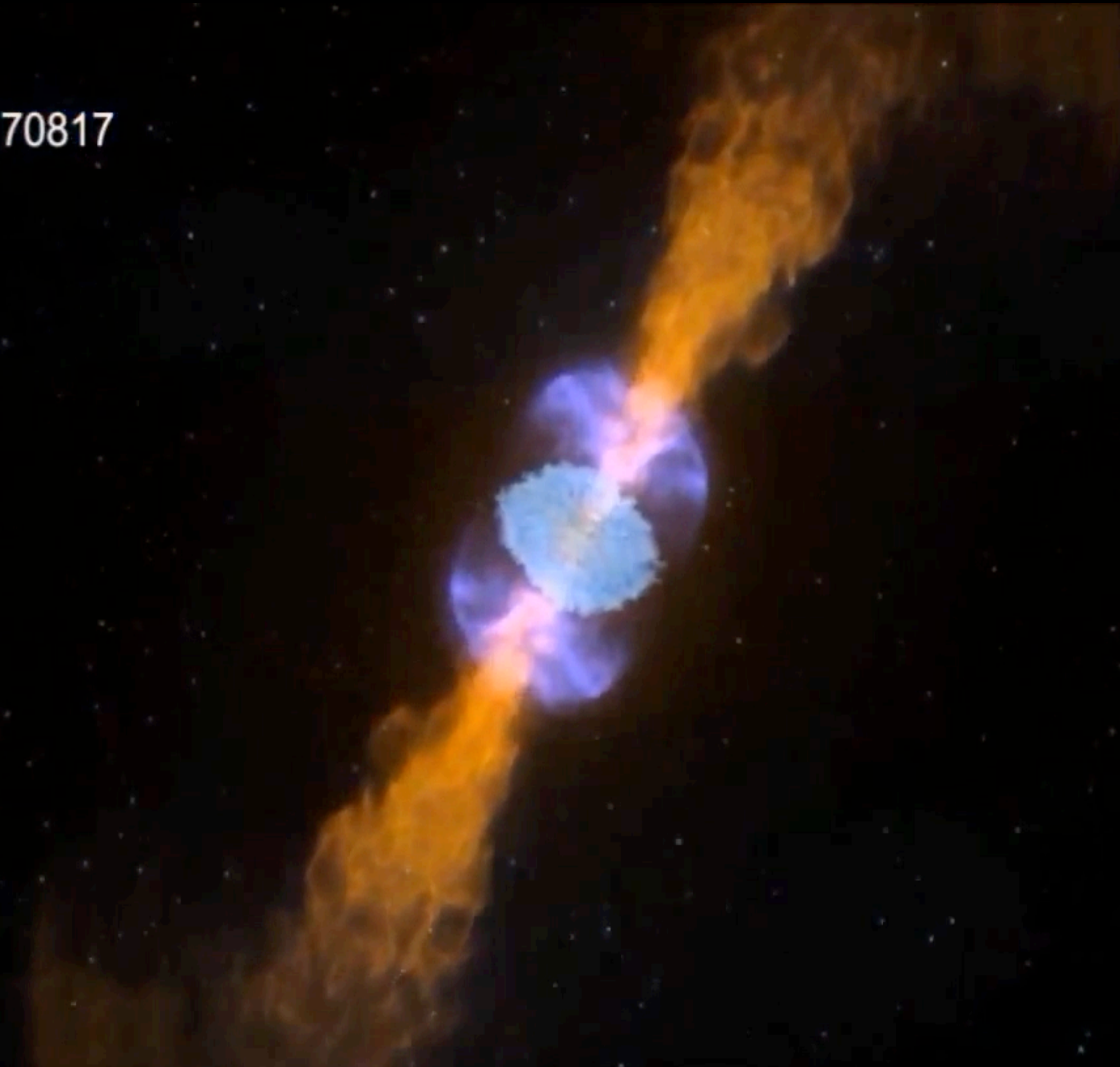
Une observation sur tout le spectre



Structure des sursauts gamma

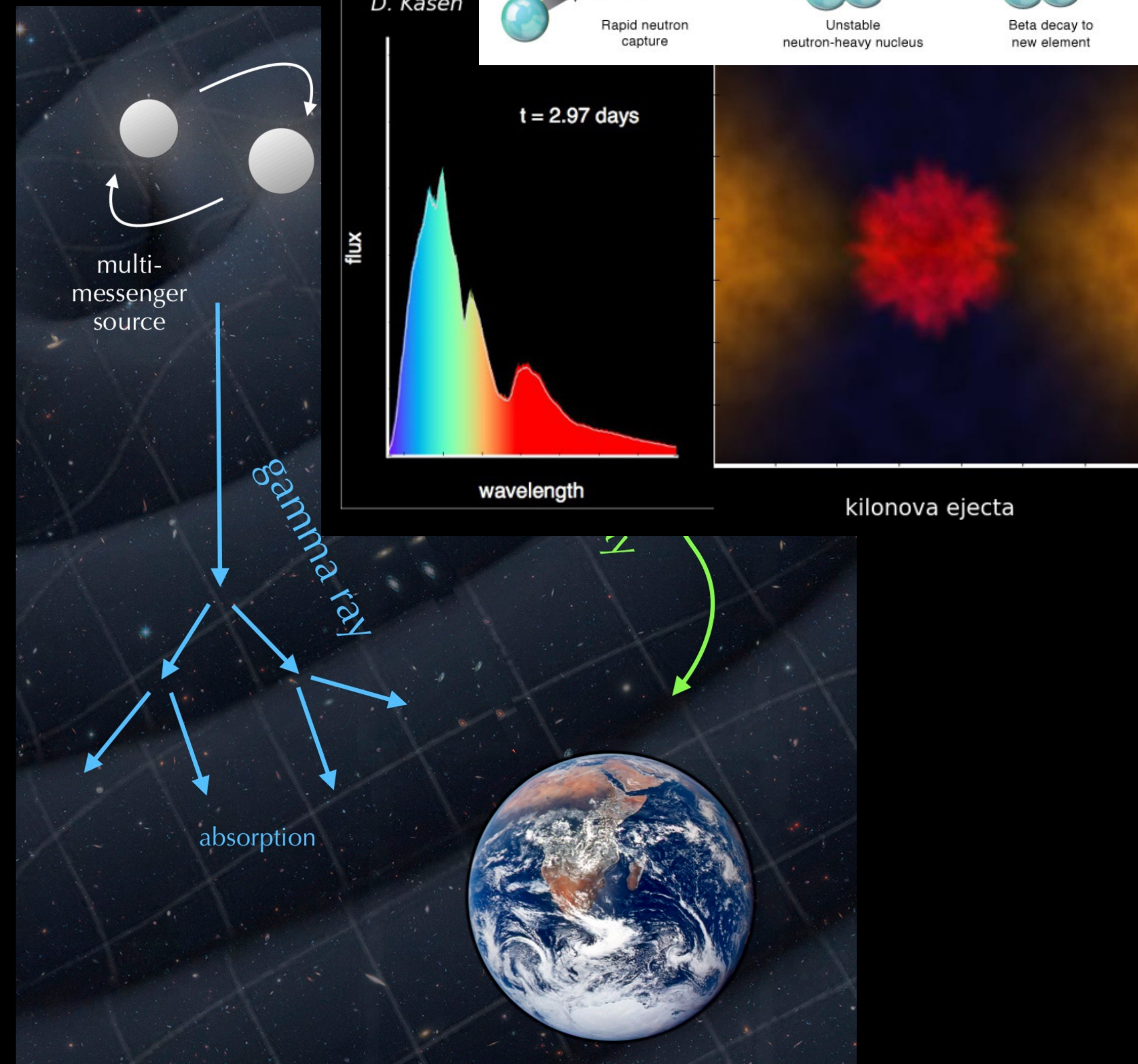
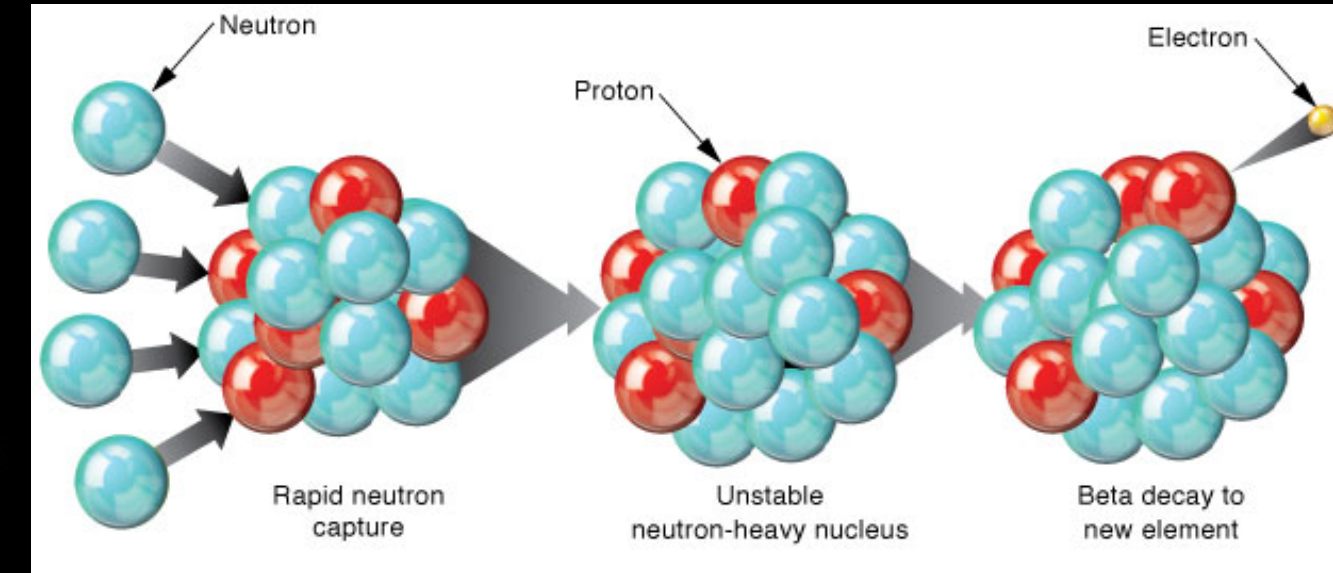
GW170817

Animation

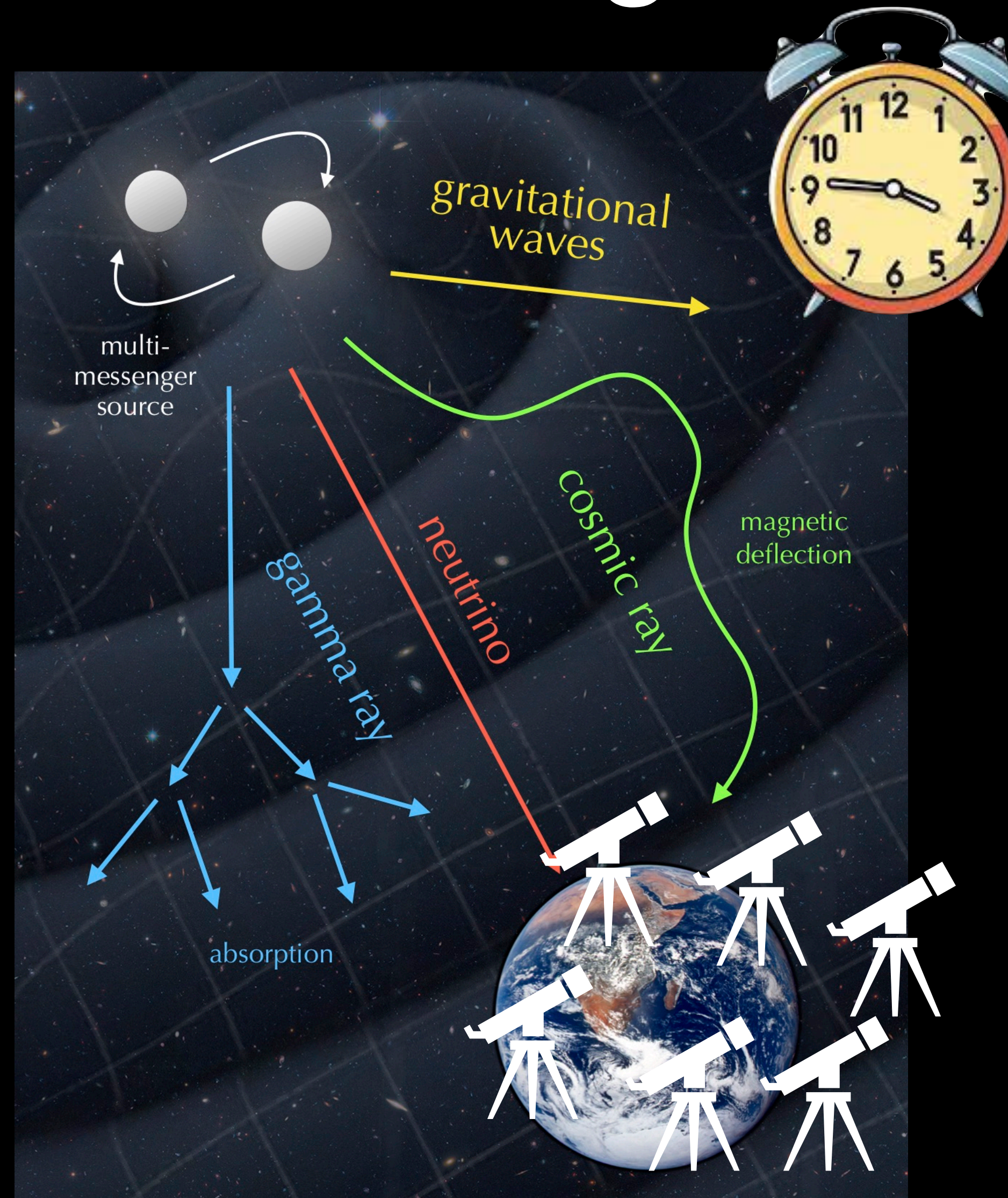


Des découvertes fondamentales

- Première observation directe d'une fusion d'étoiles à neutrons
- Preuve que les fusions d'étoiles à neutrons donnent des sursauts gamma et des kilonovae
- Preuve que les fusions d'étoiles à neutrons produisent des éléments lourds, en particulier de l'or (r-process)
- Confirmation que les ondes gravitationnelles voyagent à $\sim c$



Les réseaux multi-messenger



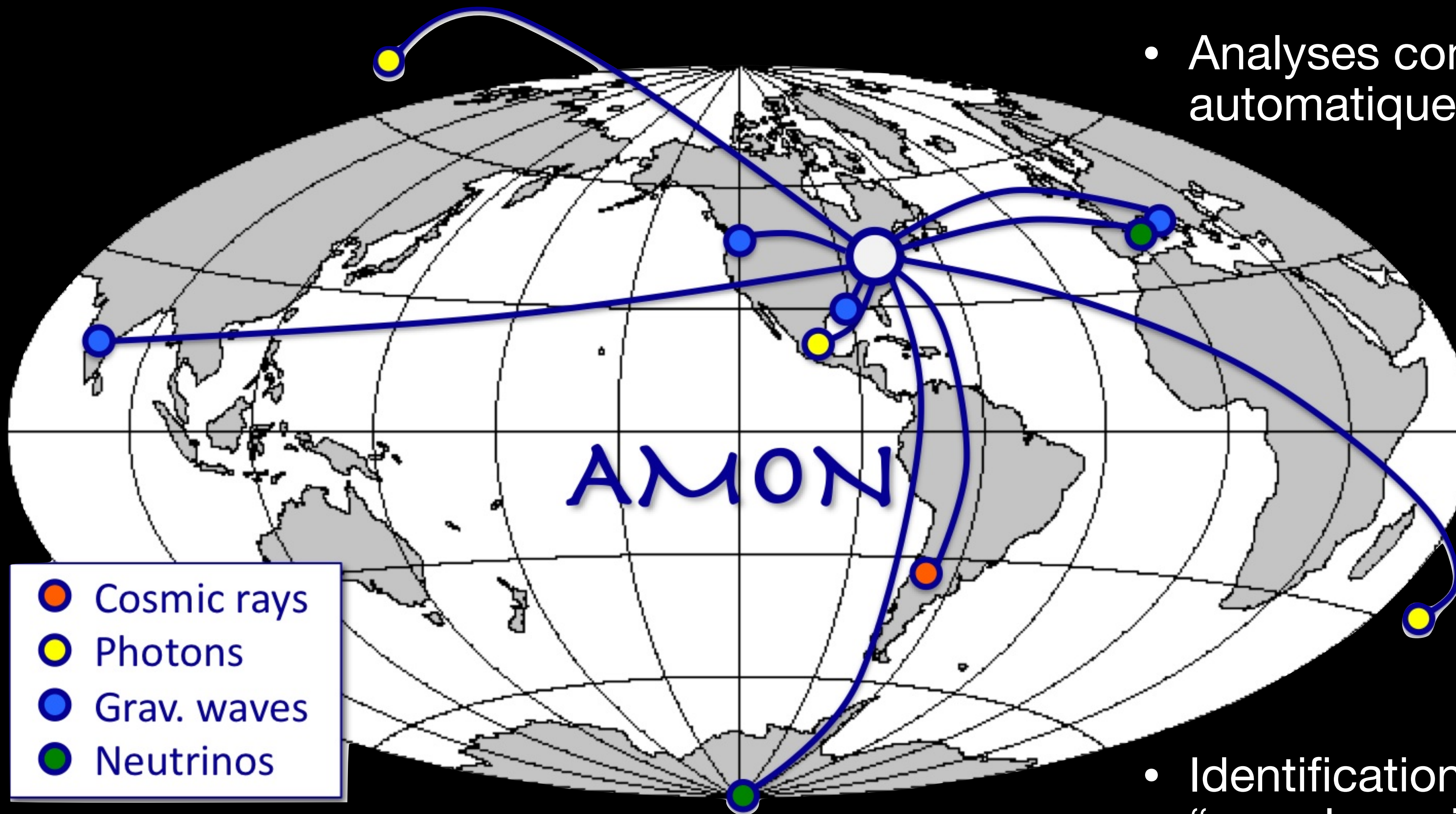
Etape suivante: les réseaux d'alertes

- Automatisation du processus de localisation et d'envoi/réception d'alertes
- Automatisation du pointage des télescopes
- **GRANDMA** : recherche de kilonovae et afterglow après des fusions d'étoiles à neutrons



Période O3: suivi de 49 événements sur 56
Délai < 1.5h pour 50% des événements
Pas (encore) d'observations

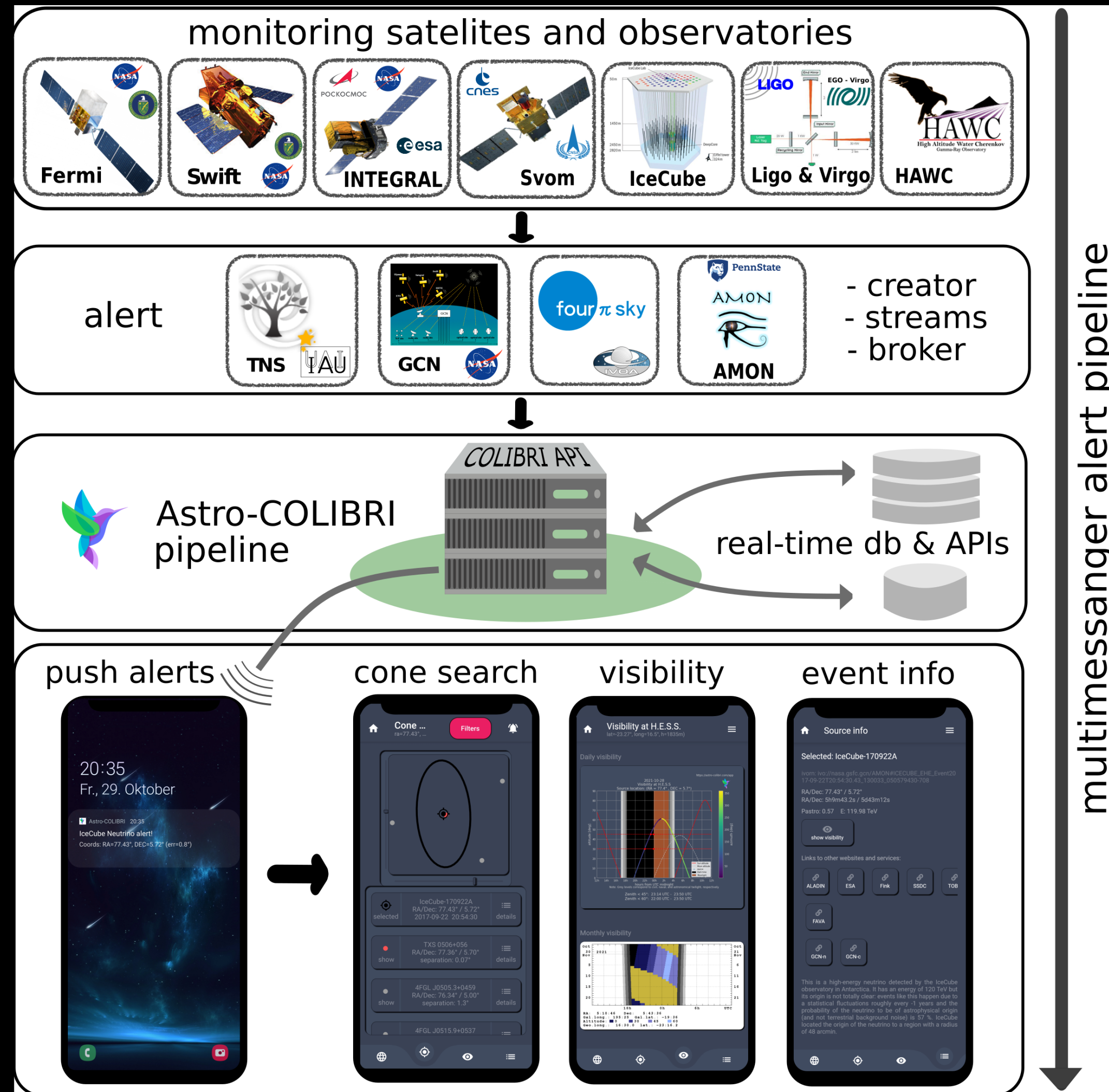
Les réseaux multi-messenger: AMON



- Analyses combinées automatiques

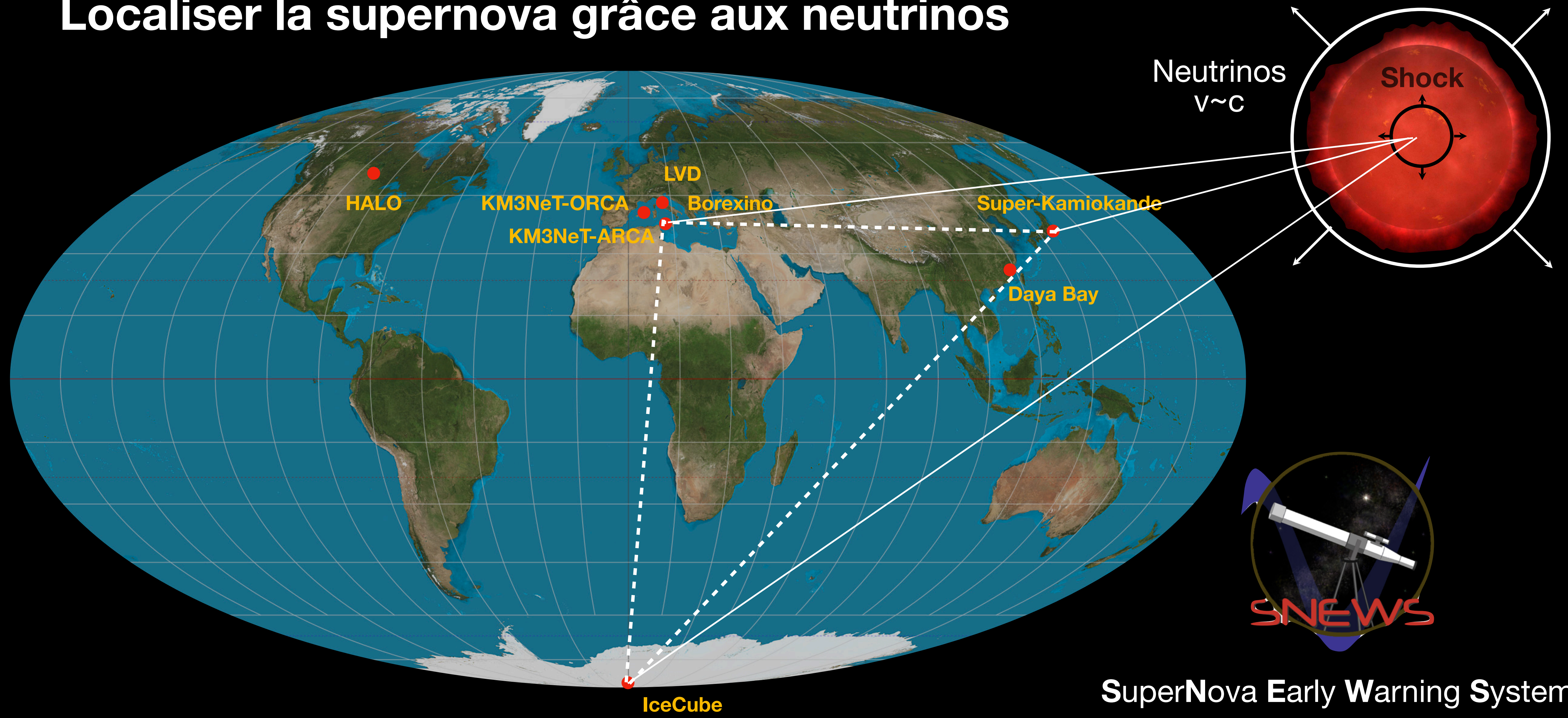
- Identification de signaux "sous le seuil"

Partage des résultats: Astro-Colibri

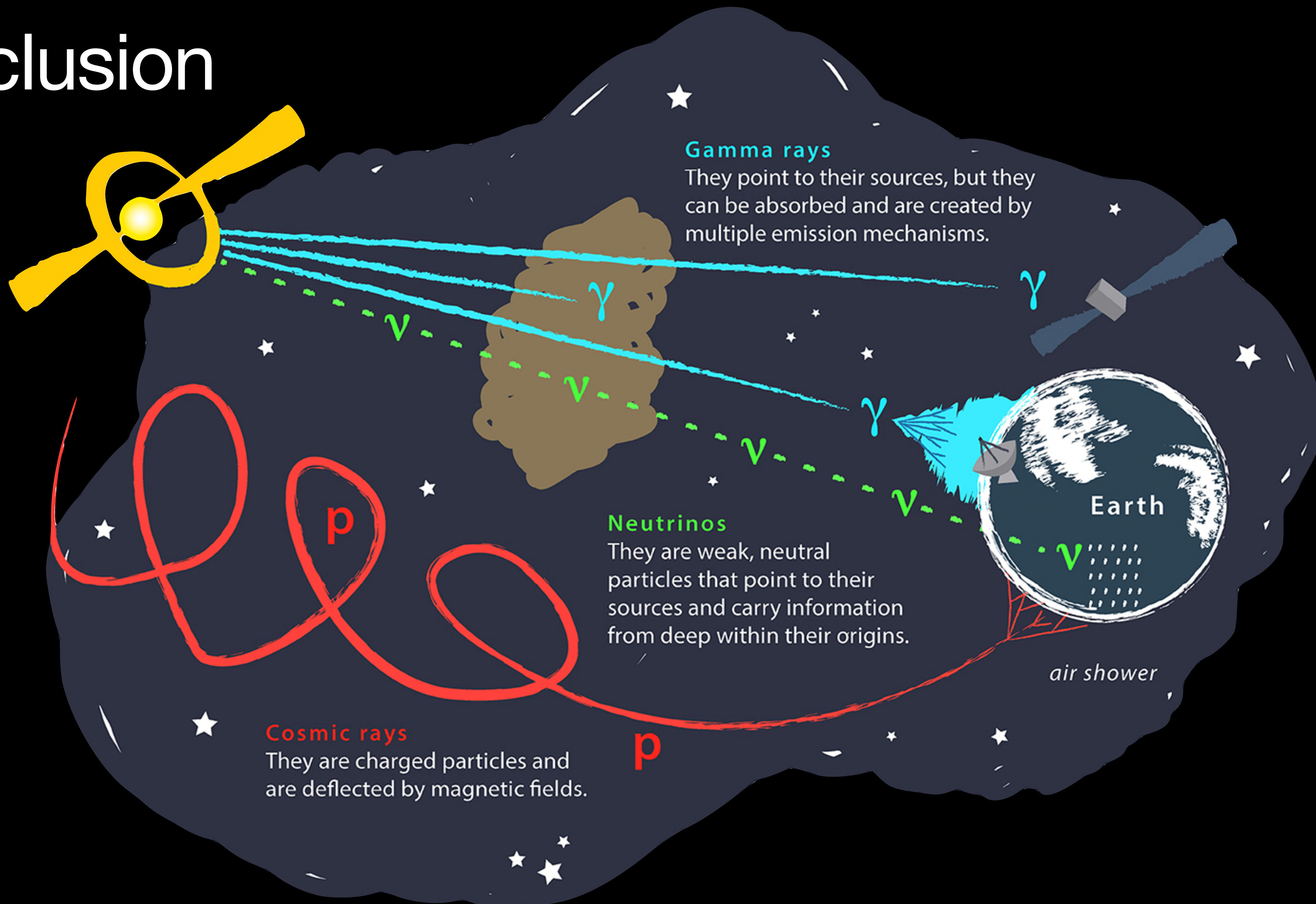


Supernovae et multi-messenger: SNEWS

Localiser la supernova grâce aux neutrinos



Conclusion



Gamma rays
They point to their sources, but they can be absorbed and are created by multiple emission mechanisms.

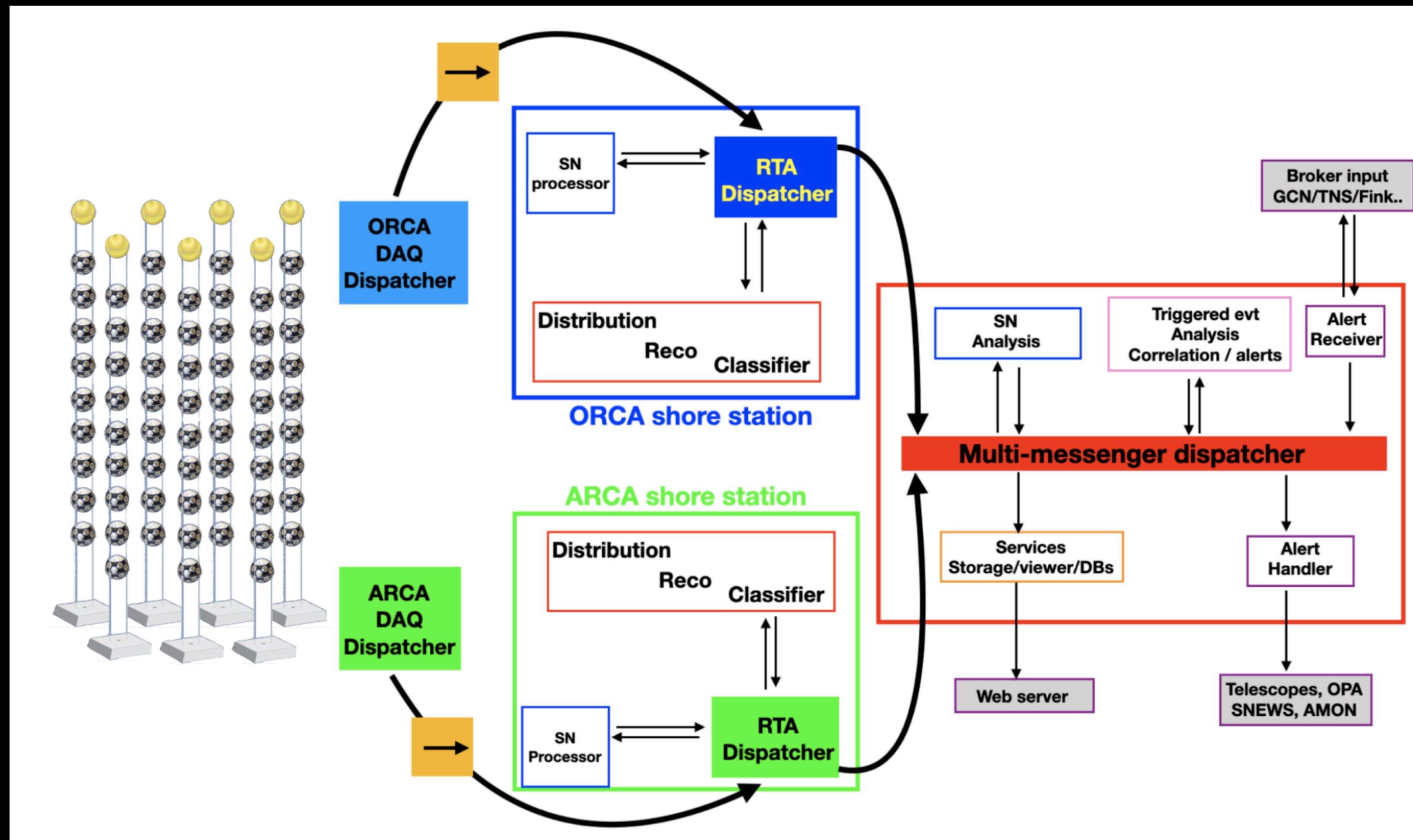
Neutrinos
They are weak, neutral particles that point to their sources and carry information from deep within their origins.

Cosmic rays
They are charged particles and are deflected by magnetic fields.

Earth

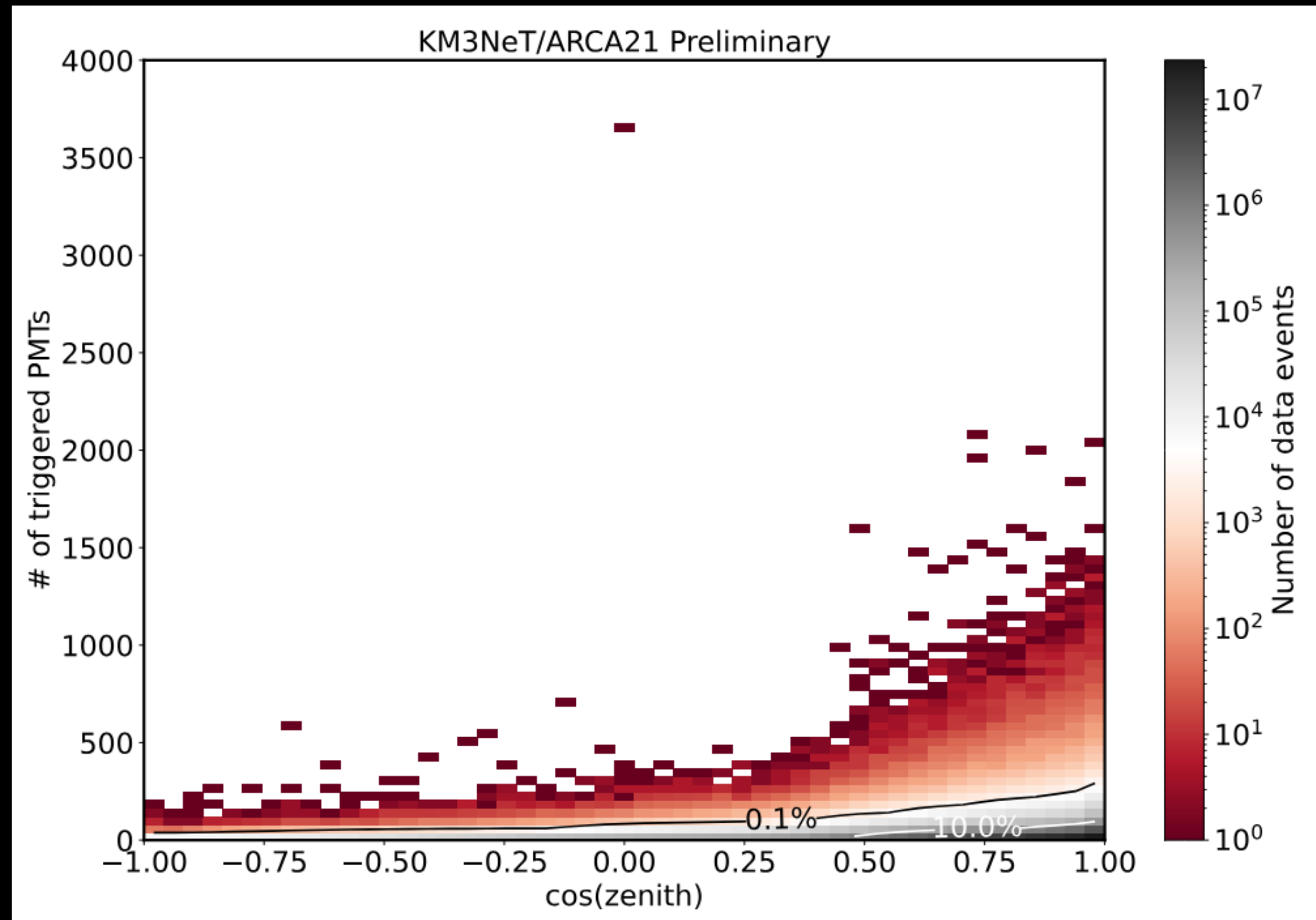
air shower

Des systèmes d'alerte dans les expériences



≥ 1000 alertes processées pour le moment

Un événement très énergétique



35% des PMTs d'ARCA ont été activés
1° au dessus de l'horizon (~horizontal)

Energie d'au moins 10 PeV!