



KM3NeT : Un télescope à neutrinos en Méditerranée

Lilian Martin pour le groupe KM3NeT



Les Journées Scientifiques
Nantes Université
3 juin 2022

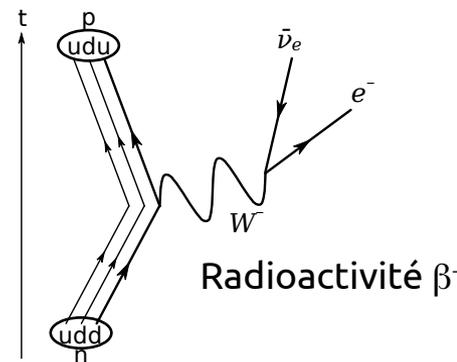
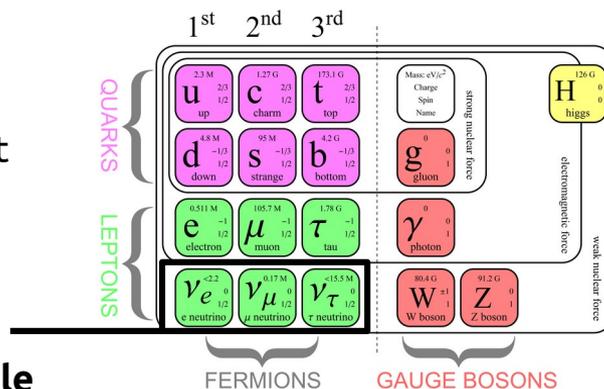


Pourquoi l'astronomie neutrinos ?

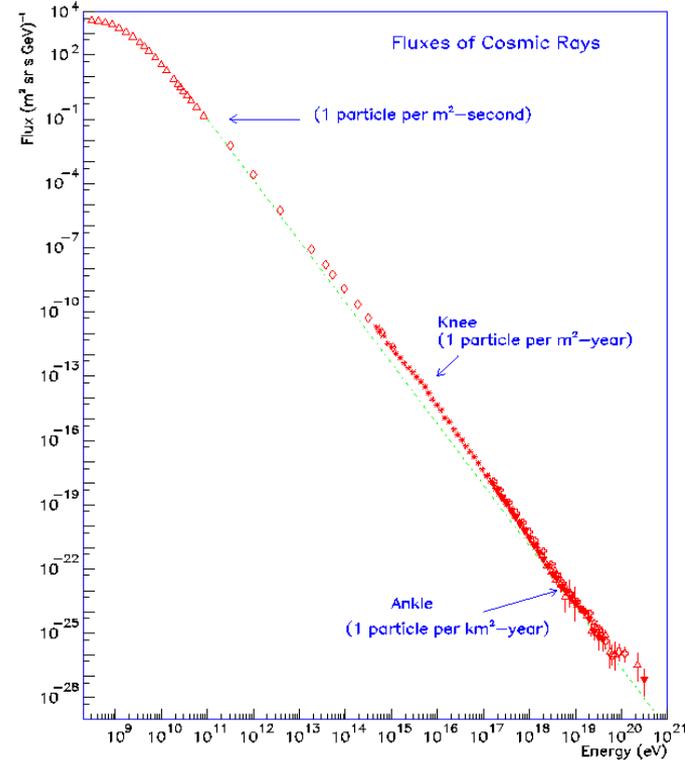
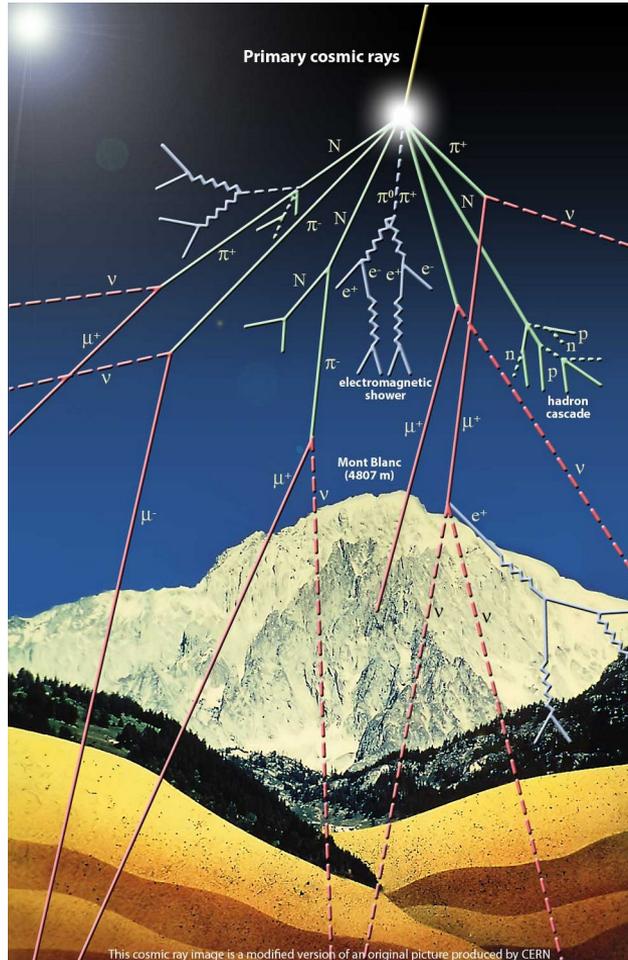
- Une clé essentielle pour comprendre l'origine des rayons cosmiques d'ultra haute énergie : sources, mécanismes d'accélération ?
- Une étude des phénomènes transitoires et violents dans l'univers : libération (rapide, définitive) de quantités gigantesques d'énergie.
- Une pièce du nouveau paradigme - l'observation multi-messagers : signaux EM (radio → photons durs), ondes gravitationnelles, neutrinos...
- Un défi technologique

Modèle standard : théorie décrivant les interactions fondamentales et classifiant les particules élémentaires

Neutrinos : famille de 3 leptons sensibles à l'interaction nucléaire faible



Astronomie des rayons cosmiques



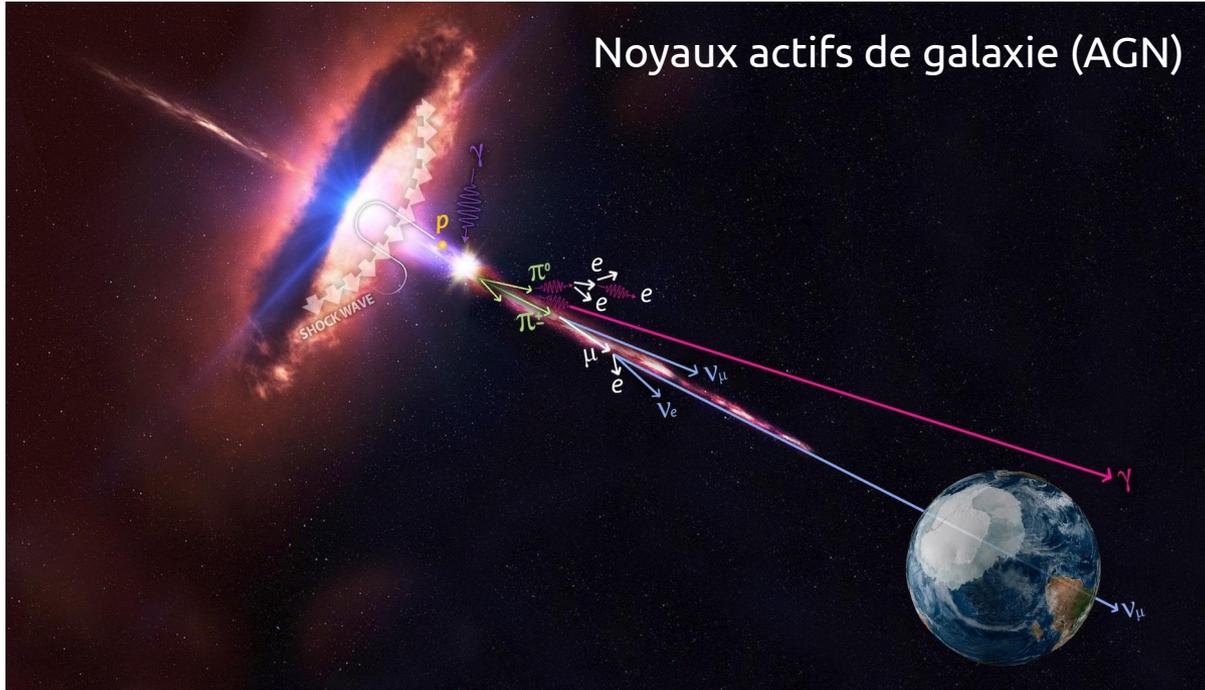
Une vieille histoire : un bon siècle d'observation

Une histoire incomplète :

- le spectre est mal compris aux hautes énergies
- pas de corrélation avec des objets astro. connus

Des sources de particules de haute énergie

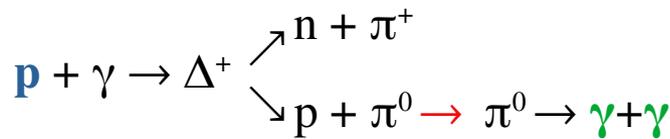
Noyaux actifs de galaxie (AGN)



Photomeson production

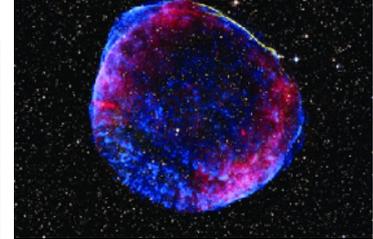
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



$$E_\nu \simeq 1/20 \quad E_p \simeq 1/2 \quad E_\gamma$$

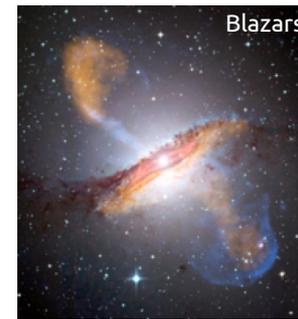
Rémanents de SN (SNR)



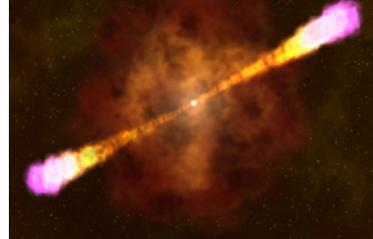
Kilonovae



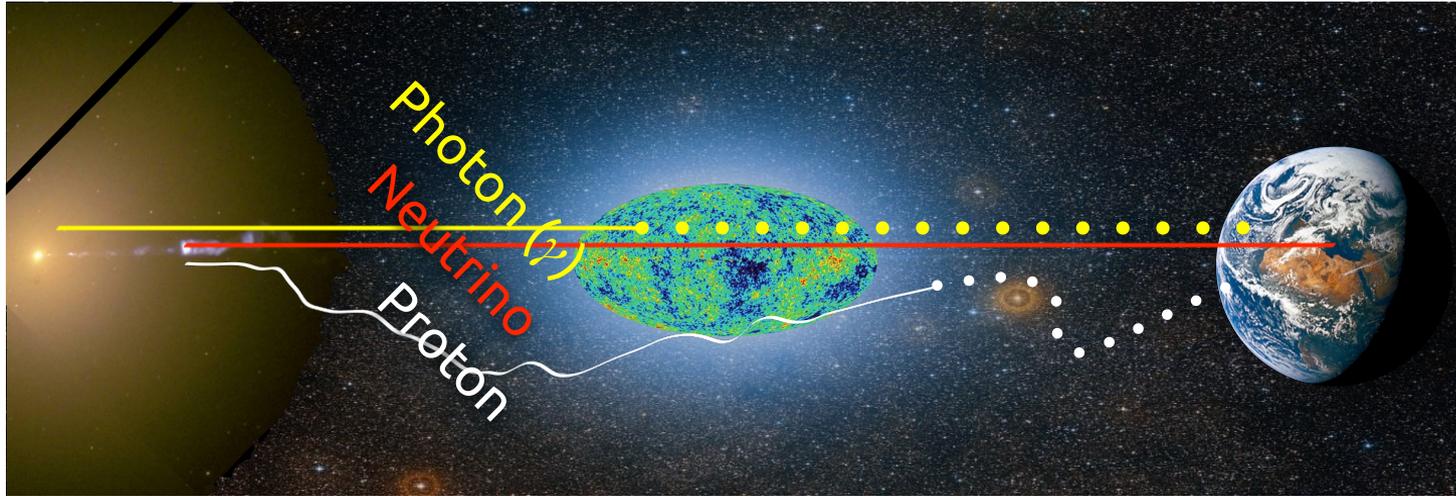
Blazars



Sursauts gamma



Neutrino : un bon messager aux énergies ultimes



Photons (γ)

Absorbés à haute énergie et grande distance
Confusion sur le processus de création
(leptonique ou hadronique)

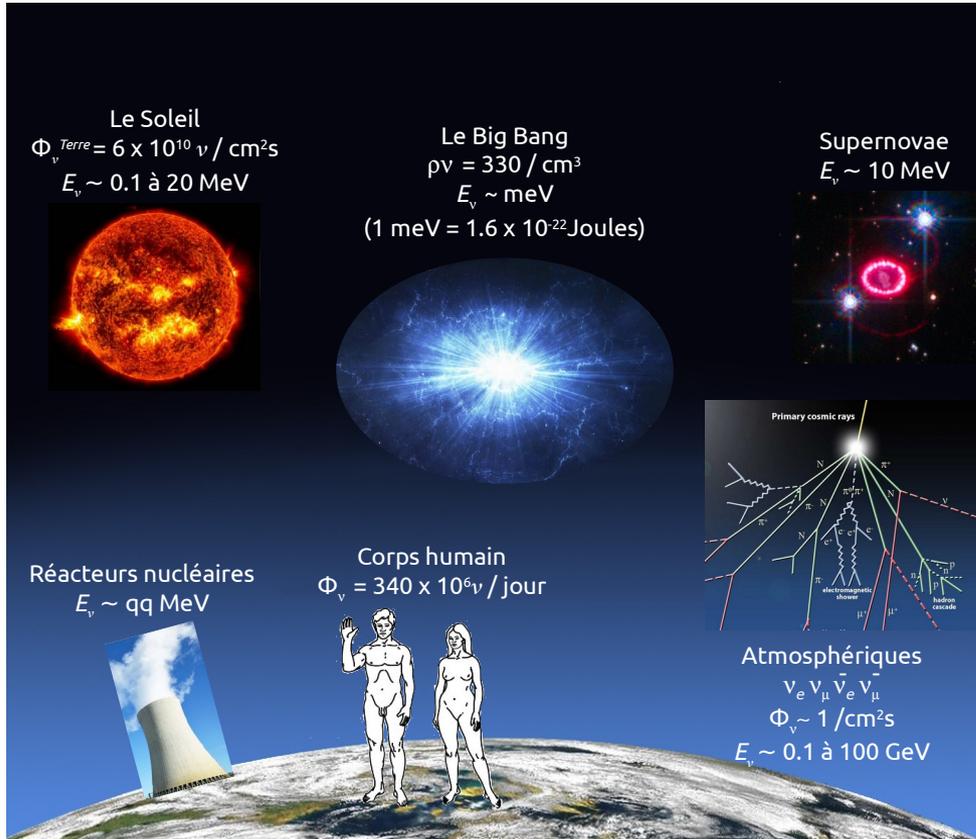
Rayons cosmiques (protons, ions)

Horizon limité par la coupure GZK (CMB)
Déviés par les champs magnétiques
Gros délais de détection par rapport aux signaux EM

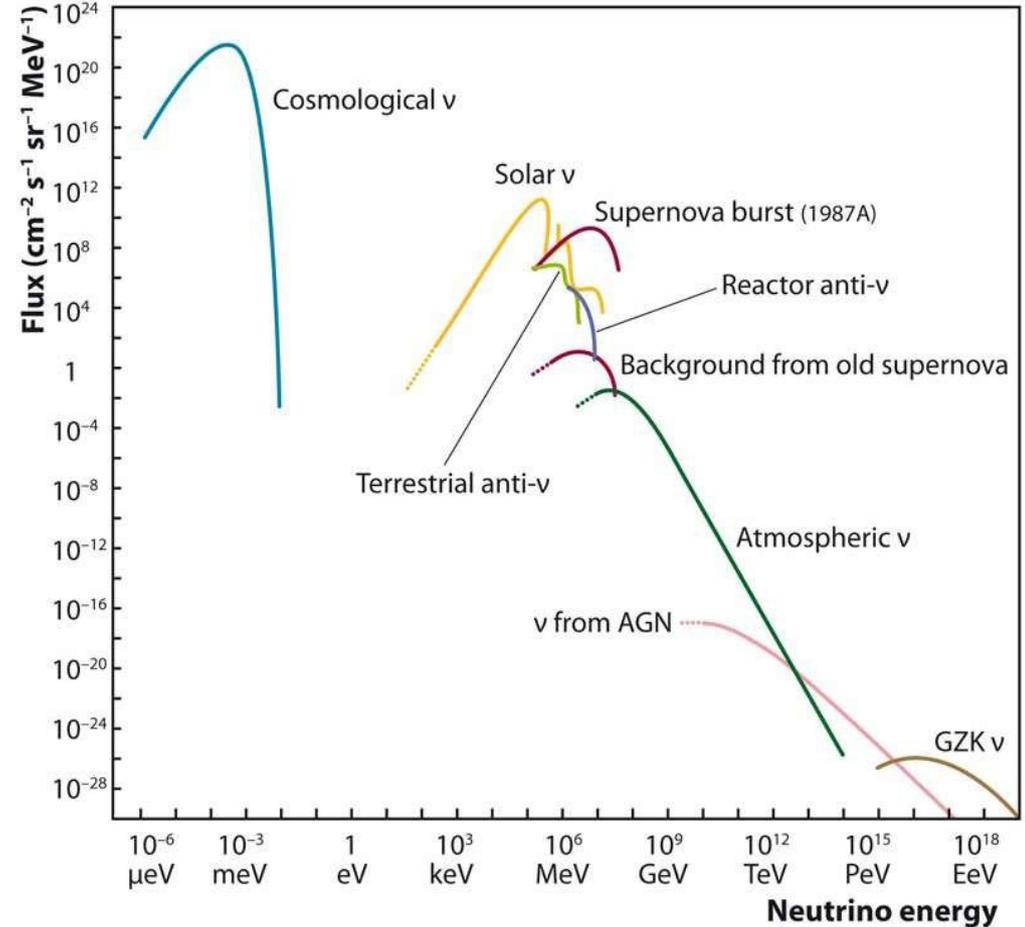
Neutrinos : neutre, stable, interagit faiblement

Pas d'absorption par le milieu traversé
Pas de déviation par les champs magnétiques
Pas d'interaction avec le CMB
Signature des processus hadroniques
Identification des rayons cosmiques
Toutes distances, tous milieux, toutes les énergies
Corrélation spatiale et temporelle avec les signaux EM
Tout le ciel. 24h/24 et 7j/7

Des flux de neutrinos variés

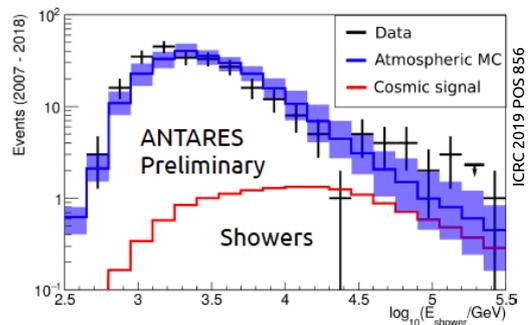
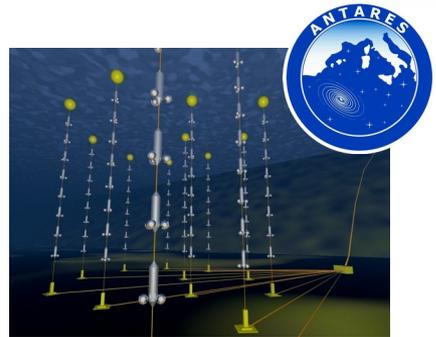
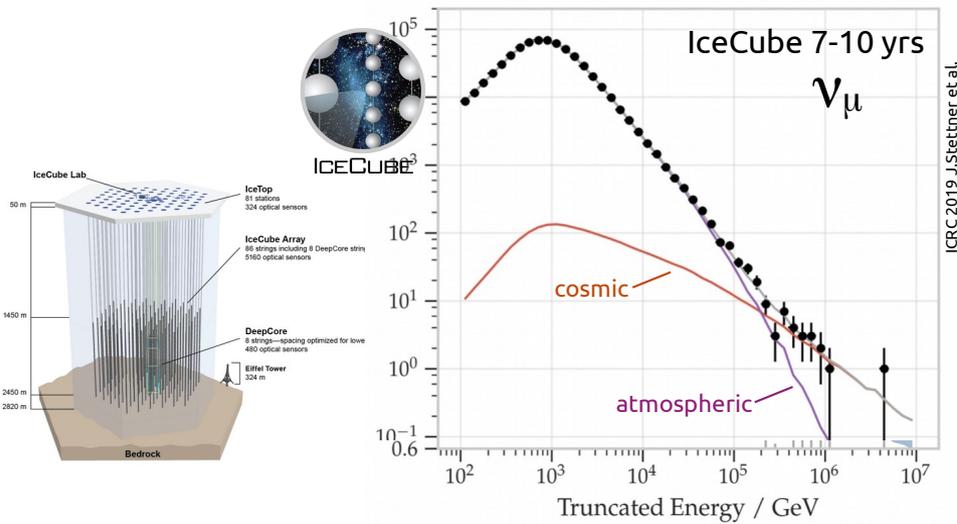


Radioactivité terrestre : $\Phi_{\nu} \sim 6 \times 10^6 \nu / \text{cm}^2 \text{s}$



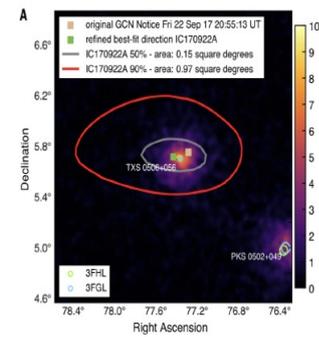
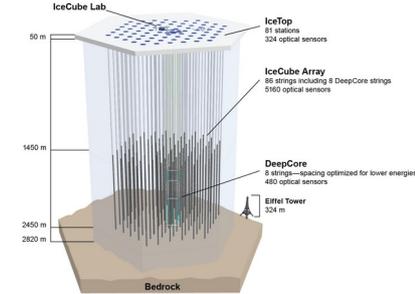
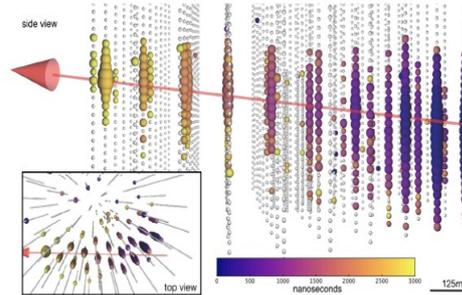
Neutrinos astrophysiques : 2 observations majeures

Diffuse flux of cosmiques neutrinos



Neutrinos from a blazar (TXS 0506+056)

Sept. 22, 2017:
A neutrino in coincidence with a blazar flare



Observed by
Fermi-LAT
and MAGIC

Significance for
correlation: 3σ

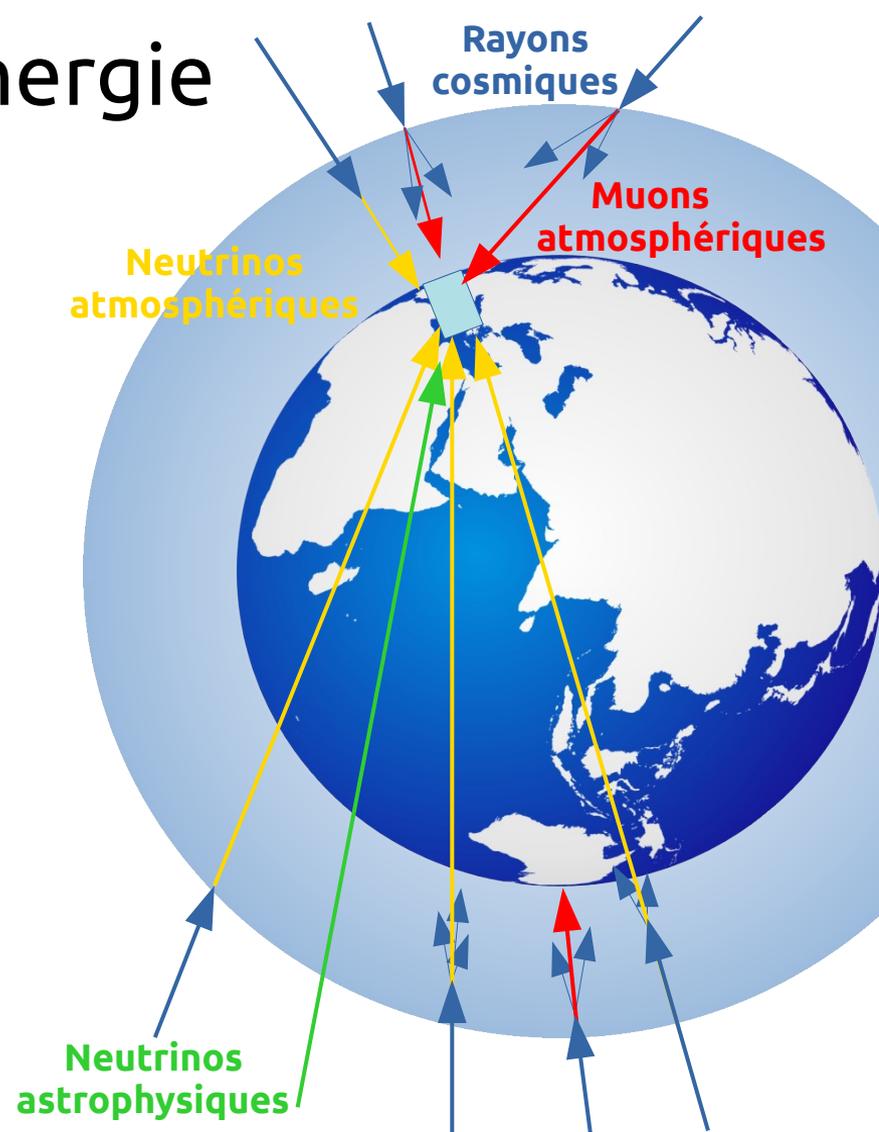
Science 361 (2018) no. 6398, eaat1378

DESY | ICRC 2019 | Winter Walter, July 25, 2019, Madison, USA



Voir des neutrinos de haute énergie

- Il faut les faire interagir dans la matière : la Terre sert de cible (et au passage les fait osciller)
- Il faut en voir suffisamment dans un temps raisonnable : instrumenter un grand volume
- Il faut voir les produits de désintégration : le milieu doit être actif
- Il faut mesurer avec précision leur direction : sélection la topologie des décroissances.
- Il ne faut pas être perturbé par les signaux parasites : à l'abri et bien orienté.
- **Une solution : au fond de la mer !**



La production de lumière Cerenkov

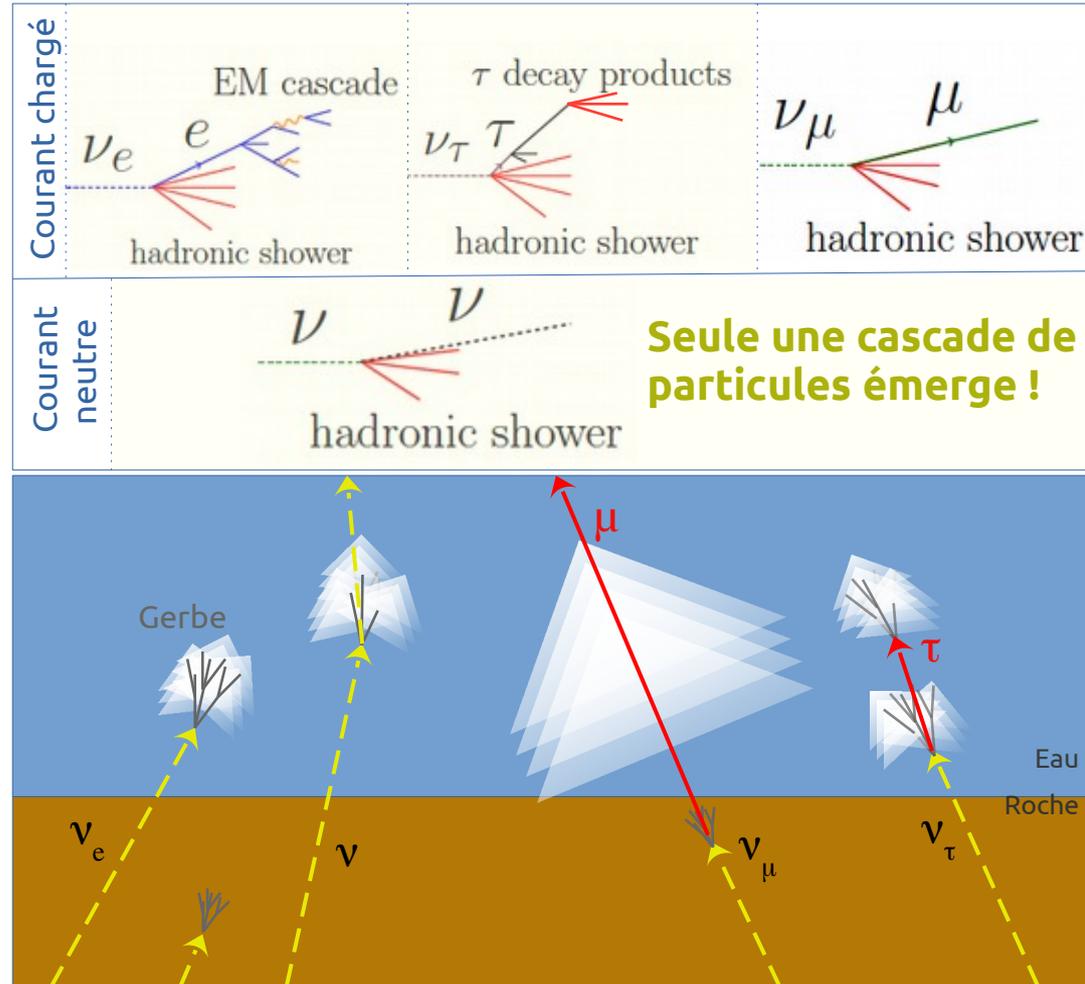
- Les “enfants” des neutrinos de haute énergie sont aussi très énergétiques.
- La topologie des décroissances renseigne sur la saveur du neutrino. La décroissance du ν_μ (cc) produit la signature la plus simple et la plus précise.
- Effet Cerenkov : une particule chargée au dessus de la vitesse de la lumière dans le milieu produit une radiation.
- L'eau est dense et a des propriétés de transmission (absorption et diffusion) de la lumière.

$$\beta_{\text{part}}/c > n$$

Indice du milieu
 $n_{\text{eau}} = 1.33$

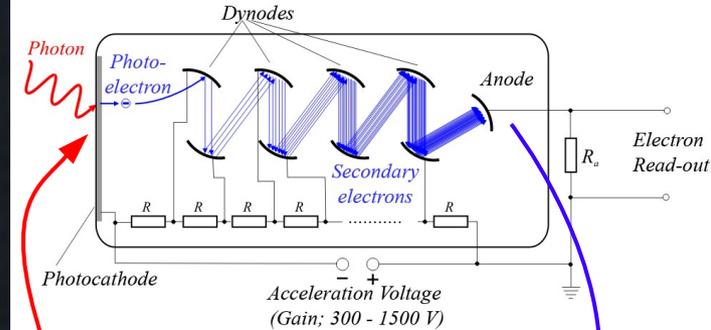
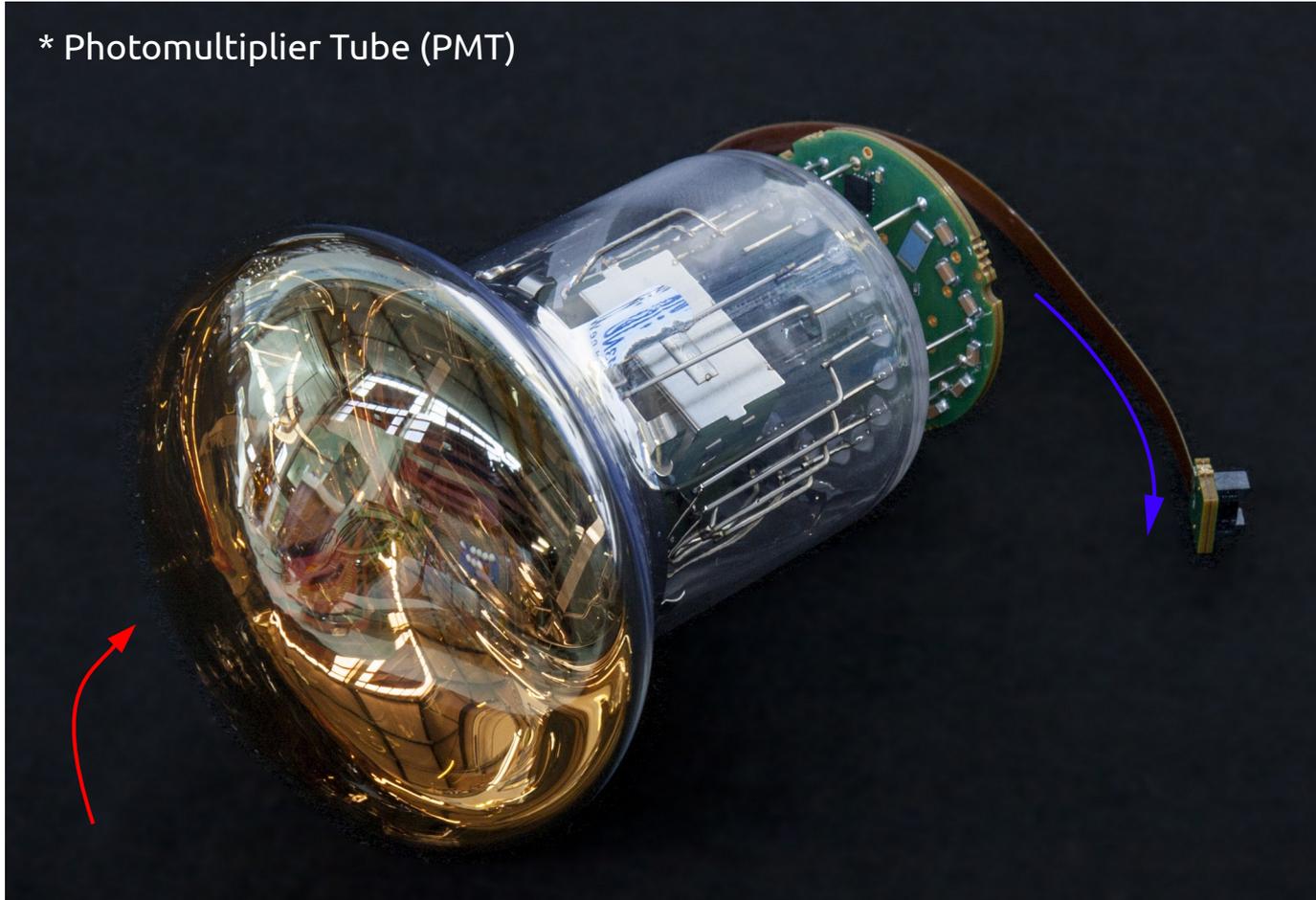


La plupart des produits de décroissance du neutrino sont au dessus du seuil Cerenkov !
 Un muon produit environ 300 photons/cm.



La technologie : le photomultiplicateur*

* Photomultiplier Tube (PMT)



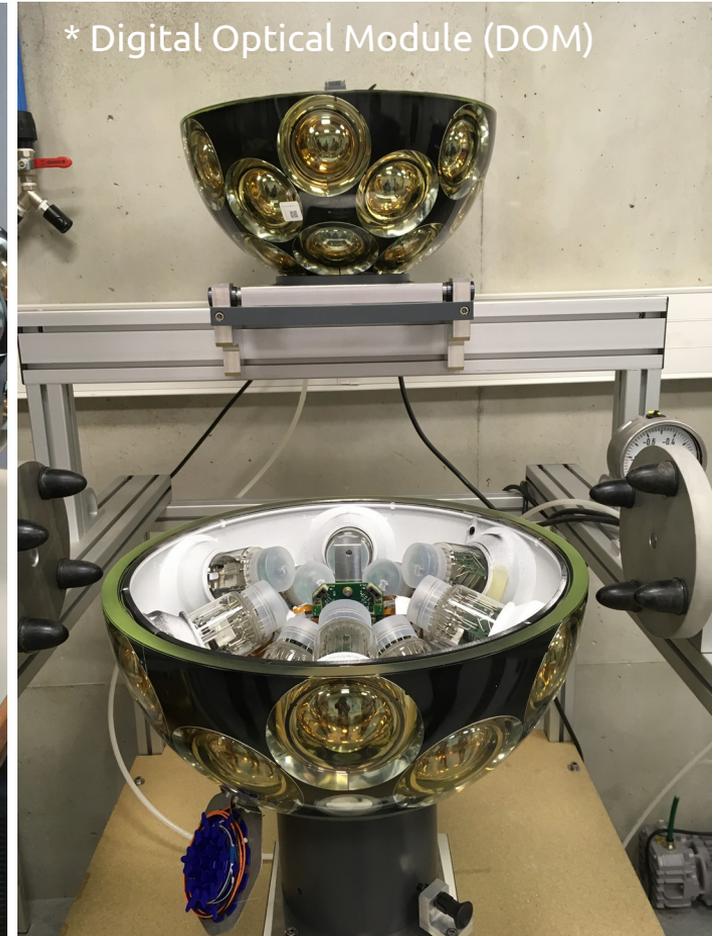
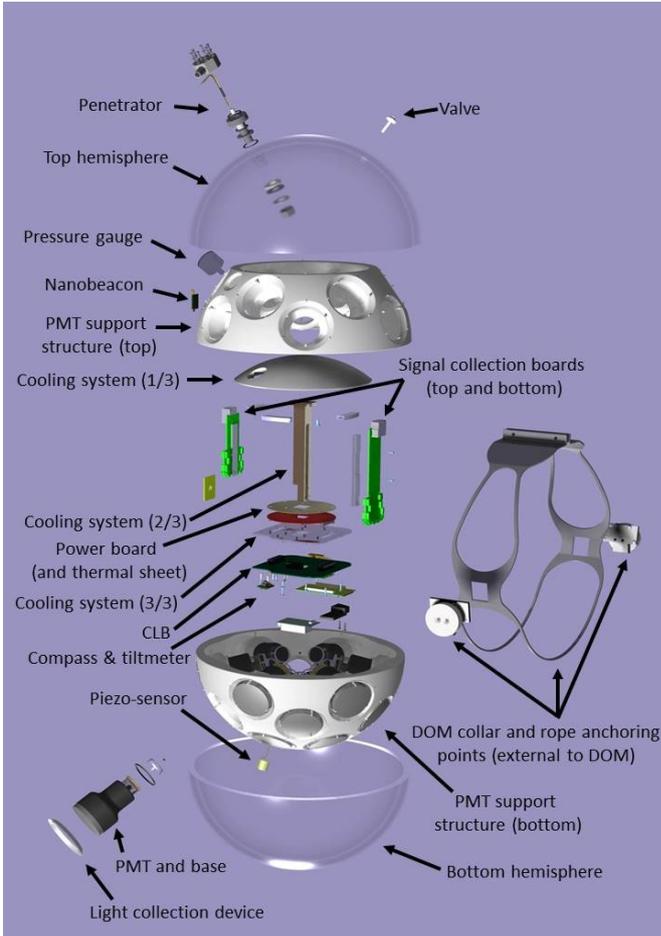
1 Photon en entrée

Plusieurs milliards
d'électrons en sortie

Une technologie ancienne
(presque un siècle) mais :

- Éprouvée
- Sensible
- Rapide

La technologie : le module optique numérique*

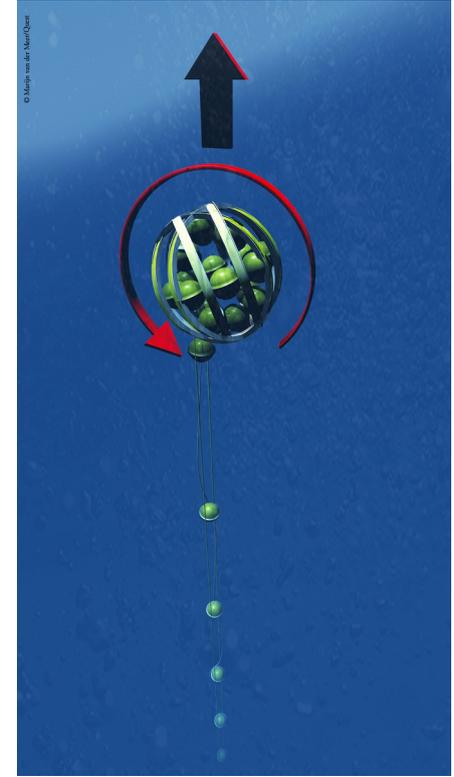
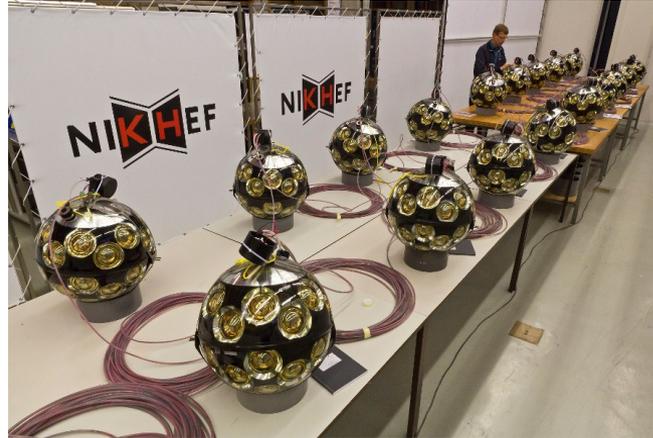


La technologie : le module optique

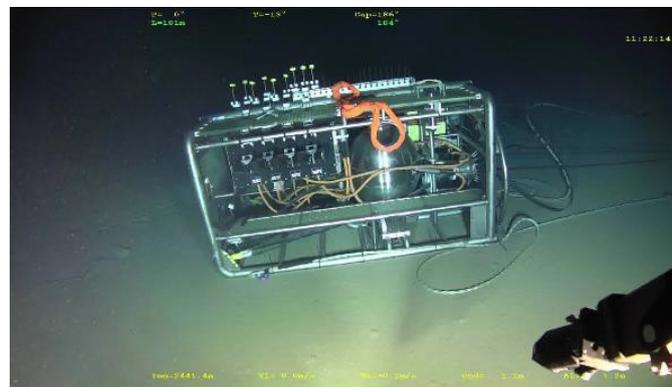
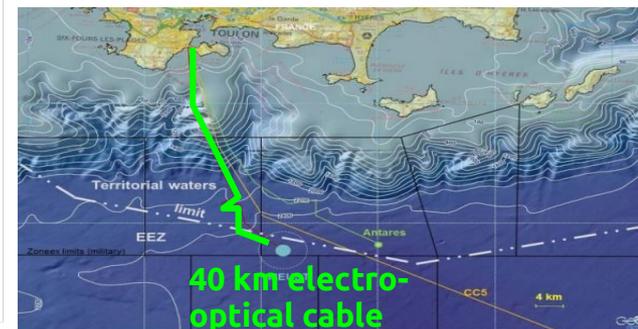
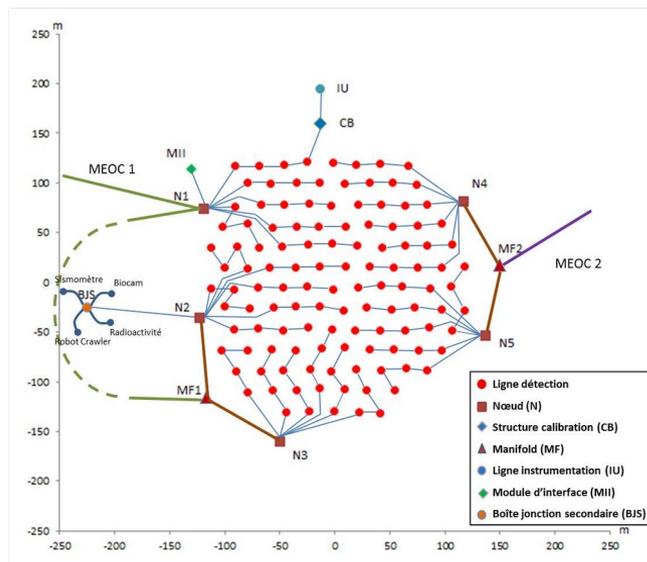
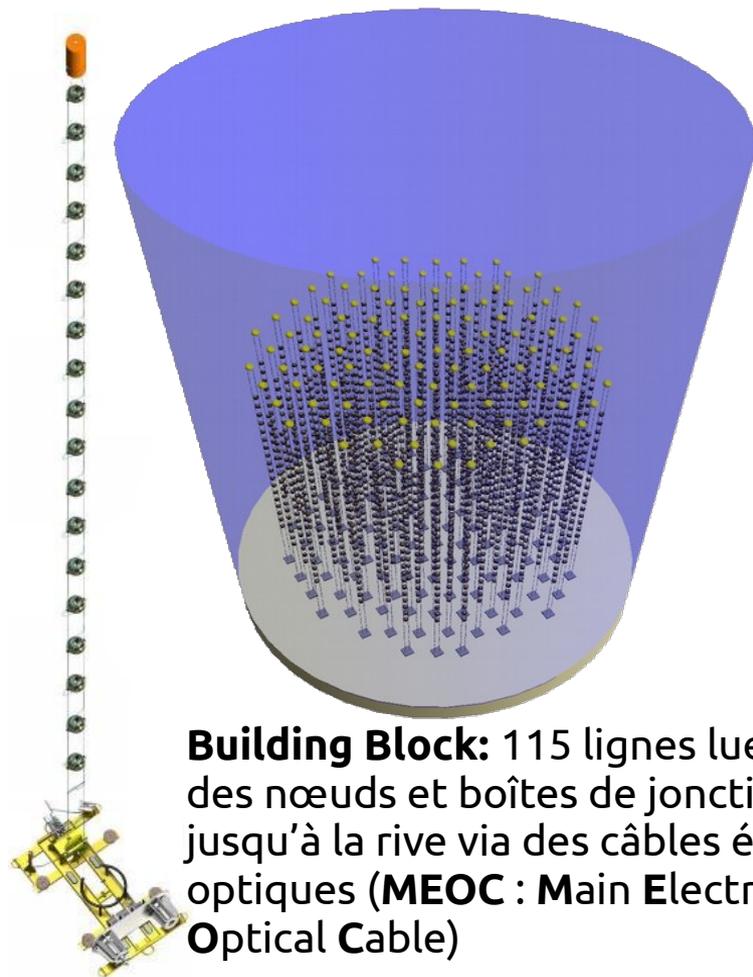


La ligne de détection (Detection Unit)

Ligne de détection: 18 modules optiques connectés à une ancre via un câble électro-optique (**V**ertical **E**lectro-**O**ptical **C**able) + deux liens et tirés vers le haut par une bouée.



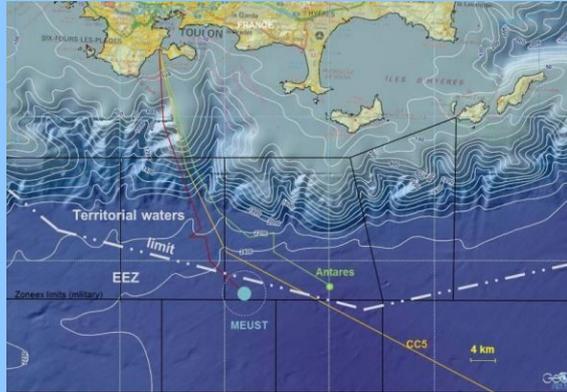
Le bloc de détection (Building block)



2 densités de capteurs : 2 instruments

Dense: écart vertical ~9m, horizontal ~20m

Petit détecteur: ~5.7 Mton



Energies : GeV (10^9 eV)

Neutrinos atmosphériques

Physique du Neutrino :

ORCA: Oscillations Research with Cosmics in the Abyss

ORCA



Épars : écart vertical ~36 m, horizontal ~100 m

Grand détecteur : 2 blocs ~1 km³ au total

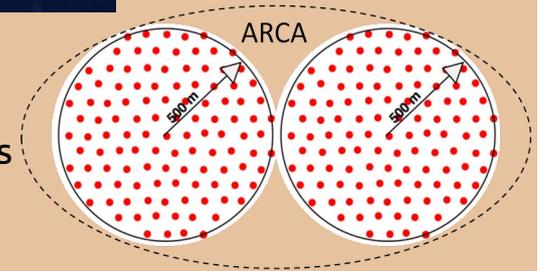


Energies : TeV- PeV
($10^{12} - 10^{15}$ eV)

Neutrinos astrophysiques

Astronomie Neutrino :

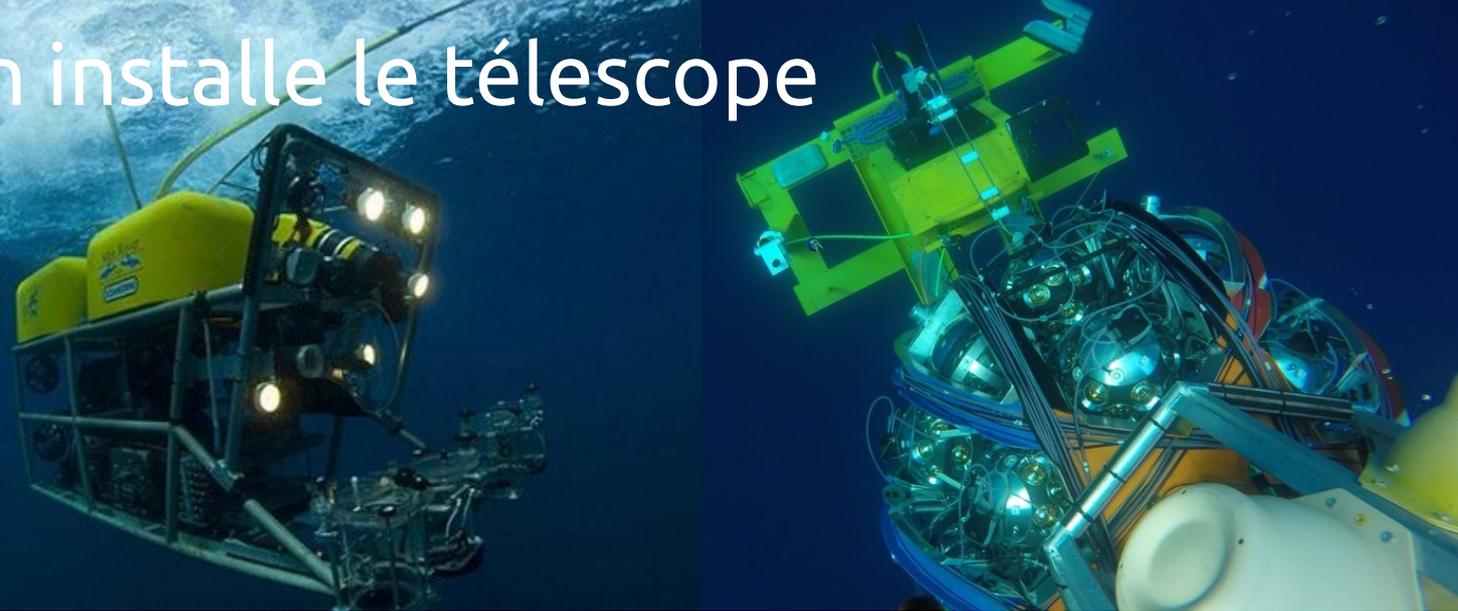
ARCA: Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss



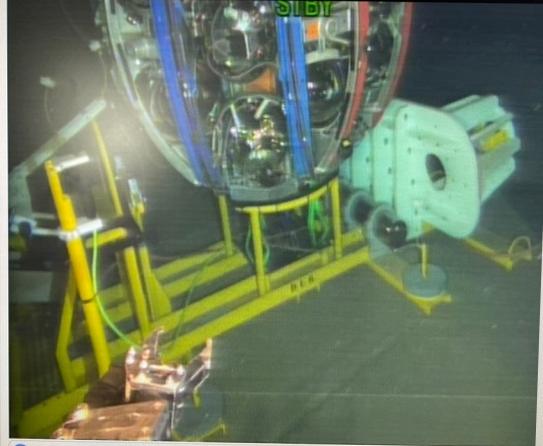
On installe le télescope



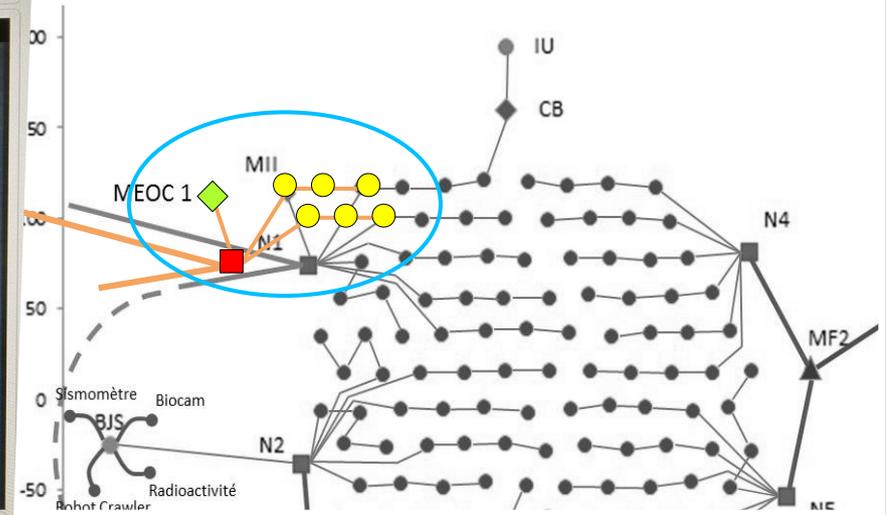
On installe le télescope



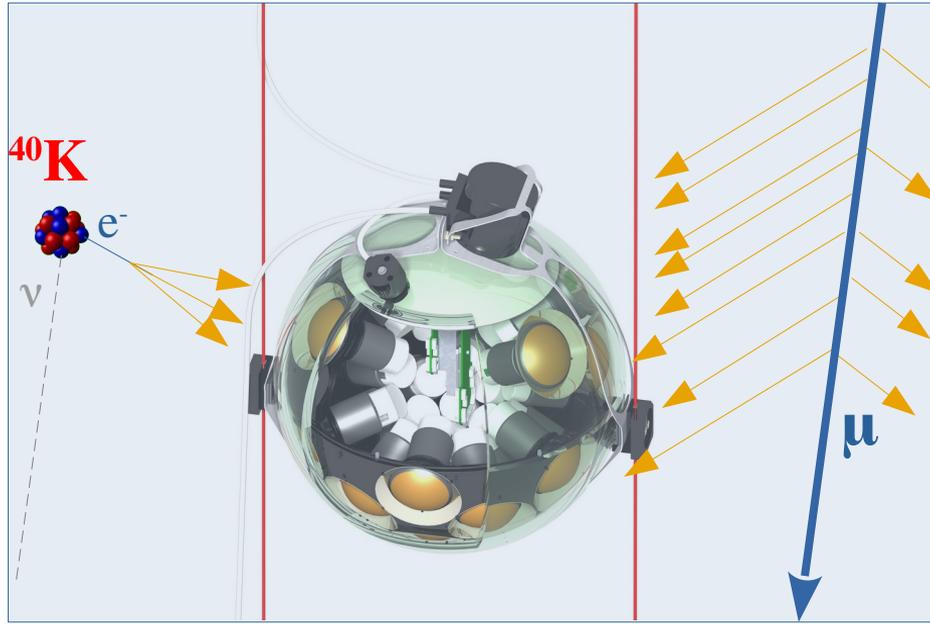
MICHMICH 2020-01-26 15:41:36



MICHMICH 2020-01-26 23:46:26



Premières données et premières analyses

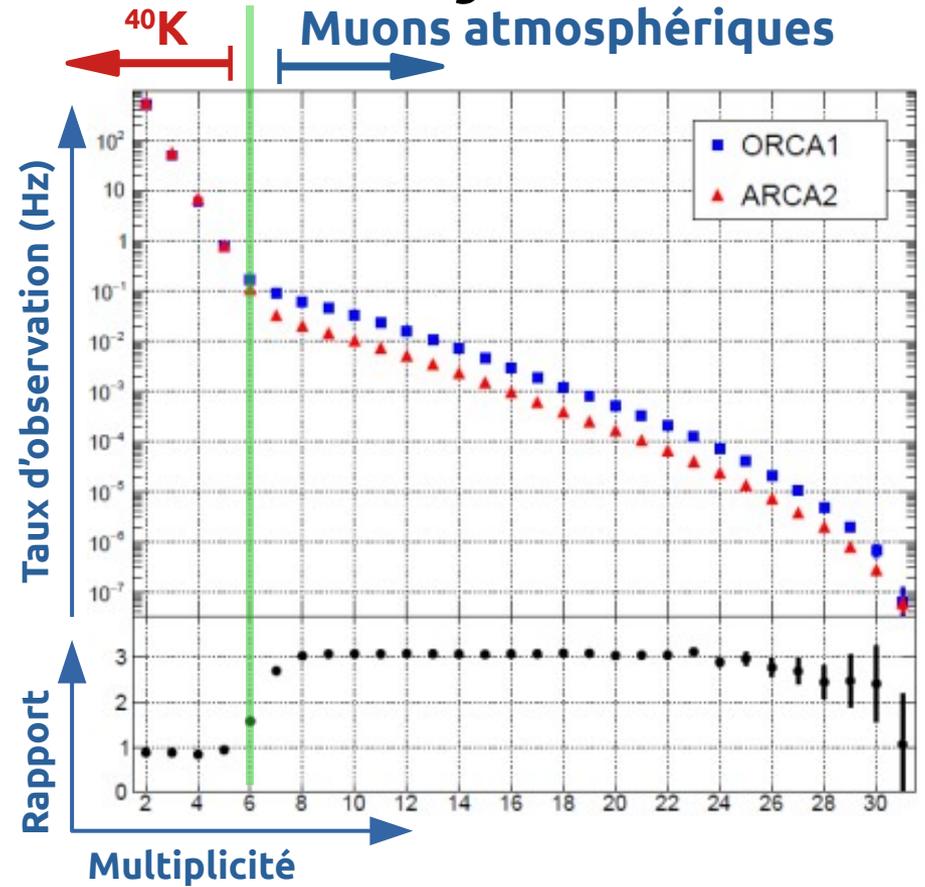


Le potassium est partout dans l'eau de mer !



L'électron (jusqu'à 1.3 MeV) produit lui aussi de la lumière Cerenkov !

L'eau absorbe et diffuse la lumière !



Multiplicité = nombre de PMTs qui observent de la lumière simultanément dans un DOM

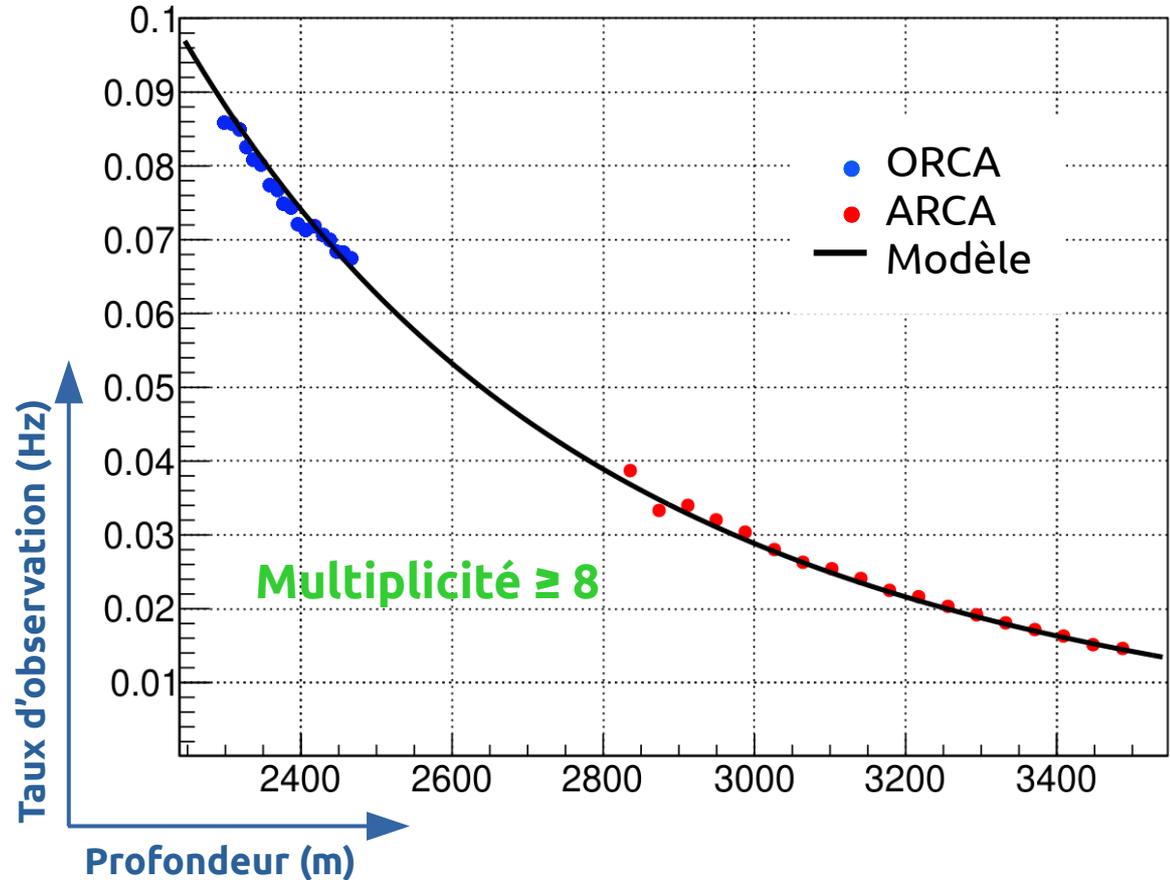
Premières données et premières analyses

Muons atmosphériques en fonction de la profondeur

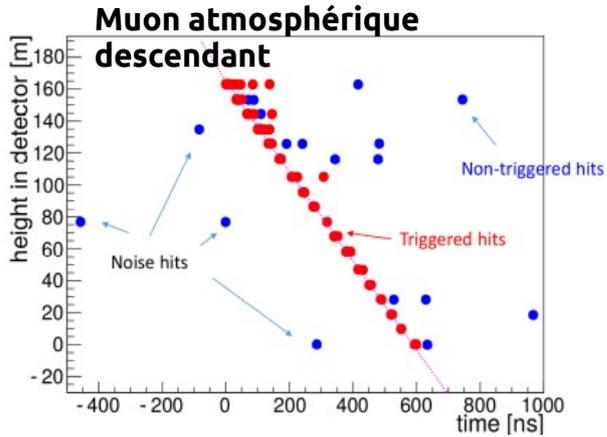
Le muon est une particule pénétrante !
On en voit 3 fois moins à 1000m de profondeur supplémentaire !

Les **données** confirment le modèle : les défauts observés dans les données peuvent être corrigés pour homogénéiser l'instrument !

→ Un signal parasite est transformé en atout pour comprendre et optimiser le détecteur !



En voilà un !

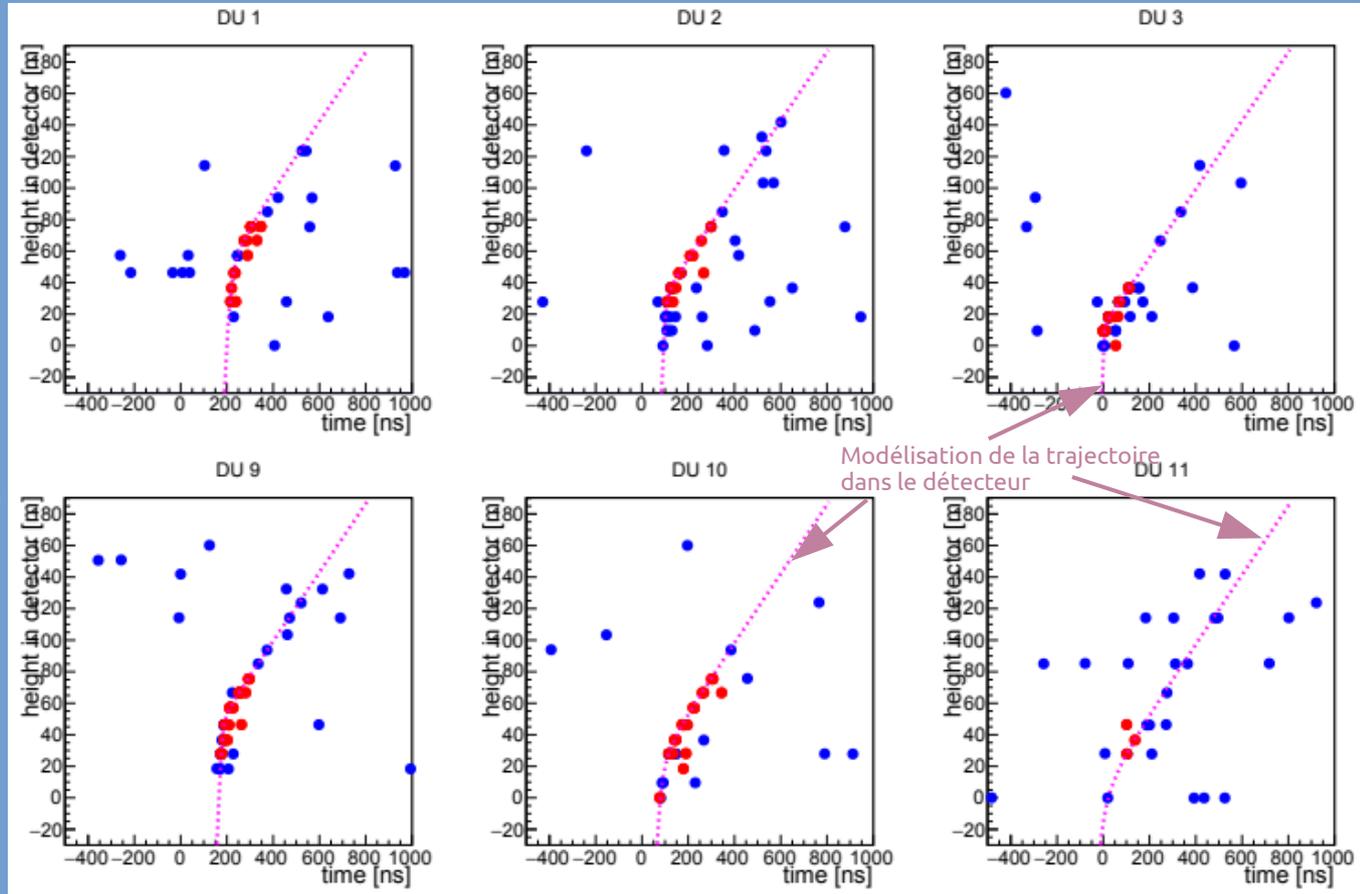


Comment déterminer les propriétés des neutrinos observés ?

- On **modélise** la production de lumière en fonction de la nature, l'énergie et la trajectoire du neutrino
- On **corrige** cette lumière des défauts du milieu (l'eau) et du détecteur (modules, électronique, etc)
- Le **meilleur accord** entre les données expérimentales et les modélisations détermine les propriétés les plus probables

Neutrino montant dans ORCA 6

↑ Altimètre dans le détecteur



→ Temps d'enregistrement

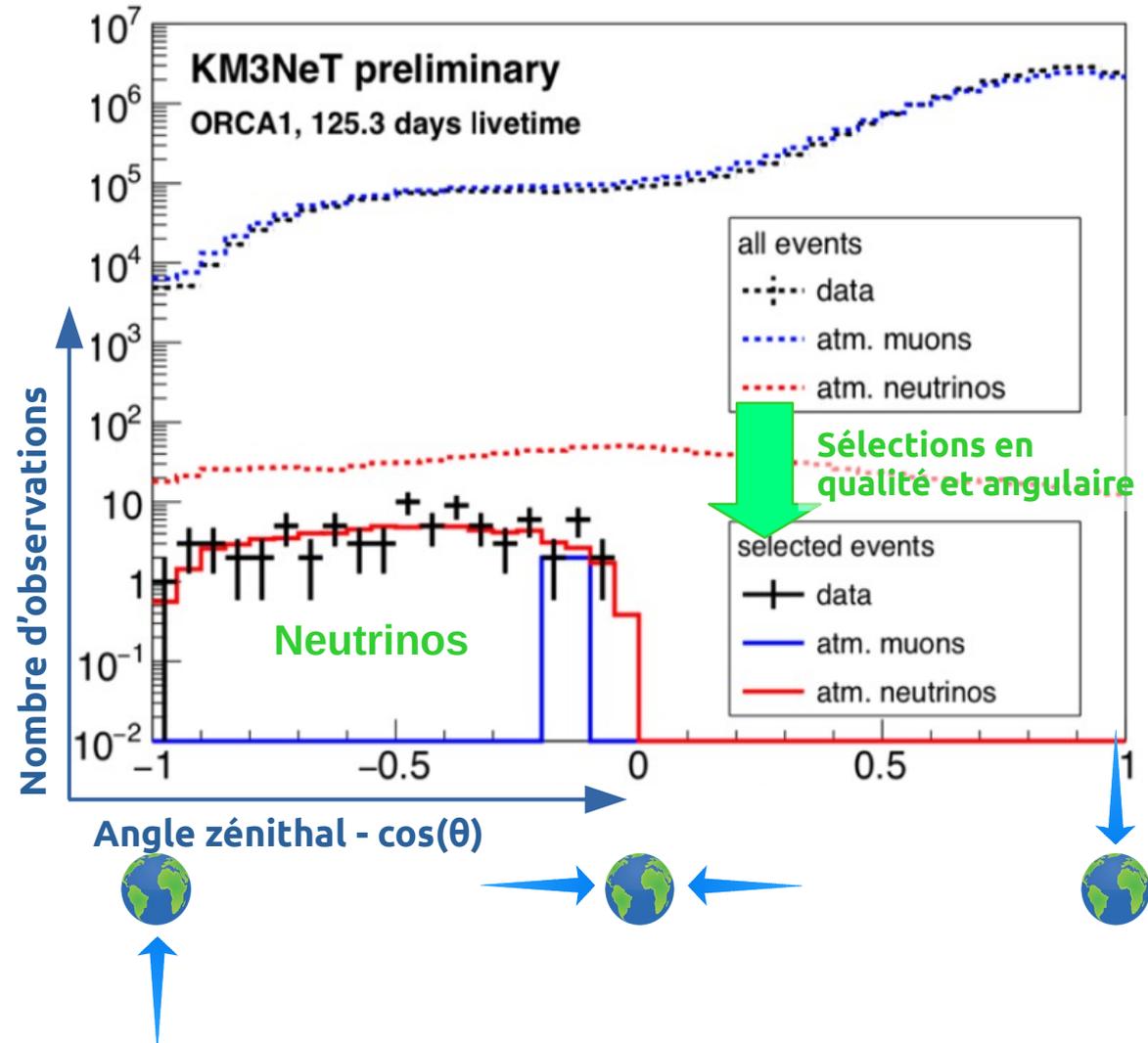
En voilà d'autres !

On détermine les directions zénithale et azimutale des particules → L'instrument pointe !

L'instrument est en cours de construction et déploiement. Peu de lignes sont déjà installées mais déjà des neutrinos. D'autres lignes vont suivre prochainement sur ORCA et ARCA.

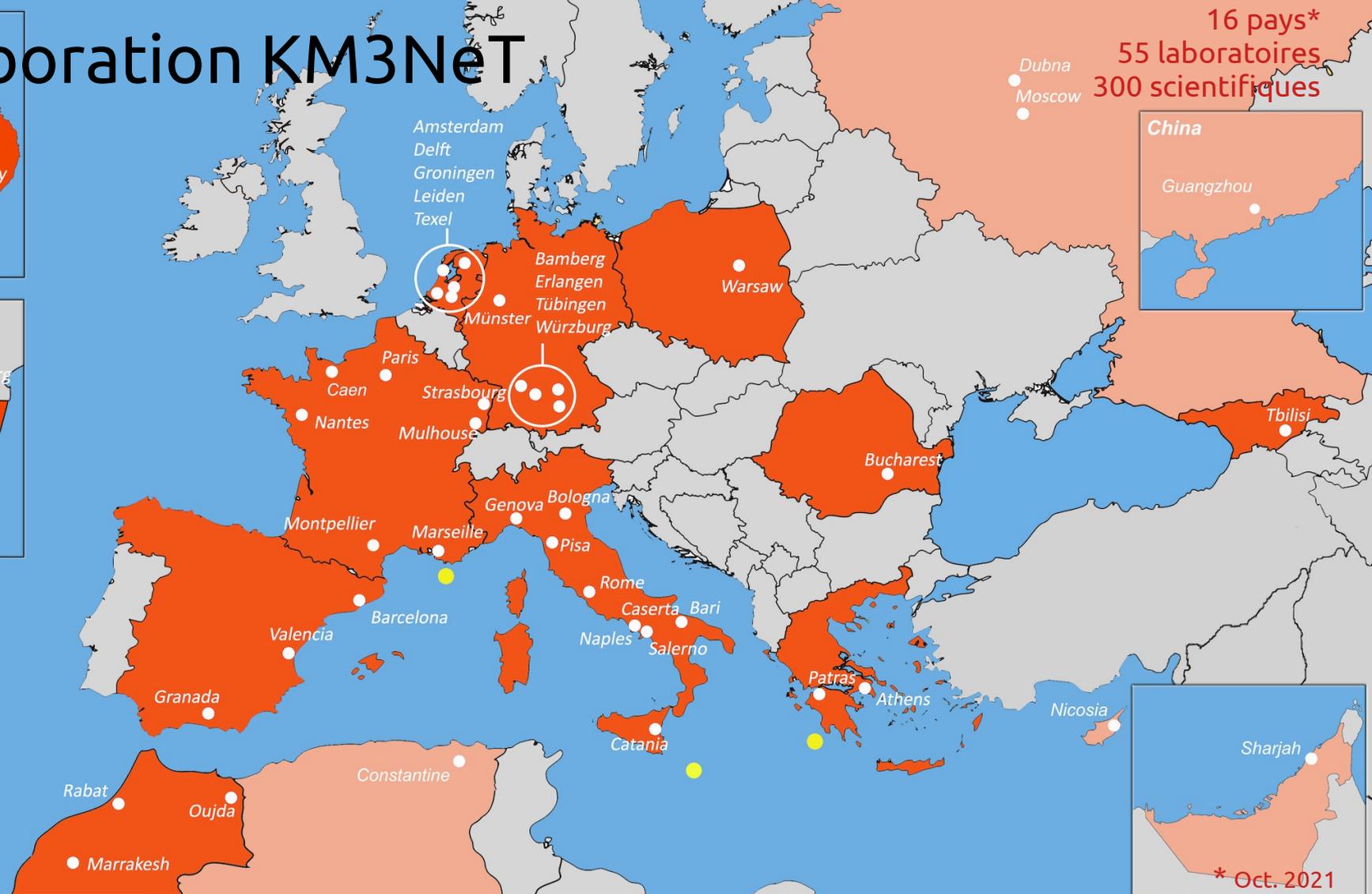
La ~~chasse~~ pêche peut commencer et elle va durer.

On espère une vingtaine d'années d'exploitation des filets !



La collaboration KM3NeT

16 pays*
55 laboratoires
300 scientifiques



Dubna
Moscow



Ce qui n'a été abordé...

- Les oscillations et la hierarchie de masse
- La tomographie neutrino de la Terre
- Le positionnement dynamique de l'instrument
- Les développements pour les océanographes, les biologistes marins...
- Les tremblements de Terre
- La bioluminescence
- Les bio-salissures
- Plus d'information sur www.km3net.org

