



# ANTARES et KM3NeT

## Des télescopes au fond de la mer pour étudier l'Univers !

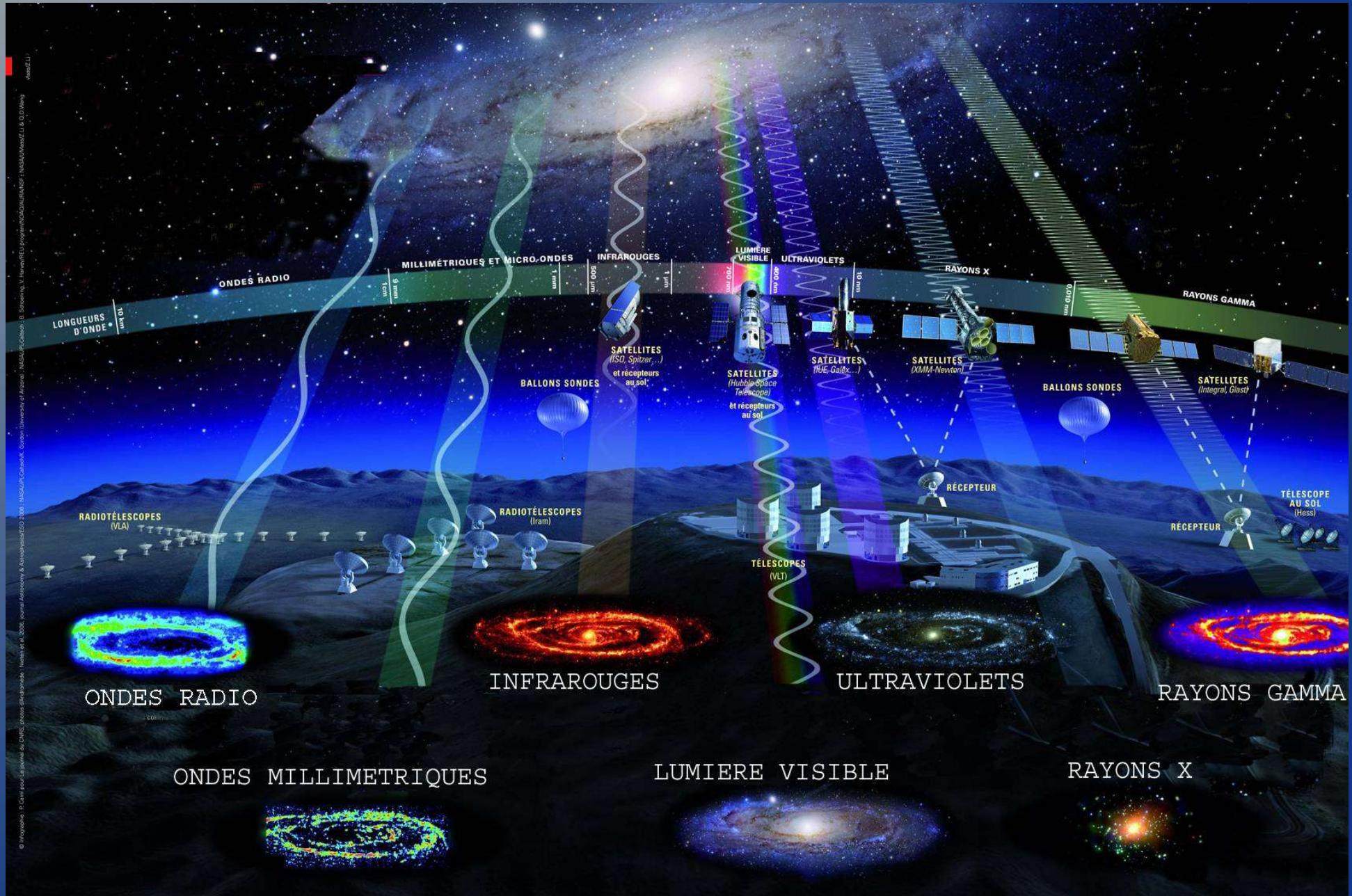


Vincent BERTIN  
Centre de Physique des Particules de Marseille

Stagiaires 3e au CPPM – Décembre 2025



# Astronomie multi-longueurs d'onde

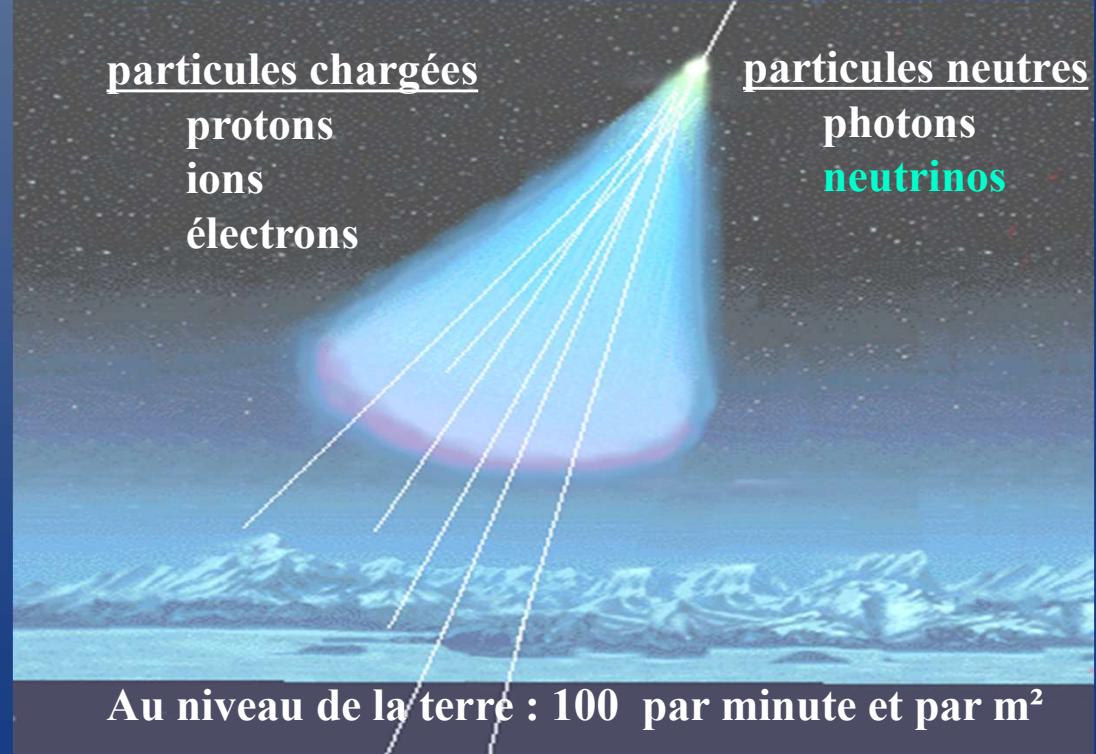


# Les rayons cosmiques

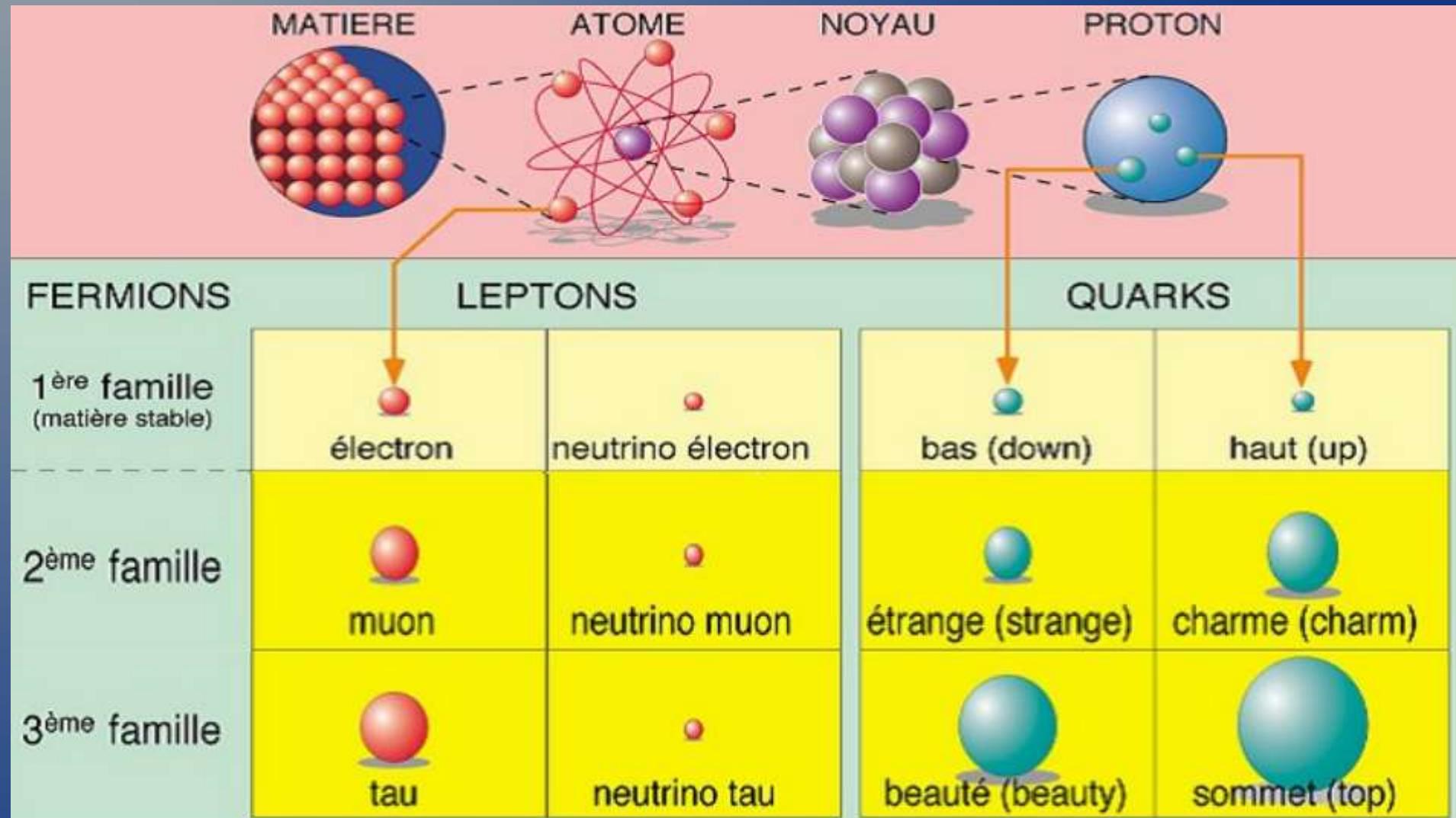


Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

Les rayons cosmiques interagissent avec la haute atmosphère et produisent des grandes gerbes de particules...



# Que sont les neutrinos ?



12 particules de matière dont 3 neutrinos

# Qu'est ce qu'un neutrino ?

CHANGEMENTS DE DOMICILE:

*date de première résidence*

Nom: NEUTRINO  
Prénom: Electron / Muon / Tau

Masse: Très très très petite !  
Charge: Neutre  
Interaction: Faible

Naissance: Réacteurs nucléaires,  
Etoiles, espace,  
Atmosphère  
Eléments radioactifs...

Profession: Passe-muraille

REPUBLIQUE FRANÇAISE

Mairie de *Paris*

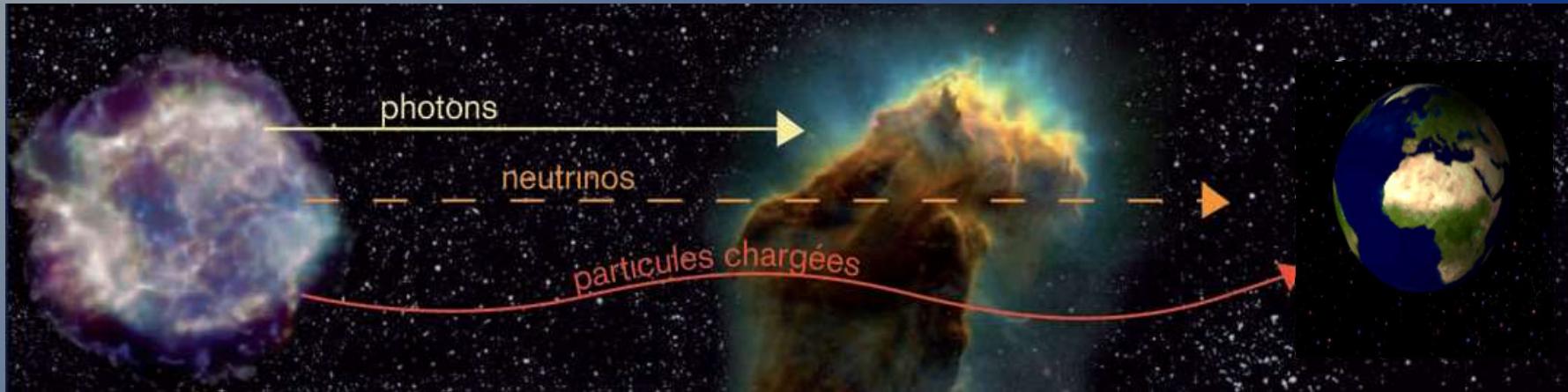
Commissariat de Police  
de *Paris*

CARTE D'IDENTITÉ



AD 11 STATIONNÉ *PARIS* 15, RUE JUIN 1978

# L'astronomie avec les neutrinos



## Avantages du neutrino :

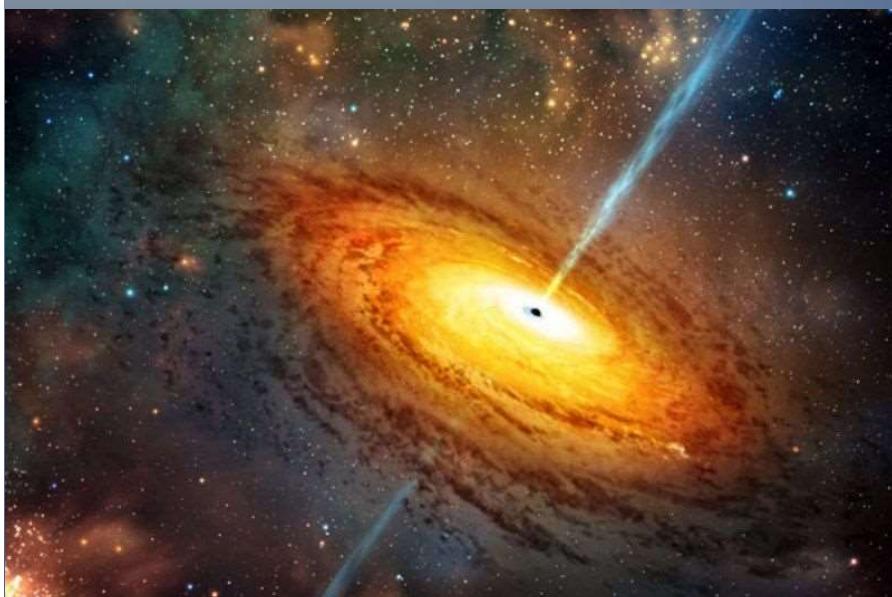
- Electriquement neutre, donc pas dévié par les champs magnétiques  $\Rightarrow$  astronomie
- Pas d'absorption  $\Rightarrow$  observation sur des distances cosmologiques
- Intéragit très faiblement  $\Rightarrow$  s'échappe des régions denses de l'Univers

## Inconvénient :

Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!  
 $\rightarrow$  Nécessité d'un grand volume de détection

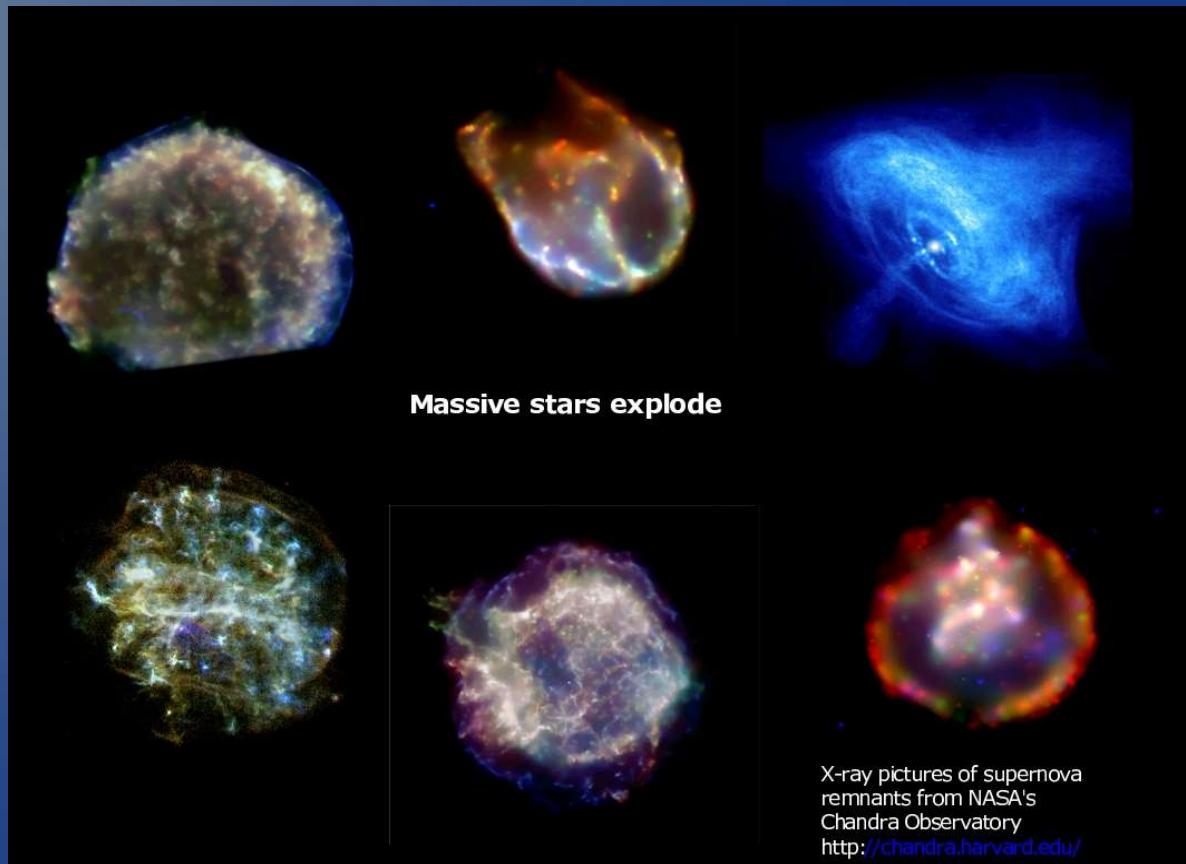
# Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

Les rayons cosmiques pourraient provenir des phénomènes violents de l'Univers...



Trous noirs super-massifs  
(Noyaux actifs de galaxies)

Explosions d'étoiles (Supernovae)



**Massive stars explode**

X-ray pictures of supernova  
remnants from NASA's  
Chandra Observatory  
<http://chandra.harvard.edu/>

# Pour arrêter les neutrinos...

... La Terre !  
(...de temps en temps...)

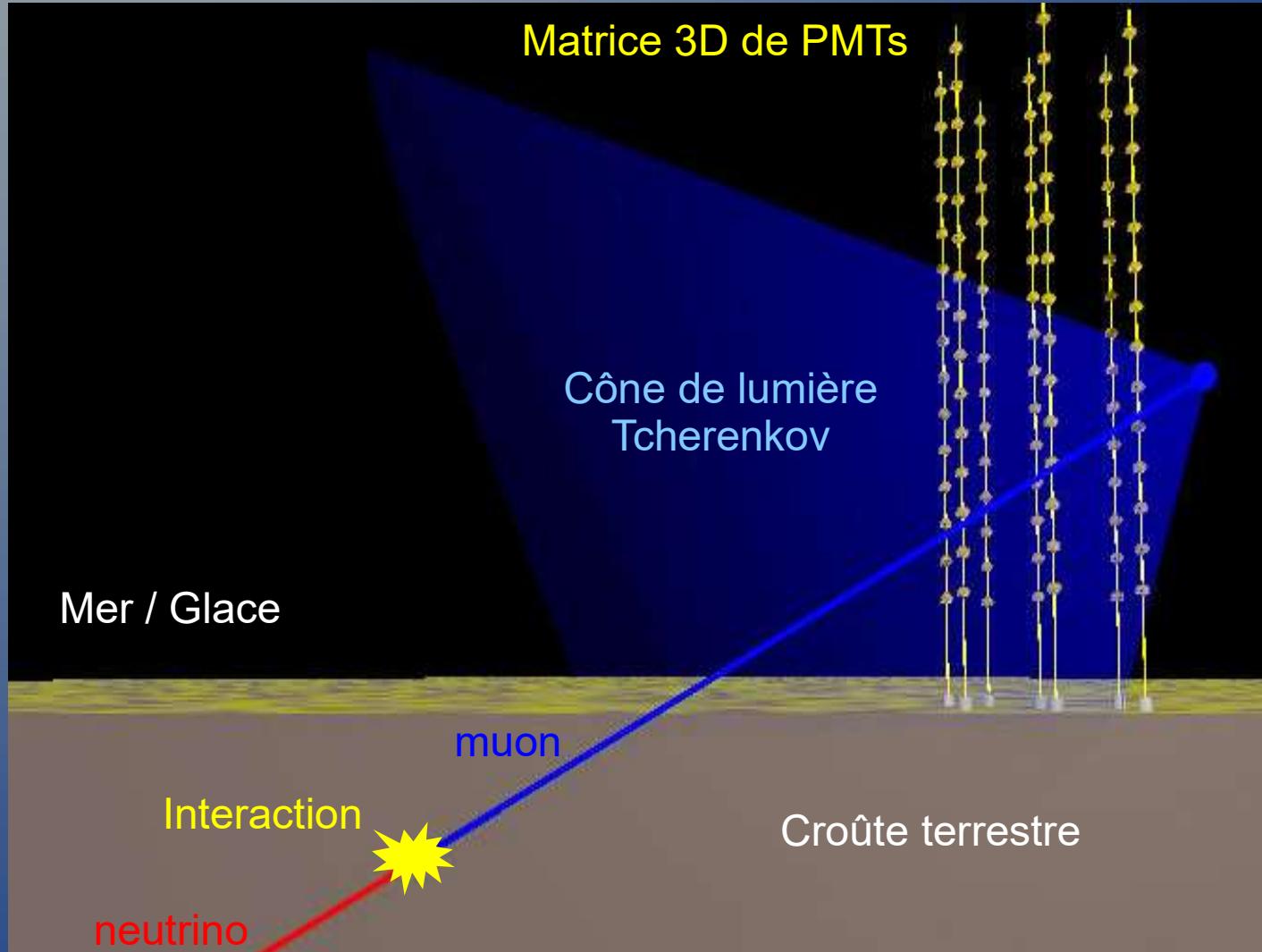


Un neutrino entre parfois en collision avec un noyau atomique

Il crée alors une autre particule : un muon (ou electron ou tau) que l'on peut essayer de détecter



# Détection indirecte des neutrinos



En traversant  
un milieu transparent  
(eau, glace, verre,...),  
le muon crée un cône de  
lumière bleutée  
(lumière Tcherenkov)

Lumière Cherenkov produite par  $\mu$  issu du  $\nu$   
propagation détectée par matrice de PMTs  
Temps & position des photons permet la  
reconstruction de la trajectoire du  $\mu$  ( $\sim \nu$ )

# Les Télescopes à neutrinos dans le Monde

ANTARES & KM3NeT



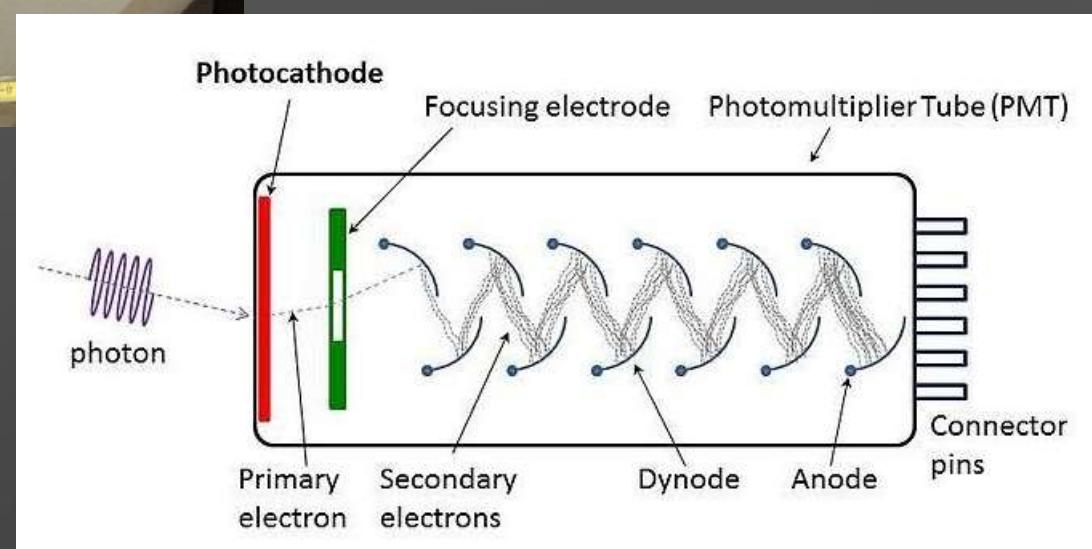
BAIKAL



↑  
IceCube



# Les yeux d'ANTARES: photomultiplicateurs



# Le DéTECTEUR ANTARES

- 12 lignes
- 25 étages / line
- 3 PMTs / étage
- 900 PMTs

14.5 m

Bouy

Etage

350 m

~60-75 m

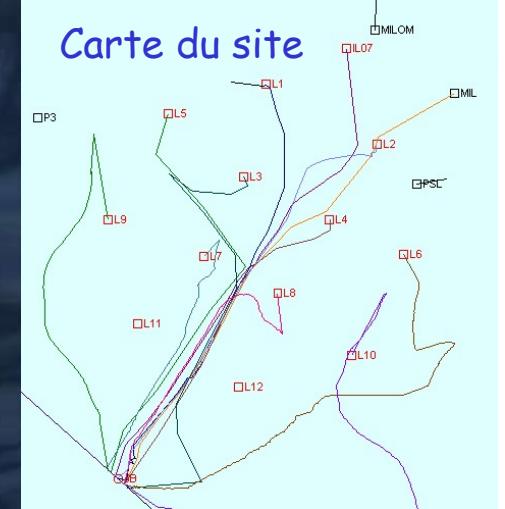
100 m

Boîte de  
Jonction

Câble  
Electro-  
optique

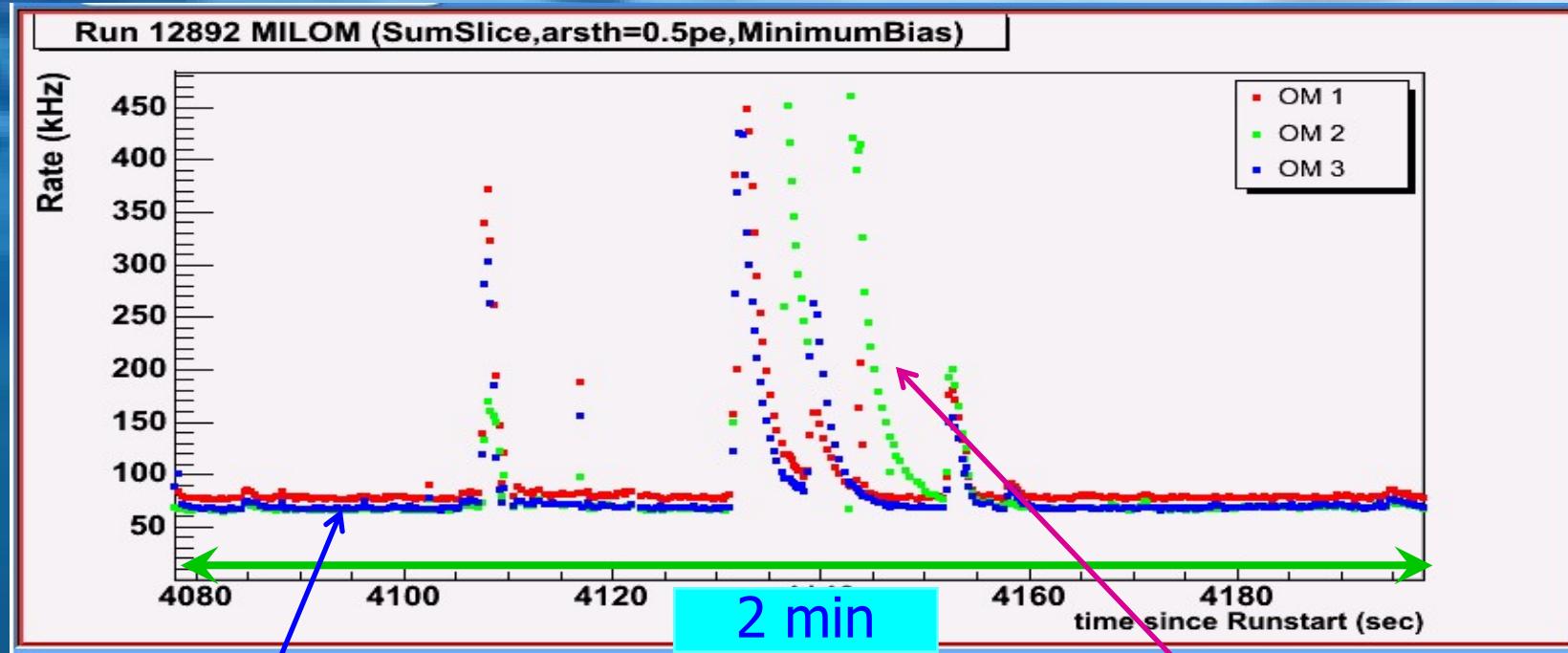
Profondeur : 2480m

DéTECTEUR en opération entre 2006 et 2022



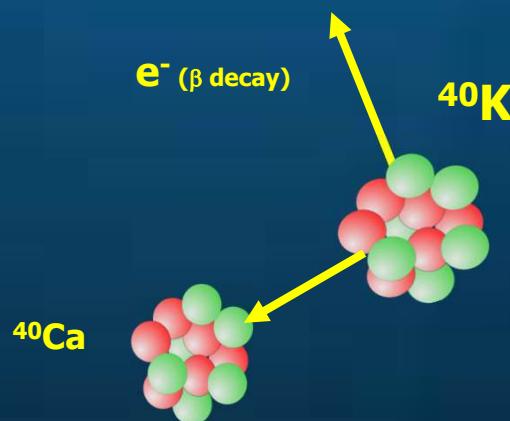


# Taux de comptage d'un Module Optique



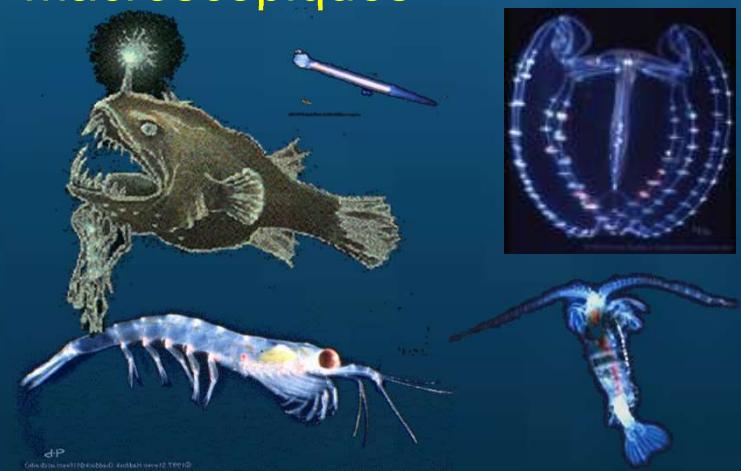
Ligne de base :

Radioactivité du sel marin ( $^{40}\text{K}$ )  
+ bactéries bioluminescentes



Bursts:

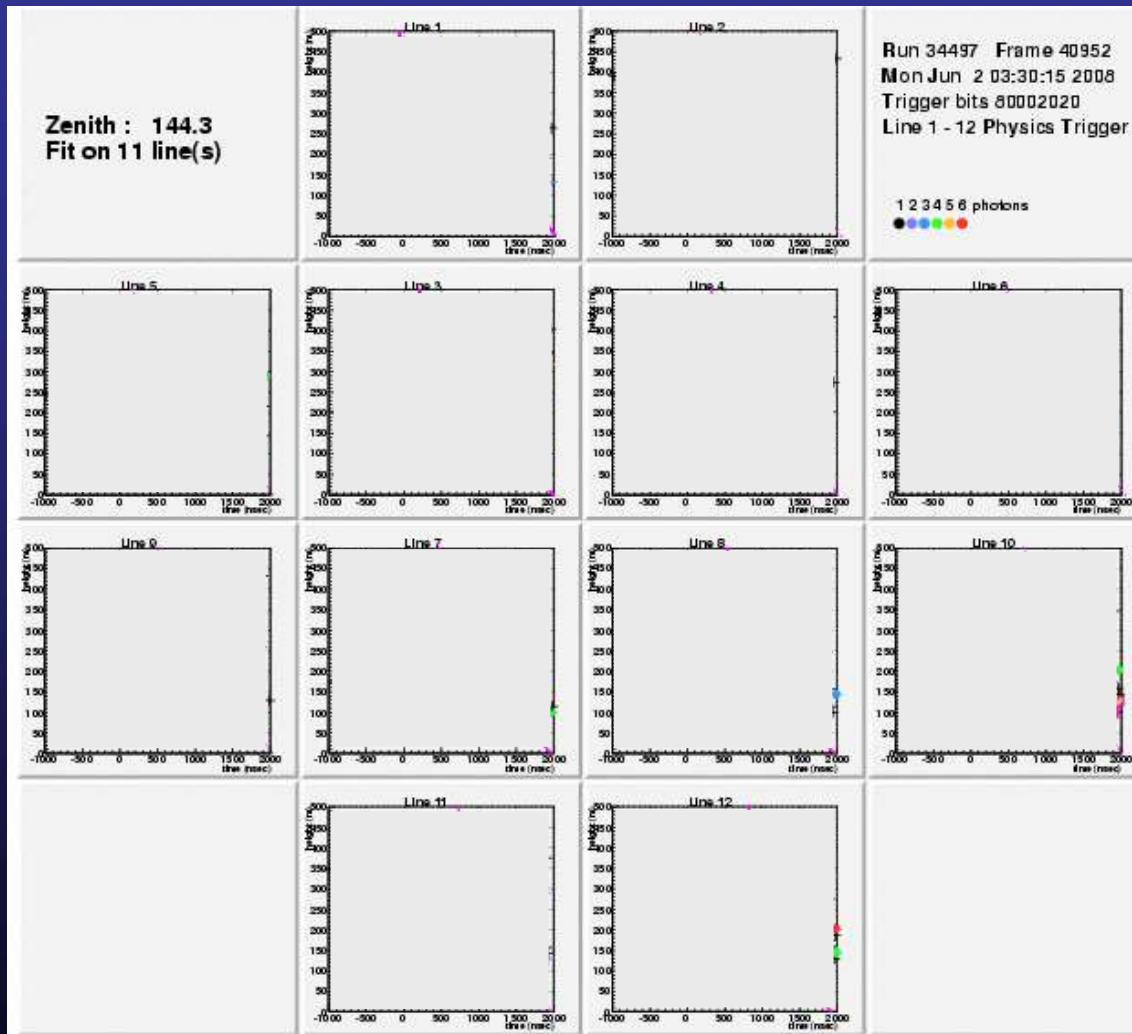
Bioluminescence d'organismes macroscopiques





# Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



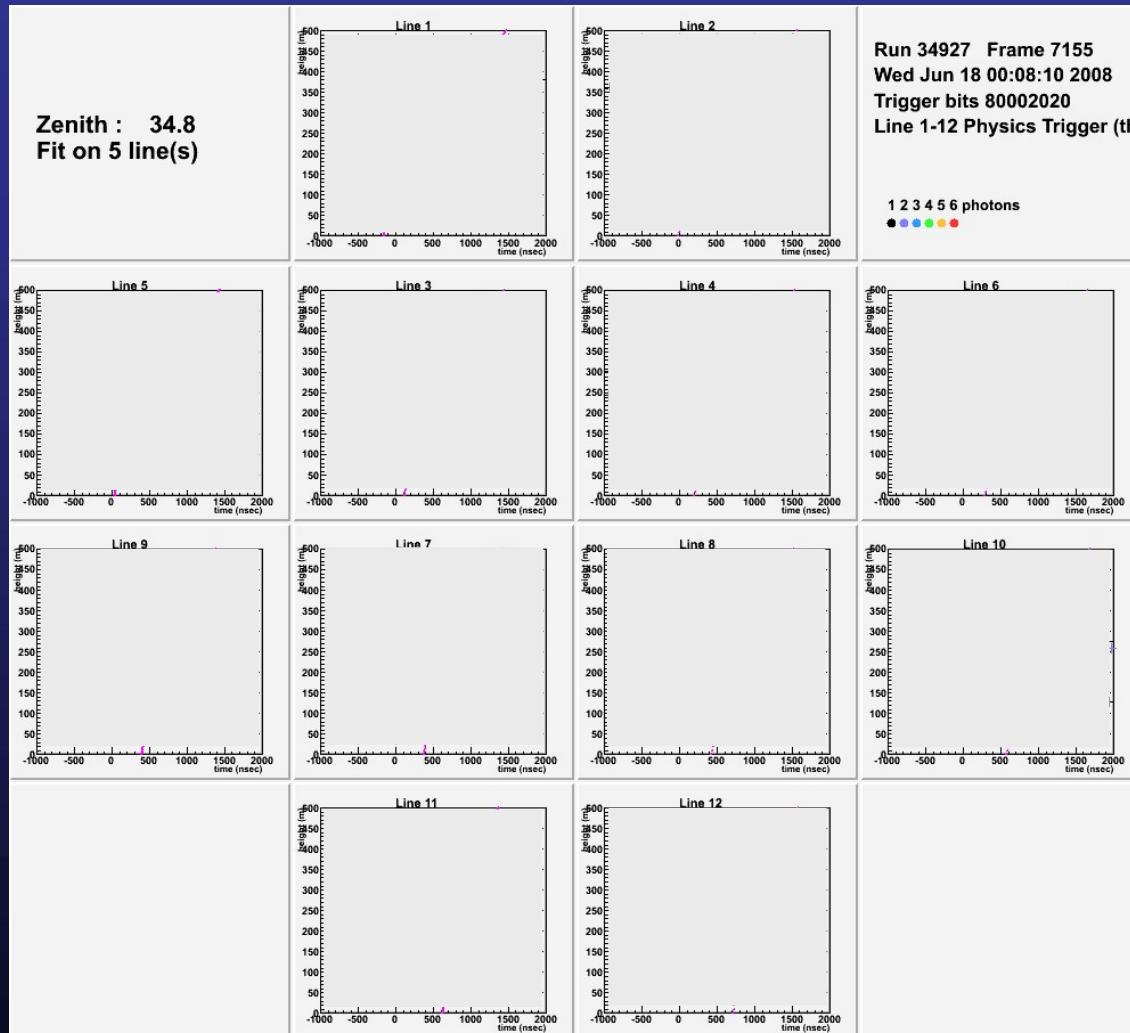
*Example of a **down-going muon event**, detected over the 12 detector lines*



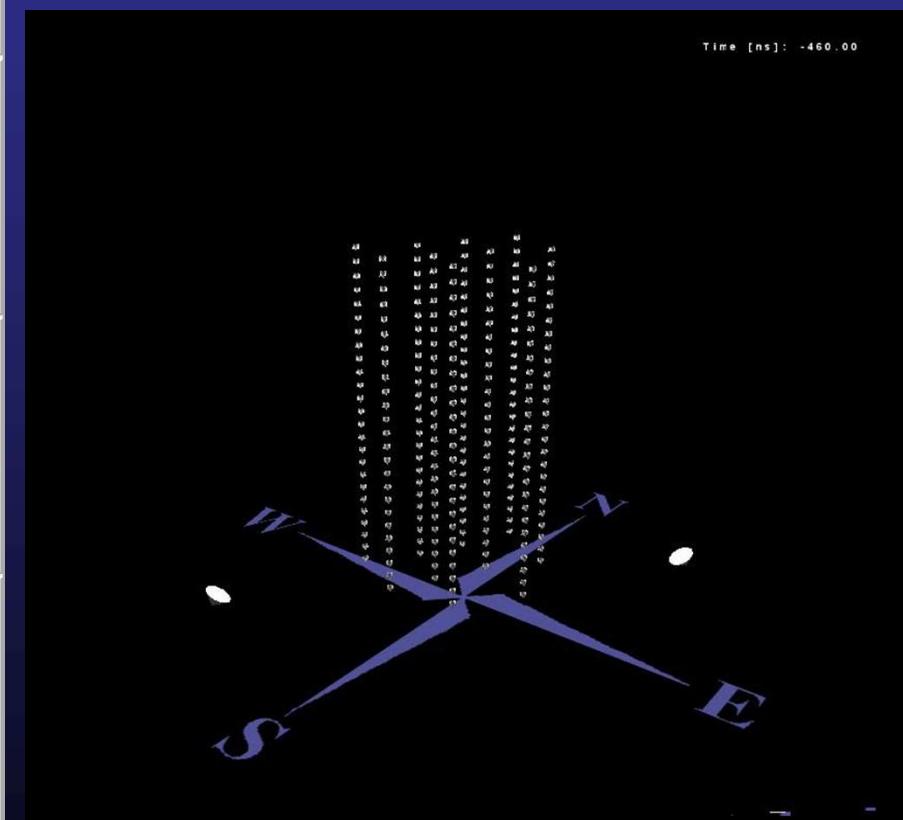


# Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



*Example of an up-going muon event (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines*



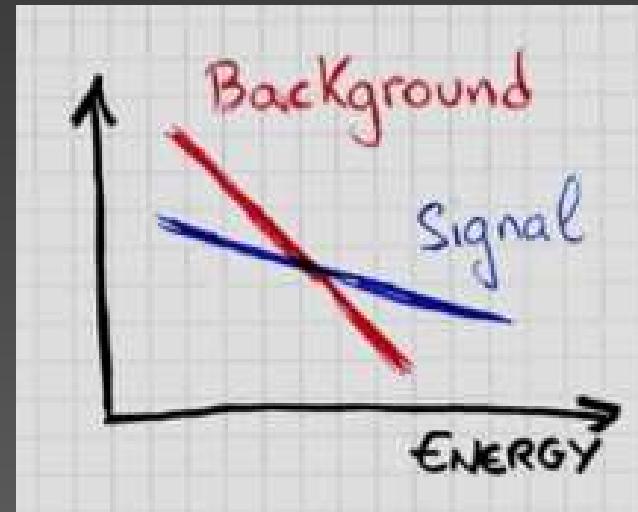
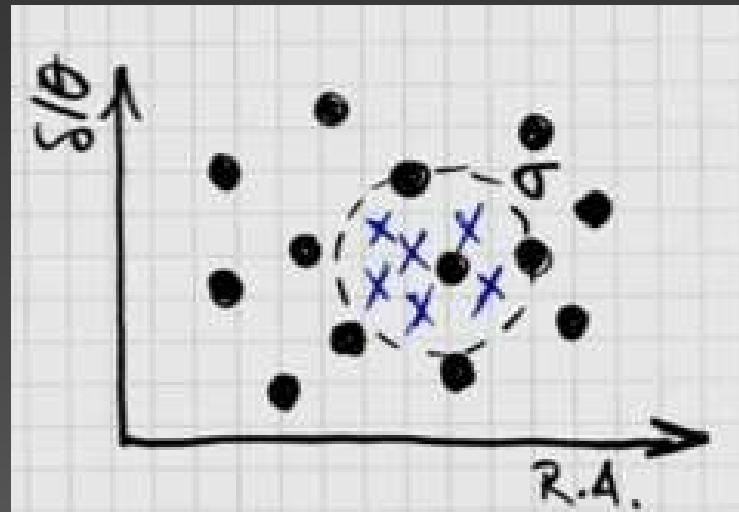
**Neutrinos atmosphériques**

150000 par an.km<sup>3</sup>

**Rayons Cosmiques**

**Muons atmosphériques**  
500 millions par an.km<sup>3</sup>

# Signal vs Bruit de fond



## Suppression du bruit de fond:

- muon atmosphérique avec la qualité de la reconstruction
- neutrino atmosphérique: isotrope + faible énergie

## Signal:

- distribution piquée pour une source et à plus haute énergie



Source ponctuelle

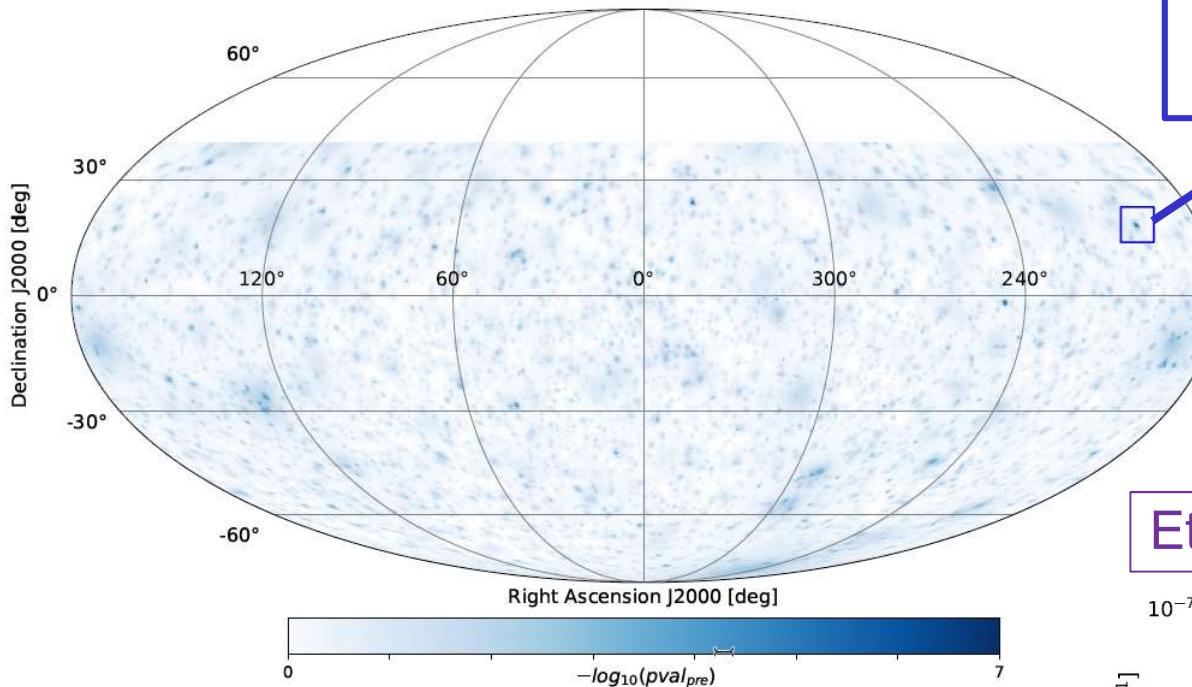


Flux diffus



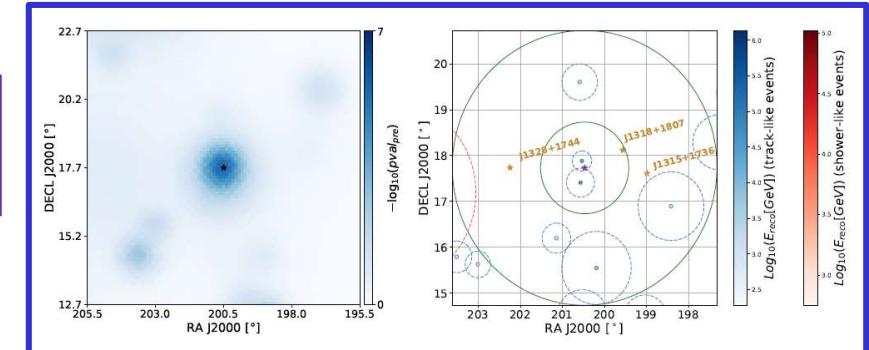
# Le ciel en neutrinos vu avec ANTARES

Carte du ciel obtenue avec toutes les données enregistrées par ANTARES 2007-2022

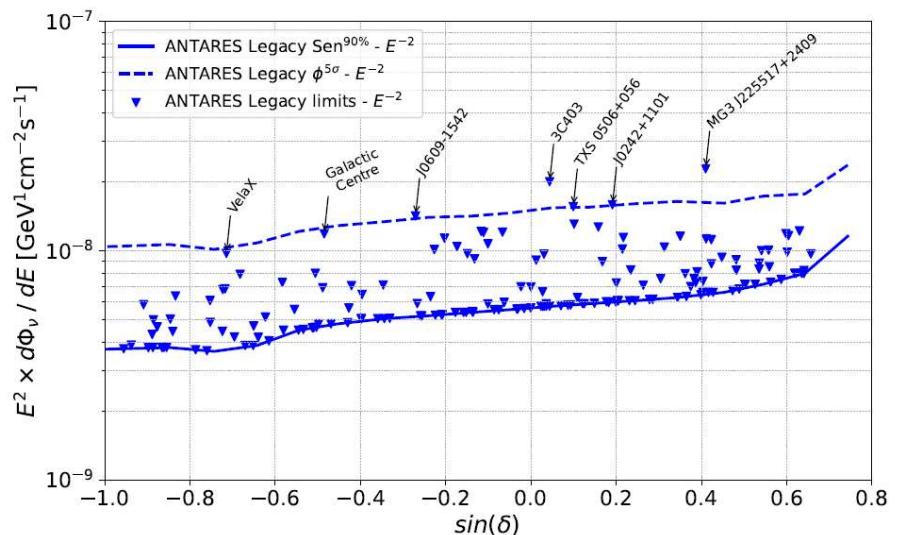


Etude statistique de la répartition des événements sur la carte du ciel

→ Pas d'excès significatif !



Etude de 169 sources particulières



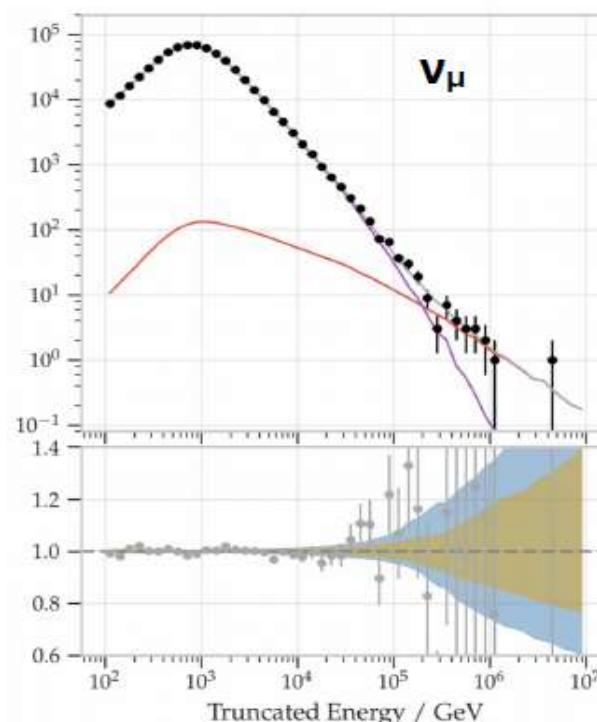
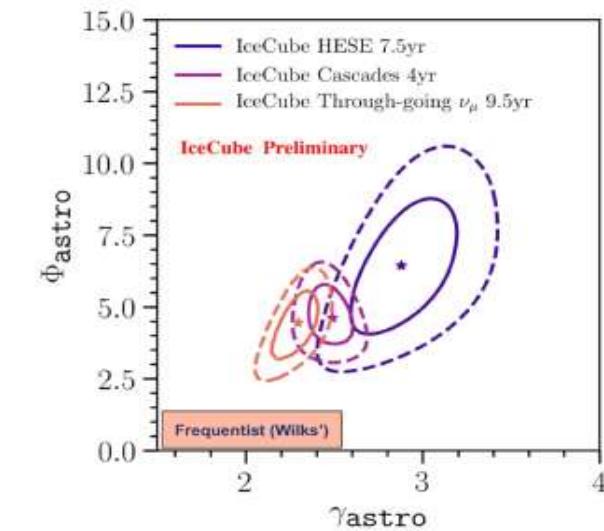
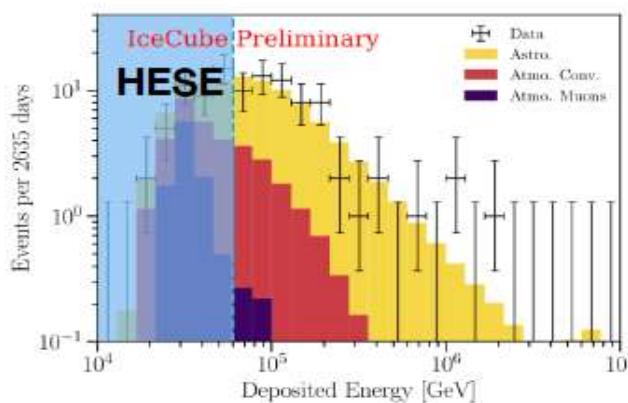


# ANTARES Multi-Messengers Analyses



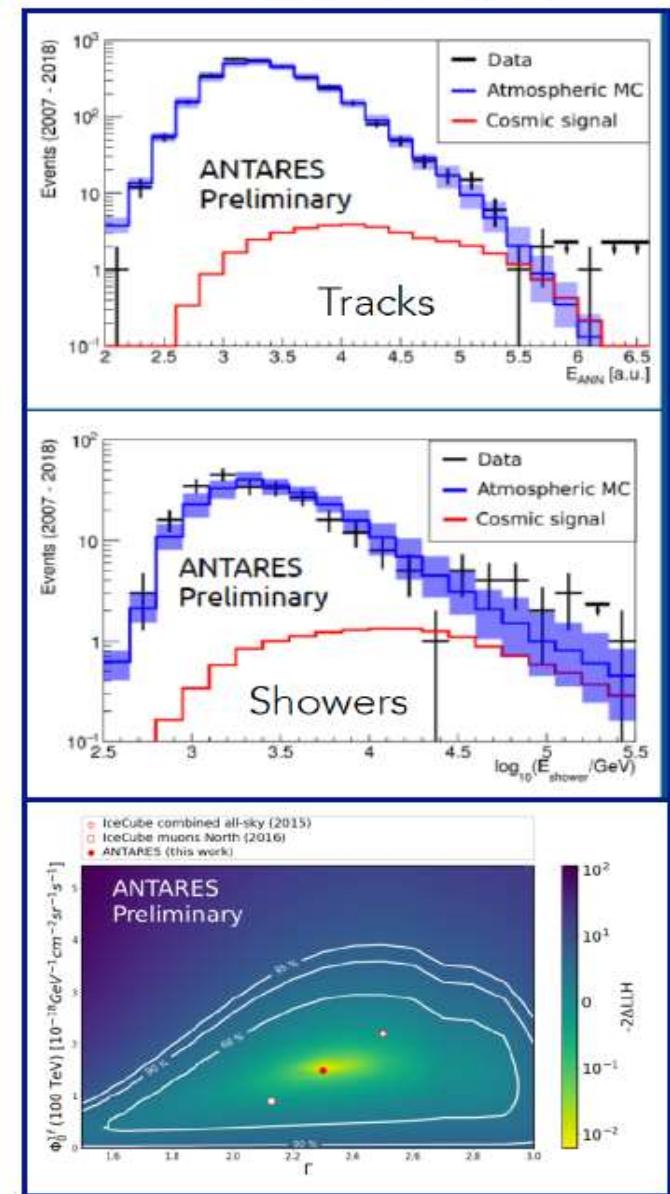
# Un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie...

## IceCube 7-10 yrs



Name	Approx. Neutrino Energy	Direction	Dominant Flavor	Unbroken Spectral Index
HESE	50 TeV - 5 PeV	All-sky	e, $\mu$ , $\tau$	2.89
Cascades	5 TeV - 5 PeV	All-sky	e, $\tau$	2.48
NuMu	50 TeV - 10 PeV	Northern sky	$\mu$	2.28

## ANTARES 11 yrs

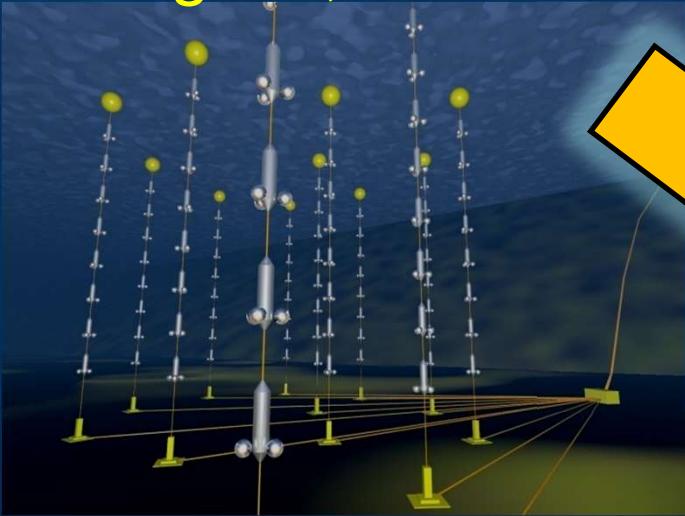


Flux très faible → doit être étudié avec un détecteur de taille multi-km<sup>3</sup>

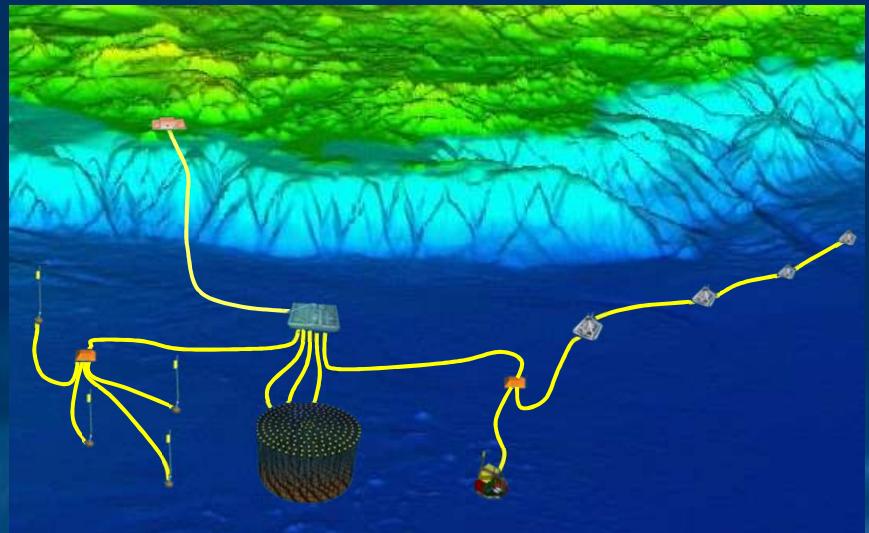
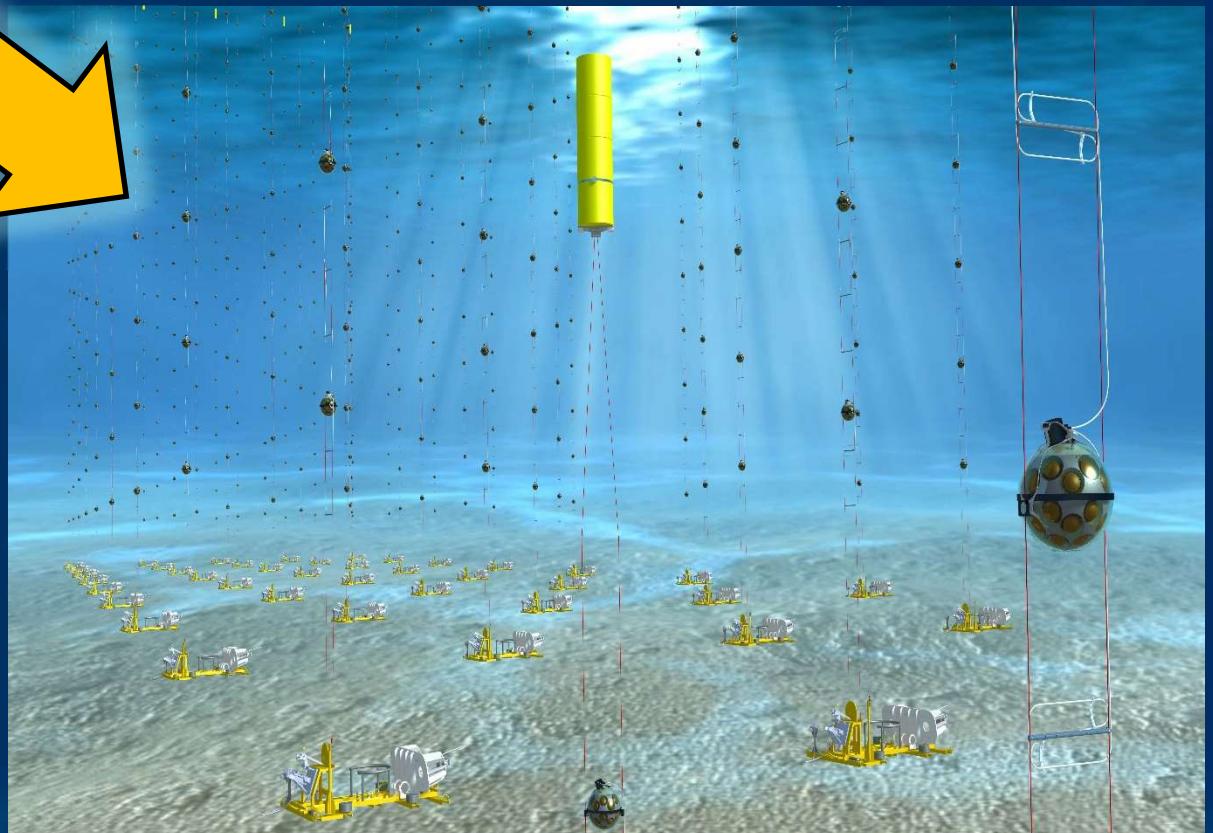


# Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs



~350 lignes, ~6300 OMs

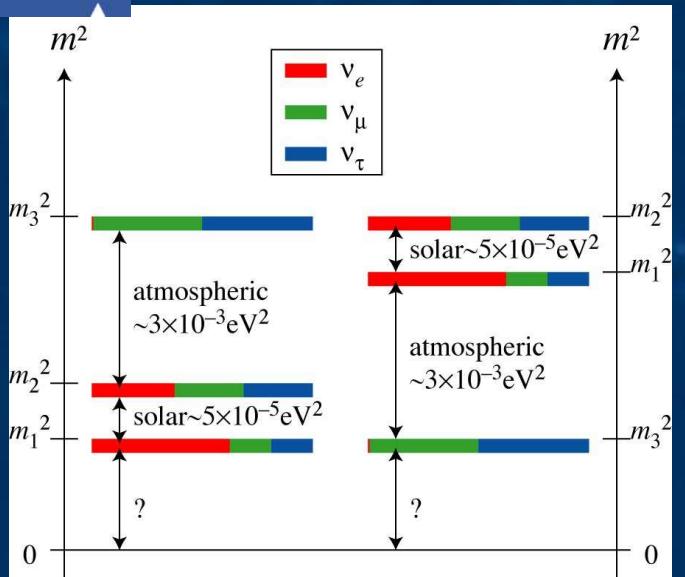


Observatoire multidisciplinaire permanent en mer profonde

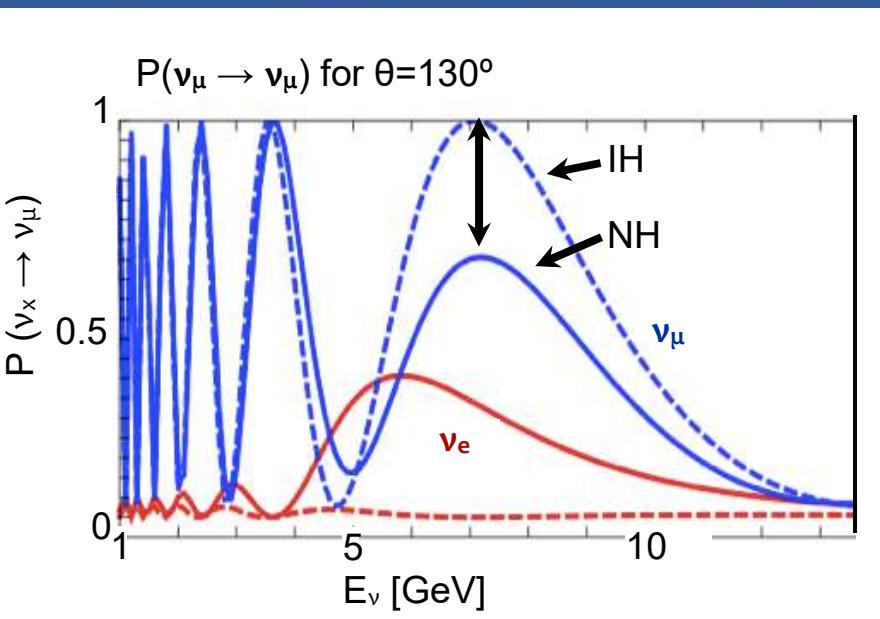
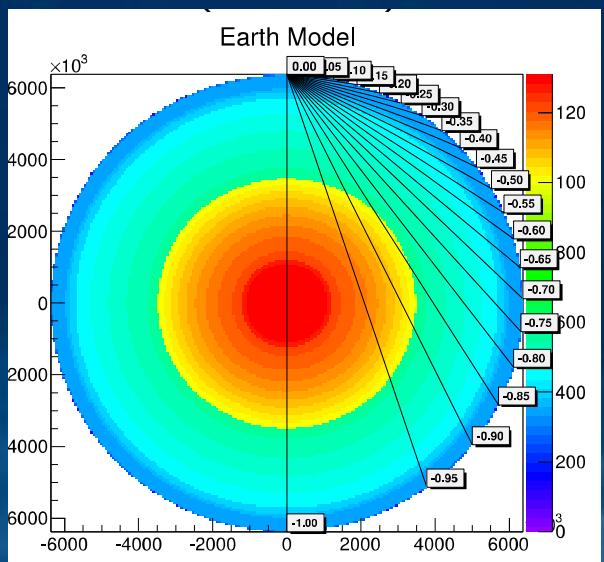
Détecteur installé sur 2 sites profonds en Mer Méditerranée au large de Toulon (France) et Sicile



# Mesure de la Hiérarchie de Masse des Neutrinos avec les oscillations des neutrinos atmosphériques



Paramètre fondamental de la nature des neutrinos toujours inconnu !!



Etudes précise du **flux des neutrinos atmosphériques de quelques GeV** intéragissant dans la Terre

NEUTRINO OSCILLATIONS  
The discovery of these oscillations shows that neutrinos have mass.



# La Collaboration KM3NeT



ORCA, pour l'étude des propriétés quantiques des neutrinos

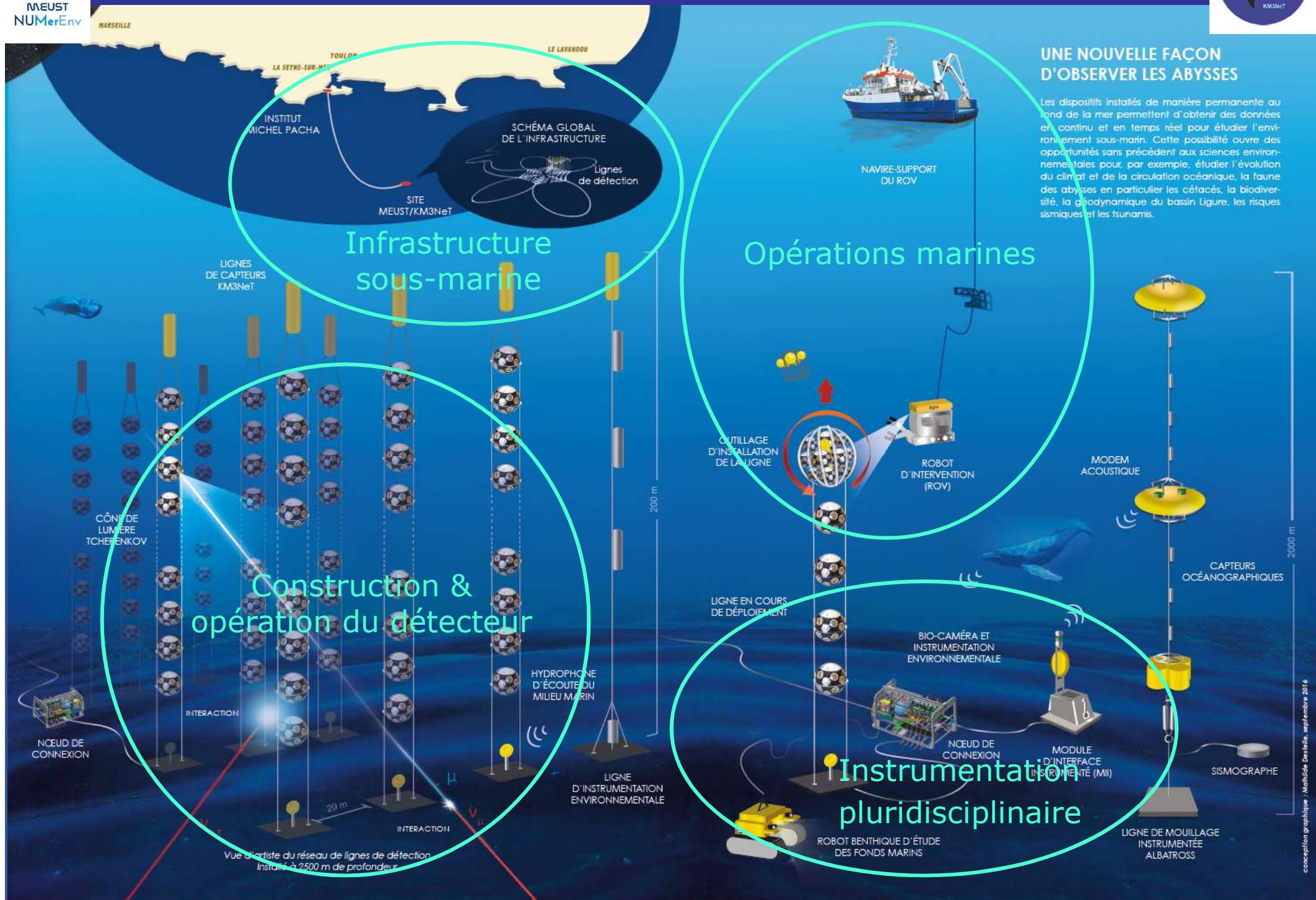
ARCA, pour l'astronomie neutrino

Une technologie, deux détecteurs

Une collaboration internationale  
17 Pays  
53 Instituts  
250 Scientifiques



# Le détecteur KM3NeT/ORCA au large de La Seyne/Mer



Plage des Sablettes,  
La Seyne-sur-Mer

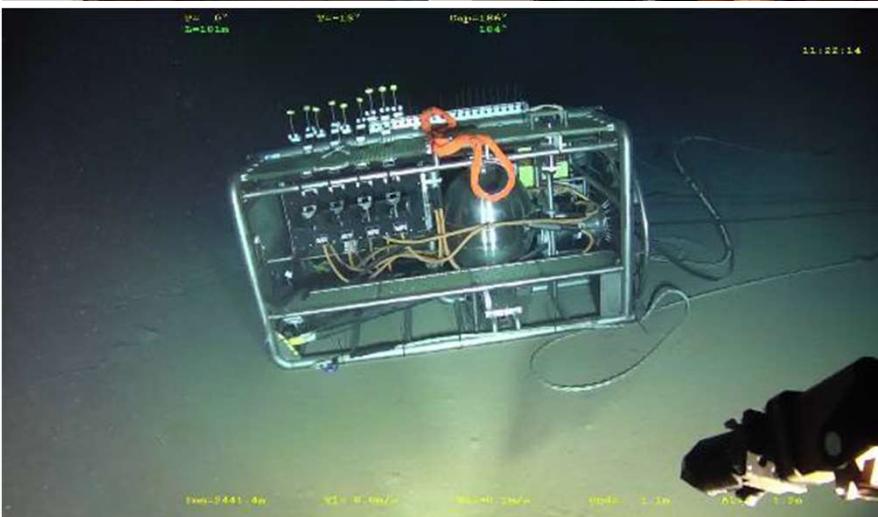


Longeur 40 km,  
36 fibres optiques,  
1 conducteur (3400 VAC)

Deuxième câble en 2025  
(réutilisation du câble ANTARES posé en 2001)

# Les premiers nœuds de connexion

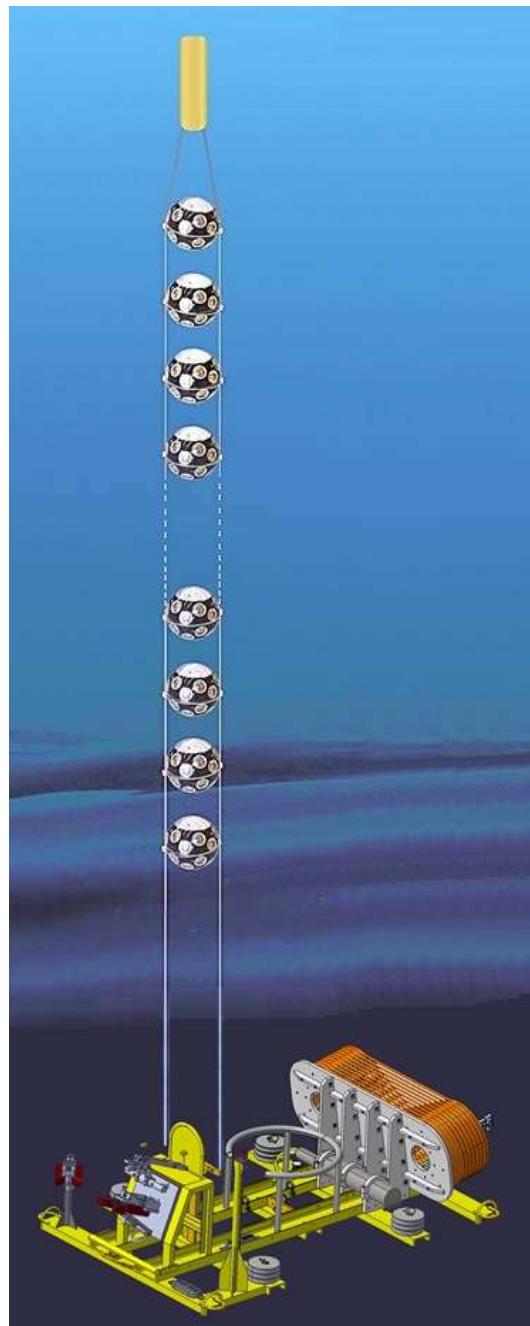
Noeud 1 : déployé 10/2018



Noeud 2 : déployé 10/2020



# La ligne de détection KM3NeT (DU)



## Technologie unique pour ORCA et ARCA

- Bouée de tête
- 2 câbles porteurs en fibres synthétiques (*diamètre 4 mm, pré tensionnés*)
- Câble électro-optique en équipression (*diamètre 7 mm, 24 fibres, 2 conducteurs*)
- 18 étages avec chacun un DOM
- Châssis d'ancrage en pied de ligne

	ORCA	ARCA
Distance vertical entre DOMs:	9 m	36 m
Hauteur de ligne:	200 m	800 m
Distance horizontale entre lignes:	20 m	90 m

# Le capteur de lumière KM3NeT (DOM)



Photomultiplicateurs 3''  
*Hamamatsu*



- Sphère avec 31 PMs de 3 pouces
- Electronique de lecture intégrée
- Grand champ de vision
- Comptage de photons
- Information directionnelle
- Réjection de la bioluminescence
- Réduction de coûts vs ANTARES

Etage ANTARES



Photomultiplicateur 10''  
*Hamamatsu*



# Construction du détecteur KM3NeT ORCA

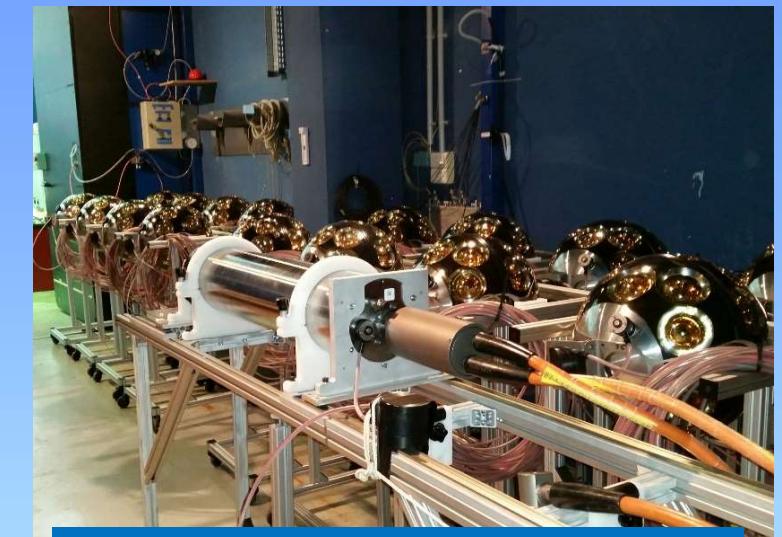


Dépliage autonome

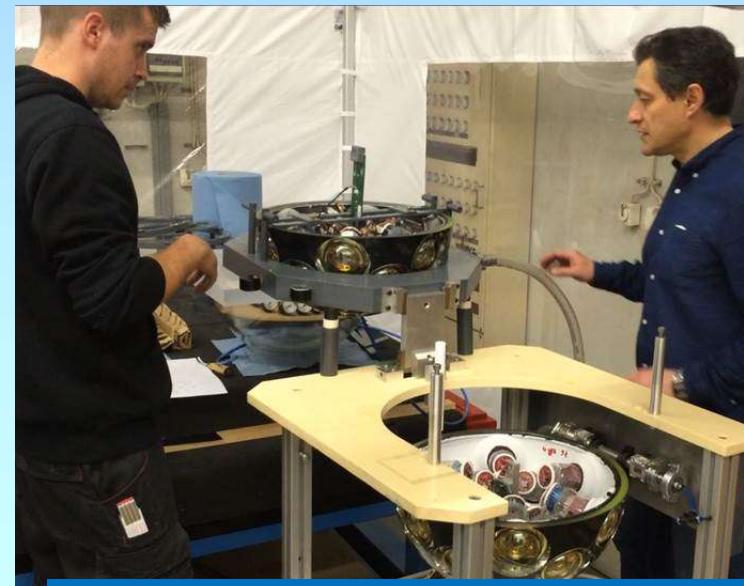
Detector Unit : ligne verticale équipée de 18 DOMs espacés de 9m



Intégration DU au CPPM pour déploiement



Calibration DU en salle noire au CPPM



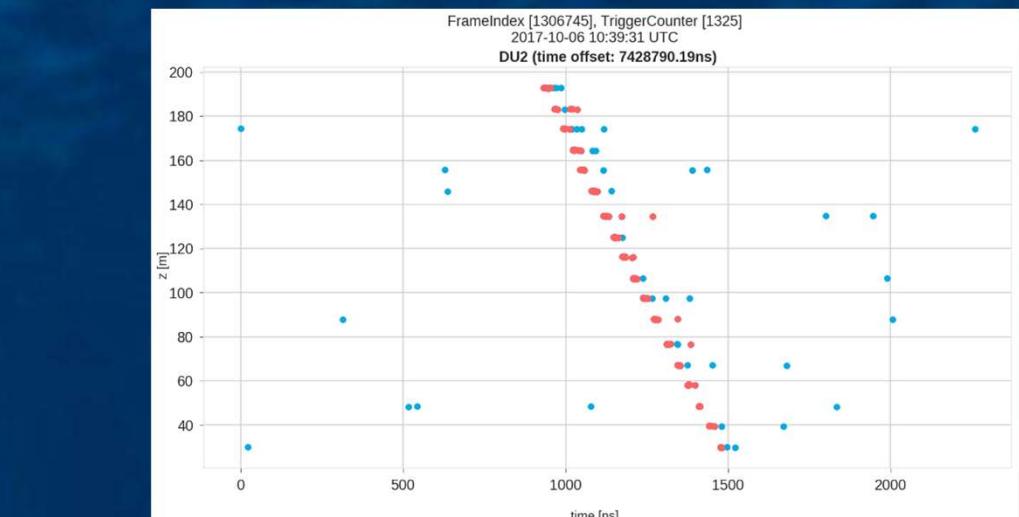
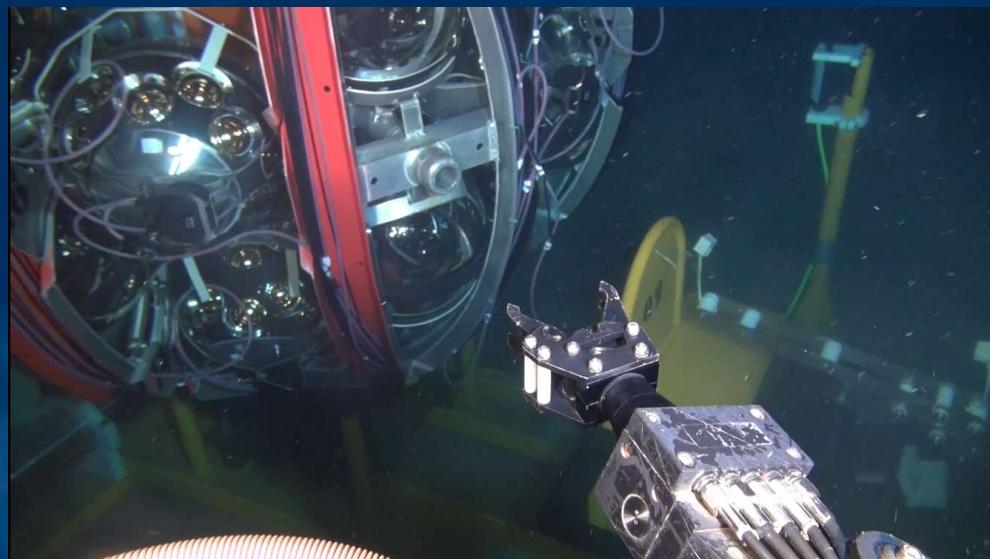
Assemblage d'un capteur de lumière



Tests du capteur de lumière



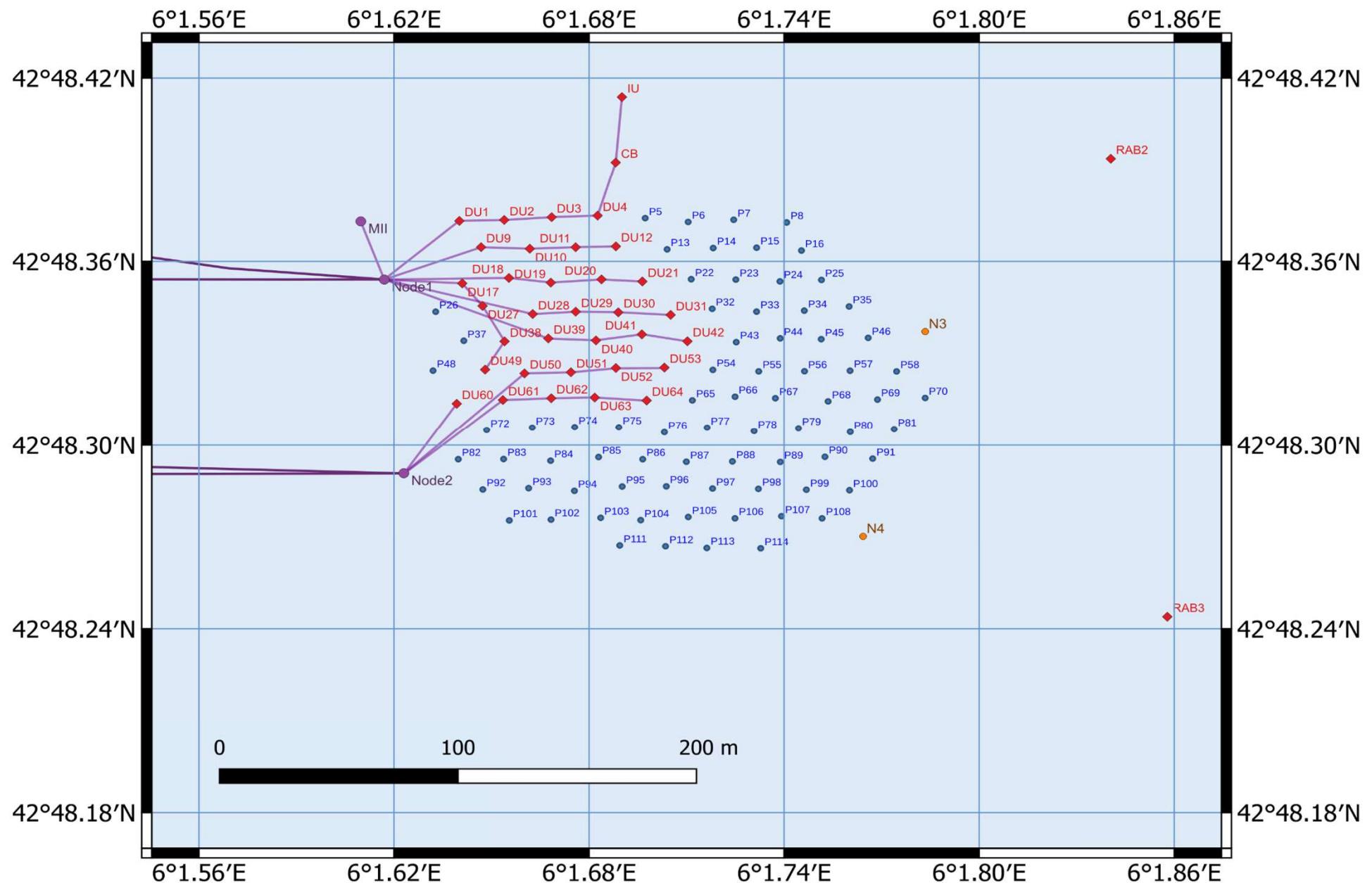
# La première ligne KM3NeT-ORCA



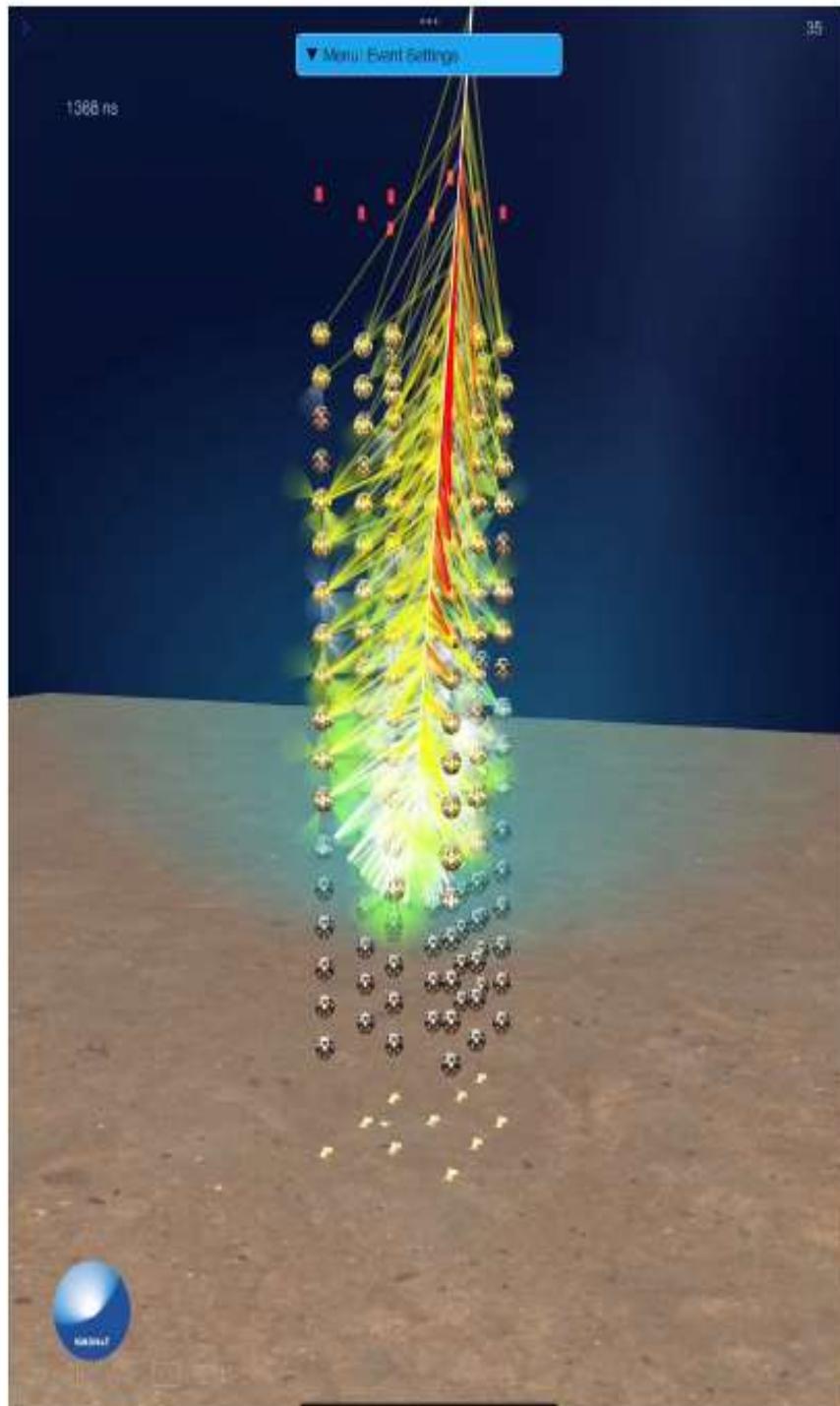
1<sup>ère</sup> ligne mise en opération en 2017

# Status de KM3NeT-ORCA : 33 lignes en opération

Site KM3NeT/ORCA - October 2025



# Statut et 1<sup>ers</sup> Résultats



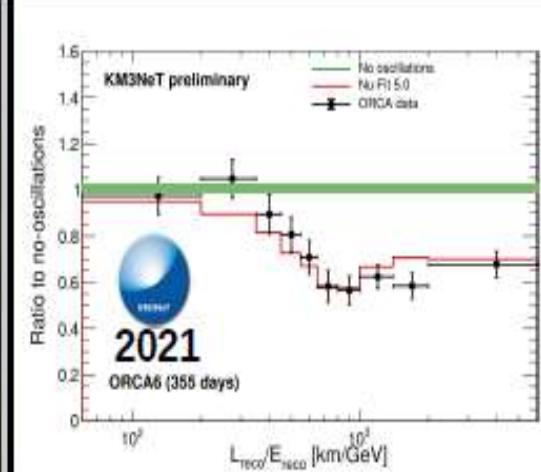
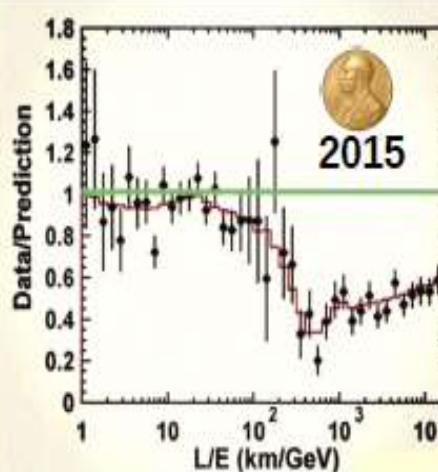
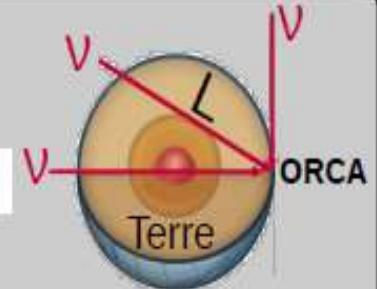
Les détecteurs sont en construction.

ORCA : 33 lignes / 115

ARCA : 51 lignes / 230

Les lignes déployées sont déjà exploitées, et des neutrinos sont observées tous les jours.

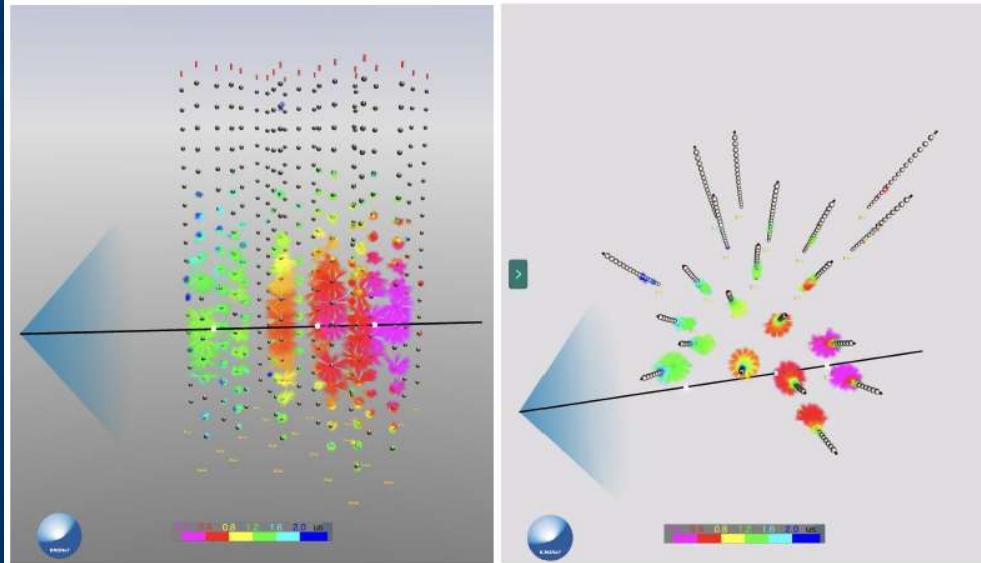
Les 6 premières lignes ORCA ont déjà permis d'observer les propriétés quantiques des neutrinos (Nobel 2015) !





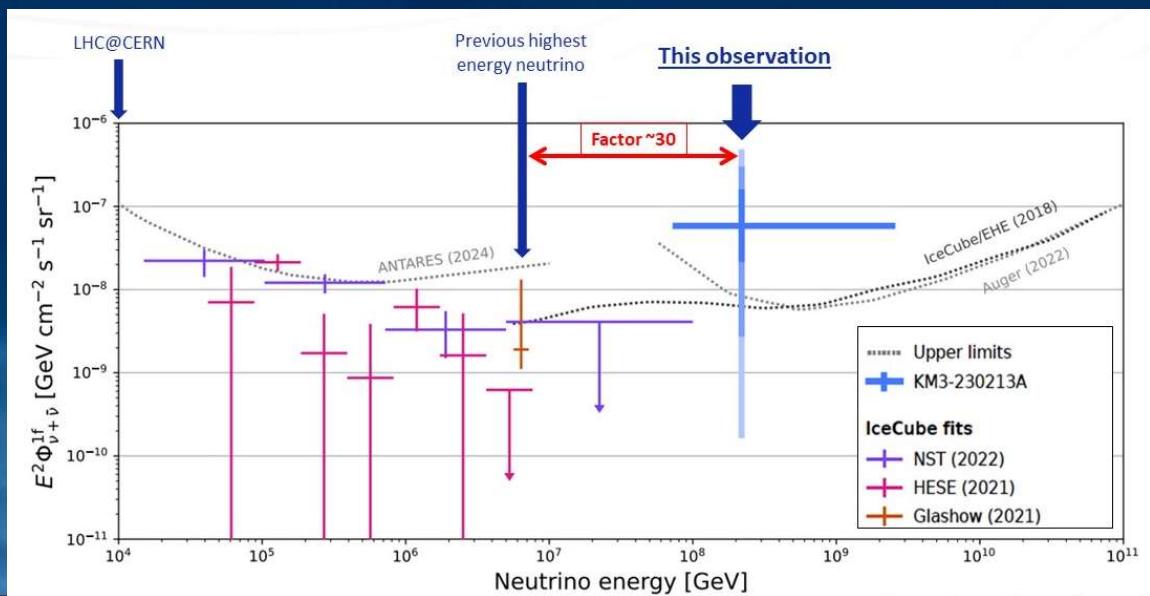
# Le Super-Neutrino du 13/02/2023

Enregistré avec ARCA21 :  
~28000 photons détectés, > 1/3 PMTs activés



Evénement très exceptionnel :  
nouvelle origine astrophysique à explorer ?

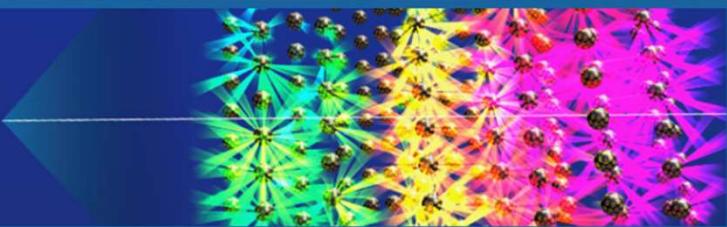
**Muon :  $E_\mu \sim 120$  PeV**  
**→ Neutrino :  $E_\nu \sim 220$  PeV :**  
> 30x plus d'énergie que  
neutrino jamais détecté  
auparavant (6 PeV) !!!





## Conférence sur les résultats scientifiques exceptionnels de la collaboration KM3NeT

•• Paris, le 12 février 2025



# Événement KM3NeT

**numerama** menu actus tech société pop culture sciences cyberguerre 🔍

Mis à jour le 13 février 2025 à 12h30

**Une particule fantôme à l'énergie record « bouscule » les scientifiques**

Un événement exceptionnel

2 min

Diane Hassoun



## UN "MESSAGER COSMIQUE": UN MYSTÈRIEU "NEUTRINO DE TRÈS HAUTE ÉNERGIE" VENU D'EN DEHORS DE NOTRE GALAXIE DÉTECTÉ

Salomé Robles avec AFP Le 13/02 à 16h34

2 minutes Un neutrino cosmique surpuissant détecté au fond de la Méditerranée

High-Tech Sciences

## Une « particule fantôme » surpuissante étrangère à notre galaxie détectée au fond de la Méditerranée

BOMBE SOUS-MARINE - Le neutrino le plus énergétique jamais détecté, témoin d'un phénomène violent dans l'univers en dehors de la Voie lactée, a été repéré par la

Europe 1



Chercher un article, un podcast, une vidéo...

Accueil

Actualités

Neutrino en Méditerranée : a-t-on découvert une particule provenant d'une autre galaxie ?

Maud Baheng Daizey  
10h56 · le 18 février 2025 · 3 min

Le Parisien

Sciences Découvertes Physique

Il ne vient pas de notre galaxie : un neutrino, une particule élémentaire à l'énergie surpuissante, détecté en Méditerranée

Les événements les plus violents de l'Univers - comme l'explosion d'une supernova, la fusion de deux étoiles à neutrons ou l'activité autour des trous noirs supermassifs - génèrent des neutrinos dits à « ultra-haute énergie ».

Par Bertrand Tessier pour AFP

Le 13/02/2025 à 16h30

Europe 1

Chercher un article, un podcast, une vidéo...

Neutrino en Méditerranée : a-t-on découvert une particule provenant d'une autre galaxie ?

Maud Baheng Daizey

CNN Science Space Life Unearthed

Science / Space

Scientists detect record-breaking 'ghost particle' in the Mediterranean Sea

By Ashley Strickland, CNN

6 minute read · Updated 1:46 PM EST, Wed February 12, 2025

La Marseillaise

ACCUEIL POLITIQUE SOCIAL SOCIÉTÉ ÉCONOMIE FRANCE INTERNATIONAL ENVIRONNEMENT

DANS CACTU #EDITO #POL #JEUDELAREPUBLIQUE #WEEKEND #BALA

HOME

Un neutrino ultra énergétique détecté en Méditerranée

La détection sans précédent d'un neutrino d'ultra-haute énergie par la collaboration scientifique KM3NeT en Méditerranée ouvre de nouvelles perspectives sur les particules élémentaires et l'origine de l'univers.

ANNEKE AHRENS GUMET / TOLON / MAXPPP/ESTER

Lisez nos éditions papier en PDF

Le pari W9 Ma's N

Particules

Détection record : un neutrino ultra-énergétique ouvre une nouvelle ère en astrophysique

par Fabrice Nicot le 12/02/2025 à 17h00

Ecouter 5 min.

Courrier international

Astrophysique. Un télescope sous-marin repère le neutrino le plus énergétique jamais détecté

Dans les abysses au large de la Sicile, un télescope en cours de construction a détecté une particule élémentaire d'origine cosmique porteuse d'une énergie jamais enregistrée jusque-là. Pour le moment, les scientifiques ne savent pas exactement d'où elle vient.

SOURCE Courrier international

Réservez aux abonnés Lecture 2 min Publié le 13 février 2025 à 16h57

franceinfo:

Accueil Menu Enquêtes Visuel Focus Guerre en Ukraine Procès Le Scandale

3 provence-alpes côte d'azur

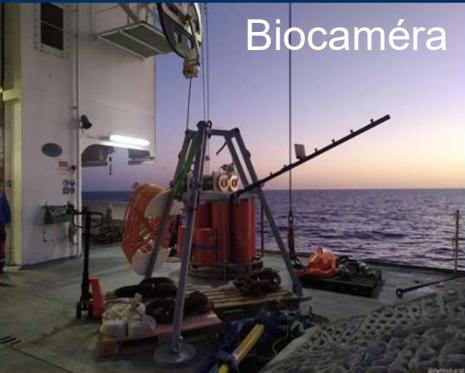
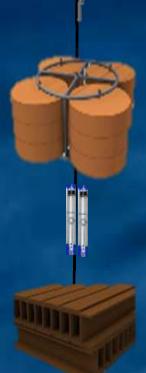
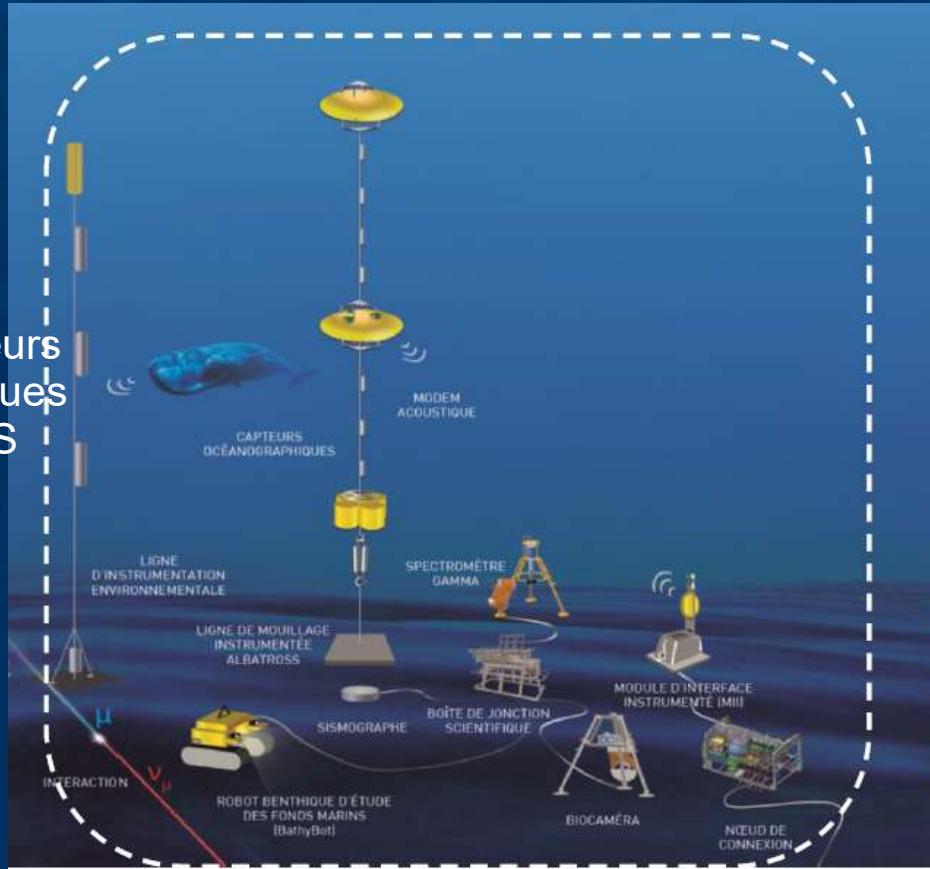
Accueil > Provence-Alpes-Côte d'Azur > Var > Toulon

"Il ne vient pas de notre galaxie" : un neutrino détecté au fond de la Méditerranée, on vous explique

# Un Observatoire Pluridisciplinaire en Mer Profonde



Ligne de capteurs  
océanographiques  
ALBATROSS



- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...



# Résumé & Perspectives



- Après des décennies de rêve et R&D intensif, l'Astronomie Neutrino est en train d'ouvrir **une nouvelle fenêtre sur l'Univers**
- Durant ~15 ans d'observation en continu, ANTARES a détecté ~15 000 neutrinos qui ont permis d'apporter de nouvelles informations sur les **cataclysmes de l'Univers**, l'origine des **Rayons Cosmiques** de hautes énergies et la nature de la **mystérieuse Matière Noire**
- La construction du télescope à neutrinos de seconde génération KM3NeT, basé sur une technologie améliorée, **est en cours !**  
→ il devrait fournir des **résultats fondamentaux** dans la prochaine décennie sur :
  - L'Astronomie Neutrino (ARCA)
  - Les propriétés fondamentales des neutrinos (ORCA)
- L'infrastructure sous-marine LSPM offre un potentiel unique de recherches **pluridisciplinaires** très riches en mer profonde