



# 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 – Juin 2025



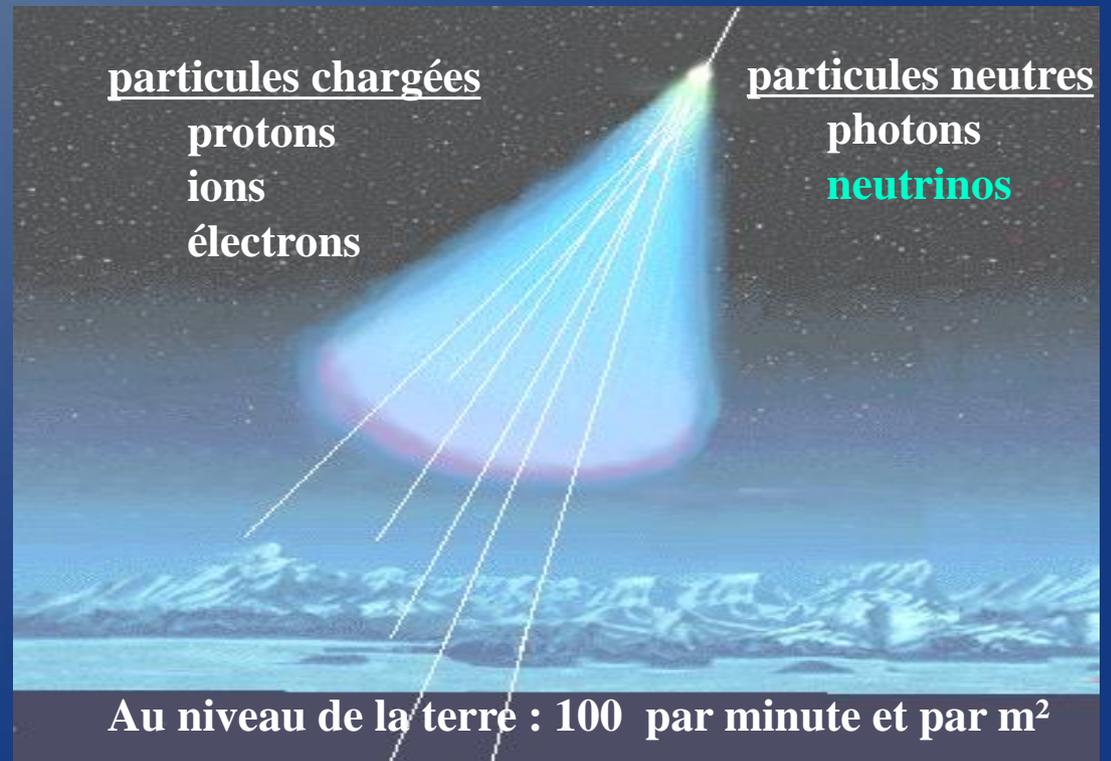


# Les rayons cosmiques

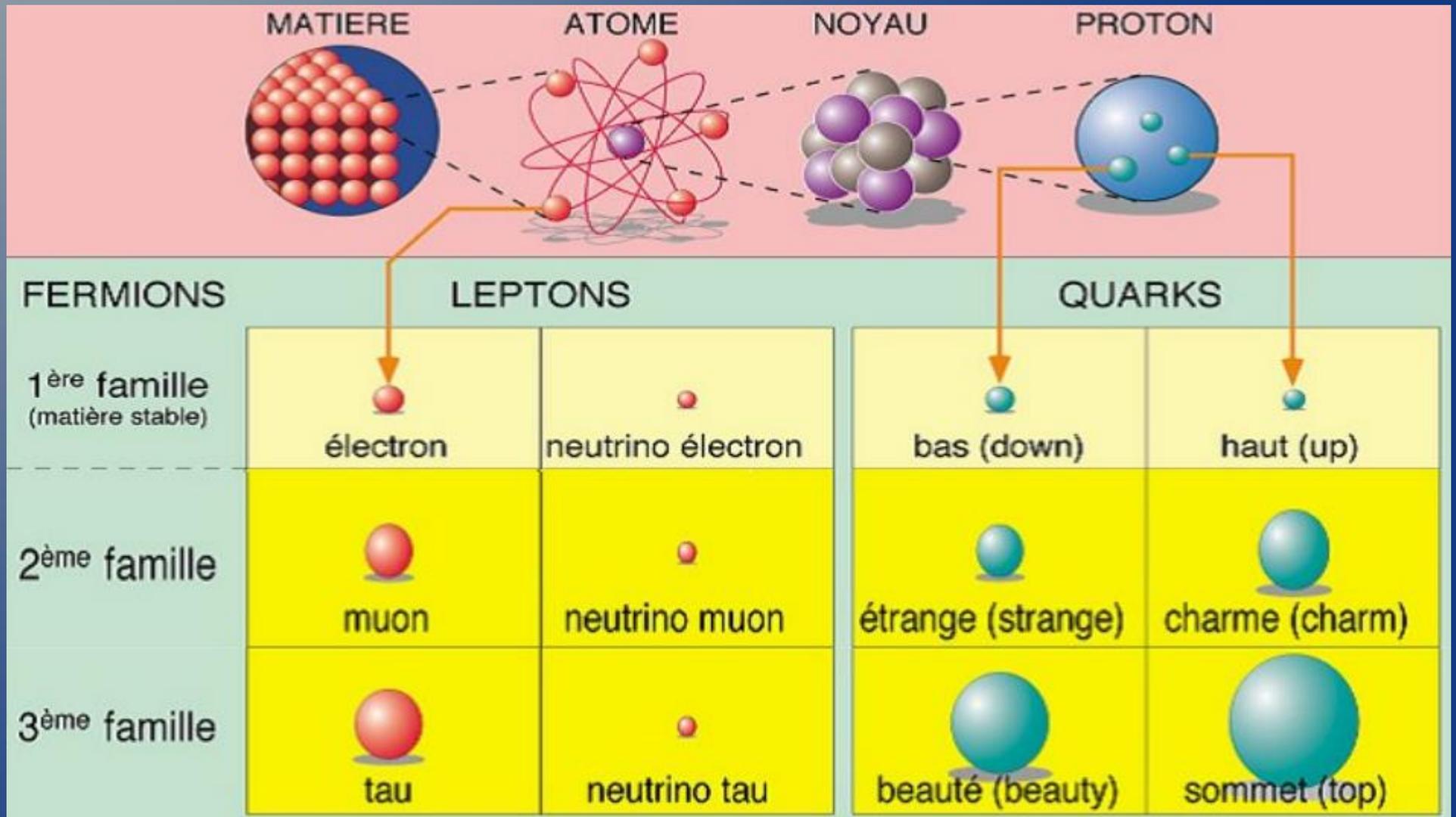


Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

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:

*carte de domicile*

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**

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Mairie de *Strasbourg*

Commissariat de Police

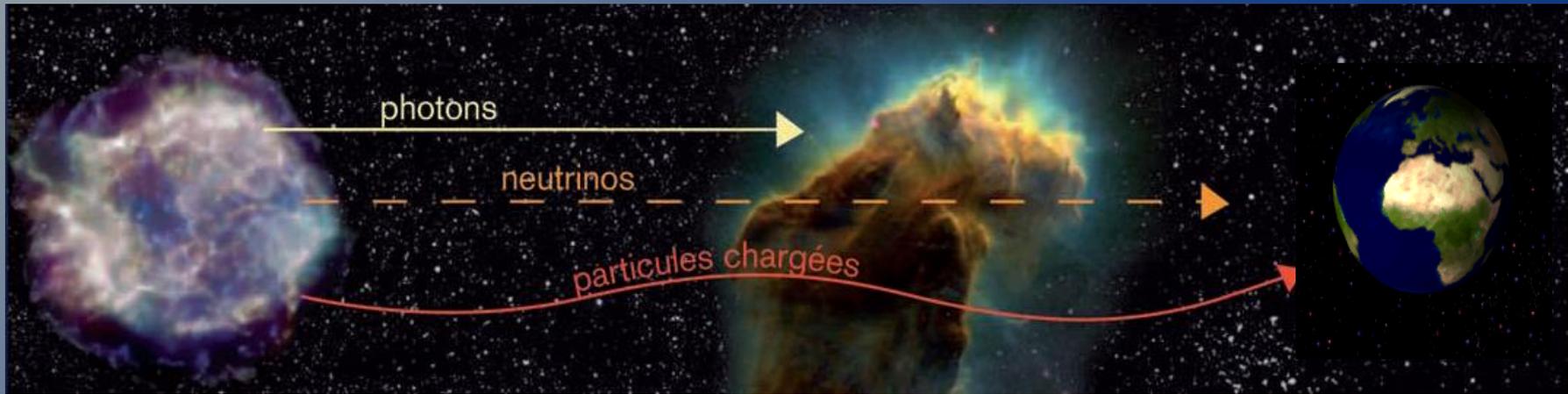
de *Strasbourg*

CARTE D'IDENTITÉ



AD 11 STRASBOURG 15, 8, DES JUIFS

# 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 :

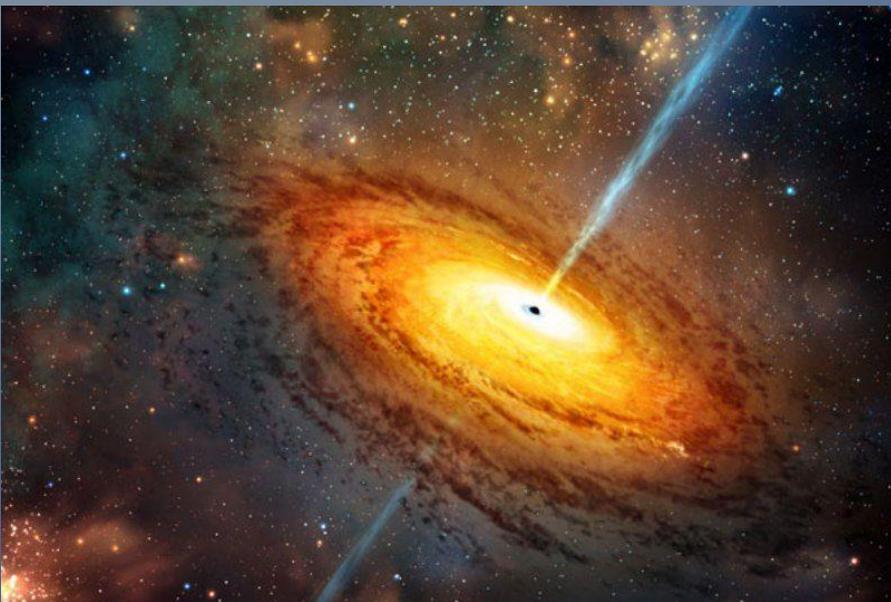
Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

**$\Rightarrow$  Nécessité d'un grand volume de détection**

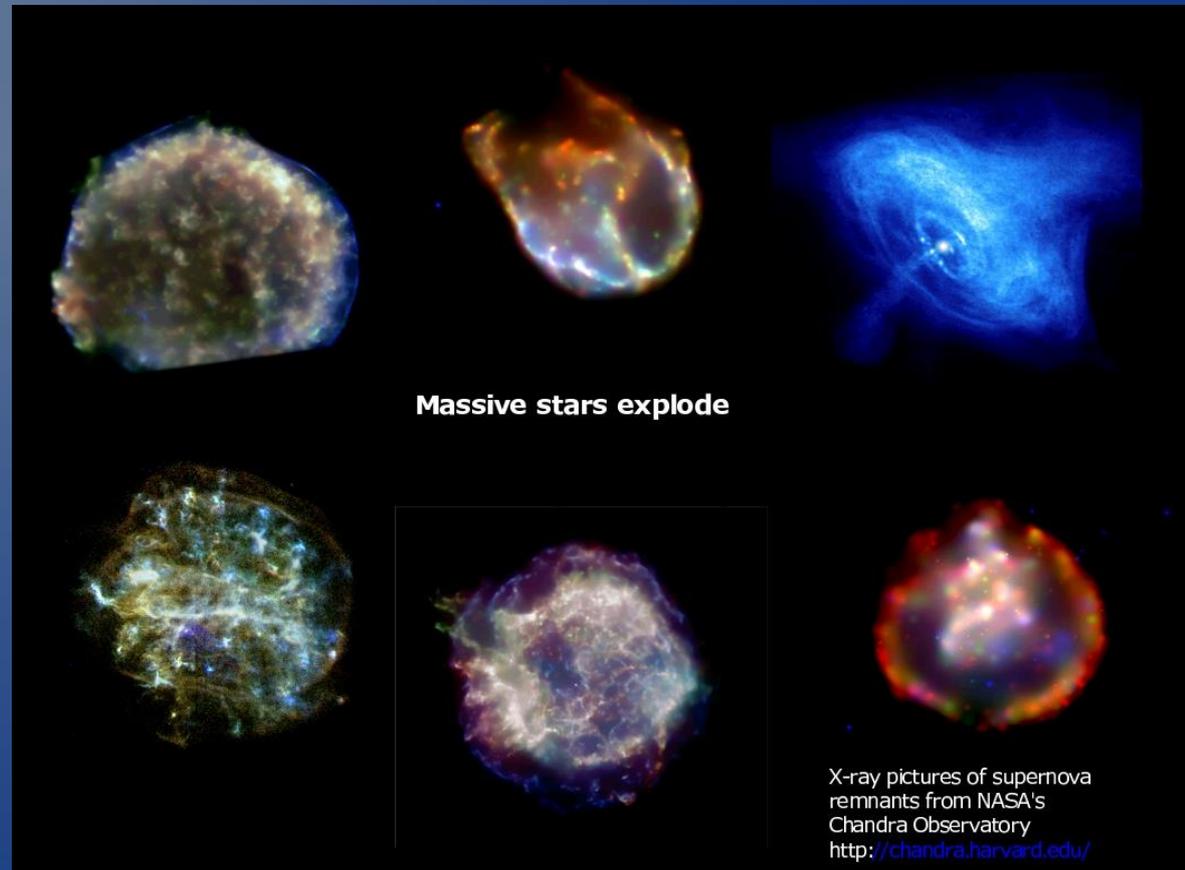
# Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

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

## Explosions d'étoiles (Supernovae)



Trous noirs super-massifs  
(Noyaux actifs de galaxies)

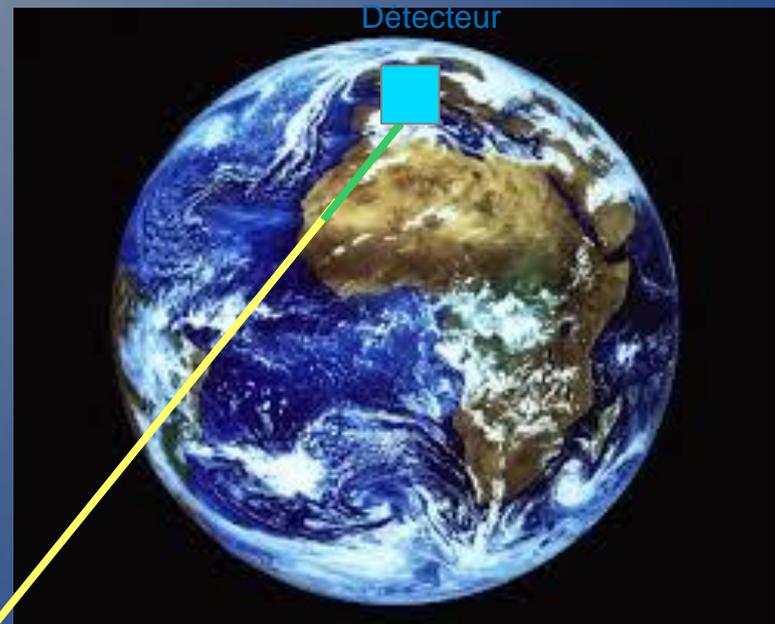


X-ray pictures of supernova remnants from NASA's Chandra Observatory  
<http://chandra.harvard.edu/>

# Pour arrêter les neutrinos...

... La Terre !

(...de temps en temps...)

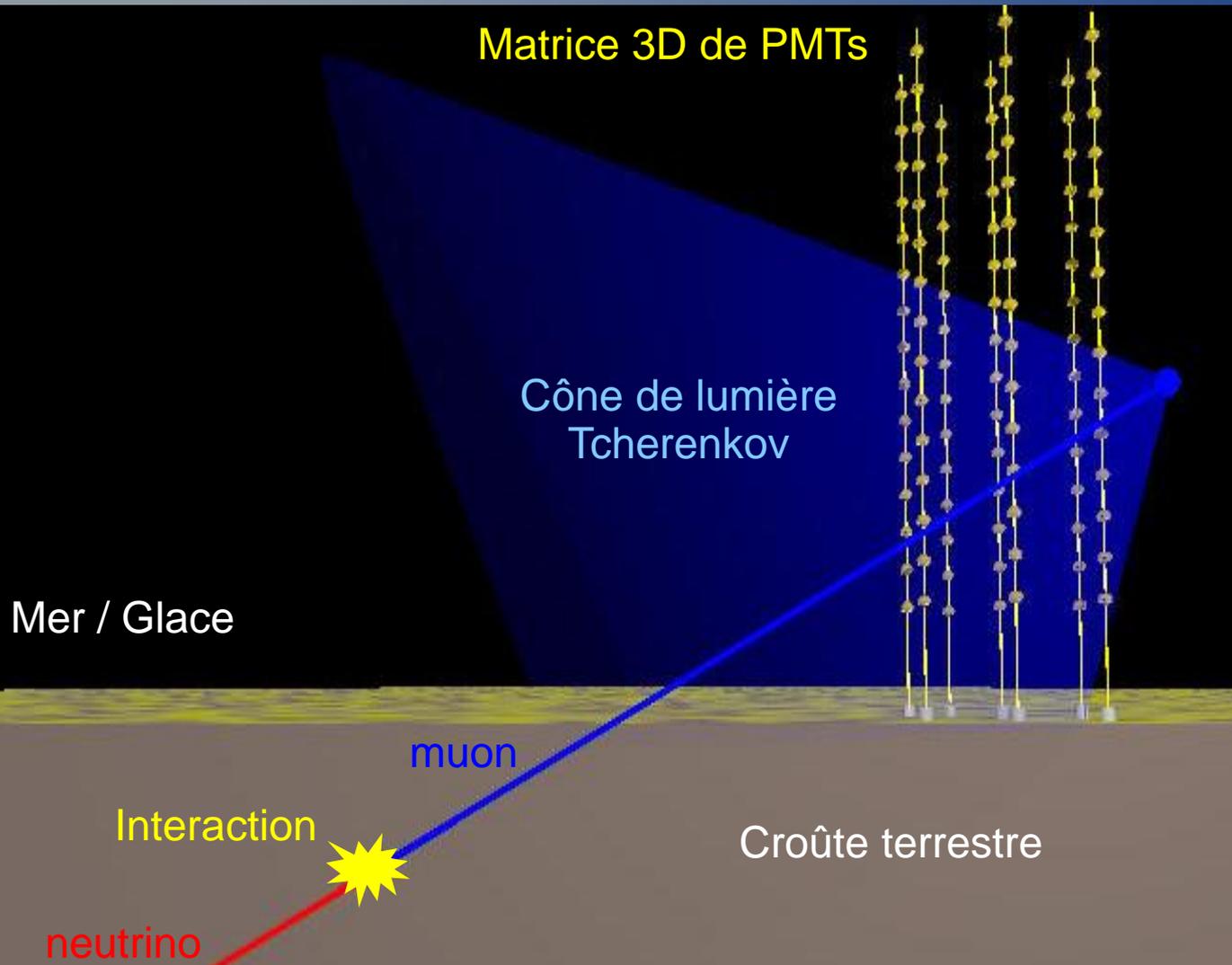


Un **neutrino** entre parfois en collision avec un noyau atomique

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 Téléscopes à neutrinos dans le Monde

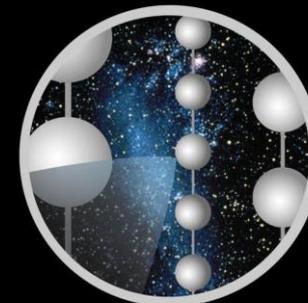
ANTARES & KM3NeT



BAIKAL

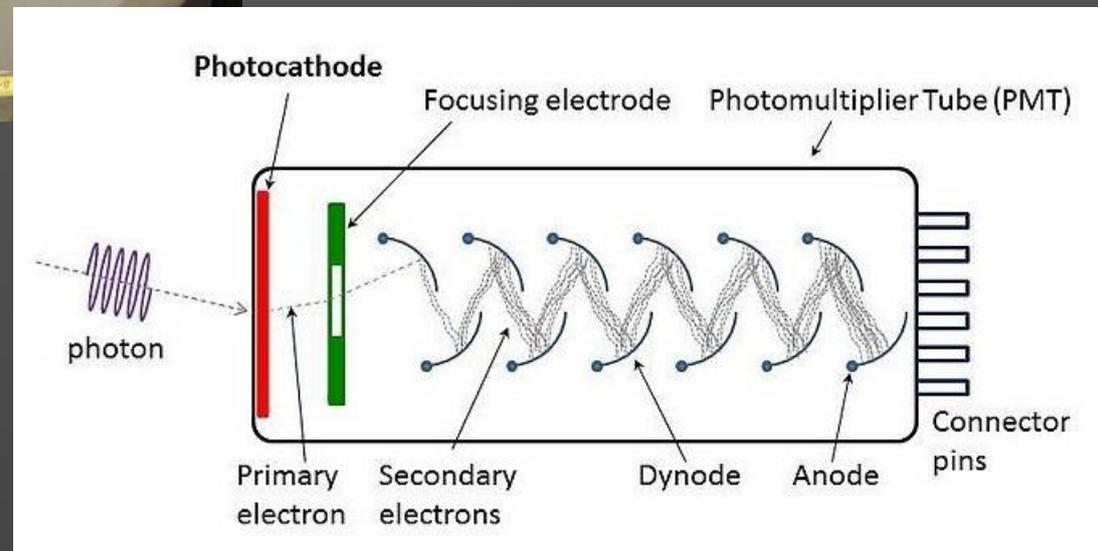


↑  
IceCube



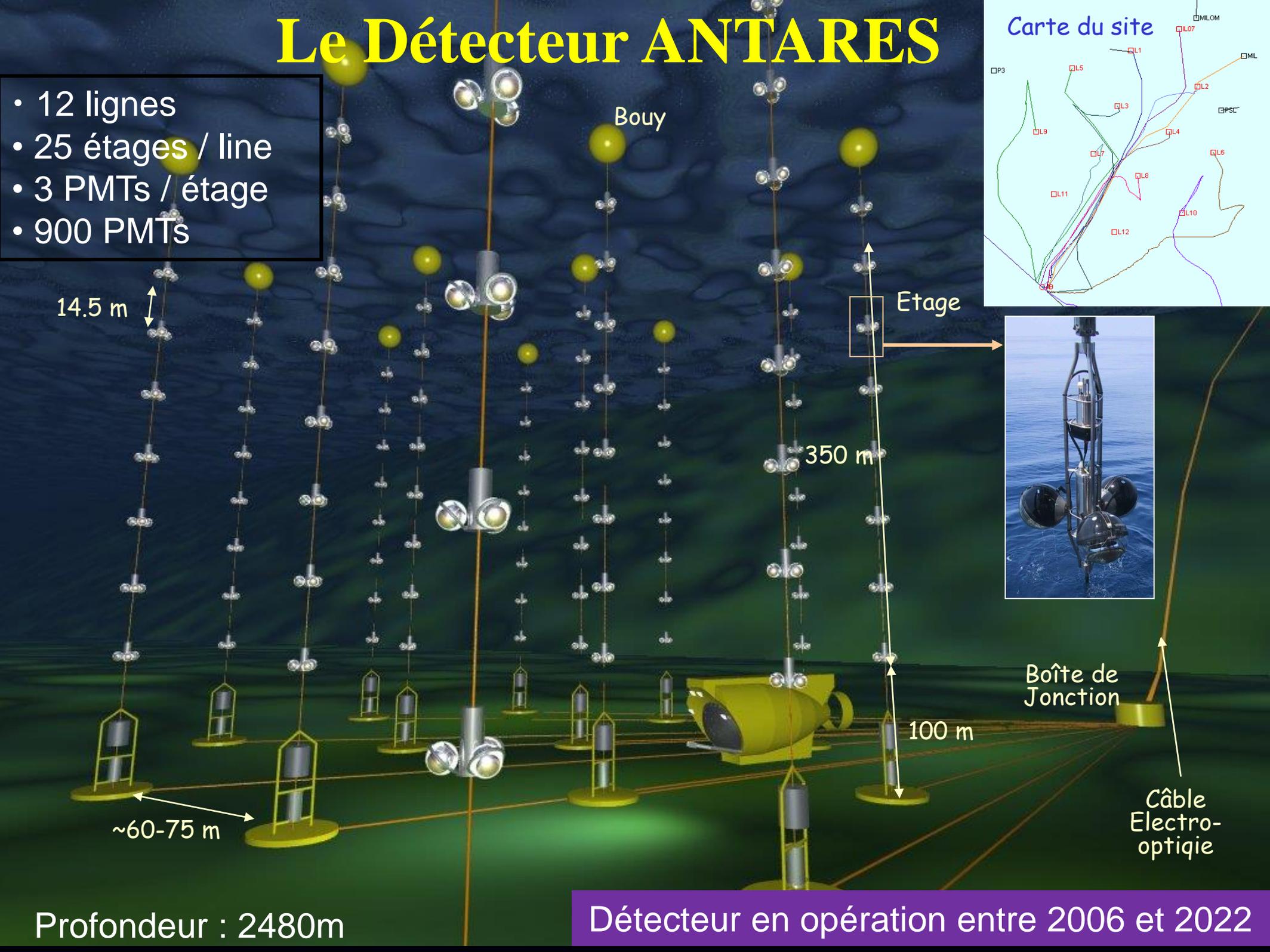
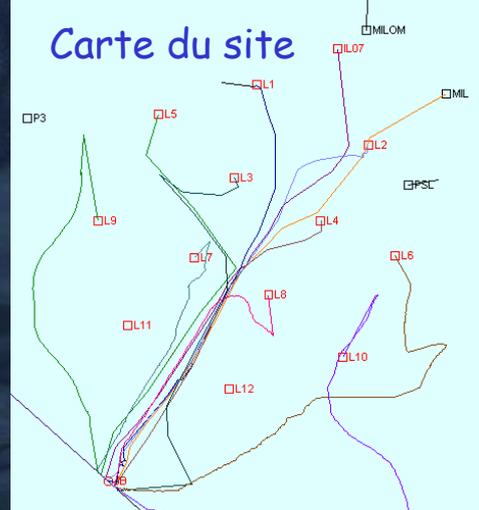
ICECUBE

# Les yeux d'ANTARES: photomultiplicateurs



# Le Détecteur ANTARES

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

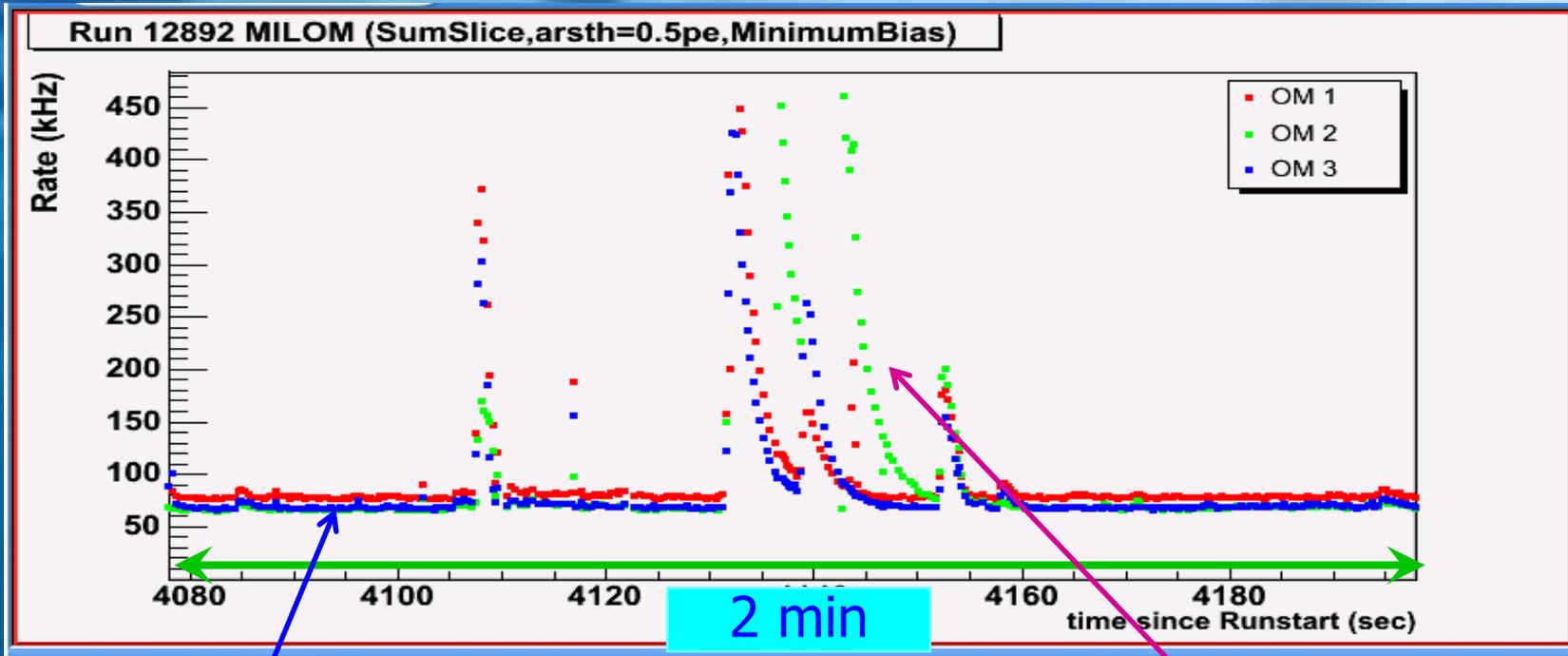


Profondeur : 2480m

Détecteur en opération entre 2006 et 2022

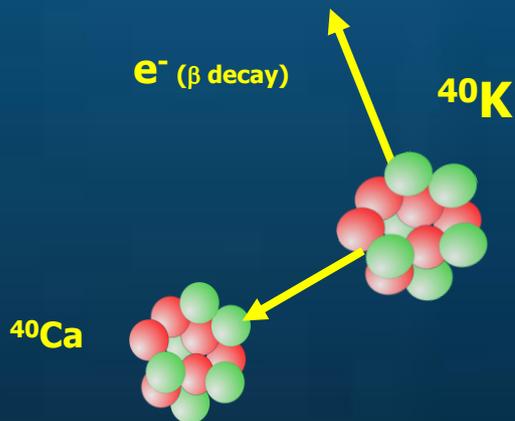


# Taux de comptage d'un Module Optique



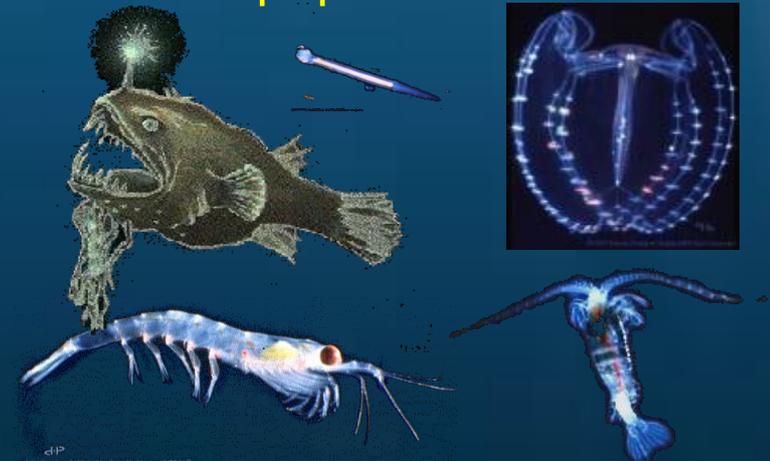
## Ligne de base :

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



## Bursts:

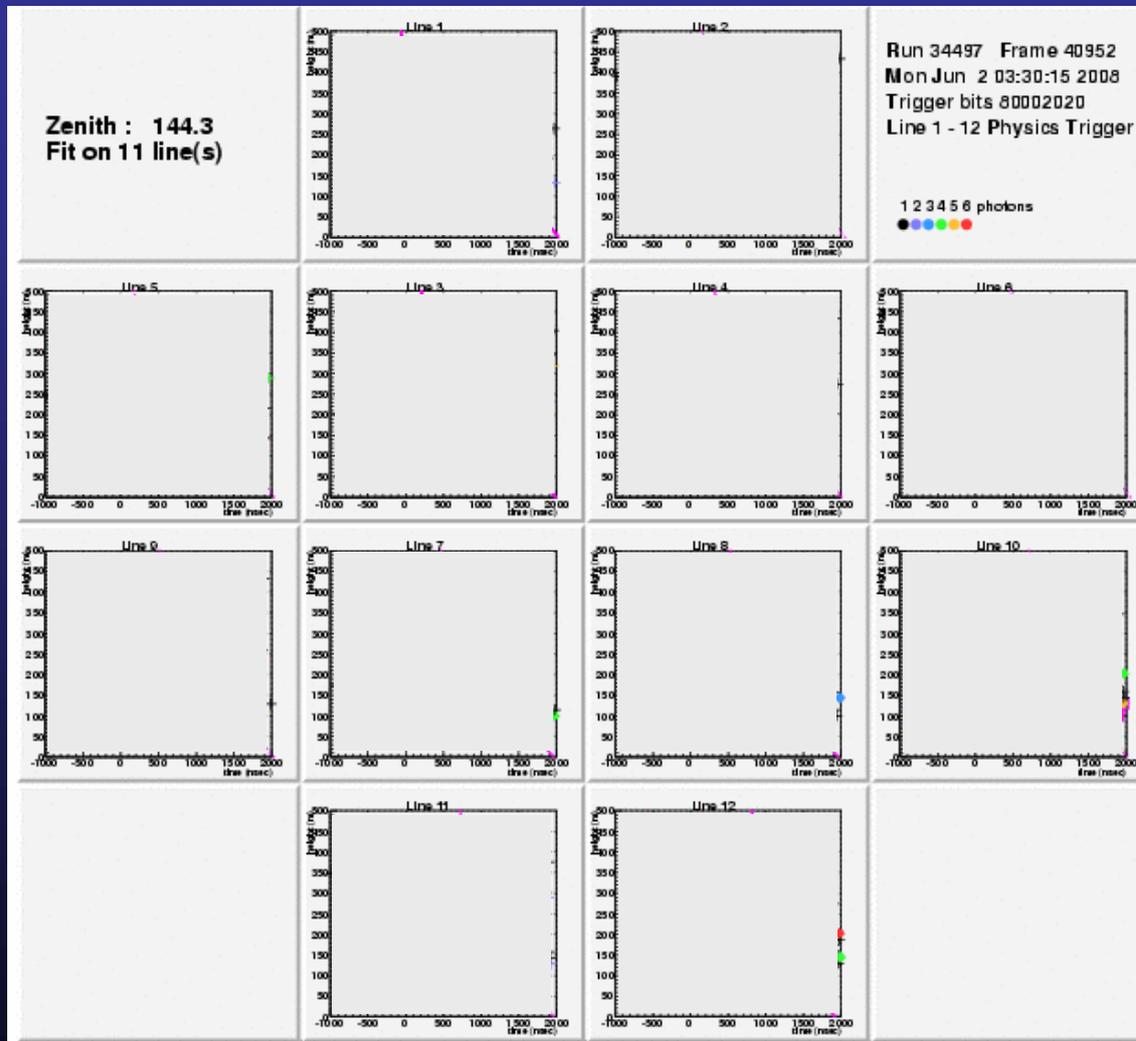
Bioluminescence d'organismes  
macroscopiques





# Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



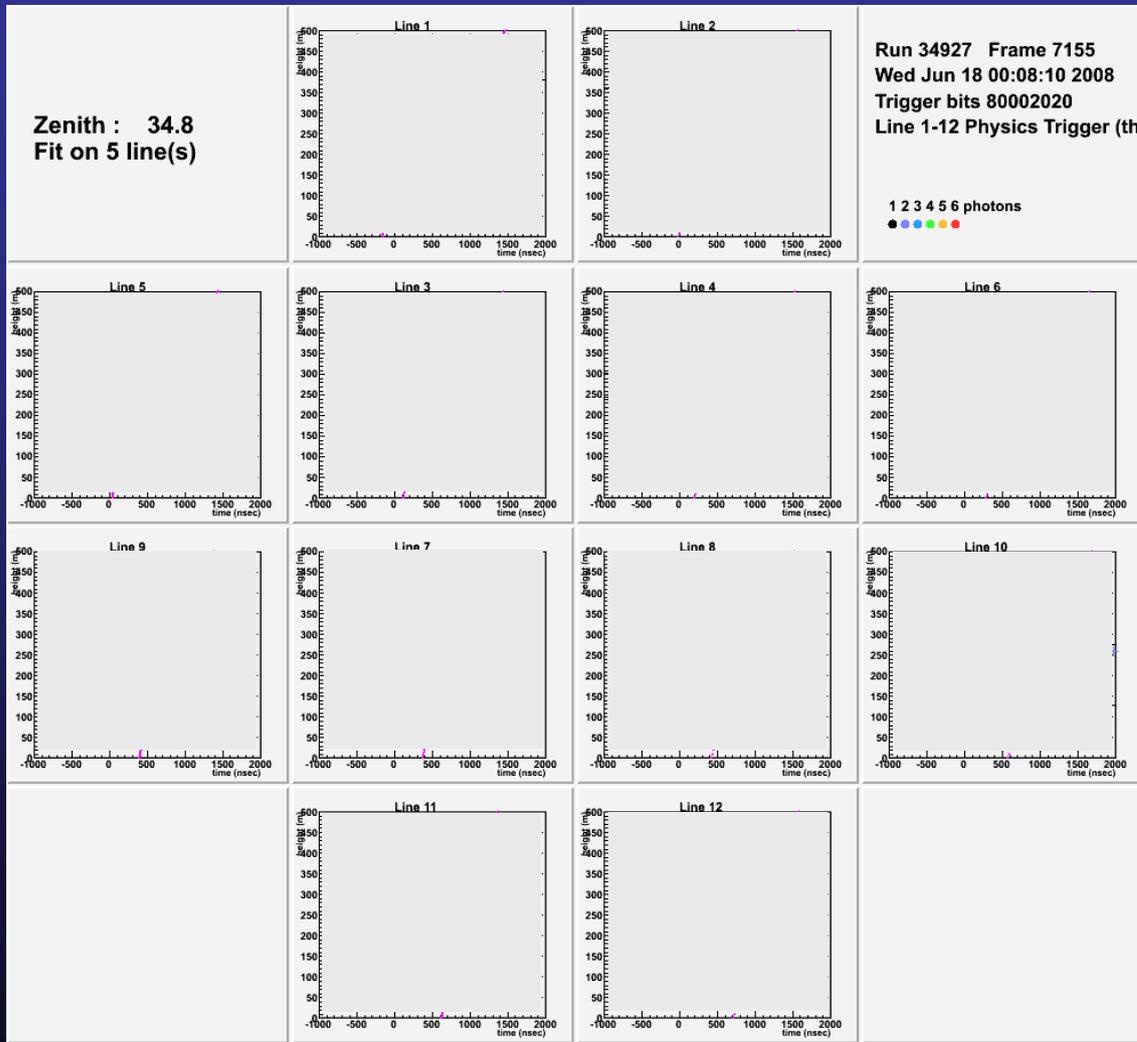
Example of a *down-going muon event*, detected over the 12 detector lines





# Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



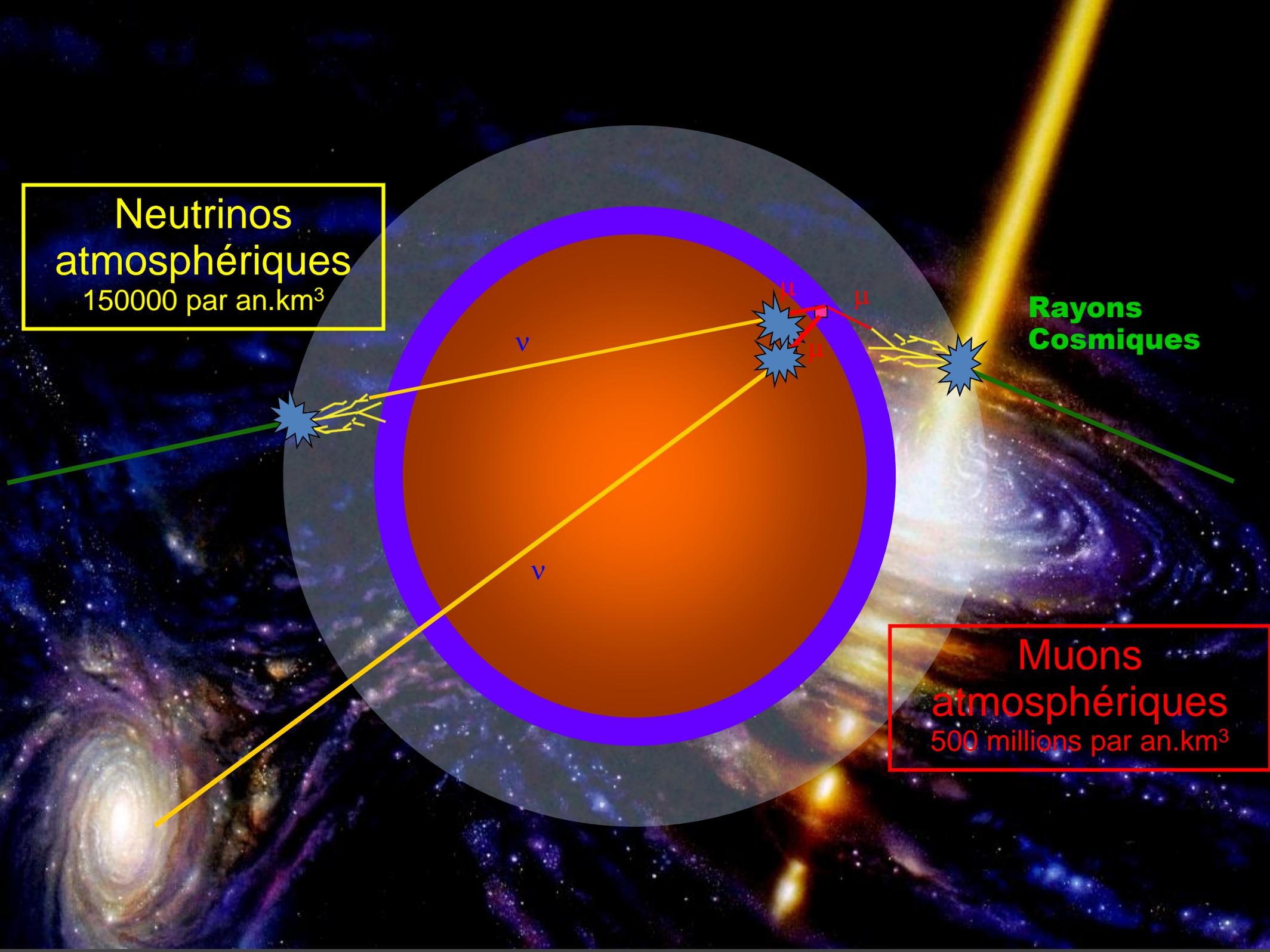
Example of an *up-going muon event* (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines



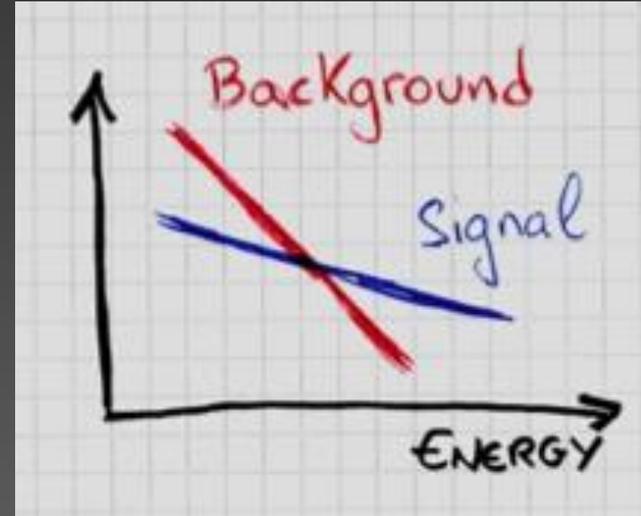
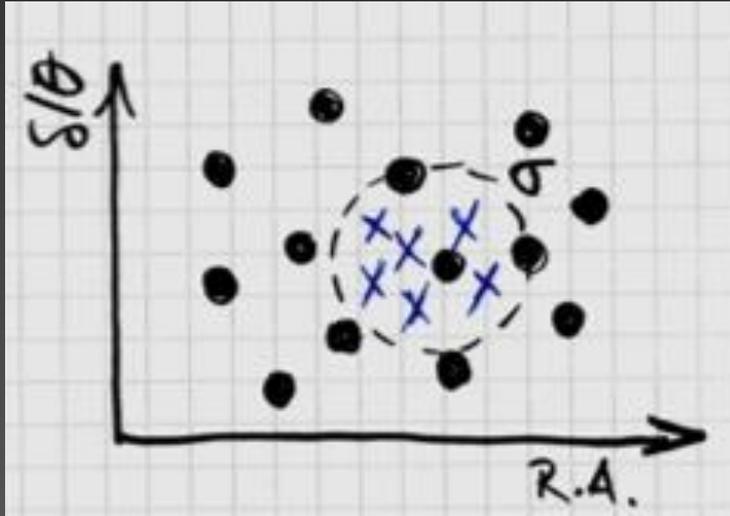
**Neutrinos  
atmosphériques**  
150000 par an.km<sup>3</sup>

**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

## Data set:

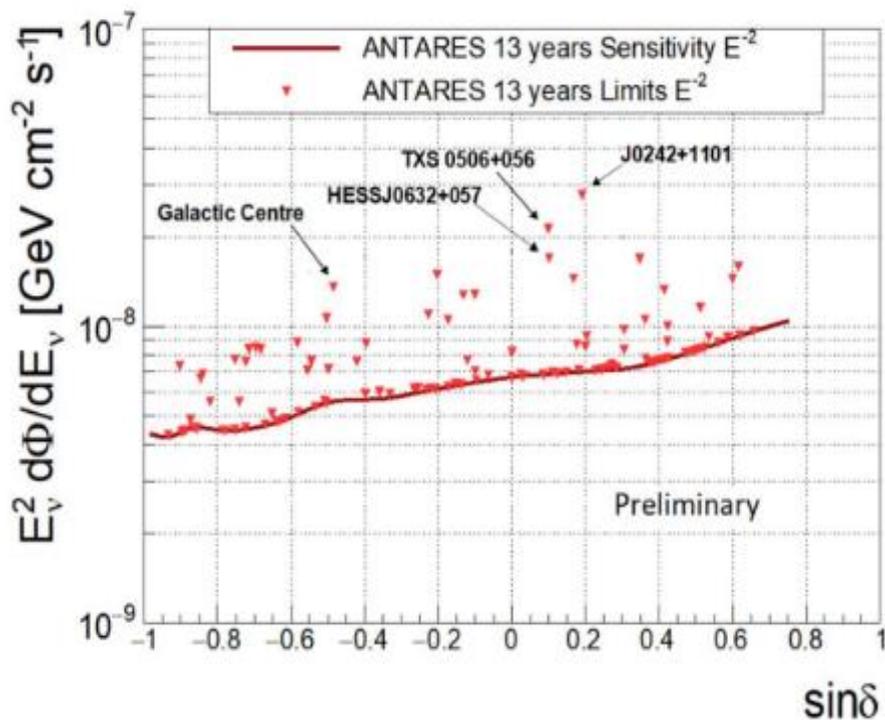
Period: from Jan 2007 to Feb 2020

Livetime: 3845 days

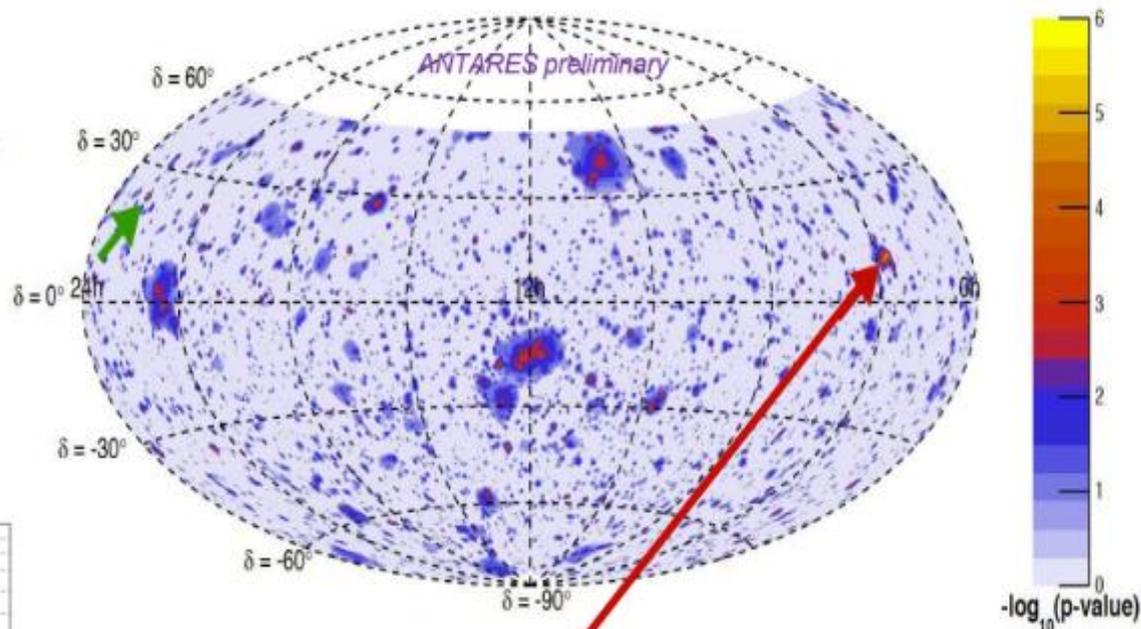
Events: 10162 tracks and 225 showers

## Candidate-list search:

121 investigated sources



## Full-sky search



Full-sky hotspot ( $\alpha, \delta$ ) = (39.6°, 11.1°)

pre-trial p-value: of  $6.8 \times 10^{-6}$  (4.3  $\sigma$ )

post-trial p-value: of 48%

Within 1 degree from J0242+1101

Most significant source:

**J0242+1101**

pre-trial significance: 3.8  $\sigma$

post-trial significance: 2.4  $\sigma$



# ANTARES Multi-Messengers Analyses



SWIFT



Maxi



Fermi



Ligo

Milagro



HAWK



TA

HAWK



Virgo

ANTARES



HESS



Auger



MWA



Parkes



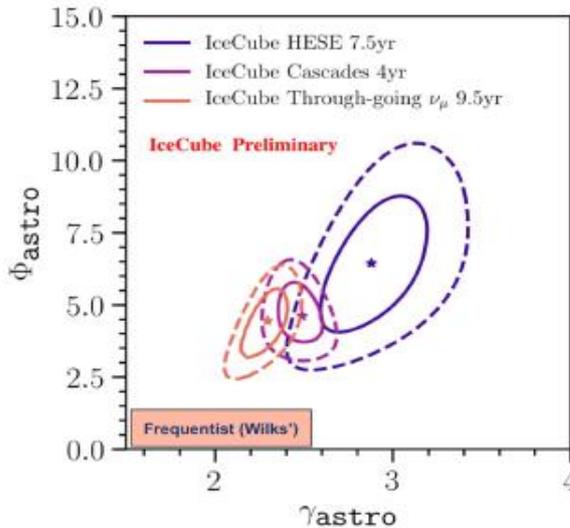
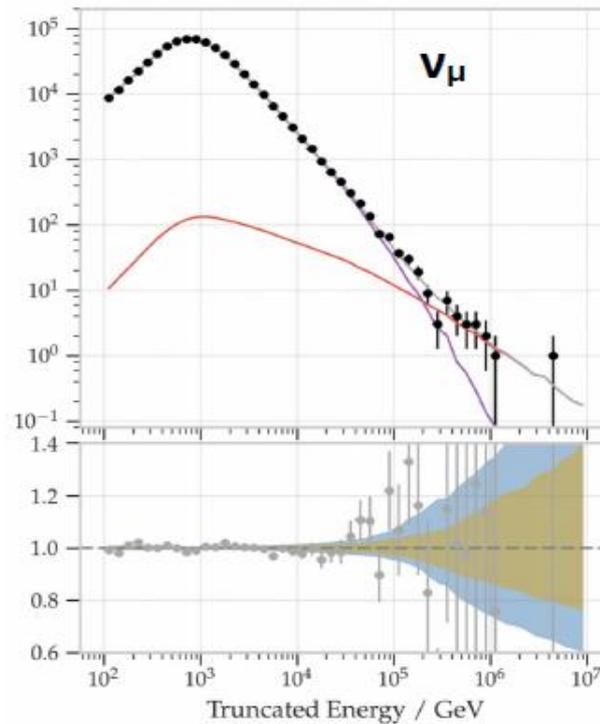
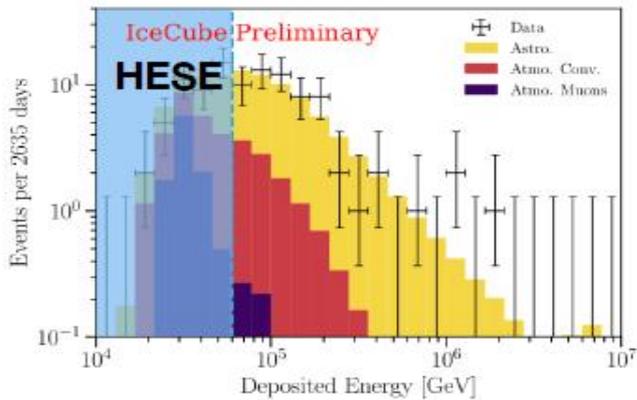
Utmost



IceCube

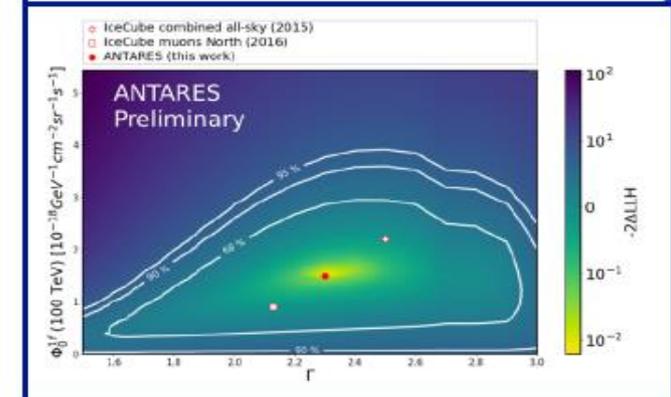
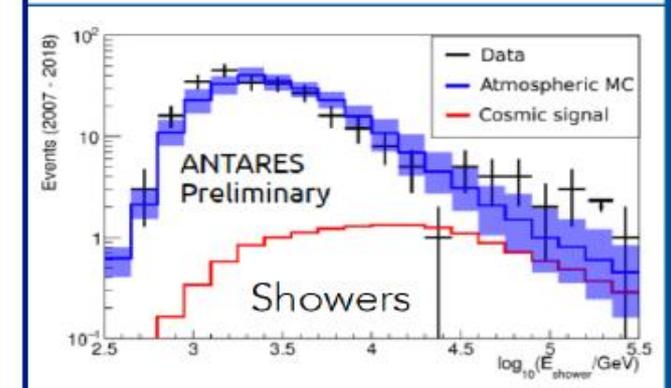
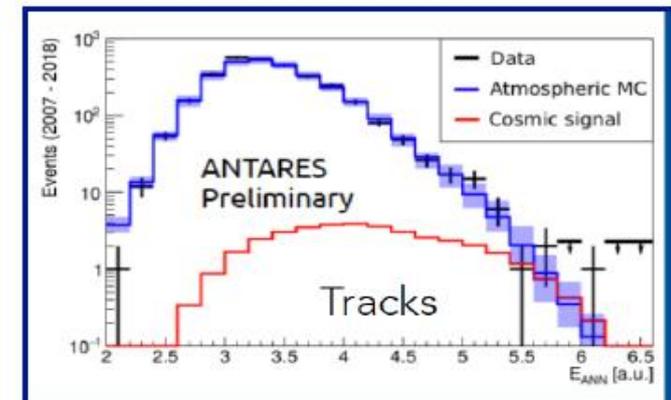
# Un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie...

## 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

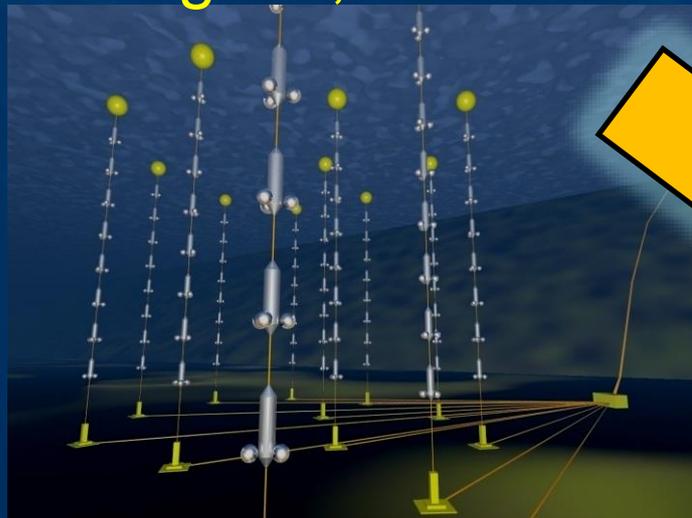


Flux très faible  $\rightarrow$  doit être étudié avec un détecteur de taille multi-km<sup>3</sup>

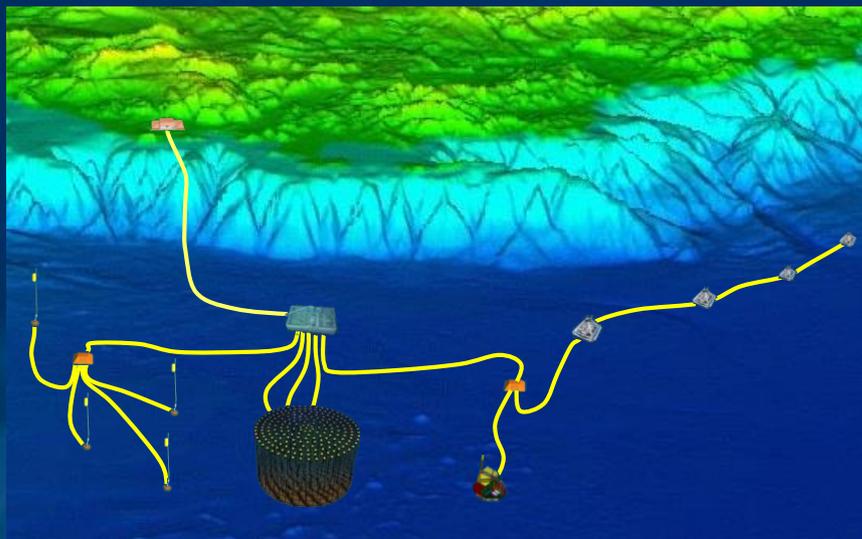
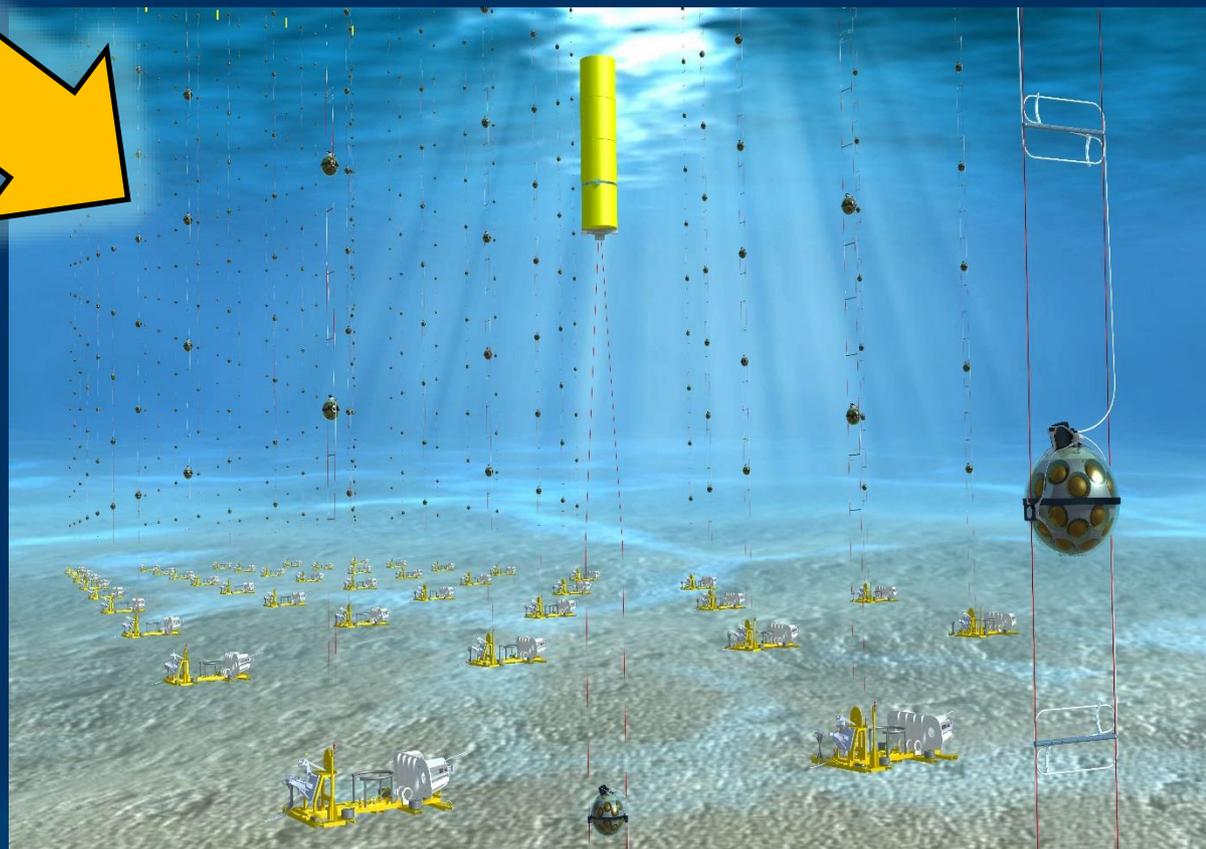


# Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs

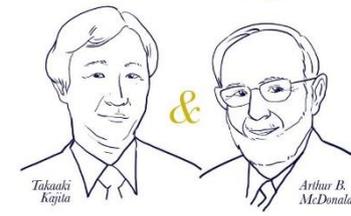


~350 lignes, ~6300 OMs



Observatoire multidisciplinaire permanent en mer profonde

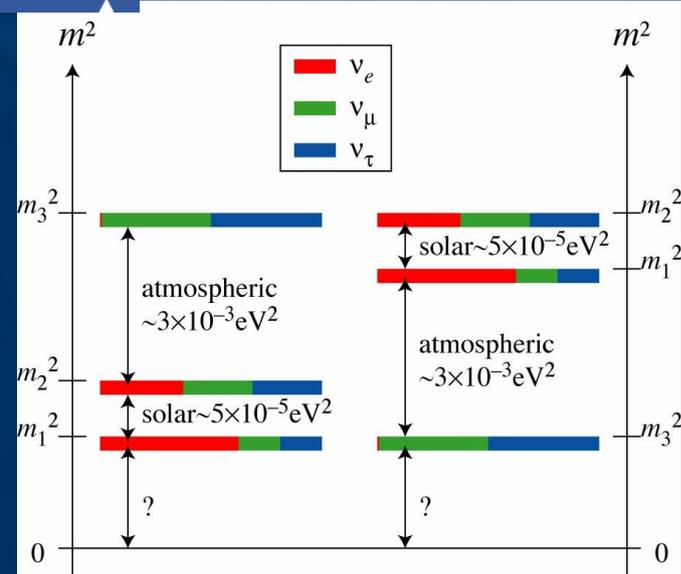
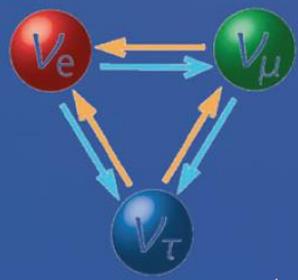
Détecteur installé sur 2 sites profonds en Mer Méditerranée au large de Toulon (France) et Sicile



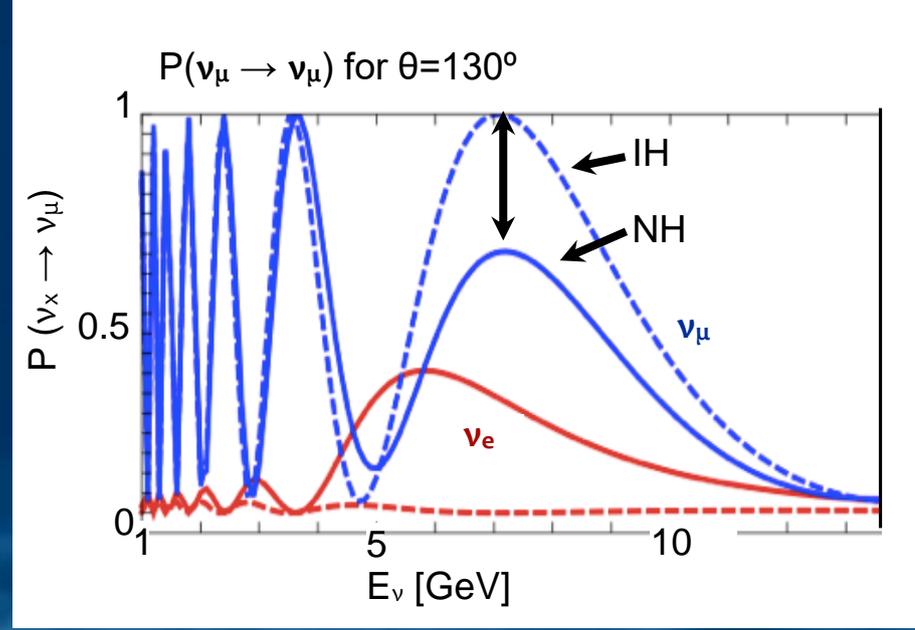
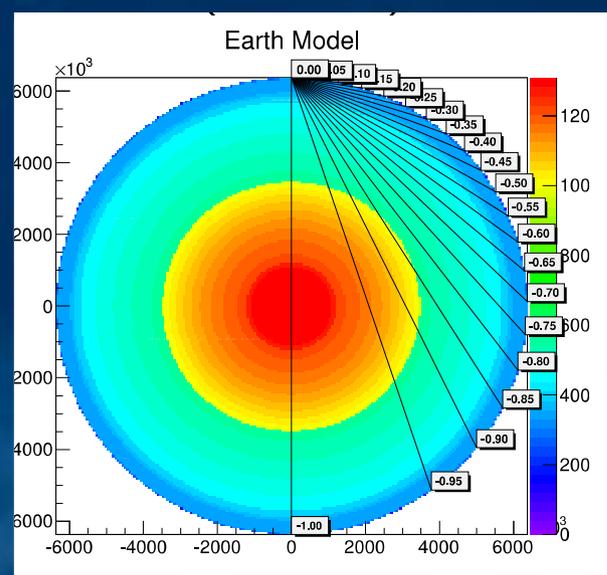
NEUTRINO OSCILLATIONS  
The discovery of these oscillations shows that neutrinos have mass.



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

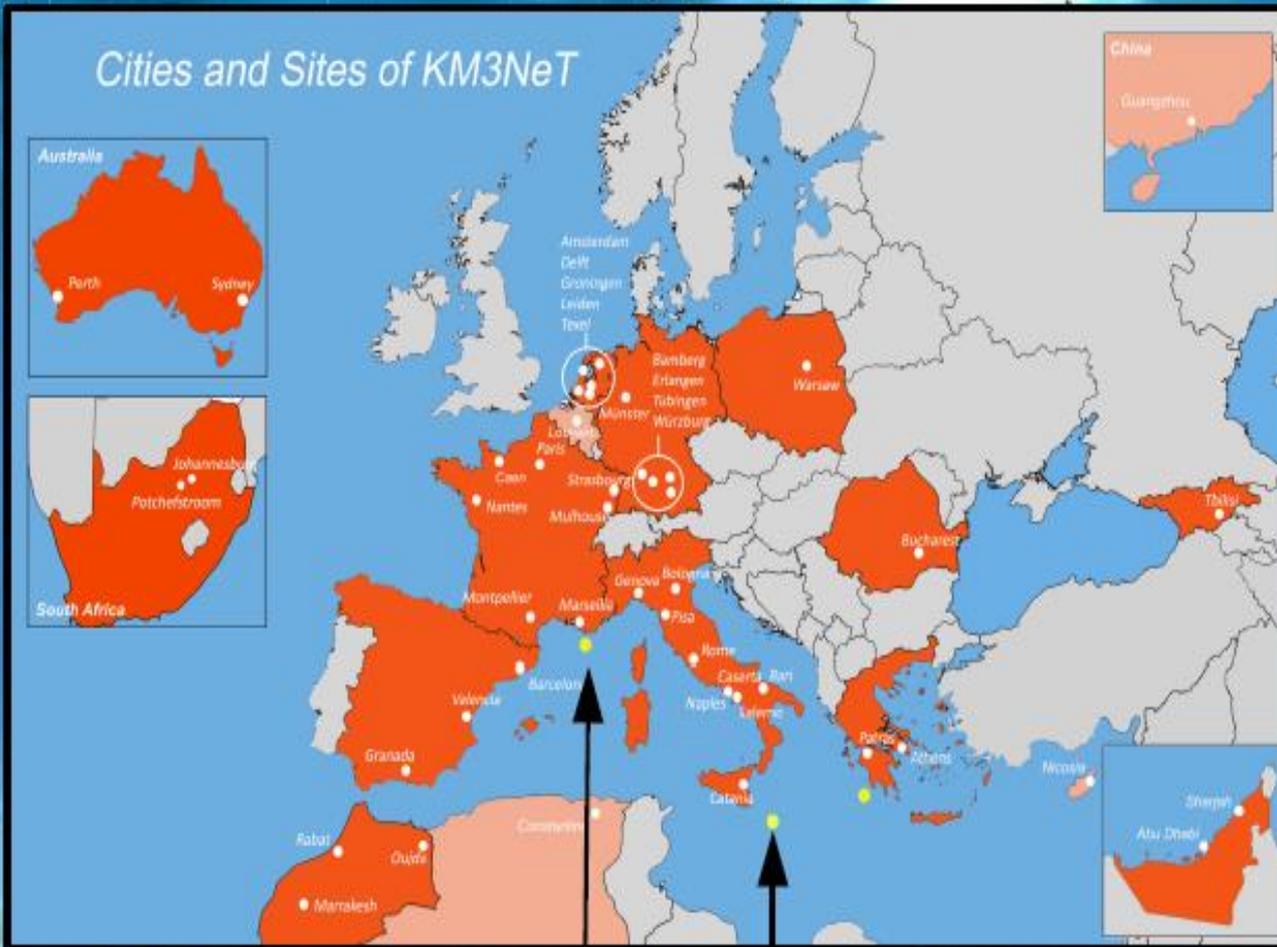


Paramètre fondamental de la nature des neutrinos toujours inconnu !!

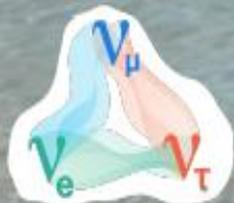


Etudes précise du flux des neutrinos atmosphériques de quelques GeV interagissant dans la Terre

# 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



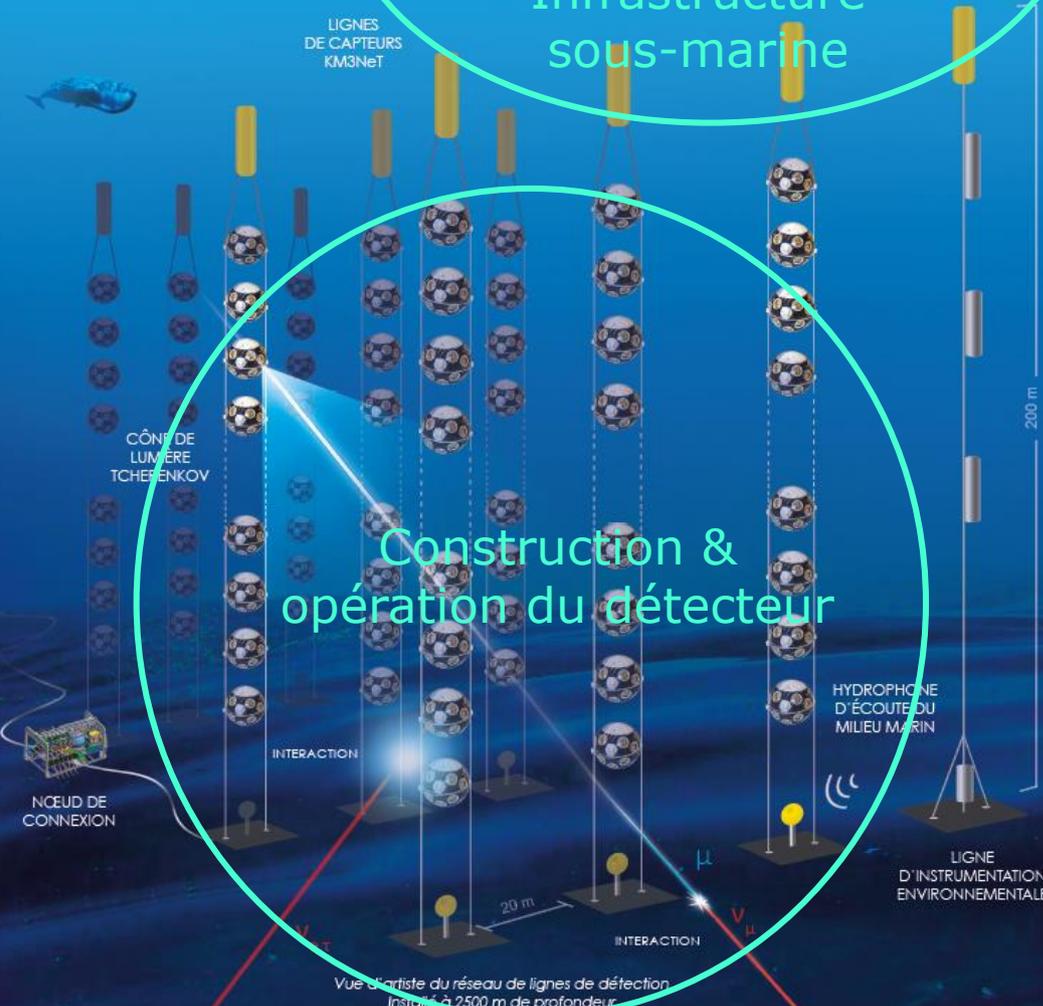


## Infrastructure sous-marine

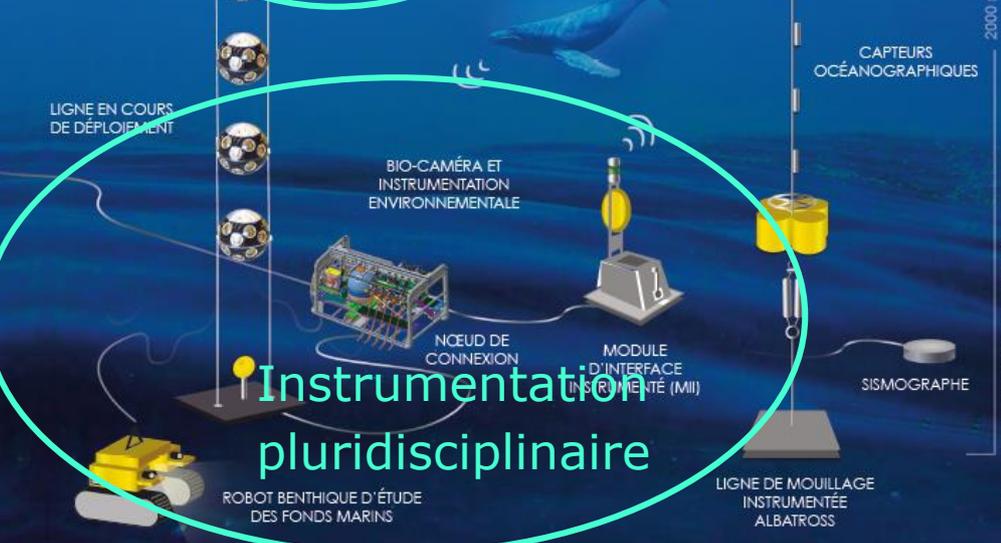


## UNE NOUVELLE FAÇON D'OBSERVER LES ABYSSES

Les dispositifs installés de manière permanente au fond de la mer permettent d'obtenir des données en continu et en temps réel pour étudier l'environnement sous-marin. Cette possibilité ouvre des opportunités sans précédent aux sciences environnementales pour, par exemple, étudier l'évolution du climat et de la circulation océanique, la faune des abysses en particulier les cétacés, la biodiversité, la géodynamique du bassin Ligurien, les risques sismiques et les tsunamis.



Vue d'artiste du réseau de lignes de détection installé à 2500 m de profondeur



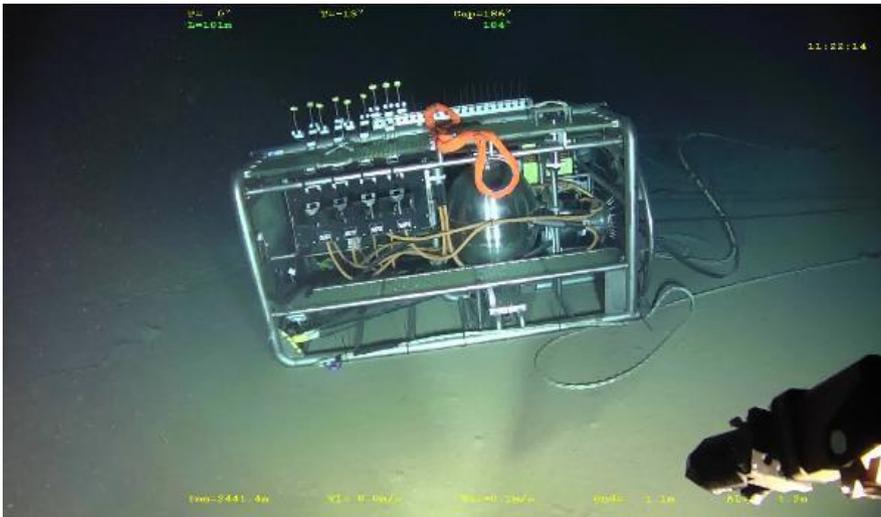
Plage des Sablettes,  
La Seyne-sur-Mer



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

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

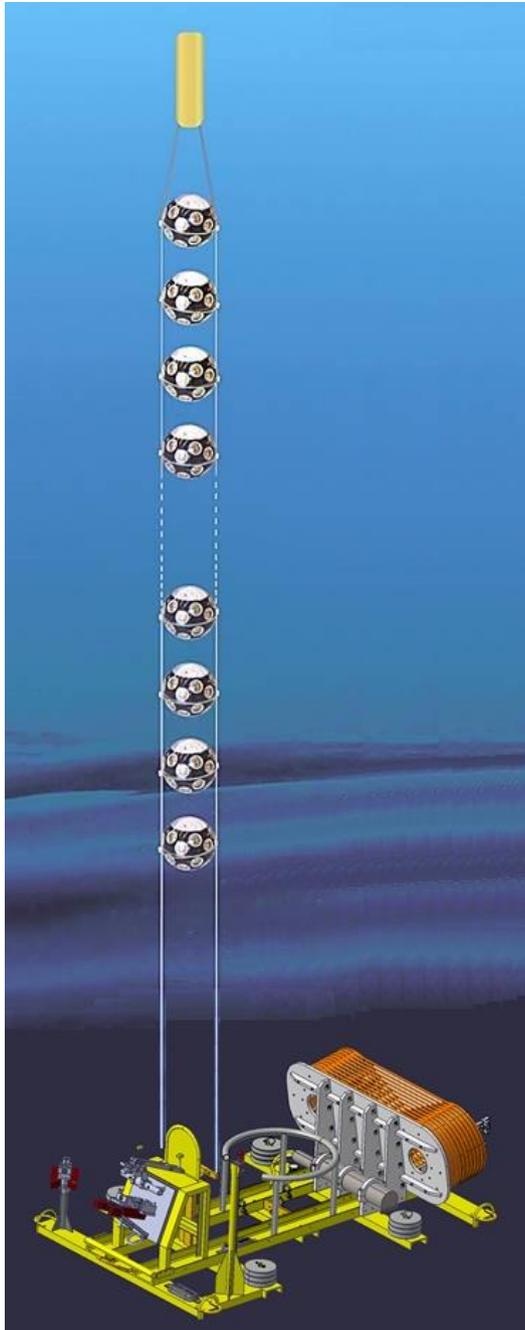
## Noeud 1 : déployé 10/2018



## 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 équpression  
(diamètre 7 mm, 24 fibres, 2 conducteurs)
- 18 étages avec chacun un DOM
- Châssis d'ancrage en pied de ligne

	<b>ORCA</b>	<b>ARCA</b>
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*



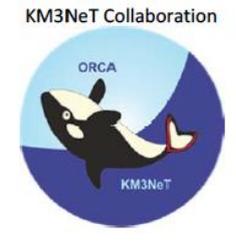
← ~0,4 m →

- 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

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



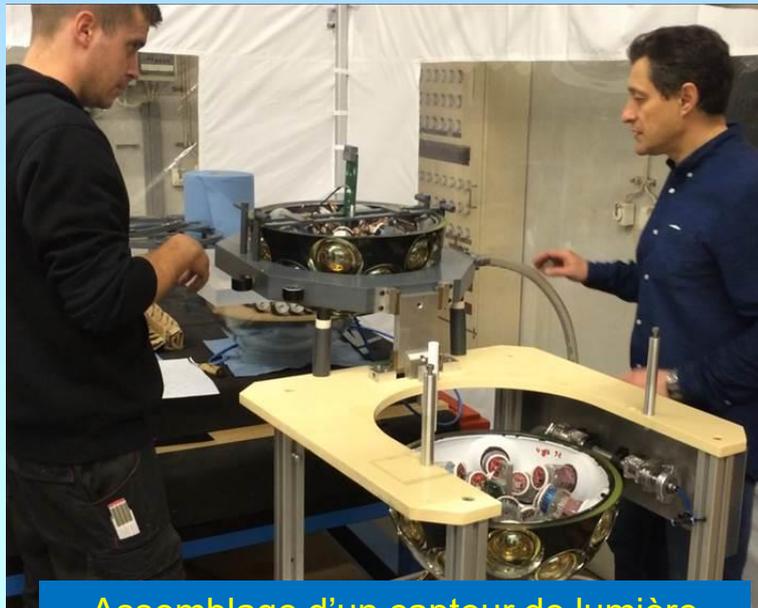
Dépliage autonome



Intégration DU au CPPM pour déploiement



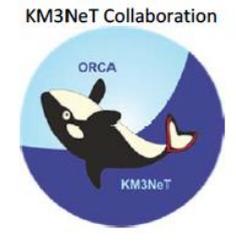
Calibration DU en salle noire au CPPM



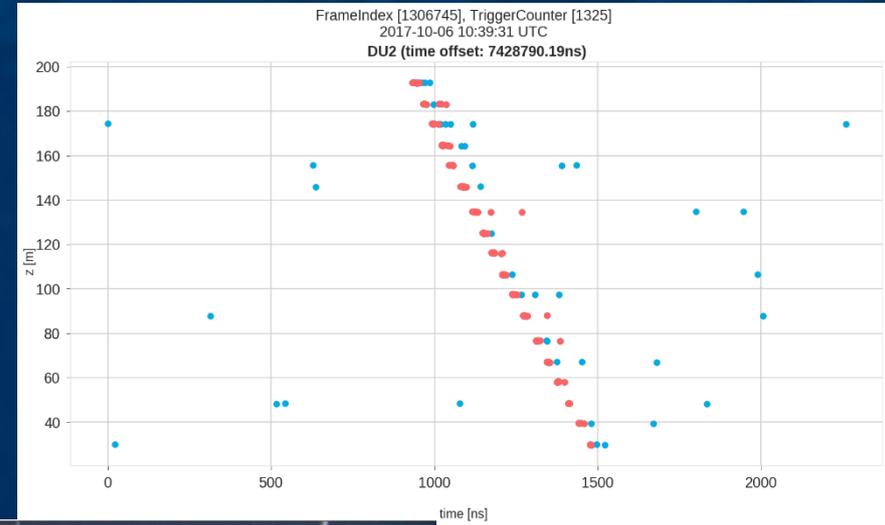
Assemblage d'un capteur de lumière



Tests du capteur de lumière

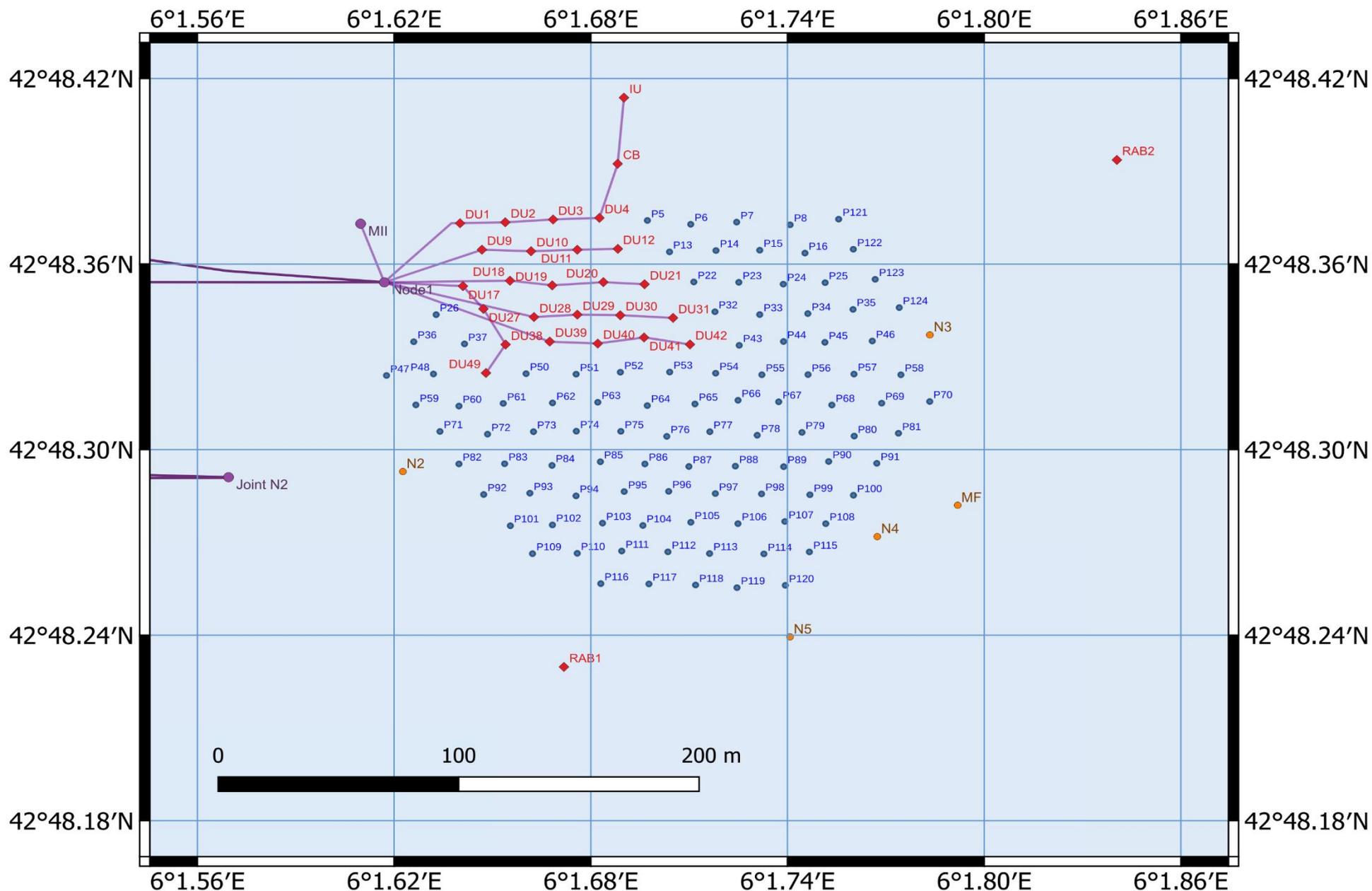


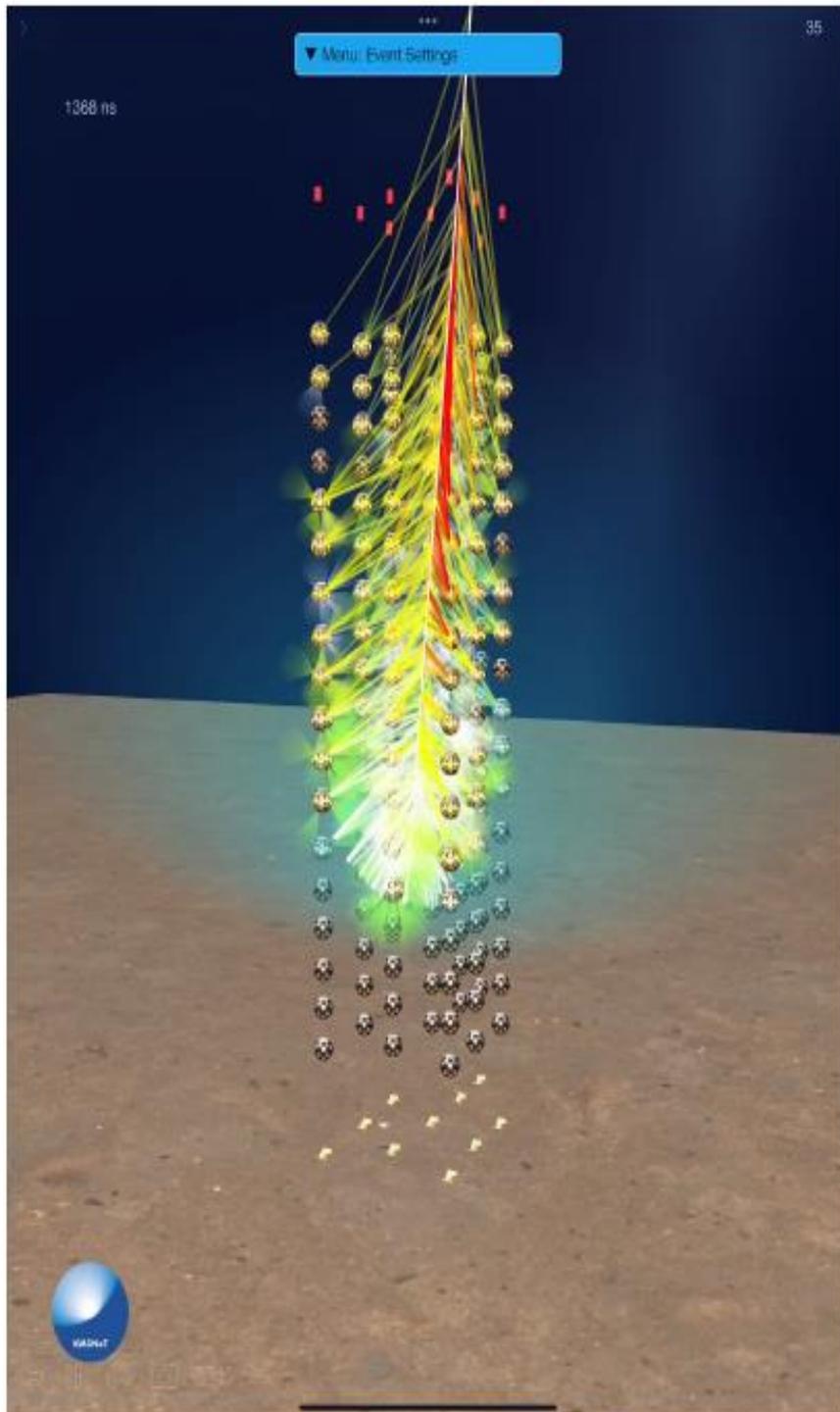
# La première ligne KM3NeT-ORCA



# Status de KM3NeT-ORCA : 24 lignes en opération

Site KM3NeT/ORCA - March 2025





# Statut et 1<sup>ers</sup> Résultats

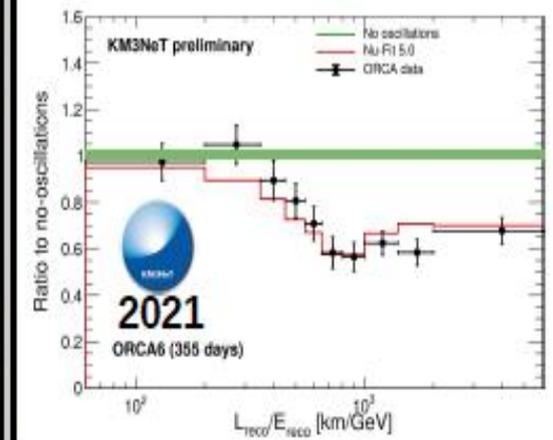
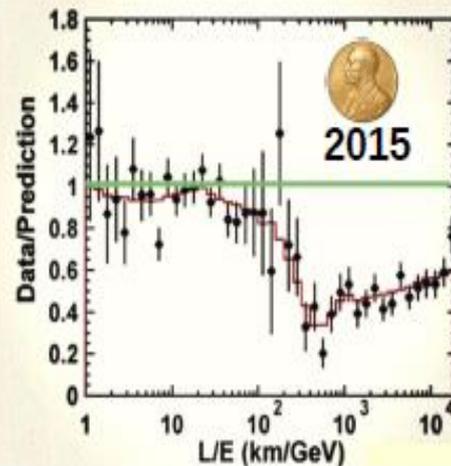
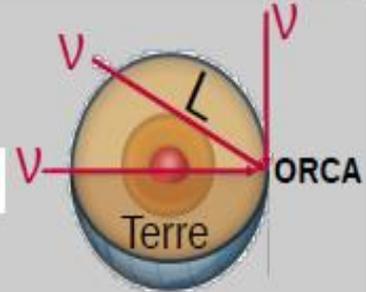
Les détecteurs sont en construction.

ORCA : 24 lignes / 115

ARCA : 33 lignes / 230

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

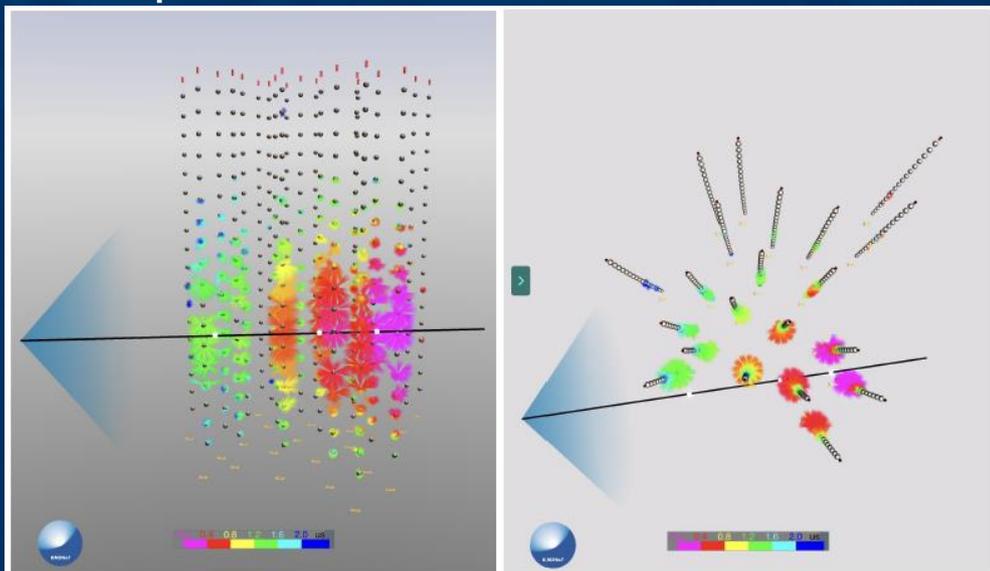
Les 6 premières lignes ORCA ont déjà permis d'observer les propriétés quantiques des neutrinos (Nobel 2015) !



# Le Super-Neutrino du 13/02/2023

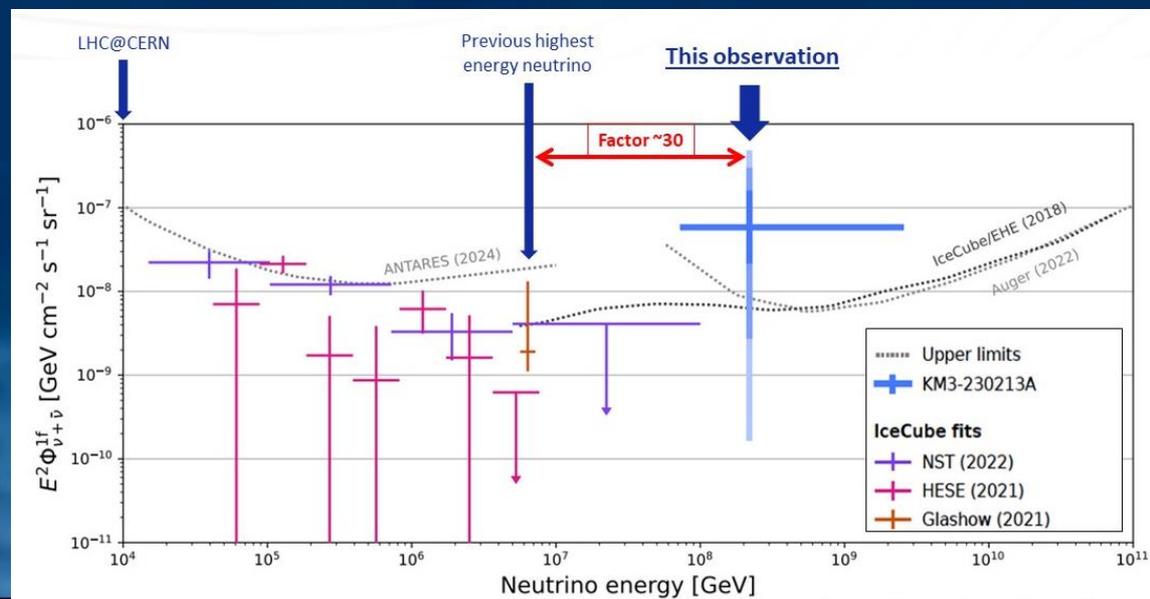


Enregistré avec ARCA21 :  
~28000 photons détectés, > 1/3 PMTs activés



Événement 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



Mis à jour le 13 février 2025 à 12h35

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

Un événement exceptionnel

2 min

Diane Hassoun



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

Salomé Robles avec AFP Le 13/02 à 16h34

20 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

### « 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 Salomé Robles avec AFP Le 9 février 2025 à 10h32

## La Marseillaise

ACCUEIL POLITIQUE SOCIAL SOCIÉTÉ ÉCONOMIE FRANCE INTERNATIONAL ENVIRONNEMENT

DANS L'ACTU #EDITO #GM #RUEDELAREPUBLIQUE #WEEKEND #BALA

### 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.

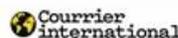
ANNETTE ARRENS QUINET / TOLSON / 14/02/2025 / 12H05

PARTICULES

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

Par Fabrice Nicot le 12.02.2025 à 17h00

Ecouter 5 min.



### 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



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

Facebook X Email Print

Actualités - Économie - Vidéos - Débats - Culture - Le Goût du Monde - Services

SCIENCES - ASTROPHYSIQUE

### Un record d'énergie battu pour un neutrino, observé en Méditerranée

Une collaboration internationale de 68 instituts, dont le CNRS, a saisi au large de la Sicile la preuve du passage d'une de ces particules à même d'apporter des informations sur des accélérateurs de particules géants dans l'Univers.

franceinfo:

Accueil Menu Enquêtes Viol ou faux Guerre en Ukraine Procès Le Sco...

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



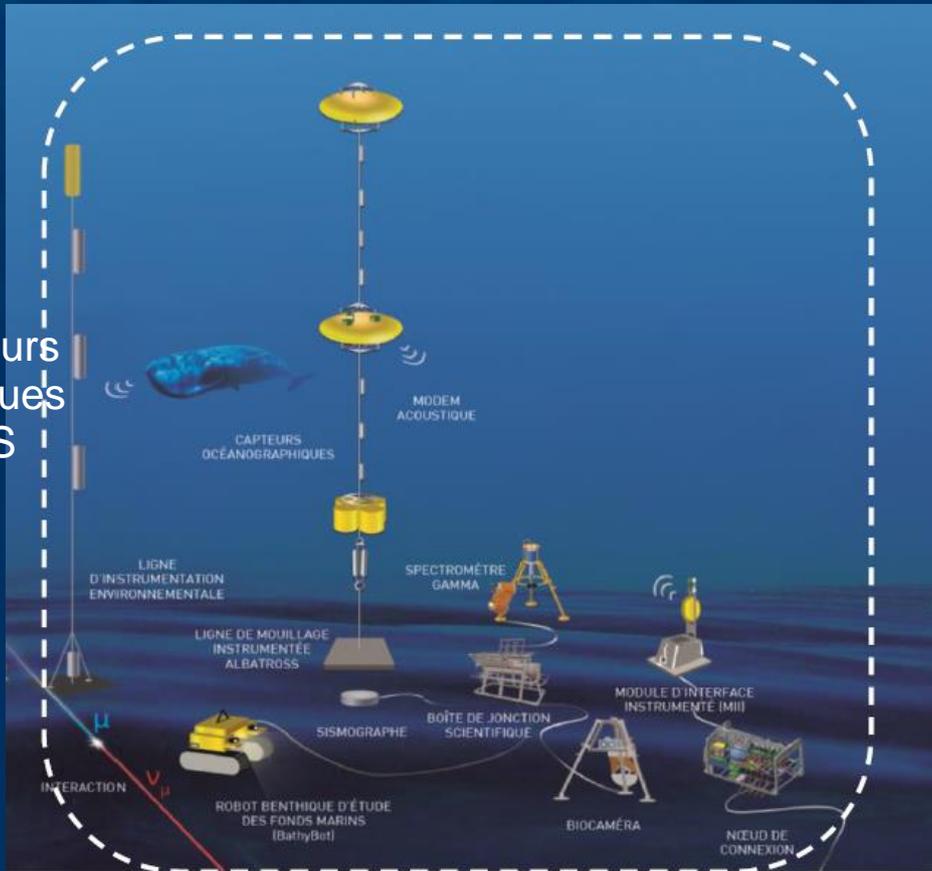
Chercher un article, un podcast, une vidéo...

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

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

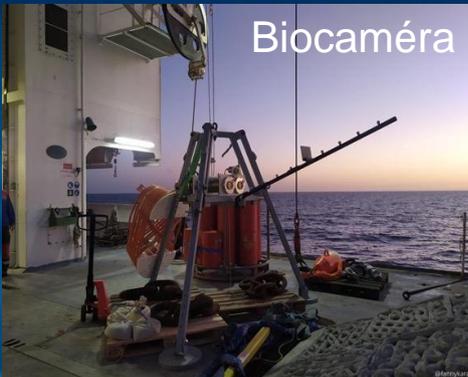
# Un Observatoire Pluridisciplinaire en Mer Profonde

Ligne de capteurs  
océanographiques  
**ALBATROSS**

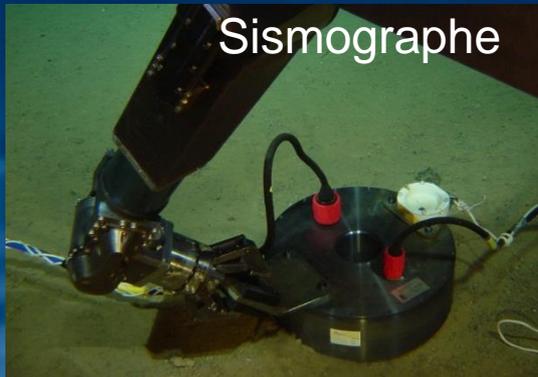


- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...

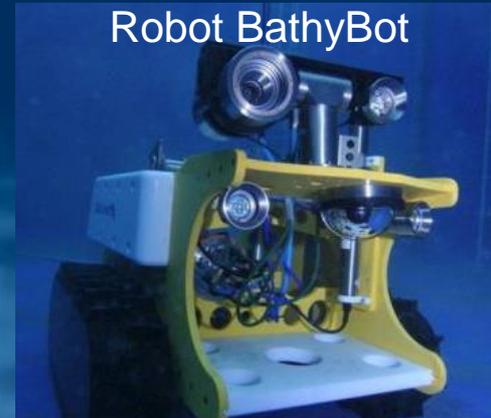
Biocaméra



Sismographe



Robot BathyBot



Spectromètre  
gamma





# 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