



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 2024

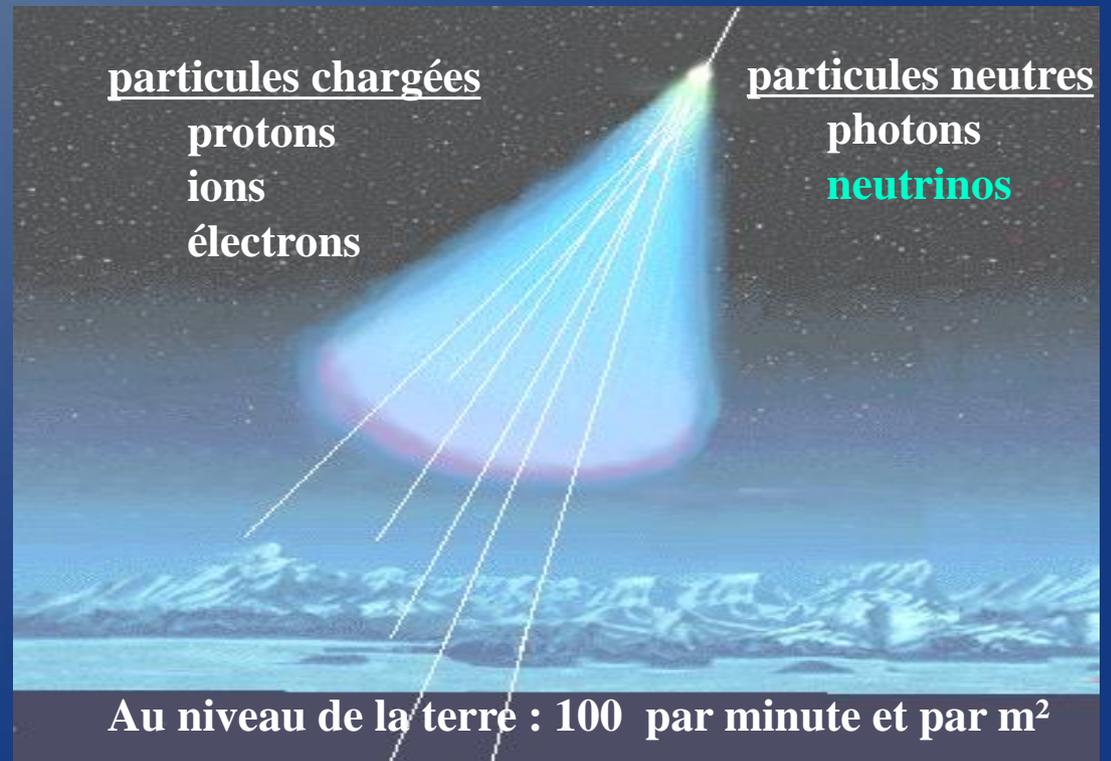


Les rayons cosmiques

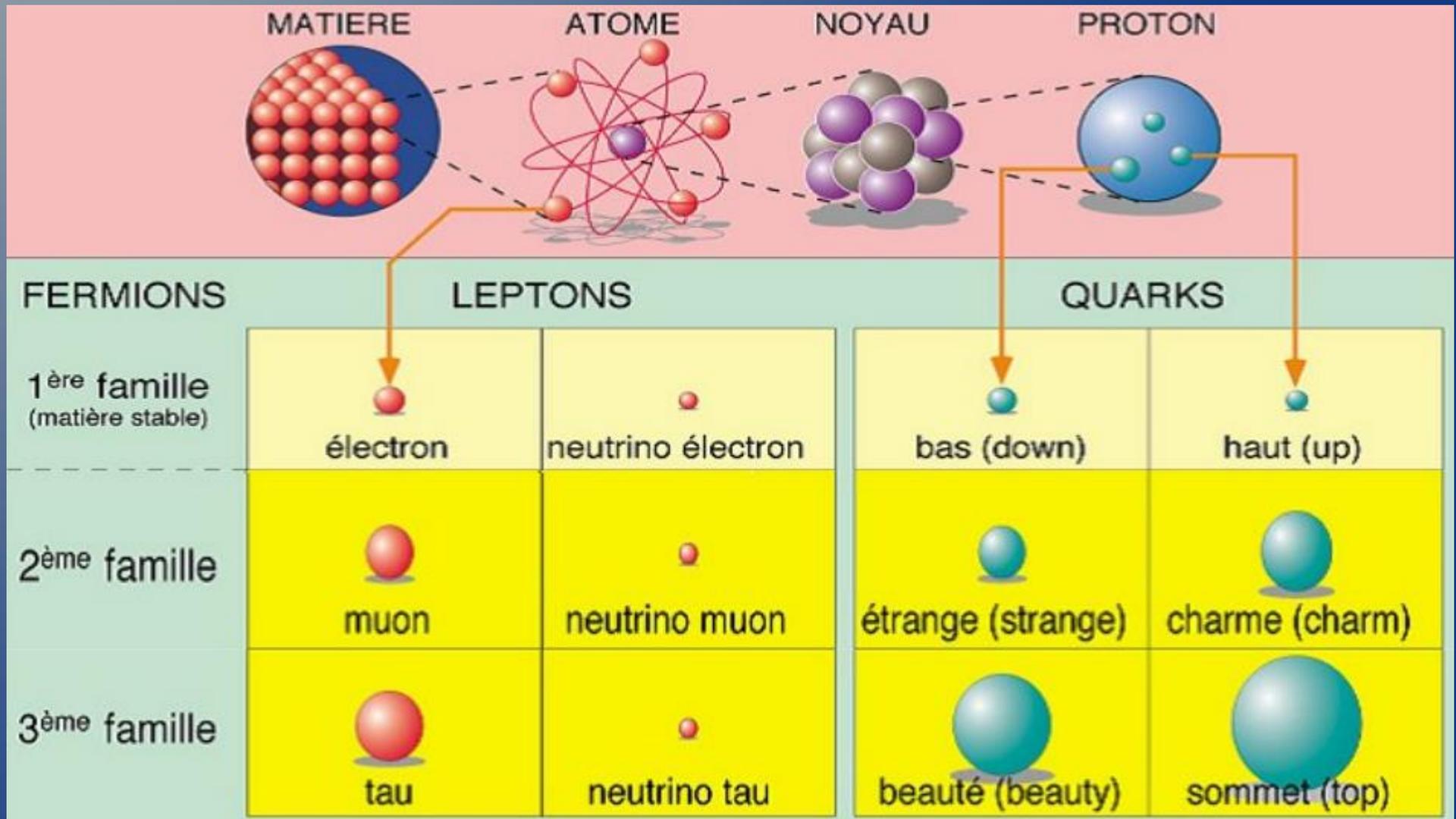


Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

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

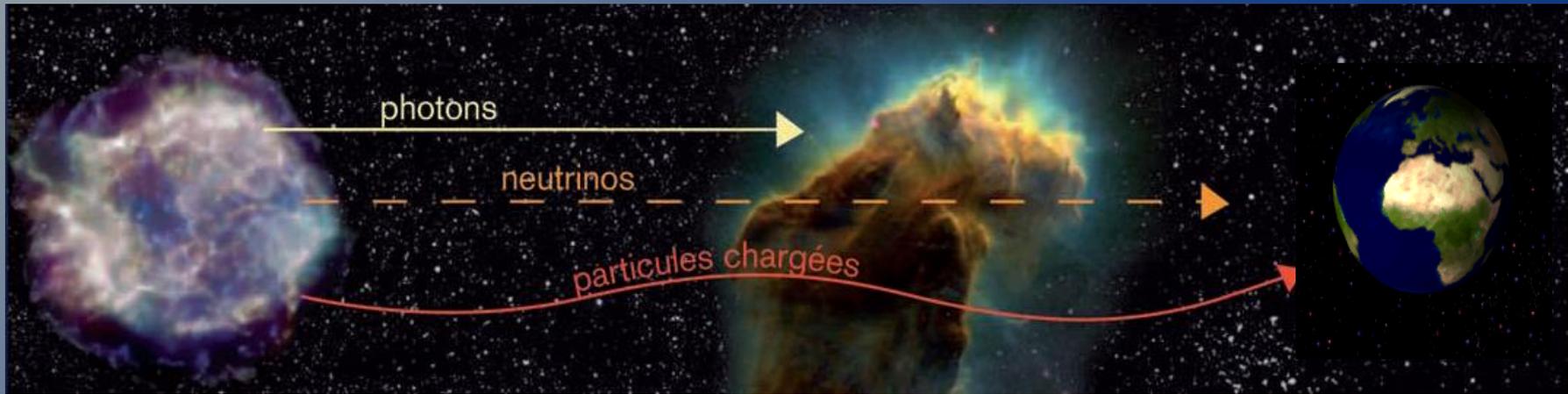
de *Strasbourg*

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 :

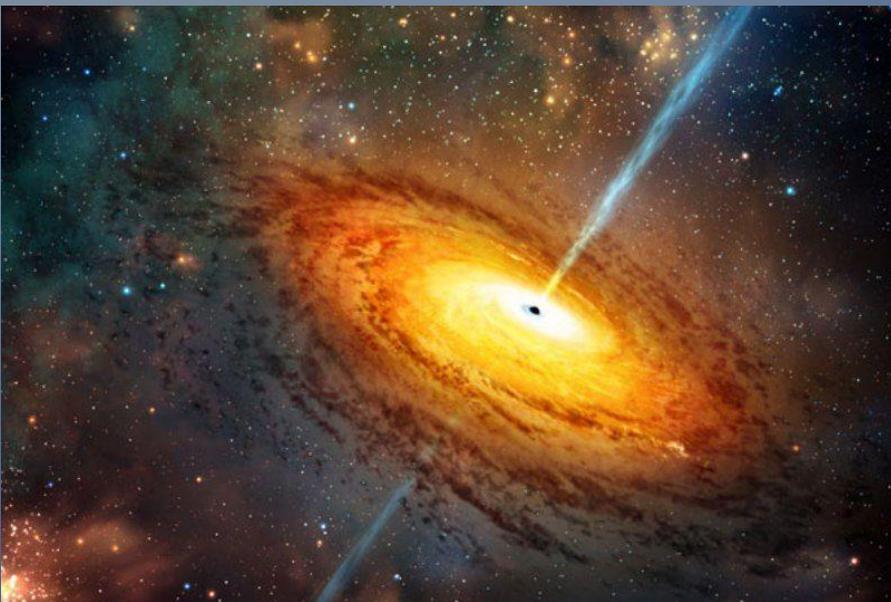
Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

\Rightarrow Nécessité d'un grand volume de détection

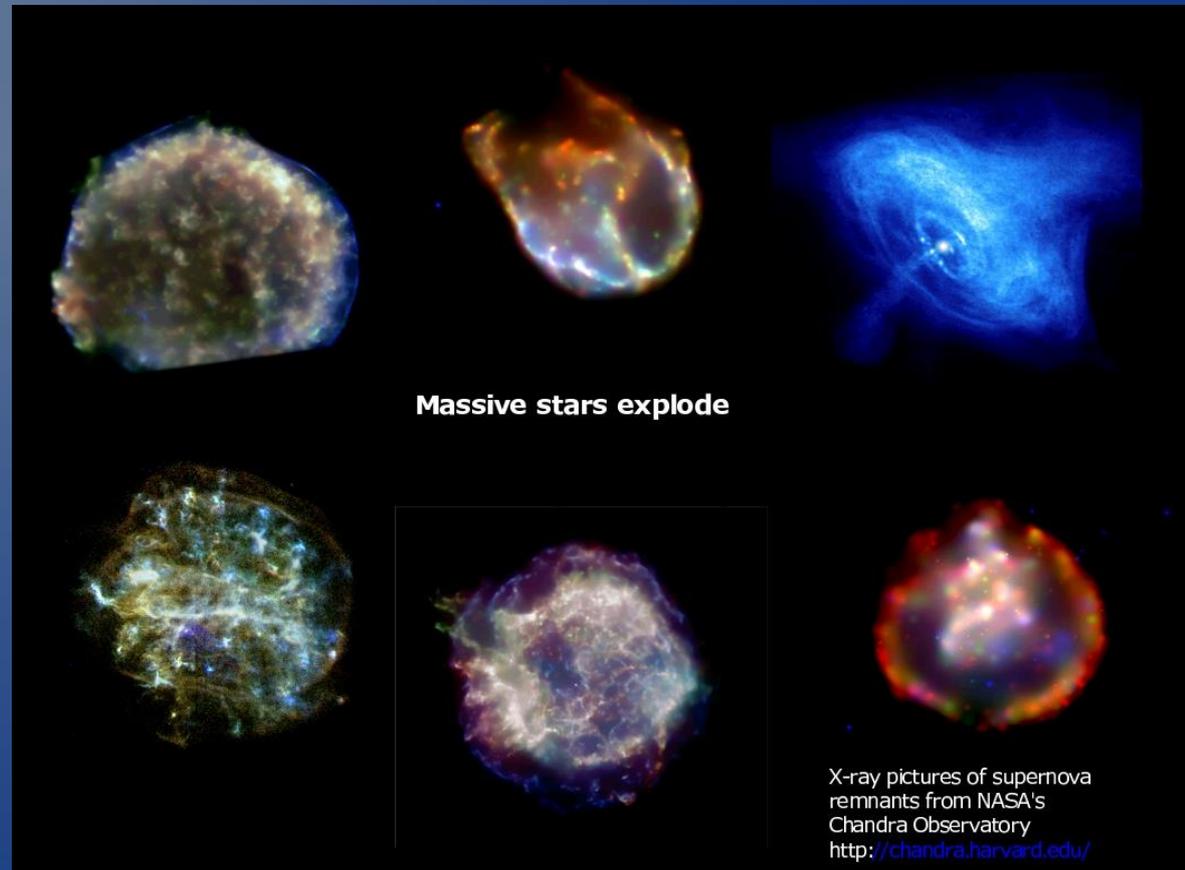
Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

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

Explosions d'étoiles (Supernovae)



Trous noirs super-massifs
(Noyaux actifs de galaxies)

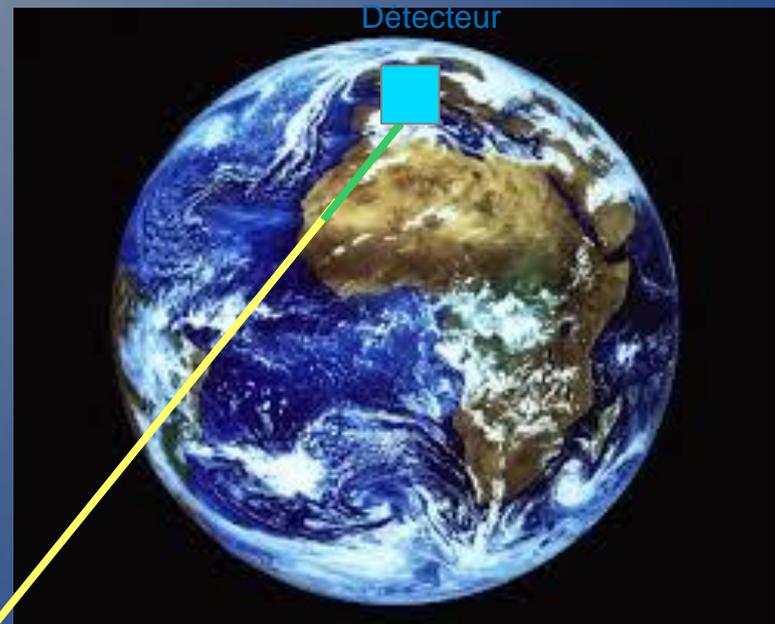


X-ray pictures of supernova remnants from NASA's Chandra Observatory
<http://chandra.harvard.edu/>

Pour arrêter les neutrinos...

... La Terre !

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

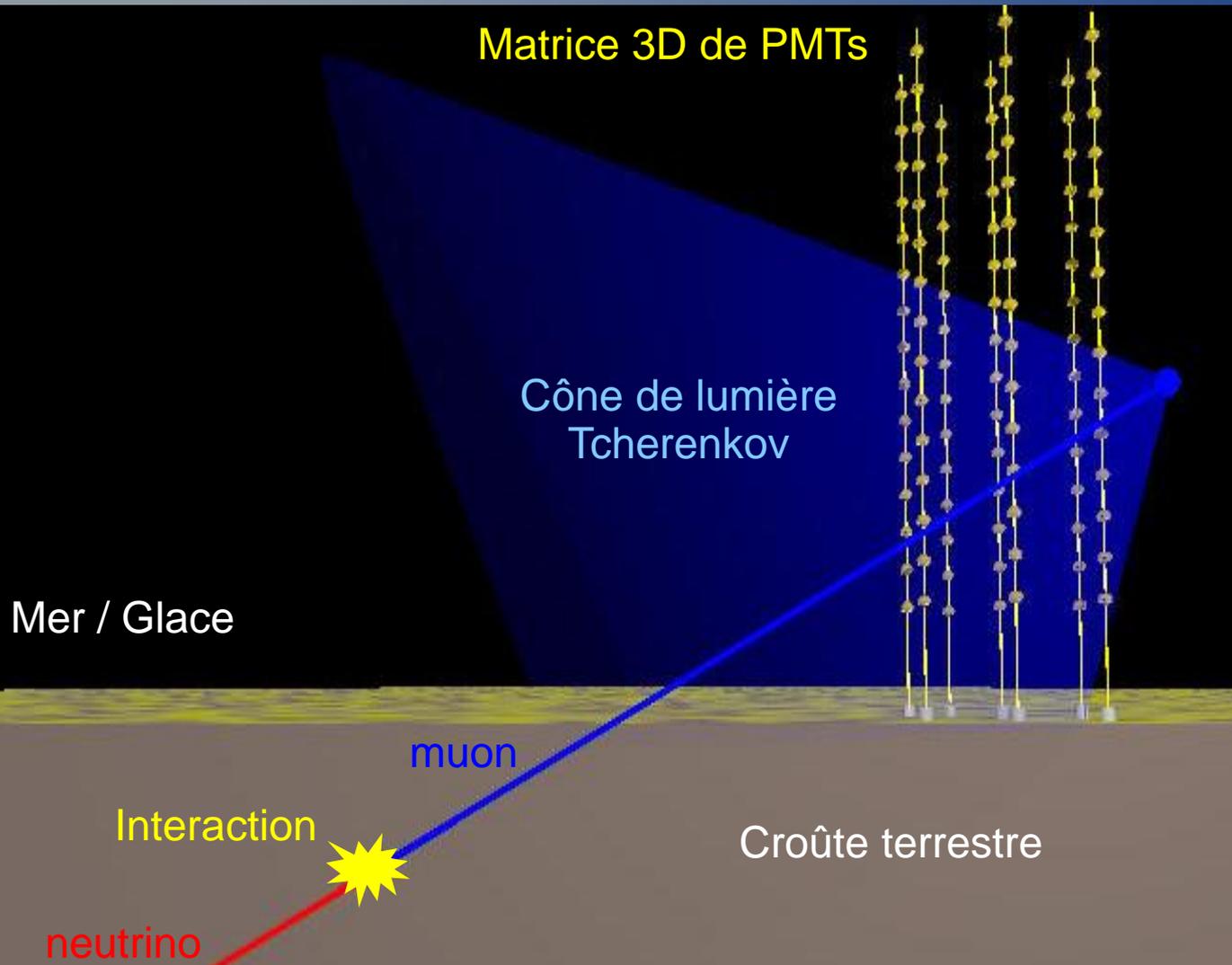


Un **neutrino** entre parfois en collision avec un noyau atomique

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 μ issu du ν propagation détectée par matrice de PMTs
Temps & position des photons permet la reconstruction de la trajectoire du μ ($\sim \nu$)

Les Téléscopes à neutrinos dans le Monde

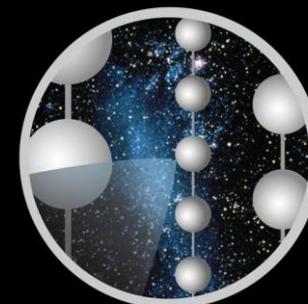
ANTARES & KM3NeT



BAIKAL

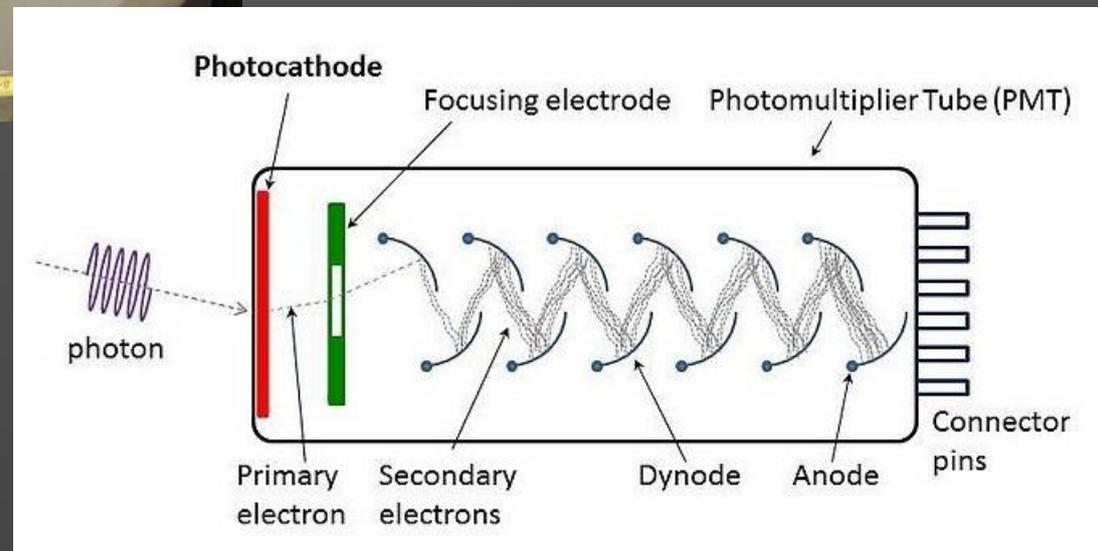


IceCube



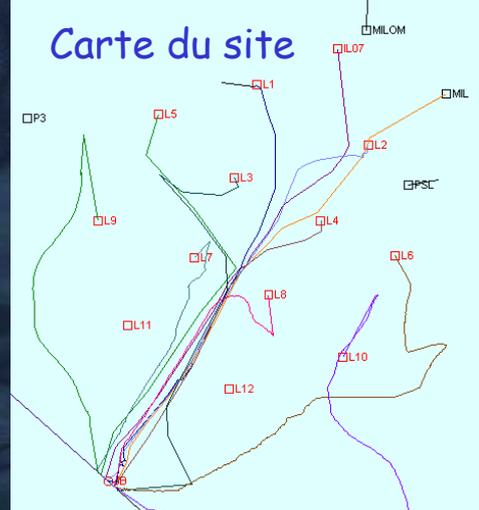
ICECUBE

Les yeux d'ANTARES: photomultiplicateurs



Le Détecteur ANTARES

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



14.5 m

Bouy

Etage

350 m



Boîte de Jonction

100 m

Câble Electro-optique

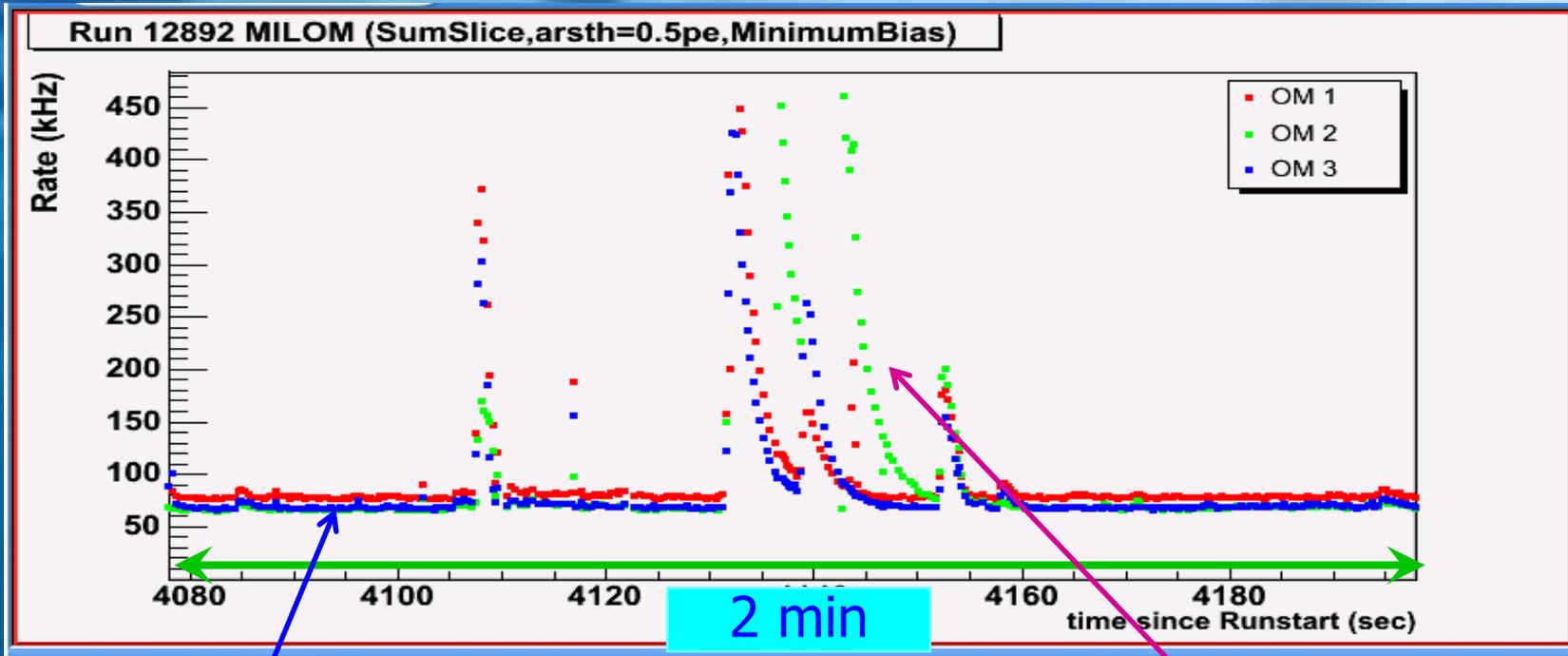
~60-75 m

Profondeur : 2480m

Détecteur en opération entre 2006 et 2022

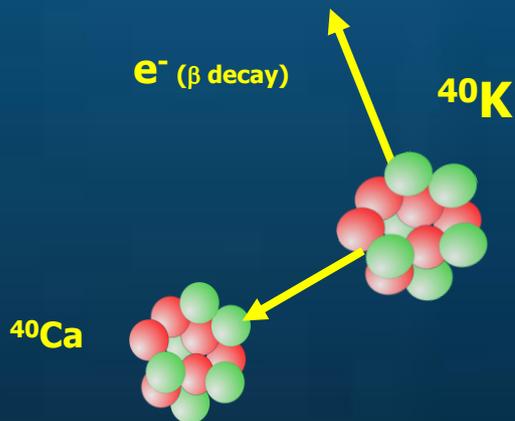


Taux de comptage d'un Module Optique



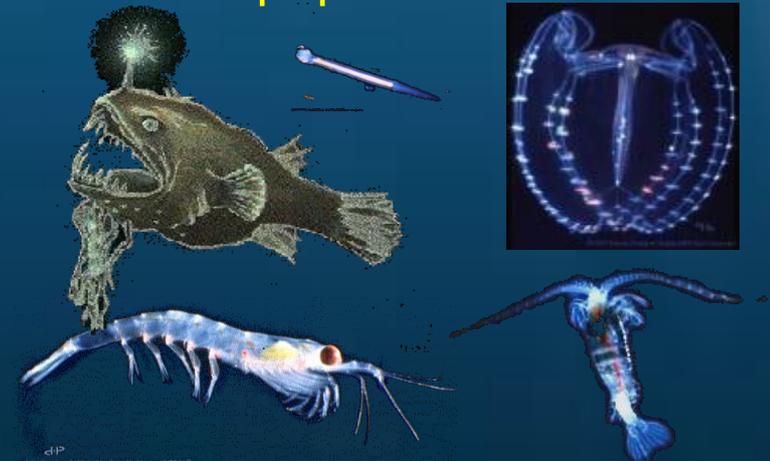
Ligne de base :

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



Bursts:

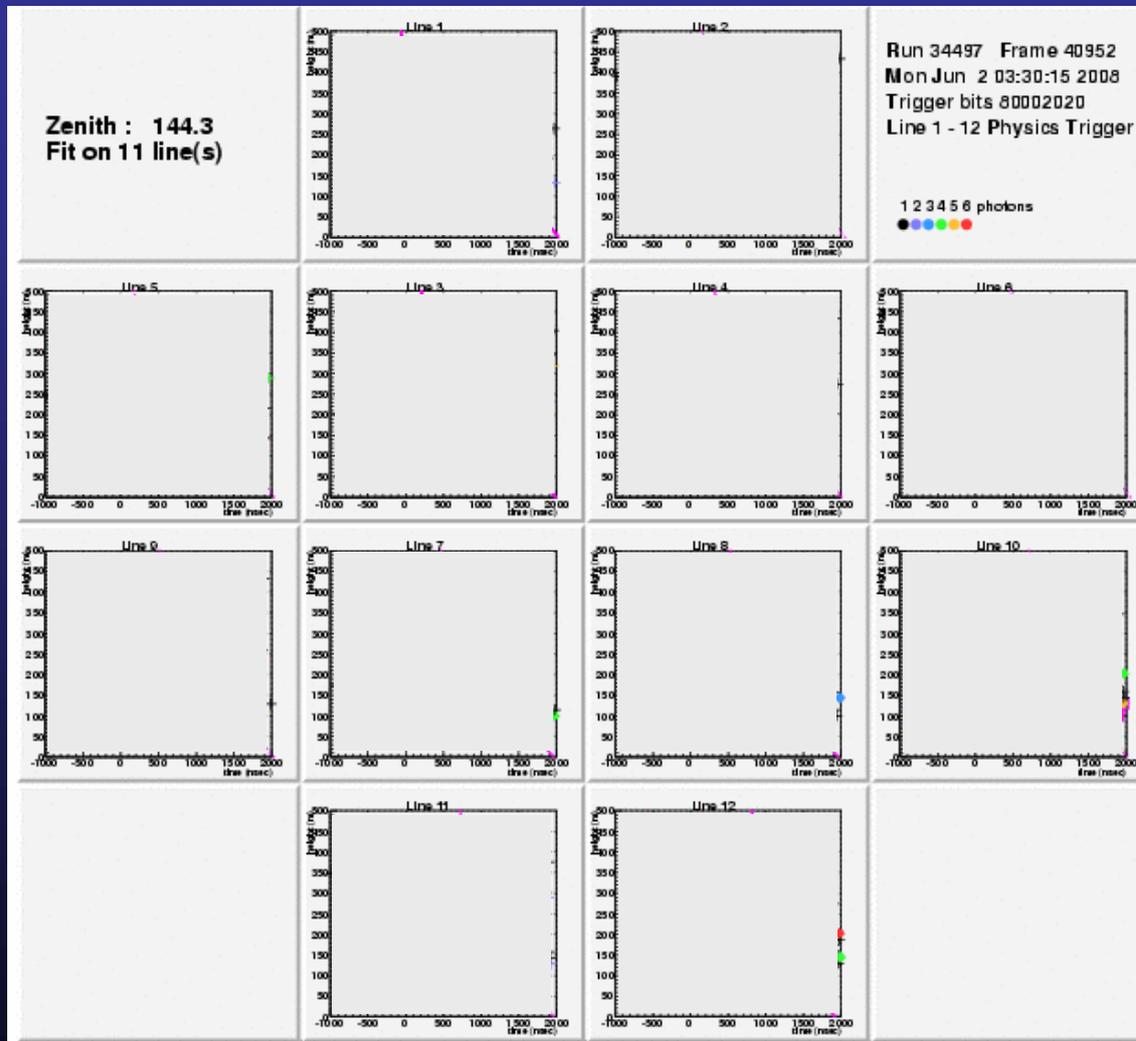
Bioluminescence d'organismes
macroscopiques





Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



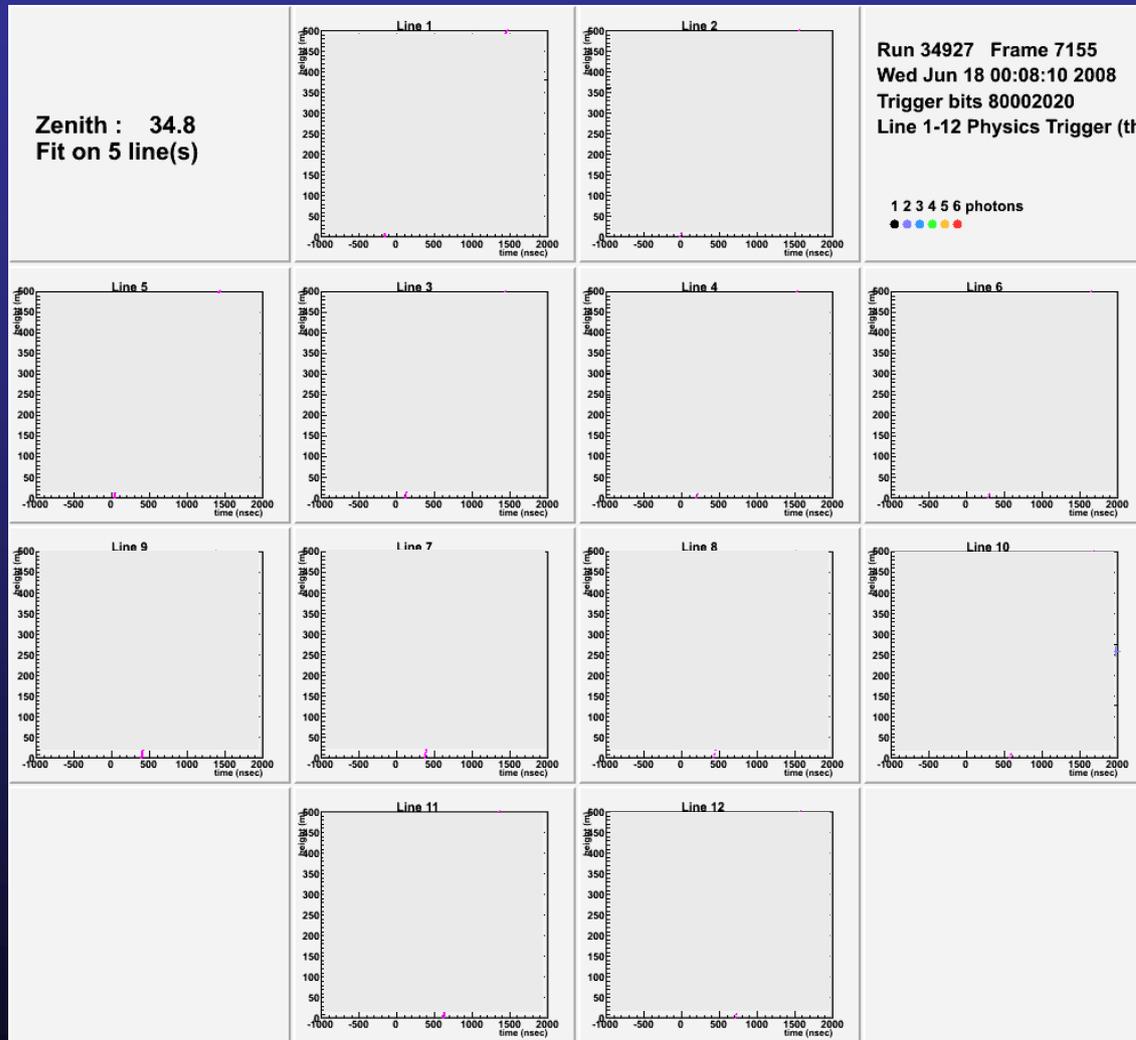
Example of a *down-going muon event*, detected over the 12 detector lines



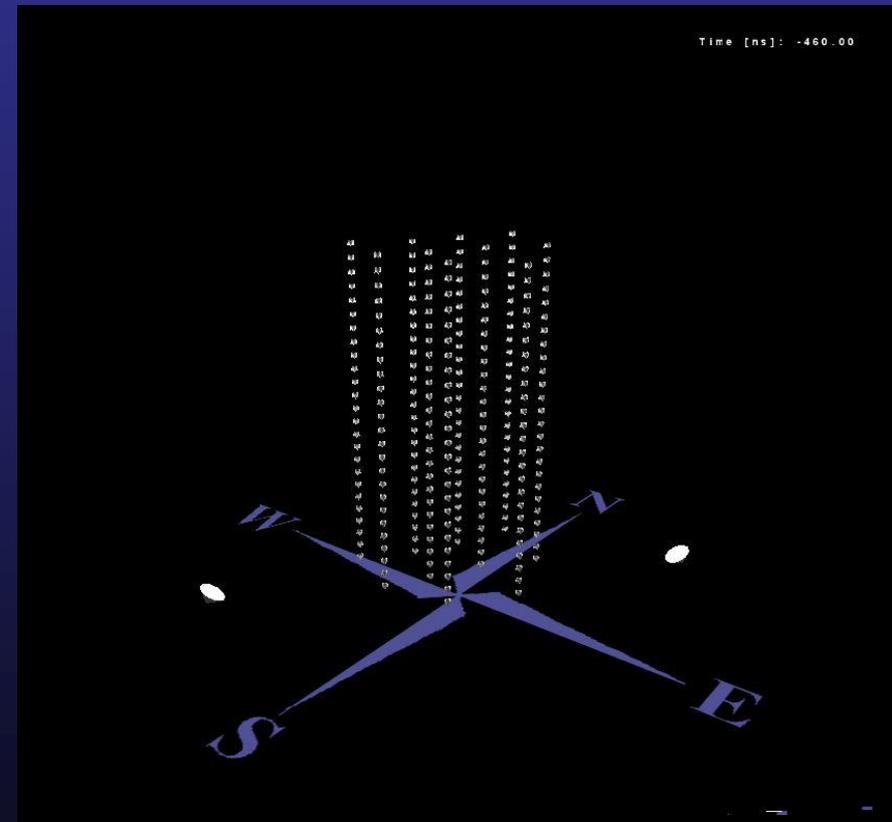


Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



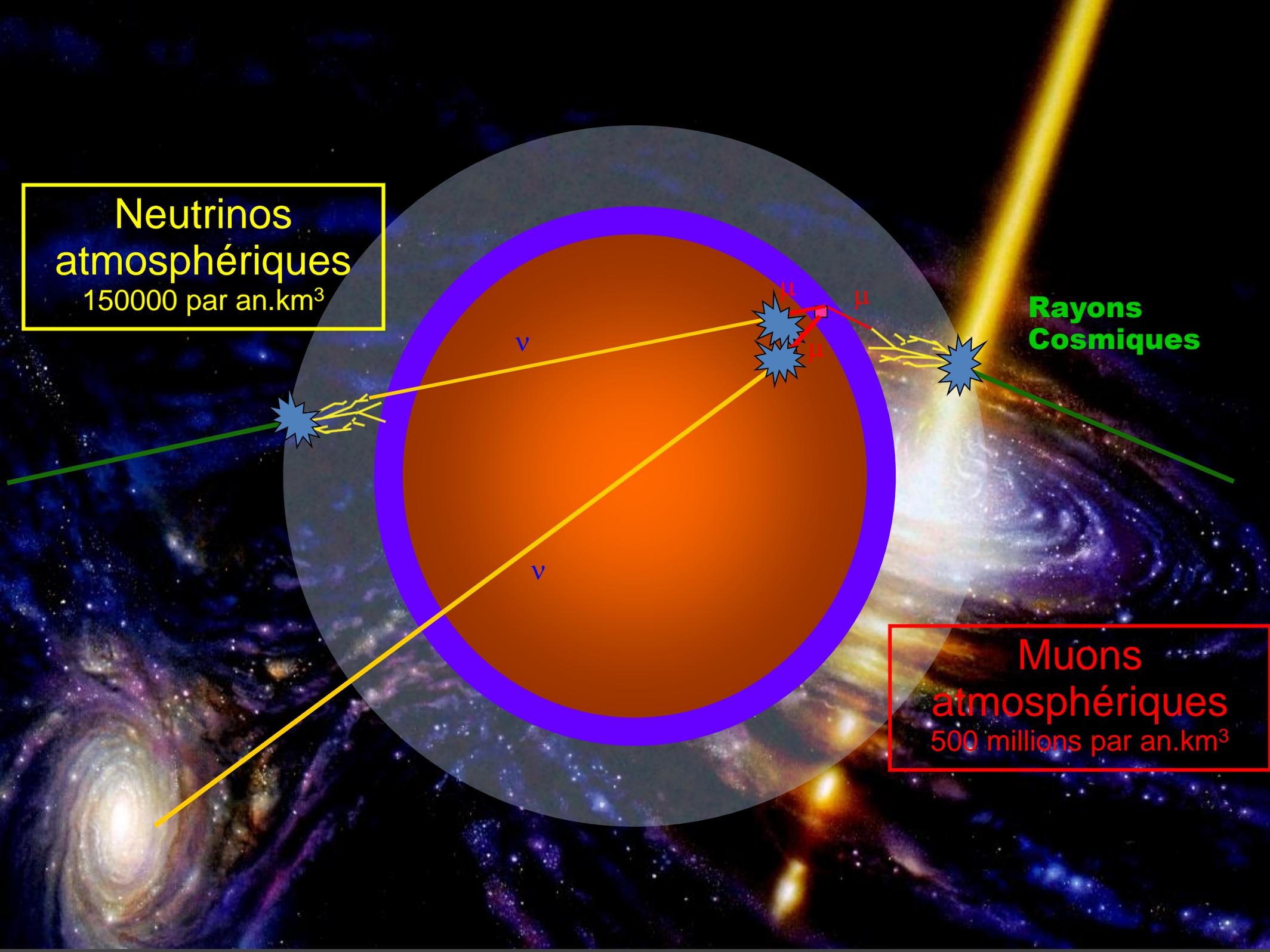
Example of an *up-going muon event* (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines



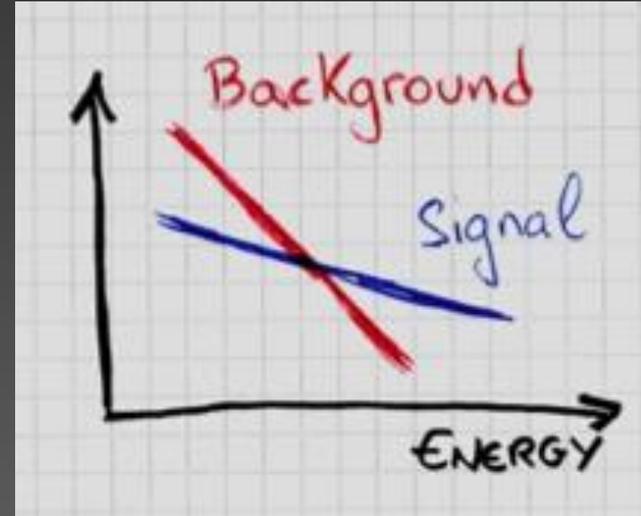
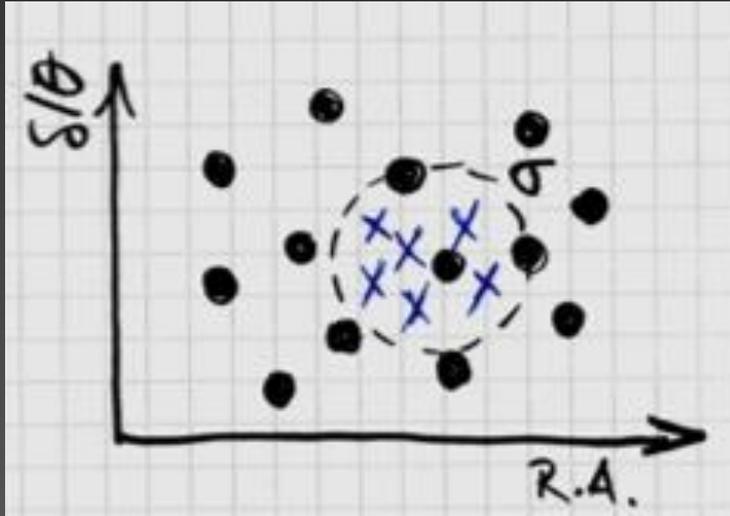
**Neutrinos
atmosphériques**
150000 par an.km³

**Rayons
Cosmiques**

**Muons
atmosphériques**
500 millions par an.km³



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:

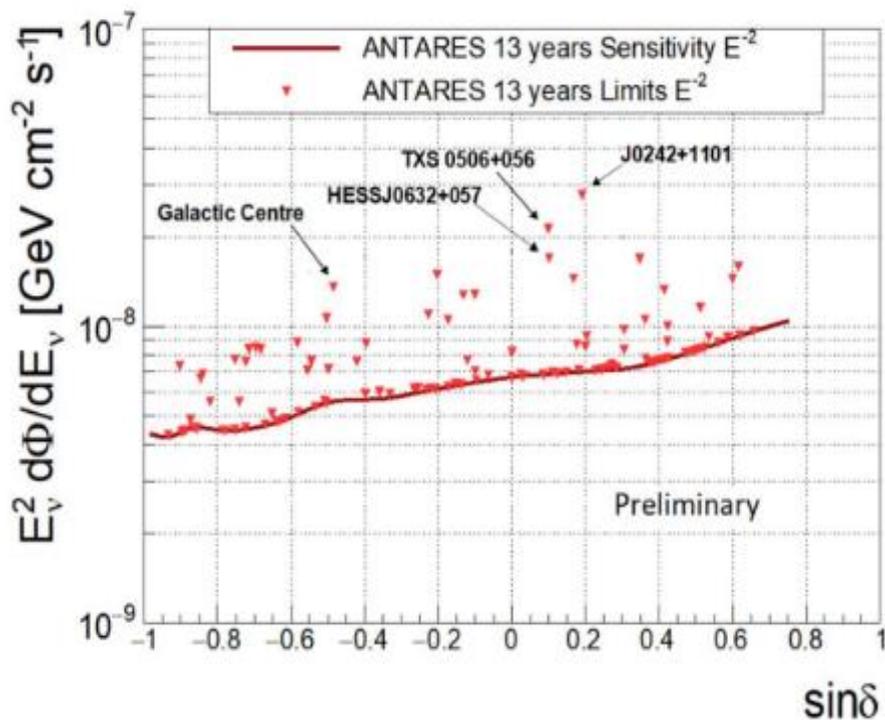
Period: from Jan 2007 to Feb 2020

Livetime: 3845 days

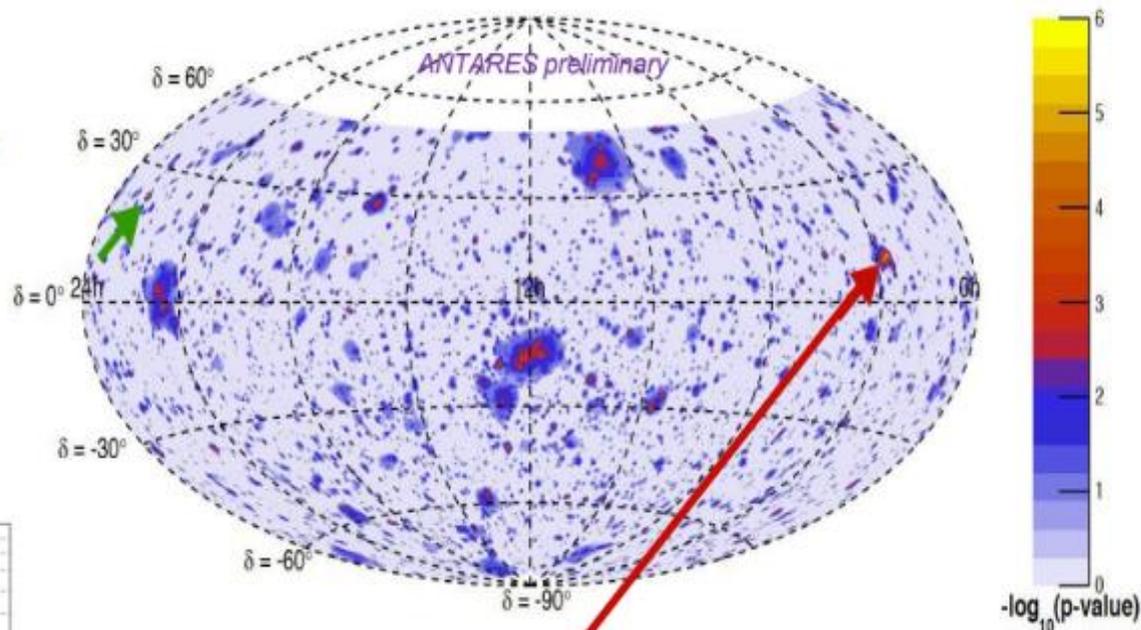
Events: 10162 tracks and 225 showers

Candidate-list search:

121 investigated sources



Full-sky search



Full-sky hotspot (α, δ) = (39.6°, 11.1°)

pre-trial p-value: of 6.8×10^{-6} (4.3 σ)

post-trial p-value: of 48%

Within 1 degree from J0242+1101

Most significant source:

J0242+1101

pre-trial significance: 3.8 σ

post-trial significance: 2.4 σ



ANTARES Multi-Messengers Analyses



SWIFT



Maxi



Fermi



Ligo

Milagro



HAWK



TA

HAWK



Virgo

ANTARES



HESS



Auger



MWA



Parkes



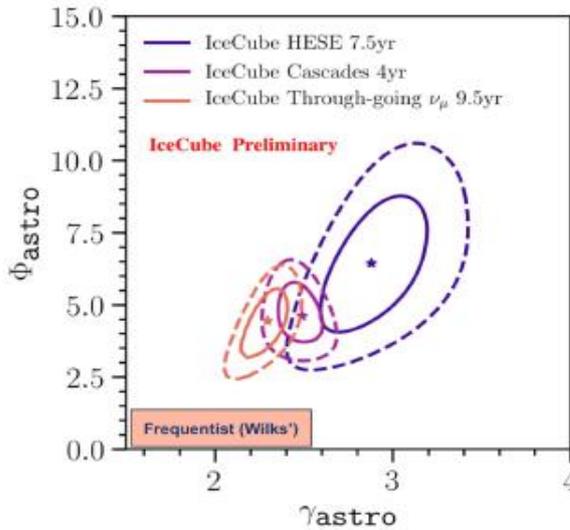
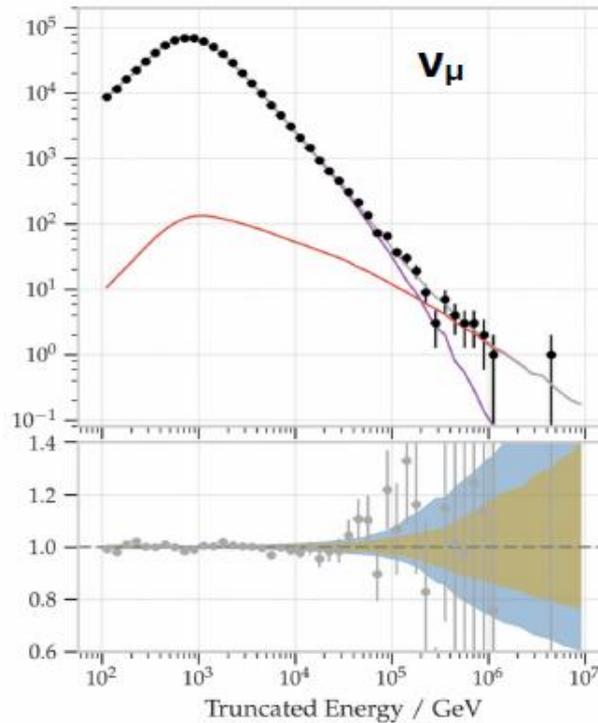
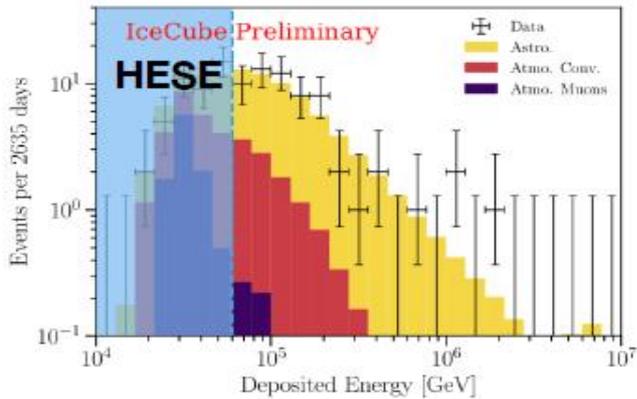
Utmost



IceCube

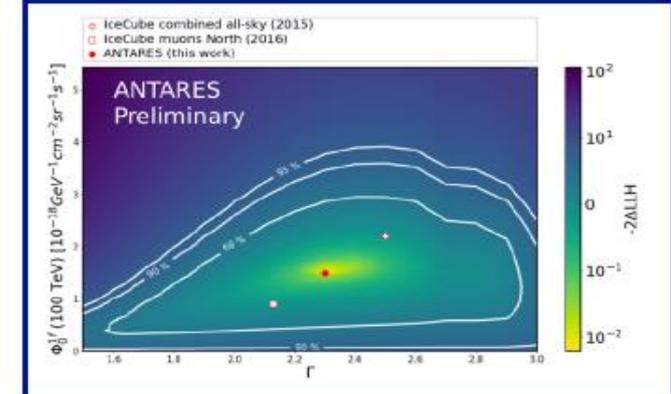
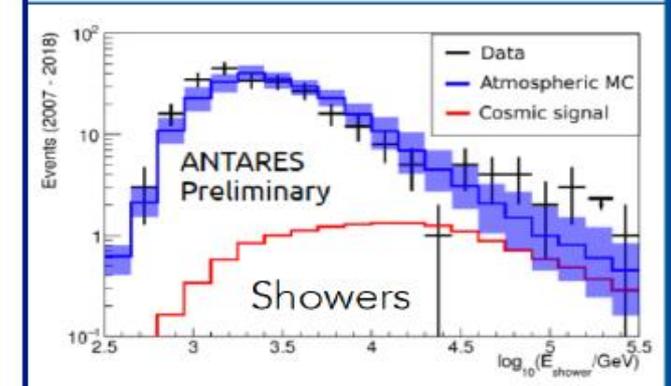
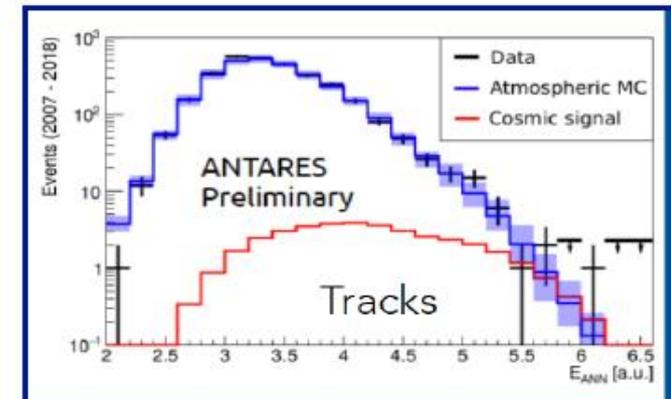
Un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie...

IceCube 7-10 yrs



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

ANTARES 11 yrs

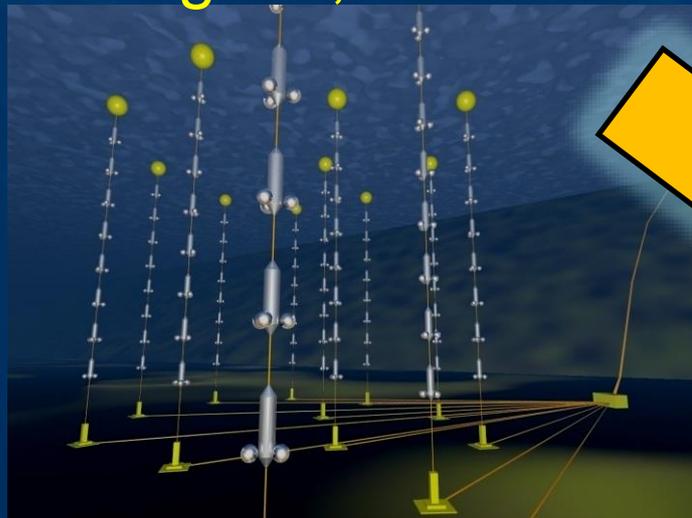


Flux très faible \rightarrow doit être étudié avec un détecteur de taille multi-km³

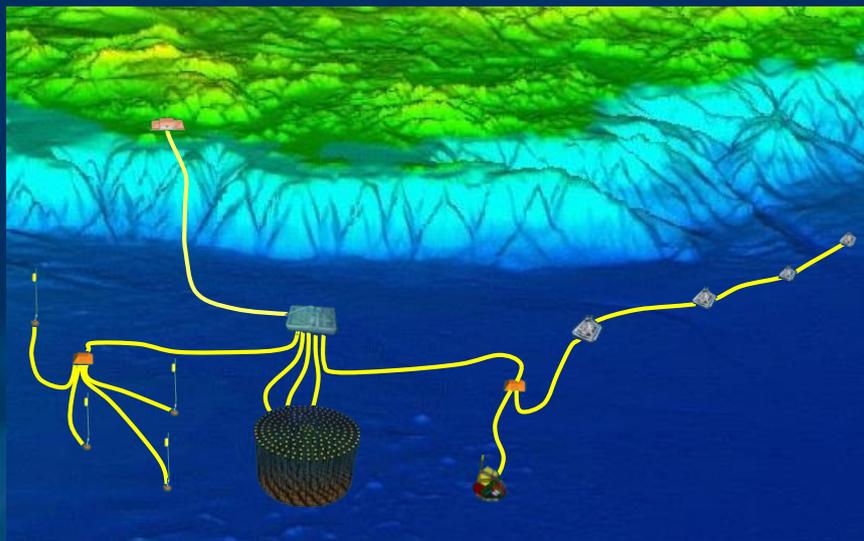
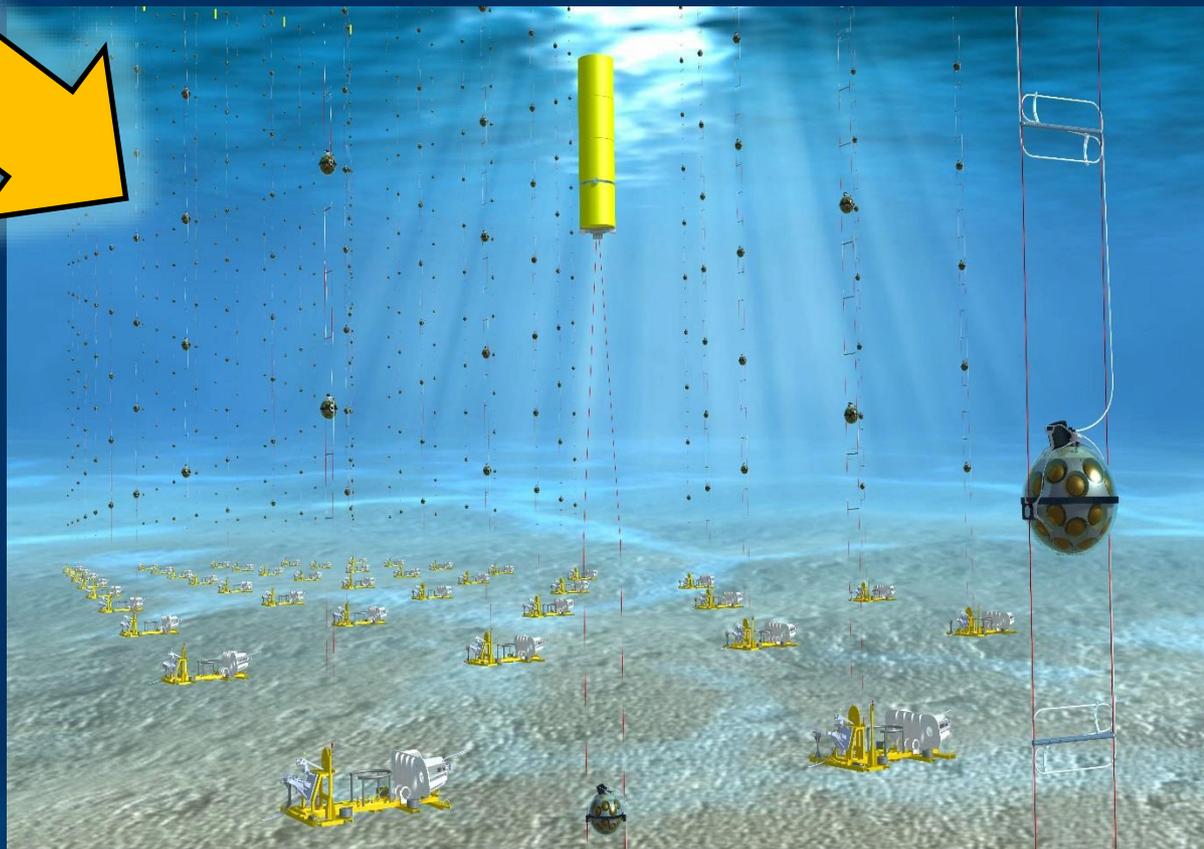


Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs

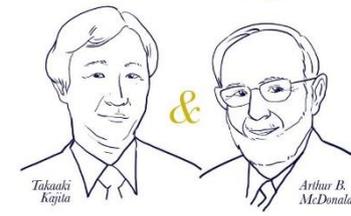


~350 lignes, ~6300 OMs



Observatoire multidisciplinaire permanent en mer profonde

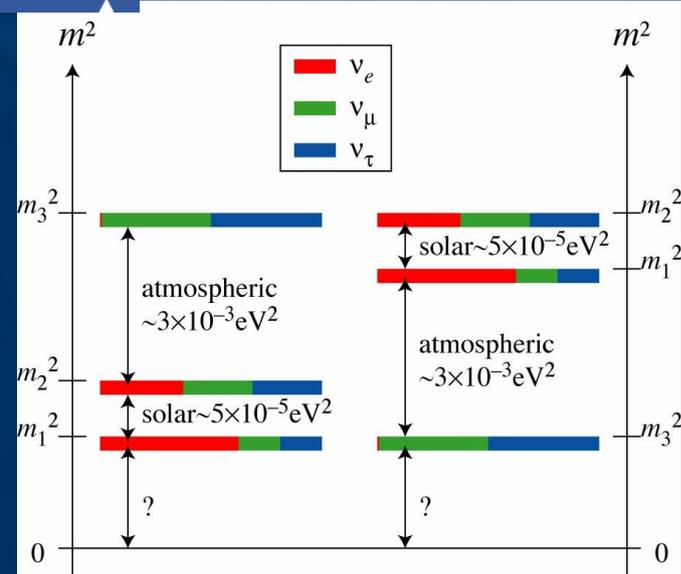
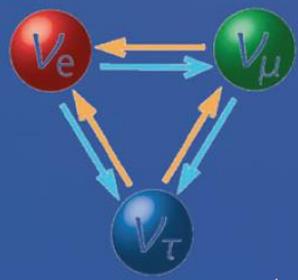
Détecteur installé sur 2 sites profonds en Mer Méditerranée au large de Toulon (France) et Sicile



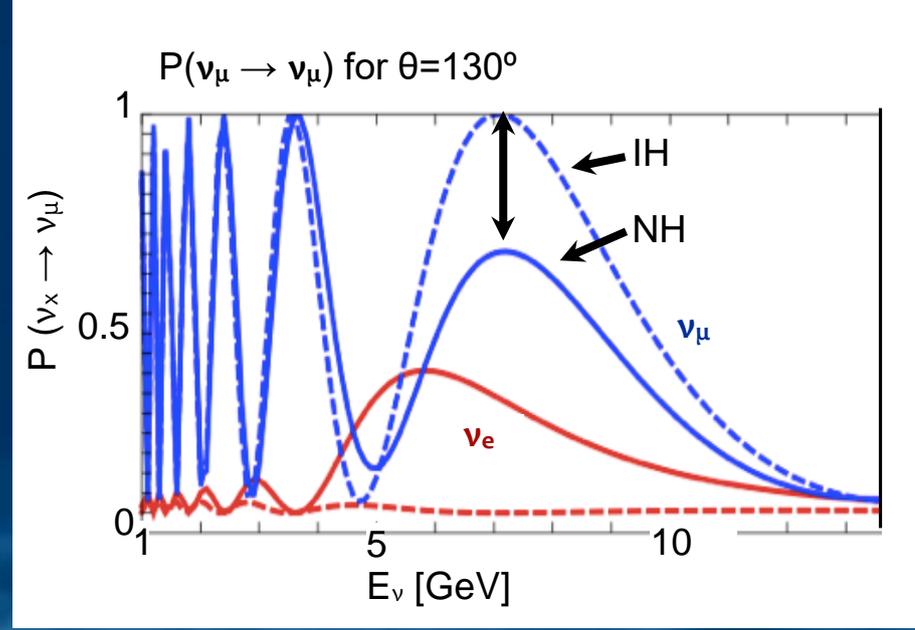
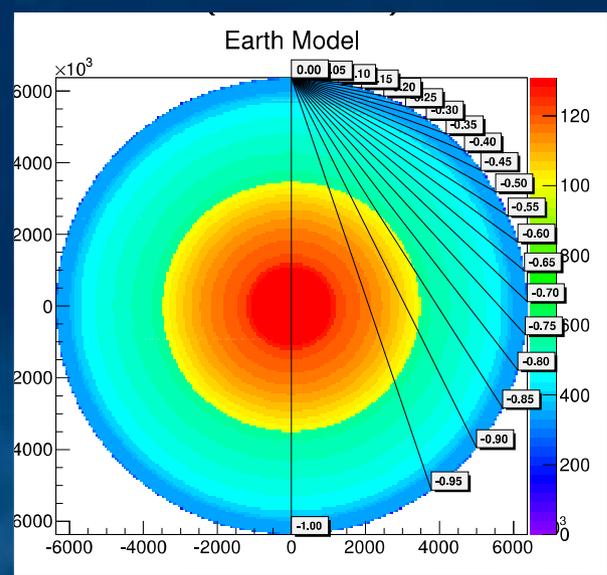
NEUTRINO OSCILLATIONS
The discovery of these oscillations shows that neutrinos have mass.



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

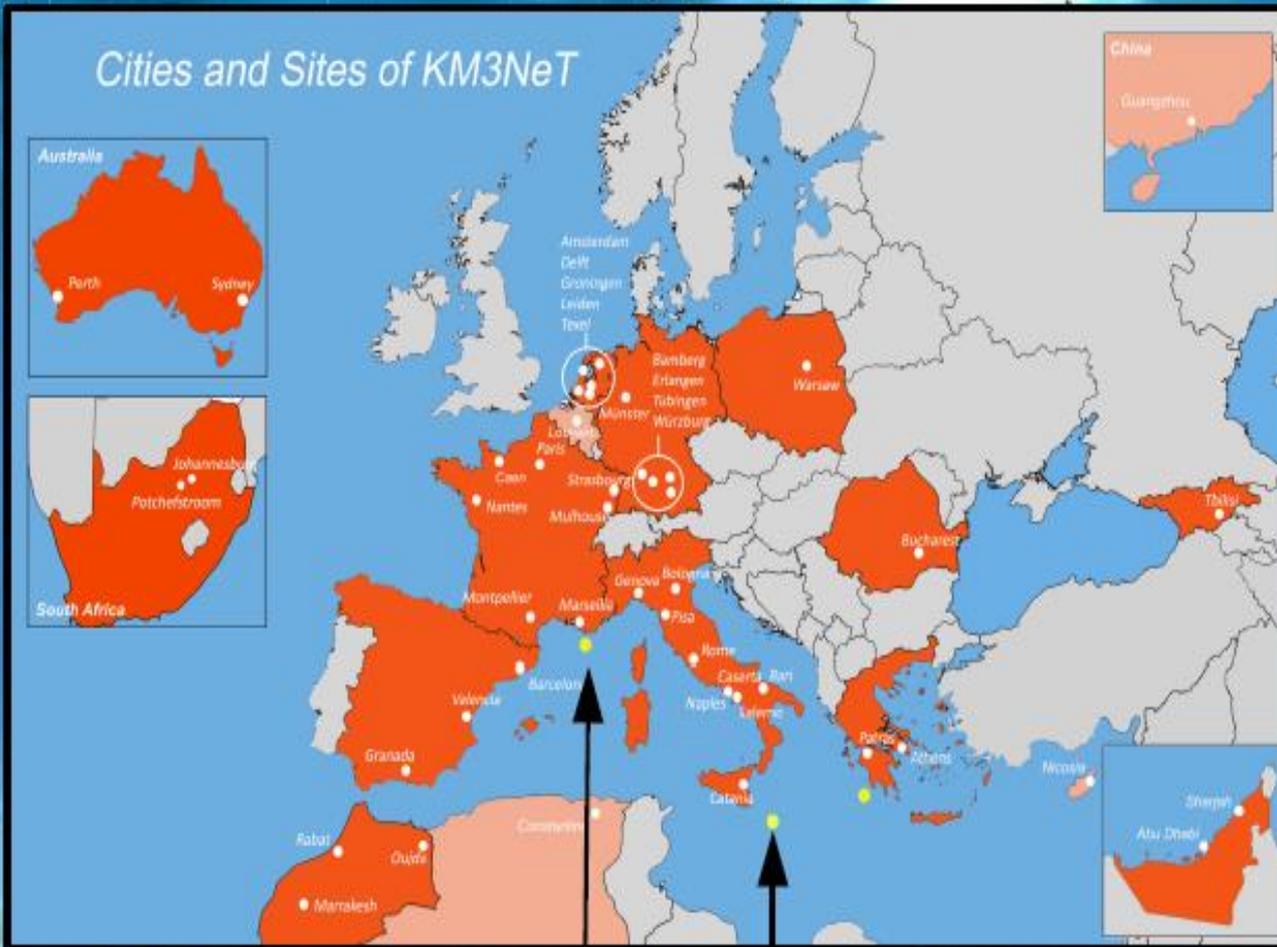


Paramètre fondamental de la nature des neutrinos toujours inconnu !!

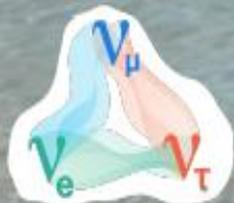


Etudes précise du flux des neutrinos atmosphériques de quelques GeV interagissant dans la Terre

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



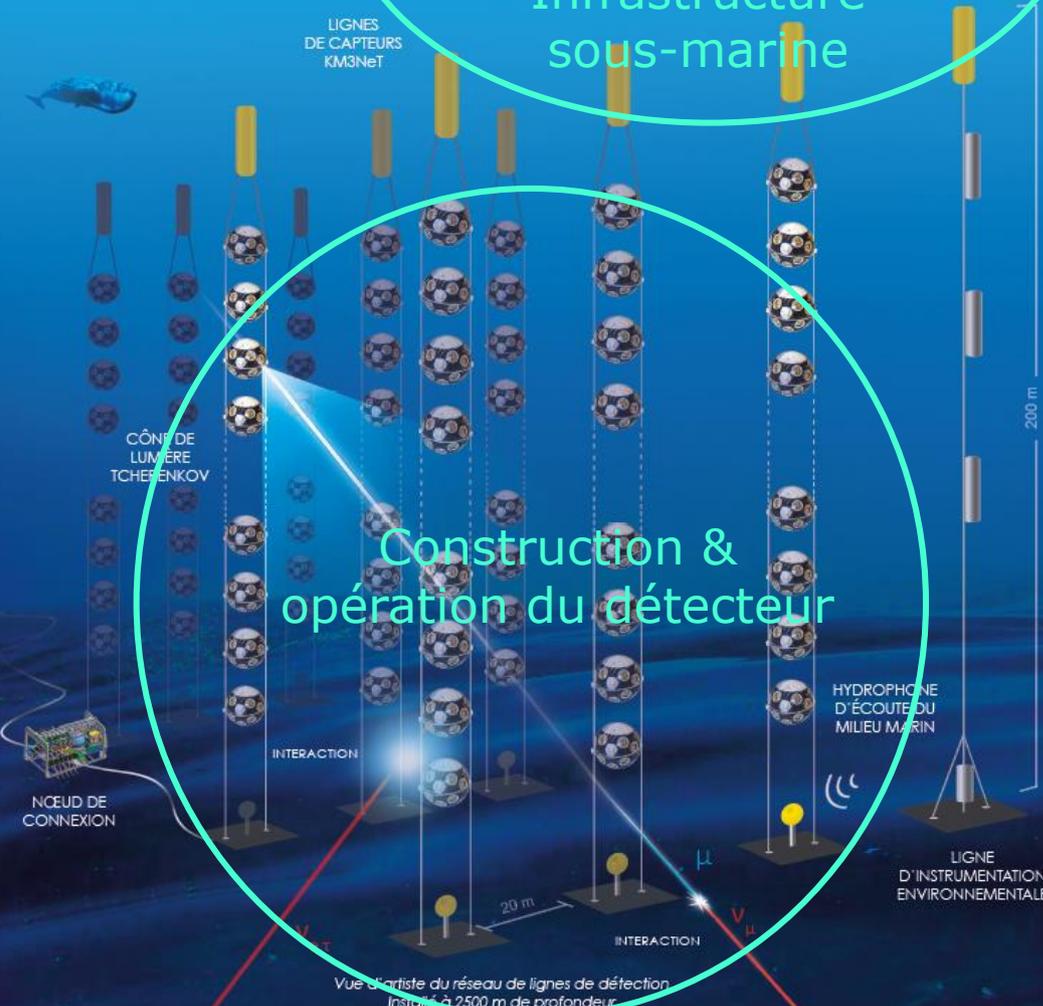


Infrastructure sous-marine

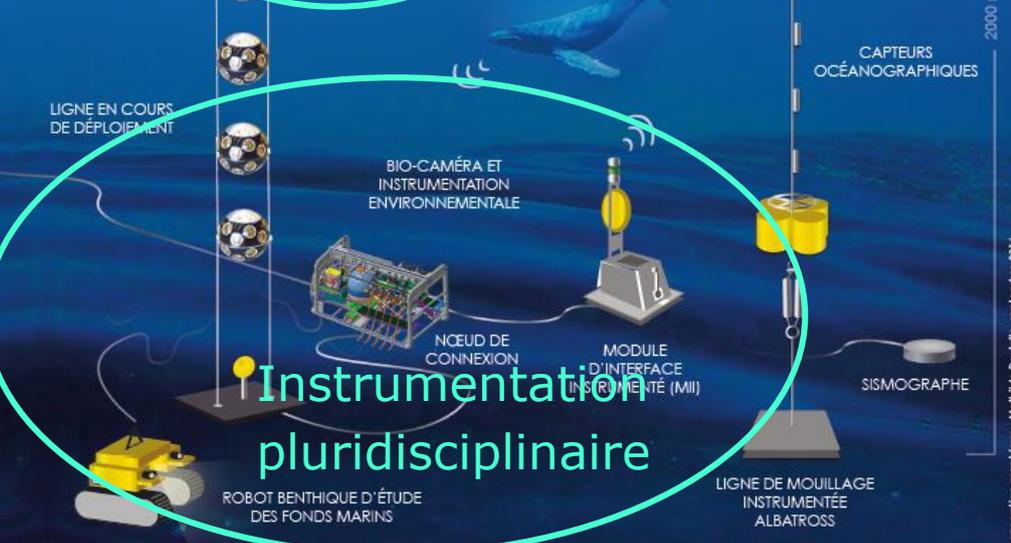


UNE NOUVELLE FAÇON D'OBSERVER LES ABYSSES

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



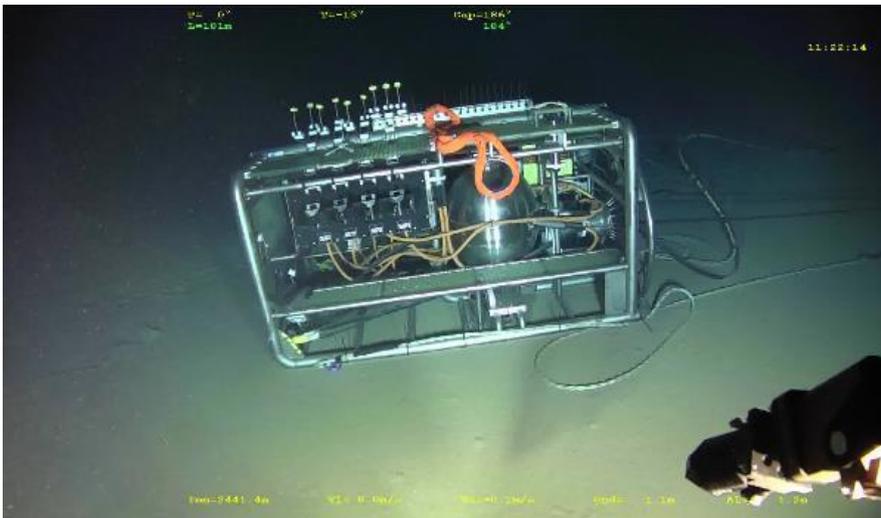
Plage des Sablettes,
La Seyne-sur-Mer



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

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

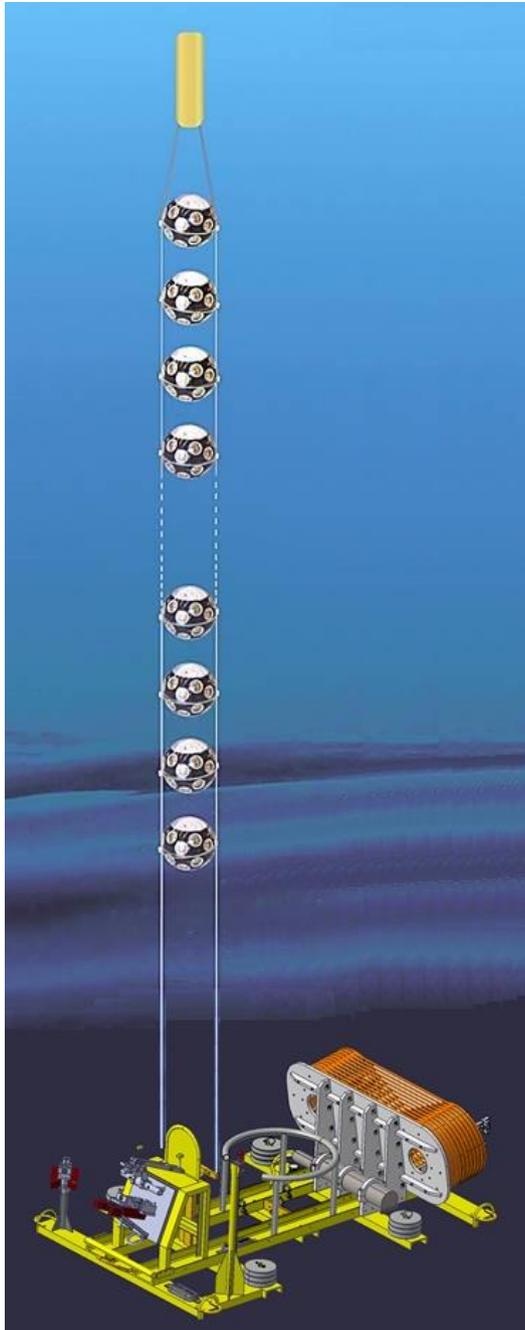
Noeud 1 : déployé 10/2018



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

	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



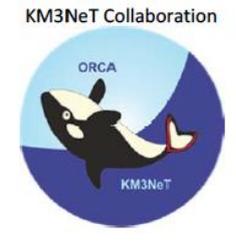
← ~0,4 m →

- 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



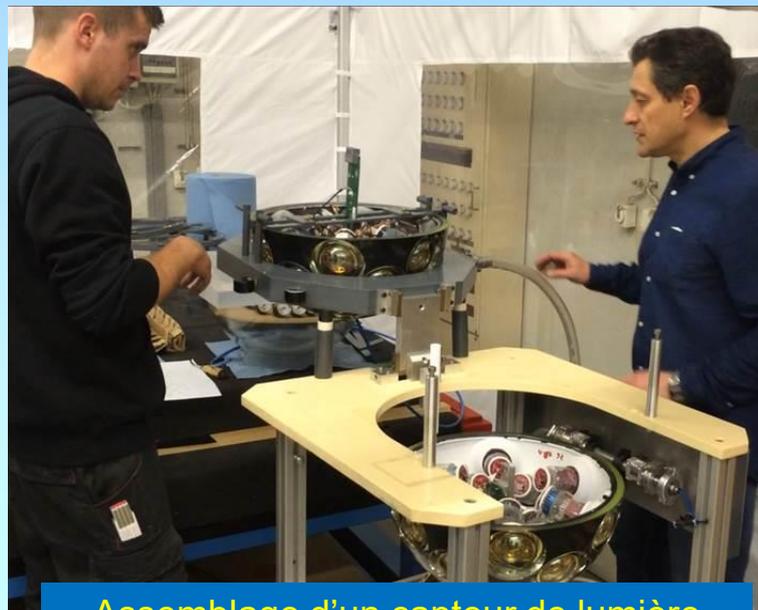
Dépliage autonome



Intégration DU au CPPM pour déploiement



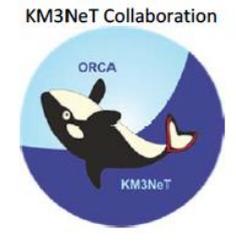
Calibration DU en salle noire au CPPM



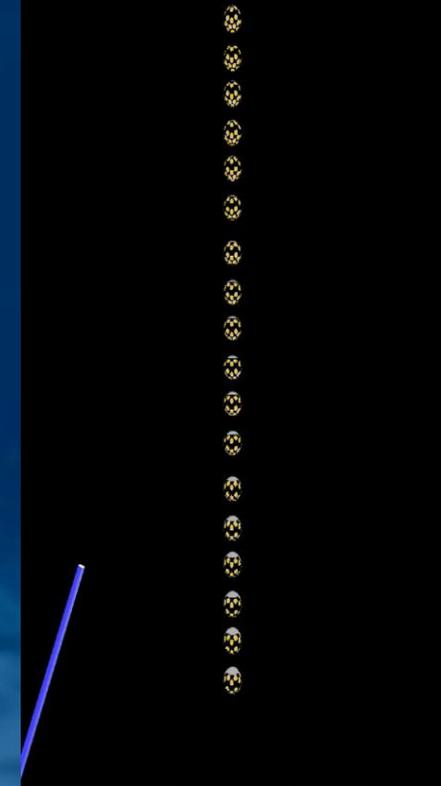
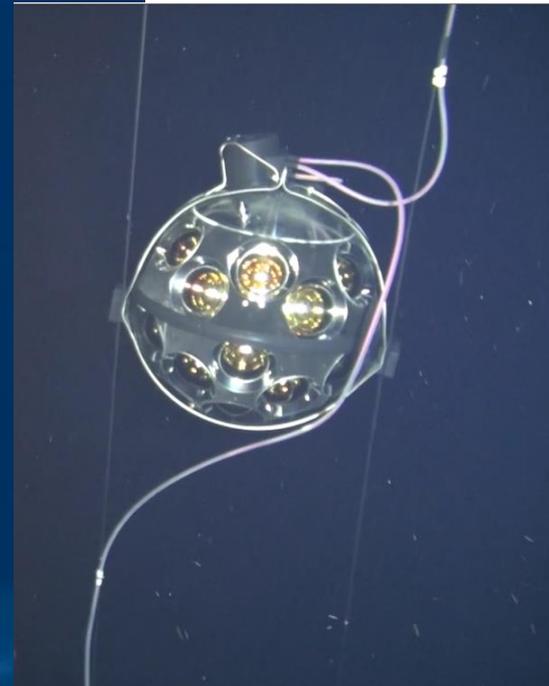
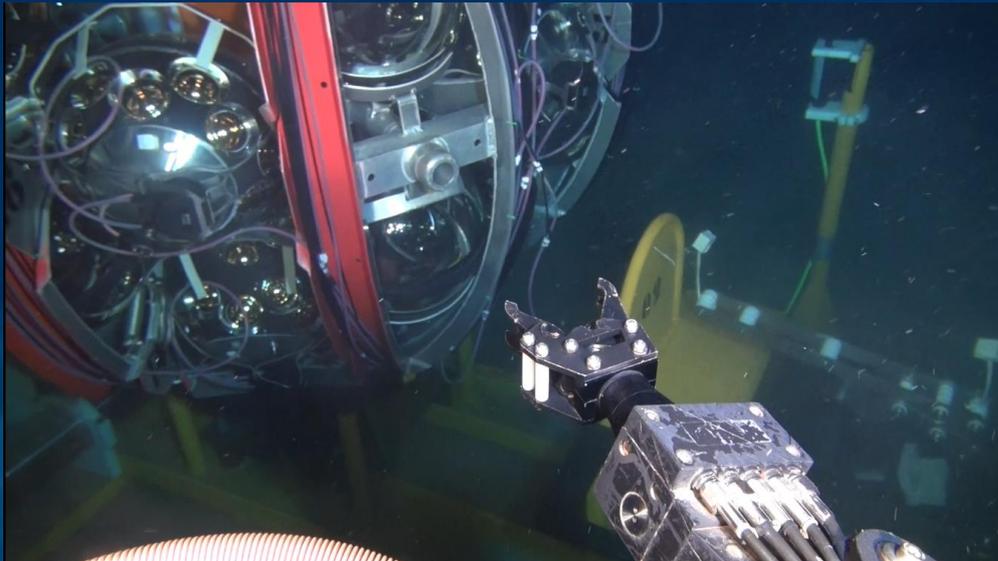
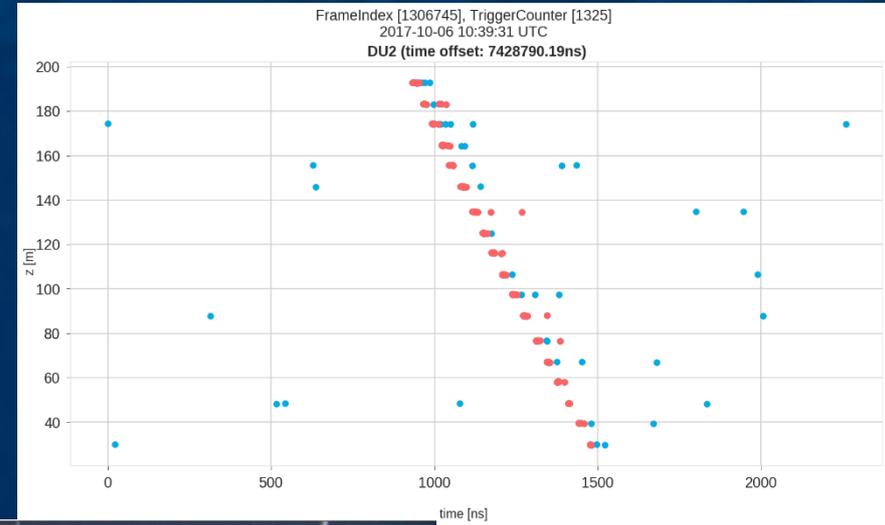
Assemblage d'un capteur de lumière



Tests du capteur de lumière



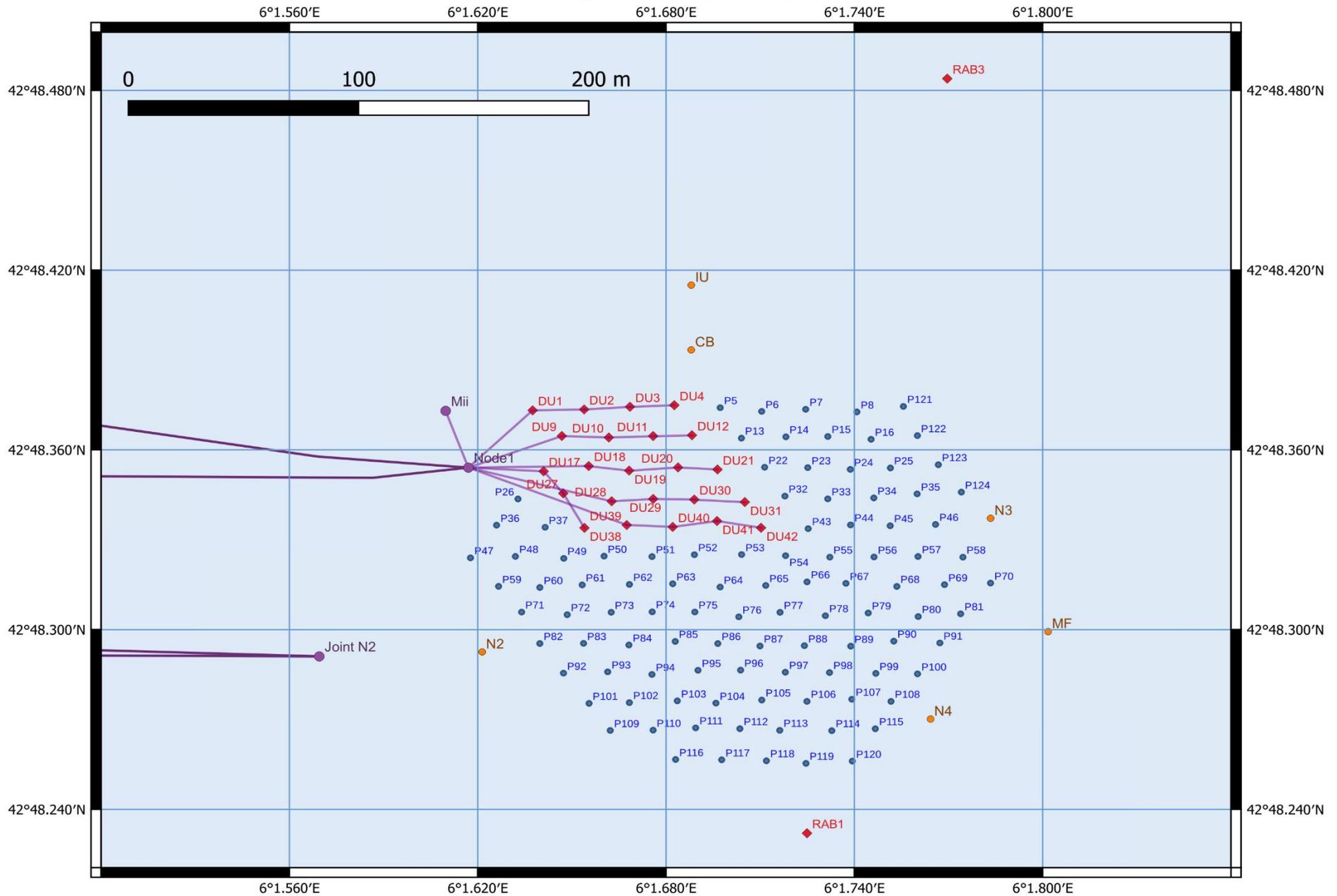
La première ligne KM3NeT-ORCA

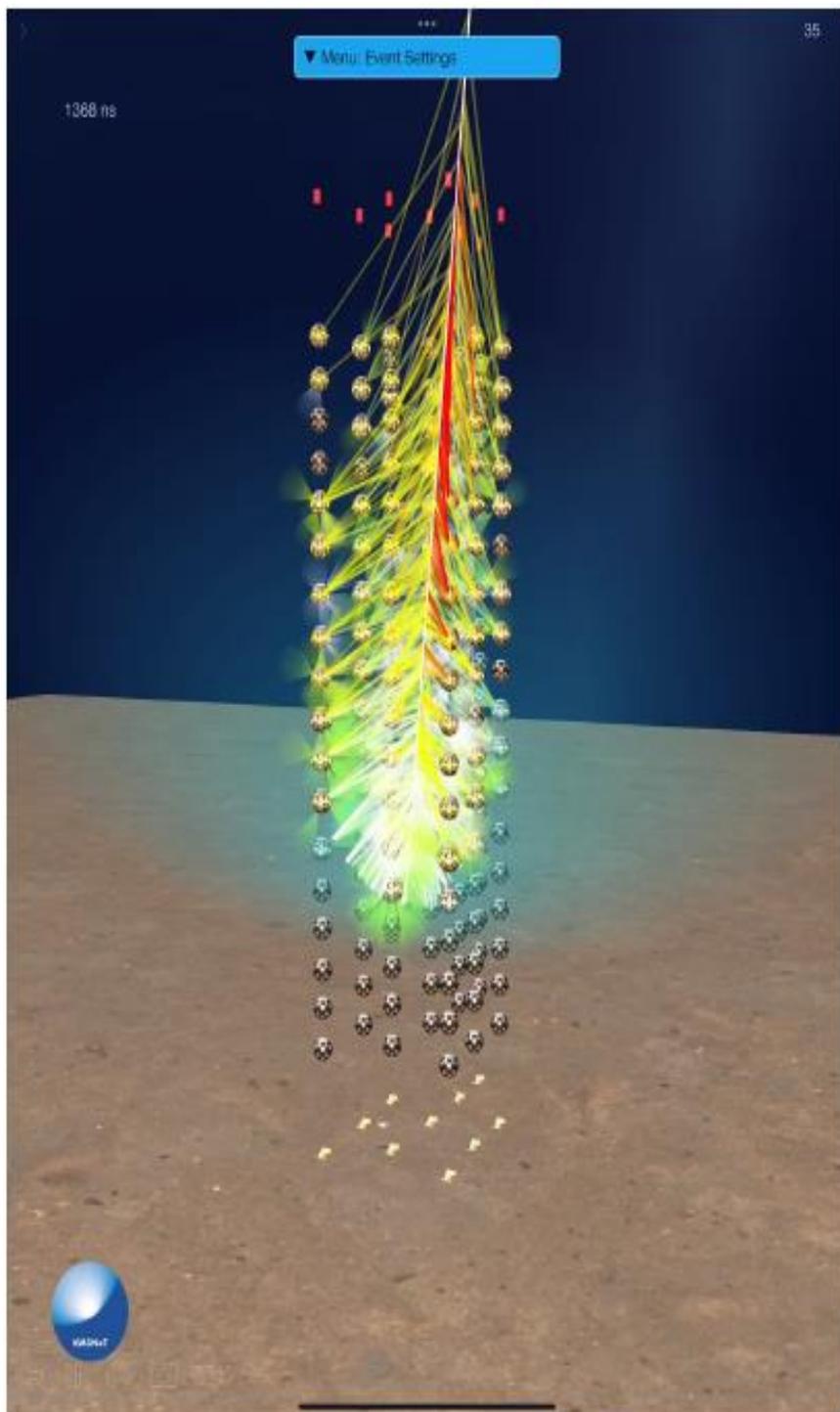


1^{ère} ligne mise en opération en 2017

Status de KM3NeT-ORCA : 23 lignes en opération

KM3NeT/ORCA Juin 2024





Statut et 1^{ers} Résultats

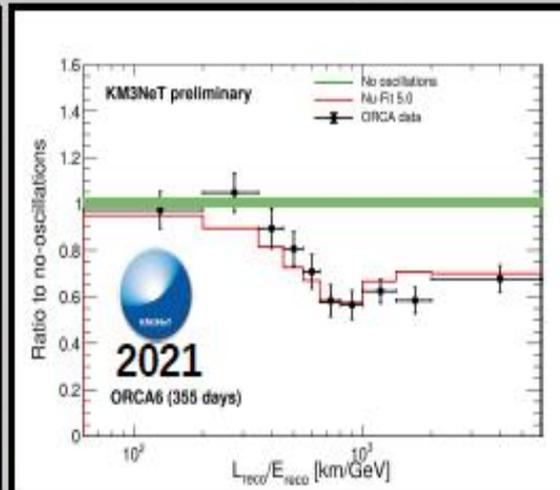
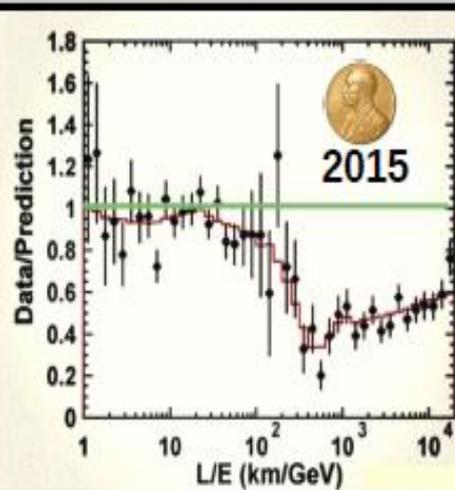
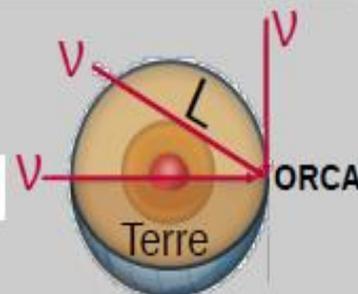
Les détecteurs sont en construction.

ORCA : 19 lignes / 115

ARCA : 28 lignes / 230

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

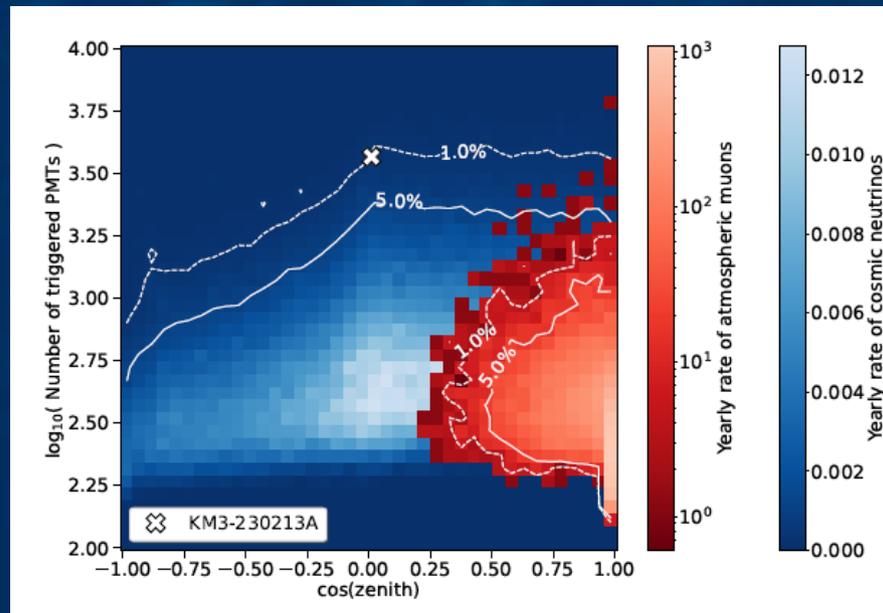
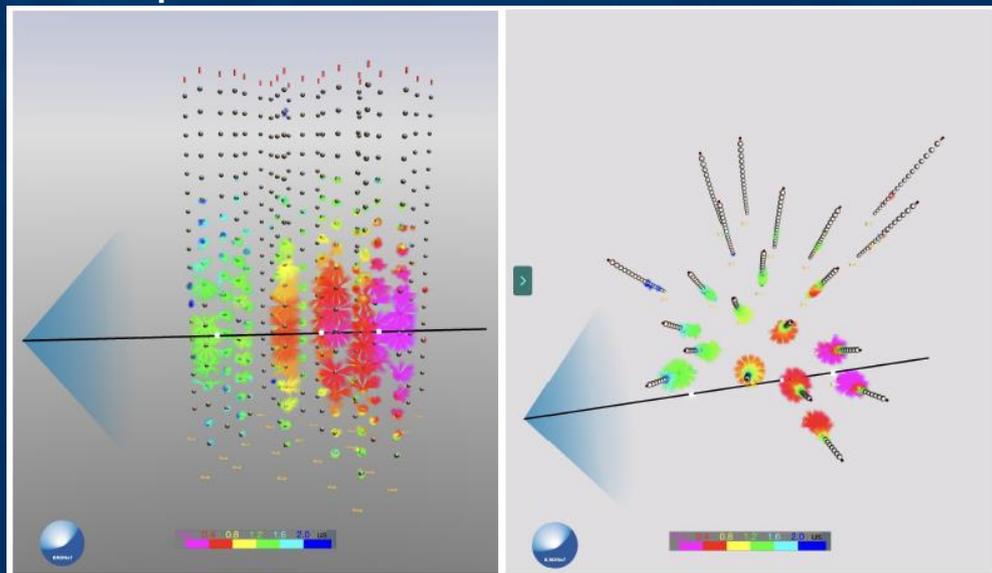
Les 6 premières lignes ORCA ont déjà permis d'observer les propriétés quantiques des neutrinos (Nobel 2015) !



Le Super-Neutrino du 13/02/2023

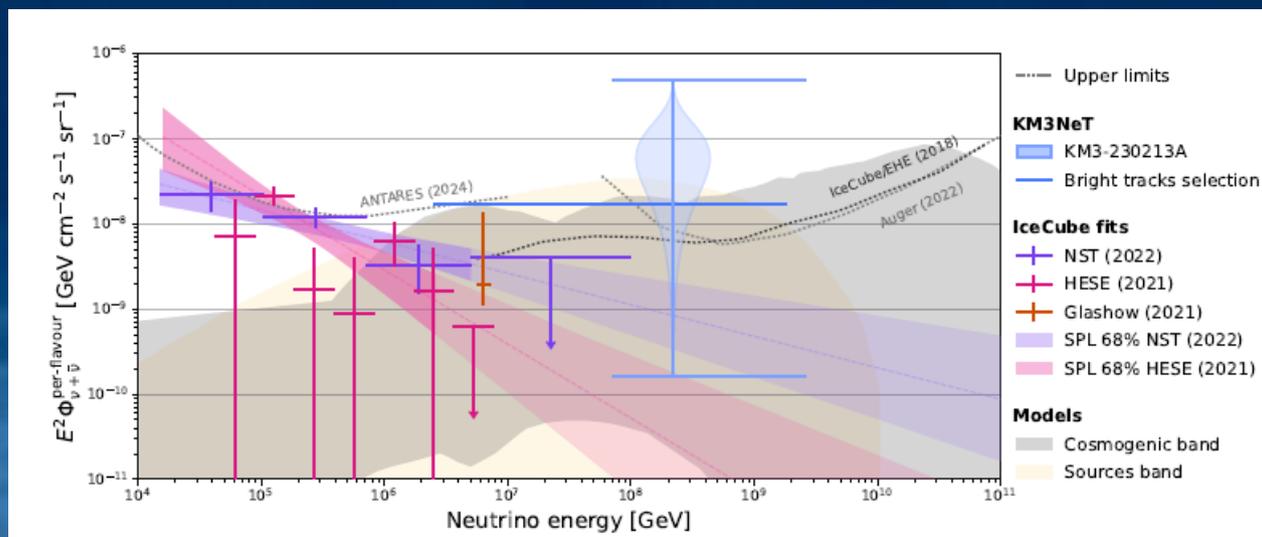


Enregistré avec ARCA21 :
~28000 photons détectés, > 1/3 PMTs activés



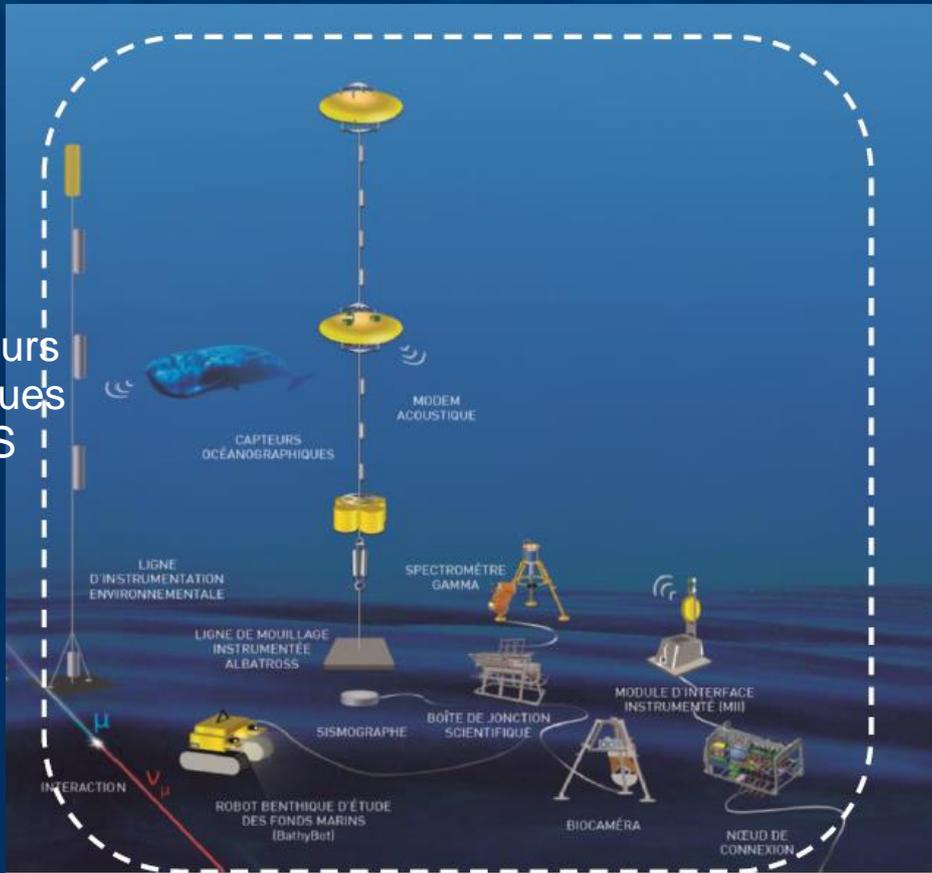
Evénement très exceptionnel :
nouvelle origine astrophysique à découvrir ?

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



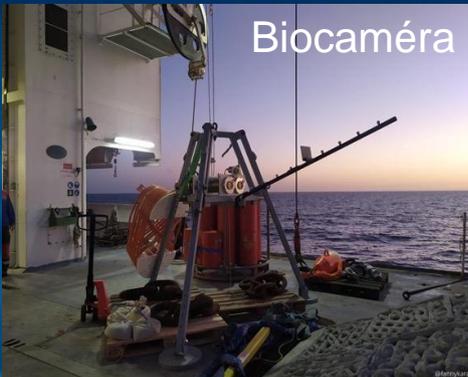
Un Observatoire Pluridisciplinaire en Mer Profonde

Ligne de capteurs
océanographiques
ALBATROSS

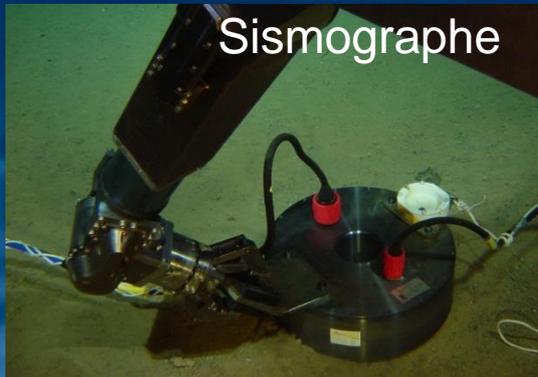


- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...

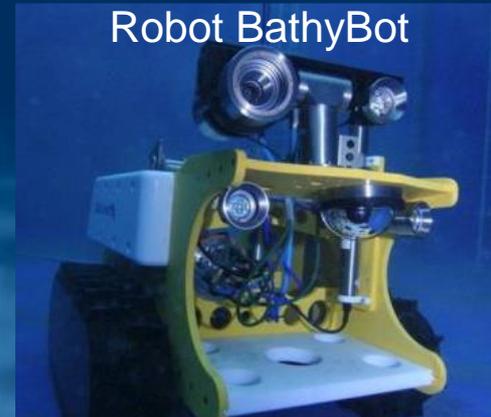
Biocaméra



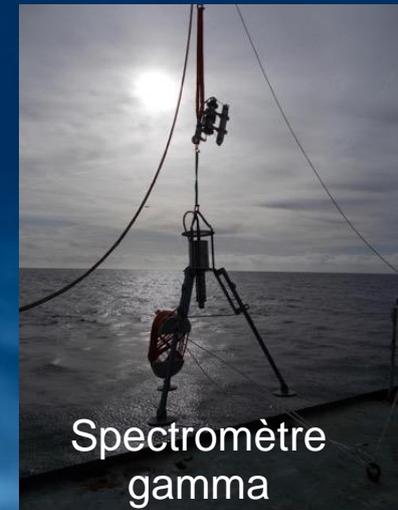
Sismographe



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