



ANTARES et KM3NeT

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

Vincent BERTIN

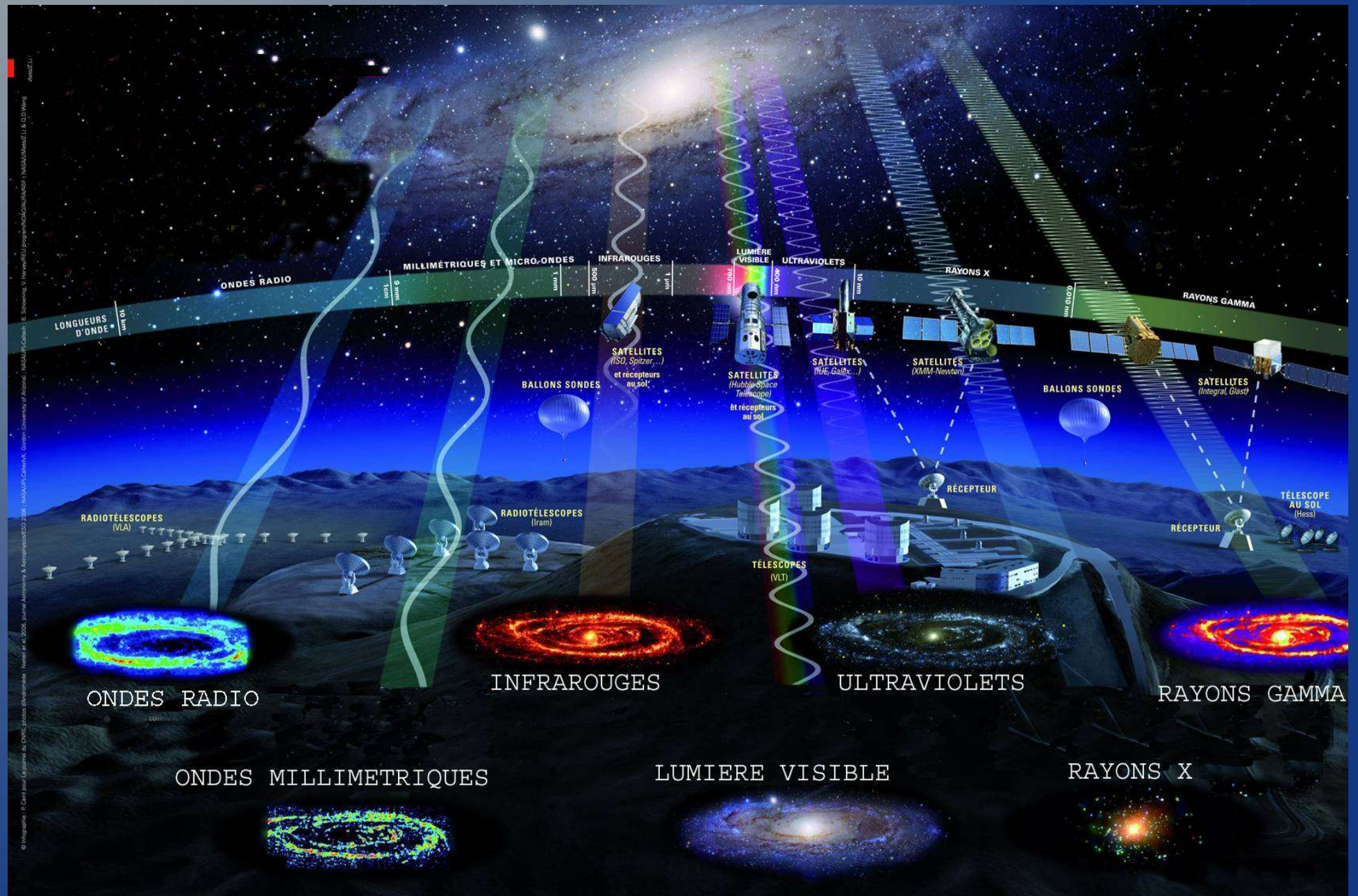
Centre de Physique des Particules de Marseille



Stagiaires 3e au CPPM – Décembre 2025



Astronomie multi-longueurs d'onde

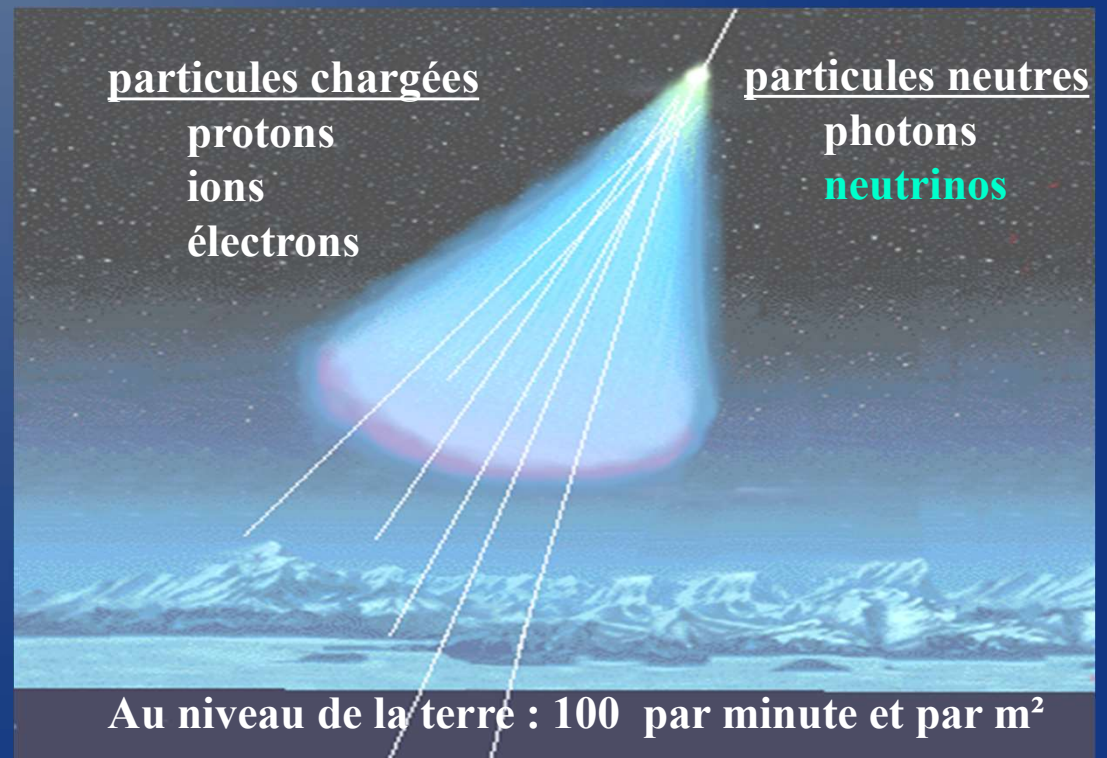


Les rayons cosmiques

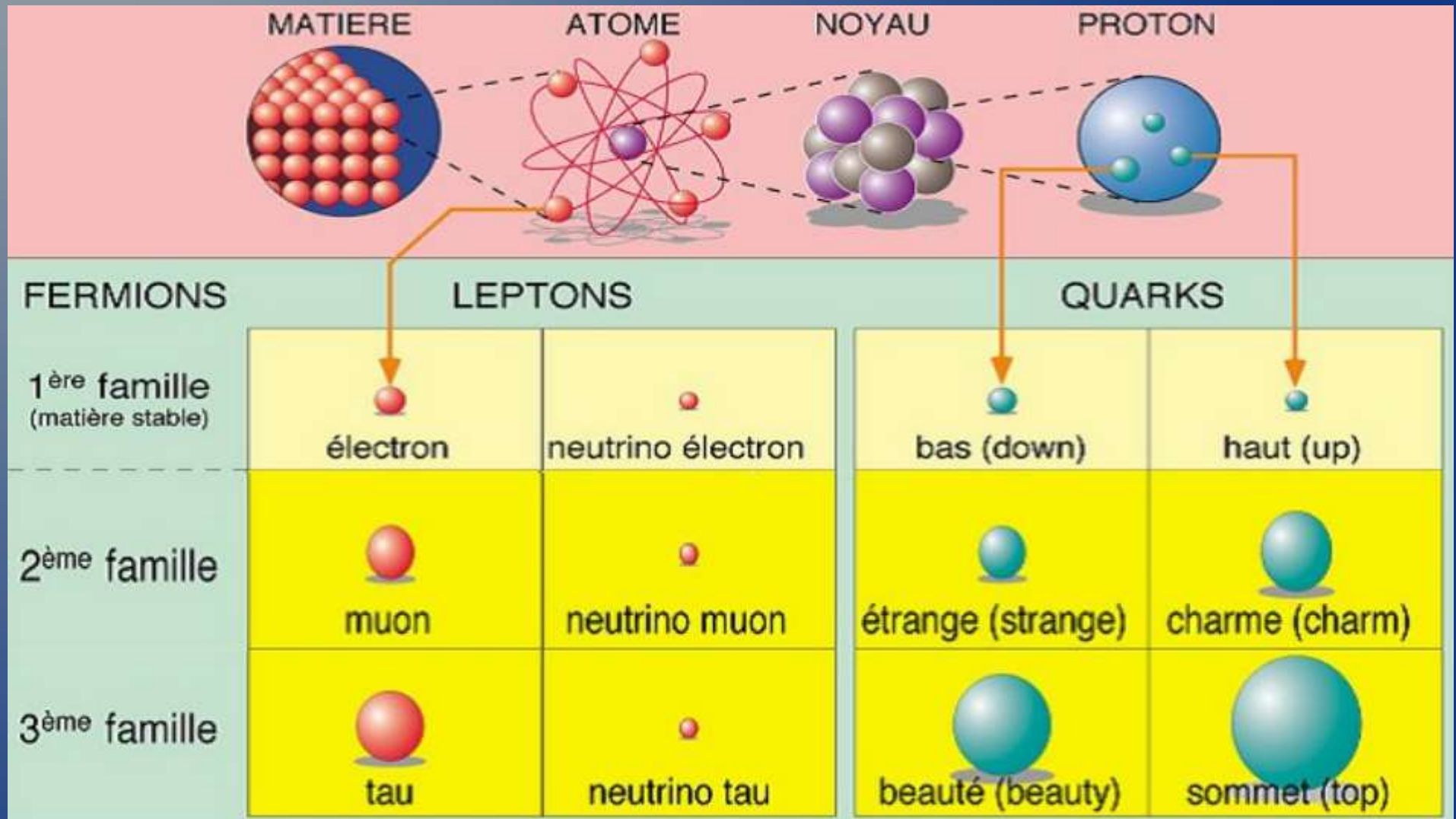


Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle par Victor Hess et on ne connaît toujours pas bien leur origine...

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:

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**

REPUBLICQUE FRANÇAISE

Mairie de

Commissariat de Police

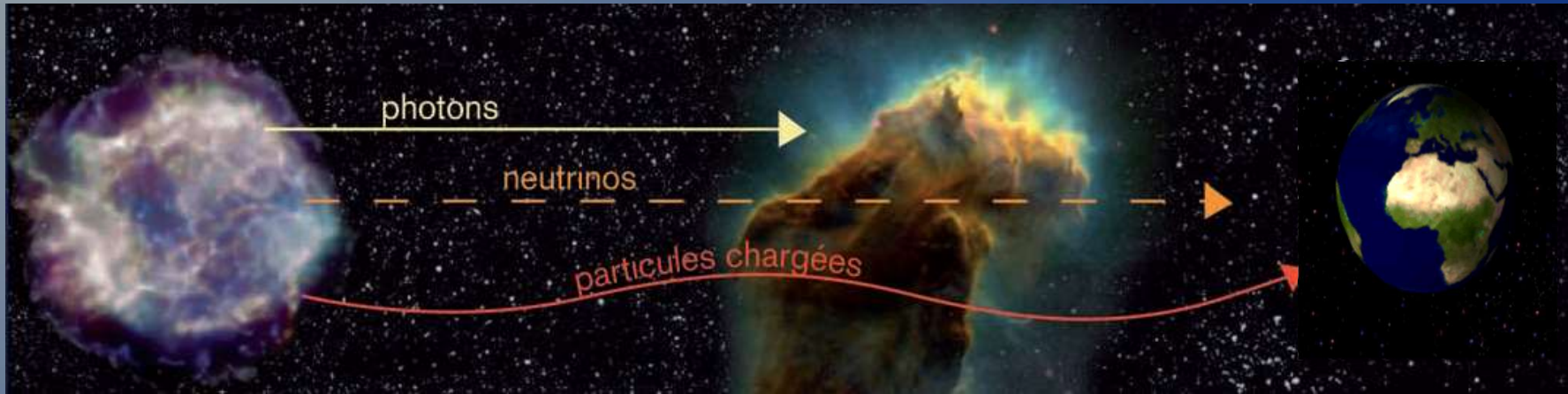
de

CARTE D'IDENTITÉ



AD 11 WITH GRADING 158 15. 02. 0000. 111111

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
- Interagit très faiblement \Rightarrow s'échappe des régions denses de l'Univers

Inconvénient :

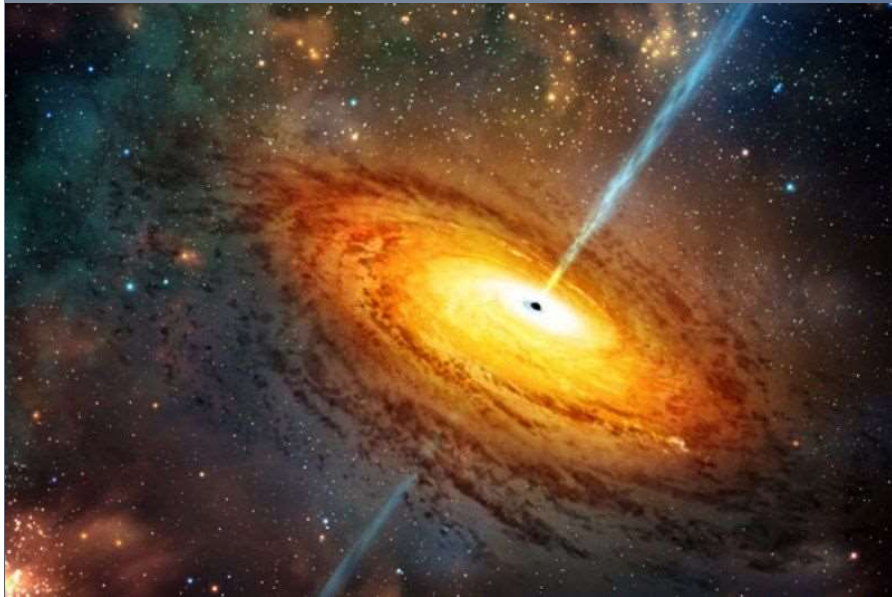
Sur 10 milliards de neutrinos provenant du Soleil et traversant la Terre, seul 1 va interagir !!!

\Rightarrow Nécessité d'un grand volume de détection

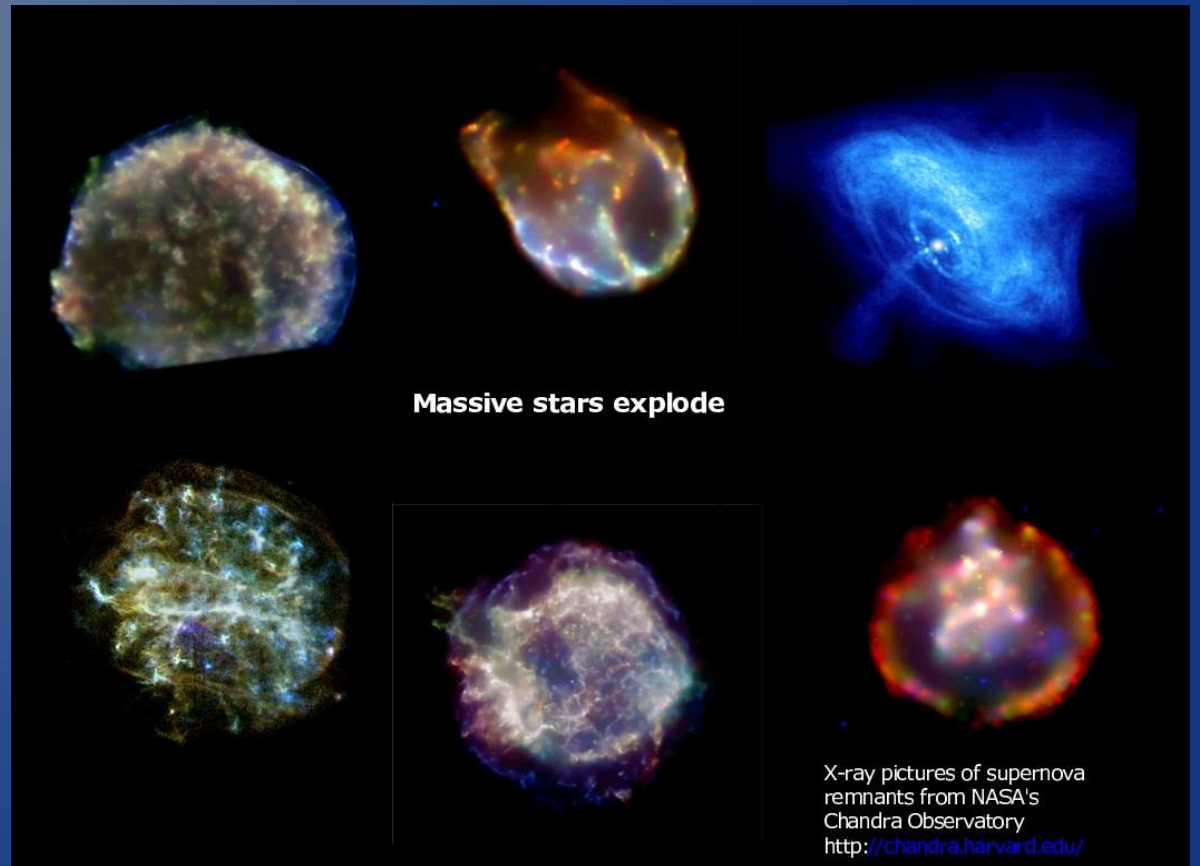
Sources potentielles : Supernovae, trous noirs

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

Explosions d'étoiles (Supernovae)



Trous noirs super-massifs
(Noyaux actifs de galaxies)



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...)

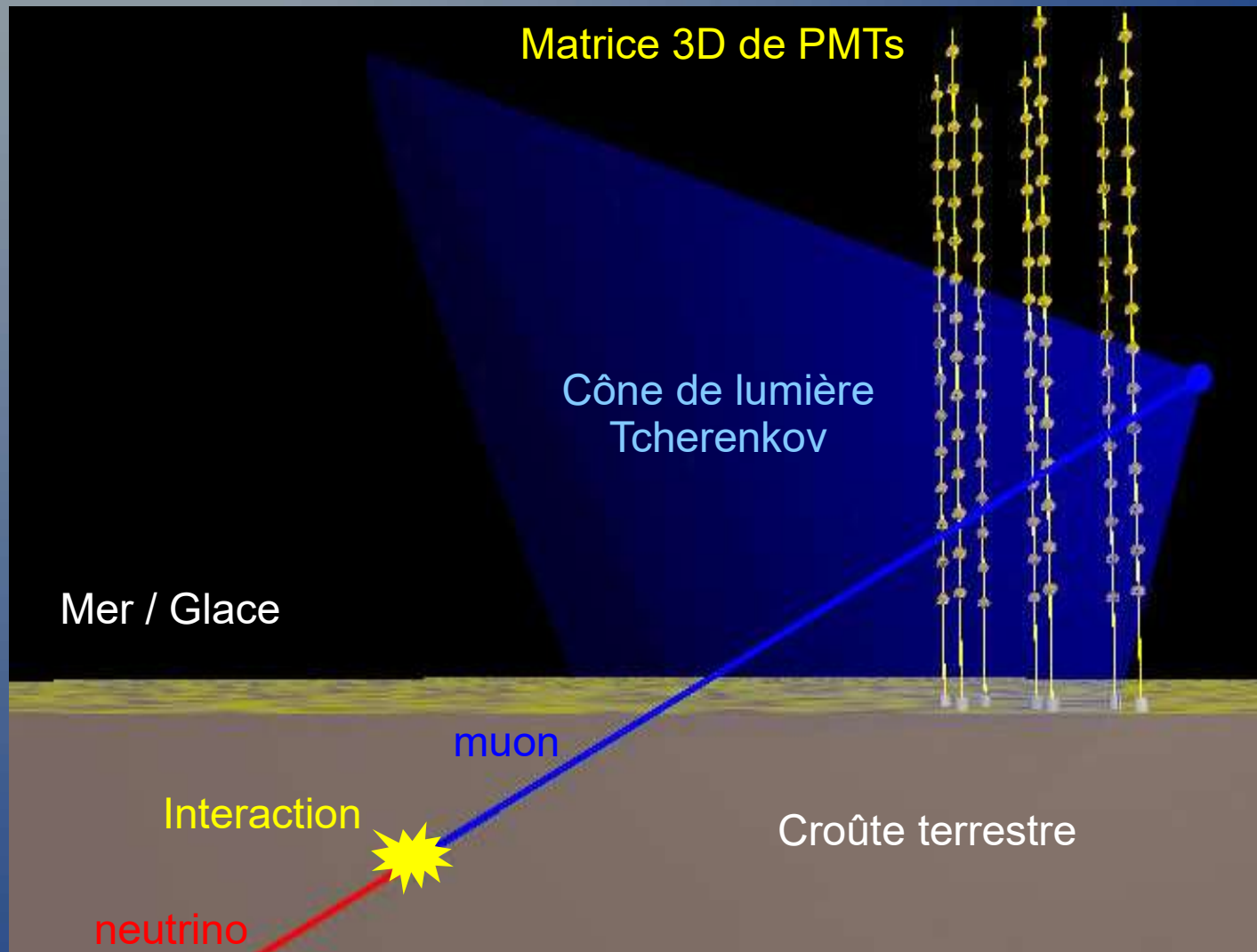
Un **neutrino** entre parfois en collision avec un noyau atomique



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 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 Télescopes à neutrinos dans le Monde

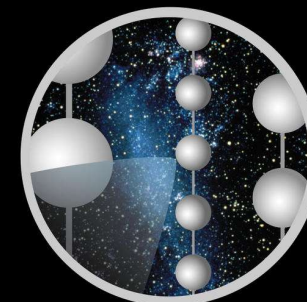
ANTARES & KM3NeT



BAIKAL

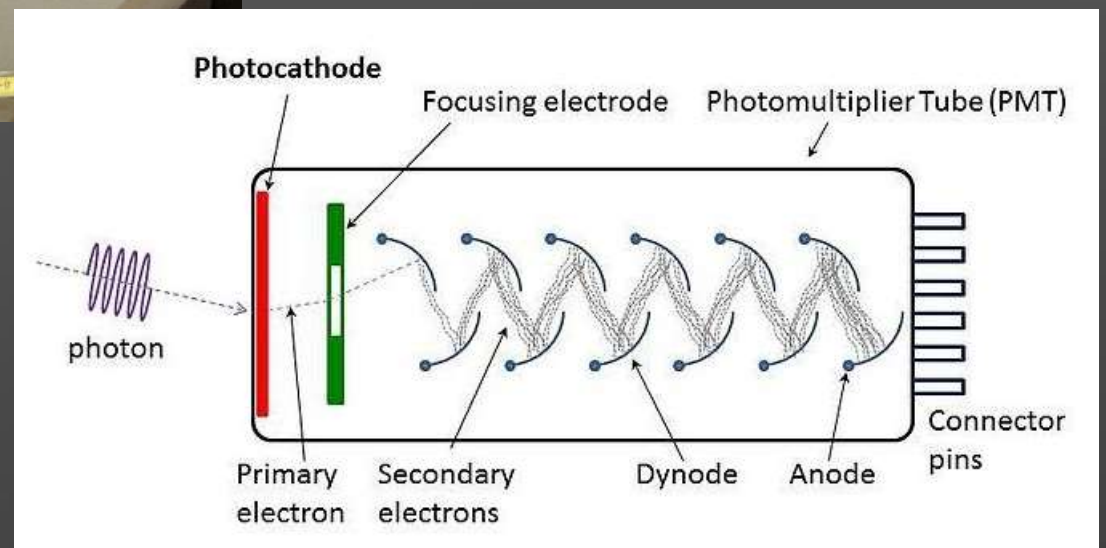


IceCube



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

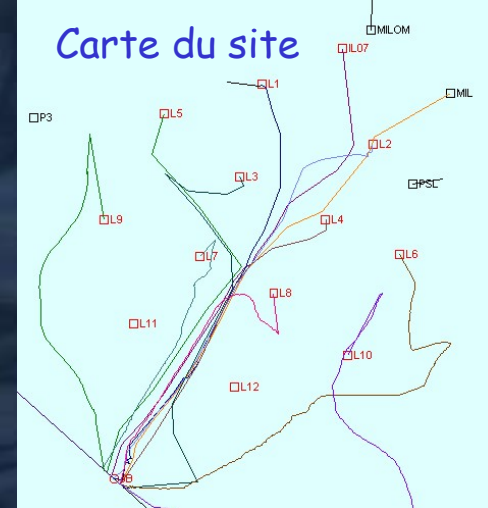
100 m

~60-75 m

Boîte de
Jonction

Câble
Electro-
optique

Carte du site

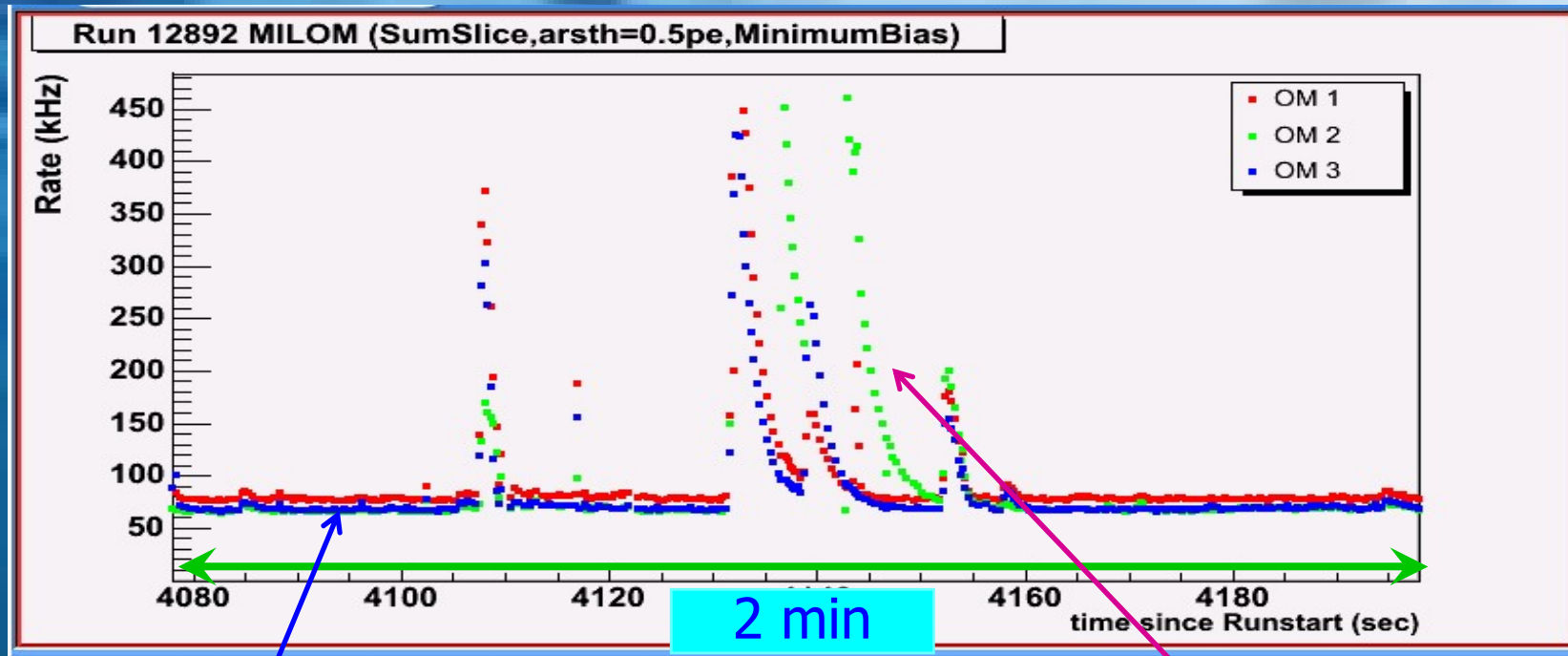


Profondeur : 2480m

Détecteur en opération entre 2006 et 2022

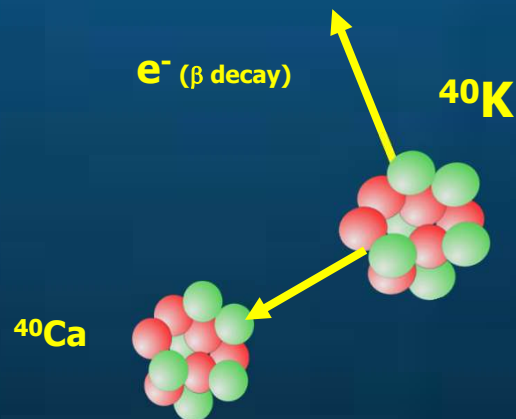


Taux de comptage d'un Module Optique



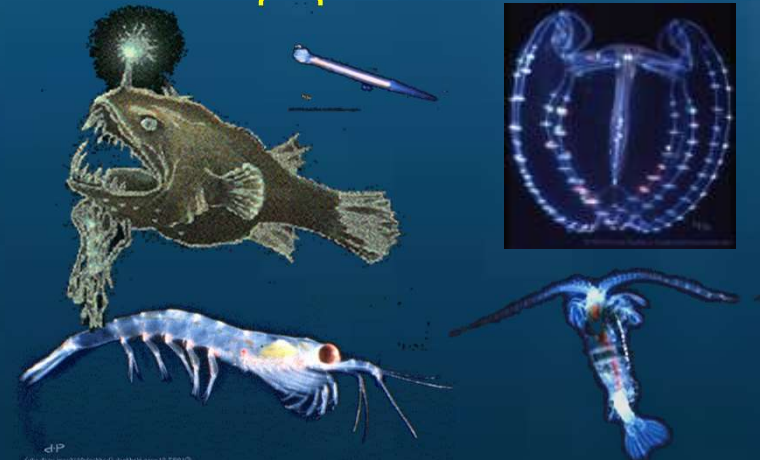
Ligne de base :

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



Bursts:

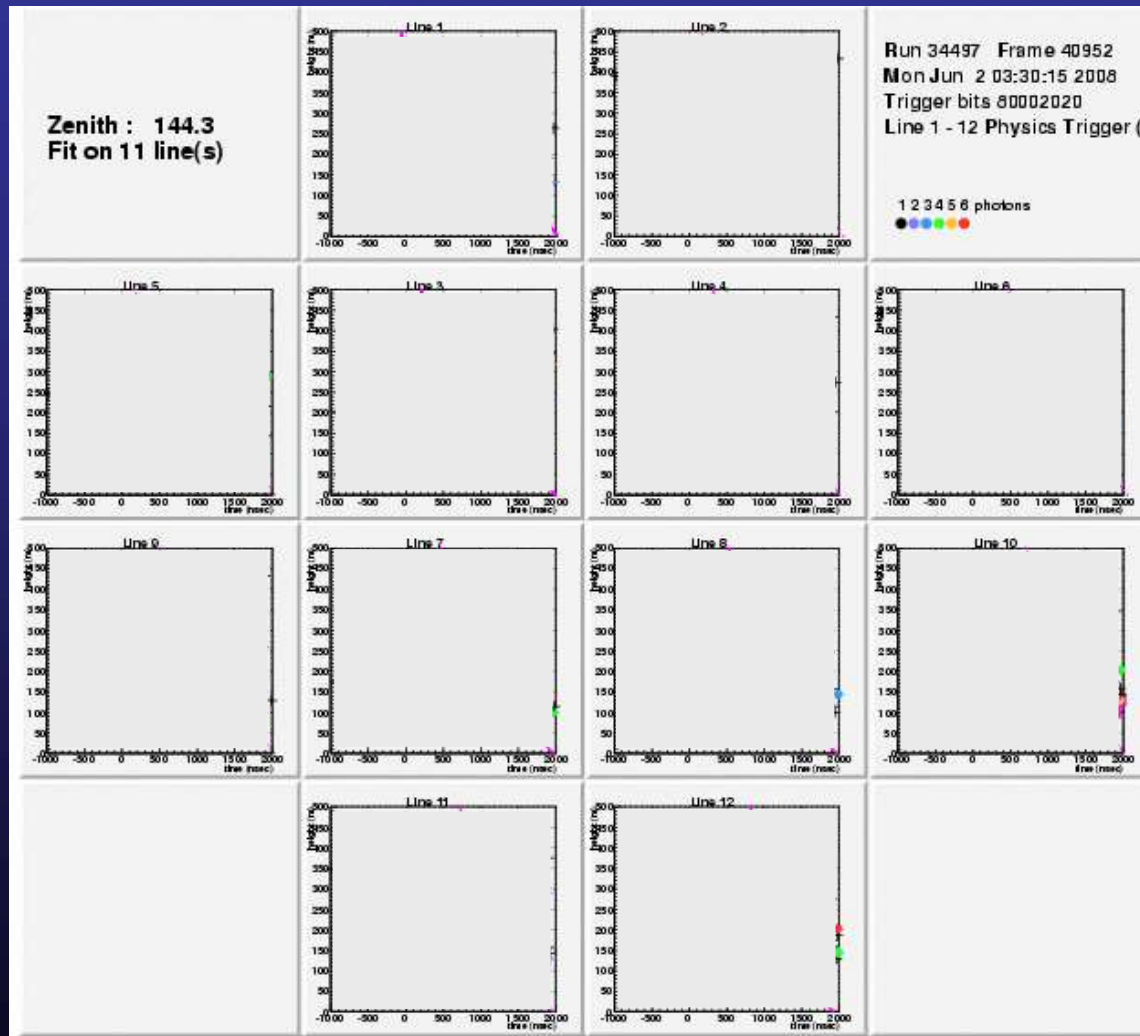
Bioluminescence d'organismes
macroscopiques





Exemple d'un événement « muon »

On en détecte quelques uns par seconde



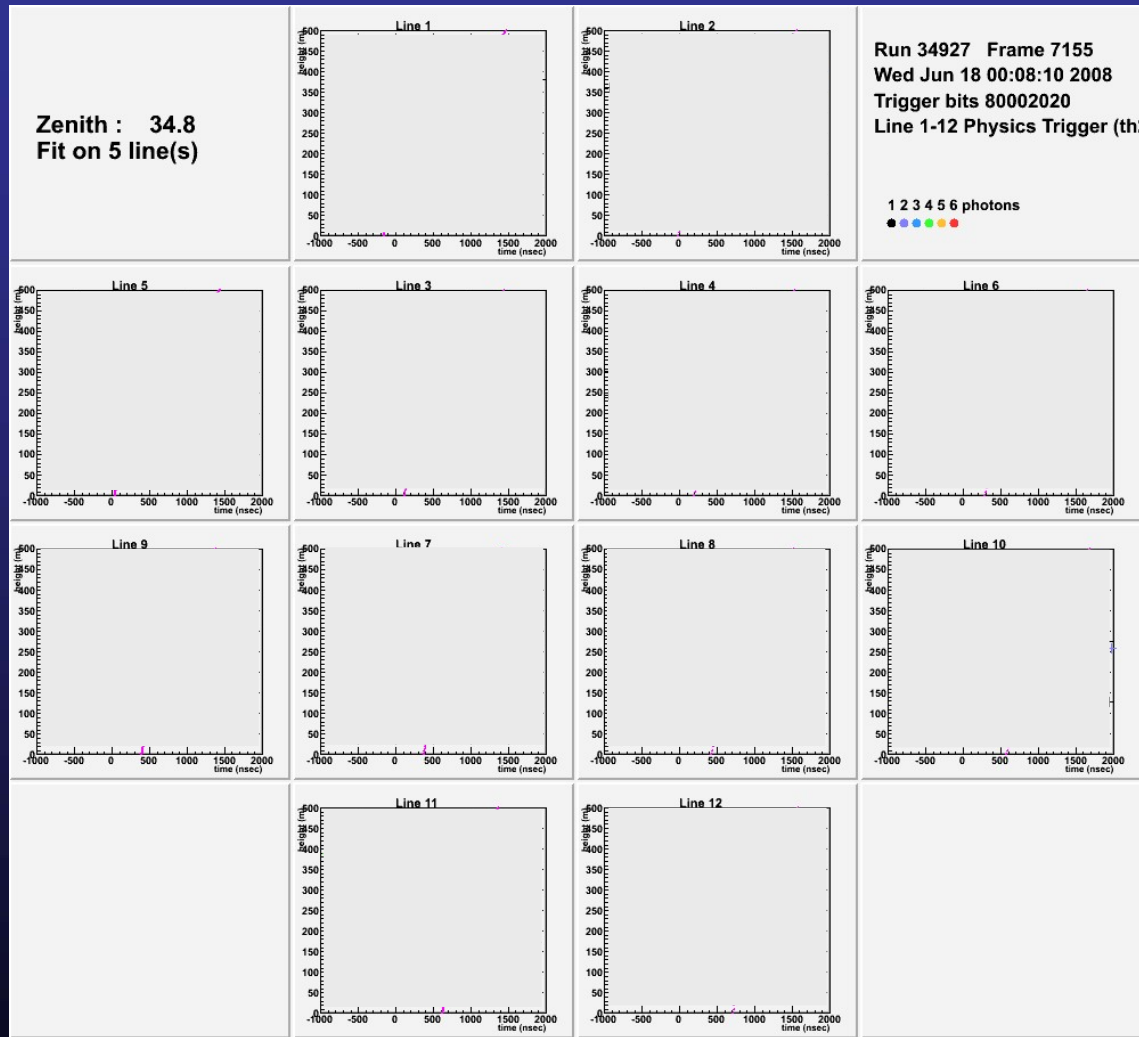
Example of a **down-going muon event**, détecté over the 12 detector lines



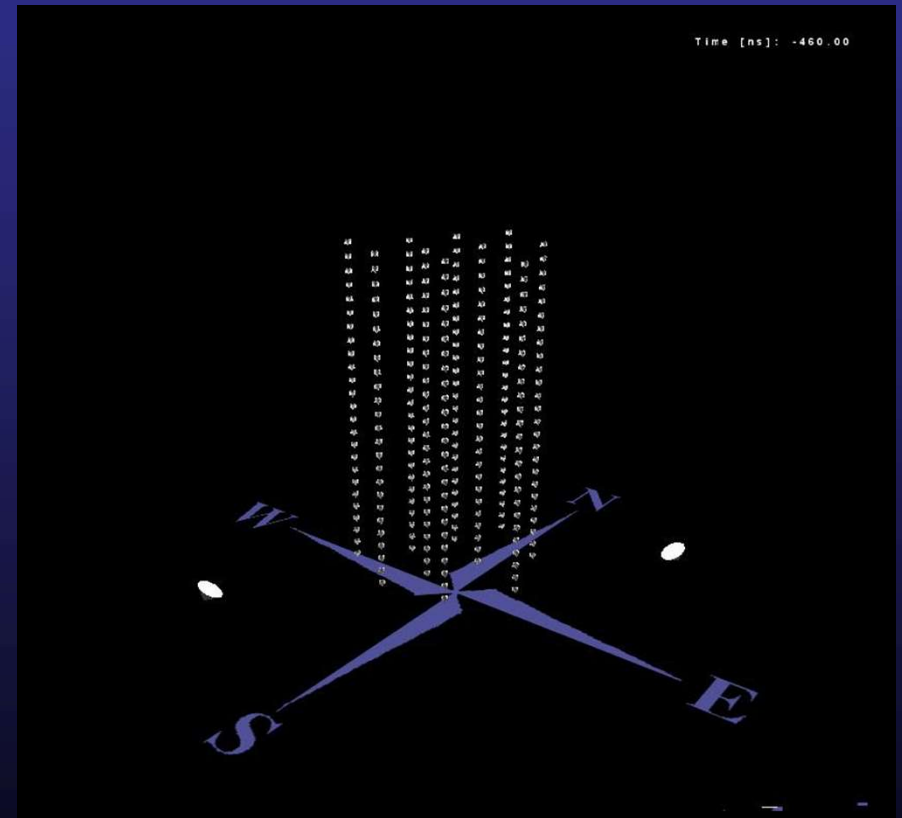


Exemple d'un événement « neutrino »

On en détecte quelques uns par jour



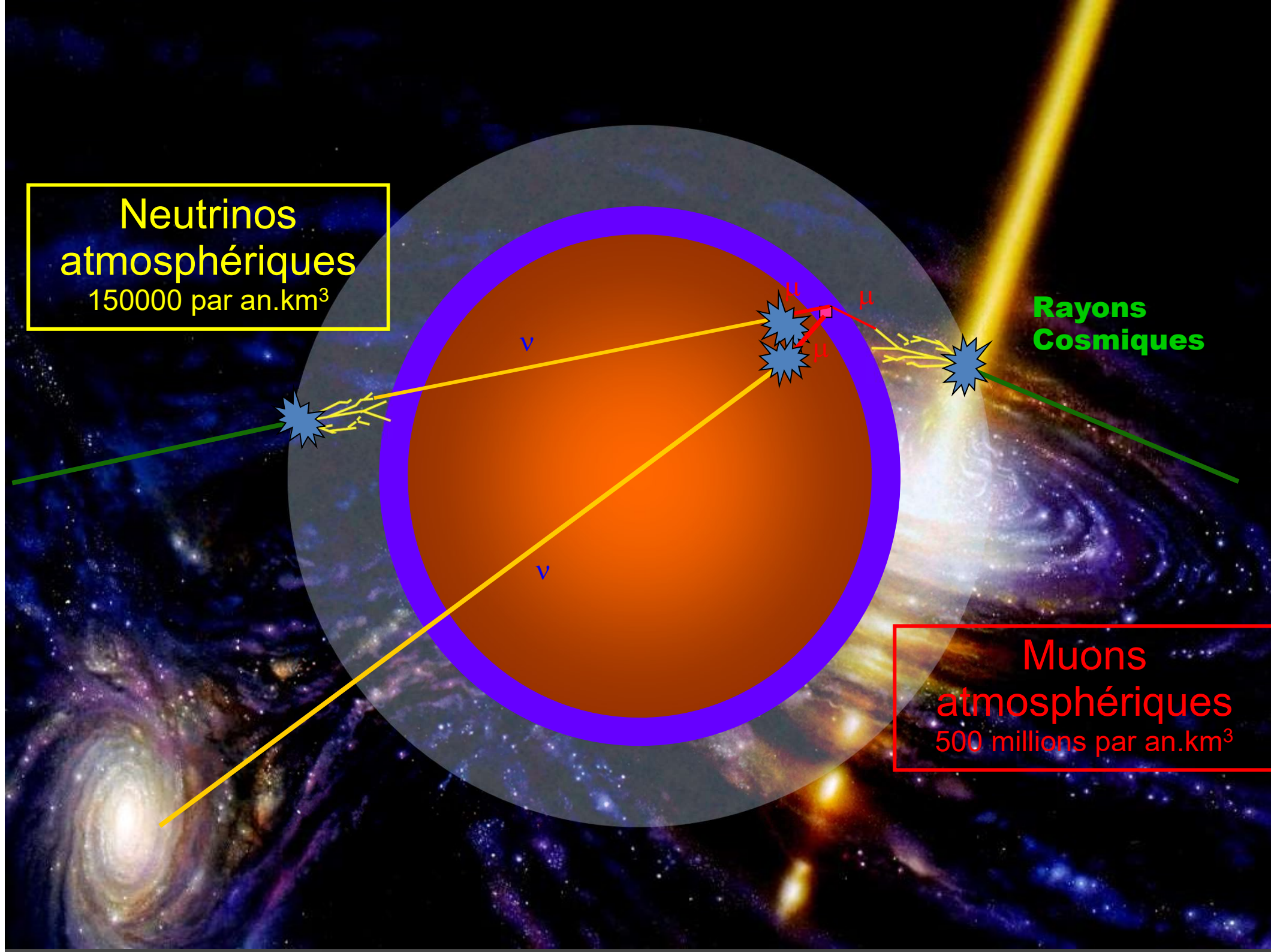
Example of an *up-going muon event* (i.e. a neutrino event) detected by 6/12 detector lines



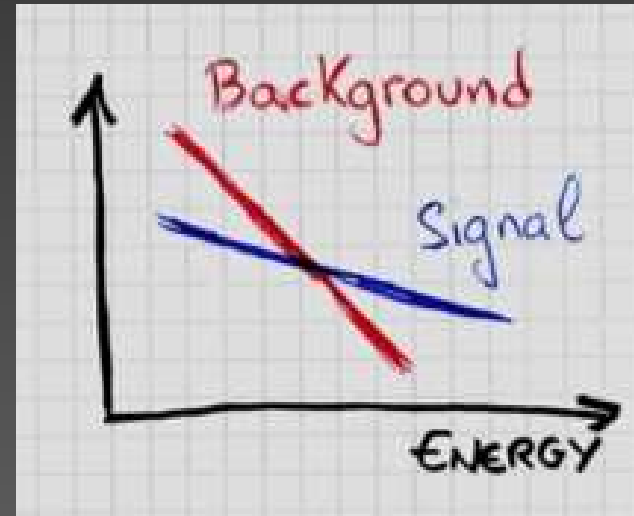
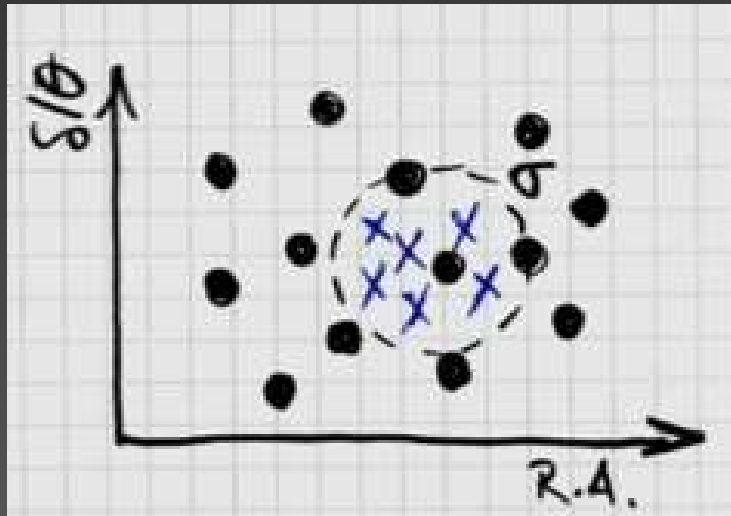
**Neutrinos
atmosphériques**
150000 par an.km³

**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

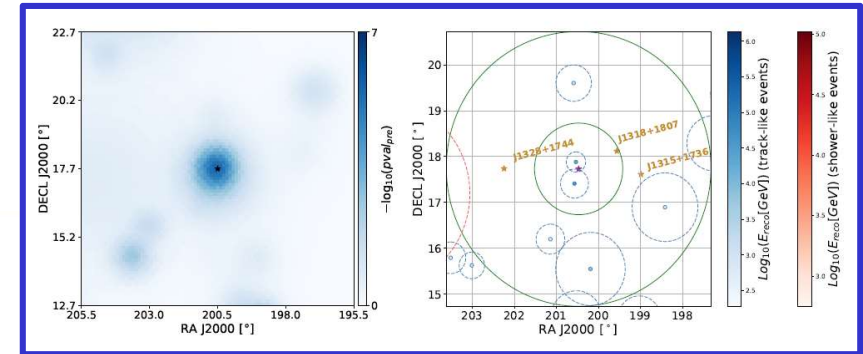
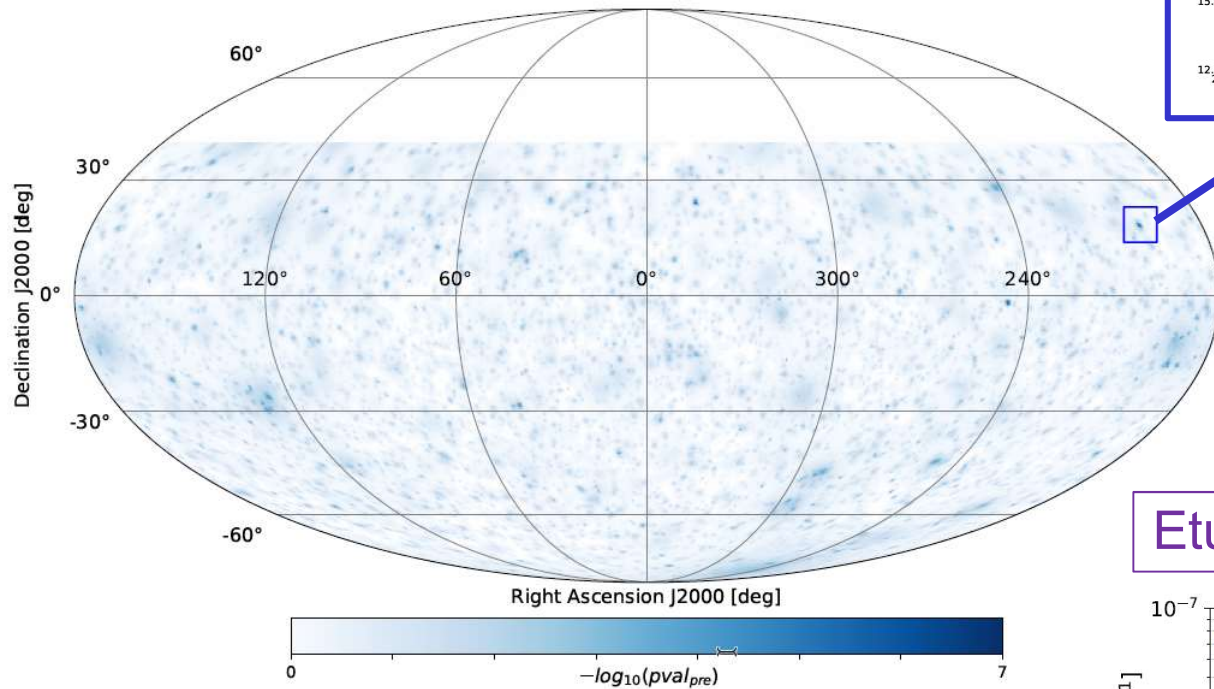


Flux diffus



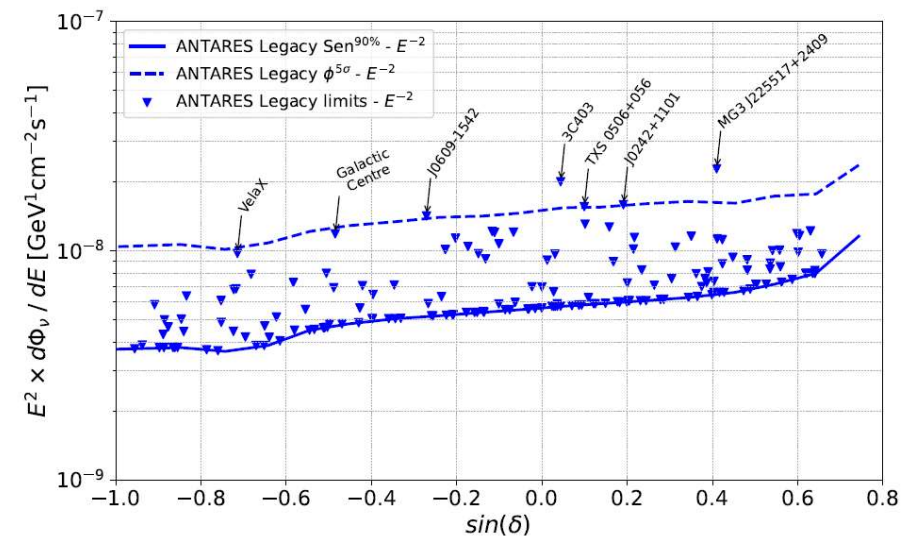
Le ciel en neutrinos vu avec ANTARES

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



Détail de l'excès maximal

Etude de 169 sources particulières



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

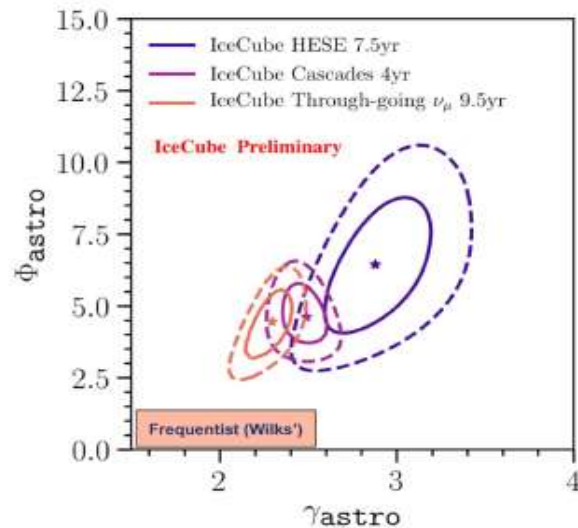
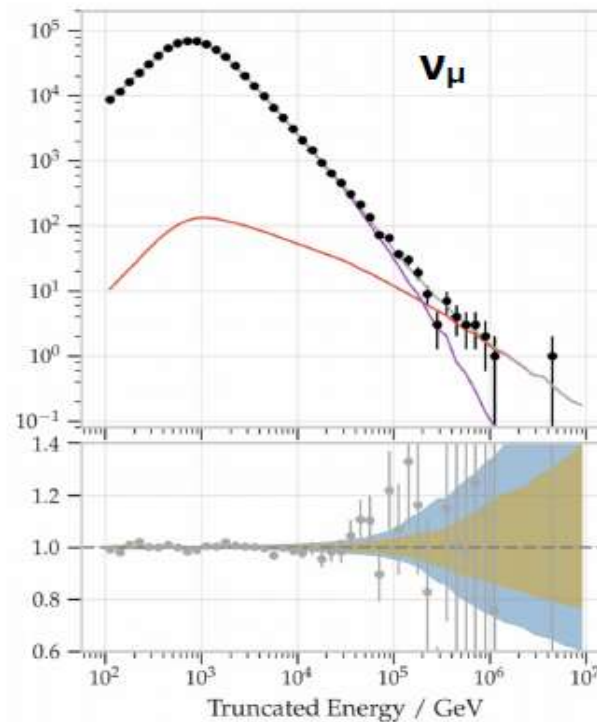
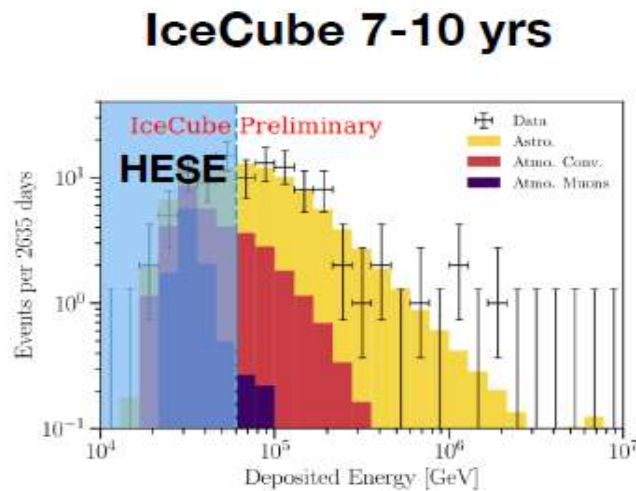
→ Pas d'excès significatif !



ANTARES Multi-Messengers Analyses

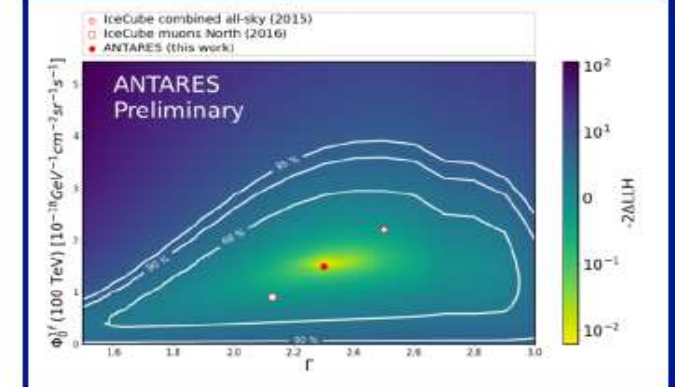
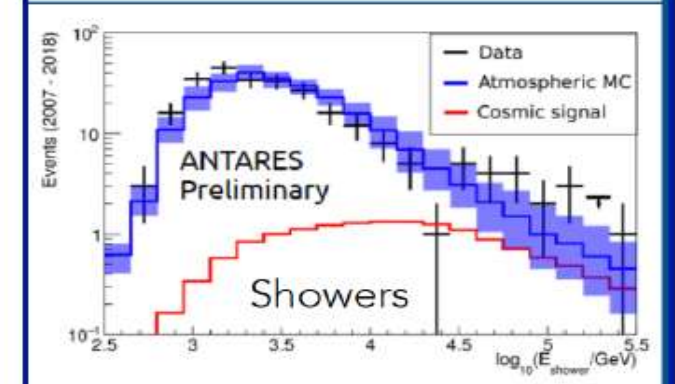
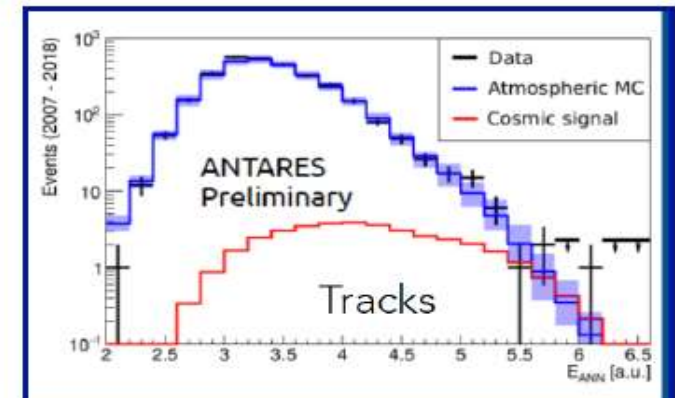


Un flux diffus de neutrinos cosmiques de haute énergie...



| 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

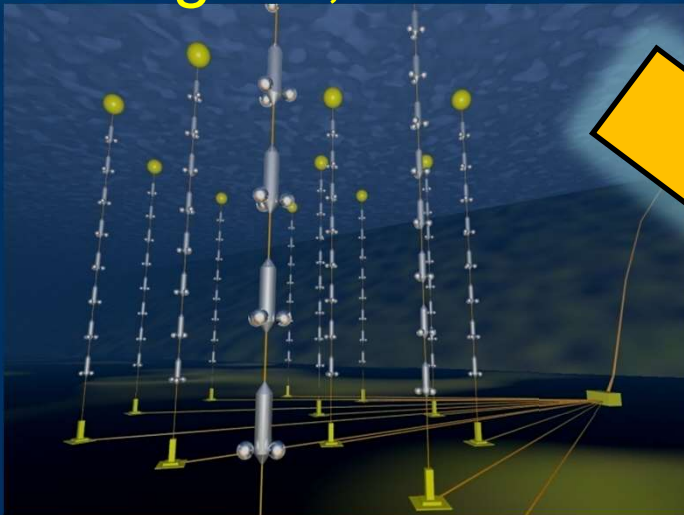


Flux très faible → doit être étudié avec un détecteur de taille multi-km³

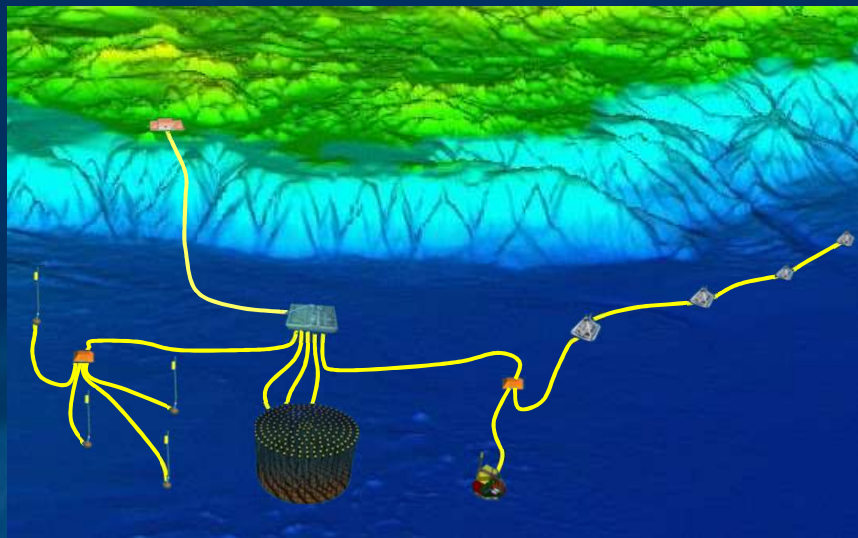
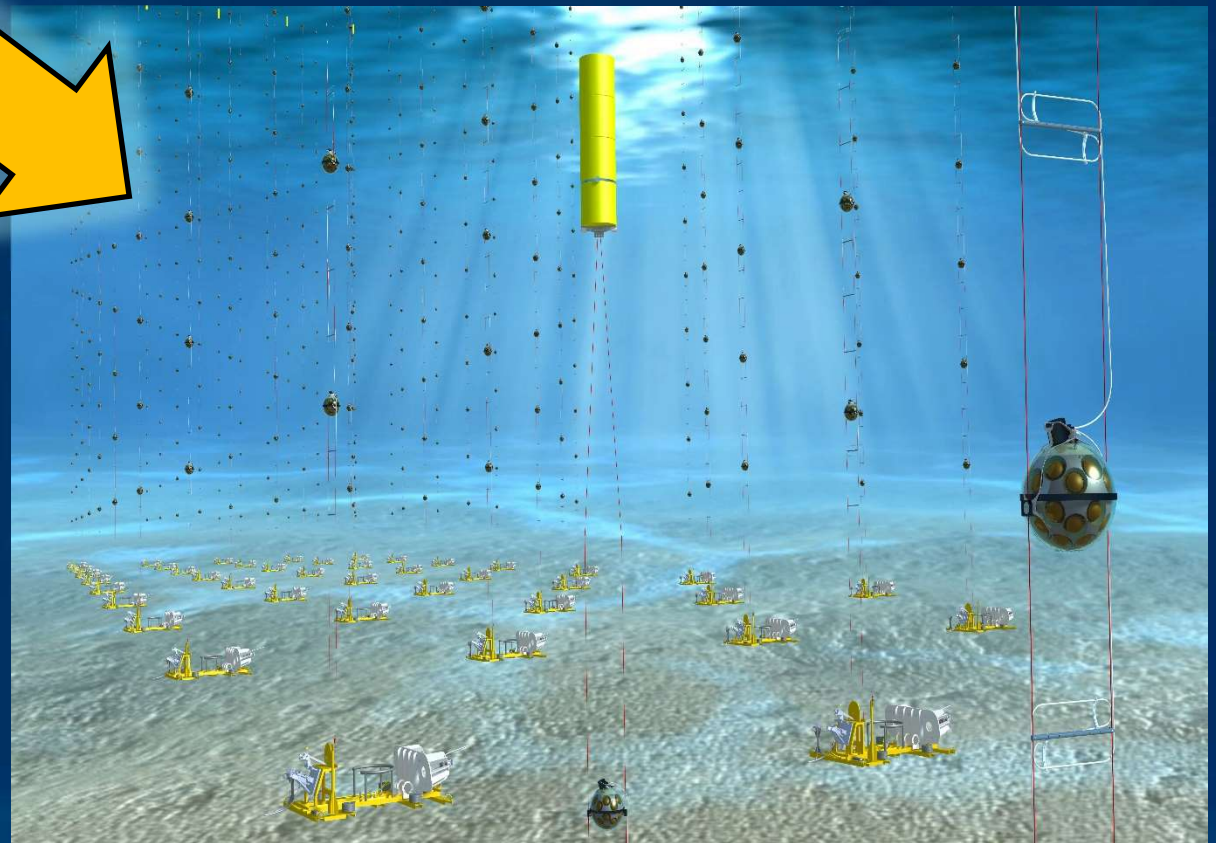


Le Télescope à neutrinos KM3NeT

12 lignes, 900 OMs

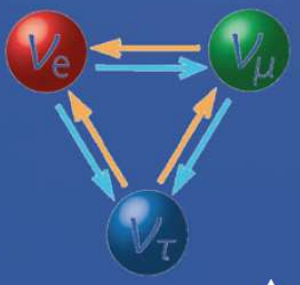


~350 lignes, ~6300 OMs

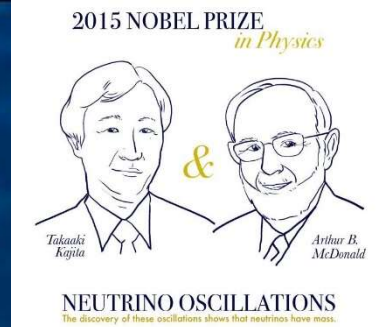


Observatoire multidisciplinaire
permanent en mer profonde

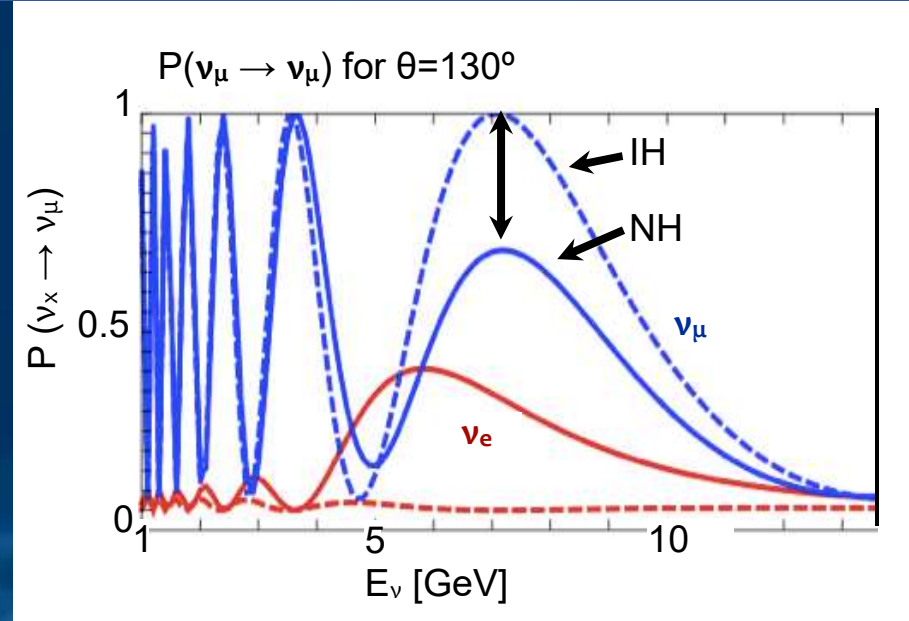
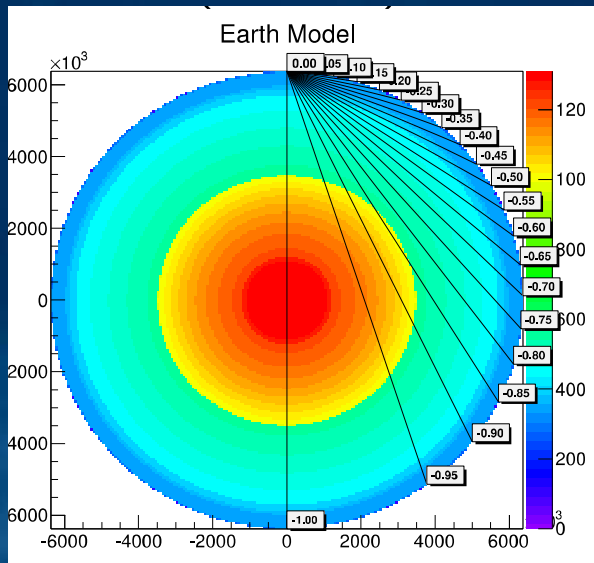
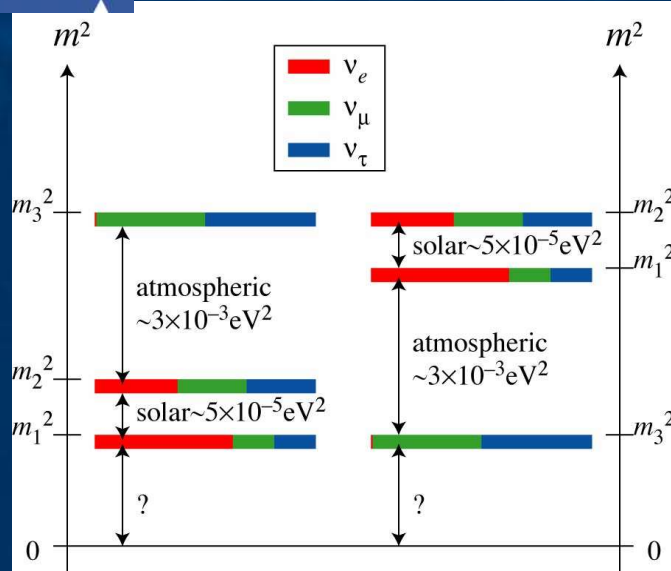
Détecteur installé sur 2 sites profonds
en Mer Méditerranée au large de
Toulon (France) et Sicile



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

Cities and Sites of KM3NeT



La Collaboration KM3NeT



ORCA, pour l'étude des propriétés quantiques des neutrinos



ARCA, pour l'astronomie neutrino



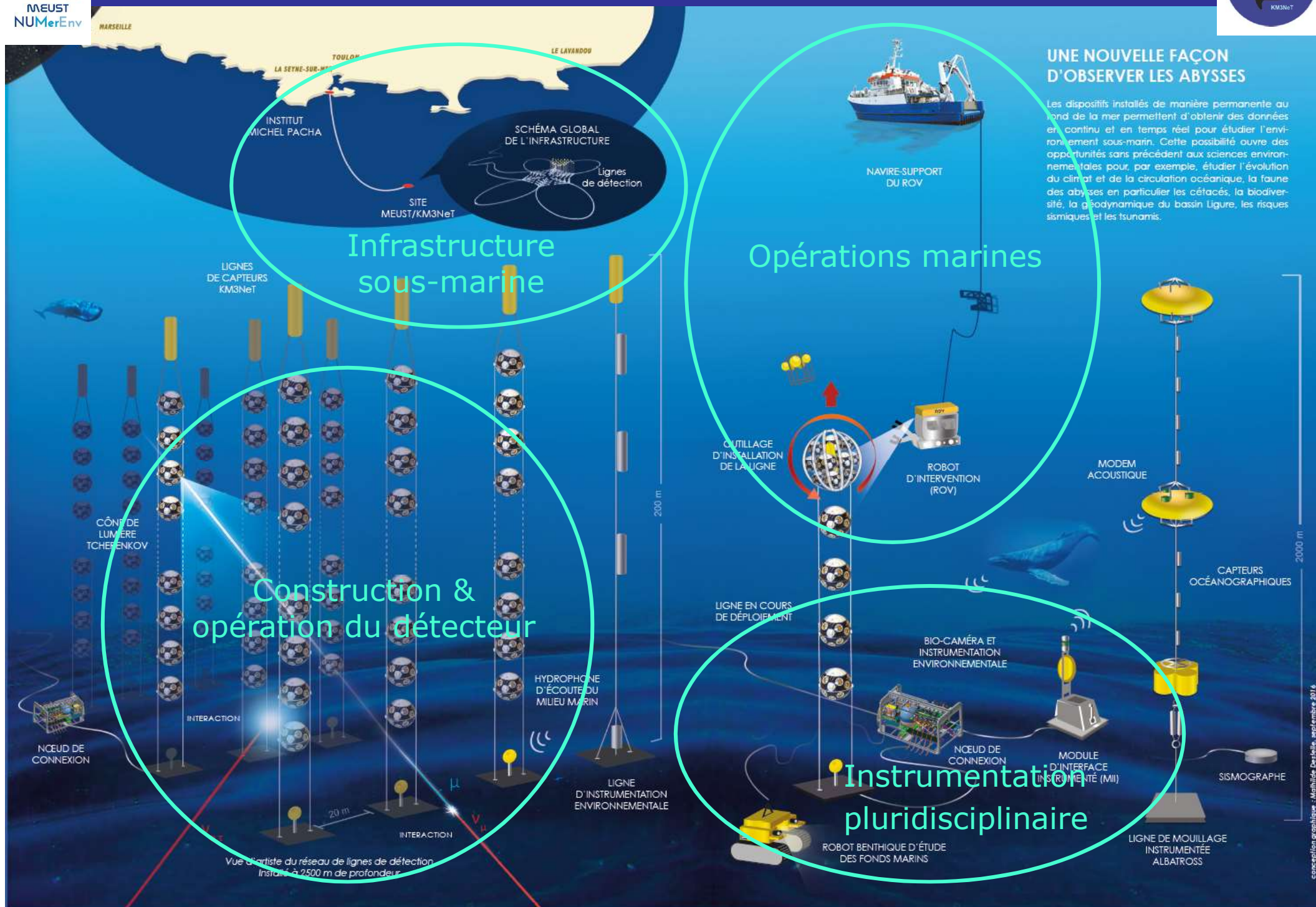
Une technologie, deux détecteurs

Une collaboration internationale

17 Pays

53 Instituts

250 Scientifiques



Plage des Sablettes,
La Seyne-sur-Mer

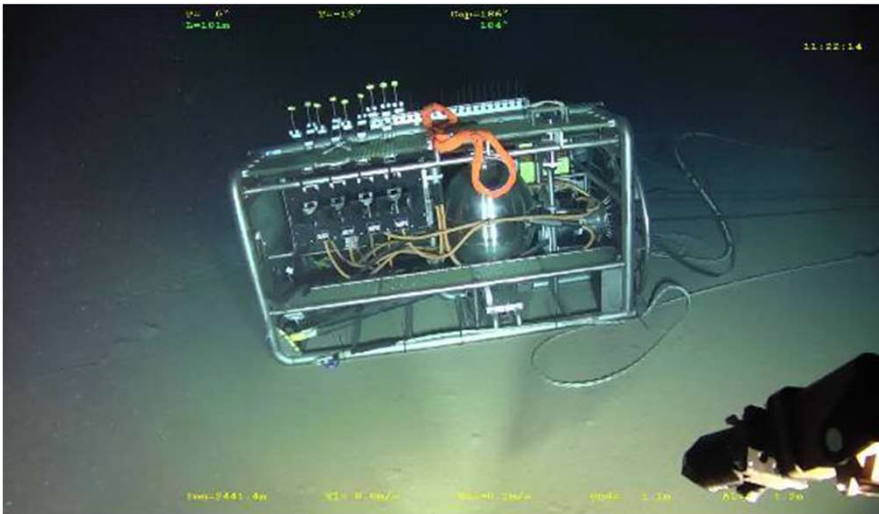


Longueur 40 km,
36 fibres optiques,
1 conducteur (3400 VAC)

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

Les premiers nœuds de connexion

Noeud 1 : déployé 10/2018

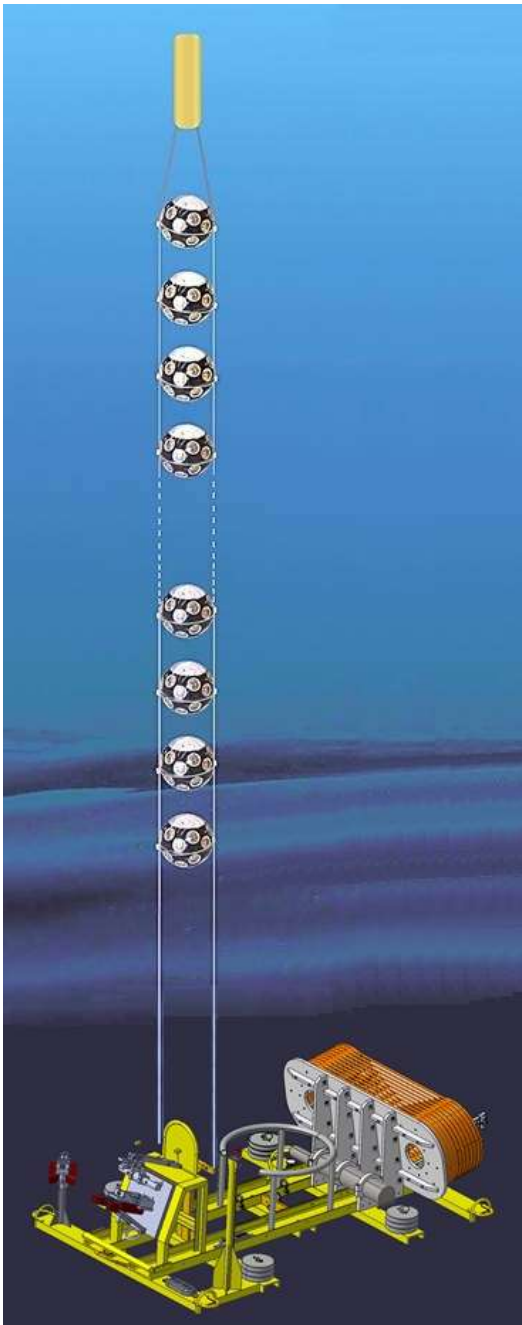


Noeud 2 : déployé 10/2020





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)



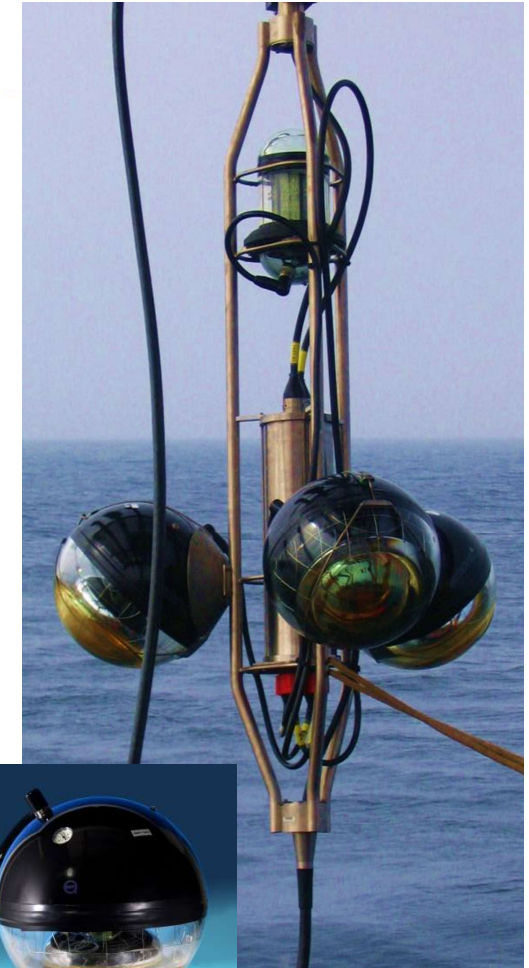
Photomultiplicateurs 3"
Hamamatsu



← ~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



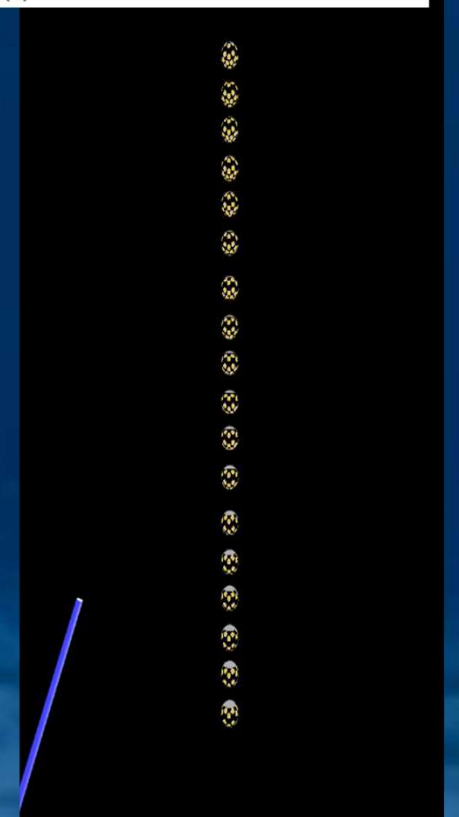
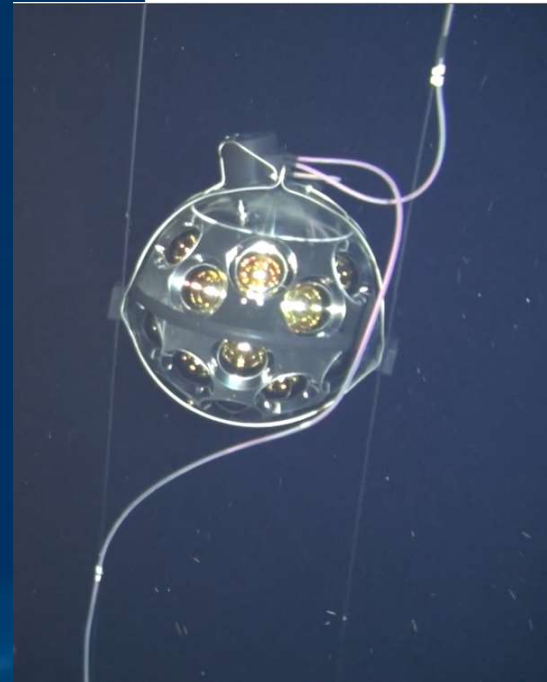
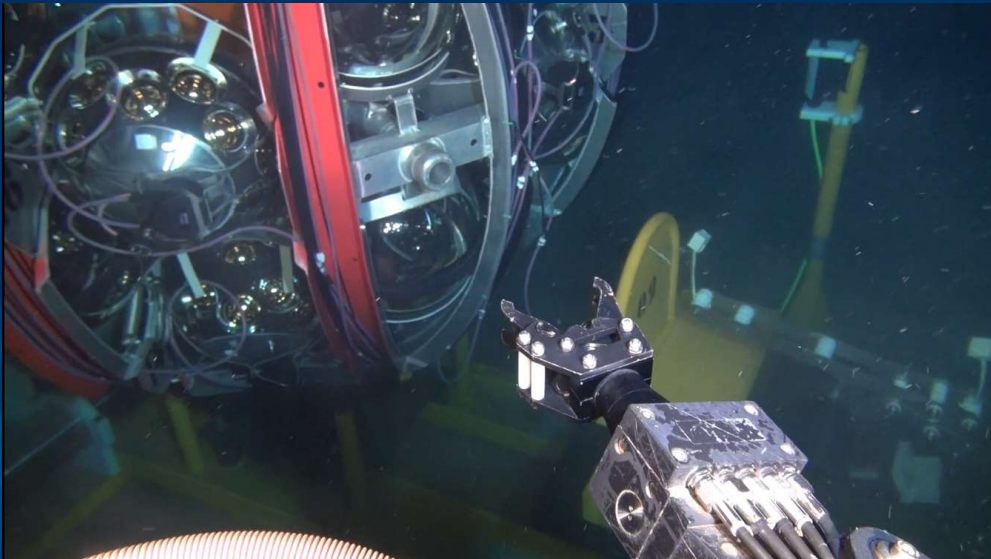
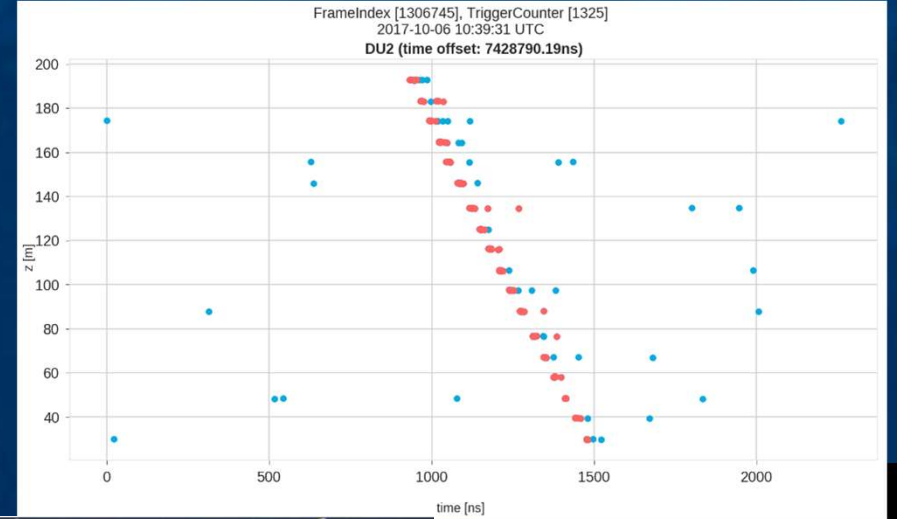
Assemblage d'un capteur de lumière



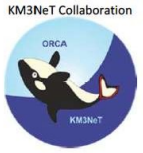
Tests du capteur de lumière



La première ligne KM3NeT-ORCA

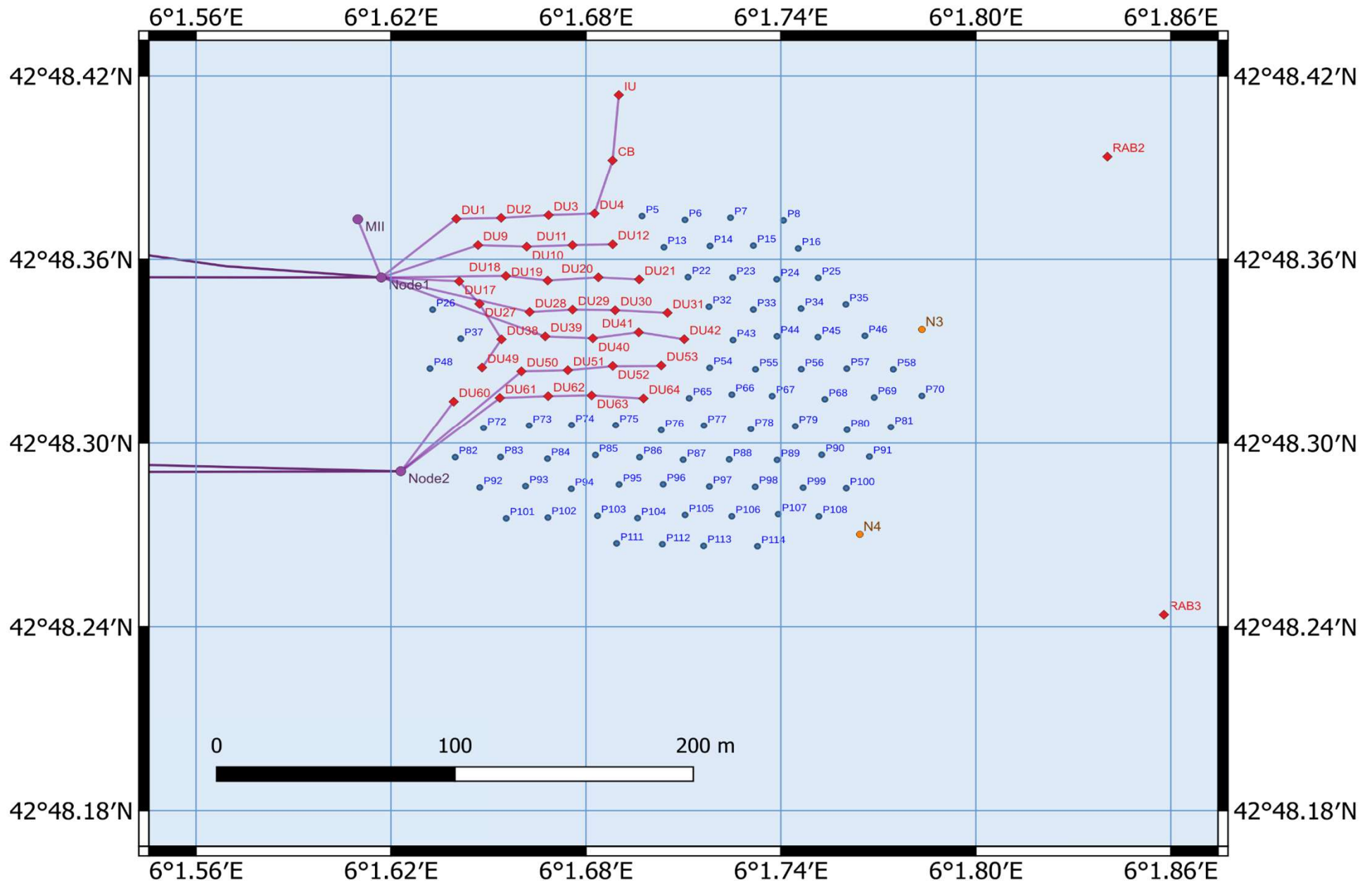


1^{ère} ligne mise en opération en 2017



Status de KM3NeT-ORCA : 33 lignes en opération

Site KM3NeT/ORCA - October 2025



Statut et 1^{ers} Résultats

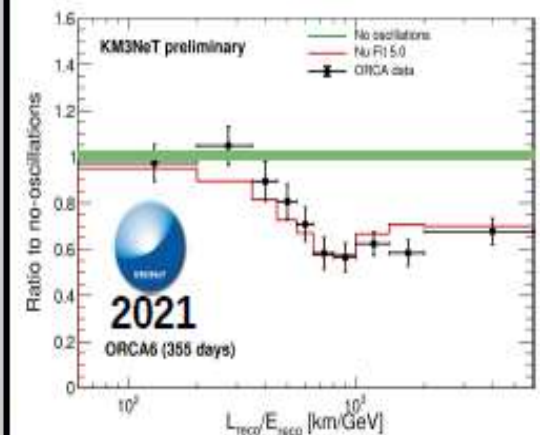
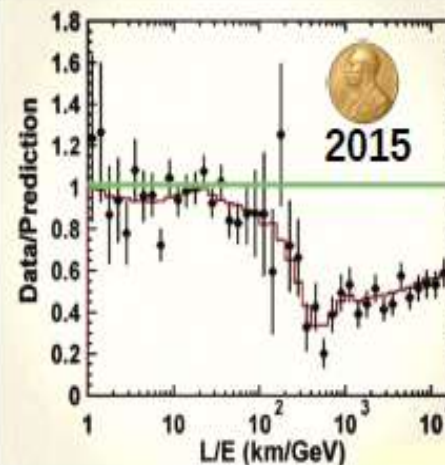
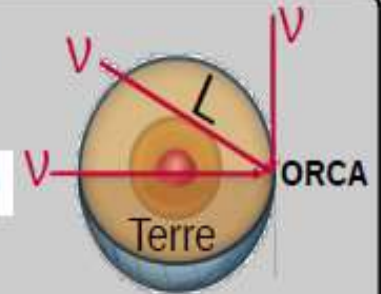
Les détecteurs sont en construction.

ORCA : 33 lignes / 115

ARCA : 51 lignes / 230

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

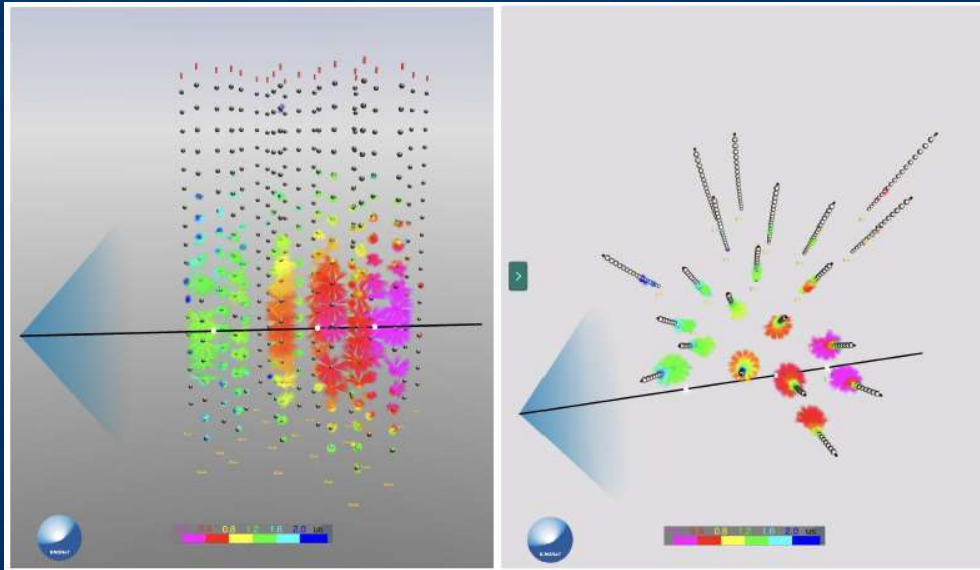
Les 6 premières lignes ORCA ont déjà permis d'observer les propriétés quantiques des neutrinos (Nobel 2015) !





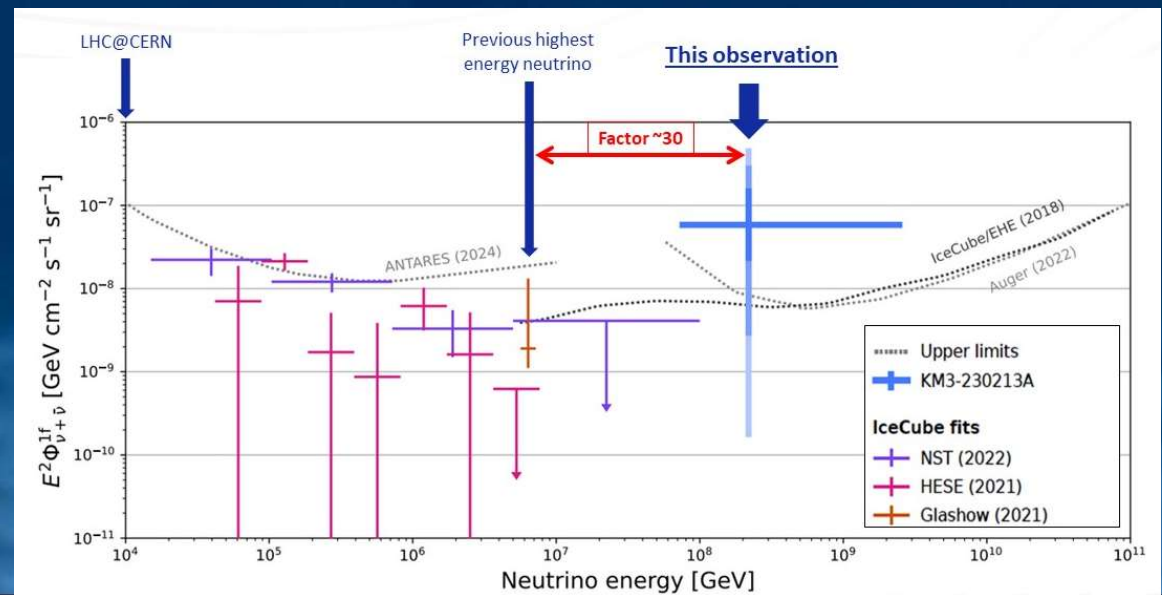
Le Super-Neutrino du 13/02/2023

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

numerama menu actus tech société pop culture sciences cyberguerre

Mis à jour le 13 février 2025 à 12h33

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

Un événement exceptionnel

2 min

Diane Hassoun



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

Salomé Robles avec AFP Le 13/02 à 10h34

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

Le Parisien

« 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 trous noirs ou l'activité autour des trous noirs supermassifs - génèrent des neutrinos dits à « ultra-haute énergie ».

Par Romain Thibault pour AFP

Le 13 février 2025 à 10h34

La Marseillaise

ACCUEIL POLITIQUE SOCIAL SOCIÉTÉ ÉCONOMIE FRANCE INTERNATIONAL ENVIRONNEMENT

DANS L'ACTU #EDITO #COM #BUDELA REPUBLIQUE #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 AUBREY GUINET / TOUTOULOU / 14/02/2025 10h34

PARTICULES

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

Par Fabrice Nicot le 12.02.2025 à 17h00

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

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

Facebook Twitter 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.

4 min Read in English

franceinfo:

Accueil Menu Englobes Voir ou faire Guerre en Ukraine Pénée Le Scap

3 provenance-alpes côte d'azur

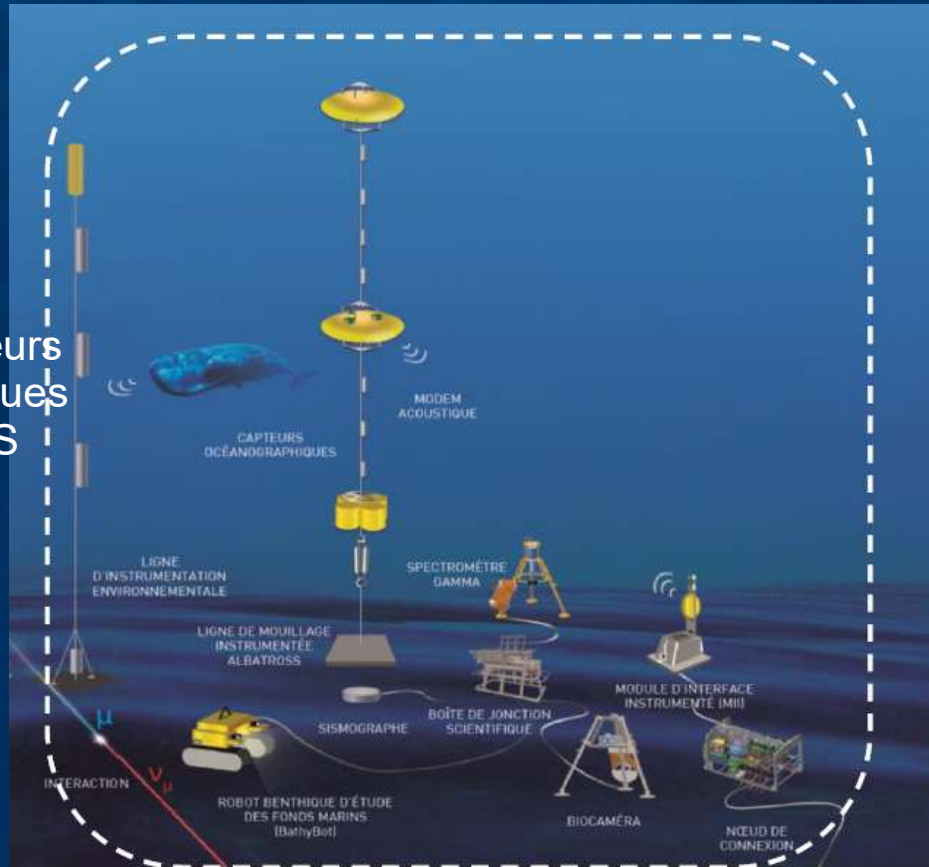
changer de région

Accueil Provence-Alpes-Côte d'Azur Var Toulon

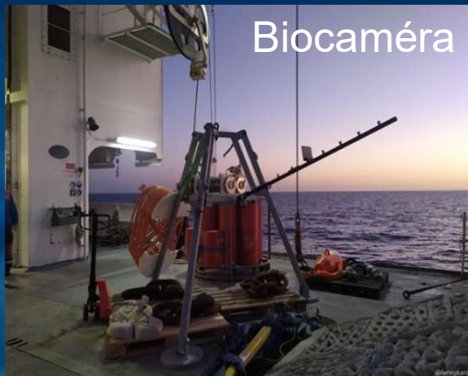
"Il ne vient pas de notre galaxie" : un neutrino détecté au fond de la Méditerranée, on vous explique

Un Observatoire Pluridisciplinaire en Mer Profonde

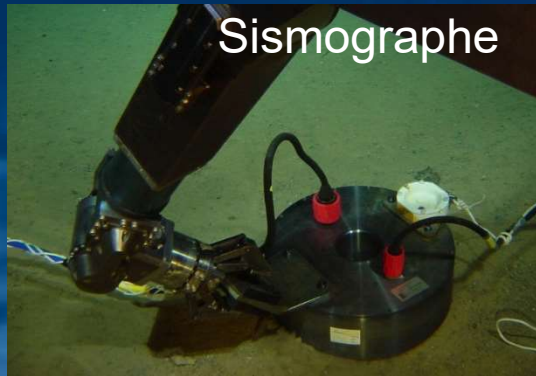
Ligne de capteurs
océanographiques
ALBATROSS



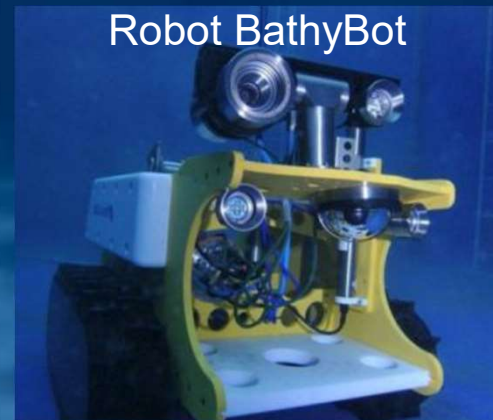
- Astronomie
- Physique des neutrinos
- Océanographie physico-chimique
- Biologie marine
- Bioacoustique
- Bioluminescence
- Microbiologie
- Ecologie, biogéochimie
- Sismologie
- Environnement
- Energies renouvelables
- Acoustique sous-marine
- R&D technologies sous-marines
- ...



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