



# Les DOMs (Digital Optical Module) de KM3NeT

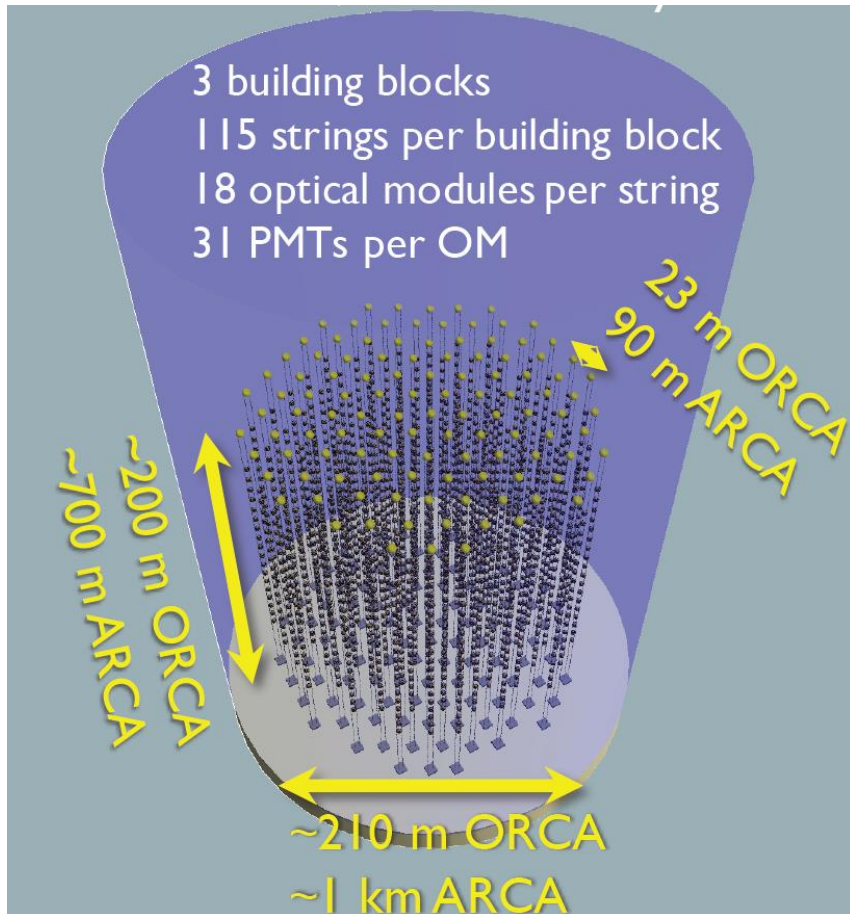
**KM3NeT : km<sup>3</sup> Neutrinos Telescope**  
(successeur d'ANTARES)

Un télescope à neutrinos est une grille de photodétecteurs en 3D, déployée dans un milieu transparent.

Permet de détecter les rayonnements Cerenkov générés par les particules secondaires issus des neutrinos, ce qui permet de remonter aux trajectoires et aux énergies des neutrinos.



# Deux télescopes sous-marin en construction : ORCA et ARCA



Aujourd'hui, 6 lignes ORCA et 6 lignes ARCA sont déployées et en acquisition.

- **ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)**

Neutrinos atmosphériques de faible énergie (1 à 100 GeV)

2500 m de profondeur, au large de Toulon

115 lignes de 18 DOMs (2070 DOMs soit 64170 PMTs 3'')

Distance horizontale interligne: 20m

Distance verticale entre 2 DOMs d'une ligne : 9m

Volume détecteur : 8 Mton (équivalent à ANTARES)

- **ARCA (Astroparticles Research with Cosmic in the Abyss)**

Neutrinos de grande énergie (GeV à PeV)

3500 m de profondeur, au large de la Sicile

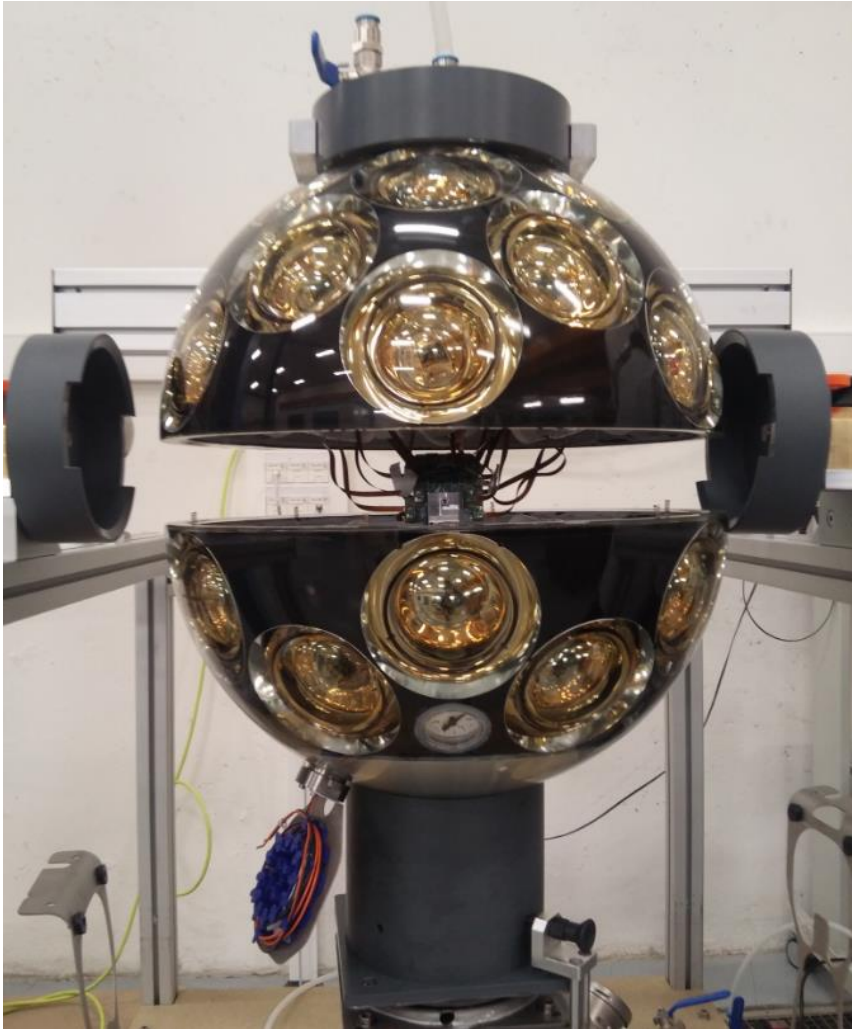
2x115 lignes de 18 DOMs (4140 DOMs soit 128 340 PMTs 3'')

Distance horizontale interligne: 90m

Distance verticale entre 2 DOMs d'une ligne : 36m

Volume détecteur : 2x0,5 Gton

# DOM : Digital Optical Module



- $\varnothing$  43 cm
- 31 photomultiplicateurs
- Signaux utiles = photoélectron unique. Rejet du bruit grâce coïncidences.
- Détection proche de  $4\pi$  + information directionnelle
- Ligne de détection de 18 DOMs soumises au courant sous-marin : boussole – tiltmètre électronique + capteur piezoélectrique (positionnement acoustique). Précision spatiale :  $\sim 10$  cm
- LED (470nm) : calibration en temps
- Capteurs température et humidité



# DOM : Digital Optical Module



- Cartes électroniques :
  - 31 pont diviseurs
  - 2 cartes collectent les signaux LVDS des PMTs pour les transmettre à la CLB
  - CLB (FPGA Xilinx Kintex 7, très faible conso), White Rabbit precision time protocol (WR-PTP) permet une synchronisation des DOMs < ns
  - power board
- Communication fibre optique : les 18 DOMs d'une ligne ont des  $\lambda$  distinctes
- 8 sites d'intégration en 2021, dont **2 sites IN2P3** depuis 2017 (IPHC Strasbourg et Subatech Nantes)

# Aspects mécaniques

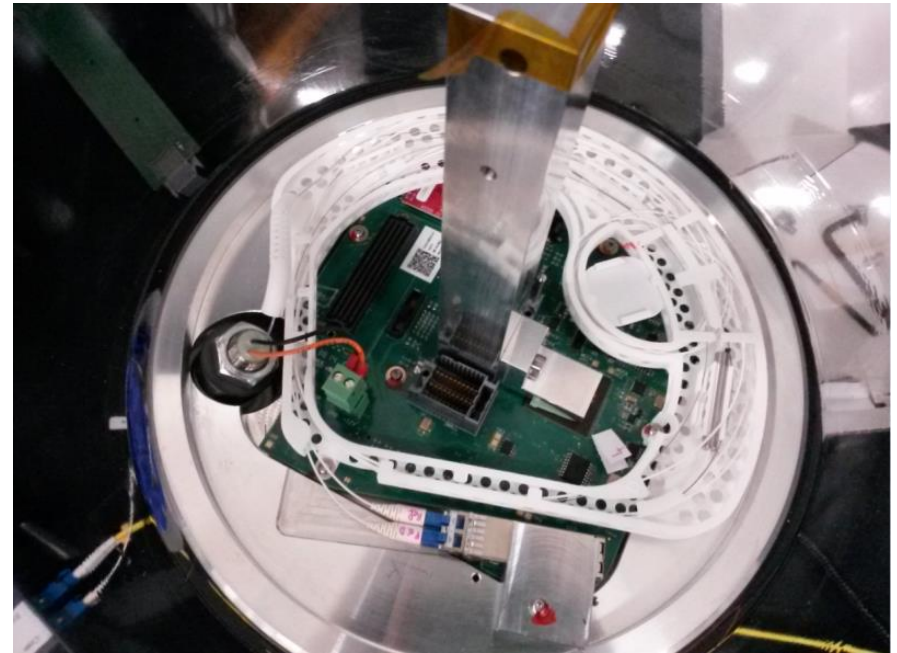
## Maintien et positionnement

- 31 PMT, 1 LED, 1 piezo, 1 manomètre
- 31 réflecteurs : 45° d'inclinaison  
=> collection photons améliorée
- Supports imprimés en 3D (nylon) : coûteux
- Supports moulés puis assemblés : moules coûteux mais amortissable

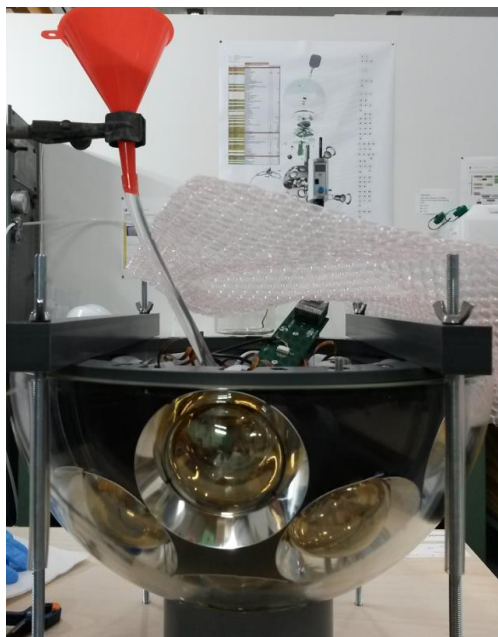


## Dissipation thermique

- Pièce en alu collée sur la sphère
- Puissance à dissiper : jusque 10 W
- Température eau de mer : 13°C



# Sphère d'instrumentation et gel optique

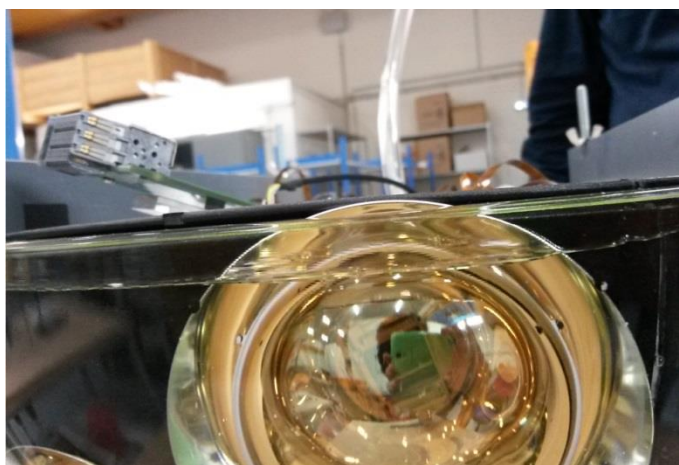


## Sphère Nautilus Ø43 cm en verre borosilicaté

- Epaisseur parois : 14 mm
- Immersion max : 6700 m
- Faible radioactivité, bonne transparence
- Sphère maintenue par simple dépression (-0,2 bar)
- Résiste à la pression, au choc, à la corrosion
- 2500 m à 3500 m => 250 à 350 bars de pression => Ø sphère rétrécie d'environ 1,5 mm

## Gel Wacker 612 bi-composant A/B

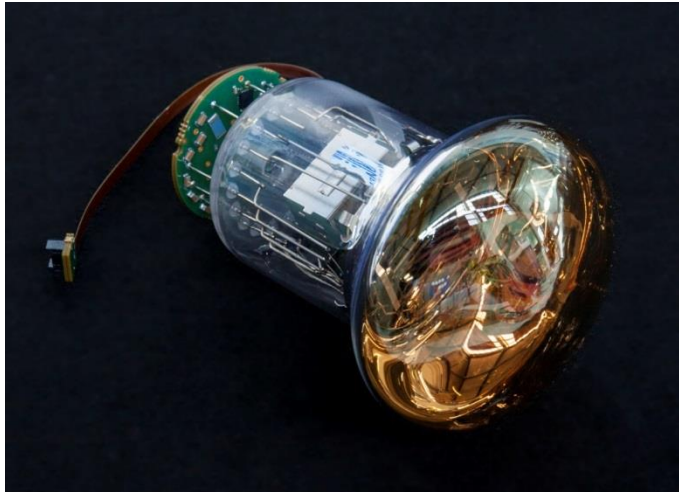
- Le gel durcit après mélange des composants
- Isolant électrique
- Fonction mécanique : collage des composants sur la sphère, absorption des chocs et vibrations lors déploiement. Accompagne le rétrécissement de la sphère.
- Fonction optique : bonne transparence, indice de réfraction (1.40) proche sphère (1.47) et fenêtre des PMTs (1.51-1.54), diminue les réflexions



Ici, versement du gel est presque terminée



# PMTs : spécifications KM3NeT



- Phase 1 : Hamamatsu R12199
  - Phase 2 : Hamamatsu R14374
- Ø 80 mm

Fenêtre en verre borosilicaté

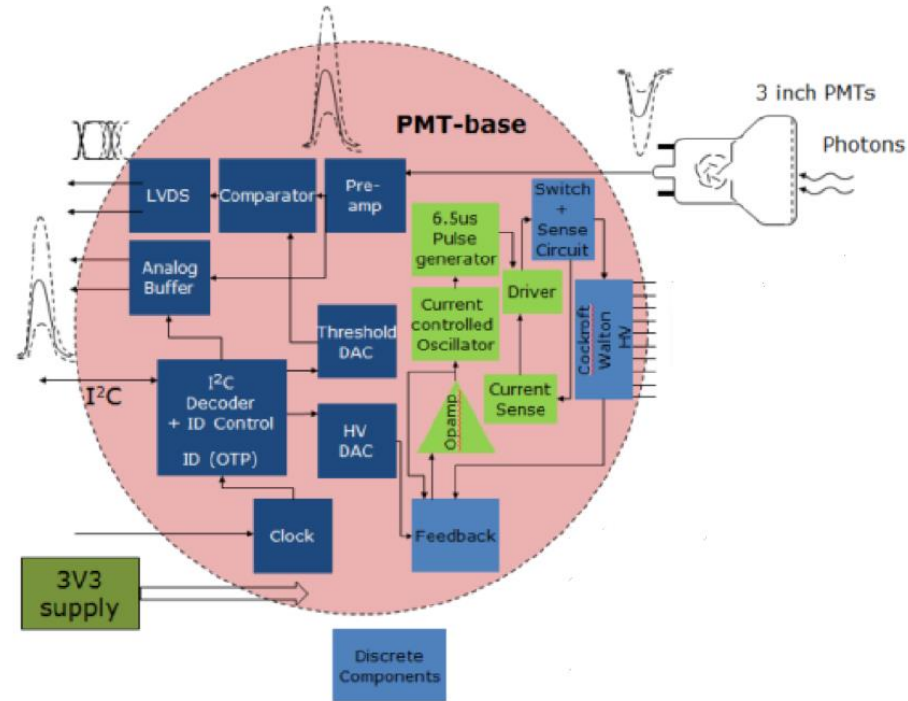
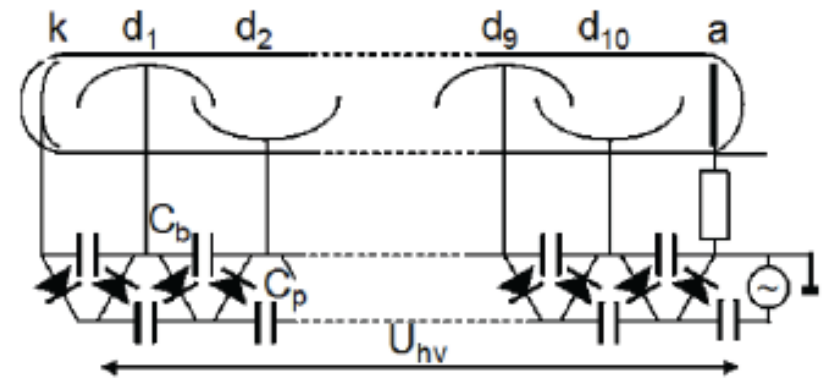
Photocathode bialkali

10 dynodes

- Efficacité quantique à 470 nm > 18%
- Efficacité quantique à 404 nm > 25%
- Transit Time Spread TTS < 5ns (FWHM)
- Gain  $3 \times 10^6$
- Dark count : 200 – 2000 Hz pour un seuil à 0,3 photoélectron
- Rapport pic/vallée > 2
- Prepulses (-60ns à -10 ns) : 1,5 % max
- Delayed pulses (15ns à 60 ns) : 5,5 % max
- Late afterpulse (100 ns à 10  $\mu$ s) : 15 % max

# PMTs : pont diviseur sur mesure

- Générateur HT Cockroft-Walton ajustable (800V à 1400 V) : HT telles que tout les PMTs aient la même réponse au photoélectron unique
- Circuit ID (identification du PM)
- Pré-amplificateur
- Signal ToT (Time over Thershold) numérisé
- Protocole I2C : valeur HT & seuil
- Signaux de sortie (LVDS) collectés par une carte électronique sur chaque hémisphère, et transmis par des cartes électroniques
- Puissance dissipée par PMTs < 5 mW (solution commerciale : 50 mW)





# PMTs : caractérisation par la collaboration

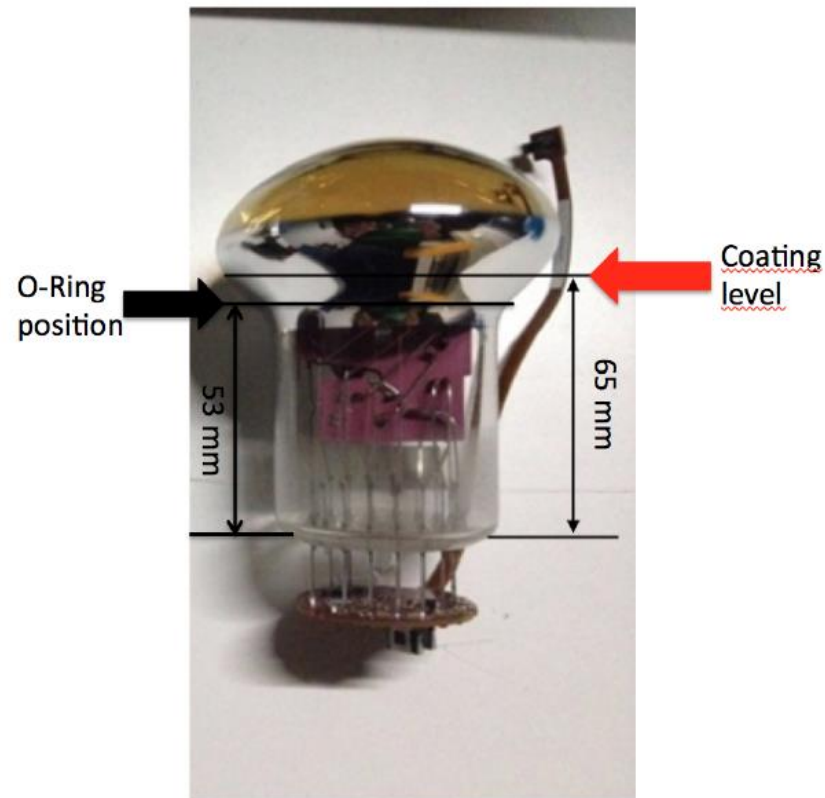
- Mesures de 7000 PMTs R12199 :
  - Dark count
  - Temps de transit et dispersion du temps de transit
  - Prepulse, delayed-pulse, afterpulse

=> 7% sont hors des spécifications KM3NeT
- Sous-échantillon de 60 PMTs, mesure de :
  - Efficacité quantique
  - Gain
  - Rapport pic/vallée

⇒ en accord avec spécifications
- Résultats mesures = données d'entrées pour les simulations

# PMTs : revêtement isolant

- Le dark count des PMTs dans le support en nylon est supérieur aux spécifications
- Cause : HT appliquée négative => champ électrique entre photocathode et environnement. Des décharges dans l'air produisent des photons (vérifié par utilisation de SF6 qui règle le pb ).
- **Solution** : application d'un vernis isolant sur le pont diviseur et le corps du PM (hors photocathode)



# Références

- The data acquisition system of the KM3NeT detector, PoS(ICRC2015)1172
- Very low power, high voltage base for a photomultiplier tube for the KM3NeT deep sea neutrino telescope, 2010 JINST 5 C12049
- Characterisation of the Hamamatsu photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope, 2018 JINST 13 P05035
- A method to stabilise the performance of negatively fed KM3NeT photomultipliers, 2016 JINST 11 P12014