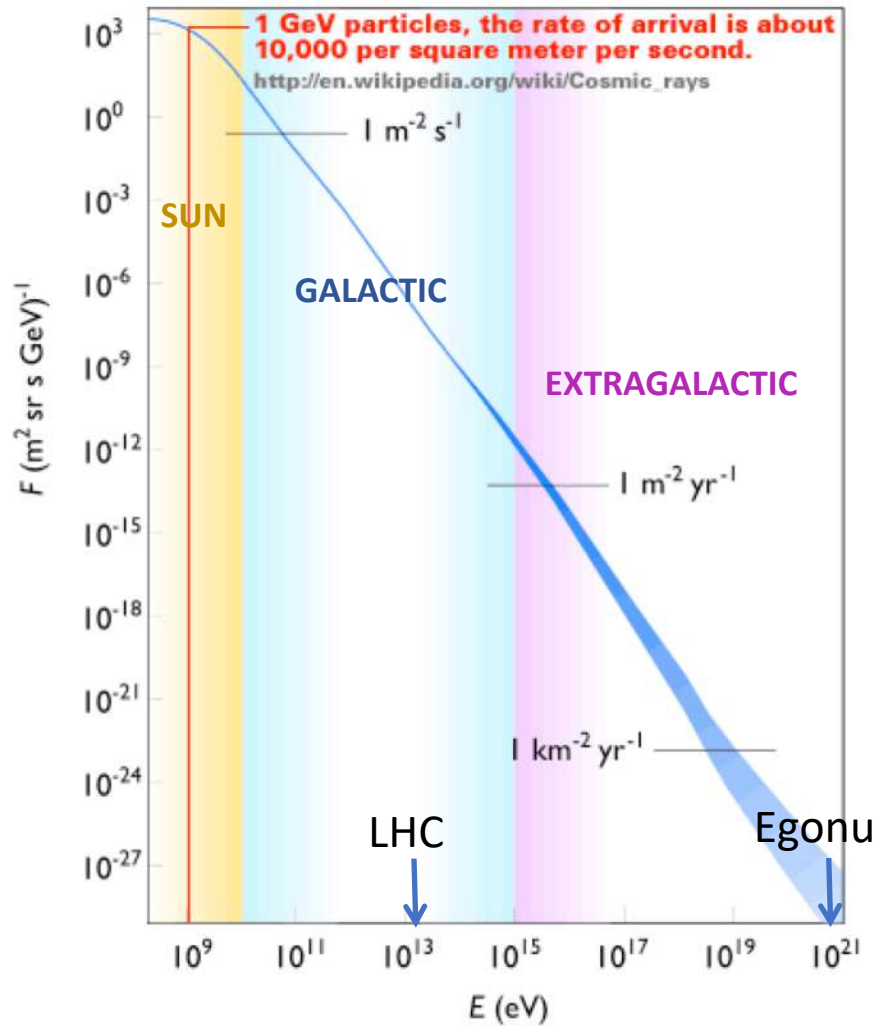


Il telescopio sottomarino per neutrini di alta energia KM3NeT: dagli abissi marini alle profondità del cosmo



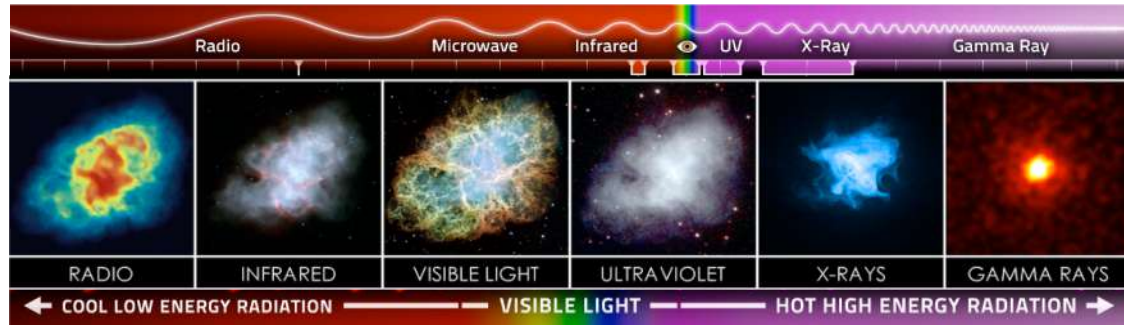
SPAIS *Scuola Permanente per l'Aggiornamento
degli Insegnanti di Scienze Sperimentali*

Quali conoscenze di base per comprendere l'innovazione?

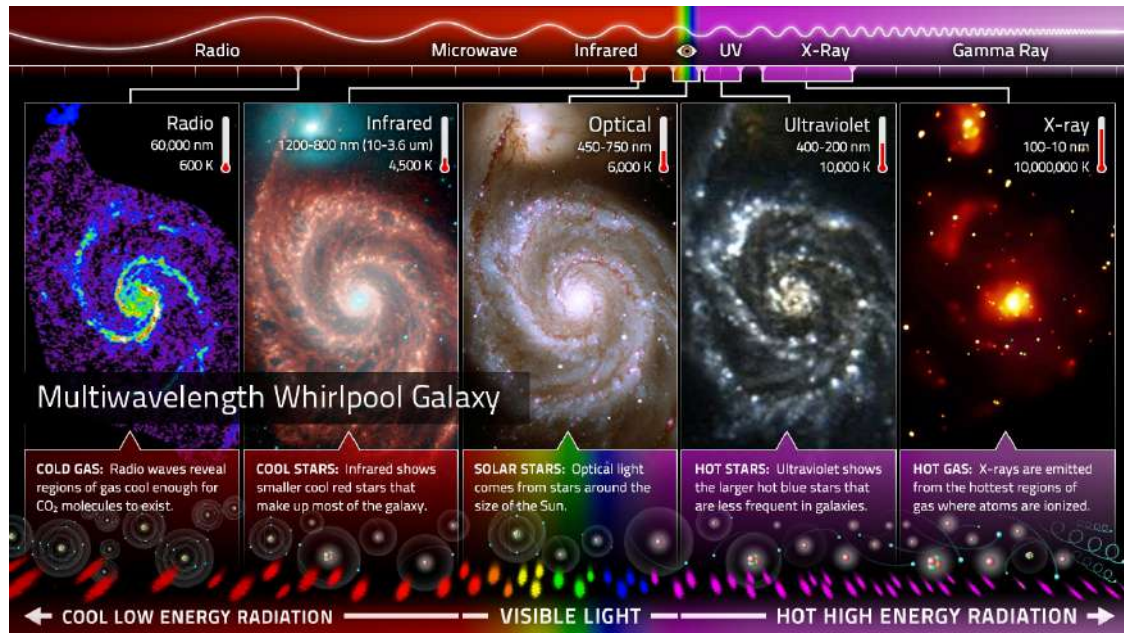


Vogliamo identificare gli acceleratori cosmici e studiarne la fisica

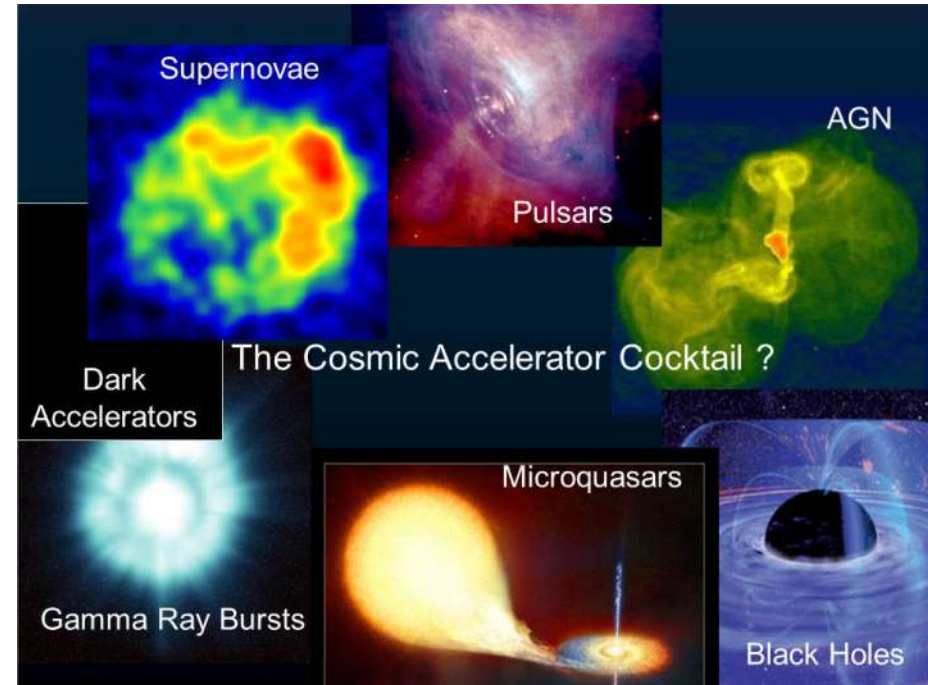
Crab nebula



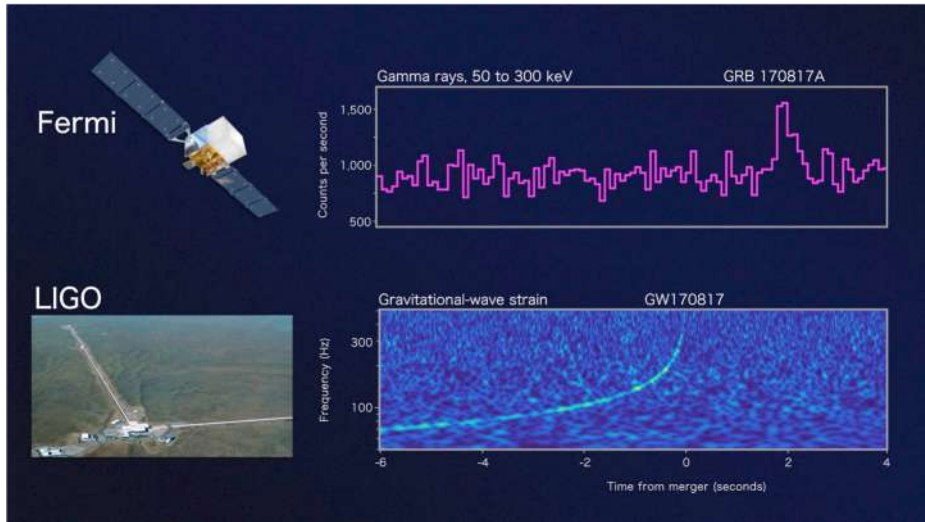
Whirlpool Galaxy



Diverse sorgenti astrofisiche emettono radiazione di sincrotrone non termica: sono acceleratori di elettroni!!!



Domanda: sono anche acceleratori di protoni?



17 Agosto 2017

LIGO e Virgo hanno rilevato un'onda gravitazionale con una durata di 100 secondi: GW170817

È stato il primo evento di fusione di stelle di neutroni (130 milioni di anni fa)

1,7 secondi dopo che Fermi e INTEGRAL hanno rilevato un breve GRB: GRB 170817A

Nei minuti e nei giorni seguenti, sono state osservate onde e.m. a tutte le lunghezze d'onda (raggi X, ultravioletti, ottici, infrarossi e radio): esplosione Kilonova e afterglow del GRB

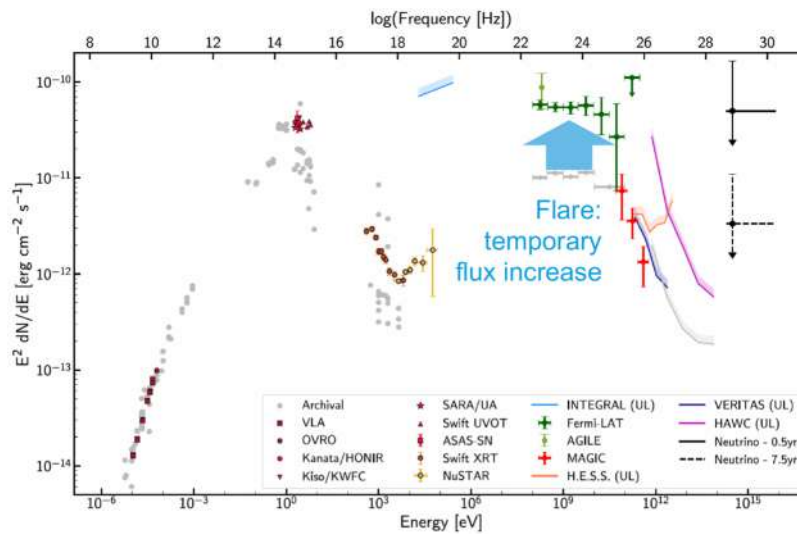
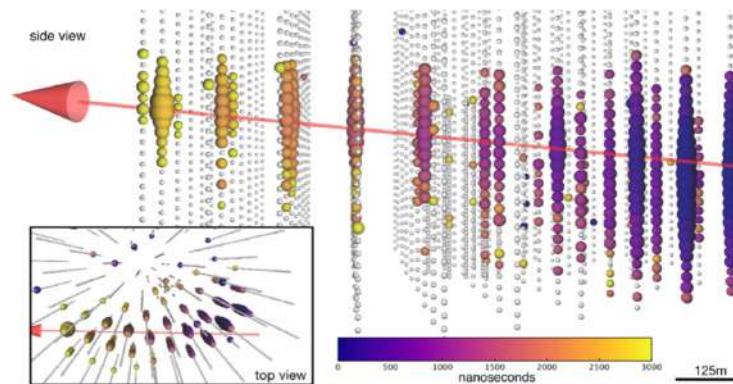
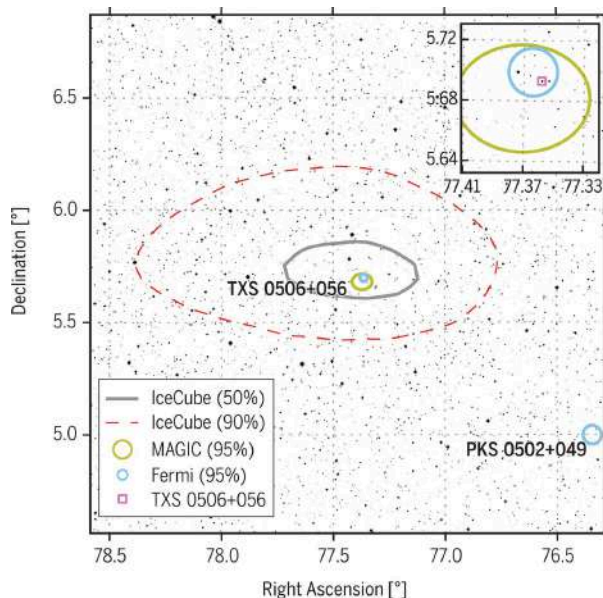
Circa 70 osservatori in tutto il mondo hanno osservato l'evento: siamo entrati in nella nuova era dell'astronomia multi-messaggera!

La rivelazione di neutrini completa il quadro dell'astronomia multi-messaggera

22 Settembre 2017

IceCube ha rilevato un neutrino di alta energia con un'energia di circa 290 TeV (IceCube-170922A)

Il neutrino era in coincidenza con un gamma-ray flare di TXS 0506+056 osservato da Fermi e MAGIC

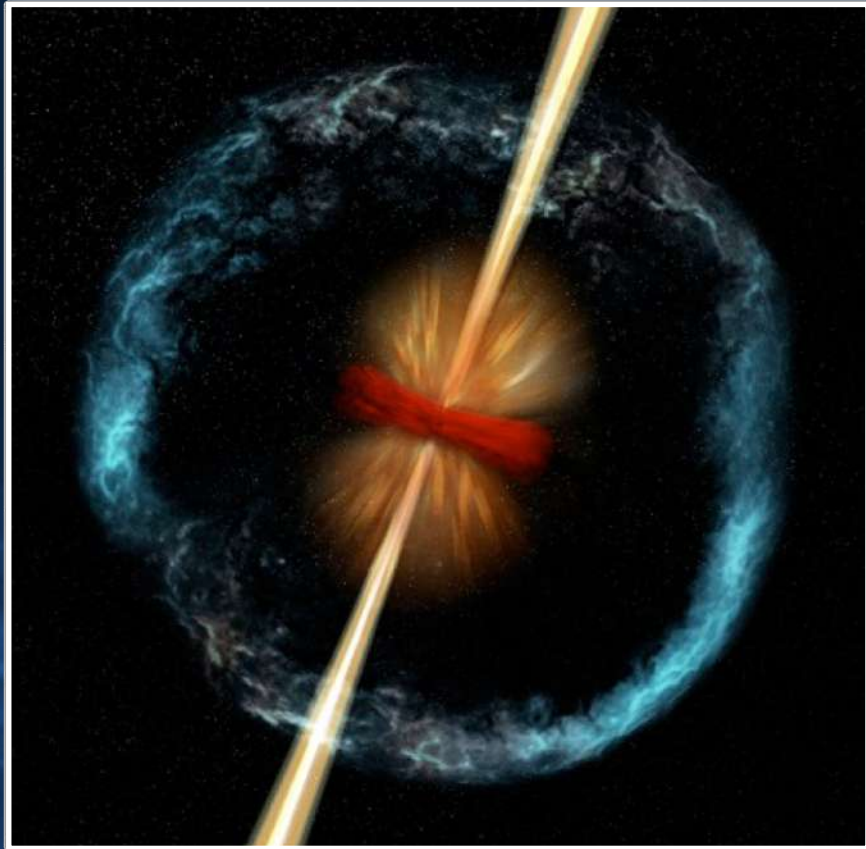


Color: coincident with neutrino; gray: archival data

Science 361 (2018) no. 6398, eaat1378



È come assemblare un grande puzzle i cui pezzi sono le informazioni portateci da diversi messaggeri



I pezzi del nostro puzzle sono:
 Radiazioni elettromagnetiche,
 onde gravitazionali,
 Raggi cosmici
 e neutrini!

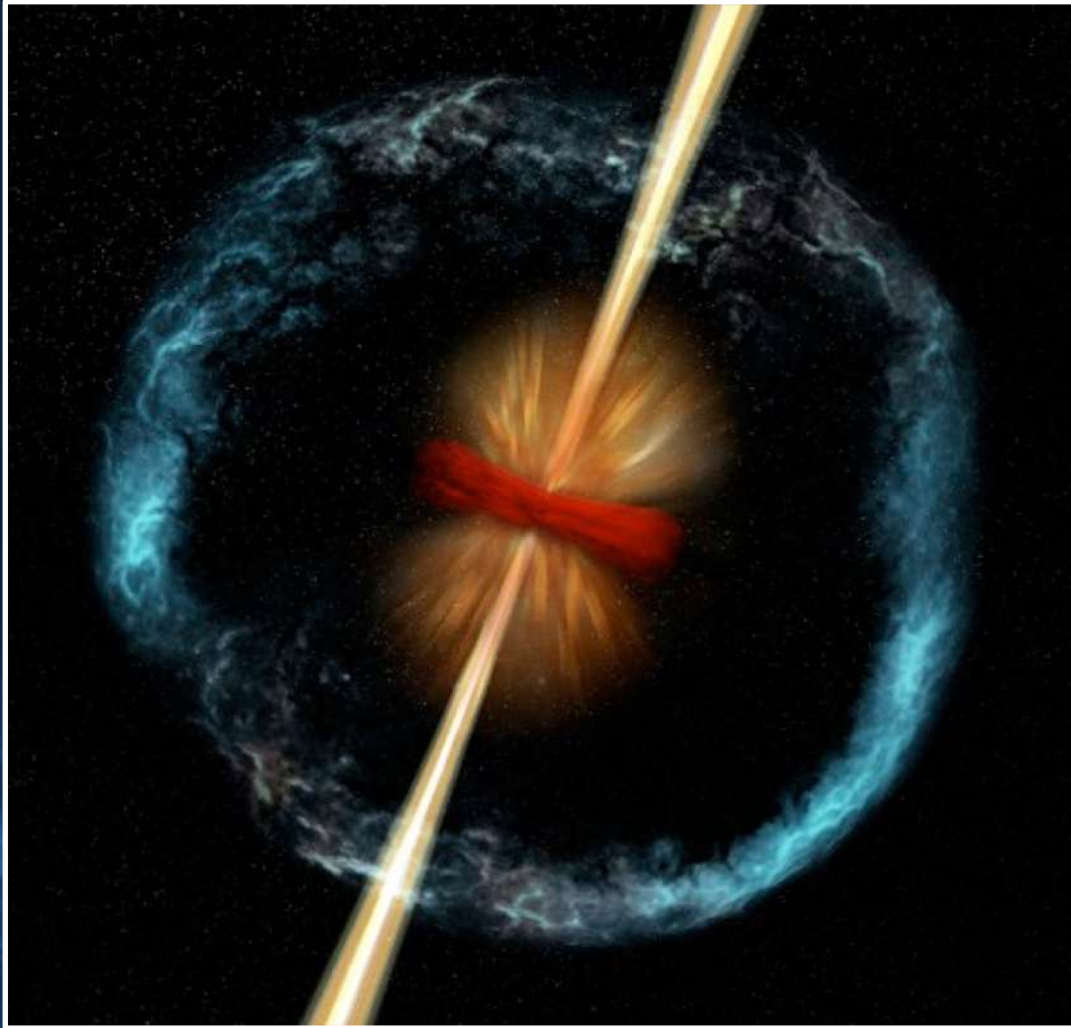




Onde gravitazionali durante la fusione

Reazioni nucleari durante l'esplosione

Formazione di getti di materia relativistica



Acceleratori di particelle!!!



Protoni (Raggi Cosmici)



Raggi Gamma

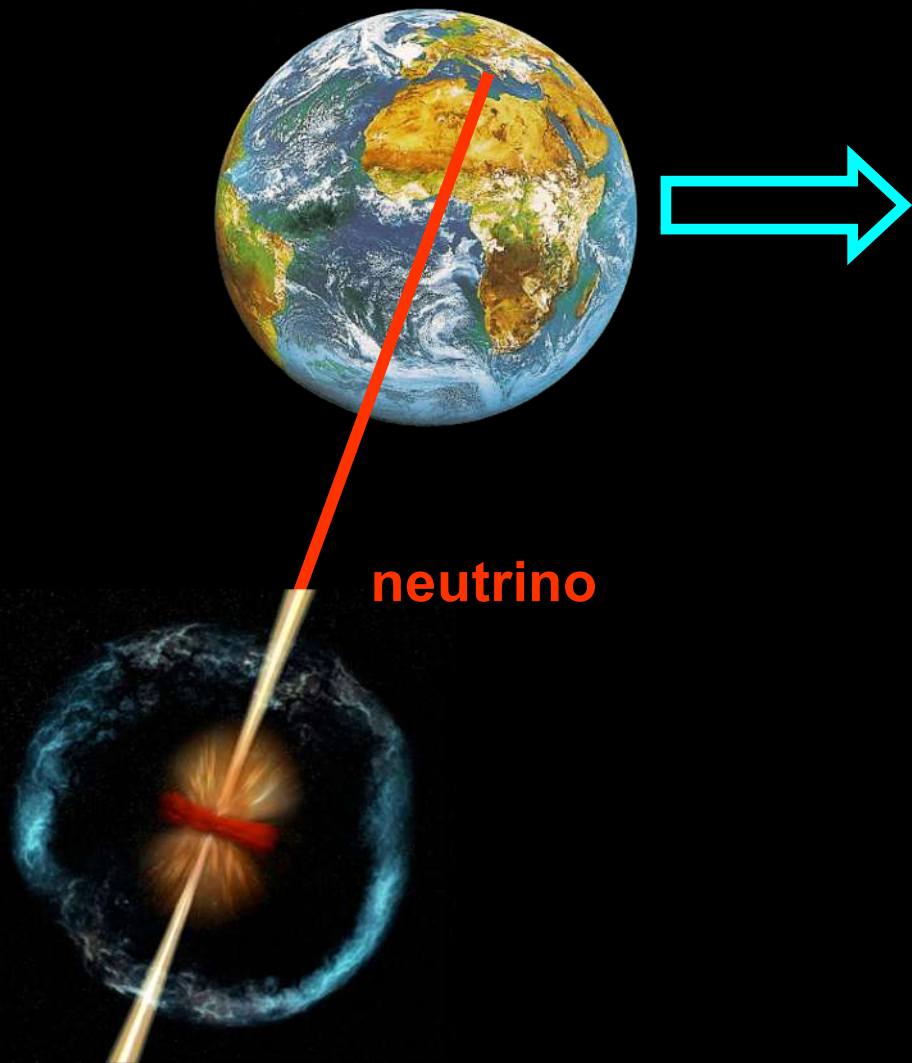


Neutrini

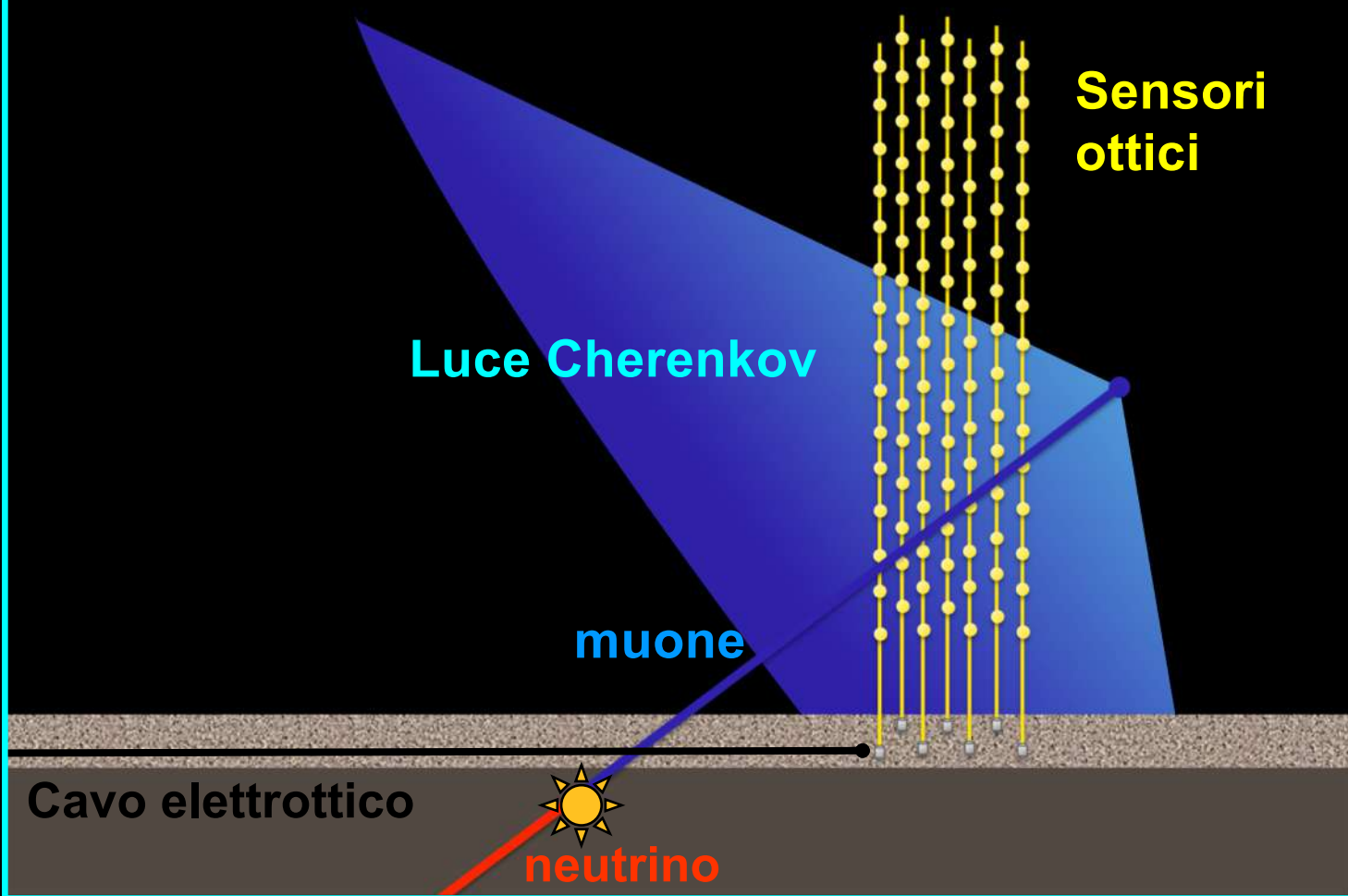
Neutrino astronomia di alta energia



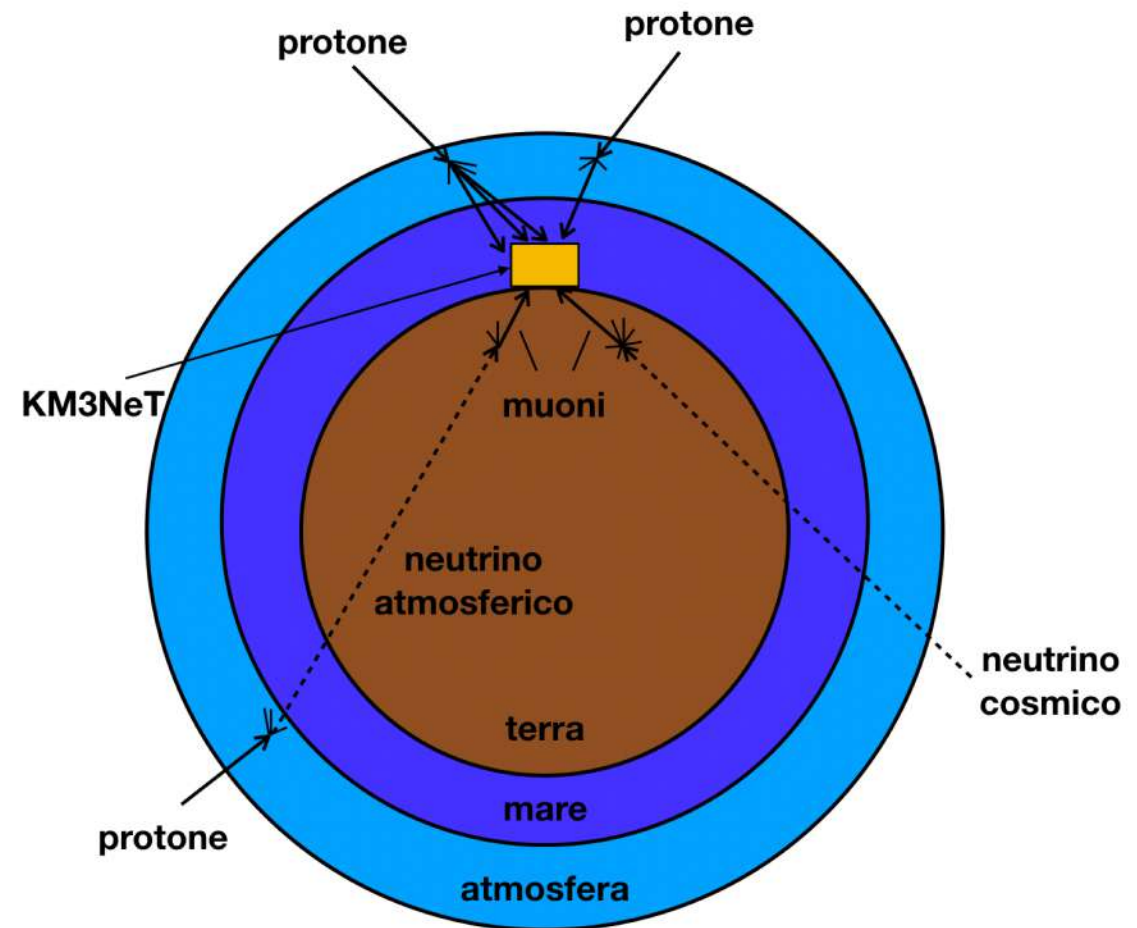
A differenza delle altre particelle, i neutrini viaggiano indisturbati nell'universo, trasportando le informazioni delle sorgenti che li hanno emessi.

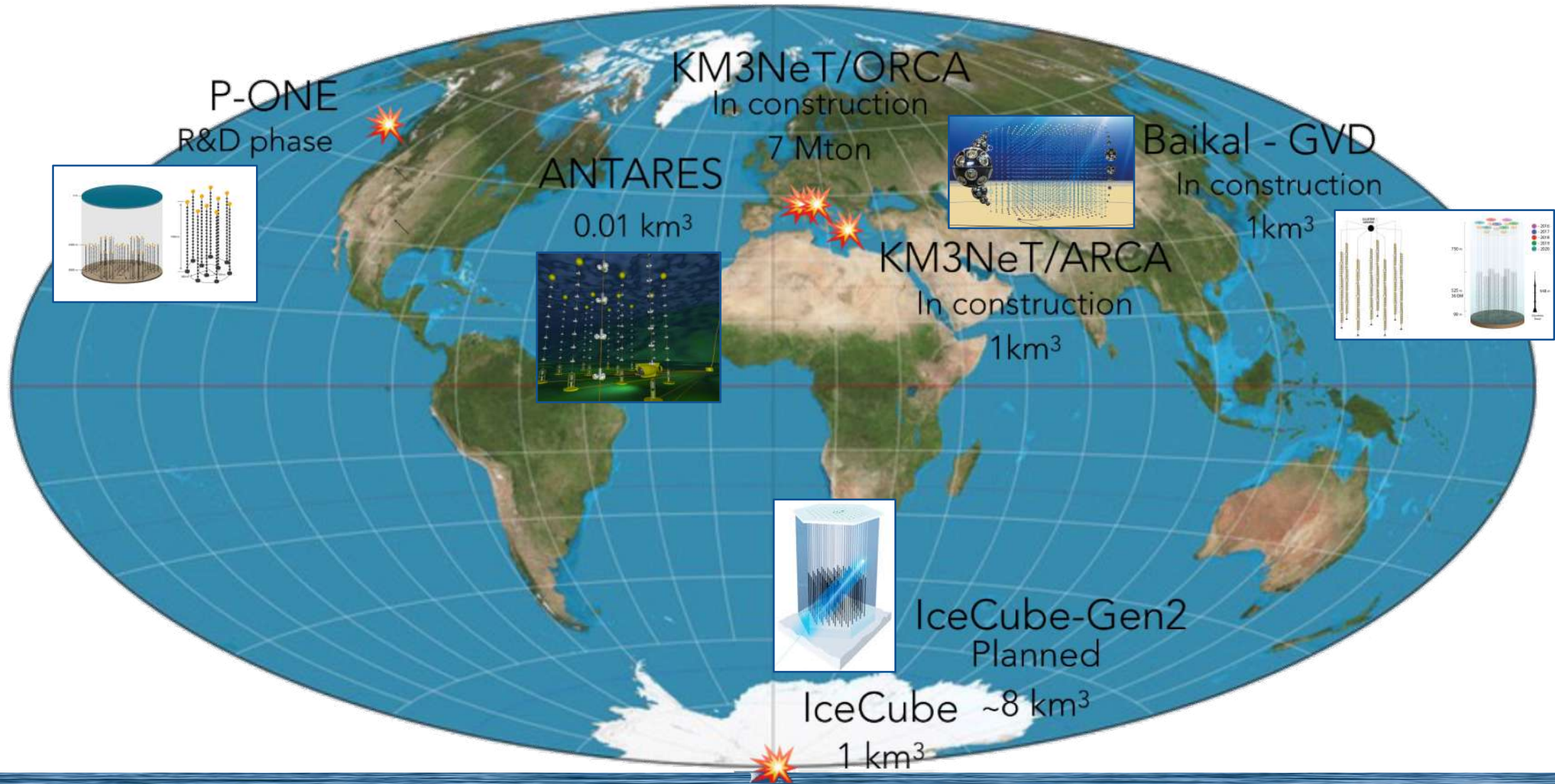


Abissi marini



- Rivelatori su scala di 1 km^3
- Dobbiamo schermare il rivelatore dai raggi cosmici!





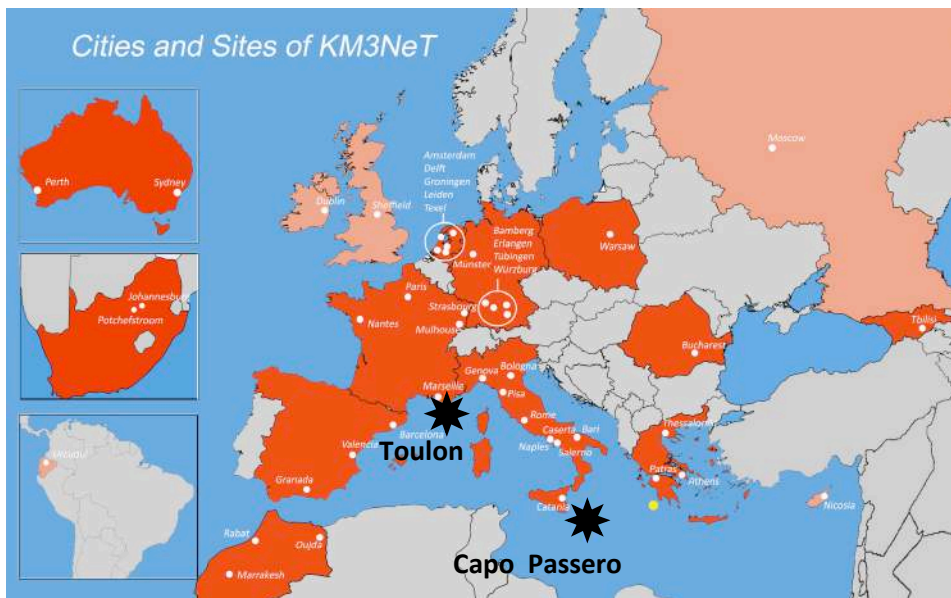
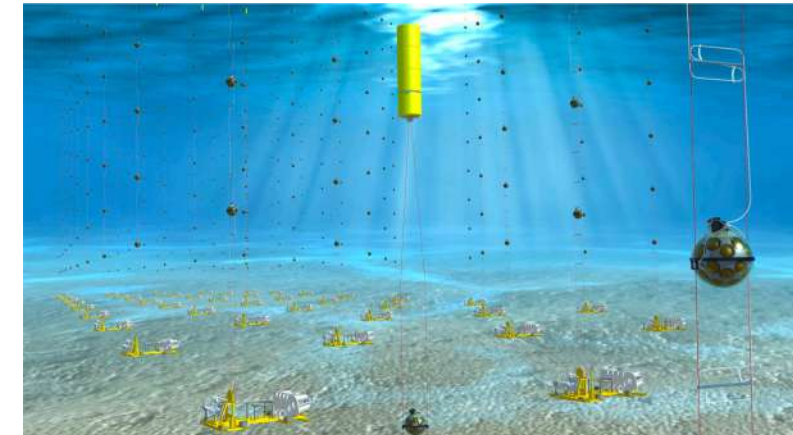
KM3NeT è un'infrastruttura di ricerca nel Mar Mediterraneo che ospita rivelatori di neutrini

KM3NeT/ORCA (**O**scillation **R**esearch with **C**osmics in the **A**byss)

- fisica del neutrino e neutrino astronomia di bassa energia (neutrini di decine di GeV)

KM3NeT/ARCA (**A**stroparticle **R**esearch with **C**osmics in the **A**byss)

- scoperta e osservazione di sorgenti di neutrini cosmici di alta energia (GeV ÷ PeV).



Tolone (Francia)
Profondità: 2500 m

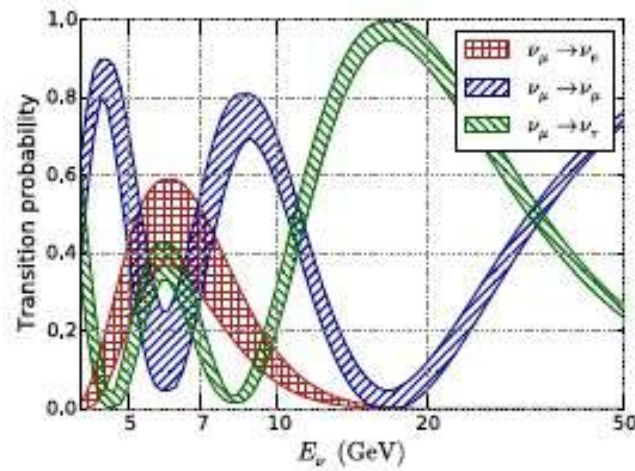


Capo Passero (Italia)
Profondità : 3500 m

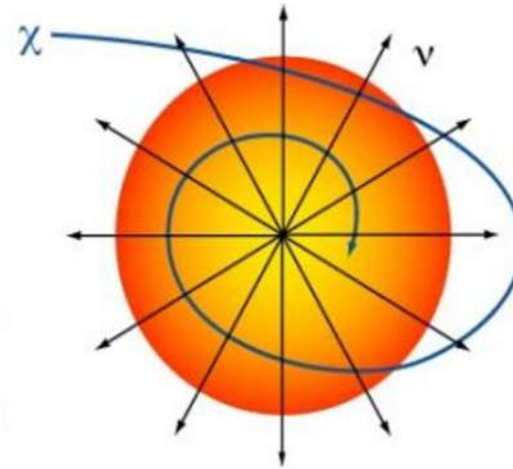
<http://www.km3net.org/>



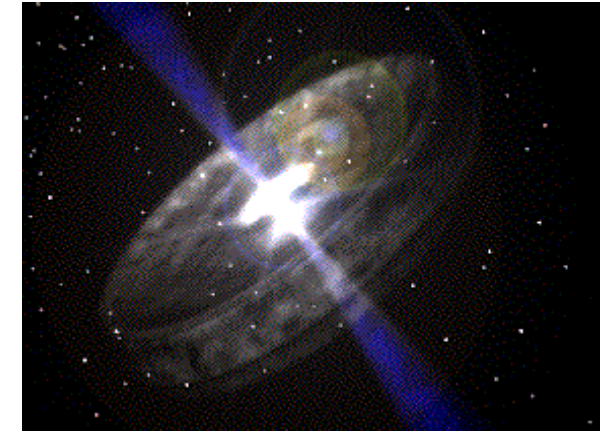
Supernovae
Flares solari



Neutrini atmosferici
Oscillazioni di neutrino



Materia oscura
Monopoli, Nuclearitei



Neutrini cosmici
Origine dei raggi cosmici

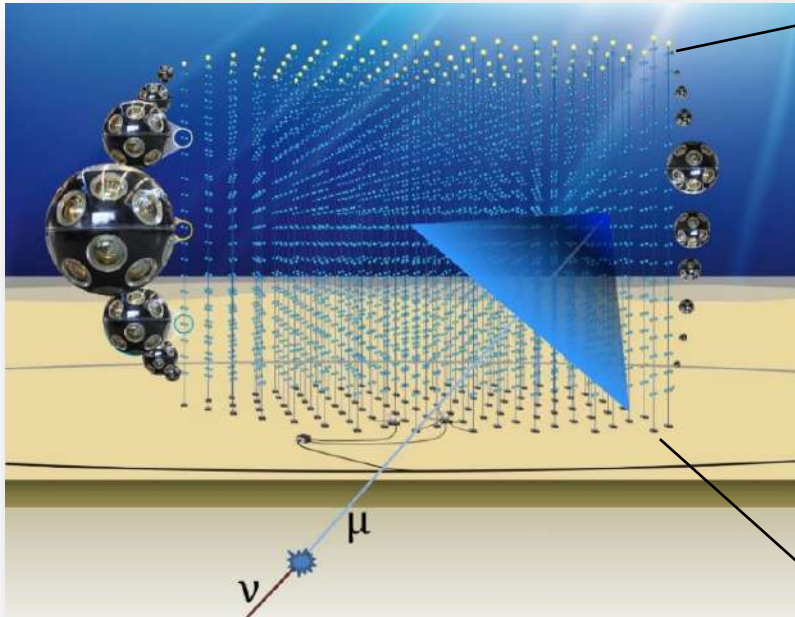
Very Low Energy
 $E_\nu < 1 \text{ GeV}$

Low Energy
 $1 \text{ GeV} < E_\nu < 10 \text{ GeV}$

Medium Energy
 $10 \text{ GeV} < E_\nu < 1 \text{ TeV}$

High Energy
 $E_\nu > 1 \text{ TeV}$



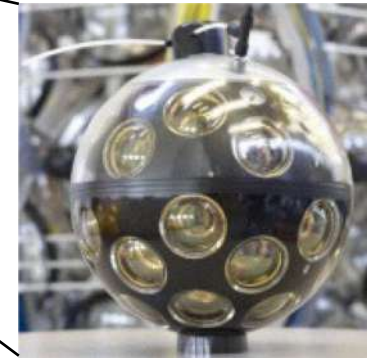


Detection Unit (DU)

Matrici 3D di sensori ottici con un design modulare:

- Digital Optical Module (DOM): modulo ottico multi-PMT (31 PMT da 3").
- Detection unit (DU): stringa verticale con 18 DOM
- Building block (BB): gruppo di 115 DU

- Alimentazione e trasferimento con un unico cavo di dorsale con breakout ai DOM
- Rete di cavi sottomarini e Junction Box collegati a terra tramite un cavo e/o principale
- Tutti i dati inviati a terra



Digital Optical Module (DOM)

Il DOM è un nuovo design per sensori ottici sviluppato dalla collaborazione.

Sfera di vetro da 17" contenente:

- 31 PMT da 3"
- Anelli di riflettori di luce attorno ai PMT
- LED beacon e sensori acustici
- Tiltmeter/compass
- Fibra Gbit/s per la trasmissione dei dati
- Hybrid White Rabbit per sincronizzazione temporale

Vantaggi:

- Conteggio digitale dei fotoni
- Informazione sulla direzione
- Ampio accettazione angolare
- Migliore reiezione del fondo ottico
- Design compatto ed economico:
 - area do fotocatodo $\approx 3 \times 10''$ PMTs
 - 1 DOM equivale a 3 OM di ANTARES



Unità di rivelazione: stringa verticale con 18 DOM



Stringa:

- 1 Boa
- 2 Corde di dyneema
- 18 DOM

Dorsale electro-ottica:

- Tubo flessibile da 7mm pieno di olio
- 18 fibre
- 2 cavi di rame (375VDC)

Base della DU:

- Ancora con un connettore electro-ottico ROV operabile
- Modulo di Base (Schede di controllo dell'alimentazione e sincronizzazione temporale, amplificatore ottico)
- Idrofono e LBL beacon

Configurazione geometrica diversa per i dure rivelatori:

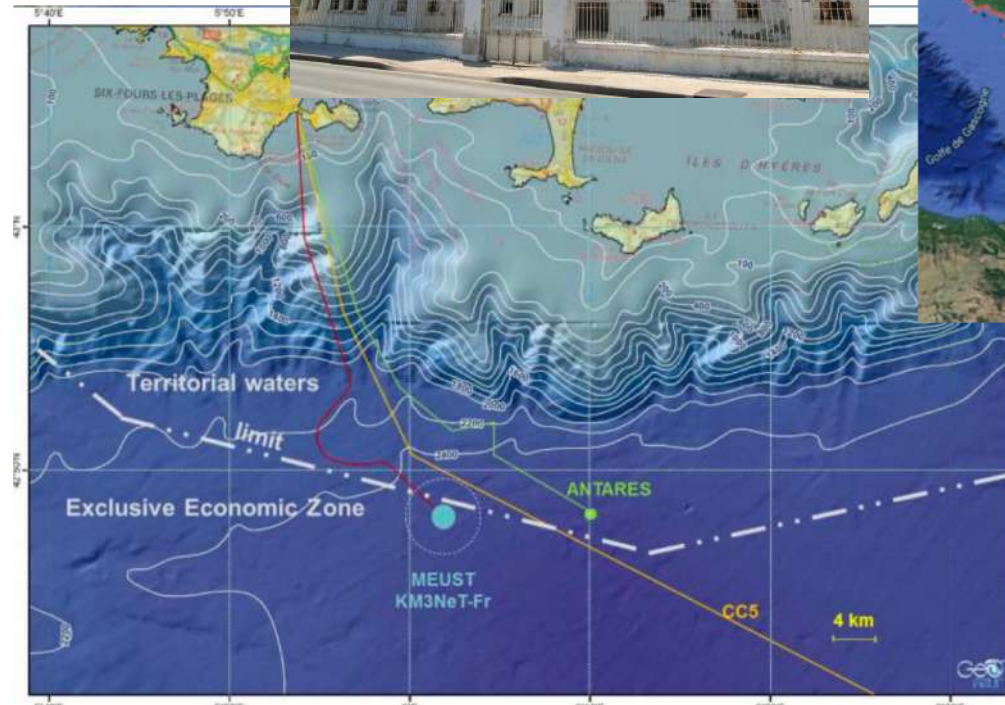
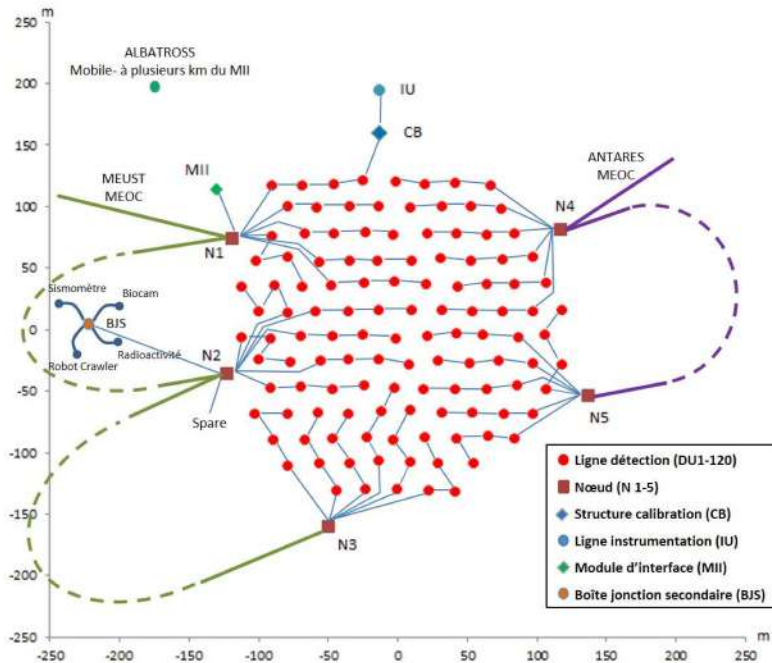
36 (ARCA) /9 (ORCA) m distanza tra i DOM

72 (ARCA) /36 (ORCA) m distanza ancora – primo DOM

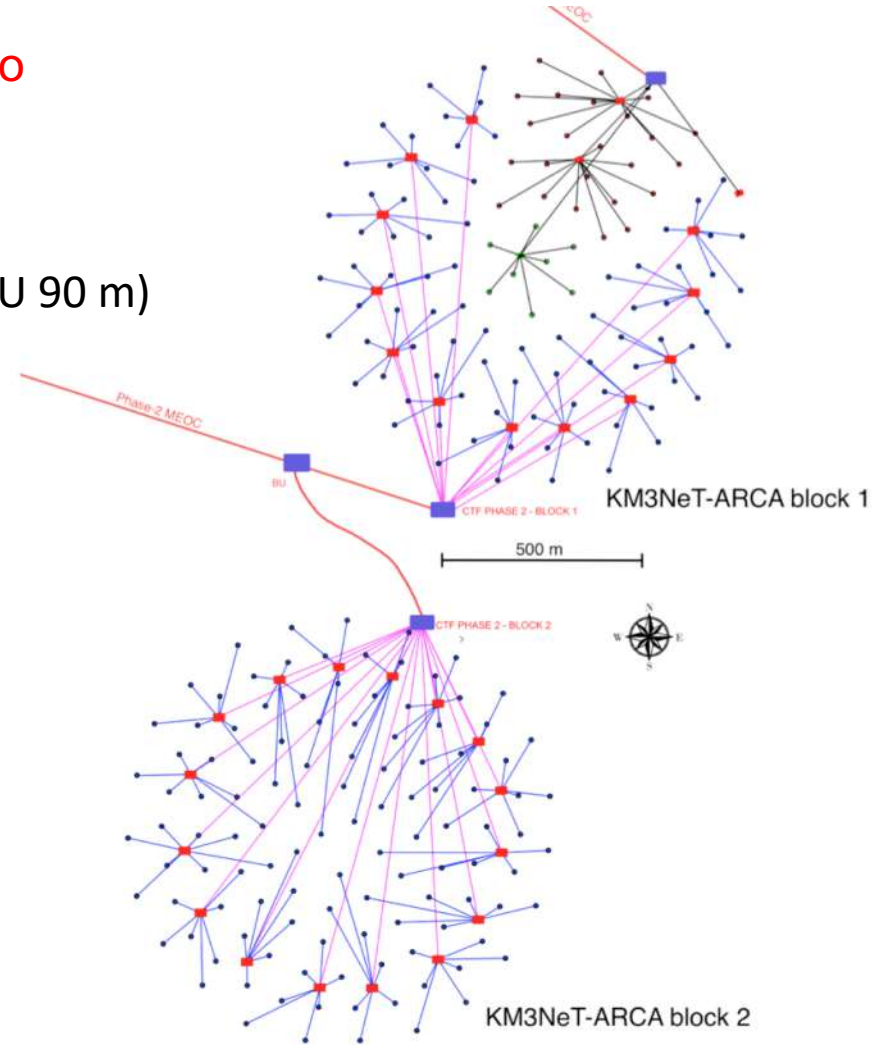
750 (ARCA) /250 (ORCA) m altezza totale dal fondo del mare



ORCA @ Toulon
 2500 m di profondità, 40 km dalla costa
 1 building block
 115 units (distanza tra le DU 20 m)
 Massa totale: 7 Mton



ARCA @ Capo Passero
3500 m di profondità,
100 km dalla costa
2 building block
230 DU (distanza tra le DU 90 m)
Volume totale: 1 km³



Alte prestazioni: massimizzare la potenza disponibile e la velocità di trasmissione dati

Alta affidabilità: 20 anni di vita 24 ore su 24, 7 giorni su 7, "nessuna" manutenzione

Alta disponibilità: ridondanze, riconfigurazione

Sicurezza: conservazione delle infrastrutture e delle attrezzature

Tutti i dati inviati in tempo reale a terra per l'analisi

Trasferimento dati 0,5 (tipico) – 1 (max) Gbps per unità

La precisione di puntamento dipende da:

Sincronizzazione temporale precisa dei sensori: 1 ns

Monitoraggio preciso della posizione dei sensori: 10 cm

Main Electro-Optical Cable 1:

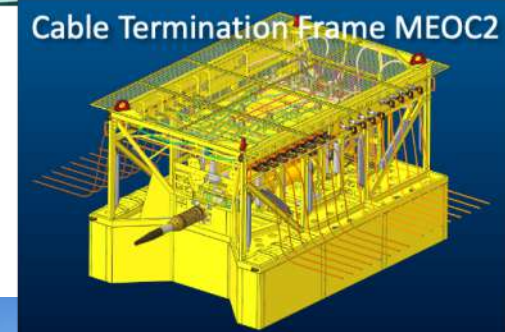
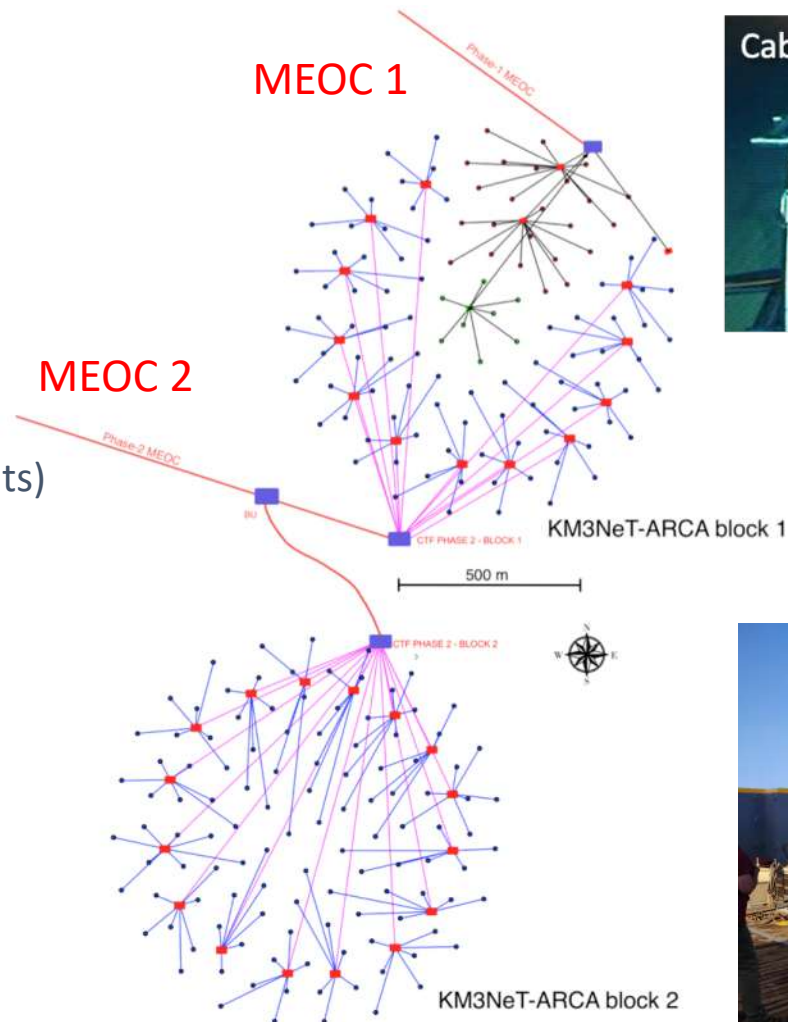
100 km-long e.o. cable 20 fibers, 1 conductor (DC)
 Cable Termination Frame (5 independent e.o. outputs)
 "Standard" DC Solution

Main Electro-Optical Cable 2:

100 km-long e.o. cable 48 fibers, 2 conductors (DC)
 Cable Termination (16 independent e.o. electrical outputs)
 new design from Alcatel

Submarine Network:

Star-like power and optical distribution system:
 Cable Termination → Junction Boxes → Detection Units



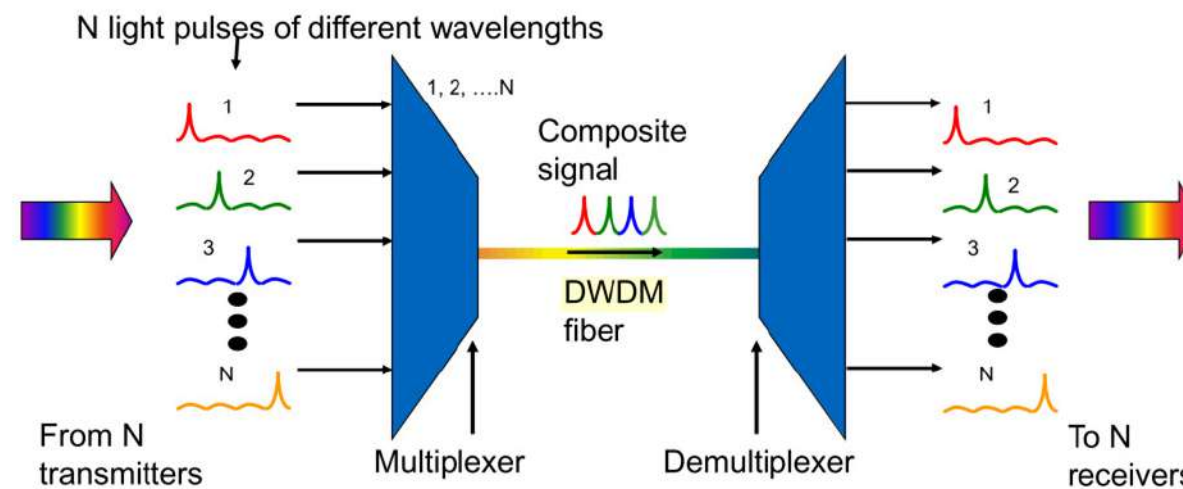
Sfida:

- Distribuzione dei comandi di controllo dalla costa a una matrice sottomarina di migliaia di nodi e a una distanza di 100 km dalla costa
- Ricezione dei dati da singoli nodi ad alta velocità di trasmissione dati
- Riduzione al minimo dell'uso di componenti elettro/ottici attivi offshore (costi / affidabilità)

Soluzione:

Rete ottica basata sulla tecnologia
Dense Wavelength Division Multiplexing

Compiuta!



Sfida:

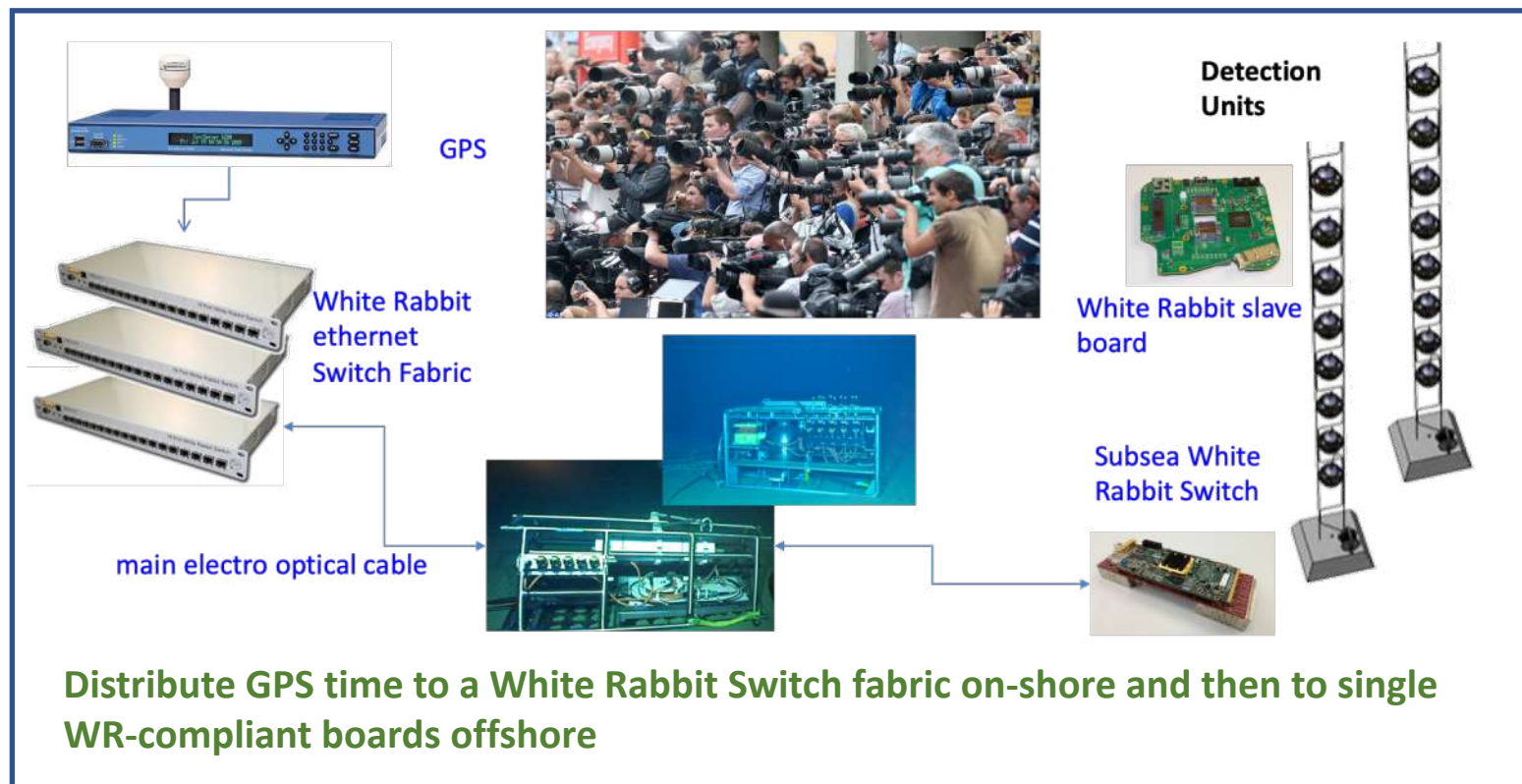
- Sincronizzazione con una precisione di 1 ns di migliaia di nodi in un array sparso in acque profonde
- Sincronizzazione mantenuta per più di 20 anni

Soluzione:

Protocollo di sincronizzazione basato sulla tecnologia White Rabbit

Calibrazione dei dispositivi White Rabbit, delle fibre ottiche (lunghezze, asimmetrie riva-mare/mare-riva, dispersione cromatica), delle latenze elettroniche di sensori e schede

Compiuta!



Sfida:

- Determinare la posizione assoluta del riferimento del rivelatore con una precisione di 2 m
- Determinare la posizione relativa di ciascun elemento con una precisione di 20 cm (strutture mobili)

Soluzione:

Utilizzare il sistema di posizionamento assoluto per la navigazione e il posizionamento globale

Costruire una Long Baseline sottomarina di emettitori e ricevitori acustici

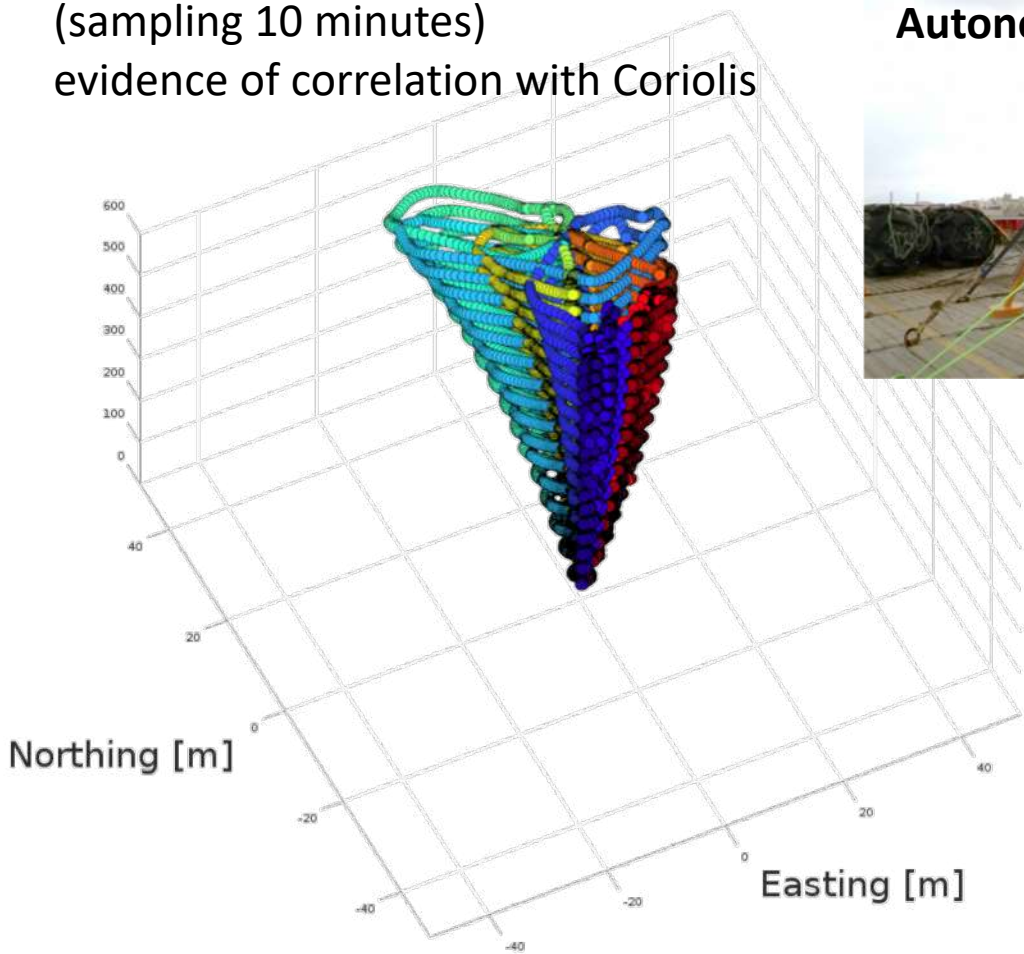
Installare sensori piezoelettrici a basso costo all'interno di ogni elemento mobile (DOM)

Utilizzare la temporizzazione WR assoluta per marcare l'istante di emissione e ricezione del segnale acustico

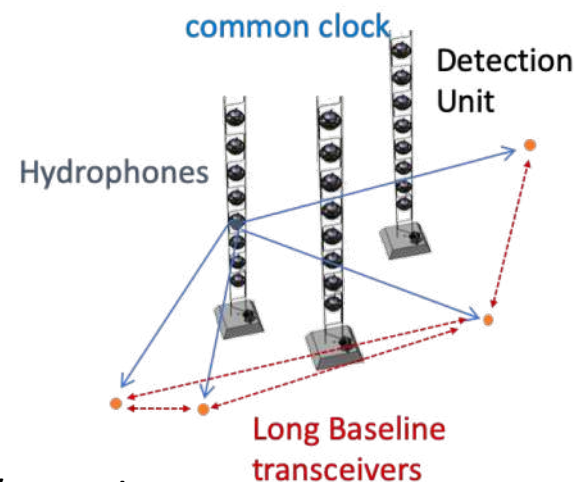
Compiuta!

Trasmissione aggiuntiva a terra di tutti i dati acustici: biologia, geofisica, monitoraggio ambientale...

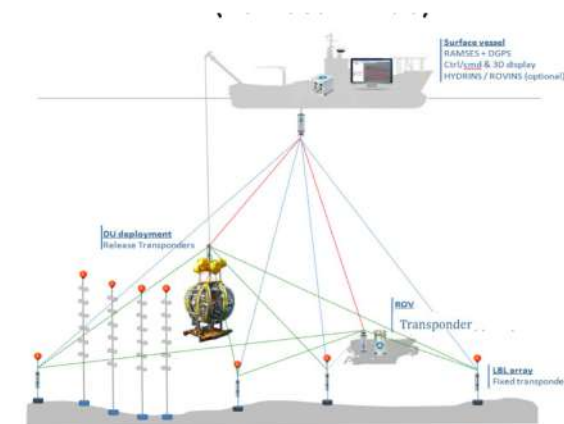
String movements in 12 h
(sampling 10 minutes)
evidence of correlation with Coriolis



Relative Positioning System



Absolute Positioning System



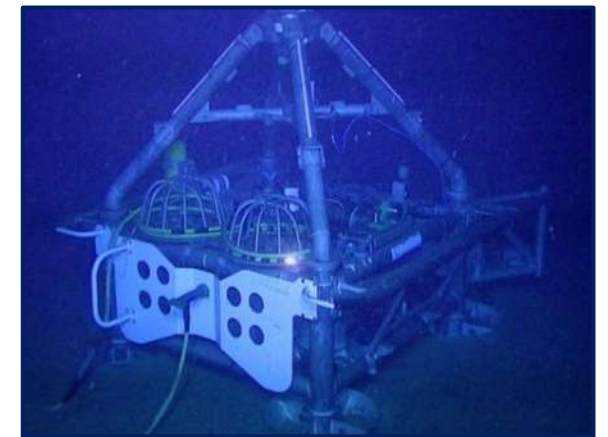
KM3NeT custom solution with European hardware manufacturers/providers

Le infrastrutture e gli osservatori sottomarini di KM3NeT offrono strumenti senza precedenti per:

- sviluppare e testare nuove tecnologie e rivelatori marini
- monitorare la geofisica, i fenomeni biologici e l'impronta antropica

Collaborazione con altri istituti: CNR, INGV,...

Observatori SMO-OnDE e EMSO- SN1 (Catania)



Capodoglio



Balenottera

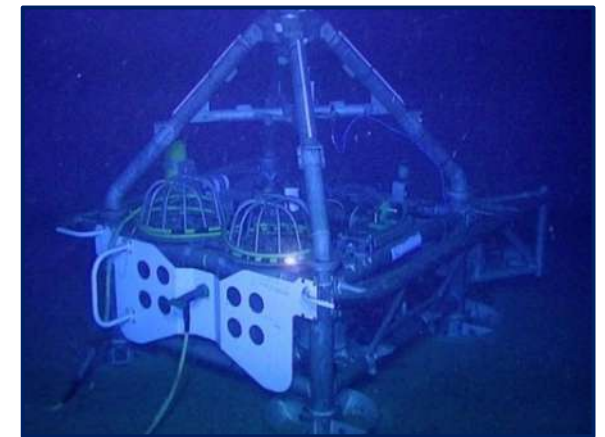
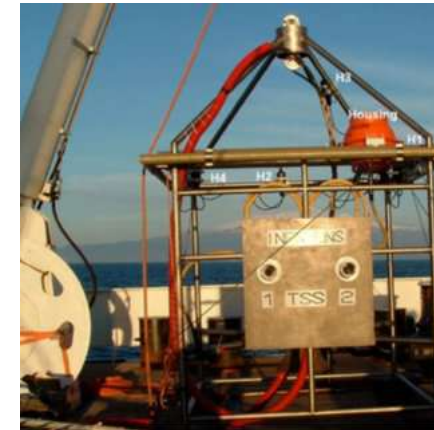
Le infrastrutture e gli osservatori sottomarini di KM3NeT

offrono strumenti senza precedenti per:

- sviluppare e testare nuove tecnologie e rivelatori marini
- monitorare la geofisica, i fenomeni biologici e l'impronta antropica

Collaborazione con altri istituti: CNR, INGV,...

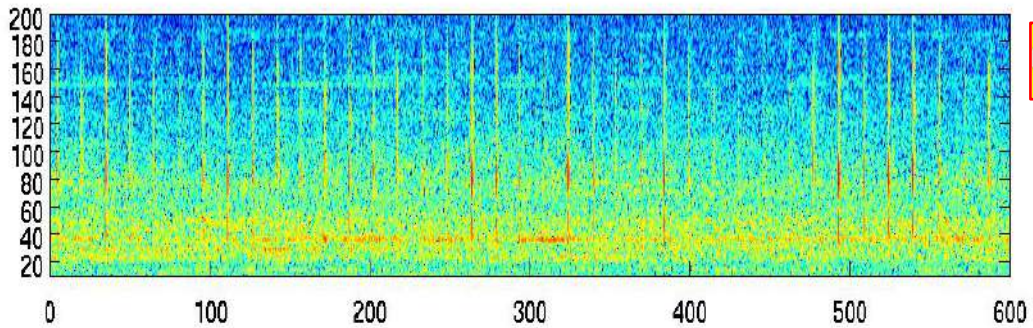
Observatori SMO-OnDE e EMSO- SN1 (Catania)



25 Ottobre 2018

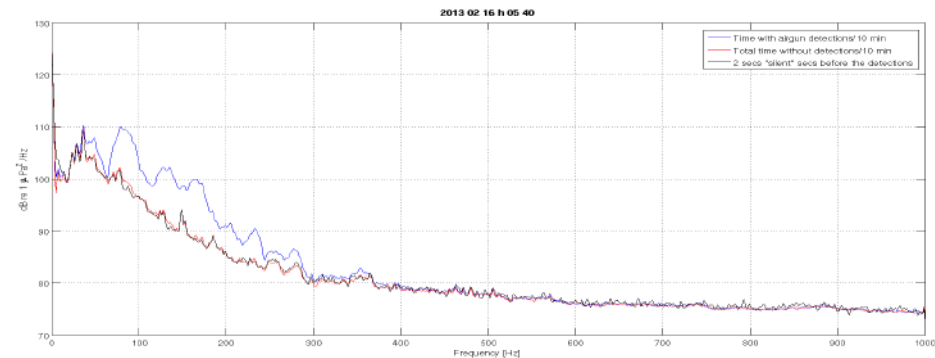
allerta tsunami per le coste di Calabria, Puglia, Basilicata e Sicilia

Real-time identification of “airguns” (compressed-air cannons) – 2012-2013 Submarine Network 1 - EMSO used for geophysics studies and oil/gas search



Italian Ministry of the environment

Noise level increase: 10 dB



Identified source, offshore Greece!



Anticoincidence between airgun shoots and fin whale presence





La posa delle stringhe



Dic 2015: ARCA2

Apr 2021: ARCA6

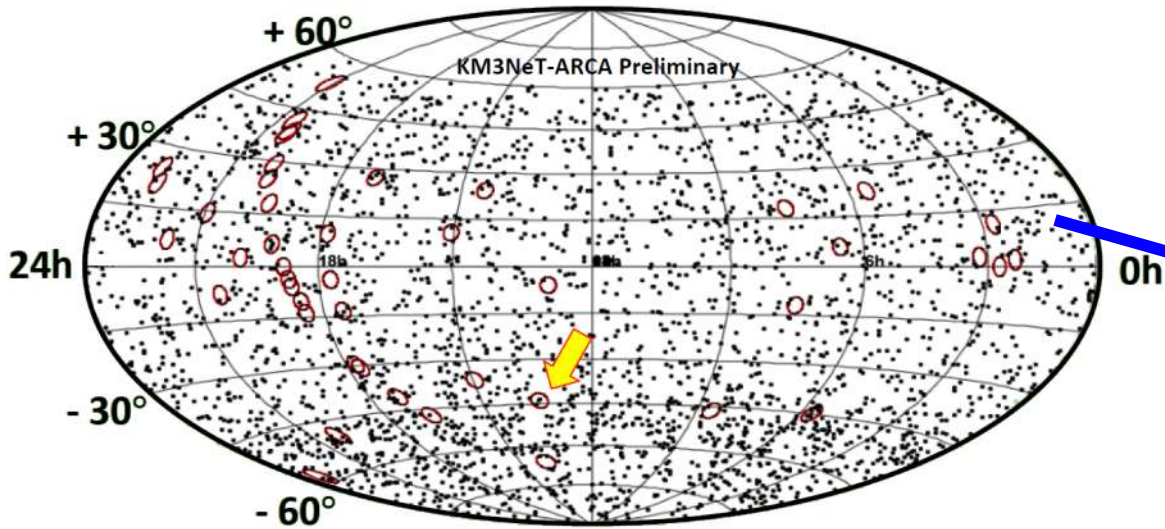
Set 2021: ARCA8

Giu 2022: **ARCA19**

Set 2022: prossima posa

2032: ARCA 2x115



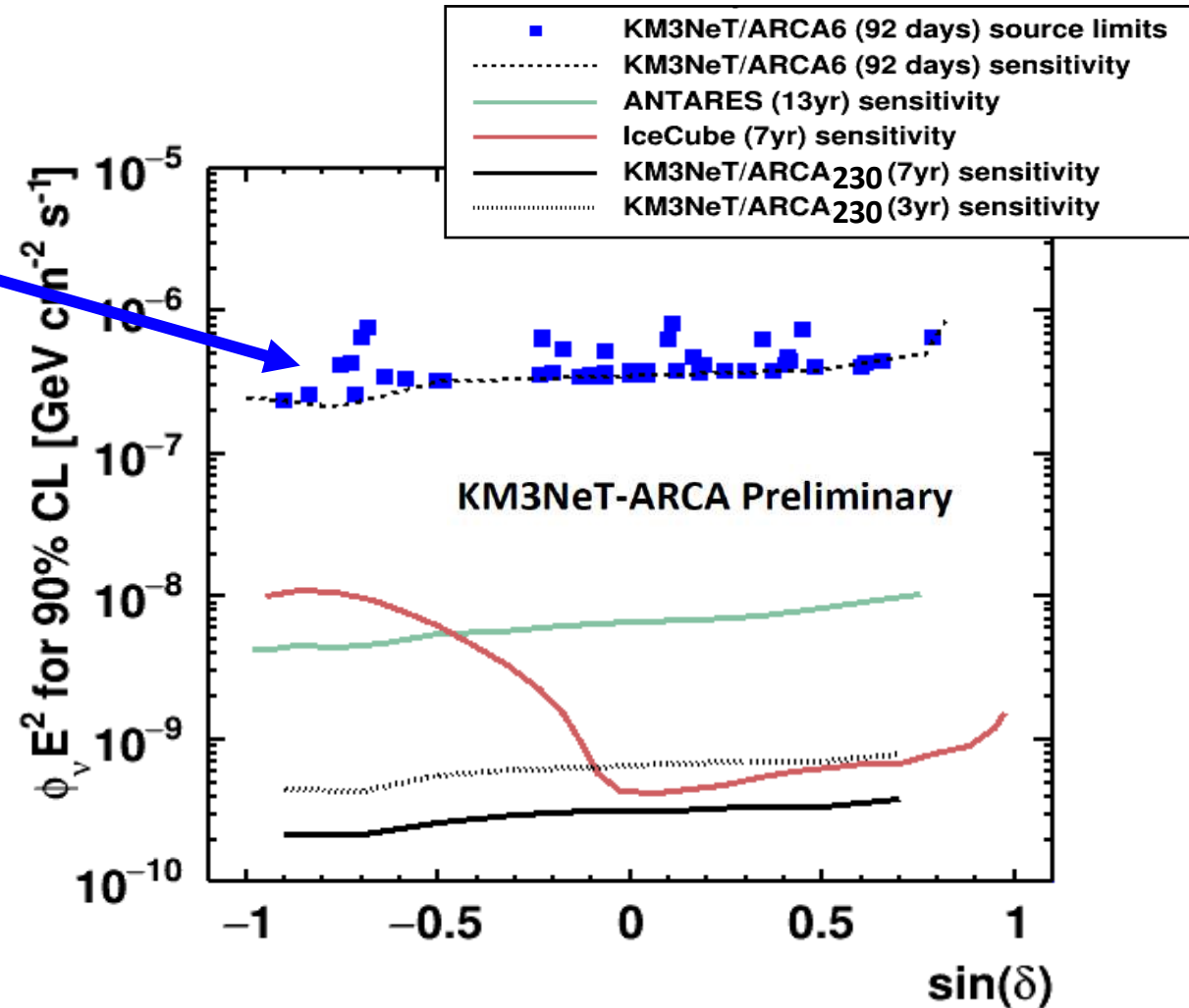


Alcuni dettagli:

- ❖ 46 sorgenti candidate [cerchi rossi]
- ❖ Rivelatore: **ARCA6**
- ❖ Livetime: **92 giorni** (Mag-Set 2021)

Risultati:

- ❖ Nessun eccesso significativo [atteso]
- ❖ Limiti non ancora competitivi [atteso]
- ❖ Migliore sorgente: Centaurus A (radio galaxy; freccia in giallo)



All'interno del PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) è stato pubblicato a fine 2021 un bando dedicato al rafforzamento delle infrastrutture di ricerca esistenti.

Progetto presentato a fine febbraio. Durata del progetto 30 mesi.

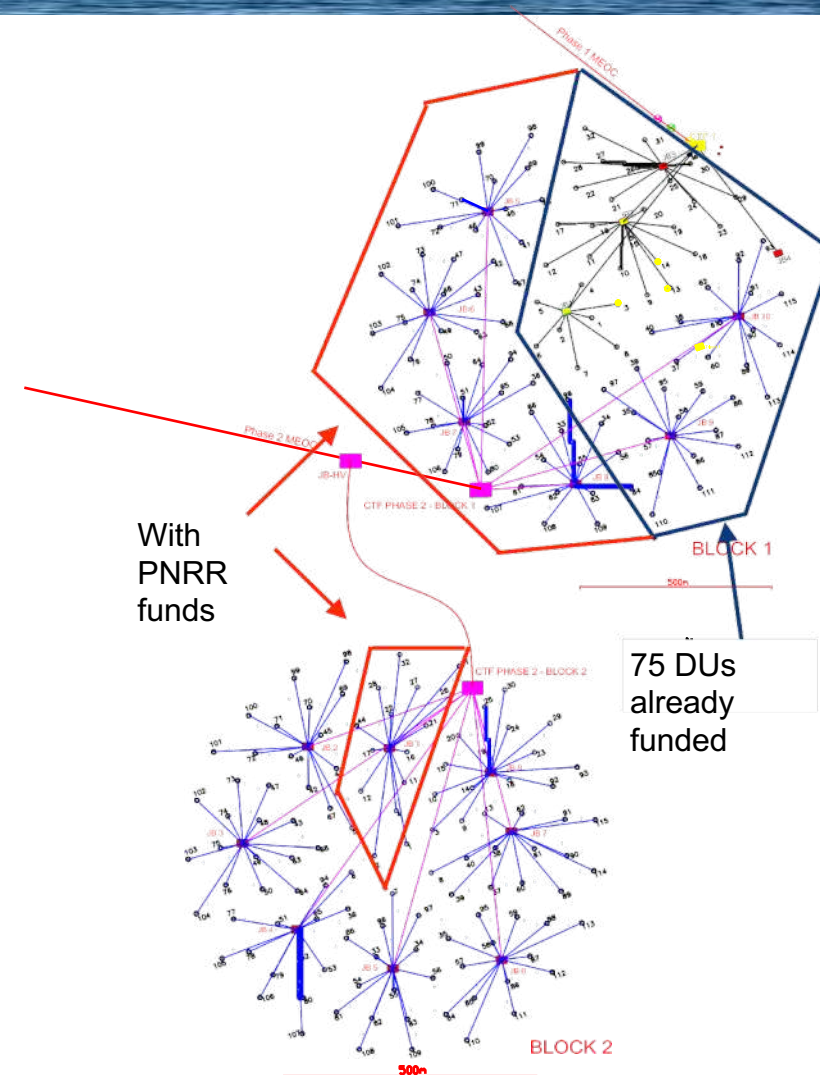
Fondi approvati 67M€

~ 55 DU

- La relativa infrastruttura di fondo (5 JB + 1CTF + cavi di IL)
- Il potenziamento dei laboratori INFN KM3NeT
- Risorse umane

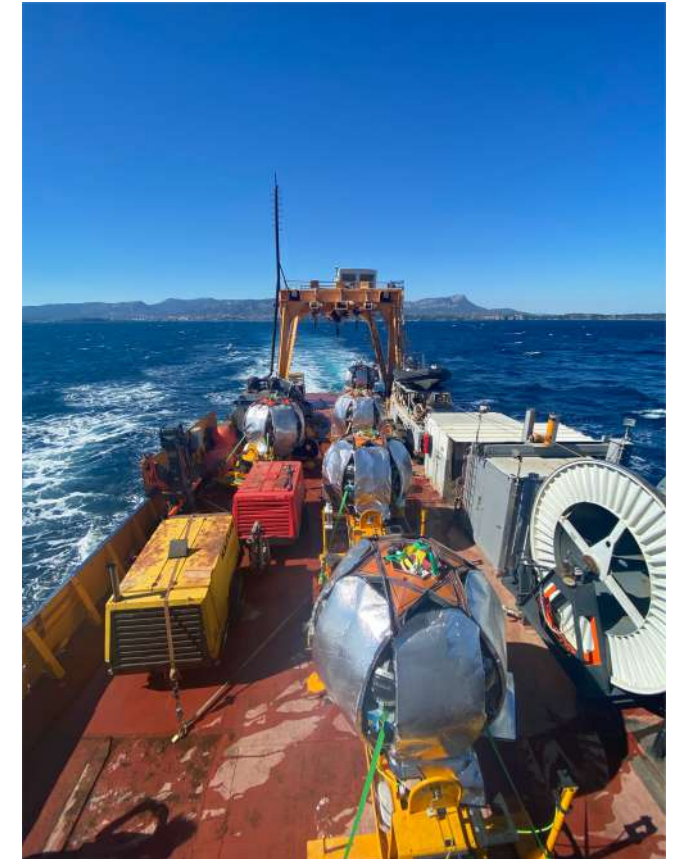
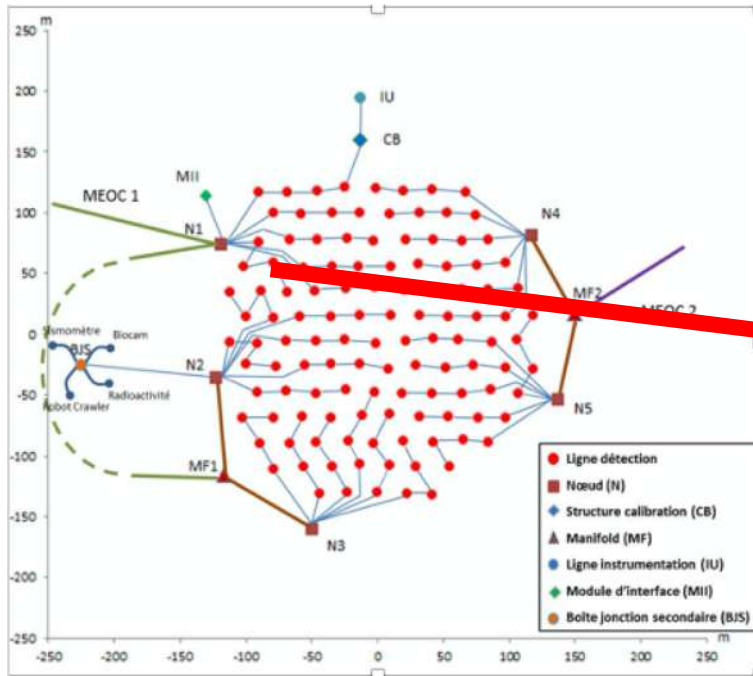
Questi fondi consentiranno il completamento del primo blocco e la costruzione di circa 15 DU del secondo blocco del rivelatore ARCA.

130 DU finanziati finora



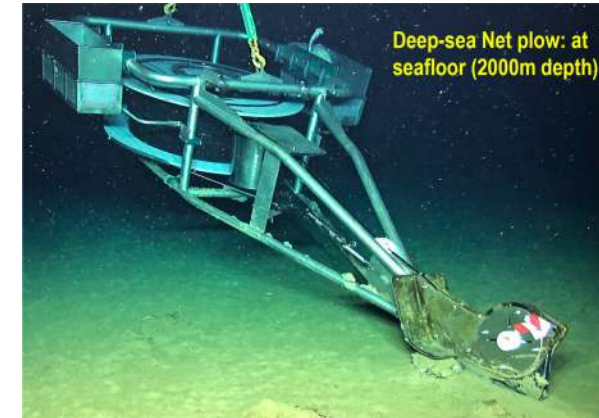


10 DUs now in operation

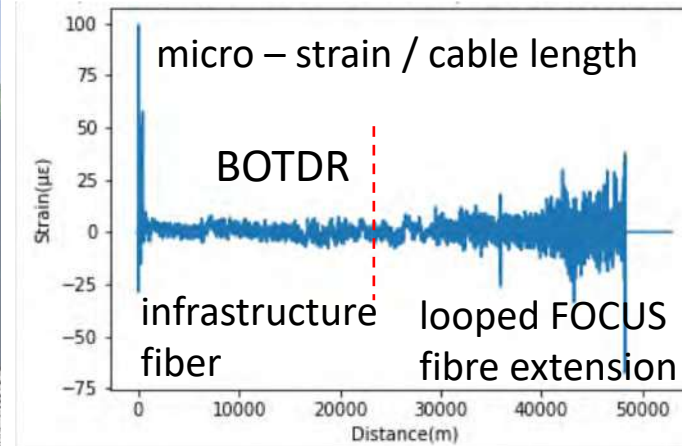
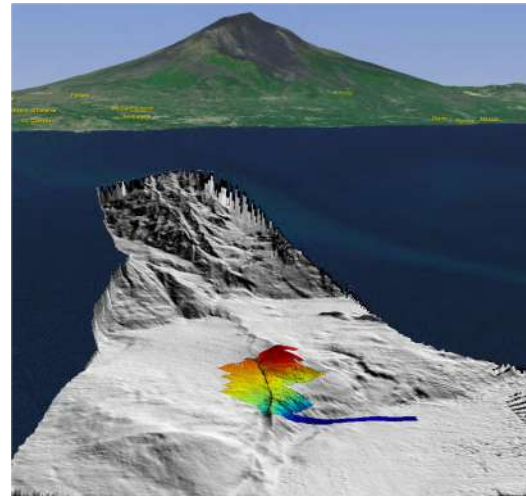
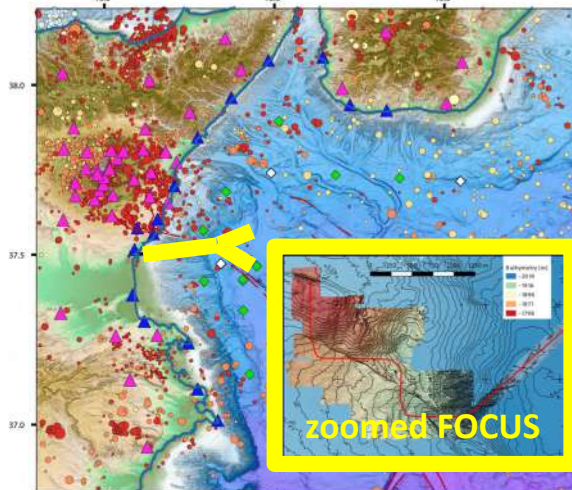


KM3NeT deep-sea infrastructures and observatories offer unprecedented tools to

- develop and test novel marine technologies and detectors
- monitor geophysics and biological phenomena and anthropic footprint



FOCUS (BOTDR technique): acquisition using optical fibres of the Catania Infrastructure plus 6 km extension (looped) Correlation with acoustics (SMO-OnDE/ EMSO-SN1) and seismic data (EMSO-SN1) and geodetic stations, OBS



**FOCUS:
MONITORAGGIO DELLE
FAGLIE SOTTOMARINE IN
SICILIA**
Monte sottomarino Alfeo, a
est di Catania,

<https://www-iuem.univ-brest.fr/lgo/les-chantiers/erc-focus/>