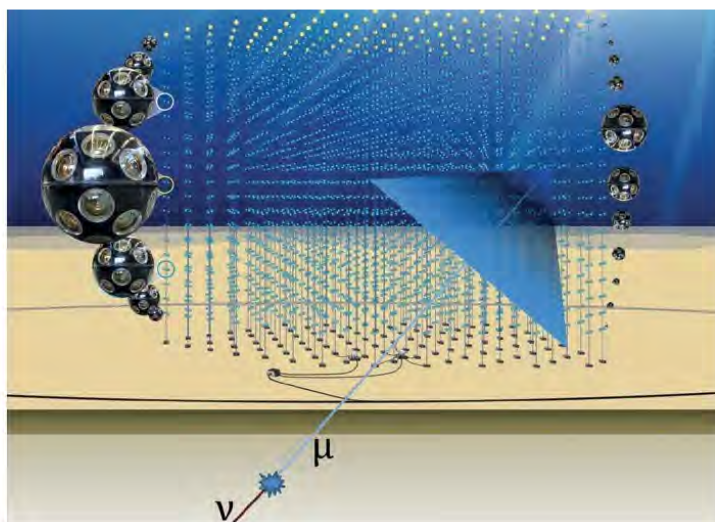


# CACCIA AI NEUTRINI

## nelle profondità del Mediterraneo



Il telescopio per neutrini KM3NeT sarà formato da circa 200 strutture flessibili verticali (le stringhe), alte circa 800 metri ed occuperà un volume d'acqua di più di un chilometro cubo. Le stringhe saranno ancorate sul fondo marino e deposte in un fondale di 3500 metri di profondità. La costruzione del rivelatore al largo di Capo Passero è già iniziata, grazie ad un finanziamento PON (Programma Operativo Nazionale).

**T**remila cinquecento metri di profondità, cento chilometri al largo di Capo Passero, all'estremo Sud della Sicilia: il fitto buio degli abissi del Mar Ionio è solcato da una debole scia di luce blu, una scia lunga quasi un chilometro ma impossibile da vedere ad occhio nudo. Termina così il viaggio di un neutrino di altissima energia, prodotto a migliaia o milioni di anni luce dalla Terra, in una delle potenti fornaci cosmiche che popolano l'universo.

E qui inizia l'avventura di centinaia di ricercatori il cui scopo è riconoscere que-

sti segnali luminosi, registrarli e studiarli per ricostruire l'identikit dei neutrini che li hanno prodotti: quale energia avevano, da quale direzione provenivano e, infine, individuare le sorgenti astrofisiche ed il meccanismo fisico che permette la produzione dei neutrini di altissima energia.

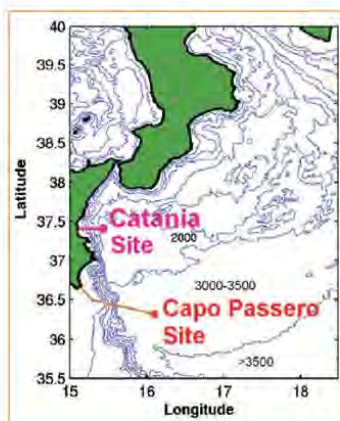
La sfida dei ricercatori è quella di costruire un enorme apparato sottomarino, formato da migliaia di occhi elettronici capaci di identificare ogni singolo fotone prodotto in mare dal passaggio di particelle cosmiche. I sensori saranno distribuiti su una superficie estesa come la città di

KM3NeT sarà non solo il più grande telescopio per neutrini di alta energia ma anche il più grande laboratorio sottomarino interdisciplinare del pianeta, utile per lo studio dei cetacei, la rilevazione degli tsunami e per il controllo dell'ecosistema marino



**Giorgio Riccobene**

È un ricercatore dei Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN. Ha partecipato agli esperimenti NEMO, Antares e partecipa oggi al progetto KM3NeT. È stato principal investigator del progetto FIRB-2008 SMO (Submarine multidisciplinary Observatory). Dal 2005 collabora anche con INGV, CNR e varie università italiane per lo sviluppo di sistemi di monitoraggio del mare profondo.



I Laboratori Nazionali del Sud hanno realizzato due infrastrutture sottomarine. Una infrastruttura di test, oggi utilizzata per studi multidisciplinari, a 2100 metri di profondità al largo di Catania e l'infrastruttura per KM3NeT, 100 km a Sud Est di Portopalo di Capo Passero (Siracusa).

Siena occupando un volume d'acqua totale di qualche chilometro cubo, dal fondo marino fino a circa 800 metri più in alto. Questo è l'ambiziosa architettura prevista per il progetto *Kilometre Cube Neutrino Telescope* (KM3NeT) o, più semplicemente, chilometro cubo [v. *schema*].

I sensori dell'apparato saranno installati su duecento strutture verticali dette "stringhe", distanti 100 metri l'una dall'altra. Ogni stringa ospiterà 18 moduli ottici digitali (*i DOM*, v. *figura p. 42*) una sorta di occhio di mosca elettronico a sua volta formato da 31 sensori ottici – i fotomoltiplicatori – in grado di captare la luce prodotta da qualunque direzione nel volume d'acqua osservato. Le stringhe saranno ancorate al fondo marino con una zavorra e tenute in tensione da una boa che fluttua circa 800 metri più in alto. I DOM saranno distribuiti lungo la stringa a circa 40 metri l'uno dall'altro, connessi meccanicamente alla zavorra e alla boa da due cime di una fibra tessile ultrasensibile e saranno connessi elettronicamente alla base da una sottile "spina dorsale" di fibre ottiche e conduttori elettrici.

Per resistere alle altissime pressioni degli abissi marini (la pressione aumenta di 1 bar ogni 10 metri, in acqua) e ai fenomeni di corrosione dovuta alla presenza dei sali disciolti in acqua, i sensori sono protetti

all'interno di sfere cave del diametro di circa mezzo metro, costruite con uno speciale vetro borosilicato dello spessore di un solo centimetro.

Dentro ogni sfera una scheda elettronica permette di acquisire i segnali dei fotomoltiplicatori, digitalizzarli e inviarli a terra utilizzando un piccolo ma potente laser e una rete di fibre ottiche che corre lungo la "spina dorsale" della stringa fino a raggiungerne la base. Ogni base della stringa è connessa da una rete di cavi in fibra ottica deposti sul fondo marino e da un cavo sottomarino principale, lungo circa 100 km, che arriva fino alla terraferma, nel porto di Portopalo di Capo Passero. Lì il cavo è connesso all'interno della stazione di acquisizione realizzata dai Laboratori Nazionali del Sud dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), che ospita i sistemi di alimentazione dell'apparato, i sistemi di comunicazione e di acquisizione e analisi dei dati.

La prima stringa è stata posata il 3 dicembre scorso, e il primo blocco di 24 stringhe, finanziato grazie ad un progetto PON-ricerca e da circa 10 paesi Europei – Italia, Olanda e Francia in testa – sarà completato nel 2017. Nel 2020 il rivelatore dovrebbe raggiungere la configurazione finale.

### I perché di KM3NeT

Ma cosa farà esattamente KM3NeT? E perché a costruirlo proprio a Portopalo? Chilometro cubo sarà il più grande telescopio sottomarino per neutrini astrofisici di altissima energia. Il suo scopo è individuarli (rivelarli, si dice nel gergo dei fisici) per misurarne direzione ed energia e infine correlare la direzione di arrivo con una sorgente cosmica.

Secondo molti modelli astrofisici, infatti, alcune sorgenti presenti nella Galassia (per esempio i resti di supernova ed il centro galattico) e altre al di fuori di essa (i nuclei galattici attivi e i progenitori dei *Gamma Ray Burst*) sono capaci di accelerare particelle cariche, come i protoni e i nuclei, fino ad energie enormi: da centinaia di migliaia di miliardi di elettronvolt (per le sorgenti galattiche) fino a mille miliardi di miliardi di elettronvolt (in alcune sorgenti extragalattiche). La più potente particella cosmica mai identificata avrebbe potuto accendere una lampadina da 10

Watt per un decimo di secondo. Per intenderci, il potentissimo acceleratore LHC del CERN di Ginevra raggiunge "solo" 14 mila miliardi di elettronvolt e resterà insuperato per i prossimi 20 anni almeno. Il problema dei ricercatori è che le particelle cariche prodotte nelle sorgenti astrofisiche, chiamate dai fisici "raggi cosmici", sono deflesse, nel loro viaggio verso la Terra, dai campi magnetici galattici e intergalattici, il che non permette di associarle ad una specifica sorgente. Inoltre, le particelle più energetiche, che sarebbero solo leggermente deflesse dai campi magnetici, perdono energia o vengono assorbite interagendo con i fotoni di bassa energia che popolano l'universo, i ben noti fotoni del fondo cosmico di microonde. Siamo di fronte ad uno dei misteri della fisica moderna: l'origine dei raggi cosmici. Per superare questa impasse i fisici hanno individuato una via alternativa, cioè rivelare i fotoni e i neutrini che si generano quando i raggi cosmici interagiscono all'interno delle sorgenti. Fotoni e neutrini non subiscono l'effetto dei campi magnetici e quindi sono perfette sonde astronomiche. Misurare i fotoni è la via maestra dell'astronomia, e i risultati non si sono fatti attendere da quando i telescopi Čerenkov, che rivelano i raggi gamma ultra-energetici, sono entrati in azione circa 15 anni addietro. La nostra mappa del cosmo si è popolata con centinaia di sorgenti individuate dai telescopi di raggi gamma, alcune di esse mai osservate in altre lunghezze d'onda. Ma anche i telescopi gamma hanno un limite: i fotoni di energia superiore a circa centomila miliardi di elettronvolt sono assorbiti dal fondo cosmico di microonde, impedendo l'osservazione di sorgenti distanti più di 100.000 anni luce dalla Terra. Inoltre, i fotoni possono essere prodotti anche da sorgenti che non accelerano protoni e nuclei ma solo elettroni e positroni. Distinguere i due scenari è molto complesso. I neutrini, invece, possono essere prodotti solo nelle sorgenti dei raggi cosmici e da lì propagarsi indisturbati nell'universo, insensibili ai campi magnetici e ai fotoni del fondo cosmico, grazie al fatto che hanno solo interazioni "deboli" con le altre particelle e che lo spazio è sostanzialmente vuoto di materia. Quando un neutrino incontra nel suo percorso un mezzo denso come la Terra, ha



una probabilità, piccola ma finita, di interagire. Se questa interazione avviene in un mezzo trasparente, come l'acqua marina o i ghiacci antartici, il neutrino cede parte della sua energia e scambia la carica debole con un nucleone (attenzione il neutrino ha carica debole, che non è la ben più nota carica elettrica). Il neutrino si trasforma così in una particella carica (un elettrone, un muone o un tauone) che ha, con buona approssimazione, la direzione e l'energia del neutrino. A sua volta questa particella cede la propria energia nel mezzo attraversato; energia che viene, in piccola parte, ceduta sotto forma di radiazione luminosa nelle frequenze dell'ultravioletto e del blu. In acqua marina la luce ultravioletta viene subito assorbita, mentre la luce blu si propaga efficacemente e può essere, quindi, osservata dai sensori del telescopio.

### Perché a Capo Passero

Dopo una lunga attività di ricerca e monitoraggio nel Mar Mediterraneo, l'area marina eletta per la costruzione del telescopio per neutrini KM3NeT è stata quella al largo di Portopalo di Capo Passero. In quest'area la trasparenza del-

le acque è ottimale per l'identificazione e la ricostruzione delle tracce luminose; la batimetria mostra una piana abissale molto profonda e distante da dirupi e canyon, permettendo l'installazione sicura e modulare di un gran numero di sensori. Le correnti sottomarine hanno una velocità media di 3,5 cm/s e cambiamenti di direzione molto lenti, che non alterano drammaticamente la geometria del rivelatore in funzione del tempo.

Infine, l'attività biologica è molto inferiore rispetto ad una zona costiera, riducendo la presenza di organismi bioluminescenti, che possono, con le loro emissioni, mascherare gli eventi cercati. Studiare il mare profondo è, quindi, assolutamente necessario per comprendere come risponderà l'apparato ai segnali di neutrino. Diversamente dai classici esperimenti di fisica delle particelle in laboratorio, i ricercatori di KM3NeT hanno a che fare con un apparato immerso in un mezzo "vivo", le cui condizioni cambiano nel tempo e vanno monitorate in tempo reale. I dati ambientali registrati devono permettere di riprodurre, nelle simulazioni al computer, lo stato del sistema e la risposta del rivelatore

in modo molto preciso. Ma quello che è un "limite" per i fisici, sempre attenti ad avere a che fare con condizioni sperimentali note e riproducibili, è una enorme opportunità per oceanografi, biologi ed ecologi.

Così è subito iniziata la collaborazione tra fisici e scienziati del mare per investigare i segreti dell'oceano, l'ambiente più estremo e meno noto all'uomo insieme allo spazio. Gli esempi di questa stretta interazione sono numerosi.

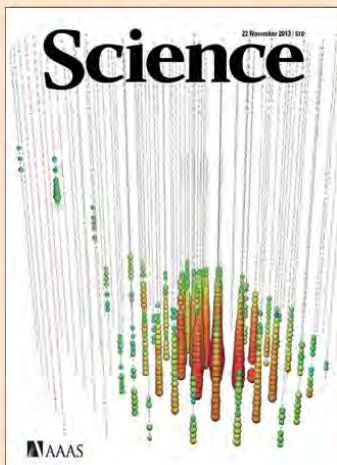
### L'esperimento Antares e la bioluminescenza

Una delle più interessanti ricerche multidisciplinari è stata condotta in collaborazione tra i fisici del progetto *Antares* e un team di biologi che ha studiato le variazioni temporali della bioluminescenza ad altissima profondità al largo di Tolone. La bioluminescenza è un fenomeno di fotoproduzione chimica da parte di microrganismi o pesci, utilizzata probabilmente per scopi di comunicazione. L'emissione di luce da parte di organismi bioluminescenti aumenta il numero di falsi segnali registrati dai sensori del telescopio e peggiora le performance del rivelatore, fino

### ICECUBE E GLI ALTRI

Il più grande telescopio per neutrini di alta energia oggi in funzione si chiama *IceCube* ed è formato da circa 6000 occhi elettronici installati fra 2500 e 1500 metri di profondità nei ghiacci della calotta polare antartica, in un'area di circa 1 chilometro quadrato al di sotto del Polo Sud geografico. Dal 2011 *IceCube* identifica circa 10 neutrini cosmici l'anno. I quattro neutrini più energetici arrivano ad oltre centomila miliardi di elettronvolt. *IceCube* ha fornito la prima evidenza di neutrini di altissima energia prodotti al di fuori del Sistema Solare, meritando la prestigiosa copertina di *Science* (<http://icecube.wisc.edu/news/view/171>).

Nell'emisfero Nord della Terra, sono in funzione l'esperimento *Neutrino Telescope-Baikal*, a circa 1500 metri di profondità sotto l'omonimo lago siberiano ed *Antares*, il papà di KM3NeT. *Antares* è formato da circa 900 "occhi", disposti in 12 stringhe alte 300 metri, a 2500 metri di profondità 40 km a Sud di Tolone in Francia. Entrambi



La copertina di *Science* del 22 novembre 2013, mostra un evento prodotto da un neutrino ultra-energetico osservato da *IceCube*. La dimensione delle sfere (I DOM) è proporzionale alla quantità di luce registrata; il colore (dal rosso al blu) indica il tempo a cui il fronte d'onda è arrivato sui foto-moltiplicatori.

telescopi non hanno una dimensione tale da poter osservare il flebile flusso di neutrini delle più lontane sorgenti celesti, ma hanno un vantaggio: possono osservare con una sensibilità prossima a quella di *IceCube* il centro e buona parte della Via Lattea. Il centro della Via Lattea si può osservare ad occhio nudo dall'emisfero Sud della Terra, ma i telescopi per neutrini, si dice in gergo, "guardano verso il basso". I segnali che i ricercatori reputano "migliori" sono, infatti, le scie luminose che si propagano dal fondo verso la superficie del mare, segno inequivocabile che è stato un neutrino a produrli, perché il neutrino è l'unica particella nota che può attraversare l'intera Terra. Quindi i telescopi installati nell'emisfero Nord possono osservare il centro della Galassia meglio di *IceCube*.





Il DOM, *Digital Optical Module*, è l'elemento base del rivelatore. 31 fotomoltiplicatori disposti ad occhio di mosca all'interno di una sfera di borosilicato resistente alle alte pressioni dell'ambiente marino. Il DOM è corredato con un sensore acustico ed una bussola per ricostruirne la posizione e l'orientamento sott'acqua. I dati acquisiti vengono spediti a terra da un potente laser connesso ad una rete di fibre ottiche.

– in alcuni casi – ad “accecare” una buona parte dei sensori ottici per frazioni di tempo non trascurabili. Non è ancora chiaro cosa scateni il fenomeno dell'emissione ottica, ma grazie all'esperimento *Antares* è stata trovata una forte correlazione con le correnti sottomarine e con i cicli stagionali di rimescolamento delle acque superficiali con quelle abissali. L'interesse per questo fenomeno ha anche portato all'installazione di una telecamera sottomarina connessa al sistema di trasmissione dati di Antares, in grado di catturare in tempo reale le immagini dei macro-organismi che emettono *flash* di luce in prossimità del rivelatore.

I dati acquisiti dai sensori ottici sono anche stati correlati con i dati ottenuti dall'ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*, un correntometro a profilatura verticale ad effetto Doppler acustico) installato sul rivelatore.

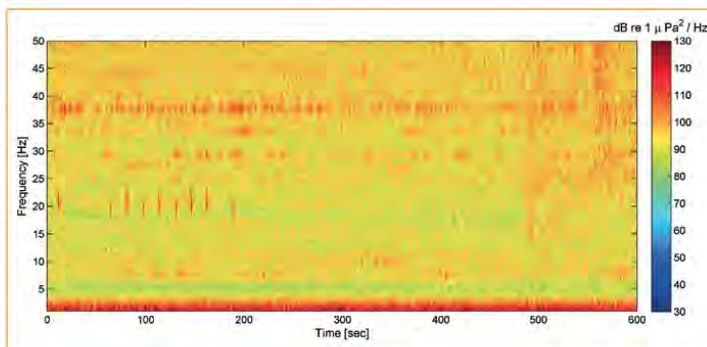
Negli stessi periodi in cui si verificava l'aumento di bioluminescenza, il correntometro segnalava l'aumento di correnti verticali e la presenza di particelle acusticamente riflettenti, inclusi i micro-organismi ritenuti responsabili dell'aumento del rumore ottico. Al largo di Capo Passero, invece, la rete di correntometri installata a profondità compresa tra 3000 e 3400 metri, ha permesso di individuare per la prima volta il passaggio di lenti vortici abissali, di diametro pari a circa 100 km, con moto ciclonico e anticiclonico. Un fenomeno mai osservato prima in Mar Mediterraneo, probabilmente indice di un cambiamento del sito di produzione e trasporto delle acque profonde nel Mediterraneo Centrale. Ma i risultati forse più avvincenti sono arrivati dall'acustica. Per monitorare come le strutture meccaniche del telescopio si

muovono sotto l'effetto delle correnti, non c'è altra via che installare una piccola rete di fari acustici sul fondo del mare i cui segnali sono recepiti e triangolati grazie a ricevitori (idrofoni) montati sul rivelatore. Il suono, infatti, si propaga in mare per chilometri, una distanza molto maggiore di quella percorsa dalla luce (meno di cento metri). Il suono è quindi anche una formidabile fonte di informazioni per comprendere ciò che accade nell'oceano. Per tale motivo i ricercatori dell'INFN hanno sviluppato idrofoni sensibilissimi, elettronica a bassissimo rumore ed un sistema in grado di sincronizzare tutti i sensori dell'antenna. Questa tecnologia – che in futuro potrà essere utilizzata anche per cercare i debolissimi segnali acustici che dovrebbero essere prodotti dall'interazione di neutrini di altissima energia in acqua –

si è rivelata un formidabile strumento per l'identificazione e il tracciamento dei cetacei e per il monitoraggio dell'inquinamento acustico marino. I primi sensori acustici furono installati nel 2005 al largo delle coste di Catania, dove i Laboratori Nazionali del Sud hanno realizzato un'infrastruttura sottomarina di test, simile a quella di Capo Passero, a profondità di 2100 metri e a soli 25 km al largo del porto di Catania. Grazie al collegamento in fibra ottica con la terraferma, dove i dati potevano essere registrati 24 ore su 24, in pochi giorni fu raccolta una messe di dati enorme e si identificarono i primi segnali dagli abissi, inequivocabili firme acustiche del passaggio di capodogli. I dati, registrati per due anni e campionati a risoluzione di 24 bit e 96 kHz, sono stati analizzati per studiare i "click", i suoni emessi dai capodogli per eco-localizzare le prede e comunicare. Essi sono emessi da una sacca nella parte frontale del capo e riflessi dalla parte terminale del capo; dall'analisi di questi click si è riusciti a ricostruire le dimensioni dei capodogli e studiare la popolazione presente o in transito nell'area del Golfo di Catania, in precedenza molto poco studiata. Come atteso dai biologi, i segnali registrati sono soprattutto provenienti da femmine adulte o giovani maschi, mentre i grandi maschi dovrebbero essere più presenti in oceano aperto. La disposizione dei sensori dell'antenna ha permesso anche di tracciare le rotte degli animali e studiare le immersioni profonde – fino a 2000 metri! – che gli animali eseguono durante la caccia.



Un pesce abissale fotografato dal robot sottomarino (ROV) utilizzato per la posa del telescopio KM3NeT al largo di Capo Passero. L'incontro con queste creature è più frequente di quanto atteso.



Spettrogramma (diagramma tempo-frequenza) dei segnali acustici prodotti da una delle balenottere identificate al largo di Catania. La scala di colori indica l'ampiezza del segnale. Le balenottere emettono segnali tonali a 20 Hz. La specie è minacciata dall'inquinamento acustico dei mari.

### KM3NeT: importante anche per tsunami ed ecologia

Nel 2012 l'osservatorio sottomarino di Catania è stato ampliato installando il primo nodo sottomarino cablato del progetto europeo EMSO (*European Multidisciplinary Seafloor Observatory*), grazie alla stretta collaborazione tra Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e altri enti di ricerca. Il nodo ha a bordo sensori oceanografici, sismici ed acustici. In particolare, un nuovo sensore acustico per le basse frequenze ha permesso di monitorare, per la prima volta nel Mar Ionio, la presenza stagionale della balenottera comune. Un'altra applicazione di questi sensori è lo studio dell'inquinamento acustico dei mari,

correlato all'intensificazione del traffico navale. Si stima infatti che negli ultimi 30 anni il rumore in mare sia aumentato di quasi 10 volte, con un probabile effetto sulla popolazione di cetacei. Il nodo EMSO di Catania ha ospitato anche il primo sistema di allerta rapida per tsunami nel Mediterraneo. La correlazione tra i dati dei sensori sismici, magnetici, acustici e di pressione permette di identificare, in tempo reale, i fenomeni geosismici abissali, potenzialmente precursori di tsunami. Il sistema di trasmissione dati può consentire di fornire un'allerta rapida alle autorità competenti, prima che l'onda di tsunami arrivi sulla costa.

Non dimentichiamo, inoltre, che il mare è un enorme serbatoio in cui si conserva circa l'80% del calore prodotto dal cosiddetto riscaldamento globale. Monitorare i parametri chimici, fisici e biologici della colonna d'acqua permette quindi di creare modelli molto più precisi per valutare lo stato e l'evoluzione del clima e gli effetti sulla flora e fauna sottomarina. Un nuovo progetto dei ricercatori del progetto KM3NeT è quello di installare migliaia di sensibilissimi termometri a bordo dell'apparato sottomarino in grado di misurare in tempo reale variazioni del millesimo di grado kelvin nelle acque profonde.

Insomma, KM3NeT sarà non solo il più grande telescopio per neutrini di alta energia ma anche il più grande laboratorio sottomarino interdisciplinare del pianeta, una sfida che scienziati provenienti da tutto il mondo non vogliono mancare. ■