

Il cielo visto dagli abissi

I telescopi per osservare i neutrini

di Giorgio Riccobene

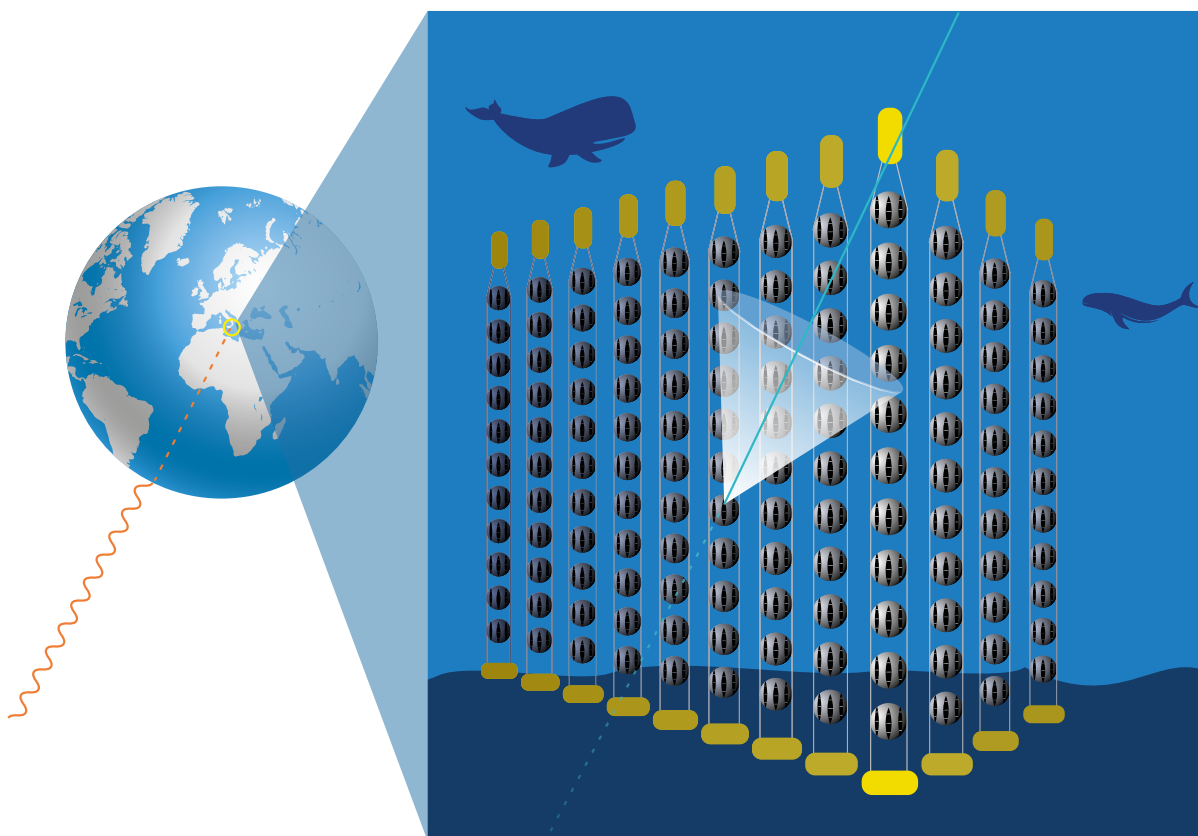


a.
Le unità di rivelazione (stringhe) di KM3NeT-ARCA a bordo della nave Optimus Prime, pronte per essere deposte a 3500 m di profondità. Le stringhe sono avvolte su un lanciatore sferico galleggiante e connesse a una base metallica (pitturata in giallo) che funge da ancora. Il verricello della nave le posa delicatamente sul fondo sotto la supervisione di un robot, che le connette alla rete sottomarina e attua il meccanismo di sgancio del lanciatore.

Mar Ionio, 100 km al largo di Capo Passero, estrema propaggine Sud della Sicilia, sono le 8:00 del mattino del 21 luglio 2025. Lo stridio del motore del verricello annuncia che il robot sottomarino della nave Optimus Prime sta rientrando a bordo dagli abissi, risalendo la murata di dritta. Si chiude così con successo la campagna di installazione di 20 nuove unità di rivelazione del telescopio per neutrini KM3NeT ARCA – Astronomy Research with Cosmics in the Abysses –, che diventa il più grande rivelatore sottomarino mai costruito, occupando un volume di circa 250 milioni di metri cubi nelle profondità del Mar Ionio. Un volume pari a un quarto della sua dimensione finale, di circa 1 km³, che KM3NeT (km³ Neutrino Telescope) raggiungerà attorno al 2030, quando sarà completato. Si tratta di un telescopio molto particolare che rivela, dal fondo del mare, i neutrini cosmici di alta energia: sfuggenti messaggeri celesti, che crediamo essere prodotti in potentissime sorgenti astrofisiche che popolano la nostra Galassia e l'universo.

I neutrini, particelle senza carica elettrica e con massa piccolissima, milioni di volte più piccola di quella dell'elettrone, interagiscono con la materia ordinaria solamente tramite l'interazione debole (il contributo gravitazionale è trascurabile). Al contrario dei raggi cosmici carichi (protoni e nuclei atomici), i neutrini non vengono deflessi dal campo magnetico galattico e non interagiscono con la radiazione cosmica di fondo, che – a energie estreme – impedisce l'osservazione di raggi cosmici di altissima energia da sorgenti distanti oltre qualche milione di anni luce.

I neutrini, pertanto, sono messaggeri astrofisici ideali che, attraversando lo spazio, possono giungere sulla Terra da sorgenti molto distanti, mantenendo invariata la direzione di propagazione. La loro bassa probabilità di interazione con la materia che attraversano è tuttavia un severo ostacolo alla rivelazione dei neutrini. La massa bersaglio necessaria per identificare circa un centinaio di neutrini cosmici l'anno nell'intervallo di



b. Principio di funzionamento di un telescopio per neutrini. I neutrini cosmici di altissima energia (che in figura arrivano dal basso, linea tratteggiata) si propagano anche all'interno della Terra. Quando interagiscono con la materia producono sciami di particelle cariche di alta energia (linea continua). Se questo processo avviene in acqua o ghiaccio, viene irradiata luce UV-blu, detta luce Cherenkov, la cui direzione forma un angolo di circa 42 gradi rispetto all'asse dello sciami. Il numero e la direzione dei fotoni Cherenkov, rivelati dai sensibilissimi sensori di luce che formano il telescopio, permettono di stimare l'energia del neutrino e la direzione da cui proviene.

energia compreso tra qualche TeV (10^{12} eV) e decine di PeV (10^{15} eV) è pari a circa 1 miliardo di tonnellate, che corrisponde, appunto, a circa 1 km^3 d'acqua. Per confronto, basterebbero pochi m^3 di acqua, se volessimo costruire un bersaglio per fotoni cosmici della stessa energia.

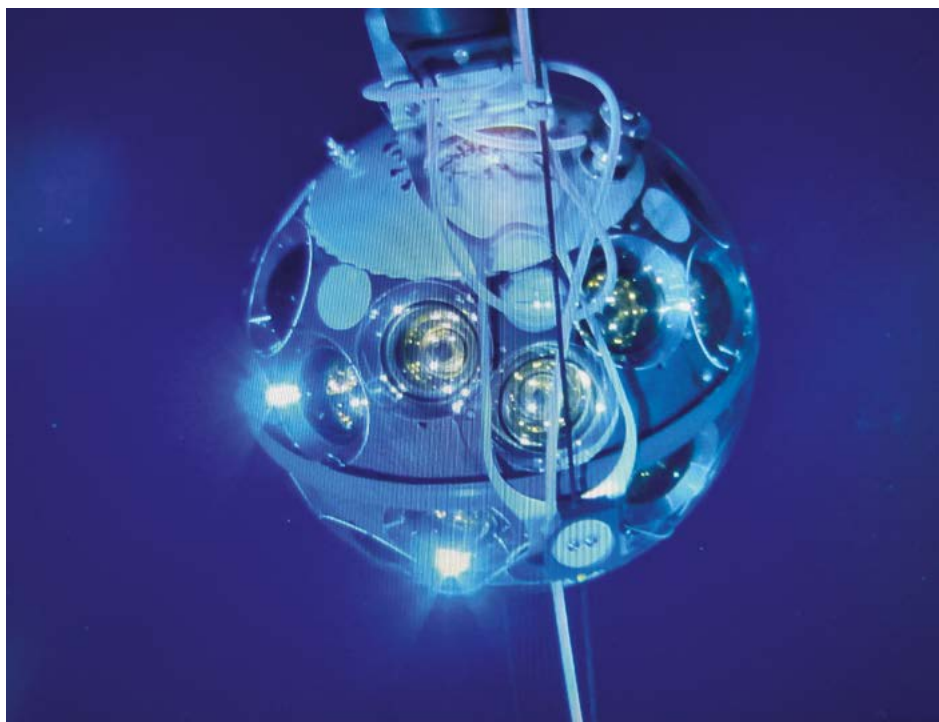
Realizzare un rivelatore capace di monitorare questo enorme volume di materia è estremamente complesso e ha richiesto decine di anni di ricerca e sviluppo per selezionare il sito di installazione e per validare soluzioni tecnologiche che ne permettano il funzionamento in un ambiente marino profondo. La tecnica sperimentale che permette la misura dell'energia e della direzione del neutrino cosmico si basa sull'effetto Cherenkov. Quando una particella carica, con velocità prossima a quella della luce c , attraversa un dielettrico trasparente, ne polarizza le molecole inducendo l'emissione di luce (dall'UV al visibile), con un angolo caratteristico che dipende dal mezzo attraversato. L'effetto è molto simile a quello prodotto da un aereo che viaggia a velocità superiore al suono.

A seguito dell'interazione dei neutrini cosmici con il bersaglio d'acqua, vengono prodotte particelle cariche collineari al neutrino con velocità prossima a c . In acqua esse sono quindi più veloci della luce, che viaggia a $2/3 c$, generando un fronte coerente

di luce blu-verde (i raggi UV sono velocemente assorbiti in mare). Tale fronte si propaga con un angolo ben definito di 42 gradi rispetto alla direzione del neutrino. Il segnale atteso dai neutrini astrofisici è simile a una scia di luce che, in qualche microsecondo, si propaga all'interno del volume d'acqua monitorato. Il numero di fotoni Cherenkov prodotti in questo processo è proporzionale al numero di particelle cariche e, quindi, all'energia del neutrino. La coerenza del fronte d'onda della luce Cherenkov permette di determinare la direzione di provenienza del neutrino (vd. fig. b).

Il mare è quindi sia il bersaglio su cui interagiscono i neutrini sia il mezzo "abbastanza" trasparente che permette la propagazione della luce Cherenkov. Un telescopio per neutrini funziona, dunque, come una videocamera, che con precisione di un milionesimo di secondo registra simultaneamente sui suoi "pixel" l'ampiezza e il tempo di arrivo dei segnali luminosi che si originano e propagano in acqua, permettendo di misurarne direzione di propagazione e intensità.

In modo analogo ai neutrini, però, anche i muoni prodotti in atmosfera dall'interazione dei raggi cosmici producono luce Cherenkov. Essi, infatti, possono propagarsi attraverso l'atmosfera e, se di alta energia, anche per qualche chilometro dentro il mare.



C.

L'elemento base di KM3NeT è il Modulo Ottico Digitale (DOM). Ogni stringa ospita 18 DOM spazati in verticale di circa 40 m l'uno dall'altro. I DOM sono tenuti insieme da una coppia di funi di tensionamento che si estende dall'ancora alla boa. Un tubo in silicone scorre lungo tutta la stringa e contiene conduttori elettrici e fibre ottiche per trasportare potenza e dati lungo la stringa. Se si potesse vedere, il telescopio sembrerebbe una foresta formata da 200 stringhe, ognuna alta circa 700 m, ancorata al fondale e tenuta in verticale da una boa.

Occorre quindi che il telescopio venga installato in un sito sottomarino molto profondo, oltre i 3000 m, per ridurre la pioggia di muoni dall'alto (di circa un fattore 10^6). Segnali inequivocabili di neutrino sono, invece, tracce ben ricostruite come provenienti dall'orizzonte o dal basso, poiché solo i neutrini possono attraversare migliaia di km di materia. Per questo si dice spesso che i telescopi per neutrini guardano il cielo "sotto i loro piedi".

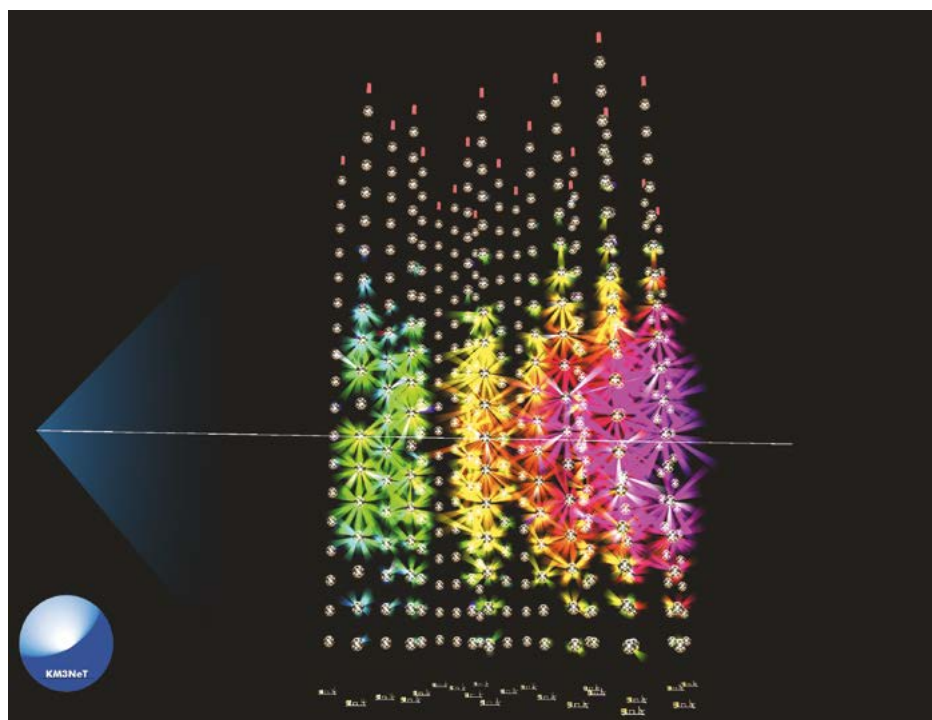
Dopo quasi 10 anni di campagne di misura, concluse nel 2007, l'INFN ha dimostrato che a 100 km al largo di Capo Passero si trovano condizioni ideali per costruire il telescopio: l'acqua marina è così limpida che l'intensità della luce Cherenkov si dimezza dopo oltre 100 m, permettendo di utilizzare soltanto circa 5000 moduli con sensori di luce per coprire un volume di 1 km^3 d'acqua. Il sito raggiunge la profondità di 3500 m, dove la luce prodotta dai muoni atmosferici e dagli organismi bioluminescenti è estremamente ridotta, le correnti sottomarine sono poco intense e i fenomeni geofisici distruttivi sono poco frequenti.

L'elemento base del telescopio è il modulo ottico digitale (DOM), una sfera di vetro capace di resistere alla pressione dell'acqua – circa 350 kg/cm^2 a 3500 m – che contiene 31 sensori di luce distribuiti a occhio di mosca, un sensore acustico, una "bussola-inclinometro", l'elettronica di alimentazione e lettura dei segnali e un laser per trasferire su fibra ottica i dati verso terra.

Ogni stringa è una struttura unifilare con 18 DOM, interconnessi da cavi meccanici ed elettro-ottici fino al fondo marino.

La base della stringa è un'ancora che alloggia un cilindro in titanio contenente l'elettronica di controllo del sistema di alimentazione e le schede che permettono la raccolta e il trasferimento dei dati dei DOM verso terra. La base ospita anche un sensore acustico, che con quelli installati nei DOM, è utilizzato per ricevere segnali da fari acustici ancorati sul fondo e di ricostruire la posizione delle stringhe. Ogni base riceve l'alimentazione elettrica e comunica verso terra, grazie a una rete di cavi elettro-ottici deposti sul fondo marino che la collegano a una *junction box* che, a sua volta connette 14 stringhe a uno dei due cavi elettro-ottici che connettono l'apparato a terra.

Benché ancora in costruzione KM3NeT-ARCA – che vede la partecipazione di oltre 300 ricercatori da tutto il mondo – ha già prodotto un risultato scientifico importantissimo: il 13 febbraio 2023 ha identificato un segnale luminoso che ha attraversato orizzontalmente quasi tutto il rivelatore, illuminando circa un terzo dei 400 DOM allora presenti. Il numero dei fotoni e i tempi di arrivo misurati da ogni sensore hanno permesso di identificare un muone di altissima energia che, durante l'attraversamento del telescopio, ha prodotto almeno tre sciami di particelle che a loro volta hanno generato fotoni Cherenkov. La



d. Ricostruzione grafica dell'evento KM3-230213A, osservato il 13 Febbraio 2023 al largo di Capo Passero. Il muone (indicato in bianco) innesca la generazione di luce Cherenkov direttamente e indirettamente (tramite l'emissione di fotoni di alta energia, che, a loro volta, generano cascate di particelle cariche, responsabili della produzione di intensi flussi di fotoni Cherenkov). Le linee colorate indicano le direzioni dei fotoni Cherenkov che colpiscono i fototubi del rivelatore in funzione del loro tempo di arrivo, dal verde al rosso. L'attraversamento del rivelatore dura pochi microsecondi (milionesimi di secondo).

luce emessa dalla traccia principale e da questi sciami secondari, che sono prodotti solo da muoni di energia elevatissima, ha permesso di stimare l'energia del muone tra i 60 e i 230 PeV. L'energia del neutrino "genitore" è quindi compresa tra 120 e 790 PeV, facendone così il neutrino di più alta energia mai identificato.

Record a parte, questo evento potrebbe rappresentare una vera e propria pietra miliare per l'astrofisica delle alte energie.

Fino al 2023 il solo rivelatore capace di identificare neutrini prodotti nel cosmo con energie superiori al TeV è stato IceCube, il primo telescopio per neutrini installato nei profondi ghiacci dell'Antartide. IceCube ha dimostrato l'esistenza del flusso dei neutrini cosmici oltre il TeV e ha indicato i nuclei galattici attivi come le più probabili sorgenti extragalattiche di neutrini di alta energia.

Il neutrino record di KM3NeT (a cui è stato dato il nome KM3-230213A) ha energia almeno trenta volte superiore a quella dei neutrini più energetici

sinora rivelati da IceCube e potrebbe indicare la presenza di una "popolazione" diversa. KM3-230213A potrebbe essere stato prodotto da un protone o un nucleo di energia circa 20 volte superiore, che ha interagito con la radiazione cosmica di fondo, rivelando per la prima volta un neutrino "cosmogenico". Il flusso di questi neutrini, previsti dalle misure dei raggi cosmici ultra-energetici e della loro interazione con la radiazione di fondo, è ancora non ben calcolato dai modelli teorici. L'osservazione di KM3-230213A apre così una strada finora mai battuta.

I prossimi anni saranno cruciali per l'astronomia con neutrini. KM3NeT si avvicina velocemente alla dimensione finale, IceCube ha avanzato una richiesta di fondi per estendere significativamente il suo volume e nuovi progetti in Canada (P-One) e soprattutto in Cina (Trident, NEON e HUNT) crescono rapidamente.

La sfida per trovare le sorgenti dei raggi cosmici non è mai stata così aperta!

Biografia

Giorgio Riccobene è ricercatore presso i Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania. Si occupa di astronomia con neutrini dal 1998. In KM3NeT ha ricoperto il ruolo di responsabile dei test e delle calibrazioni, ha coordinato numerose campagne di misura per la caratterizzazione del sito sottomarino e l'installazione del ramo principale della rete elettro-ottica sottomarina. Soffre il mal di mare.