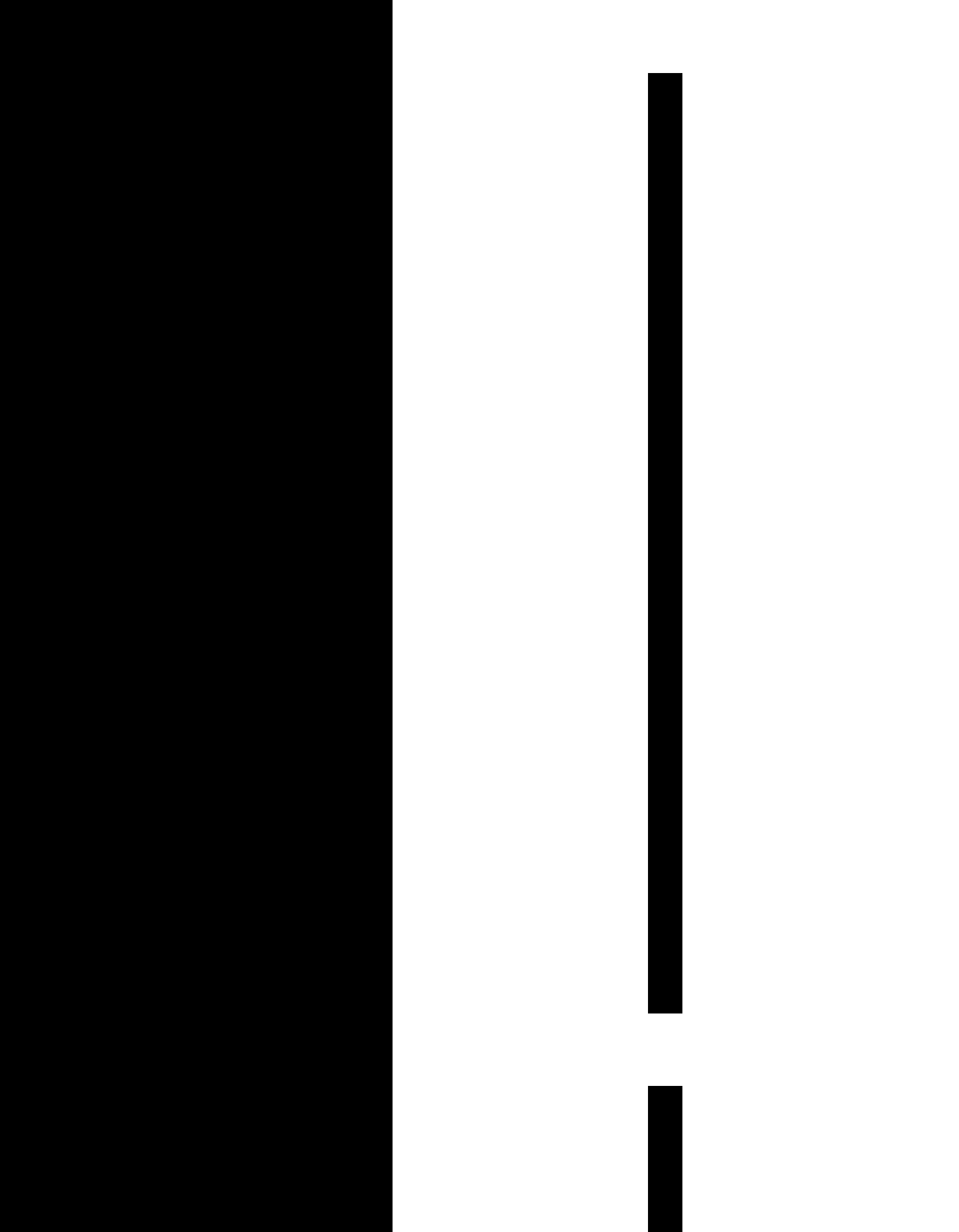


[sotto]

anno 21 numero **41**/ 10.26

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

Per osservare meglio la materia e l'universo, la fisica ha imparato a fare una scelta apparentemente controintuitiva: andare sotto. Sotto montagne, mari, ghiacci e città, lontano dal frastuono dei raggi cosmici e dalle interferenze del mondo di superficie, schermati da spessi strati di roccia o di acqua, si aprono oggi alcuni dei luoghi più sensibili della ricerca contemporanea. Non sono rifugi, ma osservatori: spazi costruiti per rivelare segnali rarissimi, normalmente impercettibili, capaci però di raccontare la storia profonda della materia e del cosmo.

Questo numero nasce da qui, dalla geografia capovolta dello sguardo scientifico. Iniziata con i raggi cosmici provenienti dal cielo, oggi la frontiera della fisica delle particelle passa per il silenzio sotterraneo e sottomarino, oltre che per la potenza e l'intensità dei grandi acceleratori, peraltro sotterranei anche essi. È lì che si inseguono i neutrini, che si cerca la materia oscura e nuovi processi mai osservati, è lì che si studiano le reazioni che accendono le stelle e, domani, le onde gravitazionali prodotte nei primi istanti di vita dell'universo.

L'Italia ha avuto e ha un ruolo di primo piano in questa storia. I nostri Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) hanno trasformato un traforo autostradale appenninico in una grande infrastruttura di ricerca, *leader* mondiale nella fisica *underground*. Oggi quella stessa idea si estende dagli abissi del Mediterraneo alle miniere della Sardegna, dalle sale schermate degli esperimenti di fisica ai laboratori dove si studiano vita, radiazione naturale e tecnologie quantistiche.

Andare sotto, dunque, non significa allontanarsi, chiudere fuori l'universo, ma al contrario trovare la condizione necessaria per leggerlo con maggiore precisione. La conoscenza, infatti, avanza anche andando in profondità, negli spazi nascosti in cui il rumore si attenua e anche le voci più flebili dell'universo possono finalmente farsi sentire.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
Presidente INFN



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da INFN.

Semestrale, anno 21,
numero 41, ottobre 2026

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *Presidente INFN*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Nicola Fornengo

comitato scientifico

Daniele Del Re
Viviana Fafone
Giuliana Galati
Sandra Leone
Alessandro Papa

redazione

Catia Peduto

hanno collaborato

Andrea Bersani, Viviana Fafone,
Fernando Ferroni, Alba Formicola,
Martina Galli, Paolo Gorla, Anna Greco,
Gianluca Imbriani, Adele La Rana,
Francesca Mazzotta, Maura Pavan,
Luca Papapietro, Federica Petricca,
Giorgio Riccobene, Roberto Tenchini

contatti redazione

INFN Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 68400361
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Hylab

stampa

Tipografare srl

su carta certificata FSC®



carta interno:
R4 Next Bulky da 130 gr/m²
carta copertina:
garda matt art da 300 gr/m²

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2026.
Tiratura 19.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo comunicazione@presid.infn.it

sito internet

Asimmetrie 41 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine

Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

crediti iconografici

Foto copertina © Zagor, Dreamstime
//foto p. 4 © dessardo feder, Getty Images, ; foto a p. 5 © Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto b p. 6 © Digital Photo Archive, Department of Energy (DOE), courtesy of AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto c p. 7 © David Parker, Science Photo Library // fig. c p. 8 © A. Zichichi; foto d p. p. 9 © Virgo-EGO // fig. pp. 10-11 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 12 © EGO-INFN; figg. b p. 13 © LNS-INFN; foto c p. 14 © M. Saltese/ INFN // foto a p. 15 © CERN; fig. b p. 16 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; foto c p. 17 © CERN // fig. a p. 18 © INFN-KM3NeT; fig. b p. 16 © Hylab/ Asimmetrie-INFN; fig. c p. 20 © INFN-KM3NeT; fig. d p. 21 © INFN-KM3NeT // foto a p. 22 © Donato Di Ferdinando; foto b p. 23 © M. Kapust/ SURF; foto c p. 24 © Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), The University of Tokyo // foto a p. 25 © N. Hubbard/SURF; foto b p. 26 © Y. Suvorov/ LNGS-INFN; foto c p. 27 © INFN // fig. a p. 28 © Illustris Collaboration; foto b p. 29 © M. Selvi-XENON/LNGS-INFN; foto c p. 30 © J. Stettler // foto a p. 31 © CNAF/ LNGS-INFN; foto b, p. 32 © INFN; fig. c p. 33 © Hylab/ Asimmetrie-INFN // foto a p. 34 © Chioloni/LNGS-INFN; foto b p. 35 © LNGS-INFN; foto p. 36 © CERN // foto p. 37 © A. Varcasia/Università di Sassari // foto p. 38 © LNGS-INFN; foto a p. 39 © P. Morciano // foto a pp. 44-45 © KM3NeT-INFN // fig. p. 48 A. Nagar/ Asimmetrie-INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

41 / 10.26

[sotto]

Sottosopra di Fernando Ferroni	4	[as] visioni Dalla miniera alle stelle di Giuliana Galati	37
[as] La profondità dei laboratori	10	[as] intersezioni Silenzio Cosmico di Patrizia Morciano	38
Surfing under the floor di Viviana Fafone	12	[as] riflessi Computer quantistici in tilt di Martina Galli	40
Anello dopo anello di Roberto Tenchini	15	[as] traiettorie Lavorare per ET di Francesca Mazzotta	41
Il cielo visto dagli abissi di Giorgio Riccobene	18	[as] illuminazioni A scuola di fisica dei neutrini di Anna Greco	44
Da un sapore a un altro di Andrea Bersani	22	[as] spazi Rivelato per la prima volta il GDay di Luca Papapietro	46
Lascia e raddoppia di Maura Pavan	25	[as] lampi	47
Prova a prendermi di Paolo Gorla e Federica Petricca	28	[as] segni	48
Le stelle sotto la montagna di Alba Formicola e Gianluca Imbriani	31		
[as] radici La nascita dei Laboratori del Gran Sasso di Adele La Rana	34		

Sottosopra

La fisica studiata in profondità

di Fernando Ferroni



a.
Il gruppo che scoprì l'antiprotone al Lawrence Radiation Laboratory dell'Università della California, a Berkeley, in una foto di ottobre 1955. Da sinistra: Emilio Segrè, Clyde Wiegand, Edward Lofgren, Owen Chamberlain e Tom Ypsilantis. La scoperta fu realizzata grazie al Bevatron, l'acceleratore diretto da Lofgren. Nel 1959 Segrè e Chamberlain ricevettero il premio Nobel per la fisica per questo risultato.

L'evoluzione della fisica delle interazioni fondamentali ha visto succedersi tre fasi. Dopo l'era dei raggi cosmici si è affiancata, e poi affermata con strepitoso successo, quella delle macchine acceleratrici. Ora in campo c'è la fisica delle astroparticelle, con il suo tentativo di sintesi tra fisica nucleare e delle particelle, astrofisica e cosmologia.

Laddove la tecnologia unifica questi diversi modi di scrutare il mondo dell'infinitamente piccolo e spesso ci permette di connettere questi fenomeni alle scale immense dell'universo, uno dei tratti caratteristici di questa esplorazione è la necessità di luoghi silenziosi che proteggano esperimenti e misure dal rumore che a suo tempo fu fonte di importanti scoperte: i raggi cosmici. Questi, sotto forma di particelle cariche, in maggioranza muoni, bombardano la terra continuamente e interagiscono con i nostri rivelatori impedendo misure di fenomeni che avvengono molto raramente.

Per ricordare gli ordini di grandezza, circa un centinaio di muoni al secondo al metro quadro piovono sulla superficie terrestre a livello del mare. In un esperimento grande come SuperKamiokande (50.000 tonnellate di acqua ultrapura) solo circa 10 neutrini solari al giorno vengono rivelati. E ne arrivano ben 65 miliardi al secondo su ogni centimetro quadro.

I raggi cosmici sono stati per lungo tempo l'unico strumento di indagine per quel mondo misterioso

che andasse al di là del protone, del neutrone e dell'elettrone: il positrone (la prima particella di antimateria), il muone (come disse Isaac Rabi dopo la sua scoperta, "la particella che nessuno aveva comandato!"), il pione, i mesoni K, con la stranezza a loro associata e il mistero del loro decadimento, che avrebbe condotto alla scoperta della violazione di parità. L'epoca trionfale delle scoperte fatte nell'atmosfera terrestre e sui laboratori ad alta quota termina con la scoperta dell'antiprotone a Berkeley (1955) nel nuovo potente acceleratore lì costruito (vd. fig a). Il testimone passa alle macchine acceleratrici. E questa è una storia impetuosa fatta di continue scoperte (nuovi leptoni, i quark e le loro tre generazioni, la violazione di CP, la nascita del modello standard), ultima delle quali il tassello mancante, il creatore delle masse delle particelle, il bosone di Higgs.

Siamo passati dal cielo alla terra. Però ci sono questioni irrisolte, domande che non hanno ancora avuto risposta o che la avranno e la hanno avuta solo andando "sotto": la natura del neutrino (Majorana o Dirac), la massa del neutrino (non prevista nel quasi onnipotente modello standard), il funzionamento del Sole (la comprensione delle reazioni nucleari al suo interno), la formazione delle stelle (i processi che Gamow ha previsto, ma che prevedono il superamento della barriera coulombiana mediante il "tunneling" quantistico), il meccanismo di esplosione delle supernovae, la



b.

L'esperimento sui neutrini solari del Brookhaven National Laboratory, allestito a circa 1.500 metri di profondità nella Homestake Gold Mine. Il serbatoio, lungo 15 metri e con un diametro di 6 metri, conteneva 380.000 litri di percloroetilene, utilizzato per rivelare i neutrini provenienti dal Sole attraverso la produzione di argon-37.

ricerca delle sorgenti capaci di produrre particelle di enorme energia e che possano arrivare sulla terra non deviate lungo il loro viaggio e la ricerca di quel 27% di materia diversa da quella di cui siamo fatti noi e che è oscura in tutti i sensi (non fa luce e non sappiamo cosa sia). Per la sua ricerca, una componente essenziale, anche se non unica, è tutta la tecnologia sviluppata per la fisica agli acceleratori e impiegata nello spazio e nei laboratori sotterranei. Poi c'è il nuovo capitolo dell'astronomia multimessaggera, dove gli strumenti di fisica delle particelle "sopra" uniscono il loro sforzo a quello degli interferometri che riveleranno le onde gravitazionali "sotto". Insomma, un bel po' da fare. Vediamo di ricapitolare la nascita del mondo di "sotto", la via verso i laboratori "underground". Era evidente che per misurare alcuni processi non c'era altra via che andare a nascondersi nelle profondità della terra. La particella che inevitabilmente viene associata alla necessità di protezione dal mondo malvagio dove piovono muoni, è il neutrino. In particolare, quello prodotto nelle reazioni nucleari che fanno del Sole la nostra fonte di vita.

La teoria di come potesse funzionare il Sole era

stata formulata da John Bahcall nel 1964 e di come potessero essere osservati i neutrini prodotti nelle reazioni di fusione da Ray Davis nello stesso anno. L'esperimento fu condotto nella Homestake Gold Mine in South Dakota (proprio dove domani ci sarà l'esperimento DUNE che intercetterà i neutrini prodotti dal Fermilab!) e iniziò nel 1967. Il risultato fu del tutto inaspettato. Solo 1/3 dei neutrini che si aspettava fu misurato. Il famoso "*solar neutrino puzzle*". Uno dei motivi per proseguire le ricerche in altri laboratori al tempo inesistenti. L'Unione Sovietica colse il punto e iniziò la costruzione del Laboratorio ora noto come Baksan.

Un altro tema che era all'attenzione della fisica era quello del possibile decadimento del protone. Una volta sviluppato il modello standard delle interazioni elettrodeboli (unificazione dell'elettromagnetismo con la forza debole) si cercò di inserire anche le interazioni forti in uno schema plausibile. Questi tentativi iniziati negli anni '60 si basavano sempre su gruppi algebrici che potessero inglobare tutte le interazioni del modello standard.

Una cosa però è certa: che in questi modelli il protone prima o poi decade. Il neutrone decade in circa un quarto d'ora, ma qui il caso è diverso,



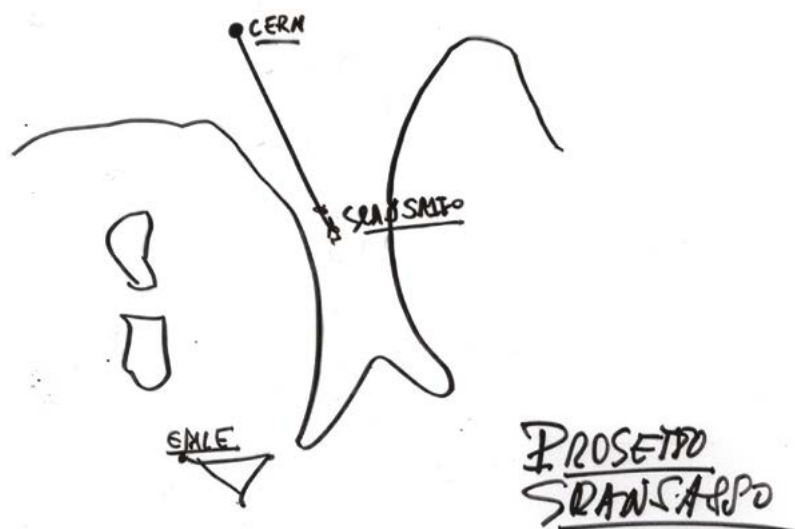
c.

Il rivelatore dell'esperimento NUSEX (NUcleon Stability EXperiment), installato in un'area tecnica del traforo del Monte Bianco, sotto circa 5.000 metri di roccia. Entrato in funzione nel maggio 1982, il rivelatore del peso di 150 tonnellate era progettato per cercare il decadimento del protone e studiare muoni cosmici e neutrini.

perché lì tutto si conserva e l'unica barriera alla velocità di decadimento è la piccola differenza di massa tra protone e neutrone o simili. Il protone non ha un barione più leggero in cui decadere. Per farlo deve violare il numero barionico. E questo è un ostacolo serio. Si pensava a tempi di decadimento nell'ordine di 10^{30} anni. Spaventoso? No, è vero che il tempo di vita dell'universo è "solo" di circa 13,8 miliardi di anni, ma è altrettanto vero che nell'universo osservabile ci sono 10^{80} protoni (la materia visibile) e quindi anche con un tempo di vita così lungo qualche traccia la dovremmo pur trovare. E in Europa negli anni '80 era partita la ricerca di questo decadimento. Il luogo protetto prescelto fu il tunnel del Monte Bianco e l'esperimento dell'INFN NUSEX provò a cercare i prodotti attesi da quel decadimento (vd. fig. c). NUSEX finisce (e per fortuna, perché qualche anno dopo il terribile incidente nel tunnel avrebbe potuto avere conseguenze drammatiche per chi ci lavorava) con un limite nell'ordine di 10^{31} anni. E di nuovo questo è una delle motivazioni per nuovi e più ambiziosi esperimenti.

Qui e là, seguendo una ricerca particolare, ma niente che assomigliasse a un laboratorio che potesse ospitare centinaia di scienziati e tecnici e permettere ricerche a largo spettro, eccoci dunque approdare all'intuizione geniale di Antonino Zichichi (vd. anche p. 34, ndr). Attraversare gli Appennini è stata sempre un'avventura per mancanza di autostrade e ferrovie veloci. Nel momento che si realizza una autostrada che connette Roma con L'Aquila e Pescara e prevede un lungo tunnel sotto il massiccio del Gran Sasso, l'allora Presidente dell'INFN ottiene dal Governo lo scavo di quelli poi conosciuti come Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS). Con una intuizione aggiuntiva, che le caverne che ospiteranno gli esperimenti siano orientate in direzione del CERN a Ginevra. E il giorno venne che un fascio di neutrini prodotto al CERN fu inviato verso i laboratori, permettendo l'osservazione diretta della trasformazione dei neutrini muonici in quelli figli del leptone tau. In questi laboratori si ottiene il silenzio cosmico, il flusso di muoni così intenso alla superficie della terra è ridotto in maniera

COMMISSIONE LAVORI PUBBLICI DEL SENATO



d.

Appunti manoscritti dell'intervento di Antonino Zichichi alla Commissione Lavori Pubblici del Senato, convocata nel 1979 per discutere la proposta di realizzazione del Progetto Gran Sasso.

sostanziale, di un fattore un milione, grazie alla presenza di 1400 m di roccia. In un metro quadro, non più 100 al secondo, ma circa 1 ogni qualche ora. Il laboratorio diviene un centro di ricerca con decine di esperimenti condotti da un migliaio di ricercatori, che vi conducono esperimenti, provenienti da tutto il mondo. Ne cito due: BOREXINO, che misura i neutrini solari a iniziare dalle energie più basse, conferma in modo spettacolare l'effetto della materia densa nella parte più interna del Sole sulle loro oscillazioni e dimostra l'esistenza del ciclo CNO (carbonio-azoto-ossigeno), e OPERA, che visualizza le interazioni dei neutrini tau che sono stati prodotti dalla conversione dei neutrini mu lungo il viaggio di 700 km dal CERN fino al Gran Sasso. Bella intuizione quella di Zichichi! Le oscillazioni di neutrino e la scoperta della loro massa avvengono in modo fortunato in un altro esperimento sotterraneo. Sotto la montagna di Ikeno in Giappone, nella miniera di Kamioka, viene realizzato un enorme rivelatore dove 3000 tonnellate di acqua servono per osservare l'eventuale decadimento del protone. A contaminare gli eventuali decadimenti dei protoni ci sono però le interazioni dei neutrini atmosferici ed è proprio studiando questi per capirne l'effetto che si osserva, con sorpresa, la variazione del rapporto tra neutrini muonici ed elettronici in funzione dell'angolo di provenienza. Le oscillazioni quindi, che dipendono proprio dal rapporto L/E (il rapporto tra la distanza dalla creazione all'interazione del neutrino e la sua energia), sono la spiegazione dell'osservazione e poiché solo famiglie di neutrini dotati di massa diversa possono oscillare, ecco anche la scoperta che i neutrini sono massivi. La prossima edizione di questo esperimento (HyperKamiokande) prevederà 260.000 tonnellate di acqua.

La soluzione del "solar neutrino puzzle" risiede proprio nelle oscillazioni che trasformano parte dei neutrini elettronici solari

in uno degli altri tipi e quindi li rendono non rivelabili. In realtà un fondamentale esperimento nel laboratorio sotterraneo canadese (SNOLab) è stato in grado di rivelare attraverso le interazioni di corrente neutra tutti i neutrini indipendentemente dal loro sapore, confermando che il Sole funziona proprio come deve!

I neutrini grazie alla loro proprietà di interagire assai poco hanno un'altra possibile funzione. Una volta prodotti in qualche assai poco compreso, ma certamente affascinante, meccanismo da qualche acceleratore cosmico, viaggiano poi in linea retta e se rivelati ci possono indicare la sorgente. Sono rari ed estremamente energetici. Per poterli osservare non bastano le decine di migliaia di tonnellate che possiamo mettere nelle caverne dei laboratori sotterranei.

Ed ecco quindi l'idea di utilizzare il ghiaccio del Polo Sud o l'acqua del Mar Mediterraneo, calando in profondità (sempre i cosmici bisogna schermare!) dei rivelatori di luce che sfruttano l'effetto Cherenkov e sono in grado di vedere enormi volumi. Recentemente nelle acque prossime alla Sicilia l'esperimento KM3Net è riuscito a osservare il neutrino più energetico mai visto (vd. p. 18, ndr). Qualcosa come 200 milioni di GeV (per confronto, LHC ha una energia di 7000 GeV per fascio).

Alcune altre considerazioni.

I laboratori sotterranei sono anche uno dei terreni dove viene ricercata la materia oscura. Costituiscono un vertice del triangolo che pensiamo ci permetterà di trovarla e capirla. La materia oscura si spera di crearla in LHC o nei suoi successori al CERN (High Luminosity-LHC, abbreviato HI-Lumi LHC o HL-LHC, e il Future Circular Collider, FCC, vd. p. 15, ndr) oppure di osservare la sua annichilazione dai satelliti nello spazio o la sua interazione negli esperimenti sotterranei.

In HI-Lumi LHC, prima, e poi con FCC, a più di 100 m sottoterra al confine franco-svizzero, si studieranno con grande



e.
Vista dall'alto dell'interferometro Virgo, a Cascina (Pisa). La collaborazione Virgo ha contribuito alla scoperta delle onde gravitazionali, annunciata nel 2016 insieme alla collaborazione LIGO.

precisione le proprietà del bosone di Higgs e i fenomeni del modello standard. Si cercherà anche di scoprire la cosiddetta “nuova fisica” attraverso l’identificazione di nuove particelle elementari o piccole discrepanze con il modello. Il motivo per cui questi moderni e potenti acceleratori di particelle, come i loro predecessori, devono essere posti sottoterra questa volta è logistico. Acceleratori lunghi decine di chilometri non sono compatibili con la antropizzazione dei nostri territori (strade, ferrovie, villaggi, agricoltura). Andare sottoterra ci risolve un problema e fornisce anche una protezione da qualsiasi possibile incidente.

Anche le onde gravitazionali fin qui studiate a LIGO e Virgo andranno nelle profondità della terra (vd. p. 12, ndr). Qui le due ragioni (scientifica e logistica) si combinano. Sono macchine lunghe almeno 10 km

e bisogna ridurre il rumore antropico e le vibrazioni sismiche a bassa frequenza. La nuova generazione di interferometri (l’Einstein Telescope – ET) verrà quindi realizzata in tunnel sotterranei e la Sardegna nella miniera di Sos Enattos ha buone probabilità di essere scelta come sito.

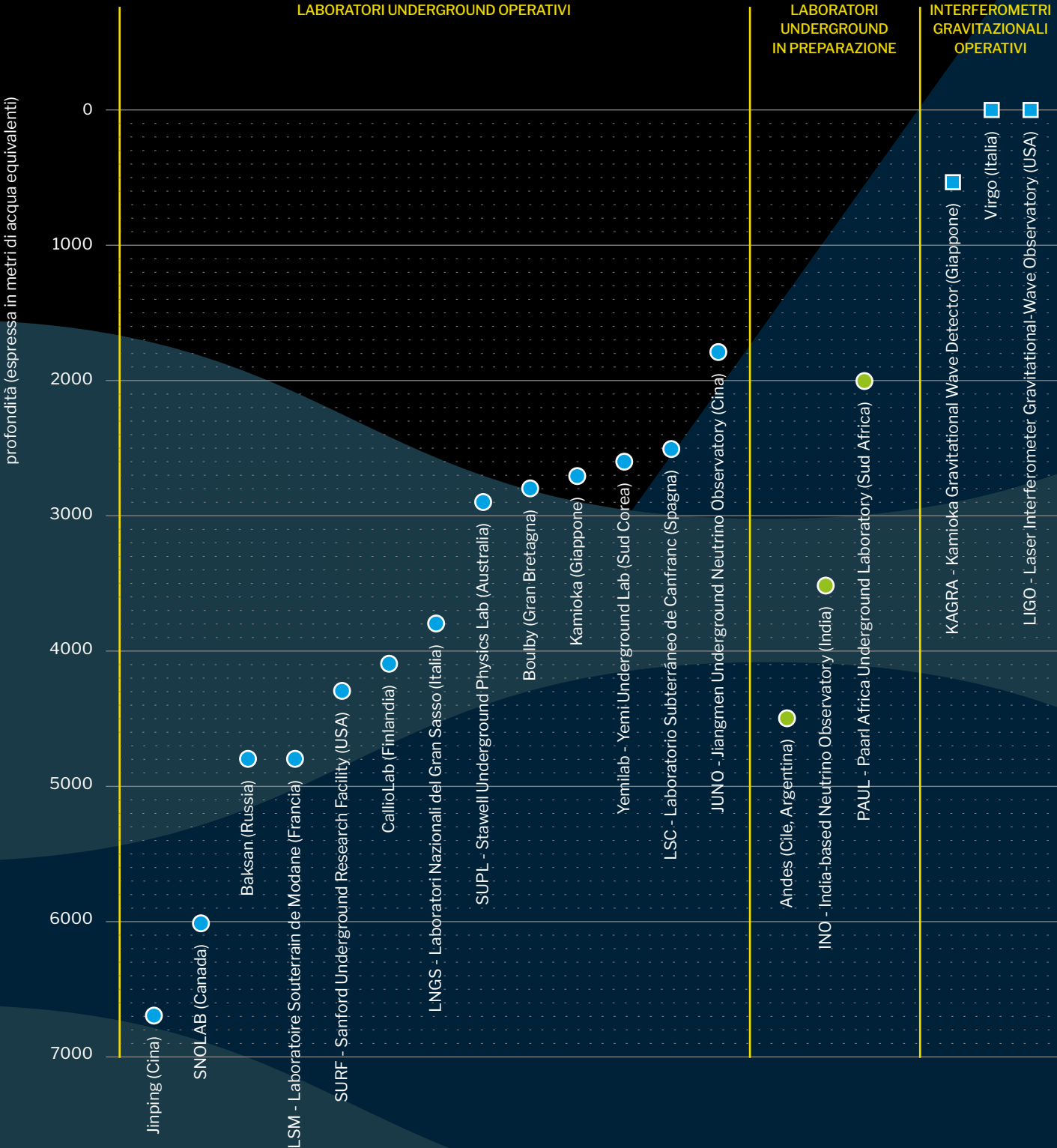
La combinazione delle misure dei neutrini cosmici misurati nelle profondità del mare, delle onde gravitazionali rivelate dall’Einstein Telescope e dei *gamma ray burst* osservati dai satelliti e provenienti dalla coalescenza di stelle di neutroni sarà un pilastro dell’astronomia multimessaggera del futuro.

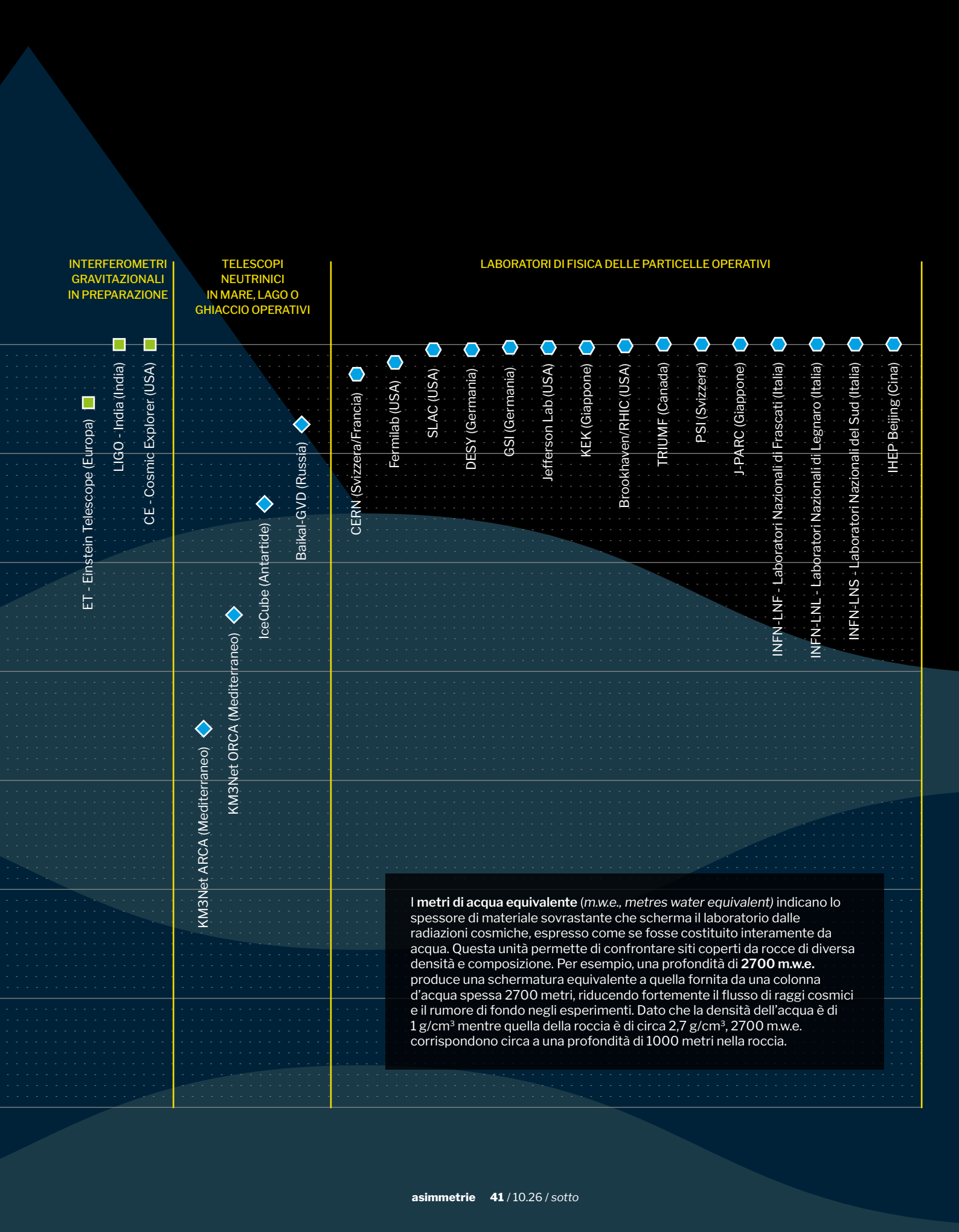
Insomma, per osservare meglio il cielo e indagare i misteri dell’infinitamente piccolo, bisogna andare sottoterra!

Biografia

Fernando Ferroni è professore emerito del Gran Sasso Science Institute. È stato presidente dell’Infn dal 2011 al 2018. Ha partecipato a molti esperimenti al Cern e allo Slac di Stanford. Attualmente è co-direttore della Einstein Telescope Organisation e partecipa all’esperimento Cuore dei Laboratori del Gran Sasso per la ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini.

[as] La profondità dei laboratori



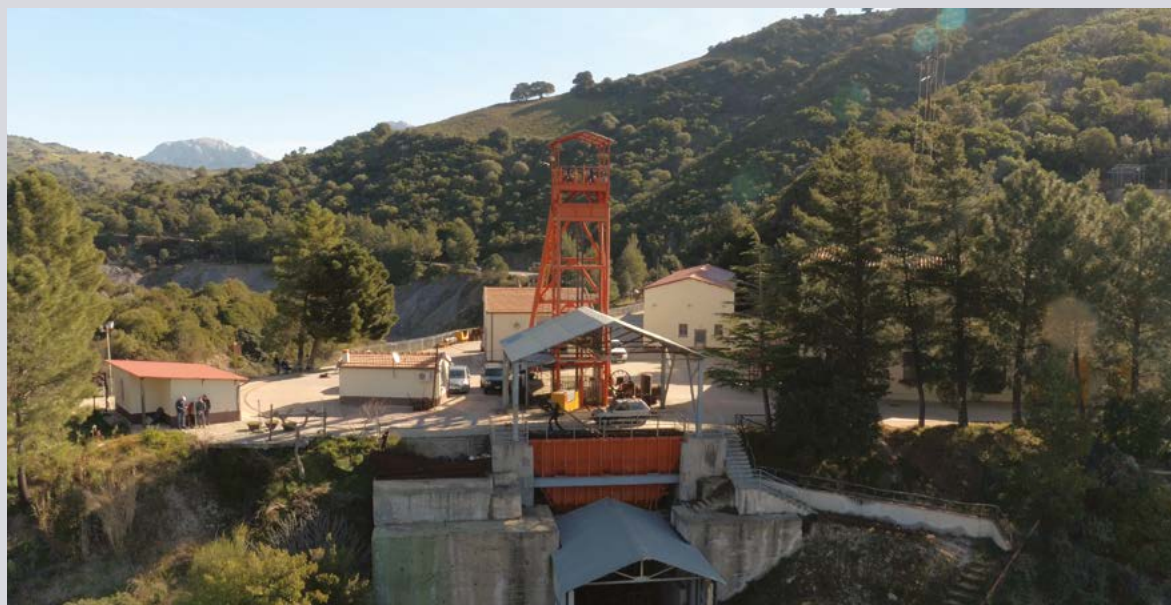


I **metri di acqua equivalente** (*m.w.e.*, *metres water equivalent*) indicano lo spessore di materiale sovrastante che scherma il laboratorio dalle radiazioni cosmiche, espresso come se fosse costituito interamente da acqua. Questa unità permette di confrontare siti coperti da rocce di diversa densità e composizione. Per esempio, una profondità di **2700 m.w.e.** produce una schermatura equivalente a quella fornita da una colonna d'acqua spessa 2700 metri, riducendo fortemente il flusso di raggi cosmici e il rumore di fondo negli esperimenti. Dato che la densità dell'acqua è di 1 g/cm^3 mentre quella della roccia è di circa $2,7 \text{ g/cm}^3$, 2700 m.w.e. corrispondono circa a una profondità di 1000 metri nella roccia.

Surfing under the floor

Il progetto Einstein Telescope

di Viviana Fafone



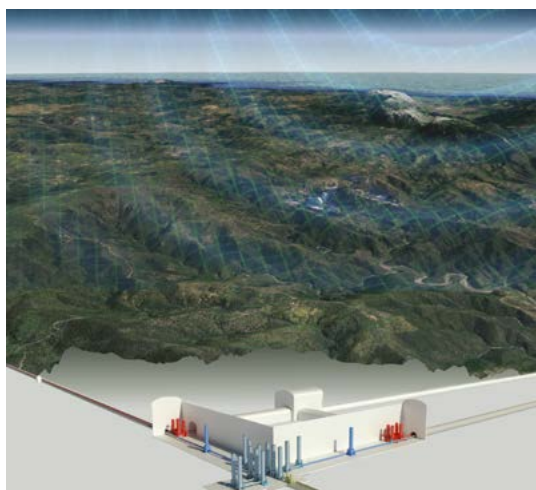
a.
Panoramica della miniera di Sos Enattos, in provincia di Nuoro (Sardegna), uno dei siti candidati per ospitare l'Einstein Telescope.

A circa dieci anni dalla prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali, la rete di osservatori interferometrici composta da Virgo (presso lo European Gravitational Observatory, nei pressi di Pisa), dai due interferometri LIGO negli Stati Uniti e da KAGRA in Giappone ha concluso, nel novembre 2025, il suo quarto periodo di osservazione dell'universo. Complessivamente, sono stati confermati più di 200 eventi – a cui si aggiunge circa un centinaio di candidati ancora in fase di analisi – prodotti da sistemi binari in fusione di buchi neri e stelle di neutroni. Le osservazioni hanno consentito di studiare le proprietà delle sorgenti, di avviare l'astronomia multimessaggera e la misura di parametri cosmologici con onde gravitazionali, e la verifica della validità della relatività generale in regime di campo gravitazionale forte.

Programmi di *upgrade* di questi rivelatori, in corso o in fase di approvazione, potenzieranno in modo significativo le loro capacità osservative. Per spingere lo sguardo sempre più lontano

nell'universo, non basterà tuttavia migliorare gli strumenti esistenti: si dovranno superare i limiti imposti dalle attuali infrastrutture e passare a una nuova generazione di interferometri. È questa l'ambizione dell'Einstein Telescope (ET), il futuro osservatorio europeo per le onde gravitazionali, progettato per guadagnare almeno un ordine di grandezza in sensibilità rispetto agli attuali interferometri e aprire una nuova fase dell'esplorazione cosmica.

Una delle scelte più distintive del progetto è la collocazione sotterranea. A differenza degli strumenti oggi in funzione, ET sarà realizzato a qualche centinaio di metri di profondità per ridurre i disturbi dovuti all'attività sismica e ambientale di origine naturale e antropica, una delle cause principali che limitano la sensibilità degli strumenti attualmente in funzione. Scendere sottoterra significa entrare in un ambiente molto più “silenzioso”, soprattutto alle basse frequenze, dove si trovano alcune delle informazioni più preziose.



b.

A sinistra, *rendering* di una possibile configurazione dell'esperimento Einstein Telescope in Sardegna. A destra, rappresentazione 3D dell'infrastruttura sotterranea del futuro interferometro gravitazionale Einstein Telescope. Le strutture verticali sono camere a vuoto che ospitano le ottiche sospese dell'interferometro. I fasci laser viaggiano all'interno dei tubi orizzontali, anch'essi sotto vuoto.

La scelta del sito diventa quindi strategica: servono condizioni geologiche stabili, bassa sismicità e limitata attività umana, caratteristiche che hanno reso l'area della miniera dismessa di Sos Enattos in Sardegna, nella provincia di Nuoro, un candidato ideale a ospitare ET (gli altri due siti candidati sono un'area della Lusazia e una dell'Euroregione del Mosa-Reno, al confine tra Paesi Bassi, Belgio e Germania).

Dal punto di vista progettuale, ET rappresenta un salto concettuale oltre che tecnologico. Il disegno originale prevede una struttura triangolare con lati di circa 10 chilometri, all'interno della quale operano tre interferometri. Ogni lato ospita in realtà una coppia di strumenti, secondo una configurazione detta "a xilofono": un interferometro è ottimizzato per le alte frequenze (fino a qualche kilohertz), l'altro per le basse. Questa scelta permette di coprire un intervallo di frequenze molto più ampio rispetto agli attuali rivelatori, spingendosi fino a pochi hertz, una regione oggi inaccessibile. In alternativa, si stanno considerando configurazioni classiche "a elle", con bracci lunghi 15 km e con siti distribuiti geograficamente, capaci di migliorare ulteriormente la localizzazione delle sorgenti e la sensibilità complessiva.

L'accesso alle basse frequenze è uno degli elementi chiave dell'innovazione di ET. Significa poter osservare eventi di coalescenza molto prima della fase finale, seguendone l'evoluzione per tempi più lunghi, ma anche intercettare sorgenti finora invisibili. Inoltre, la maggiore sensibilità permetterà di rivelare segnali provenienti da

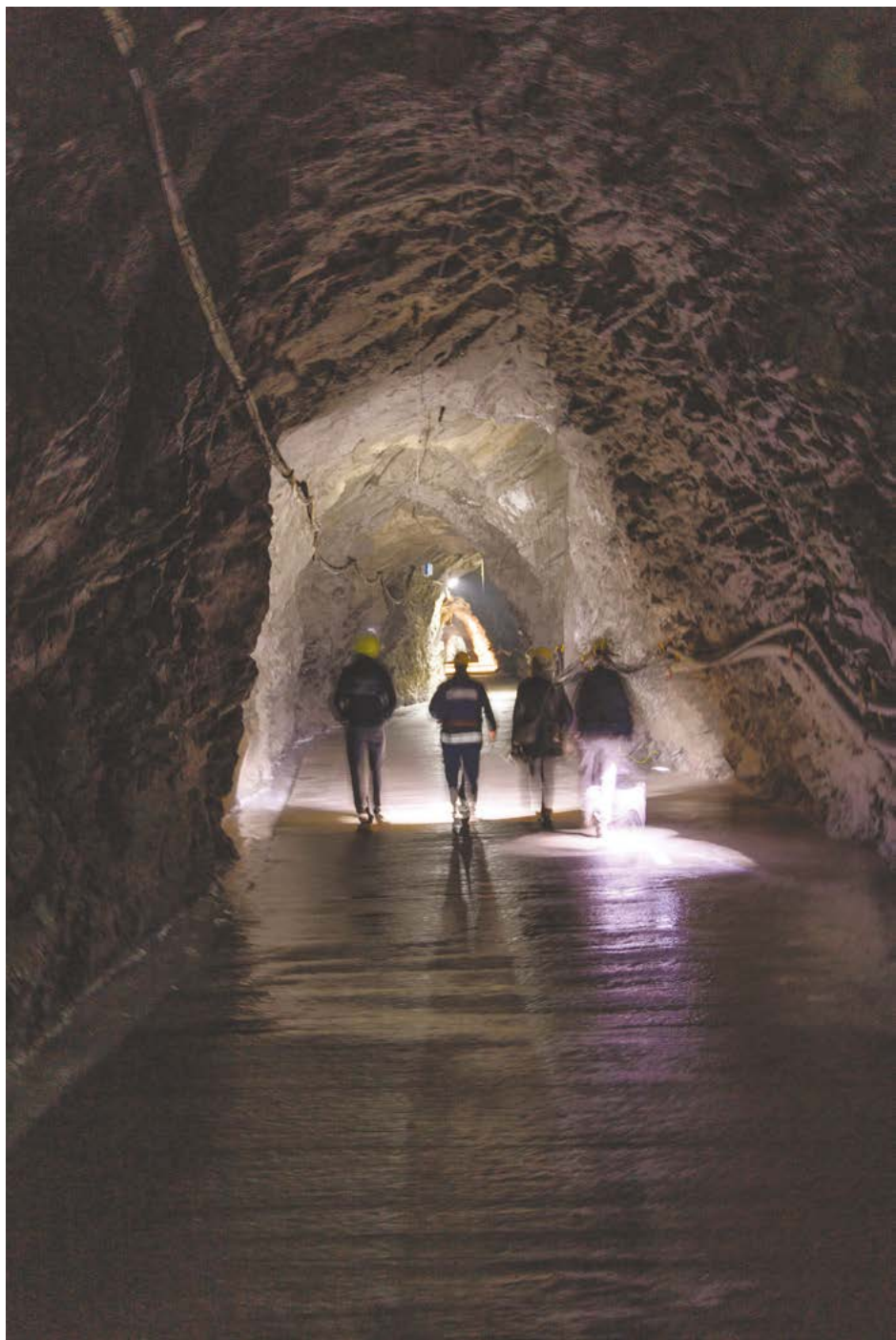
distanze cosmologiche, fino a coprire gran parte della storia dell'universo. ET potrà così costruire una vera e propria "demografia" di buchi neri e stelle di neutroni, tracciandone formazione ed evoluzione nel tempo.

Per raggiungere questi obiettivi sarà necessario un salto tecnologico significativo. Il miglioramento delle prestazioni non può derivare solo dall'aumento delle dimensioni: richiede lo sviluppo di nuove soluzioni in ottica, fotonica, materiali e controllo dei sistemi. Gli specchi dovranno essere più grandi e con proprietà meccaniche superiori, i laser più potenti e stabili, i sistemi di isolamento sismico ancora più sofisticati.

Per ridurre il rumore termico, gli interferometri ottimizzati per le basse frequenze opereranno a temperature criogeniche, mentre tecniche di ottica quantistica, come l'uso di stati compressi della luce, e le alte potenze circolanti nei bracci degli interferometri (fino a 3 MW), permetteranno di abbattere i limiti imposti dalle fluttuazioni quantistiche. Anche l'analisi dei dati rappresenterà una sfida: con una sensibilità così elevata, i segnali saranno così numerosi da sovrapporsi, richiedendo nuovi metodi, anche basati sull'intelligenza artificiale, per separarli e interpretarli.

Ma cosa cercherà, in concreto, l'Einstein Telescope?

Le sue prospettive scientifiche abbracciano diversi ambiti, dall'astrofisica alla cosmologia, fino alla fisica fondamentale. Potrà osservare fusioni di sistemi binari in tutto l'universo, verificare la relatività generale in condizioni estreme e studiare la struttura della materia nelle stelle di neutroni.



Grazie al gran numero di eventi rivelati, sarà possibile misurare con maggiore precisione i parametri cosmologici e indagare la natura dell'energia oscura. ET potrebbe inoltre rivelare segnali prodotti nei primissimi istanti dopo il Big Bang, aprendo una finestra su energie e processi altrimenti inaccessibili, e contribuire alla ricerca della materia oscura nel contesto di scenari ancora inesplorati.

Anche l'astronomia multimessaggera giocherà un ruolo fondamentale. La capacità di individuare con largo anticipo le sorgenti di onde gravitazionali permetterà di coordinare osservazioni con telescopi elettromagnetici e altri rivelatori, ad esempio di neutrini, seguendo gli eventi in tutte le loro manifestazioni. Questo approccio integrato consentirà di ricostruire i fenomeni astrofisici in modo sempre più completo, combinando informazioni diverse e complementari.

L'Einstein Telescope non sarà quindi solo un nuovo strumento, ma un'infrastruttura che ridefinisce il modo di osservare l'universo. Portando i rivelatori nel silenzio della Terra e spingendo la tecnologia ai suoi limiti, promette di trasformare le onde gravitazionali in una sonda precisa del cosmo, capace di raccontarne la storia fino alle epoche più remote.

C.
Tunnel della miniera di Sos
Enattos.

Biografia

Viviana Fafone è professoressa all'Università di Roma Tor Vergata e ricercatrice dell'INFN. Ha ricevuto premi personali per il contributo allo sviluppo di rivelatori gravitazionali di nuova concezione e di collaborazione per la prima osservazione delle onde gravitazionali. È stata responsabile nazionale di Virgo, al quale partecipa dal 2007, e tra gli autori del primo studio concettuale di ET pubblicato nel 2011.

Anello dopo anello

L'evoluzione degli acceleratori al CERN

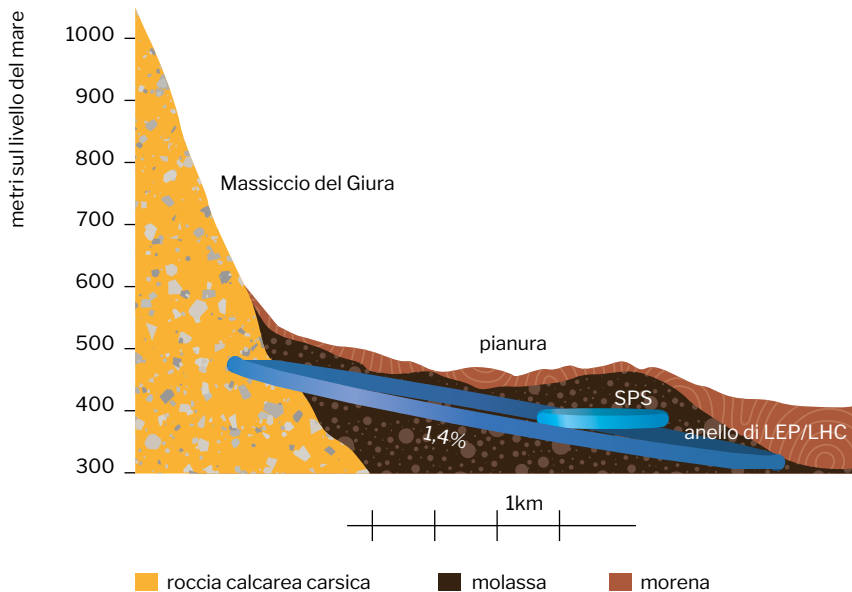
di Roberto Tenchini



a.
Il tunnel di LEP/LHC nel
sottosuolo tra Ginevra
e il Giura. Le linee dei
fasci passano all'interno
del tubo blu.

Dagli anni '80, la regione che si trova a nord di Ginevra, tra l'altopiano svizzero e la catena del Giura francese, ha avuto uno straordinario sviluppo urbanistico, tecnologico e di servizi. Il viaggiatore che dopo quasi mezzo secolo si trovasse a passare per il Pays de Gex, così si chiama la zona, non potrebbe evitare di notare gli effetti di questo sviluppo, sempre in un contesto paesaggistico pedemontano, di cui sono state preservate le caratteristiche ambientali. Lo stesso viaggiatore però non noterebbe che la stessa regione ospita la maggiore costruzione di ingegneria civile europea degli anni '80, costruita nel sottosuolo dal 1983 al 1988: il tunnel circolare di 26,7 km del CERN (vd. fig. a.), che ha ospitato per 12 anni l'acceleratore di particelle LEP (Large Electron Positron

collider) e che ora ospita LHC (Large Hadron Collider). La costruzione del complesso sotterraneo ha implicato lo scavo di 1,4 milioni di metri cubi di roccia, di cui meno della metà hanno riguardato il tunnel stesso e il resto quattro caverne sperimentali, pozzi di accesso, alcove per apparati tecnici e 3 km di tunnel secondari che collegavano il LEP, e attualmente LHC, agli altri acceleratori del CERN, necessari per la iniezione dei fasci di particelle. Il posizionamento del tunnel, a una profondità massima di 150 m, è stato fatto con particolare cura per rendere minima la porzione di scavo nella roccia carsica e porosa del Giura, mantenendosi per quanto possibile nelle marne e arenarie che formano la cosiddetta "molassa", di più facile scavo. Per questo motivo il tunnel del LEP e poi



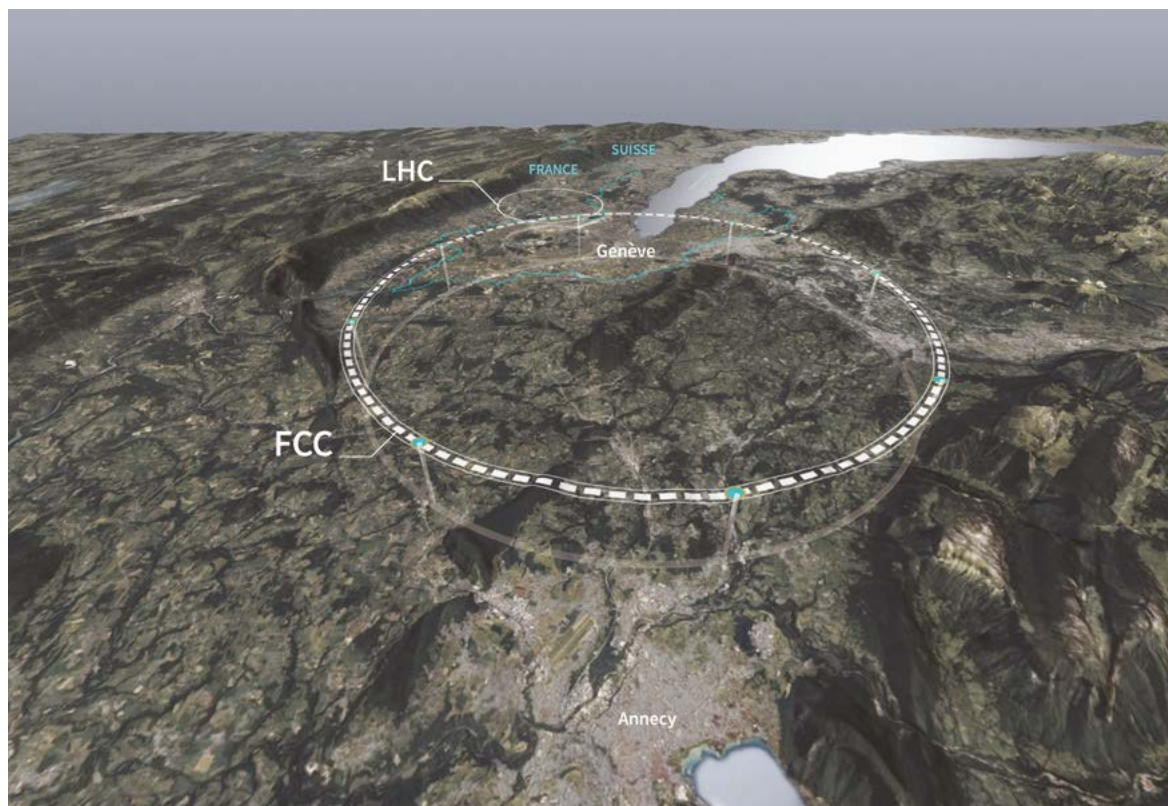
b.

La posizione del tunnel di LEP/LHC rispetto alla stratigrafia rocciosa nei pressi della catena del Giura. È indicata la roccia calcarea carsica (*limestone*), la molassa e la morena. È anche indicata la posizione dell'acceleratore SPS, precedente a LEP e che attualmente fa parte della catena di pre-accelerazione che fornisce i fasci di protoni a LHC.

LHC presenta un'inclinazione di circa 1,4% (vd. fig. b), che massimizza la presenza della molassa, a scapito della roccia carsica. Nonostante questo, lo scavo dei 3,5 km che si trovano nella roccia del Giura è stato difficoltoso, per la formazione di una fonte carsica sotterranea di acqua ancora esistente ai tempi dell'installazione degli esperimenti del LEP, e con frequenti inondazioni, la cui portata è stata via via ridotta. Al di là di queste difficoltà, il tunnel è stato completato nel 1988 con una precisione di circa 1 cm rispetto al progetto iniziale, a cui è seguito l'allineamento dei componenti dell'acceleratore di particelle a meno di 0,1 mm sulla scala di molti chilometri! La precisione in ingegneria civile è stata un pre-requisito e un buon auspicio per i successivi record di precisione delle misure del LEP e di LHC. La misura della massa del bosone Z è stata misurata dagli esperimenti del LEP con una precisione di 2 parti su 10^5 e per far questo si è anche dovuto tener conto dell'effetto delle maree lunari sulla circonferenza del tunnel. In seguito, gli esperimenti a LHC hanno misurato la massa del bosone W e del bosone di Higgs con una precisione di 10^{-4} e 10^{-3} , rispettivamente. I risultati sperimentali del LEP sono stati fondamentali per determinare il successo del modello standard delle particelle elementari, per il quale storicamente esiste un "prima" e un "dopo LEP". In particolare, l'uso della meccanica quantistica (tecnicamente delle correzioni radiative) per esplorare nuove particelle, al di là della possibilità di produzione diretta all'acceleratore, ha rappresentato un successo del LEP e del modello standard. L'esistenza di un quark top pesante, di massa attorno ai 175 GeV era indicata dai dati del LEP prima della scoperta diretta al Tevatron (al Fermilab) nel 1995. In maniera analoga è stato possibile indicare la presenza del bosone di Higgs nella zona di massa dove poi è stato effettivamente scoperto a LHC nel 2012. Questo modo di usare la meccanica quantistica per esplorare nuovi territori è parte integrante dei progetti delle nuove macchine di frontiera (in particolare del Future Circular Collider – FCC).

Il tunnel sotterraneo nel Pays de Gex, dopo aver visto circolare e collidere elettroni e positroni, ha iniziato a ospitare collisioni di protoni, con LHC, dal 2009. A differenza degli elettroni, i protoni sono particelle composite, formati da due quark up e un quark down. Le loro collisioni formano eventi più complessi, ma permettono di arrivare a energie più alte, grazie alla molto minore radiazione di sincrotrone. I fasci di LHC raggiungono un'energia 35 volte superiore all'energia massima raggiunta dal LEP e una luminosità due ordini di grandezza superiore. Dopo tre anni di funzionamento del collisore, gli esperimenti ATLAS e CMS a LHC hanno accumulato abbastanza dati da permettere l'osservazione del bosone di Higgs, ovvero il quanto corrispondente al campo di Higgs attraverso il quale le particelle elementari acquistano massa. Nel corso di 16 anni i due esperimenti hanno conseguito innumerevoli altri risultati di alto profilo, tra i più recenti ricordiamo l'osservazione dell'*entanglement* quantistico in coppie di quark top. Nell'estate del 2026 LHC e i suoi esperimenti hanno iniziato un lungo periodo di manutenzione dedicato a un notevole potenziamento dell'acceleratore che entrerà, all'alba della prossima decade, nella fase di altissima luminosità (High-Luminosity LHC, ovvero HL-Lumi LHC o anche HL-LHC) con una produzione di collisioni di protoni almeno 5 volte superiore a quella attuale.

Questo sarà possibile grazie al potere focalizzante di nuovi quadrupoli superconduttori con un campo magnetico di ben 11 T, a nuovi deflettori chiamati *crab cavities* (utilizzati per la prima volta al collisore Dafne ai Laboratori Nazionali INFN di Frascati) e ad altri componenti innovativi. L'altissima luminosità di Hi-Lumi LHC, prevista dal 2030 al 2042, richiede considerevoli miglioramenti degli apparati sperimentali, che necessitano di aumentata granularità per trattare fino a 200 eventi contemporanei, maggiore resistenza alle radiazioni e nuove soluzioni per la selezione in tempo reale degli eventi interessanti.



c.
La posizione prevista per il tunnel di FCC, è indicato anche l'anello di LHC.

E il dopo LHC? Si è recentemente concluso un processo di circa due anni che ha coinvolto la comunità dei fisici delle alte energie e ha portato all'aggiornamento della European Strategy for Particle Physics (ESPP). La ESPP raccomanda la costruzione di un tunnel di 90,6 km adiacente a LHC, che ospiterebbe, nella prima fase, un collisore elettrone-positrone (FCC-ee) seguito da un collisore di protoni (FCC-hh), con un passaggio di testimone simile a quello avvenuto tra il LEP e LHC. La differenza sostanziale riguarda, per FCC-ee, l'altissima luminosità che sorpasserebbe il LEP fino a cinque ordini di grandezza, la possibilità di produrre bosoni di Higgs e, nella fase finale, coppie di quark top. FCC-hh permetterebbe di raggiungere energie dei fasci sette volte superiori a quelle di LHC, fornendo un'energia nel centro di massa attorno ai 100 TeV. Il tunnel di FCC (vd. fig c) è previsto estendersi nella regione di Ginevra, passando sotto il lago, arrivando a lambire le Alpi a una profondità media di 240 m, giungendo fino a 560 m sotto il livello del suolo. La progettazione del tunnel ha fatto tesoro dell'esperienza costruttiva del tunnel di LEP/LHC,

evitando la problematica roccia carsica, che interesserebbe solo il 2,5% del tunnel posizionato essenzialmente nella molassa. La roccia estratta rappresenta un fattore quattro rispetto a quella estratta per LEP/LHC; sono in corso vari studi per il suo riutilizzo, sia per nuove costruzioni che per l'agricoltura.

Con FCC-ee si utilizzerà la grande mole di dati relativa ai bosoni W, Z, Higgs e al quark top per effettuare misure di precisione che permettano l'utilizzo della meccanica quantistica per esplorare la fisica al di là del modello standard ad alte scale di energia. Nella fase successiva (FCC-hh) il programma di misure continuerà e sarà accompagnato da un notevole incremento della potenzialità di produzione diretta di nuove particelle. Grazie a FCC il viaggiatore che tra vent'anni si troverà a passare nella regione a nord del Monte Bianco avrà "sotto" i suoi piedi una straordinaria opera scientifica, che manterrà la *leadership* europea nella fisica delle alte energie nella seconda metà del secolo.

Biografia

Roberto Tenchini è dirigente di ricerca della sezione di Pisa dell'INFN. È stato presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la fisica delle particelle tra il 2019 e il 2025, *spokesperson* dell'esperimento ALEPH al LEP e responsabile dei gruppi di ricerca sulla fisica elettrodebole e del quark top dell'esperimento CMS a LHC.

Il cielo visto dagli abissi

I telescopi per osservare i neutrini

di Giorgio Riccobene

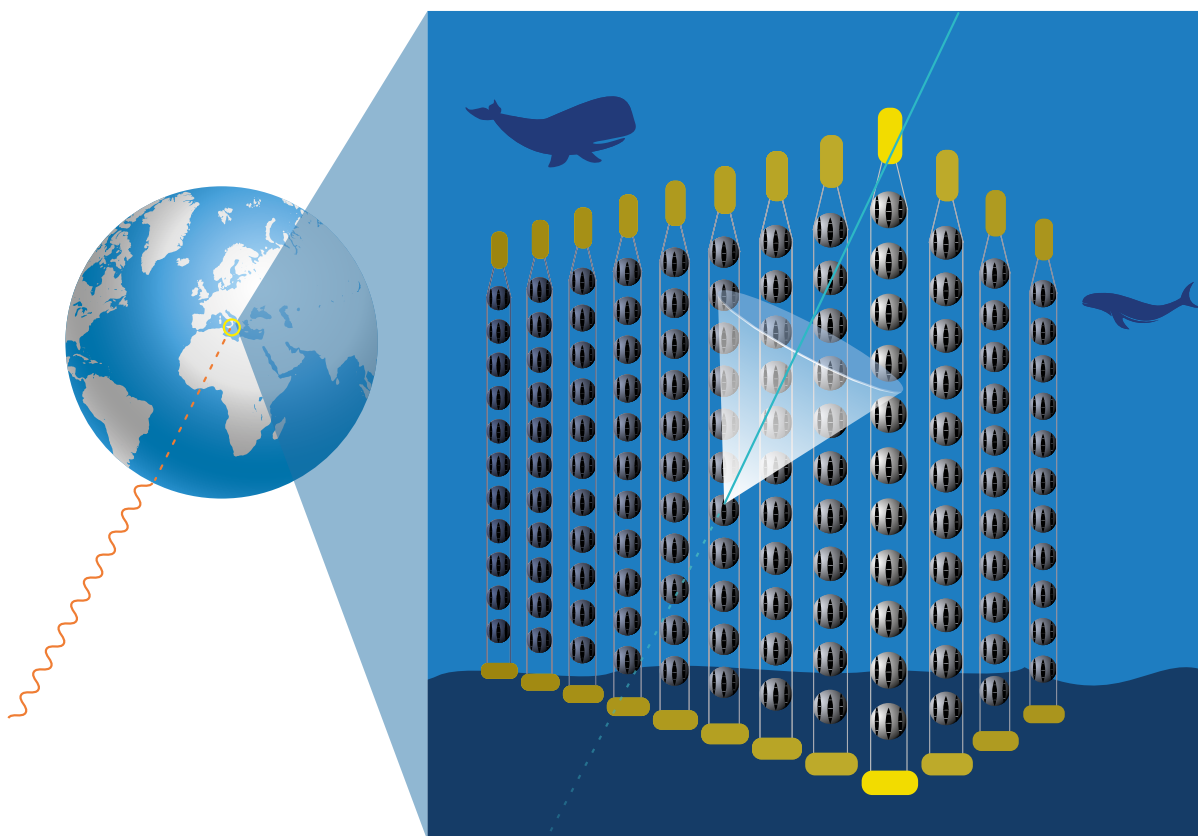


a.
Le unità di rivelazione (stringhe) di KM3NeT-ARCA a bordo della nave Optimus Prime, pronte per essere deposte a 3500 m di profondità. Le stringhe sono avvolte su un lanciatore sferico galleggiante e connesse a una base metallica (pitturata in giallo) che funge da ancora. Il verricello della nave le 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 sciame. 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.

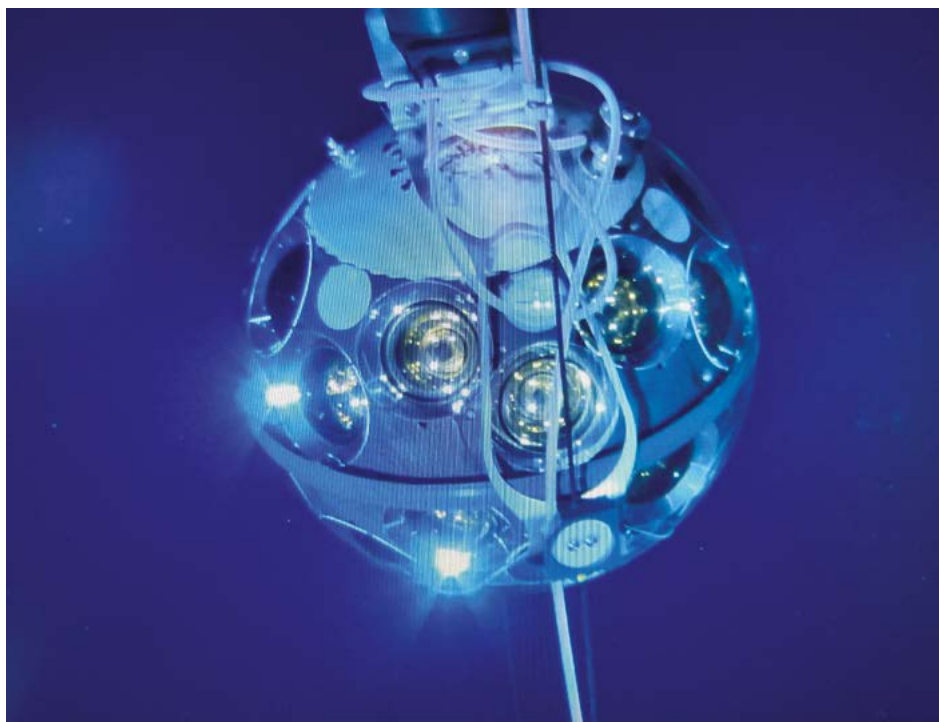
Realizzare un rivelatore capace di monitorare questo enorme volume di materia è estremamente complesso e ha richiesto decine di anni di ricerca e sviluppo per selezionare il sito di installazione e per validare soluzioni tecnologiche che ne permettano il funzionamento in un ambiente marino profondo. 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".

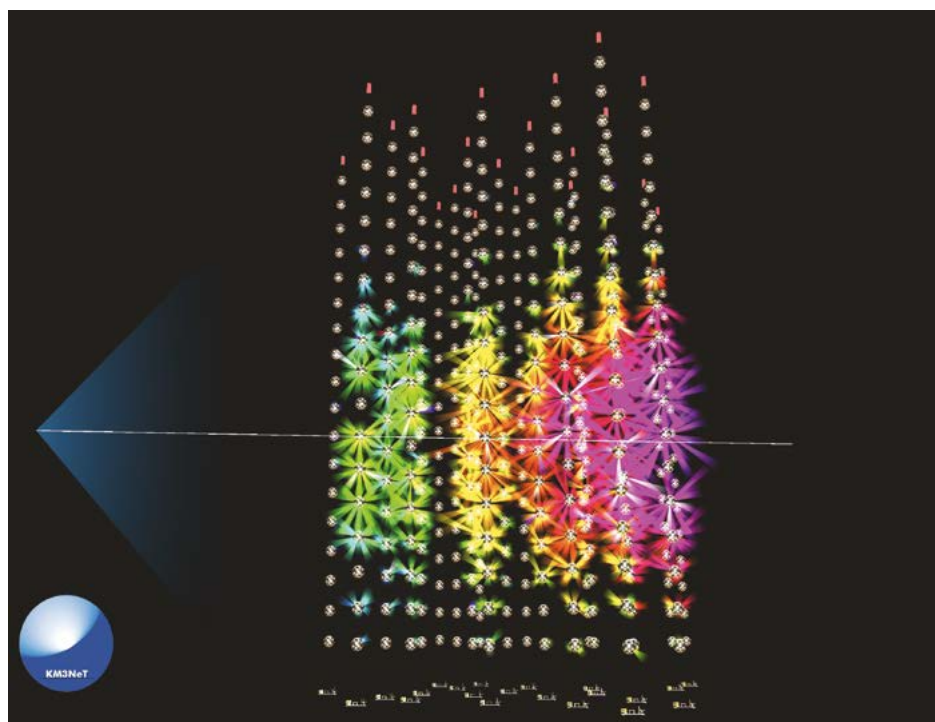
Dopo quasi 10 anni di campagne di misura, concluse nel 2007, l'INFN ha dimostrato che a 100 km al largo di Capo Passero si trovano condizioni ideali per costruire il telescopio: l'acqua marina è così limpida che l'intensità della luce Cherenkov si dimezza dopo oltre 100 m, permettendo di utilizzare soltanto 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!

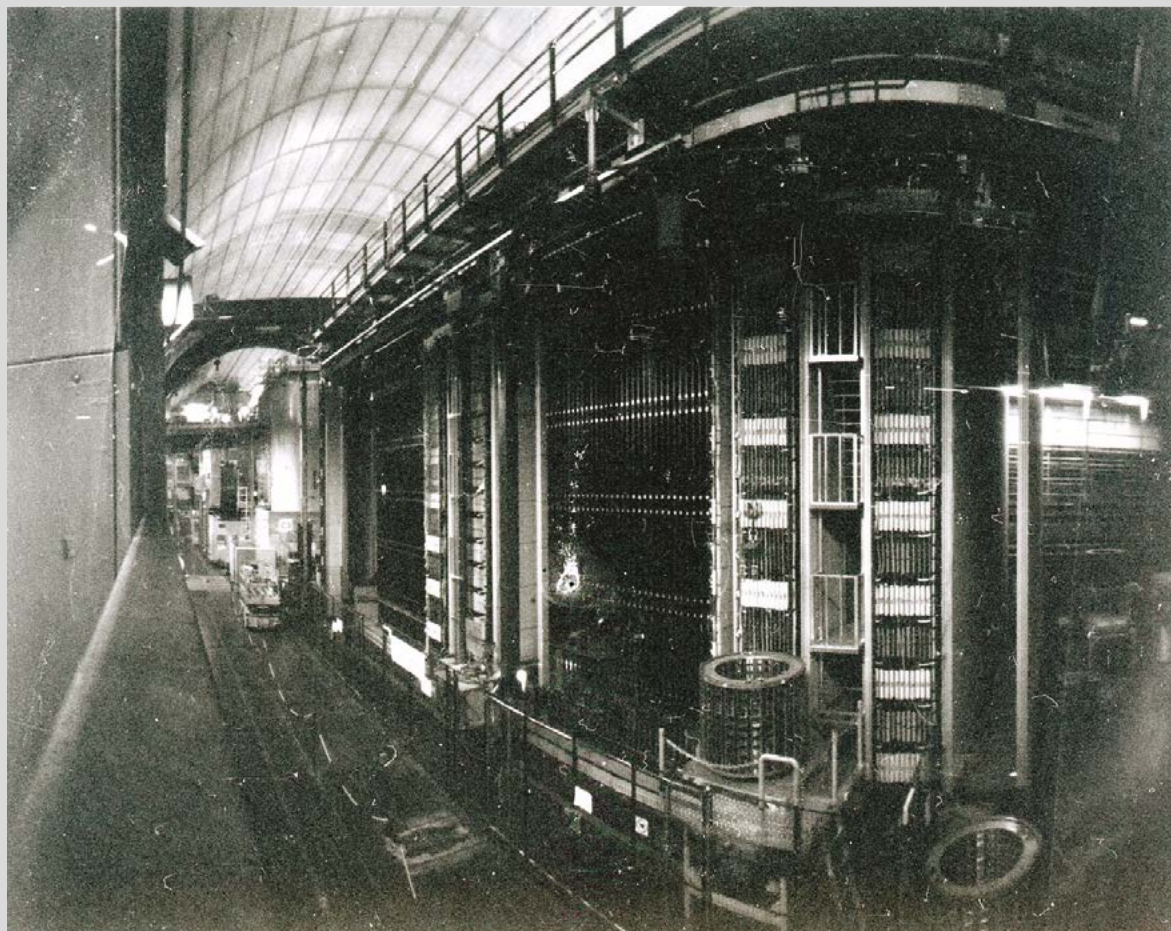
Biografia

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.

Da un sapore a un altro

I rivelatori sotterranei per studiare l'oscillazione dei neutrini

di Andrea Bersani



a.
OPERA (Oscillation Project with Emulsion tRacking Apparatus) è stato progettato per osservare direttamente la comparsa di neutrini tau in un fascio di neutrini muonici prodotto al CERN e inviato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso nell'ambito del progetto CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso). L'esperimento ha raccolto dati tra il 2008 e il 2012 e l'osservazione di eventi di neutrino tau ha fornito la prima evidenza diretta dell'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini tau. L'immagine mostra il rivelatore di OPERA presso i laboratori del Gran Sasso in una foto analogica realizzata con una emulsione fotografica come quelle su cui si basava il rivelatore (vd. p. 40 in *Asimmetrie* n. 31, ndr).

Ogni secondo, miliardi di neutrini attraversano indisturbati ogni cosa (compreso il nostro corpo!). Proprio questa loro natura sfuggente rende i neutrini tra le particelle più difficili da studiare. La loro sezione d'urto, cioè la probabilità di interagire e lasciare una traccia, è estremamente bassa. Da questa rarità nasce la difficoltà di misurare le proprietà delle tre generazioni, o "sapori", dei neutrini: elettronico, muonico e tauonico. Tra le questioni aperte ci sono la misura delle masse, la determinazione dei parametri che governano le oscillazioni da

un sapore all'altro e la possibile differenza di comportamento tra neutrini e antineutrini. Per questo è fondamentale per noi costruire rivelatori molto grandi e altrettanto importante è cercare di eliminare ogni sorgente di segnali indesiderati, materiali radioattivi, disturbi elettromagnetici, raggi cosmici, che accecherebbero i nostri strumenti. Per un rivelatore di neutrini, il fondo di radiazione ambientale è come il Sole di mezzogiorno per una macchina fotografica che tenti di distinguere la fiamma di un fiammifero acceso a cento metri di



b.
DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) è un esperimento internazionale di nuova generazione in costruzione tra il Fermilab (Illinois) e la Sanford Underground Research Facility (Sud Dakota), negli Stati Uniti. Utilizzerà un intenso fascio di neutrini e grandi rivelatori ad argon liquido per studiare con elevata precisione le oscillazioni dei neutrini, determinare l'ordine delle loro masse e cercare possibili differenze tra neutrini e antineutrini che potrebbero aiutare a spiegare l'origine dell'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo. Nella foto è visibile la caverna che ospiterà DUNE, finita di costruire nel 2024.

distanza: il segnale c'è, ma rischia di perdersi completamente nella luce di fondo. Per questo motivo i maggiori esperimenti, con cui cerchiamo di misurare le proprietà sopra citate, sono molto ben nascosti in profondità sotto qualche montagna, o in altri luoghi straordinariamente remoti, in diversi angoli del mondo. Le cosiddette "oscillazioni" sono state per molti decenni il principale oggetto di studio nel campo dei neutrini. Essi sono prodotti e rivelati sempre e solo attraverso l'interazione debole in uno dei tre sapori, i quali, però, non coincidono con gli stati di massa, chiamati ν_1 , ν_2 , ν_3 : ciascun sapore è una diversa combinazione quantistica di questi tre stati. Seguendo le regole della meccanica quantistica, queste "sovrapposizioni" di stati si propagano in modo diverso e complesso, trasformandosi le une nelle altre, secondo un *pattern* che simula una oscillazione dipendente dalla distanza percorsa e dall'energia del neutrino stesso: tutti questi fenomeni, però, possono essere descritti grazie a pochi parametri, che sono appunto ciò che tutti questi esperimenti si sono proposti di misurare.

Tra i laboratori sotterranei più importanti ci sono i nostri Laboratori del Gran Sasso, raggiungibili attraverso il traforo che, passando 1400 metri sotto la vetta del monte più alto degli Appennini, collega l'Aquila a Teramo. Troviamo lì diversi esperimenti che hanno attratto ricercatori da Asia, Europa e Americhe, molti proprio dedicati al neutrino e alle sue oscillazioni.

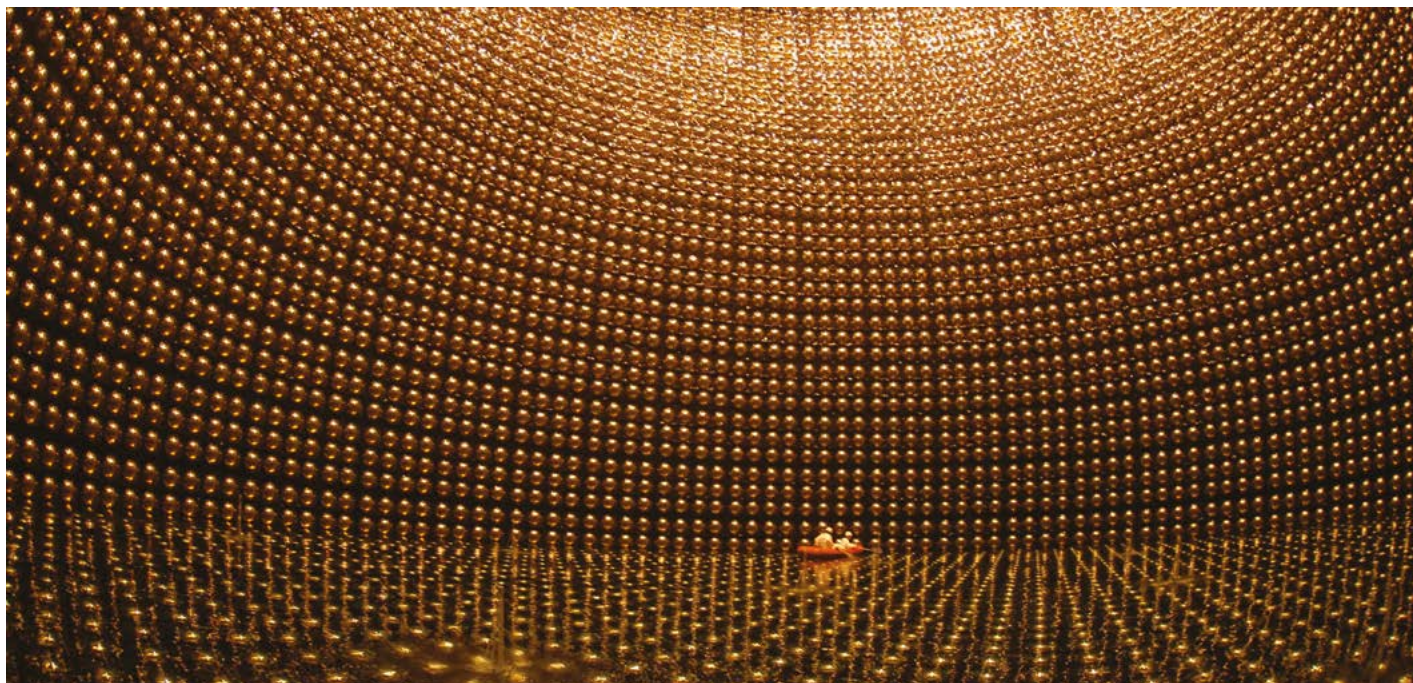
Almeno tre hanno segnato pietre miliari per lo studio delle oscillazioni. BOREXINO, basato su uno scintillatore liquido estremamente radiopuro, ha permesso di misurare in tempo reale neutrini solari di bassissima energia, contribuendo in modo decisivo alla comprensione dei meccanismi di produzione di energia nel Sole e alla verifica del quadro delle oscillazioni dei neutrini solari.

Tra gli esperimenti più grandi costruiti presso i Laboratori del

Gran Sasso c'è OPERA (vd. fig. a), basato su lastre fotografiche (milioni di lastre fotografiche!), in grado di ricostruire con precisione micrometrica le tracce delle particelle prodotte nelle interazioni, l'unico in grado di vedere la firma caratteristica del neutrino tau. OPERA ha dimostrato che alcuni neutrini muonici prodotti al CERN, durante il percorso di 730 km per arrivare ai Laboratori del Gran Sasso, si erano trasformati in neutrini tau. I neutrini trasformati erano appena dieci su 5603 interazioni ricostruite! Lo stesso fascio è stato utilizzato da ICARUS, un'idea di Carlo Rubbia nella seconda metà degli anni '70 del secolo scorso, un esperimento basato sulla ricostruzione di tracce prodotte in un enorme recipiente pieno di argon, il cui scopo principale era studiare l'ipotetica oscillazione in un quarto tipo di neutrino, la cui esistenza non è ancora stata dimostrata.

Andando oltreoceano, la miniera di Homestake in Sud Dakota sarà la sede di DUNE (vd. fig. b), basato sull'esperienza di ICARUS, il più grande esperimento oggi in costruzione per la misura di oscillazione del neutrino, disegnato per rivelare neutrini prodotti al Fermilab, vicino a Chicago, a oltre 1300 km di distanza.

La maggior parte di questi esperimenti sono stati installati in miniere abbandonate o ancora in attività, come SNO a Subdury, in Canada, che dopo una fase in cui ha usato acqua pesante, in cui il deuterio prende il posto dell'idrogeno, principalmente per lo studio delle oscillazioni dei neutrini solari, è stato riconvertito recentemente a scintillatore, per affiancare i risultati di BOREXINO e KamLAND, il primo già citato, il secondo situato nella miniera di Kamioka, in Giappone. KamLAND ha avuto molte vite. Prima era principalmente dedicato alla misura delle oscillazioni di antineutrini provenienti dai reattori nucleari di Giappone e Corea e di neutrini provenienti dai decadimenti dei materiali radioattivi nella Terra, i cosiddetti "geoneutrini", poi è stato migliorato per osservare neutrini solari, infine "drogato"



c.

SuperKamiokaNDE è un grande rivelatore Cherenkov contenente 50.000 tonnellate di acqua ultrapura, situato in Giappone. Misurando neutrini prodotti nell'atmosfera, dal Sole, da acceleratori e da altre sorgenti, ha fornito risultati fondamentali sul fenomeno delle oscillazioni dei neutrini, contribuendo alla scoperta premiata con il premio Nobel per la fisica nel 2015.

con un particolare isotopo dello XENON per misurare il doppio decadimento beta senza neutrini.

Nella stessa miniera di Kamioka si trovano diversi esperimenti. KamiokaNDE è stato il primo, nato per osservare il decadimento del protone (che finora non è stato osservato, peraltro) e che è valso ai suoi scienziati il premio Nobel nel 2002 per la prima osservazione di neutrini astrofisici. Evolutosi in SuperKamiokaNDE (vd. fig. c), con 50.000 tonnellate di acqua osservata da migliaia di fotomoltiplicatori di oltre mezzo metro di diametro, l'esperimento mostrò che i neutrini muonici prodotti nell'alta atmosfera cambiavano sapore attraversando la Terra, una scoperta premiata con il Nobel per la fisica 2015 a Takaaki Kajita. SuperKamiokaNDE verrà sostituito da HyperKamiokaNDE, che inizierà a prendere dati nel 2028 e conterrà l'enorme massa di 260.000 tonnellate d'acqua. La ricerca di volumi d'acqua giganteschi per neutrini di altissima energia ha portato a sfruttare grandi masse d'acqua fornite dalla natura stessa. Il primo esperimento, tutt'ora in attività, si trova nel lago Bajkal, oltre mille metri sotto la superficie del lago più grande del mondo. Ammodernato diverse volte, è in costruzione la sua evoluzione verso la scala

del chilometro cubo, che è considerata la meta di questo tipo di rivelatori. Al Polo Sud (letteralmente, il rivelatore contiene il Polo Sud geografico!) è stato costruito IceCube, a circa 2 km di profondità nel ghiaccio: questi rivelatori guardano principalmente al cielo, ma sono ottimizzati per i neutrini che vengono dal basso, così da schermare al meglio i segnali "meno interessanti" provenienti dall'alto. Bajkal e IceCube "guardano" a direzioni diverse nel cielo. Un altro grande rivelatore è in costruzione nel Mediterraneo, KM3NeT (vd. p. 18, ndr). Quest'ultimo è diviso in due parti, ARCA e ORCA, il primo più grande e distribuito, ottimizzato per i neutrini di origine astrofisica, al largo delle coste siciliane, il secondo più piccolo e denso di rivelatori, dedicato proprio ai neutrini atmosferici e allo studio delle oscillazioni, al largo di Tolone: miliardi di metri cubi d'acqua strumentati con decine di migliaia di rivelatori per osservare le particelle più leggere dell'universo. È solo grazie al silenzio delle profondità, sotto chilometri di roccia, acqua o ghiaccio, che possiamo studiare i neutrini e cercare risposte ad alcune delle domande più profonde sulla materia e sull'universo.

Biografia

Andrea Bersani è tecnologo alla sezione INFN di Genova, dove si occupa principalmente di magneti superconduttori per acceleratori e rivelatori di particelle, dopo aver lungamente lavorato su sviluppo, costruzione e integrazione di rivelatori, sia per fisica adronica che soprattutto per neutrini.

Lascia e raddoppia

La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

di Maura Pavan



La miniera è un labirinto buio. Camminiamo in silenzio accompagnati dal chiacchiericcio di minatori e minatrici, indossiamo i loro stessi abiti: stivali di gomma, tuta, elmetto e lampada. In fondo a una lunga galleria, compare una porta bianca incastonata nella roccia. Sembra l'ingresso della tana del Bianconiglio, ma dietro niente mondo fantastico: c'è un esperimento di fisica fondamentale. Siamo nel 1991, a 50 km da Pechino, 521 metri sottoterra. Uno dei tanti laboratori sotterranei utilizzati ieri, oggi o domani per la ricerca del doppio decadimento beta.

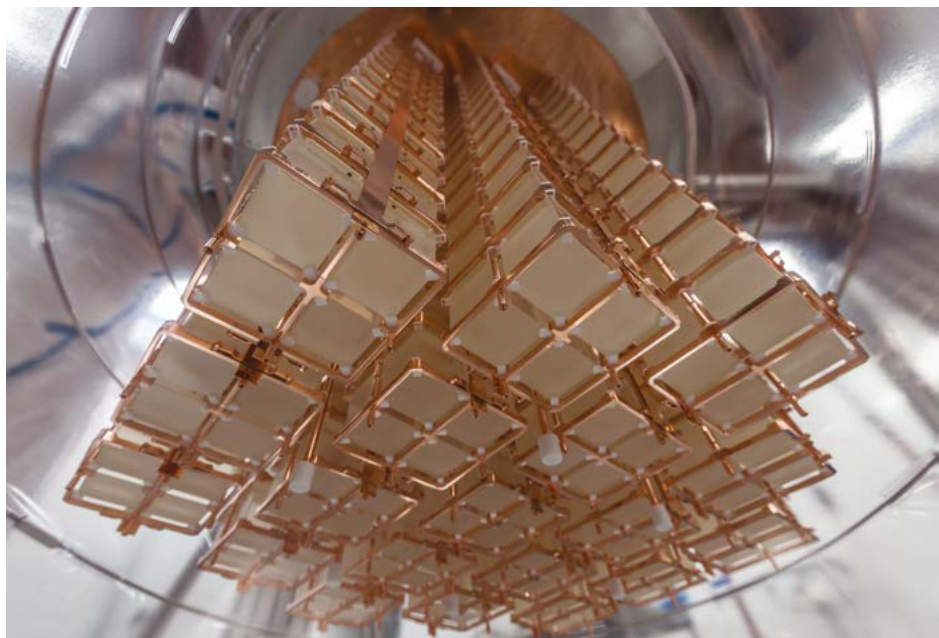
Un elemento chimico è definito dal numero di protoni nel suo nucleo (un protone fa l'idrogeno, due l'elio). Il numero di neutroni, invece, può variare, creando diverse versioni dello stesso elemento chiamate isotopi. Mentre alcuni sono stabili, altri sono instabili e decadono per trovare un equilibrio migliore. Non sappiamo quando un singolo atomo decadrà, ma conosciamo il suo tempo di dimezzamento, ovvero quanto occorre perché metà del campione si trasformi.

Nel decadimento beta, un neutrone del nucleo si trasforma in un protone. L'energia in eccesso crea due nuove particelle: un elettrone (materia) e un antineutrino (antimateria). Questo schema si replica in tutte le trasformazioni in cui l'energia si trasforma in massa: si crea sempre materia associata a una controparte di antimateria. Se questa regola fosse stata rispettata alla perfezione durante il Big Bang, l'energia primordiale avrebbe creato materia e antimateria in parti uguali. Invece la materia ha prevalso, e il nostro universo ne è oggi interamente costituito: è quella che chiamiamo "asimmetria barionica".

La chiave di questo mistero potrebbe nascondersi nel doppio decadimento beta. Nella sua versione "standard" questo processo equivale a due decadimenti beta

a.

Il rivelatore dell'esperimento Majorana all'interno del suo massiccio schermo di rame e piombo. Concluso con successo il suo percorso scientifico alla Sanford Underground Research Facility (SURF), la tecnologia e il prezioso *know-how* sviluppati da questa collaborazione si stanno ora fondendo con l'esperienza dell'esperimento GERDA per la realizzazione di LEGEND, il futuro grande progetto internazionale per la ricerca sul germanio-76.



b.

Vista delle 19 torri di CUORE. All'orizzonte della conclusione della sua presa dati, l'esperimento ha centrato i suoi traguardi di sensibilità, vincendo la scommessa tecnologica di un rivelatore innovativo e posizionandosi ai vertici mondiali nella caccia al doppio decadimento beta. Forte di queste enormi sfide superate, CUORE lascia il passo a CUPID: il nuovo esperimento sfrutterà una versione più avanzata della stessa tecnologia bolometrica, puntando a confermarsi come uno dei progetti più competitivi del futuro.

simultanei. Tuttavia, se il neutrino coincidesse con la propria antiparticella – il cosiddetto “neutrino di Majorana” – diventerebbe possibile un'altra modalità: i due neutrini potrebbero “annullarsi” tra loro all'interno del nucleo, lasciando uscire soltanto i due elettroni e il decadimento si chiamerebbe “doppio decadimento beta senza neutrini”. Un evento simile creerebbe materia senza antimateria, offrendo una spiegazione non solo per l'asimmetria barionica, ma anche per la leggerezza dei neutrini rispetto ai leptoni carichi e ai quark (un altro “sassolino nella scarpa” per i fisici).

Le collaborazioni GERDA e Majorana (rispettivamente ai Laboratori del Gran Sasso e alla Sanford Underground Research Facility - SURF, vd. fig. a), studiando il doppio decadimento beta del germanio-76, hanno provato che mentre il canale standard mostra un tasso di 2 eventi al giorno per kg, il doppio decadimento beta senza neutrini (chiamato anche “canale di Majorana”) non ha prodotto segnali, stabilendo un limite superiore di meno di 3 decadimenti l'anno per 100 kg di isotopo. Conclusioni analoghe sono state raggiunte dagli esperimenti CUORE (al Gran Sasso) e Kamland-ZEN (a Kamioka, in Giappone), studiando il tellurio-130 e lo xenon-136: il decadimento nel canale standard è raro ma osservabile, quello nel canale di Majorana se esiste è ancora al di là della portata di questi esperimenti.

Come si studia questo processo e quali sono gli obiettivi della ricerca? Ci si concentra su isotopi che offrono condizioni ideali: producono elettroni energetici, sono reperibili in grandi quantità e

integrabili in un rivelatore ad alte prestazioni.

La sfida è tutta nell'evitare i falsi positivi indotti dalla radioattività naturale e dai raggi cosmici: gli esperimenti sono sotto chilometri di roccia e utilizzano materiali con contaminazioni radioattive svariati ordini di grandezza inferiori a quelle dei materiali comuni.

Il parametro che misura i progressi di questa ricerca è la “massa di Majorana” del neutrino, una costante universale legata al tempo di dimezzamento da un rapporto di proporzionalità inversa al quadrato. Tale legame varia tra i diversi isotopi, ma è ricavabile con qualche approssimazione dai modelli nucleari. I risultati degli esperimenti GERDA, Majorana, CUORE e Kamland-ZEN corrispondono al limite superiore della massa di Majorana di qualche centinaio di millielettronvolt (meV). La sfida per la prossima generazione di esperimenti è di arrivare a poche decine di meV.

Alcune grandi collaborazioni internazionali sono attualmente in prima linea in questa impresa.

In Giappone, a mille metri di profondità, KamLAND-Zen utilizza 800 kg di xenon-136 diluito in un liquido scintillante. L'energia dei due elettroni si converte in “lampi” di luce, rivelati da una schiera di sensori (fotomoltiplicatori). Il tutto è racchiuso all'interno di un enorme pallone di 13 metri di diametro che fa da schermo attivo contro i falsi segnali esterni. L'esperimento vanta oggi una delle sensibilità più alte al mondo e si sta preparando a un ulteriore potenziamento.

In Italia, presso i Laboratori del Gran Sasso, LEGEND raccoglie l'eredità di GERDA e Majorana



C.
Il fisico Ettore Fiorini (1933–2023). A lui si devono le intuizioni rivoluzionarie che hanno tracciato la strada della ricerca sul doppio decadimento beta: l'idea di usare i diodi al germanio negli anni '60 e, successivamente, nel 1984, la proposta di sviluppare i rivelatori termici per studiare isotopi differenti dal germanio-76. Due visioni straordinarie, che oggi trovano il loro coronamento nei grandi esperimenti LEGEND e CUORE/CUPID ai Laboratori del Gran Sasso.

e, utilizzando una tecnica proposta negli anni '60 da Ettore Fiorini, sta completando l'installazione di alcune decine di diodi al germanio per una massa totale di circa 200 kg di germanio-76. In questo caso l'energia dei due elettroni produce nel diodo, in cui avviene il decadimento, un insieme di coppie elettrone-lacuna che danno origine a un impulso elettrico. I diodi sono immersi in un bagno di argon liquido che funge sia da refrigerante che da schermo attivo, grazie alle proprietà di scintillazione dell'argon. Nel frattempo si lavora già a un'infrastruttura futura che arriverà a 1000 kg di germanio-76.

Sempre ai Laboratori del Gran Sasso, si sta concludendo il percorso scientifico di CUORE, segnando il coronamento di una visione durata decenni: quella di Ettore Fiorini, che di questa linea di ricerca non è stato solo l'ideatore, ma il principale artefice e guida. La tecnologia cambia radicalmente e si basa sui rivelatori termici, o "bolometri", capaci di trasformare

l'energia cinetica degli elettroni direttamente in calore. CUORE studia il decadimento del tellurio-130 attraverso 988 cristalli di ossido di tellurio (TeO_2) raffreddati a temperature vicine allo zero assoluto. Terminata con successo questa missione, il testimone passerà a CUPID, che sostituirà i cristalli di ossido di tellurio con cristalli di molibdato di litio (LMO) per studiare il molibdeno-100. Qui si sfrutta la versatilità della tecnica bolometrica, che consente di cambiare isotopo, una strategia che permette di raggiungere sensibilità molto maggiori senza dover costruire un'infrastruttura nuova che contenga un rivelatore più grande.

Infine, si sta già ragionando su un orizzonte temporale ancora più lontano, pensando a sfruttare sinergie con altre attività sperimentali, che usano o useranno rivelatori di grandissime dimensioni, oppure mirando alla realizzazione di più installazioni sperimentali, i cui risultati possano essere combinati per raggiungere sensibilità maggiori.

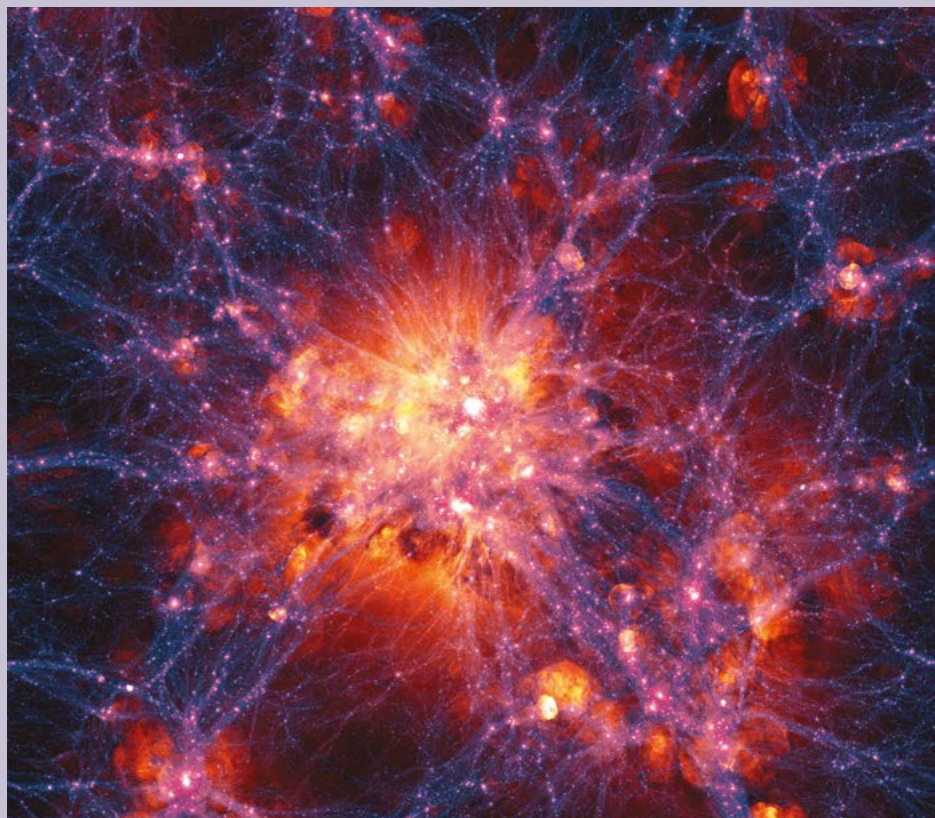
Biografia

Maura Pavan è professoressa all'Università di Milano-Bicocca e associata alla locale sezione dell'INFN. Dopo gli studi sotto la guida di Ettore Fiorini, svolge da sempre la sua attività di ricerca nel campo della fisica del neutrino, concentrandosi principalmente sullo sviluppo e l'applicazione dei rivelatori termici. Attualmente è *co-spokesperson* della collaborazione CUPID.

Prova a prendermi

La ricerca di materia oscura con esperimenti sotterranei

di Paolo Gorla e Federica Petricca



a.
Visualizzazione della struttura a grande scala dell'universo, ottenuta dalla simulazione cosmologica Illustris. L'immagine mostra la complessa rete di filamenti che collega i massicci ammassi di galassie.

Quarant'anni sottoterra, a scrutare il cielo, e ancora nessun segnale. Da decenni scienziati da tutto il mondo si ritrovano in luoghi unici, come i Laboratori del Gran Sasso, unendo competenze e strumenti nella sfida di svelare uno dei più grandi misteri della fisica: la materia oscura. Capire cosa tiene insieme le stelle nelle galassie e governa l'attrazione gravitazionale tra i corpi celesti è infatti una delle questioni più affascinanti nello studio del cosmo.

La materia oscura potrebbe spiegare numerose osservazioni astrofisiche e cosmologiche legate alla gravità che, ancora oggi, non trovano una spiegazione completa.

A partire dagli anni '30 del '900 abbiamo iniziato a capire che la materia visibile dell'universo – stelle, pianeti e gas interstellare – rappresenta solo una piccola frazione del cosmo. Il resto è costituito da una componente invisibile, che non emette luce e interagisce debolmente con la materia ordinaria, ma che si

manifesta attraverso i suoi effetti gravitazionali sul moto di stelle e galassie.

Oggi sappiamo che la materia ordinaria costituisce circa il 5% del contenuto dell'universo, mentre la materia oscura ne rappresenta circa il 27%. Il restante 68% è attribuito all'energia oscura, una componente ancora più enigmatica, responsabile dell'espansione accelerata dell'universo. Comprendere la natura della materia oscura e studiarne le proprietà è una delle grandi sfide della fisica moderna.

L'ipotesi più accreditata è che la materia oscura sia composta da particelle elementari diverse da quelle che conosciamo, distribuite attorno alle galassie a formare una sorta di nuvole di forma sferica, i cosiddetti "aloni galattici". La loro presenza contribuirebbe significativamente ad aumentare la massa delle galassie, spiegando gli effetti che osserviamo: dal moto delle stelle nella rotazione galattica all'attrazione tra galassie vicine.



b.
Dettagli della Time
Projection Chamber
dell'esperimento
XENON-nT durante
le fasi di costruzione
dell'apparato.

Ma perché non abbiamo mai osservato queste particelle?

La materia oscura non interagisce con la luce né con le forze nucleari forti. Tuttavia, la sua massa esercita un'attrazione gravitazionale misurabile.

L'ipotesi è che comunichi con il resto dell'universo attraverso una forza estremamente flebile che la rende uno dei componenti più elusivi della natura. Come possiamo allora misurarne la natura? L'idea è quella di realizzare rivelatori in cui sia possibile misurare l'interazione delle particelle di materia oscura con i nuclei degli atomi che li costituiscono. Quando una di queste particelle urta un nucleo atomico, rilascia una quantità minuscola di energia: un segnale debolissimo ma potenzialmente misurabile che può fornire informazioni sulla particella che lo ha urtato.

Purtroppo queste interazioni sono rarissime, soprattutto se confrontate con quelle causate dai raggi cosmici che ci piovono sulla testa dallo spazio. Per questo motivo, per avere una possibilità di osservare un segnale, è fondamentale installare i rivelatori in laboratori sotterranei, dove la roccia sovrastante funge da scudo naturale contro il rumore di fondo cosmico.

Un passo importante in questa direzione arriva nel 1984, quando Andrzej Drukier e Leo Stodolski propongono per la prima volta di utilizzare rivelatori criogenici per osservare i neutrini attraverso lo *scattering* coerente sui nuclei. L'anno successivo, Mark Goodman e Edward Witten mostrano come questi stessi rivelatori possano essere impiegati per cercare particelle di materia oscura presenti nell'alone della nostra galassia.

Nel 1986 iniziano i primi tentativi sperimentali. Da un lato Oliviero Cremonesi, dall'altro Frank Avignone e collaboratori,

conducono ricerche utilizzando rivelatori al germanio. Il primo, utilizzando i dati di un rivelatore installato nel laboratorio del Monte Bianco, attivo negli anni '80 lungo il traforo tra Italia e Francia; l'altro nella miniera di Homestake, in Sud Dakota, lo stesso sito in cui Raymond Davis Jr. realizzò la prima misura dei neutrini solari (vd. p. 4, ndr). La sensibilità di questi strumenti si rivela insufficiente per osservare la materia oscura. Nonostante ciò, si apre una nuova era di esplorazione scientifica, che dà impulso allo sviluppo di rivelatori sempre più sofisticati, con l'obiettivo di cogliere per la prima volta un segnale dovuto alla presenza dell'alone galattico di materia oscura.

Nel tempo gli scienziati hanno messo in campo tecnologie sempre più innovative per rivelare la materia oscura, riuscendo, ad esempio, a distinguere una particella neutra, come ci si aspetta che sia la materia oscura, da una particella carica e a misurarne l'energia con una precisione un tempo impensabile. Oggi, fisici delle particelle da ogni parte del mondo, affrontano la sfida della caccia alla materia oscura nei laboratori sotterranei sparsi per tutto il globo, dal nord America al Giappone, passando per l'Europa fino ad arrivare alla Cina. In questo scenario i Laboratori del Gran Sasso giocano un ruolo di primo piano, ospitando alcuni degli esperimenti più sensibili al mondo per la ricerca di materia oscura.

Nonostante le innumerevoli osservazioni astrofisiche che hanno portato al modello degli aloni galattici, le caratteristiche della materia oscura (natura, origine, massa) rimangono ancora ignote. Per questo la caccia si combatte su più fronti.

All'interno dei Laboratori dell'INFN sotto il massiccio del Gran Sasso numerosi esperimenti sfruttano caratteristiche



c.
Uno dei moduli
criogenici
dell'esperimento
CRESST durante la fase
di assemblaggio del
rivelatore.

differenti per cercare di massimizzare le possibilità di scoperta. Da un lato un "gigante" tecnologico, l'esperimento XENON-nT, che rappresenta uno dei punti di riferimento a livello mondiale per la ricerca di materia oscura (assieme ai suoi "gemelli": l'americano LZ a Sanford Underground Research Facility e il cinese PANDA-X, nel China Jinping Underground Laboratory). XENON-nT ha raggiunto livelli di sensibilità senza precedenti, grazie all'utilizzo di un rivelatore a doppia fase, basato su circa otto tonnellate di xenon liquido e gassoso racchiuse in un'imponente struttura (vd. fig b). Questi enormi volumi sono indispensabili per aumentare la probabilità di interazione con particelle di materia oscura relativamente pesanti (da decine a centinaia di masse del protone). Eppure, finora, non c'è ancora nessuna evidenza.

All'estremo opposto, la ricerca si fa con rivelatori piccolissimi e ultra-precisi. CRESST, basato su cristalli scintillanti di tungstato di calcio del peso di pochi grammi (vd. fig c), è in grado di raggiungere soglie di energia senza pari (pochi elettronvolt). Operando a temperature prossime allo zero assoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$), questi sono in grado di registrare gli impercettibili urti di particelle di materia oscura leggera, rendendo l'esperimento un riferimento internazionale nella ricerca di particelle di materia oscura con massa inferiore a quella di un protone.

Gli esperimenti SABRE e COSINUS cercano di avere una conferma indipendente dei risultati osservati per la prima volta da DAMA/LIBRA (vd. in Asimmetrie n. 4 p. 37, ndr), utilizzando approcci complementari basati su cristalli di ioduro di sodio, e si preparano a entrare in presa dati.

Il prototipo CYGNO sta sviluppando una tecnologia capace di tracciare la direzione di provenienza delle particelle di materia oscura, per sfruttare il movimento del sistema solare nell'alone galattico che conferisce alla materia oscura una direzione di provenienza privilegiata.

Mentre la caccia prosegue con gli strumenti attuali, la comunità scientifica guarda già alla prossima generazione di rivelatori ultra-sensibili. L'esperimento DarkSide-20k, attualmente in costruzione, impiegherà oltre 20 tonnellate di argon in un rivelatore a doppia fase, spingendo ancora più in là i limiti di sensibilità.

In fondo, 40 anni di ricerche senza un'osservazione definitiva non hanno scoraggiato la comunità scientifica, che si prepara a rilanciare la sfida per la prima osservazione della materia oscura sotto il massiccio del Gran Sasso con rivelatori grandi come edifici o piccoli come cristalli.

Biografie

Paolo Gorla è ricercatore presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Da sempre interessato alla fisica del neutrino e degli eventi rari, ha sviluppato rivelatori criogenici operanti a temperature prossime allo zero assoluto. Partecipa a importanti collaborazioni internazionali per la ricerca del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini (CUORE/CUPID) e della materia oscura (CRESST).

Federica Petricca è ricercatrice e Group Leader presso il Max-Planck-Institut für Physik di Monaco di Baviera. La sua attività di ricerca si concentra sulla fisica delle astroparticelle, con un focus specifico sulla ricerca diretta della materia oscura e nello sviluppo di rivelatori criogenici d'avanguardia. È responsabile internazionale dell'esperimento CRESST, condotto presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Le stelle sotto la montagna

L'esperimento LUNA ai Laboratori del Gran Sasso

di Alba Formicola e Gianluca Imbriani



a.
Dettaglio dell'apparato sperimentale di LUNA400 ai Laboratori del Gran Sasso. In primo piano si vedono la linea di fascio, che trasporta le particelle accelerate fino al bersaglio, e parte del sistema di rivelazione usato per misurare le reazioni nucleari di interesse astrofisico.

Nei Laboratori del Gran Sasso esiste un acceleratore di particelle che lavora da oltre trent'anni nel silenzio della roccia. Si tratta dell'esperimento LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics), che misura direttamente le reazioni nucleari che alimentano le stelle, aprendo una nuova frontiera dell'astrofisica sperimentale.

Tra i risultati più importanti di LUNA c'è la misura ad alta precisione della reazione tra protone e deuterio, che dà origine all'elio-3 con l'emissione di radiazione gamma, pubblicata su Nature nel 2020. Questa misura ha permesso di determinare con maggiore accuratezza l'abbondanza finale del deuterio prodotta durante la nucleosintesi primordiale del Big Bang, uno dei parametri chiave per ricavare la densità di materia barionica dell'universo.

LUNA nacque nel 1991 per trovare una risposta al problema dei neutrini solari. Dalla fine degli anni '60, gli esperimenti che rivelavano neutrini provenienti dal Sole misuravano un flusso significativamente più basso rispetto alle previsioni del modello solare standard sviluppato da John Bahcall. Nel 1972 il futuro premio Nobel William Fowler pubblicò su Nature un breve articolo in cui propose una possibile, per sua stessa ammissione disperata, soluzione: l'esistenza di una risonanza a bassa energia in una delle reazioni finali della catena protone-protone, il processo che alimenta il Sole. Una risonanza avrebbe infatti modificato il bilancio delle reazioni nucleari nel centro della stella, riducendo la produzione dei neutrini associati al decadimento del berillio-7 e riconciliando così teoria ed esperimenti (vd. in Asimmetrie n. 26 p. 18, ndr). Fu allora che nacque un'idea semplice e radicale: proporre di svolgere l'esperimento sottoterra. Operando in un ambiente sotterraneo, dove il fondo cosmico è fortemente soppresso, è possibile spingersi verso energie sempre più basse, avvicinandosi, per la prima volta, alla regione di interesse astrofisico. A energie così basse, infatti, il numero di reazioni nucleari prodotte diventa estremamente piccolo e, senza la schermatura naturale offerta dalla montagna, il segnale verrebbe completamente sommerso dal fondo generato dai raggi cosmici.

Facendo questo tipo di misure nelle sale sperimentali sotterranee dei laboratori del Gran Sasso è stato possibile



ridurre drasticamente il fondo cosmico e spingere le misure fino alle energie del Sole, escludendo l'esistenza di questa risonanza (vd. in Asimmetrie n. 9 p. 24, ndr).

La soluzione del problema dei neutrini solari arrivò poco dopo, all'inizio degli anni 2000, dalla conferma della teoria di Pontecorvo: i neutrini cambiano identità durante il loro viaggio verso la Terra, il fenomeno noto come oscillazione dei neutrini (vd. p. 22, ndr). LUNA aveva però ormai dimostrato che le reazioni nucleari di interesse astrofisico potevano essere misurate direttamente nella regione energetica delle stelle, aprendo una nuova frontiera sperimentale.

Oggi il programma sperimentale di LUNA è entrato in una nuova fase, grazie al nuovo acceleratore da 3,5 MV, la Bellotti Ion Beam Facility, entrata in funzione sempre ai Laboratori del Gran Sasso nel 2023, che consente di estendere le misure a reazioni nucleari rilevanti per le fasi avanzate dell'evoluzione stellare.

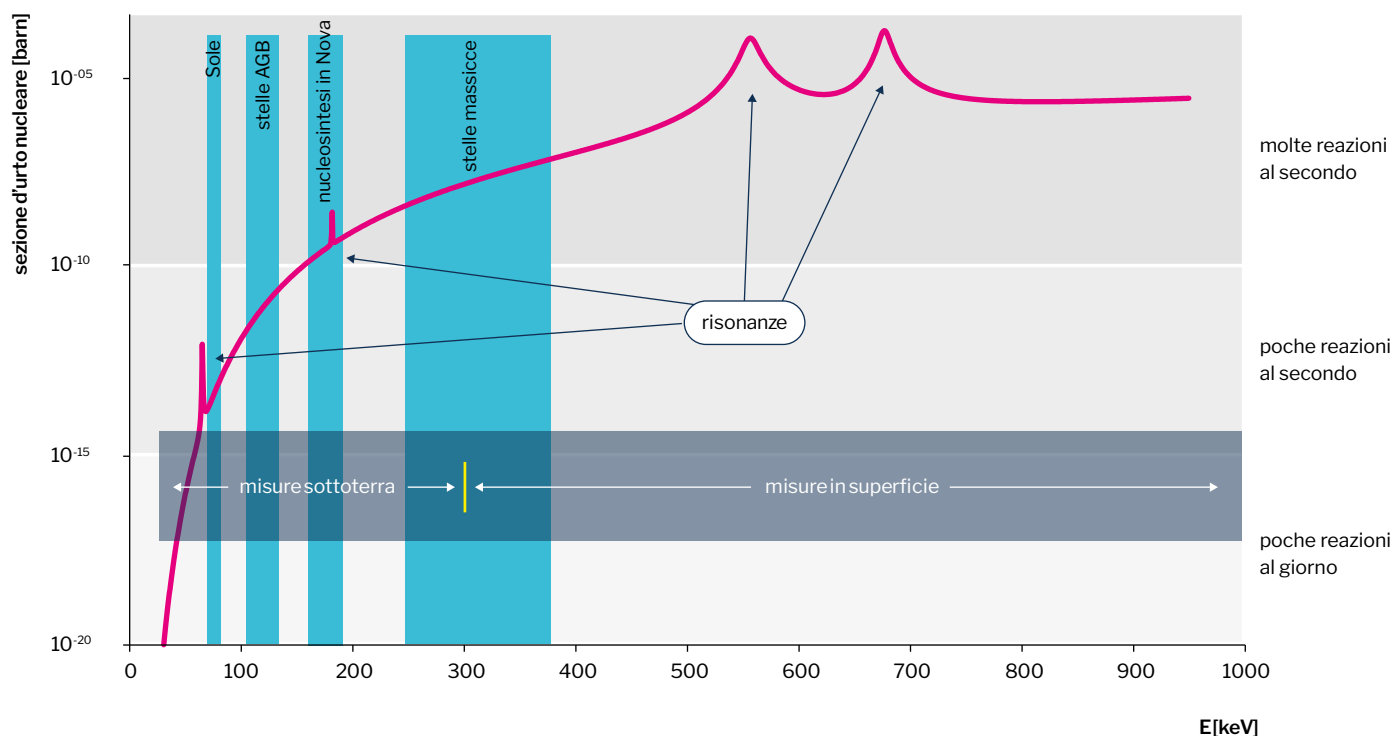
Tra queste, un ruolo centrale è giocato dalla reazione di fusione tra due nuclei di carbonio-12, che segna l'innesco della combustione del carbonio nelle stelle massicce, ovvero stelle con massa maggiore di circa 8 volte quella del Sole. Si tratta di un passaggio cruciale, da cui dipende la struttura del nucleo stellare, le fasi evolutive successive e, in ultima analisi, il destino finale della stella, dall'esplosione come supernova alla formazione di una stella di neutroni o di un buco nero.

Il bruciamento del carbonio è inoltre alla base dei modelli delle supernovae di tipo Ia, utilizzate come indicatori di distanza su scala cosmologica. Le condizioni di innesco della combustione del carbonio determinano infatti le proprietà osservabili dell'esplosione e quindi la calibrazione di queste sorgenti come candele standard. Nonostante questa importanza, la reazione tra due nuclei di carbonio-12 rimane una delle principali fonti di incertezza nei modelli astrofisici.

Nel regime di energia rilevante per le stelle ($E \lesssim 2-3$ MeV), la sezione d'urto è estremamente piccola e le misure dirette sono ostacolate dal fondo cosmico. Di conseguenza, i tassi di reazione utilizzati nei modelli stellari si basano in larga parte su estrapolazioni affette da incertezze significative o su misure indirette. La possibile presenza di risonanze a bassa energia, non ancora osservate direttamente, potrebbe modificare in modo sostanziale tali tassi.

In particolare, anche variazioni moderate della sezione d'urto possono spostare la soglia di massa che separa stelle che terminano la loro evoluzione come supernovae a collasso del nucleo da quelle che evolvono verso la formazione di nane bianche di carbonio-ossigeno, potenziali progenitrici di supernovae di tipo Ia. I risultati di questa misura saranno inoltre cruciali per chiarire il ruolo della struttura a *cluster* dei nuclei e il suo possibile impatto sull'insorgenza di risonanze nella regione di bassa energia.

b.
La Bellotti Ion Beam Facility nei Laboratori del Gran Sasso. In primo piano sono visibili le due linee di fascio, che guidano le particelle accelerate verso gli esperimenti; sullo sfondo, la *tank* dell'acceleratore da 3,5 MV.



La misura della reazione tra due nuclei di carbonio-12 è attualmente in corso presso la Bellotti Facility, e i primi dati nel regime astrofisico sono attesi a breve.

Ridurre queste incertezze significa migliorare in modo diretto la nostra comprensione dell'evoluzione stellare, della nucleosintesi e dei meccanismi che regolano le esplosioni stellari, collegando in maniera quantitativa la fisica nucleare di laboratorio all'evoluzione chimica dell'universo. In questa prospettiva si inserisce anche LUNANOVA, un progetto internazionale

recentemente finanziato dallo European Research Council nell'ambito ERC-Synergy, che nei prossimi anni permetterà alla comunità INFN di estendere ulteriormente il programma dell'astrofisica nucleare sotterranea e di mantenere una posizione di *leadership* internazionale nel campo. L'esperimento LUNA dimostra come l'astrofisica nucleare possa costruire un ponte tra il microcosmo del nucleo atomico e il macrocosmo delle galassie, tra la fisica fondamentale e l'evoluzione dell'universo.

c. Andamento schematico della probabilità che una reazione nucleare avvenga al variare dell'energia. Alle energie tipiche delle stelle questa probabilità diventa estremamente piccola, mentre eventuali risonanze possono aumentarla localmente. Grazie alla riduzione del fondo cosmico, i laboratori sotterranei permettono di misurare queste reazioni più vicino alla regione di interesse astrofisico.

Biografie

Alba Formicola è ricercatrice dell'INFN presso la sezione di Roma. Si occupa di astrofisica nucleare sperimentale in ambiente sotterraneo, è membro della collaborazione LUNA dal 1998 e ne è attualmente portavoce. Ha contribuito a numerose misure di reazioni nucleari di interesse astrofisico e allo sviluppo delle tecniche sperimentali a basso fondo presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Gianluca Imbriani è professore di fisica presso l'Università di Napoli Federico II. La sua attività di ricerca è dedicata all'astrofisica nucleare sperimentale, con particolare attenzione alla misura di sezioni d'urto di reazioni nucleari rilevanti per l'evoluzione stellare e la nucleosintesi. Membro della collaborazione LUNA fin dalle sue prime fasi, ne è stato portavoce dal 2020 al 2024 e ha contribuito alla realizzazione della Bellotti Ion Beam Facility ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

La nascita dei Laboratori del Gran Sasso

di Adele La Rana

storica della fisica



“Nessuno ha mai installato rivelatori da molte kilotonnellate nelle profondità del sottosuolo. Chissà quali bizzarri fenomeni dovuti ai raggi cosmici potranno essere scoperti [...]? Forse l'avvento di giganteschi rivelatori sotterranei inaugurerà una nuova era di scoperte, destinata a mettere in crisi la prossima generazione di teorici”. Così il premio Nobel Sheldon Glashow concludeva il suo intervento al cosiddetto GUD Workshop, svoltosi a Roma nell'ottobre 1981 e dedicato al progetto di un “Giant Underground Detector”. Glashow esprimeva l'entusiasmo per una nascente frontiera della ricerca, che puntava a obiettivi non perseguibili con gli acceleratori di particelle e necessitava invece di rivelatori sotterranei di dimensioni senza precedenti, in grado di catturare i segnali assai più energetici e spesso molto rari provenienti dal cosmo.

Il GUD Workshop – presieduto da Marcello Conversi – rappresentò un momento importante di dialogo internazionale circa un'ambiziosa iniziativa italiana in fase di definizione. Poco più di un anno prima, il 6 giugno 1980, l'allora presidente dell'INFN Antonino Zichichi (vd. approfondimento, ndr) aveva avanzato una proposta in Consiglio Direttivo INFN: realizzare un grande laboratorio

sotterraneo sfruttando gli scavi del traforo del Gran Sasso, in corso lungo l'autostrada A24 tra L'Aquila e Teramo. Come avrebbe osservato lo stesso Zichichi al GUD Workshop, si trattava della prima fortunata coincidenza tra la costruzione di un traforo autostradale e la possibilità di scavare contestualmente un esteso centro di ricerca nel sottosuolo, a disposizione della comunità scientifica internazionale. Già il 21 giugno 1980, gruppi di ricerca di Frascati, Milano, Roma e Torino inviavano a Zichichi una lettera d'intenti, proponendo di installarvi un rivelatore modulare di massa gigantesca, il GUD, “adatto a studiare i canali di disintegrazione dei nucleoni e a osservare le interazioni in esso prodotte da neutrini di alta energia, atmosferici ed extraterrestri”.

Tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli '80 stava infatti emergendo la fisica astroparticellare, nata dall'incontro fra fisica delle particelle, astrofisica e cosmologia. Fino ad allora – e a partire dall'avvento delle prime grandi macchine acceleratrici a metà degli anni '50 – la fisica delle particelle aveva affidato soprattutto ai grandi acceleratori il compito di ricreare sulla Terra le condizioni necessarie per studiare i costituenti fondamentali della materia. Cresceva però la consapevolezza

a.
I Laboratori sotterranei del Gran Sasso durante i lavori di scavo, iniziati nel 1982.

che i fenomeni che si verificano nelle condizioni più estreme dell'universo – dalle fornaci nucleari delle stelle alle esplosioni di supernovae, fino all'universo primordiale – non potessero essere compresi soltanto attraverso esperimenti di laboratorio, ma richiedessero di rivelare direttamente i segnali prodotti dai processi naturali che li generano.

Conversi, convinto sostenitore del futuro laboratorio del Gran Sasso, individuava i seguenti principali obiettivi di ricerca: la verifica dell'eventuale instabilità del nucleone, in particolare del protone, la cui stabilità assoluta – postulata circa mezzo secolo prima – era stata posta in discussione; lo studio delle oscillazioni dei neutrini e delle loro sorgenti cosmiche; l'osservazione dei neutrini emessi durante i collassi stellari o le reazioni nucleari nel Sole; l'indagine di eventi rarissimi di altissima energia e la ricerca dei monopoli magnetici. Già all'inizio degli anni '80 si faceva riferimento a una futura "astronomia del neutrino", capace di aprire una finestra inedita sull'universo, complementare a quella offerta dall'astronomia elettromagnetica.

I fisici italiani non erano nuovi ai laboratori sotterranei: dai primi anni '80 era infatti operativo il Laboratorio del Monte Bianco, che ospitava gli esperimenti NUSEX (vd. fig. c p. 7, ndr) e LSD-UNO (Large Scintillation Detector – Underground Neutrino Observatory). In Europa era inoltre in costruzione un secondo laboratorio sotterraneo, che sfruttava la galleria del Fréjus. Il progetto del Gran Sasso rappresentava un deciso salto di scala, con la possibilità di ospitare simultaneamente apparati di dimensioni inedite. Come avrebbe ricordato Nicola Cabibbo, il piccolo laboratorio del Monte Bianco aveva ormai "dimensioni del tutto insufficienti" rispetto a una ricerca che appariva

sempre più "una via maestra per l'esplorazione della fisica subnucleare [...] e della natura del cosmo".

Nell'aprile 1981 il Governo approvò il progetto, trasformato dal Parlamento in legge nel febbraio successivo. Gli scavi procedettero rapidamente e già all'inizio del 1984 la prima delle future tre sale era delineata. Intanto la notizia del nuovo laboratorio si era diffusa nella comunità scientifica internazionale. Per definire la futura strategia sperimentale, l'INFN istituì nel 1984 un Comitato Scientifico Internazionale, che invitò i gruppi di ricerca di tutto il mondo a presentare le proprie proposte. Mentre gli scavi e i lavori di allestimento procedevano, presero forma i primi grandi esperimenti destinati al Gran Sasso: MACRO (Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory), concepito come osservatorio multifunzionale per la ricerca dei monopoli magnetici, lo studio dei raggi cosmici e dei neutrini; GALLEX, dedicato alla rivelazione dei neutrini solari; e LVD (Large Volume Detector), progettato per osservare i neutrini da supernova.

Completati sotto la presidenza INFN di Nicola Cabibbo (1983-1992) e la guida del primo direttore Enrico Bellotti, i Laboratori Nazionali del Gran Sasso sarebbero diventati la più grande infrastruttura di ricerca sotterranea del mondo, realizzando la felice metafora usata da Zichichi nel suo discorso al GUD Workshop: *"This afternoon I was told that the projection on the real axis of many of these dreams is the new project called 'Gran Sasso'"* (Questo pomeriggio mi è stato detto che la proiezione sull'asse reale di molti di questi sogni è il nuovo progetto chiamato 'Gran Sasso')".



b.
La collaborazione
dell'esperimento
MACRO, entrato in
funzione nel 1989.

[as] approfondimento

Antonino Zichichi, tra fisica e politica della ricerca

Nato scienziato sotto il segno della fisica delle particelle – come ebbe a dire di lui Nicola Cabibbo – Antonino Zichichi (Trapani, 1929 - Losanna, 2026) è stato una delle figure più influenti e discusse della fisica italiana del secondo '900. Laureato nel 1952 a Palermo come allievo di Donato Palumbo (futuro direttore del programma europeo di ricerca sulla fusione nucleare controllata), cominciò la sua carriera all'appena nato CERN e poi al Fermilab (Chicago), mantenendo sempre uno stretto legame con la ricerca italiana. Tra i suoi principali contributi scientifici figurano la scoperta dell'antideutone, primo nucleo di antimateria, ottenuto al CERN nel 1965 da un gruppo da lui diretto (in contemporanea con un *team* del Brookhaven National Lab guidato da Leon Lederman), gli studi pionieristici sui leptoni pesanti e lo sviluppo di nuove tecniche sperimentali di rivelazione.

Alla ricerca affiancò un intenso impegno nello sviluppo di istituzioni scientifiche. Nel 1962 promosse la nascita a Erice del Centro per la cultura scientifica "Ettore Majorana", nell'ambito del quale presero forma la Scuola Internazionale di Fisica Subnucleare e numerose altre scuole. Queste iniziative hanno trasformato la suggestiva cittadina siciliana in una sede di rilievo mondiale per la formazione scientifica avanzata, favorendo il dialogo fra discipline, generazioni e paesi, compresi quelli appartenenti ai blocchi contrapposti della Guerra Fredda. Negli anni '90, Zichichi contribuì alla fondazione del Museo Storico della Fisica e Centro Studi e



Ricerche Enrico Fermi (CREF), istituito nella storica palazzina di via Panisperna, divenendone il primo presidente.

A capo dell'INFN dal 1977 al 1982, promosse una fase di grande espansione dell'Istituto, rafforzandone il ruolo internazionale attraverso il sostegno ai grandi programmi del CERN, come UA1 e LEP, e alle infrastrutture di ricerca nazionali, in particolare nei Laboratori Nazionali di Legnaro e del Sud, con la realizzazione dei nuovi acceleratori Tandem. Contestualmente, favorì una presenza stabile del personale scientifico e tecnico italiano al CERN, attraverso adeguate misure economiche e organizzative, e promosse la nascita dei gruppi collegati dell'INFN presso sedi universitarie prive di Sezione, molti dei quali sarebbero successivamente divenuti nuove Sezioni dell'Istituto. A quel periodo risale la sua proposta di realizzare il grande laboratorio sotterraneo, che poi divenne il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso.

Personalità fuori dal comune, capace di entusiasmare ma anche di dividere, notissimo al grande pubblico per l'ampia attività divulgativa in giornali, libri e TV, Zichichi resta una figura di scienziato e politico della ricerca ancora in larga parte da esplorare sul piano storico. Della sua presidenza INFN, Nicola Cabibbo scrisse che aveva dato ai fisici italiani "le migliori opportunità di operare sulla scena mondiale con indipendenza nella ricerca e libertà, cioè con la massima dignità scientifica", concludendo che Antonino Zichichi "deve essere considerato uno dei maggiori *leader* della scienza italiana".

Dalla miniera alle stelle

di Giuliana Galati

Cercavo una meta inusuale dove trascorrere qualche giorno in tranquillità. Così, tra piccoli comuni lontani dal mare e dal turismo, sono arrivata a Lula, nel cuore della Sardegna. Mi sono svegliata di buon'ora e ho iniziato a camminare seguendo un sentiero che andava verso sud-est. Dopo un paio d'ore, l'arsura non mi faceva più ragionare. In lontananza ho visto una specie di torre fatta da tubi arancioni e mi ci sono precipitata, alla ricerca di un po' d'ombra. Su un casolare c'era una scritta: "SOS ENATTOS". S-O-S. Sono nel posto giusto! Senza pensarci due volte sono entrata e mi sono seduta su una piattaforma che però, poco dopo, ha iniziato a muoversi sprofondando nelle viscere della Terra...



[as]: Aiuto! SOS! Sto precipitando! Non vedo più nulla!

[Pozzo Rolandi]: Ma che dici, non stiamo precipitando! L'argano si è messo in movimento e stiamo lentamente scendendo al piano inferiore, a 80 metri di profondità. Tra 3 minuti saremo arrivati. Accendi la torcia del telefono, guarda la roccia che si muove intorno a noi e rilassati!

[as]: Ma dove siamo? E dove stiamo andando?

[PR]: Siamo in uno dei luoghi più silenziosi della Terra, almeno a livello sismico. Con le tue urla sicuramente abbiamo perso pace per le orecchie, ma del resto quella mancava anche prima, quando c'erano i minatori a fare baccano tutto il giorno.

[as]: Non ci sono più ora?

[PR]: La miniera è stata chiusa nel 1996. Si estraeva prevalentemente blenda, cioè solfuro di zinco e cadmio, o galena argentifera, ovvero solfuro di piombo e argento.

[as]: Quindi una volta giù morirò, perché nessuno potrà sentirmi urlare e salvarmi?

[PR]: Ma va! C'è un sacco di gente ora. Però sono tutti scienziati di enti che cominciano con "IN": INFN, INAF, INGV... Vogliono costruire qui un enorme esperimento chiamato ET: Einstein Telescope.

[as]: ET come "ET Telefono casa"? Cercano mica alieni sottoterra?

[PR]: Certo che ne dici di sciocchezze eh! ET sarà un interferometro, la "versione 2.0" di Virgo e LIGO, e servirà a esplorare la storia del cosmo fino alle sue prime fasi e a osservare eventi finora invisibili grazie alle onde gravitazionali. Studierà la materia nelle condizioni più estreme del cosmo e aiuterà pure a capire come si formano i buchi neri... Io, che da decenni faccio su e giù in un pozzo nero, sono entusiasta all'idea di scoprire qualcosa in più sui fratelli buchi neri!

[as]: E quando sarà pronto?

[PR]: Purtroppo per ora sono solo studi di fattibilità. Non è neanche sicuro se sarà questo posto a ospitarlo. I siti candidati per ospitare l'interferometro sono tre: oltre a noi, l'area dell'Euroregione del Mosa-Reno, al confine tra Paesi Bassi, Belgio e Germania, e un sito in Lusazia, in Germania. Ma basta chiacchiere, abbiamo toccato il fondo. Adesso puoi decidere se risalire o esplorare chilometri di tunnel...

[as]: Ma io volevo vedere ET!

[PR]: Tieni d'occhio le notizie nel 2027 allora. E, se va come spero, torna a trovarmi nel 2035.

[as] intersezioni

Silenzio Cosmico

di Patrizia Morciano

biologa



A meno di essere laureati in fisica, probabilmente non riflettiamo spesso sul fatto di vivere in un ambiente naturalmente radioattivo e di essere costantemente circondati da radiazioni, in particolare da radiazioni “ionizzanti” che, come suggerisce il termine, sono in grado di modificare le molecole ionizzandole e rendendole più reattive. Le radiazioni ionizzanti naturali sono di diversa natura e origine. Vi sono le radiazioni cosmiche, che arrivano dallo spazio e, “filtrate” dall’atmosfera terrestre, danno luogo ai raggi cosmici, in particolare i muoni. Vi sono le radiazioni terrestri, emesse dal suolo e dalle rocce per la presenza di radionuclidi naturali come torio e uranio. Anche nell’aria che respiriamo è presente un

gas radioattivo, il radon-222, che decadendo produce altri radionuclidi, come il polonio-218 e il piombo-210. Persino la materia organica, di cui siamo costituiti, contiene piccole quantità di isotopi radioattivi, come il potassio-40 (che rappresenta circa lo 0,012% del potassio naturale). Questa minima concentrazione è sufficiente a renderci debolmente radioattivi!

Quindi la radioattività naturale è ubiquitaria e l’esposizione alla radiazione naturale è inevitabile per i sistemi viventi.

Tuttavia, cosa sappiamo della radiazione naturale a cui siamo costantemente esposti e che ha accompagnato la vita sulla Terra fin dalle sue origini? A questa domanda, apparentemente



a.
Il laboratorio di biologia
nei Laboratori del Gran
Sasso.

semplice, ad oggi non siamo ancora in grado di dare una risposta chiara ed esaustiva. La stretta e complessa relazione tra sistemi viventi e radiazioni naturali è oggi oggetto di affascinanti studi di radiobiologia condotti nei moderni laboratori sotterranei. Tra questi, i Laboratori del Gran Sasso rappresentano una delle eccellenze mondiali attualmente operative.

I laboratori sotterranei sono infrastrutture progettate per sfruttare l'ambiente "ipogeo" (sotterraneo): lo spesso strato di roccia sovrastante agisce da scudo naturale contro i raggi cosmici. Questo "silenzio cosmico" crea le condizioni ideali per esperimenti di fisica astroparticellare (neutrini, materia oscura). Questi laboratori hanno una forte vocazione multidisciplinare. I ricercatori, che hanno popolato le grandi *hall* sperimentali sotterranee al Gran Sasso, hanno intuito sin da subito che un ambiente così peculiare potesse essere sfruttato anche per studi avanzati in altri ambiti di ricerca, come la biologia. Il pioniere della radiobiologia sotterranea ai Laboratori del Gran Sasso è il compianto Luigi Satta, scienziato poliedrico formatosi come fisico e poi avvicinato alle bioscienze. Durante la fase di costruzione dei Laboratori del Gran Sasso fu coinvolto, insieme ad altri colleghi fisici, nelle misurazioni del campo di radiazione sotterraneo. Come egli stesso ricordò durante il secondo Congresso internazionale "DULIA-bio" del 2019, rimase profondamente colpito dai "numeri" raccolti: il campo di radiazione sotterraneo risultava incredibilmente più basso rispetto a quello esterno, con un flusso di muoni ridotto di circa un milione di volte.

Queste misurazioni stimolarono la sua innata curiosità scientifica, portandolo a riunire un *team* interdisciplinare di biologi e biofisici per studiare l'impatto della riduzione della radiazione naturale sui sistemi viventi. Nacque così negli anni '90, accanto al primo esperimento di fisica dei Laboratori del Gran Sasso, MACRO (vd. p. 34, ndr), il cui nome richiama anche

l'imponenza dell'apparato (circa 70 metri di lunghezza), PULEX, il primo esperimento di radiobiologia. Il nome, dal latino *pulce*, suggella simbolicamente il passaggio dalla strumentazione macroscopica all'indagine microscopica, ambito peculiare della biologia. I successivi esperimenti, denominati Silenzio Cosmico (o Cosmic Silence, in inglese), nome suggerito da Zichichi, furono condotti su diverse linee cellulari di mammifero. Nel frattempo, altri laboratori sotterranei si interessarono a queste ricerche, seguendo l'esempio dei Laboratori del Gran Sasso, e dando vita a un nuovo filone di ricerca multidisciplinare, la "radiobiologia *underground*". Gli studi su colture cellulari dimostrano che ridurre la radiazione cosmica impatta su proliferazione e difese antiossidanti confermando che la radiazione naturale è uno stimolo importante per mantenere efficienti i sistemi di risposta degli organismi.

Nel 2016 venne inaugurato ai Laboratori del Gran Sasso il primo esperimento di biologia *underground*, Flyinglow, su un organismo complesso, il comune moscerino della frutta (*Drosophila melanogaster*), utilizzato da oltre un secolo nella ricerca biologica. Negli anni successivi furono condotti altri esperimenti, con un importante supporto dell'INFN. Ricerche recenti confermano che tutti gli organismi, unicellulari e multicellulari, cresciuti in ambienti sotterranei a radiazione ultra-bassa, non subiscono danni immediati, ma diventano più vulnerabili a stress successivi, evidenziando la loro dipendenza evolutiva dalla radiazione naturale di fondo. Gli studi di radiobiologia *underground* proseguono nei laboratori sotterranei di tutto il mondo.

Decifrare il rapporto tra la vita e le radiazioni naturali potrebbe non solo ridefinire il modo in cui interpretiamo gli effetti delle radiazioni, ma anche offrire nuove prospettive in vari ambiti tecnico-scientifici dalla medicina alla ricerca spaziale.

[as] riflessi

Computer quantistici in tilt

di Martina Galli

Immaginate di mettere a punto un dispositivo complesso, composto di elementi estremamente delicati – diciamo un “chip quantistico”, composto da “qubit”. E poi immaginate di ideare una strategia per cui se uno di questi elementi, o qubit, smette di funzionare, gli altri possono prenderne il posto, conservare le sue informazioni e fare in modo che il chip non vada in arresto. Una strategia infallibile, insomma. Eppure, capita che, alle volte, non uno, ma un intero gruppo di questi delicatissimi qubit smette di funzionare all'unisono, con la conseguenza che il meccanismo di conservazione delle informazioni entra in crisi. Perché accade? C'è un errore strutturale? Una falla nella scelta dei materiali? Oppure è l'ambiente in cui il chip si trova a innescare il malfunzionamento?

Oggi sappiamo che l'ipotesi più coerente è la terza: la risposta è da ricercarsi nell'ambiente, e più precisamente nella radioattività ambientale. Questo

fenomeno, ben noto ai fisici delle particelle, è sfuggito a lungo ai fisici quantistici, e noi abbiamo incontrato Laura Cardani, ricercatrice della sezione INFN di Roma 1, per farci raccontare com'è avvenuto il salto disciplinare e quali strategie sono state messe in campo per contrastare gli effetti della radioattività sui qubit.



[as]: Che cosa si intende con radioattività ambientale?

[Laura Cardani]: Esistono in natura dei nuclei radioattivi, come il radon, che si disgregano spontaneamente, e che producono, decadendo, diversi tipi di radiazione: particelle alfa, elettroni, raggi gamma, raggi X... E poi, ci sono i raggi cosmici, che in ogni momento bombardano la nostra atmosfera producendo principalmente muoni, particelle molto penetranti (vd. anche p. 38, ndr). Insieme, i nuclei radioattivi e i raggi cosmici, costituiscono le principali fonti di radioattività ambientale capaci di interferire con i qubit.

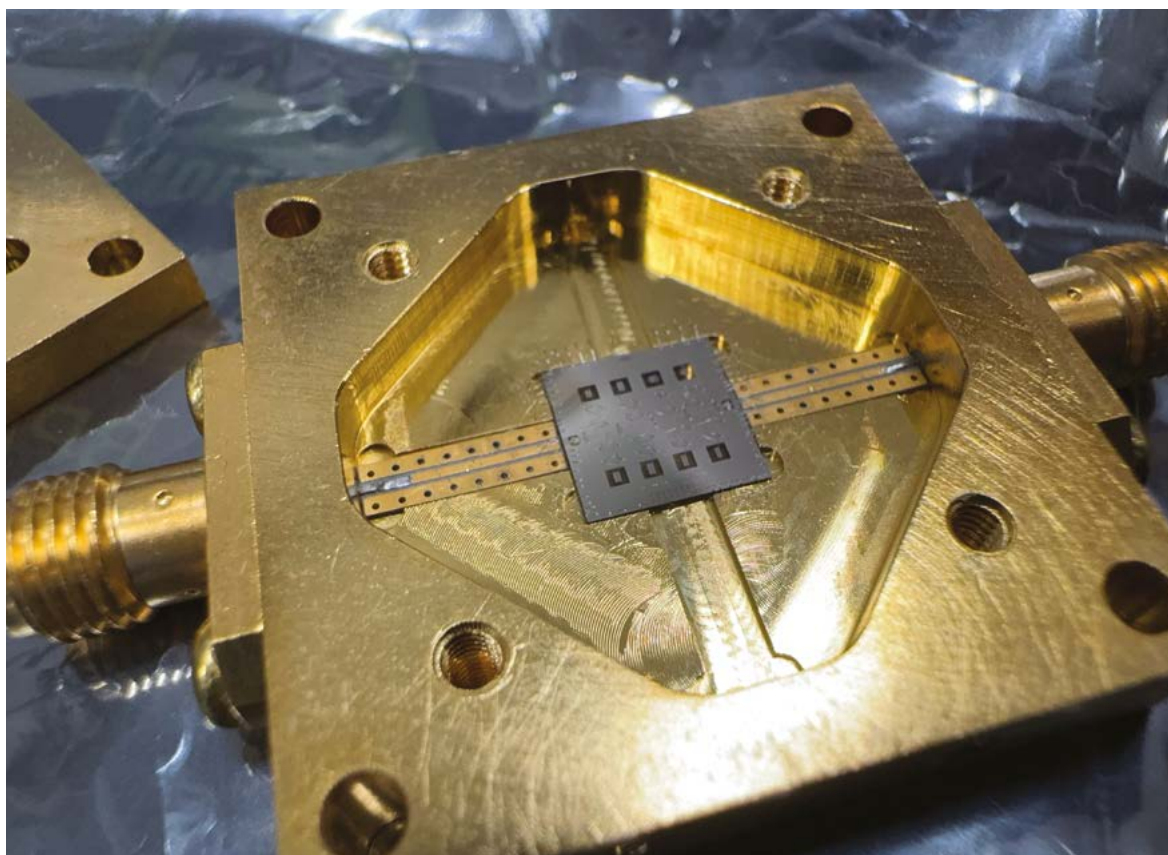
[as]: Che cosa succede ai qubit quando sono esposti alla radioattività ambientale?

[LC]: Per un qubit è fondamentale il tempo di coerenza, ovvero l'intervallo in cui mantiene il proprio comportamento quantistico. Si tratta di un intervallo brevissimo (nella

tecnologia a superconduttori pari a circa 30 microsecondi), da preservare limitando al massimo le interazioni con il mondo esterno. Quando, per esempio, un muone attraversa il chip su cui poggia il qubit, generalmente un wafer di silicio o di zaffiro, rilascia energia che ionizza il materiale: si forma una nuvola di carica e il qubit sovrastante vede considerevolmente ridotto il suo tempo di coerenza. Ma non finisce qui, perché la carica si ricombina, e tutta l'energia immagazzinata si disperde in vibrazioni del silicio, i cosiddetti “fononi”. Questi fononi viaggiano all'interno del chip anche a distanza di centimetri, per decine di millisecondi, e tutti i qubit che si trovano al di sopra del chip ne sperimentano l'effetto, andando incontro a decoerenza o perdita del proprio comportamento quantistico.

[as]: Qual è l'impatto di questa interazione sulla capacità di calcolo dei qubit?

[LC]: Quello della decoerenza è un problema comune ai qubit,



a.
Un chip con otto qubit all'interno del suo supporto in rame, con agli estremi i due connettori per trasmettere segnali. I qubit sono depositati all'interno delle aree più scure.

e non dipende solo dalla radioattività. Per questo la stessa informazione viene codificata in tanti qubit fisici che agiscono come un unico qubit logico. Quello che accade però quando i fononi si propagano nel chip, è che molti qubit iniziano a commettere errori contemporaneamente e il risultato del calcolo può diventare del tutto casuale. Sono i cosiddetti “errori correlati”: una singola causa provoca errori correlati nel tempo e nello spazio, mettendo in crisi i protocolli di correzione, che funzionano solo con errori indipendenti o scorrelati nel tempo.

[as]: Voi come avete identificato nella radioattività la causa di questi errori?

[LC]: Il nostro gruppo lavorava allo sviluppo di rivelatori di particelle estremamente sensibili, i “risonatori a microonde”, già impiegati in astrofisica per fare misure di fotoni nello spazio. Questi risonatori sono estremamente simili ai qubit: c'è un circuito superconduttore depositato su silicio, messo in un holder di rame e inserito in un criostato. E, data la somiglianza, noi fisici delle particelle abbiamo iniziato a frequentare gli stessi workshop dei fisici quantistici. Durante uno di questi incontri, ho realizzato che molti colleghi dell'ambito quantistico non riconoscevano un segnale chiaramente dovuto alla radioattività. Mi è sorto così il dubbio che ci fosse un problema: come mai un dispositivo disegnato *ad hoc* per essere molto sensibile alla radioattività e misurare particelle, veniva

impiegato per un circuito con l'ambizione di non risentire affatto del mondo esterno? Ipoteizzavo che ne risentisse eccome, e le misure hanno poi confermato questa intuizione.

[as]: Come contrastiamo allora l'effetto della radioattività ambientale sui qubit?

[LC]: Ognuno sta investendo sulla tecnologia che è più nelle sue corde. I grandi sviluppatori di computer quantistici stanno tentando di ingegnerizzare il modo in cui costruiscono i qubit, così da renderli più robusti al passaggio di radioattività. Per noi fisici delle particelle, invece, è impensabile cambiare un rivelatore funzionante potendo schermarlo da fuori. Abbiamo spostato quindi i qubit sottoterra, nei Laboratori del Gran Sasso, dove il flusso dei raggi cosmici è circa un milione di volte inferiore, e abbiamo ottenuto risultati importanti senza troppo sforzo: una riduzione di circa dieci volte del numero di errori di ciascun qubit.

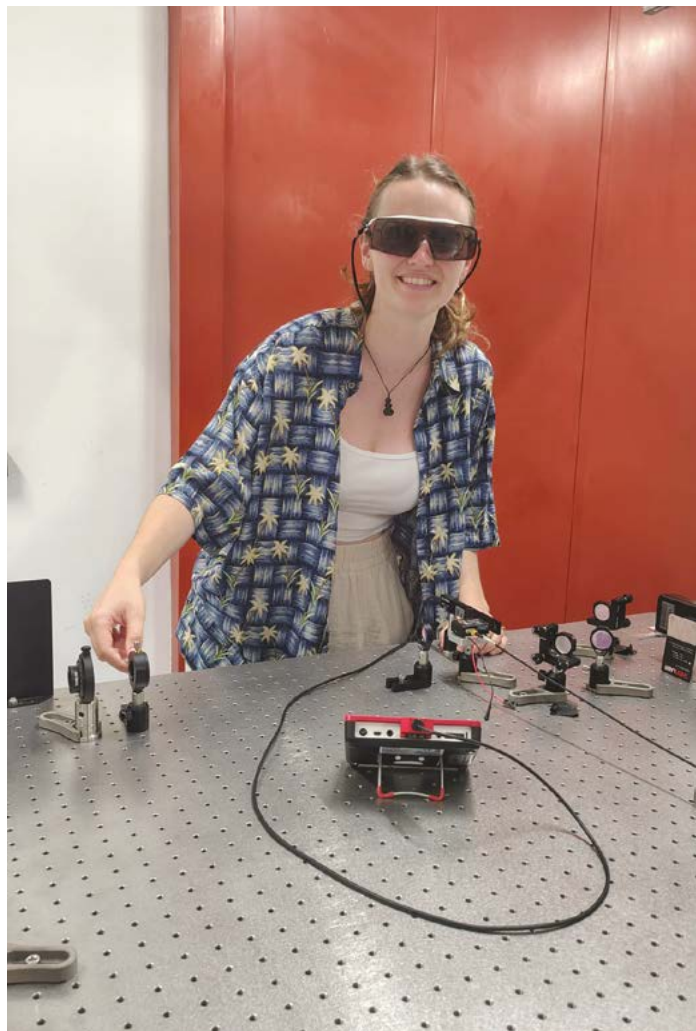
[as]: Quindi il futuro del calcolo quantistico è sottoterra?

[LC]: È ancora presto per dirlo. Oggi i qubit sono limitati da molte sorgenti di errore diverse, e la radioattività ambientale è solo una delle tante sfide da affrontare. Vista la velocità a cui evolve questo settore, non credo sia lontano il momento in cui la radioattività si imporrà come limite fondamentale, e a quel punto sottoterra potrà essere sicuramente una strada.

[as] traiettorie

Lavorare per ET

di Francesca Mazzotta



a.
La dottoranda Emma
Johnson.

Due percorsi diversi ma una sfida comune: contribuire allo sviluppo delle tecnologie che serviranno a costruire il futuro osservatorio per le onde gravitazionali in Europa, l'Einstein Telescope (ET), che l'Italia è candidata a ospitare in Sardegna. Emma Johnson, dottoranda neozelandese, e Andrea Lampis, tecnologo neoassunto INFN con un'esperienza maturata al Fermilab e al CERN, lavorano oggi a Cagliari nell'ambito del progetto Einstein Telescope. Lei arriva dal mondo dell'ottica, lui dalla fisica delle particelle: competenze differenti che si intrecciano nello studio di nuovi strumenti per sviluppare i rivelatori di onde gravitazionali del futuro.

“Sono ancora all'inizio della mia carriera,” racconta Emma. “Ho studiato in Nuova Zelanda all'Università di Canterbury, specializzandomi sull'ottica adattiva. Dopo gli studi volevo uscire dalla mia *comfort zone* e ho quindi iniziato a cercare un progetto di dottorato all'estero. Tra le opportunità, c'era una posizione legata all'Università di Padova, che in realtà ho capito poi che si sarebbe svolta a Cagliari. E quando l'ho scoperto ho pensato: è un'isola, è sul mare, perfetto per me. Passerò da un'isola a un'altra. A Cagliari, mi sono sentita accolta sin da subito. Ho trovato persone aperte, gentili e disponibili. Un ambiente simile a quello che avevo lasciato in Nuova Zelanda. Mi sono sentita a casa. Unica differenza: in Sardegna fa molto più caldo. Inoltre, mi sono buttata con entusiasmo su questa opportunità perché il progetto su cui avrei lavorato sembrava estremamente interessante e ambizioso: avrei potuto mettere le mie competenze nel campo dell'ottica a servizio di un innovativo progetto per la rivelazione delle onde gravitazionali”. Andrea Lampis, invece, ha costruito il suo percorso scientifico a Cagliari, dove ha studiato fisica e dove è tornato per lavorare per l'Einstein Telescope. Racconta: “Ho scelto fisica quasi d'istinto: mi piaceva la materia e sono stato spinto da un professore delle superiori che mi ha trasmesso un approccio molto quantitativo ai problemi. Sono contento di questa scelta, perché durante la laurea magistrale, grazie anche all'INFN, ho avuto l'opportunità di fare ricerca all'estero. Sono stato al Fermilab, negli Stati Uniti, dove ho lavorato per la prima volta all'interno di una grande collaborazione internazionale: un'esperienza straordinaria, che mi ha permesso di confrontarmi con colleghi e colleghe da tutto il mondo. Da lì, sono tornato a Cagliari per intraprendere il dottorato di ricerca in fisica, entrando a far parte della collaborazione LHCb del CERN e lavorando al progetto Timespot, dedicato allo sviluppo di sensori innovativi per la fisica delle alte energie. Ed è arrivata una grande soddisfazione: con questi sensori, siamo riusciti a raggiungere una precisione record nella misura del tempo di passaggio delle particelle cariche, circa



b.
Il tecnologo Andrea Lampis.

10 picosecondi (10^{-12} s) (vd. in *Asimmetrie* n. 40 p. 27, ndr). Durante il dottorato ho trascorso più di un anno al CERN contribuendo alla caratterizzazione di questi sensori innovativi in vista del futuro *upgrade* ad alta luminosità dell'esperimento LHCb. Ho inoltre avuto l'opportunità di lavorare direttamente sull'apparato sperimentale, prendendo parte alle attività di *commissioning* del rivelatore di vertice. Dopo questa esperienza mi sono trovato di fronte a un bivio: continuare a lavorare al CERN e continuare la ricerca sui rivelatori innovativi oppure tornare in Sardegna. Grazie ai finanziamenti del PNRR, si stava infatti aprendo l'opportunità di lavorare al progetto ETIC, che aveva l'obiettivo di creare in Italia un'infrastruttura estesa di ricerca per sostenere la candidatura italiana a ospitare l'Einstein Telescope. E da sardo, non ho avuto dubbi. Ho visto questa opportunità come un modo per mettere a disposizione del mio territorio le competenze che avevo acquisito negli anni e oggi sono estremamente orgoglioso di poter contribuire con il mio lavoro allo sviluppo di un ecosistema tecnologico in Sardegna".

Oggi, Andrea ed Emma sono impegnati nella realizzazione dell'infrastruttura che in futuro permetterà alla comunità scientifica di sviluppare, testare e validare nuovi sensori optoelettronici per l'Einstein Telescope e uno degli strumenti chiave di questo sistema, su cui stanno lavorando entrambi, è la *phase camera* per gli interferometri di ET. "Possiamo considerare la *phase camera* un po' come gli occhi dell'interferometro," spiega Emma.

"È uno strumento che osserva il comportamento dei fasci laser e permette di capire se c'è qualche problema: un disallineamento, un effetto termico o altre anomalie. Ci aiuta a monitorare il funzionamento dell'interferometro, a individuare eventuali problemi e a capire come correggerli. Dal punto di vista tecnologico, l'Einstein Telescope rappresenta una delle sfide più complesse che la comunità scientifica dovrà affrontare nei prossimi anni. Richiede strumenti ai limiti delle possibilità attuali e offre la possibilità di sviluppare nuove soluzioni. A livello personale, questo è estremamente stimolante: ogni giorno c'è qualcosa di nuovo da capire, e una nuova sfida da affrontare. Mi capita di iniziare ad affrontare un problema, credendo di avere le idee chiare, ma lavorando e confrontandomi con colleghe e colleghi mi rendo spesso conto che c'è ancora molto da imparare. Ed è proprio questo quello che amo della ricerca".

"L'aspetto che trovo più emozionante è sicuramente il livello di precisione richiesto da un progetto come l'Einstein Telescope. Quando si pensa a che cosa dobbiamo misurare, cioè variazioni estremamente piccole dello spaziotempo, ci si rende conto dell'entità della sfida. Ma proprio questa difficoltà apre uno spazio enorme per sviluppare nuove tecnologie," aggiunge Andrea. "Personalmente, non vedo l'ora di superare questa fase di analisi e di progettazione iniziale, per entrare in una fase più operativa. Non vedo l'ora di iniziare a costruire ET, speriamo, proprio qui, in Sardegna".

[as] illuminazioni

A scuola di fisica dei neutrini

di Anna Greco



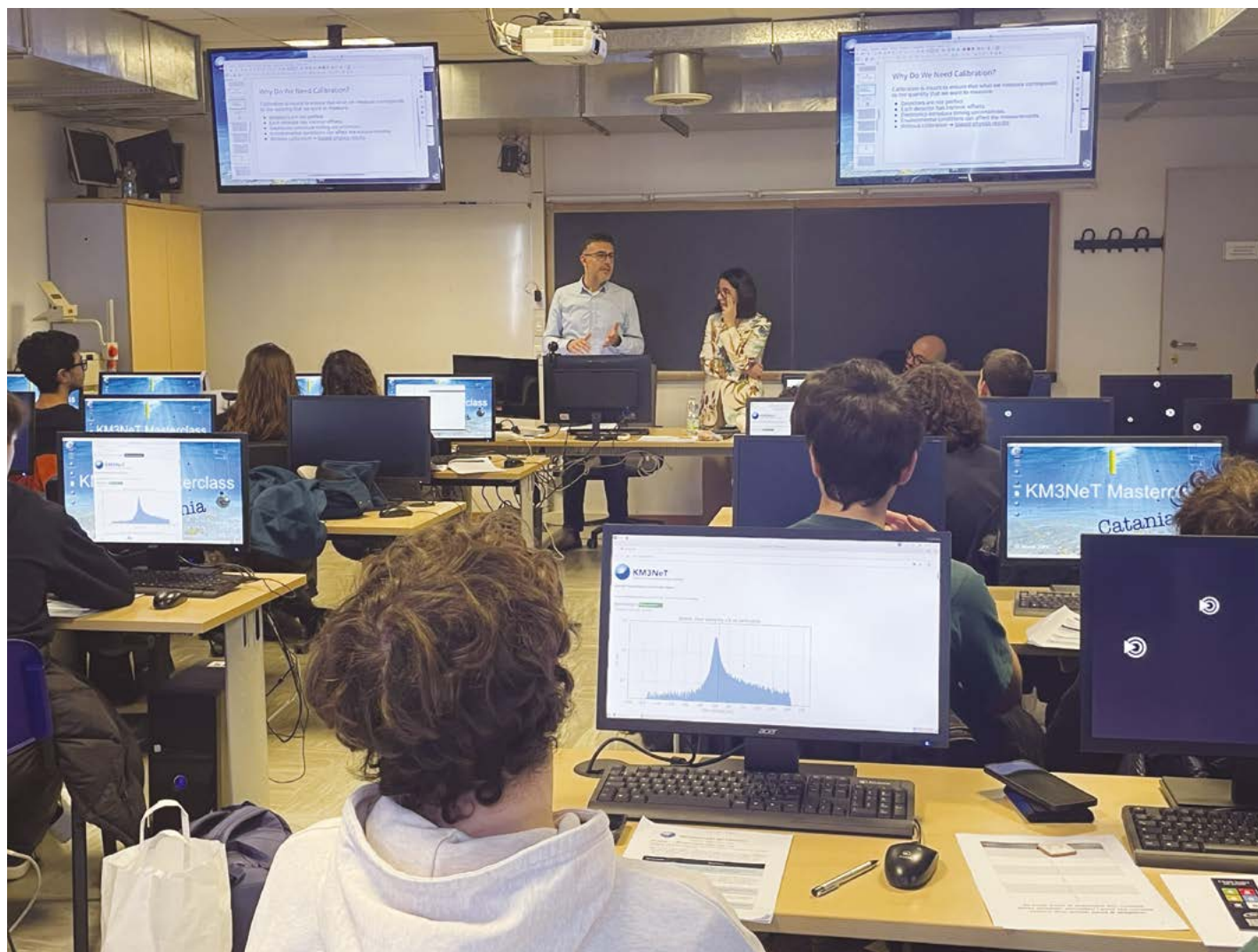
La scorsa primavera si è tenuta la prima KM3NeT Masterclass, un evento dedicato a studenti e studentesse italiani ed europei, per scoprire come funziona il mestiere di chi segue le tracce dei neutrini negli abissi del Mar Mediterraneo (vd. p. 18, ndr). In duecento hanno toccato con mano l'attività di ricerca realizzata dall'esperimento KM3NeT. Al centro della giornata, infatti, è un esercizio di analisi di dati reali raccolti dal grande esperimento sottomarino, che riproduce, in forma semplificata ma autentica, il lavoro quotidiano svolto dalla collaborazione scientifica.

Il programma della giornata è iniziato con un'introduzione alle particelle elementari, ai neutrini e alle grandi domande a cui cerca di rispondere KM3NeT. In alcune sedi, si è svolta anche una breve visita ai laboratori dedicati all'esperimento. I partecipanti sono passati poi dalla teoria alla pratica, lavorando all'esercizio su dati reali. Con una breve introduzione teorica, l'esercizio può essere svolto anche in classe, sotto la guida di un docente. I set di dati e le indicazioni per l'analisi sono disponibili al link: km3net.org/education/masterclass.

L'esercizio si articola in tre fasi tra loro collegate. La prima prova permette agli studenti di familiarizzare con il modo in cui funziona KM3NeT: si tratta di provare a riconoscere la natura di alcuni eventi, basandosi sulla visualizzazione, in forma di video e di grafici, della successione dei segnali misurati dall'apparato. Si passa poi a "raffinare" i dati, cercando di determinare i fattori di correzione della calibrazione temporale di alcune linee di misura. Infine, viene richiesto di applicare i fattori di calibrazione appena determinati nell'analisi di un campione di dati, in cerca di segnali di neutrini provenienti da alcune potenziali sorgenti cosmiche, come nuclei galattici attivi o pulsar. Questa attività permette di capire tutti i passaggi intermedi necessari sia per una corretta analisi dei dati che per migliorare le prestazioni di misura dell'apparato.

Il momento conclusivo delle giornate di Masterclass integra all'analisi dati anche la dimensione internazionale della ricerca. Partecipanti da tutte le sedi coinvolte si sono collegati in videoconferenza per confrontare i risultati e scambiarsi osservazioni e domande. Studenti e studentesse hanno presentato con sorprendente sicurezza il lavoro svolto, confrontandosi con i coetanei degli altri Paesi in un contesto che riproduce da vicino il funzionamento delle grandi collaborazioni scientifiche internazionali.

Il baricentro delle attività è stato in Italia, in conseguenza del ruolo-guida svolto dall'INFN nella organizzazione dell'iniziativa. Sono stati coinvolti otto centri di ricerca in sette città europee: i Laboratori Nazionali del Sud e le sezioni INFN e le Università di Bari, Bologna, Catania, Genova e Salerno, in Italia, la Universitat



a.
Partecipanti alla Masterclass di KM3NeT a Catania lo scorso marzo.

Politécnica de València in Spagna e la Tbilisi State University, in Georgia. L'iniziativa è stata sviluppata secondo le linee guida delle International Masterclass di Fisica promosse da IPPOG, l'International Particle Physics Outreach Group, la collaborazione che da anni permette a migliaia di studenti in tutto il mondo di sperimentare in prima persona il lavoro della ricerca scientifica in fisica delle particelle (vd. p. 47 in *Asimmetrie* n. 4, ndr). Il recente ingresso di KM3NeT in IPPOG ha consentito di ampliare questo panorama, aprendo una finestra sulla fisica delle astroparticelle e sull'astronomia dei neutrini.

“L'entusiasmo raccolto durante questa prima esperienza ha confermato il valore dell'iniziativa, sia come occasione di orientamento alla scelta universitaria e professionale, sia come strumento per raccontare la ricerca contemporanea”,

commenta Marco Circella, ricercatore della sezione INFN di Bari e coordinatore della Masterclass KM3NeT. “Stiamo quindi già lavorando a una prossima edizione, che contiamo di estendere a una rete ancora più grande di istituti e città, prevedendo anche un collegamento con la stazione di controllo dell'apparato sottomarino a Portopalo di Capo Passero (SR), sulla costa siciliana, in modo da collegare ancora più strettamente la ricerca, il territorio e le nuove generazioni di ragazze e ragazzi”.

Per partecipare alle Masterclass di KM3NeT non occorrono competenze specifiche di base, ma sono indispensabili l'interesse per la scienza, la curiosità e una sana dose di spirito di iniziativa. La Masterclass fa parte di un ricco catalogo di iniziative rivolte dalla collaborazione KM3NeT alla cittadinanza (per maggiori informazioni www.km3net.org).

[as] spazi

Rivelato per la prima volta il GDay

di Luca Papapietro



Portare il tema delle onde gravitazionali nelle scuole non è solo un esercizio di pura divulgazione scientifica su un tema arbitrario – per quanto questo esercizio non sia comunque privo della sua importanza.

Con l'Italia e l'Europa in prima linea nello studio e nella rivelazione delle onde gravitazionali, con infrastrutture come Virgo (vd. p. 4, ndr) e progetti futuri quali l'Einstein Telescope (vd. p. 12, ndr) e l'interferometro spaziale LISA (vd. in Asimmetrie n. 18, p. 32, ndr), che hanno un forte impatto scientifico, economico e sociale e contribuiranno a rafforzare il rapporto con il territorio, promuovere la consapevolezza su questo tema rappresenta anche una responsabilità degli istituti coinvolti.

Nasce così il Gravitational Day (anche detto GDay), su iniziativa dell'Ufficio Comunicazione INFN, con il supporto del Comitato Coordinamento Terza Missione (CC3M) e il gruppo *outreach* di VIRGO. L'iniziativa, attualmente in una fase avanzata di progettazione, vedrà una prima edizione in Italia il prossimo novembre, con l'ambizione di ampliare la platea di istituti nazionali coinvolti nella realizzazione di questa prima edizione e di rendere il GDay un evento internazionale sul modello dell'International Cosmic Day (ICD) (vd in Asimmetrie n. 27, p. 46, ndr).

Il GDay si svolgerà il 25 novembre, data in cui Albert Einstein presentò all'Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino le equazioni di campo della relatività generale. Ulteriori attività potranno comunque essere organizzate nel corso della

settimana che comprende questa ricorrenza.

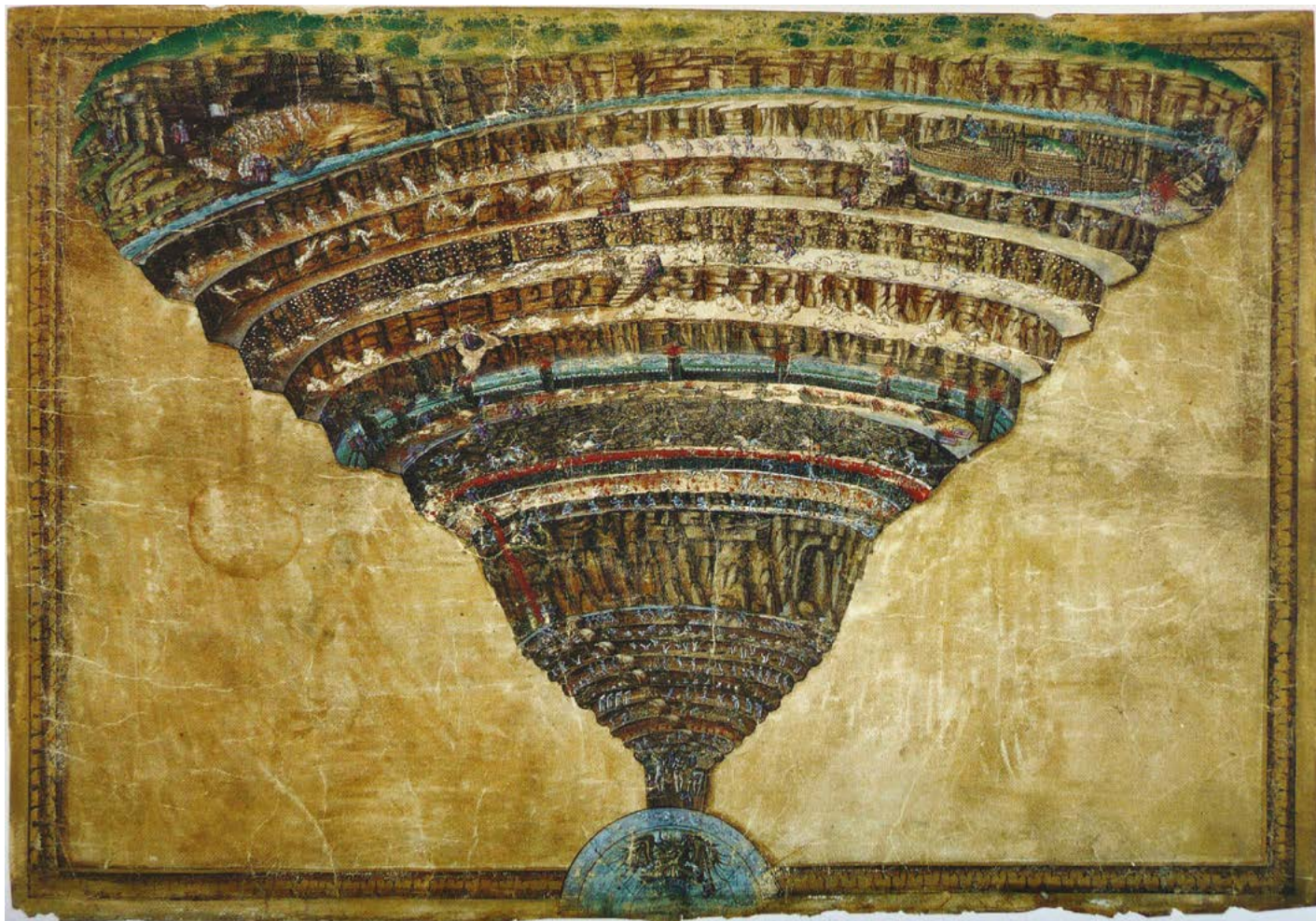
L'idea è semplice: portare per una giornata i ricercatori e le ricercatrici nelle scuole o portare le scuole nelle sezioni degli enti coinvolti per introdurre studenti e studentesse all'affascinante mondo delle onde gravitazionali.

La giornata sarà divisa in due parti: un primo *excursus* storico-scientifico, sul modello della lezione frontale, servirà da introduzione al tema delle onde gravitazionali e, soprattutto, a far conoscere quelle realtà che rendono Italia ed Europa tra i capifila a livello mondiale nel settore. La seconda parte sarà invece dedicata ad attività *hands-on*, in cui studenti e studentesse dovranno sfruttare diversi sensi (vista, tatto e udito) per diventare provetti cacciatori di onde gravitazionali.

La scelta di coinvolgere differenti canali sensoriali non è casuale: le onde gravitazionali costituiscono infatti un messaggero profondamente diverso dalla luce e, così come la comunità scientifica ha dovuto affiancare agli strumenti ottici nuovi metodi di indagine per studiarle, anche i partecipanti saranno chiamati a esplorare modalità percettive differenti per portare a termine le attività proposte.

L'obiettivo non è solo comunicare la scienza, ma rendere le scuole partecipi di un progetto che coinvolge i territori, le comunità e aiutare loro a esperire come osserviamo l'universo attraverso un messaggero completamente nuovo.

Per maggiori informazioni: https://collisioni.infn.it/attivita_educative/GDay/



La voragine infernale di Sandro Botticelli (ca. 1481-1488)

Uno dei circa cento disegni che Sandro Botticelli dedicò alla Divina Commedia. Con una sorprendente sintesi visiva, l'artista trasforma l'Inferno immaginato da Dante in una sezione della Terra: un immenso imbuto che si restringe fino al centro del mondo, scandito dai nove cerchi e popolato dalle schiere dei dannati. Più che un'illustrazione, è una mappa del viaggio dantesco, in cui rigore geometrico e immaginazione si fondono in una delle interpretazioni più affascinanti del poema. È l'unica tavola completata da Botticelli per la Divina Commedia ed è oggi conservata nella Biblioteca Apostolica Vaticana.

[as] segni



Sotto, per percepire il sopra. Occhi, orecchie e nuovi sensi variopinti nell'ombra. Nascosti da tutto ciò che disturba, ma senza creare disturbo. Umani. Forse.

“Sotto”, acquarello e acrilico su carta, illustrazione e testo di Alessandro Nagar



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423

/ 2552 / 2643 / 2942

comedu@lnf.infn.it

www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T +39 0862 437265/450

visits@lngs.infn.it

www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356

stage@lnl.infn.it

www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296

visiteguidate@lists.lns.infn.it

www.lns.infn.it



Raccontaci che cosa pensi di Asimmetrie su Instagram.
Pubblica storie, post e reel con l'hashtag
#AsimmetriInfn e taggando l'account @infn_insights.
Condivideremo i tuoi contenuti.

www.infn.it



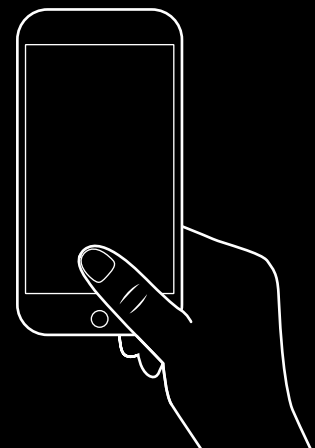
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it