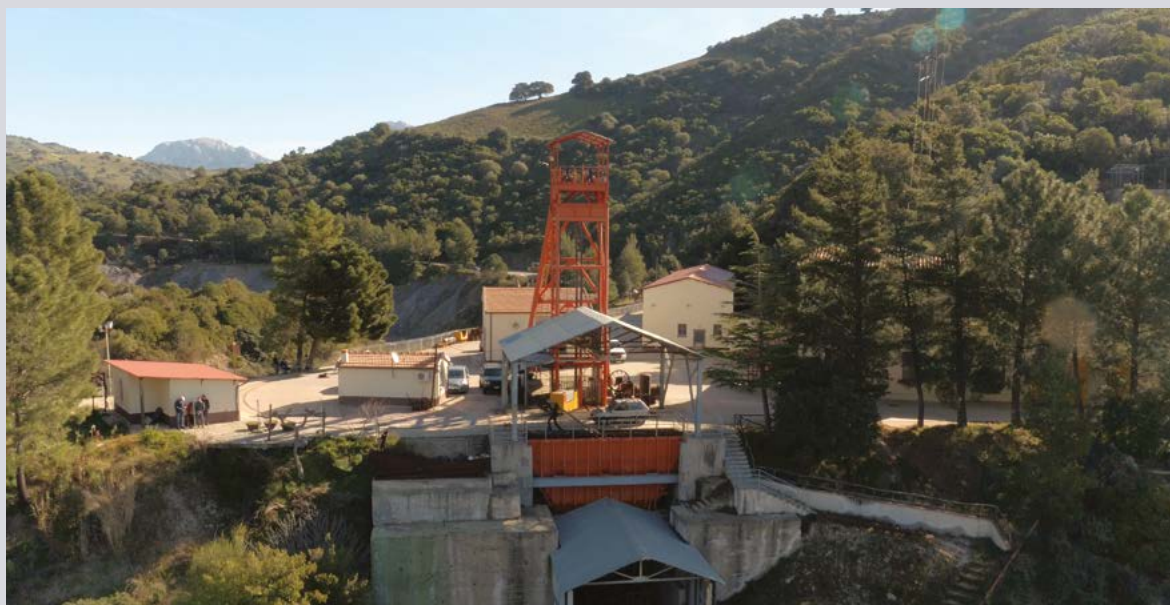


Surfing under the floor

Il progetto Einstein Telescope

di Viviana Fafone



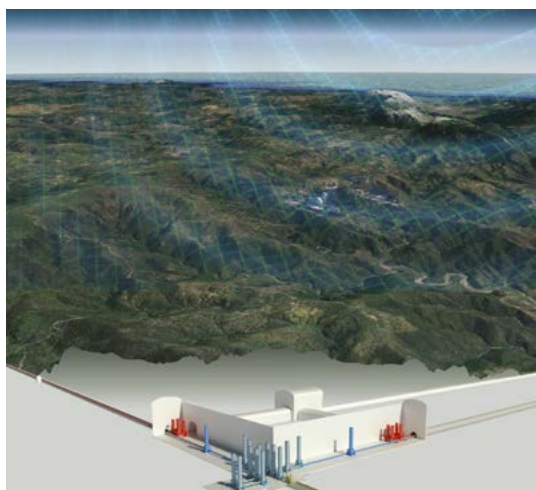
a.
Panoramica della miniera di Sos Enattos, in provincia di Nuoro (Sardegna), uno dei siti candidati per ospitare l'Einstein Telescope.

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

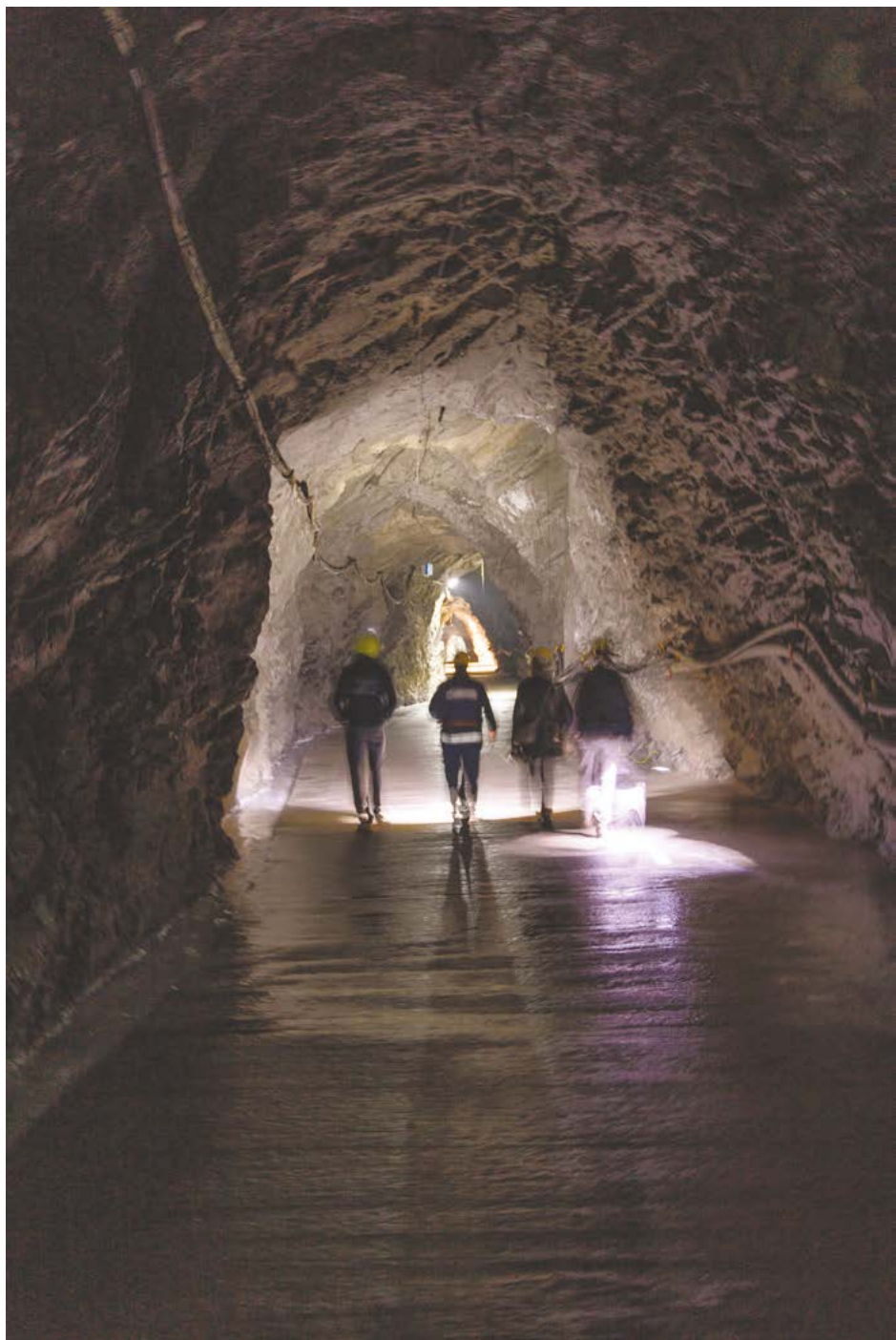
distanze cosmologiche, fino a coprire gran parte della storia dell'universo. ET potrà così costruire una vera e propria "demografia" di buchi neri e stelle di neutroni, tracciandone formazione ed evoluzione nel tempo.

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.