



Dall'Europa alla **Luna**, i nuovi rivelatori di onde gravitazionali amplieranno la gamma di frequenze “**udibili**” del cosmo, offrendoci una visione più ampia e “**multisensoriale**”.

di Andrea Parlangei

**ULTRAPURI**  
Uno degli specchi del rivelatore Virgo. Gli specchi sono lavorati con precisione per riflettere al meglio i raggi infrarossi usati per misurare il passaggio delle debolissime onde gravitazionali.

**B**uchi neri, stelle di neutroni, Big Bang... le recenti scoperte astronomiche risvegliano in tutti noi l'interesse per quei fenomeni estremi che avvengono o sono avvenuti in luoghi remoti nello spazio e nel tempo. Ma se già gli strumenti attuali incredibilmente ci consentono di ammirare tutto questo, che cosa vedremo in futuro? Che cosa resta da scoprire e come si amplierà il nostro sguardo nei prossimi anni?

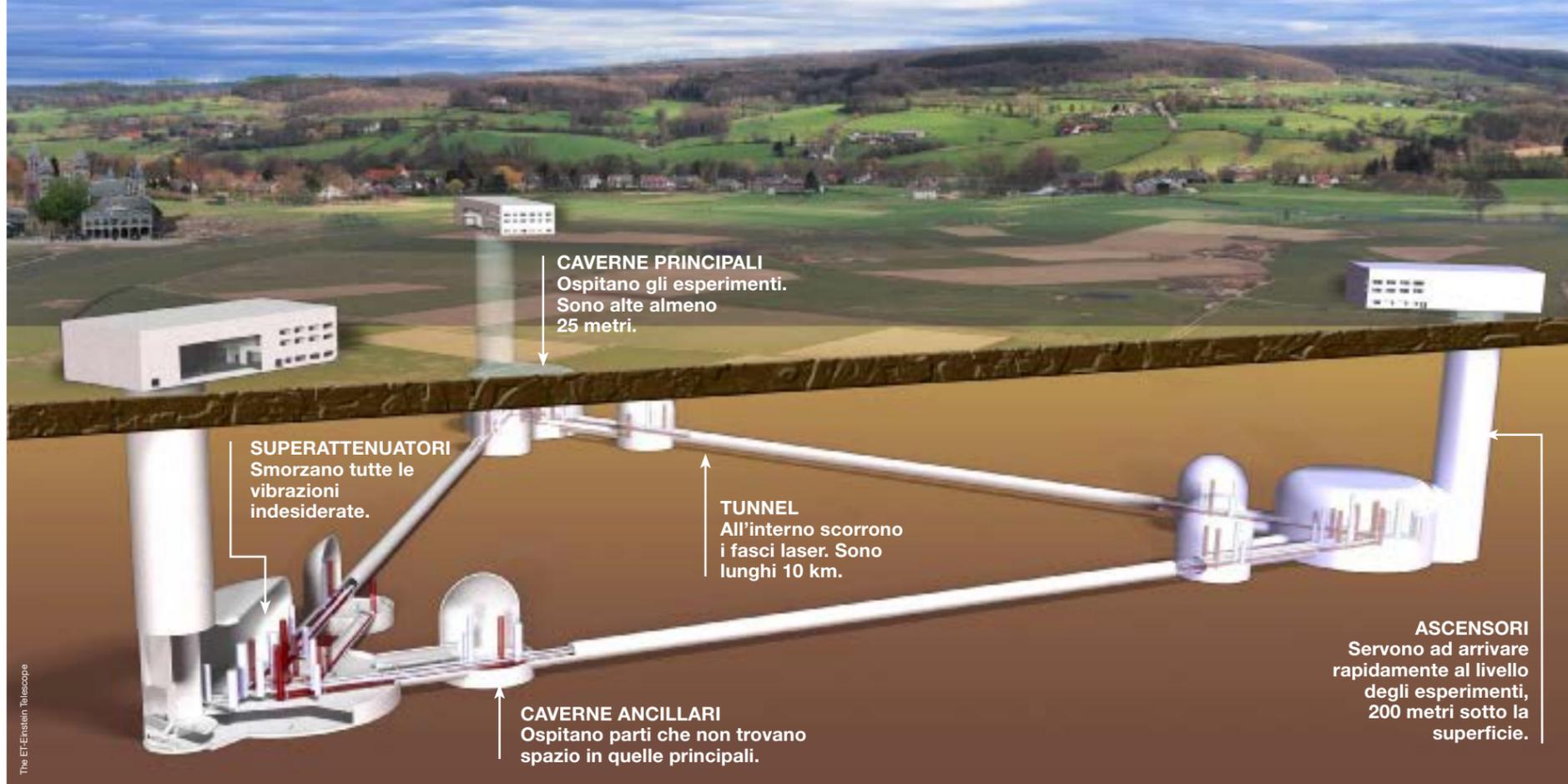
**NUOVI OCCHI, NUOVE ORECCHIE**

La scienza procede con tempi lunghi e progetti sempre più ambiziosi, globali, che si estendono spesso oltre la Terra, in orbita, sulla Luna... Il settore oggi più vivace è quello delle onde gravitazionali, che dopo essersi sviluppato in silenzio per decenni, sta esplodendo in una serie impressionante di scoperte e di nuove idee. Le onde gravitazionali sono lievissime increspature dello spazio-tempo, generate da violenti fenomeni celesti, che si propagano come onde in uno stagno, stirando o contrando le lunghezze nelle varie direzioni. Per tante ragioni possiamo paragonarle a onde acustiche, e in tal senso possiamo dire che ci permettono di “ascoltare” i “suoni” dell'universo. Gli strumenti attuali registrano frequenze comprese tra 10 Hz e 10 kHz, che corrispondono a quelle sonore percepibili dalle nostre orecchie. Gli strumenti in fase di progettazione andranno oltre, consentendoci di ascoltare nuovi suoni per comprendere nuovi fenomeni. E grazie ai telescopi che “estendono” in un certo senso anche la nostra vista e il tatto (v. riquadro in fondo all'articolo), l'astronomia del futuro sarà sempre più “multimediale” (o meglio “multimessaggera”) e ci offrirà una comprensione ancor più completa del cosmo. ▶

# Ascoltare L'UNIVERSO

## LA PERFEZIONE DEL TRIANGOLO

Due progetti europei, tra loro complementari, per l'osservazione di onde gravitazionali. A destra, l'Einstein Telescope, che sostituirà in futuro gli attuali rivelatori. Sotto, Lisa, un osservatorio costituito da tre satelliti che seguiranno la Terra nel suo movimento intorno al Sole, mantenendo una disposizione a triangolo.



## L'ANTICO BRUSIO DEI BUCHI NERI

L'universo è pieno di stelle, dette "pulsar", che ruotano vorticosamente producendo impulsi radio. Le pulsar scandiscono il tempo con una regolarità superiore a quella di un orologio atomico: perché non usarle, allora, per monitorare il passaggio di onde gravitazionali a bassissima frequenza, che scuotono l'universo su larga scala?

**Grande rete.** È quello che fanno i ricercatori del progetto International Pulsar Timing Array (Ipta), che recentemente hanno completato l'analisi di 65 pulsar, trovando le

tracce di quello che potrebbe essere il primo segnale di questo tipo (nella foto il telescopio Parkes in Australia, che fa parte del network). «È un segnale interessante», commenta Stavros Katsanevas, «che però non ha tutte le caratteristiche che ci si aspetterebbe da un'onda gravitazionale». Le osservazioni devono essere affinate, insomma, ma con questa tecnica si potrebbe osservare il brusio cosmico prodotto da una moltitudine di coppie di buchi neri supermassicci nelle prime fasi di vita dell'universo.



## VERSO UN CAMBIO DI GENERAZIONE

Il punto di partenza sono gli attuali rivelatori di onde gravitazionali, Virgo in Italia e LIGO negli Stati Uniti, ai quali recentemente si è aggiunto il giapponese Kagra (per una sintesi dei loro risultati, v. Focus n. 355). «Nel 2026-27 è previsto un altro rivelatore, LIGO India», dice Michele Punturo, dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn). «La presenza di un network di rivelatori distribuiti sul globo terrestre serve soprattutto a migliorare la localizzazione della sorgente». A un certo punto, però, sarà necessario cambiare radicalmente tecnologia. Punturo è coordinatore di un progetto - di cui sono capofila l'italiano Infn e l'istituto di fisica olandese Nikhef - di un rivelatore che gradualmente sostituirà quelli in circolazione: l'Einstein Telescope (ET). «Avrà una sensibilità 10 volte maggiore di quella dei rivelatori attuali», spiega. «E questo ci permetterà di vedere molto più in profondità, fino a quelle che chiamiamo le "ere oscure", che precedono la formazione delle prime stelle. Ci consentirà anche di studiare nel dettaglio gli scontri tra stelle di neutroni, dove si innescano processi nucleari finora mai osservati. E ancora, grazie alla sua sensibilità a bassa frequenza (fino a 1 Hz), ci consentirà per la prima volta di studiare buchi neri di qualche centinaio di masse solari».

ET avrà anche un nuovo ruolo nella nascente astronomia multimessaggera: «Individuerà con anticipo, anche di ore, coppie di stelle in procinto di collidere, consentendo di allertare i telescopi che lavorano nei campi dell'ottica, dell'infrarosso, dei raggi gamma (v. riquadro in fondo all'articolo). È un cambio di

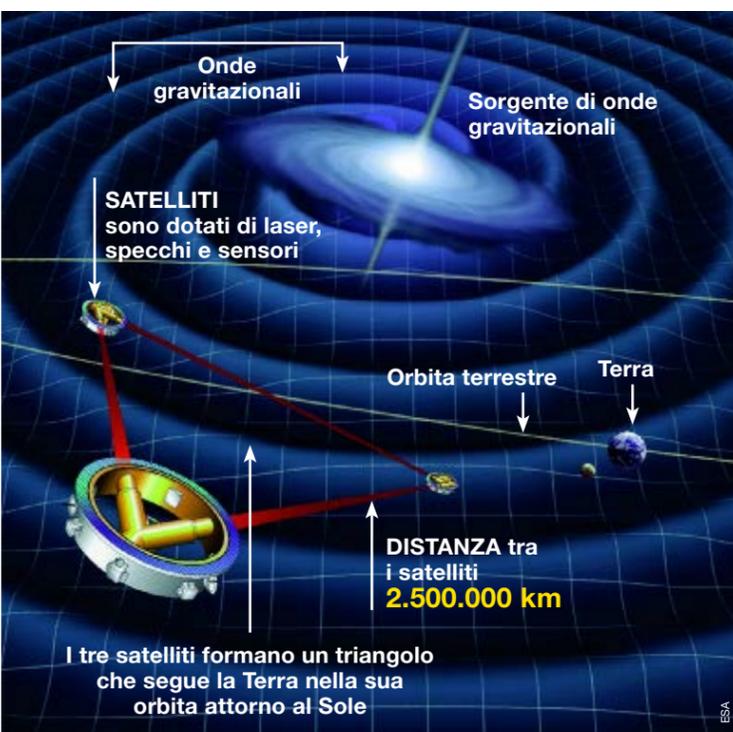
paradigma: non guarderemo più l'evento dopo che è avvenuto, ma lo punteremo prima che avvenga».

Il principio di funzionamento dell'Einstein Telescope è simile a quello dei rivelatori attuali: si basa sull'interferenza di fasci laser. «ET, però, ha alcune caratteristiche in più», precisa Punturo. «I rivelatori attuali hanno solo un punto d'osservazione (il detector), ET ne avrà sei, due per ogni vertice del triangolo. In pratica, sarà come avere 6 rivelatori equivalenti a LIGO o Virgo: tre sono specializzati nelle basse frequenze, tre nelle alte frequenze». Il primo opererà a basse temperature (-263 °C, 10 gradi sopra lo zero assoluto) e tutti saranno a 200 metri di profondità, il più possibile al riparo da rumori e interferenze (v. disegno sopra). Dove sarà costruito ET, ancora non si sa: «Ci sono due siti in competizione», spiega Punturo. «Uno è al confine tra Belgio, Olanda e Germania (una regione chiamata Euregio Mosa-Reno), l'altro è in Sardegna». L'Italia ovviamente appoggia la Sardegna, che ha due vantaggi: «È scarsamente popolata e ha una stabilità geologica unica in Europa», osserva Punturo. E queste caratteristiche sono importanti per garantire il massimo della sensibilità.

L'avvio degli scavi è previsto entro il 2027, mentre l'opera sarà completata nel 2035. Il suo costo secondo le stime sarà di 1,7 miliardi di euro, e genererà un giro d'affari 3,2 volte maggiore.

## NEGLI STATI UNITI E IN CINA

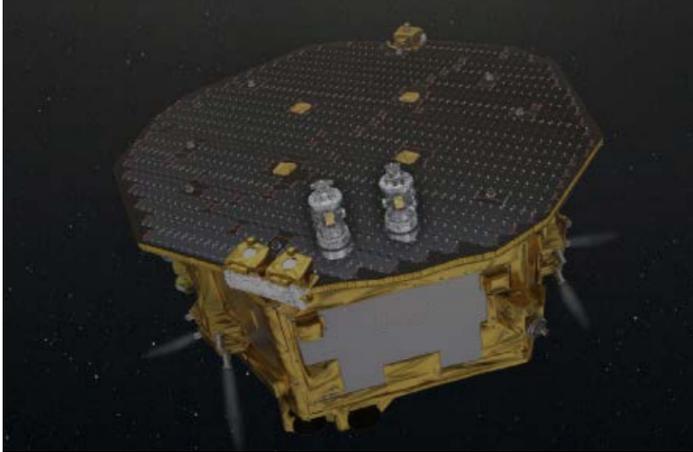
«All'inizio ET funzionerà in parallelo agli altri rivelatori terrestri; poi li sostituirà», dice Punturo. Negli Stati Uniti, invece, entrerà in funzione Cosmic Explorer, che avrà una struttura a L simile a quella di LIGO, ma raggiungerà una lunghezza di 40 chilometri, dieci volte maggiore. Anche la Cina punta a un suo rivelatore; ma - forse anche per ragioni strategiche - sembra più interessata allo spazio. Perché per realizzare strumenti ▶



L'osservatorio **in orbita** Lisa potrà ascoltare fenomeni milioni di volte più lenti delle vibrazioni acustiche

**ESPERIMENTO RIUSCITO**

Disegno di Lisa Pathfinder, prototipo che ha dimostrato la fattibilità di Lisa.



ancora più grandi di Cosmic Explorer è utile andare oltre la Terra, nello spazio. Il progetto più avanzato di questo tipo è a guida europea e si chiama Lisa.

**TRIANGOLO IN ORBITA**

Lisa sarà una costellazione di tre satelliti in orbita, che formeranno un triangolo equilatero con 2,5 milioni di chilometri di lato. «Osserverà frequenze che vanno da 10 microhertz fino ai millihertz», illustra Punturo. «Potrà quindi vedere gli scontri tra buchi neri supermassicci, o la caduta di un buco nero stellare in uno supermassiccio. La missione dovrebbe essere lanciata nel 2035-6, quindi sarà un'ottima compagna di ET». La convivenza inaugurerà una nuova era dell'astronomia gravitazionale, definita "multibanda". L'idea è semplice: pensiamo a due buchi neri che ruotano l'uno attorno all'altro perdendo lentamente energia. Lisa potrà "ascoltarli", e sentirà - nella metafora - un suono sempre più acuto, perché i due buchi neri ruotano sempre più velocemente, avvicinandosi. Dopo un po', spiega Punturo, il segnale uscirà dal range di frequenze di Lisa, per poi entrare in quello di ET. Insomma, il segnale osservato diventa troppo "acuto" per Lisa, per poi essere successivamente percepito come "basso" da ET, che opera a frequenze maggiori.

**RITORNO ALLA LUNA**

Tra Lisa ed ET c'è però un "buco" di frequenze non osservabili, o meglio "non udibili". Come colmarlo? I giapponesi hanno ideato un esperimento, Decigo, simile a Lisa ma con i satelliti più vicini tra loro. Recentemente, però, è stata lanciata anche una proposta che prevede un ritorno alla Luna. Stavros Katsanevas, direttore dell'European Gravitational Observatory

**UN NUOVO "OCCHIO" PER IL COSMO VIOLENTO**

I raggi gamma hanno la stessa natura della luce visibile, ma sono molto più energetici e difficili da rilevare. Per studiare quelli che vengono dal cosmo, è in costruzione il Cherenkov Telescope Array Observatory (Ctao), una struttura dislocata in due aree, alle isole Canarie (foto) e in Cile. «Quando la radiazione gamma raggiunge la Terra, reagisce con l'atmosfera e produce una cascata di particelle e luce», spiega Federico Ferrini, già docente all'Università di Pisa e direttore del progetto. «La radiazione, scendendo di quota, si

degrada, fino a diventare tenue e blu a 2.000-2.500 metri di quota: i telescopi del Ctao sono studiati per raccogliere questa radiazione».

**Misteri.** «Vogliamo studiare le sorgenti più energetiche dell'universo: supernovae, collassi di stelle di neutroni, buchi neri», conclude Ferrini. «E vogliamo chiarire il mistero dei raggi cosmici (particelle energetiche di origine ignota) e quello della materia oscura. Secondo alcune teorie, infatti, la materia oscura presente nel cosmo decade spontaneamente, producendo raggi gamma».

(EGO, il consorzio che ospita Virgo), snocciola uno a uno tutti i buoni motivi per farlo: «1, la Luna ha una sismicità molto inferiore a quella della Terra, perché non ha un nucleo fluido in movimento; 2, sulla Luna non c'è atmosfera: il vuoto sulla sua superficie è lo stesso di quello di LIGO e di Virgo, dunque non c'è bisogno di ricrearlo artificialmente; 3, la distanza tra la Terra e la Luna permette una triangolazione per individuare con esattezza la posizione delle sorgenti osservate».

L'elenco non finirebbe qui, ma tra tutti gli altri punti il più importante è di ordine scientifico e riguarda proprio la sensibilità nell'intervallo di frequenze desiderato: «Dalla Luna si possono vedere buchi neri fuori dagli intervalli ottimali di osservazione di Lisa (che studierà quelli al centro delle galassie) e di ET (che si focalizzerà su quelli di origine stellare), in particolare i buchi neri tra 150 e 1 milione di masse solari», dice Katsanevas. «Si arriverà a guardare fino a prima della nascita delle stelle, all'i-



Durante il **lockdown** è nata l'idea che anche la **Luna** possa essere usata come un'enorme **antenna**

nizio dell'universo osservabile». E studiare la formazione dei buchi neri supermassicci al centro delle galassie.

Per raggiungere questo traguardo, l'idea è usare l'intera Luna come rivelatore. Quando passa un'onda gravitazionale, infatti, il nostro satellite oscilla come se fosse attraversato da un rapido passaggio di marea. E allora basta avere alcuni rivelatori nei punti giusti per misurare le deformazioni che avvengono.

**CON LE FIBRE OTTICHE**

Ci sono più modi per farlo. Jan Harms, del Gran Sasso Science Institute (Gssi), ha proposto di usare 4 sismografi ultrasensibili. Katsanevas, con altri suoi colleghi, propone invece le fibre ottiche: «Se c'è una vibrazione del terreno, le fibre si deformano, cambia l'indice di rifrazione e questo produce un effetto osservabile al passaggio di un laser», spiega. «Quindi possiamo costruire un rivelatore lungo 3 km composto da 100 sensori,

uno ogni 30 metri. Potrebbe essere pronto per il 2028». La proposta, già presentata all'Esa, ha un ulteriore vantaggio: le fibre, registrando tutte le microsismicità, consentirebbero di rilevare l'eventuale presenza di ghiaccio nel sottosuolo, che avrebbe un'importanza enorme in vista delle missioni umane in programma. Le complicazioni non mancano, così come non manca la determinazione a superarle. «L'idea è nata all'inizio della pandemia di Covid-19, durante il primo lockdown», racconta Katsanevas. «I colleghi del Cnrs (istituto di ricerca francese che partecipa a Virgo, ndr) mi riferirono che c'era un forte interesse dell'Esa per andare sulla Luna. La situazione che stiamo vivendo mi riporta alla mia infanzia, quando c'era la Guerra fredda e i russi mandarono il primo uomo nello spazio, Jurij Gagarin, mentre gli Americani stavano preparando le missioni Apollo. Rivivo quel momento, in cui tutti volevano andare sulla Luna. Nel bene e nel male, è un ritorno della storia». **F**

**GIGANTI IN ARRIVO**

Oltre ai rivelatori di onde gravitazionali, è in arrivo un'ondata di grandi telescopi che estenderanno le nostre osservazioni oltre le frequenze della luce visibile, fino ai raggi gamma (v. riquadro in alto), e anche a particelle di natura diversa come i neutrini.

**Cherenkov Telescope Array Observatory (Ctao)**

DOVE: Cile, Canarie  
QUANDO: 2026  
OSSERVERÀ: Raggi gamma  
OBIETTIVI: Studierà i fenomeni più violenti dell'universo.

**Advanced Telescope for High Energy Astrophysics (Athena)**

DOVE: Orbita  
QUANDO: 2034  
OSSERVERÀ: Raggi X  
OBIETTIVI: Studio dei gas caldi, come quelli intorno ai buchi neri supermassicci.

**Extremely Large Telescope (Elt)**

DOVE: Cile  
QUANDO: 2027  
OSSERVERÀ: Luce  
OBIETTIVI: Si affiancherà al nuovo telescopio spaziale Vera C. Rubin (2024) per lo studio dell'universo visibile.

**James Webb Space Telescope (Jwst)**

DOVE: Orbita  
QUANDO: 2022  
OSSERVERÀ: Infrarosso  
OBIETTIVI: Studio dell'universo primordiale, formazione delle stelle e dei pianeti.

**Square Kilometre Array Observatory (Ska0)**

DOVE: Australia e Sudafrica  
QUANDO: 2030  
OSSERVERÀ: Onde radio  
OBIETTIVI: Studio di buchi neri, dell'universo giovane e della vita extraterrestre.

**Cubic Kilometre Neutrino Telescope (KM3NeT)**

DOVE: Mar Mediterraneo  
QUANDO: 2022  
OSSERVERÀ: Neutrini  
OBIETTIVI: Studi fondamentali sui neutrini, processi stellari, supernovae.