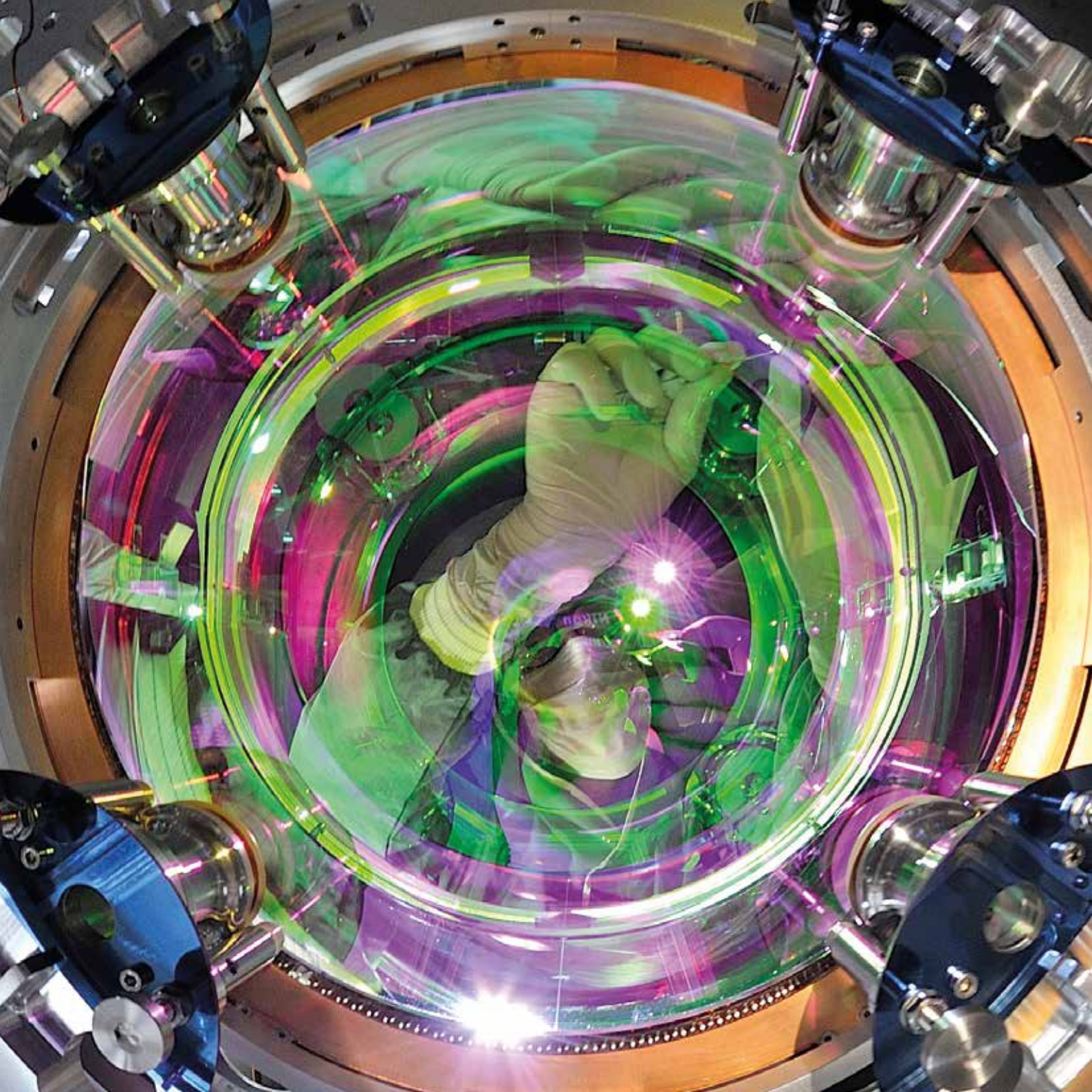


L'OSSERVATORIO
GRAVITAZIONALE
EUROPEO
E VIRGO

EGO  VIRGO



LA PIÙ
FOLLE
DELLE
IMPRESE



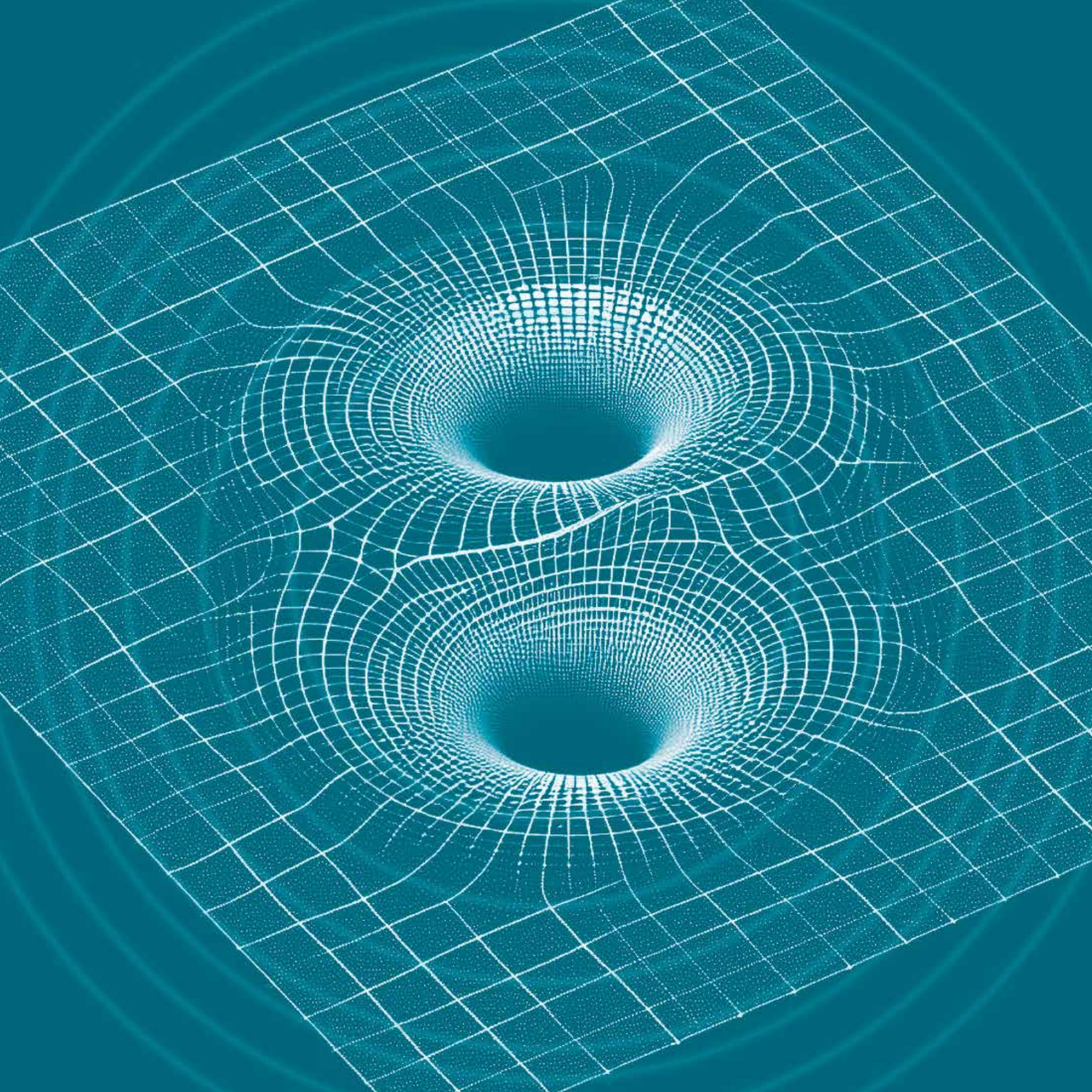
La storia di Virgo inizia nei primi anni '80 del secolo scorso, dall'incontro fra due fisici visionari: l'italiano **Adalberto Giazotto** e il francese **Alain Brillet**. I due unirono le forze per inseguire un sogno comune: **costruire un grande interferometro per rivelare le onde gravitazionali**, impercettibili segnali cosmici predetti dalla **Relatività Generale di Einstein** all'inizio del '900.

Entrambi stavano già conducendo ricerche su tecnologie decisive per il futuro esperimento: l'ottica laser e l'attenuazione sismica. Così nel 1989, sulla base dei risultati preliminari dei loro studi, l'**Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - INFN** in Italia e il **Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS**, in Francia accordarono a Giazotto e Brillet un finanziamento, **dando il via al progetto di un grande interferometro gravitazionale europeo, Virgo**. Negli stessi anni il Massachusetts Institute of Technology (MIT) e il California Institute of Technology (Caltech) avviavano negli Stati Uniti il progetto di due analoghi interferometri, chiamati LIGO.

LIGO e Virgo rappresentavano la più importante impresa scientifica per la ricerca delle onde gravitazionali mai tentata. Sebbene godessero del sostegno di prestigiose istituzioni di ricerca internazionali, erano però guardati con scetticismo da una parte della comunità scientifica. Le sfide tecnologiche legate ai due esperimenti apparivano troppo ambiziose, così come pesavano gli insuccessi di precedenti esperimenti, ad esempio quelli condotti da Joseph Weber alla fine degli anni '60 con le barre risonanti. Lo stesso Giazotto avrebbe detto in seguito: **“Rivelare le onde gravitazionali era la più folle delle imprese”**.

pag. 2
Un'immagine aerea
dell'interferometro Virgo

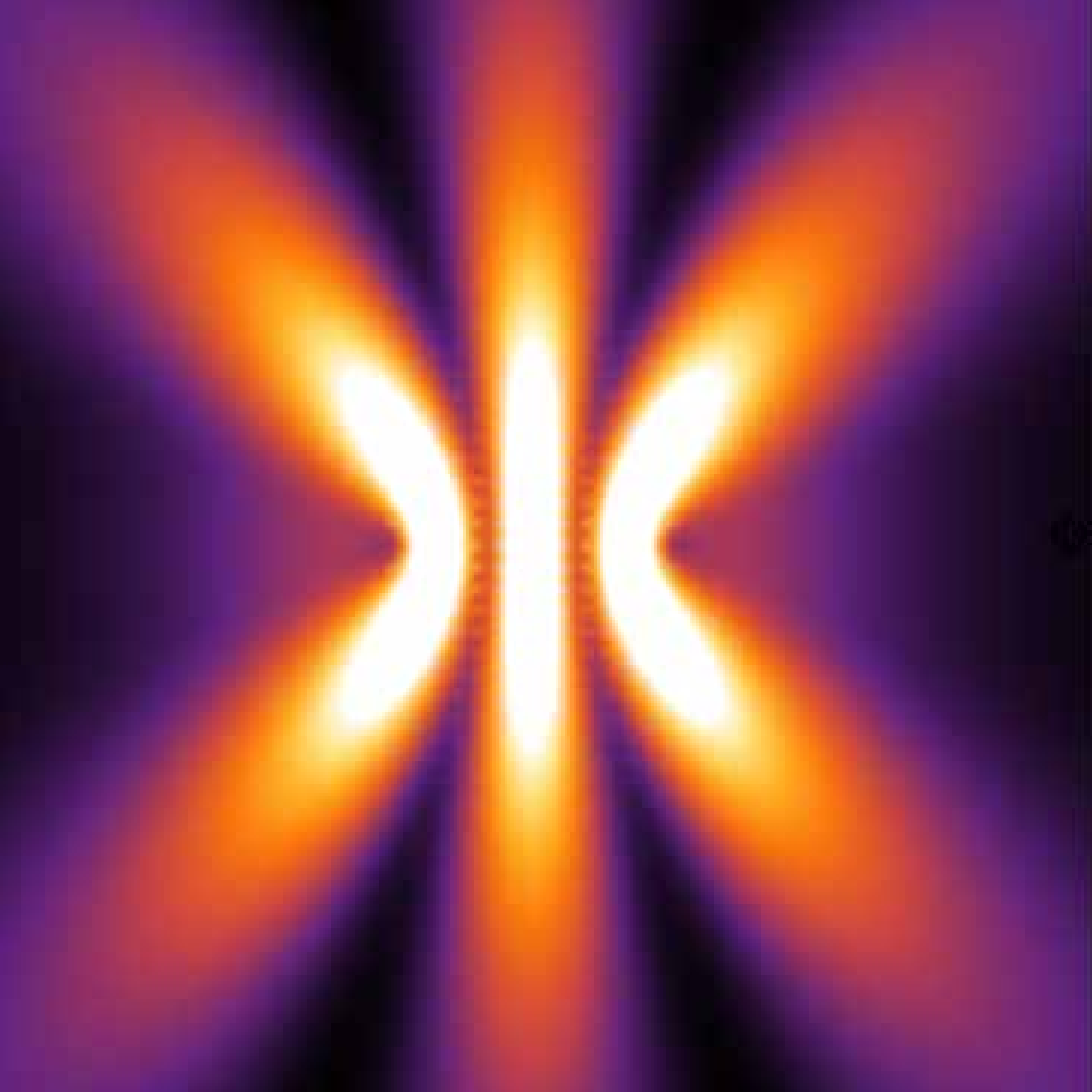
pag. 4
Scienziato di Virgo al lavoro su
uno degli specchi del rivelatore



ONDE GRAVITA ZIONALI

Possiamo immaginare le onde gravitazionali come **increspature del tessuto dello spazio-tempo**, ovvero vibrazioni della stessa 'impalcatura' dell'Universo. Si propagano deformando lo spazio-tempo, e quindi tutti gli oggetti che attraversano, per una frazione di secondo.

Le onde gravitazionali vengono generate dai **fenomeni cosmici più estremi e violenti**, come le collisioni di buchi neri e stelle di neutroni. Propagandosi per milioni o miliardi di anni nel Cosmo prima di arrivare fino a noi, le onde gravitazionali perdono gran parte della loro energia, e quindi gli effetti che generano sulla Terra sono impercettibili. Si tratta di **deformazioni spaziotemporali più piccole delle dimensioni di un nucleo atomico**: per questo **rivelarne il passaggio sembrava una sfida impossibile!**



LA
FONDA
ZIONE



La vera e propria costruzione di Virgo cominciò nel 1996, dopo l'individuazione del sito in un'ampia piana della campagna pisana, nel comune di Cascina.

L'inaugurazione dell'infrastruttura sperimentale si tenne il 23 luglio 2003, alla presenza dei Ministri dei governi italiano e francese e di esponenti di spicco della comunità scientifica internazionale.

Era il coronamento, oltre che di uno strenuo lavoro di ricerca e sviluppo di tecnologie all'avanguardia, di un importante percorso politico istituzionale.

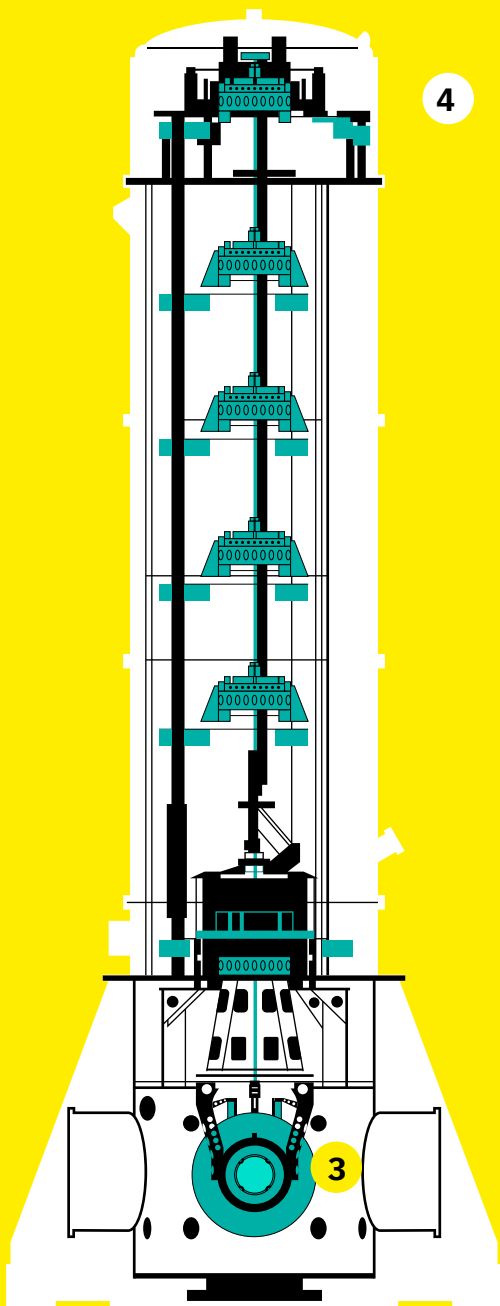
Nel 2000, infatti, era stato fondato l'Osservatorio Gravitazionale Europeo - EGO, finanziato da INFN e CNRS, con la missione di gestire l'infrastruttura di ricerca, gli aspetti logistici e amministrativi.

Nello stesso periodo entravano in funzione anche i due interferometri LIGO, ma né Virgo né i rivelatori statunitensi furono in grado nei primi anni di captare i tanto attesi segnali gravitazionali. Il prolungarsi dell'attesa e l'incertezza del risultato convinse nel 2007 i ricercatori a unire le forze e creare un'unica rete globale di interferometri, in modo da acquisire e analizzare i dati congiuntamente. A questa rete si sarebbe aggiunto nel 2019 anche il rivelatore giapponese KAGRA. Le tre collaborazioni insieme formano la Collaborazione Scientifica internazionale LIGO - Virgo - KAGRA, che oggi conta quasi 3.000 membri.

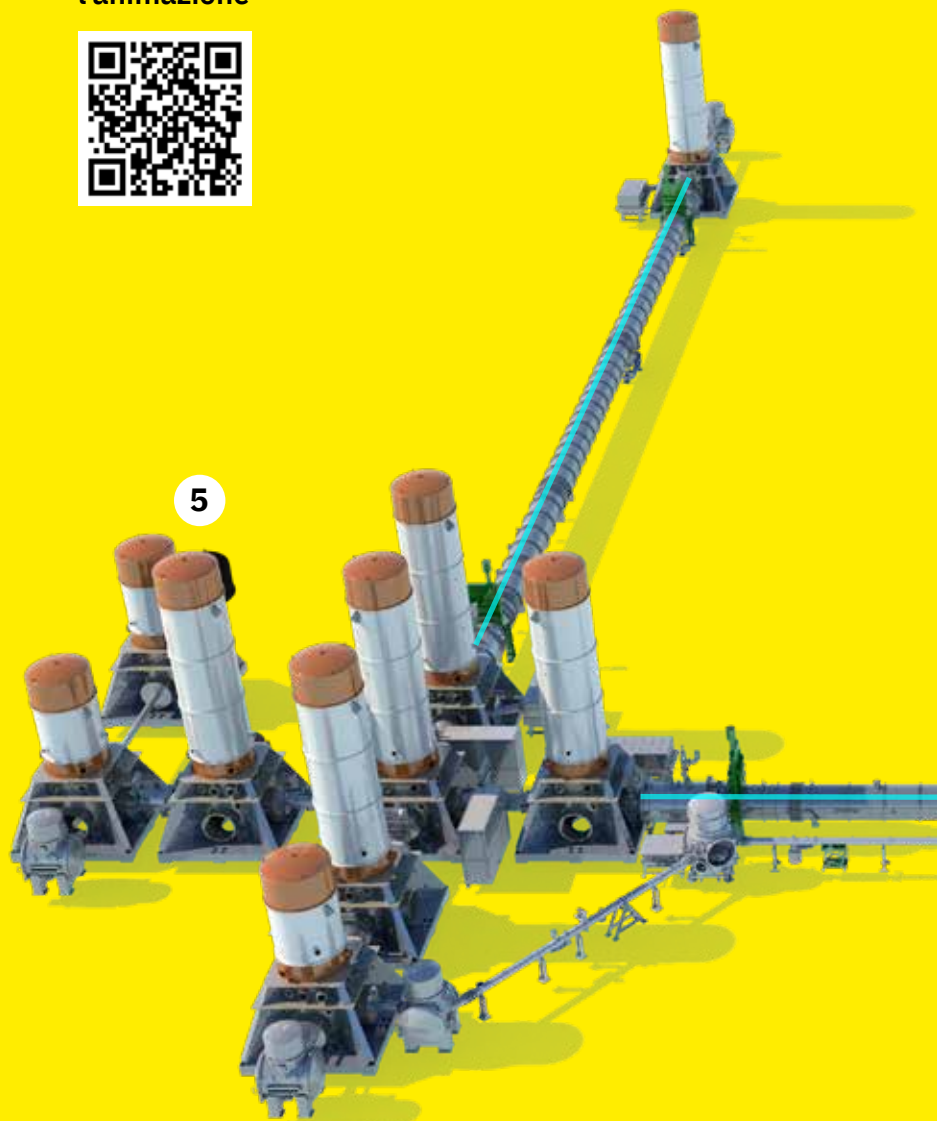
Anche il consorzio EGO, inizialmente italo-francese, è cresciuto in modo significativo. A INFN e CNRS si è aggiunto nel 2009 NWO-I (Fondazione per gli Istituti di Ricerca Scientifica Olandesi) in qualità di osservatore e poi nel 2022 come membro associato, seguito nel 2025 dalle fondazioni di ricerca belghe FWO (La Fondazione per la ricerca nelle Fiandre) e FNRS (Fondo per la ricerca scientifica). EGO conta attualmente cinque istituzioni finanziatrici di quattro Paesi membri.

pag. 8
Elaborazione artistica
di una figura di interferenza
di luce

pag. 10
Il tunnel nord del
rivelatore Virgo: a
sinistra il tubo principale
dell'interferometro, a destra
la cavità di squeezing, dove
viene iniettato il laser per
ridurre il rumore quantistico



guarda
l'animazione

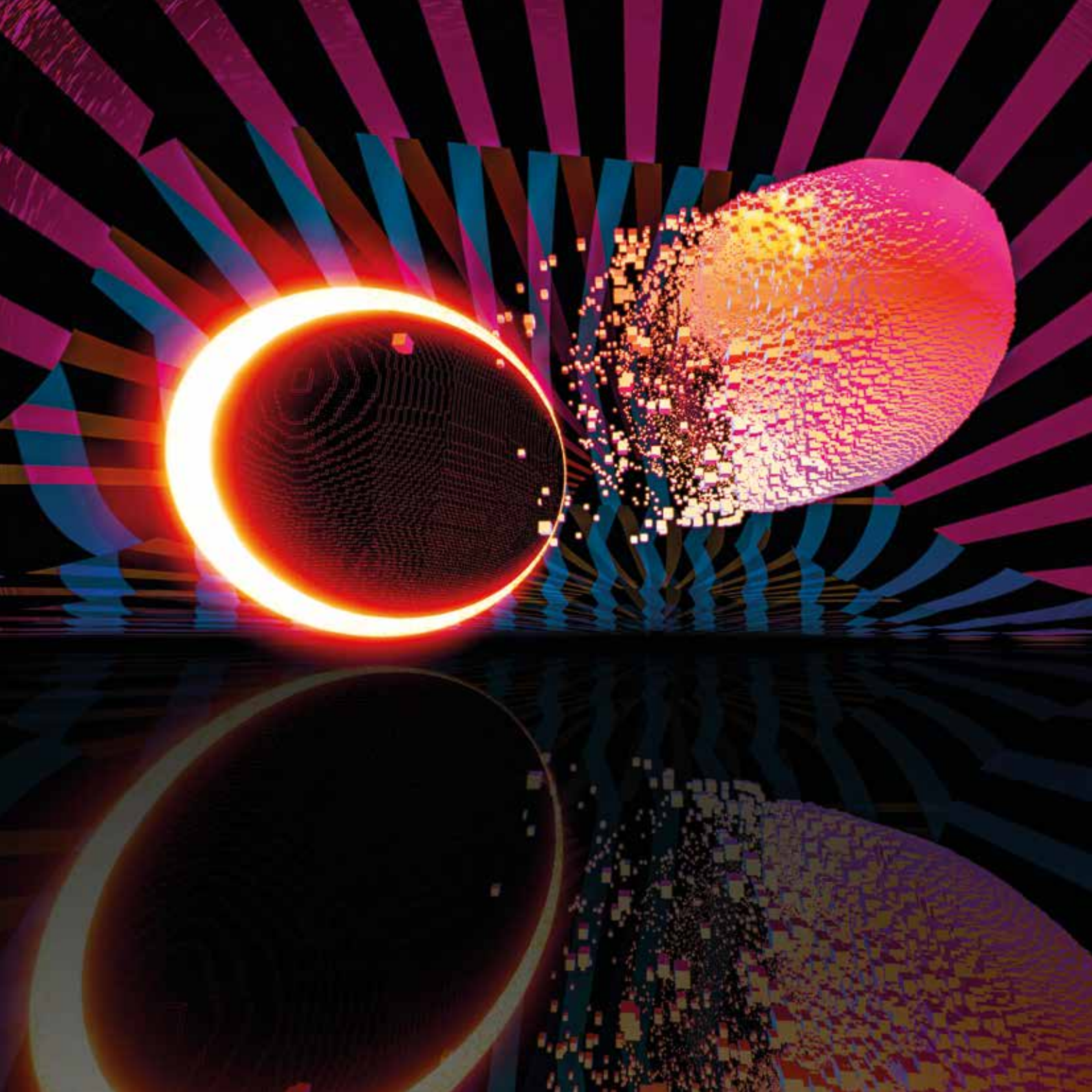


INTERFEROMETRO

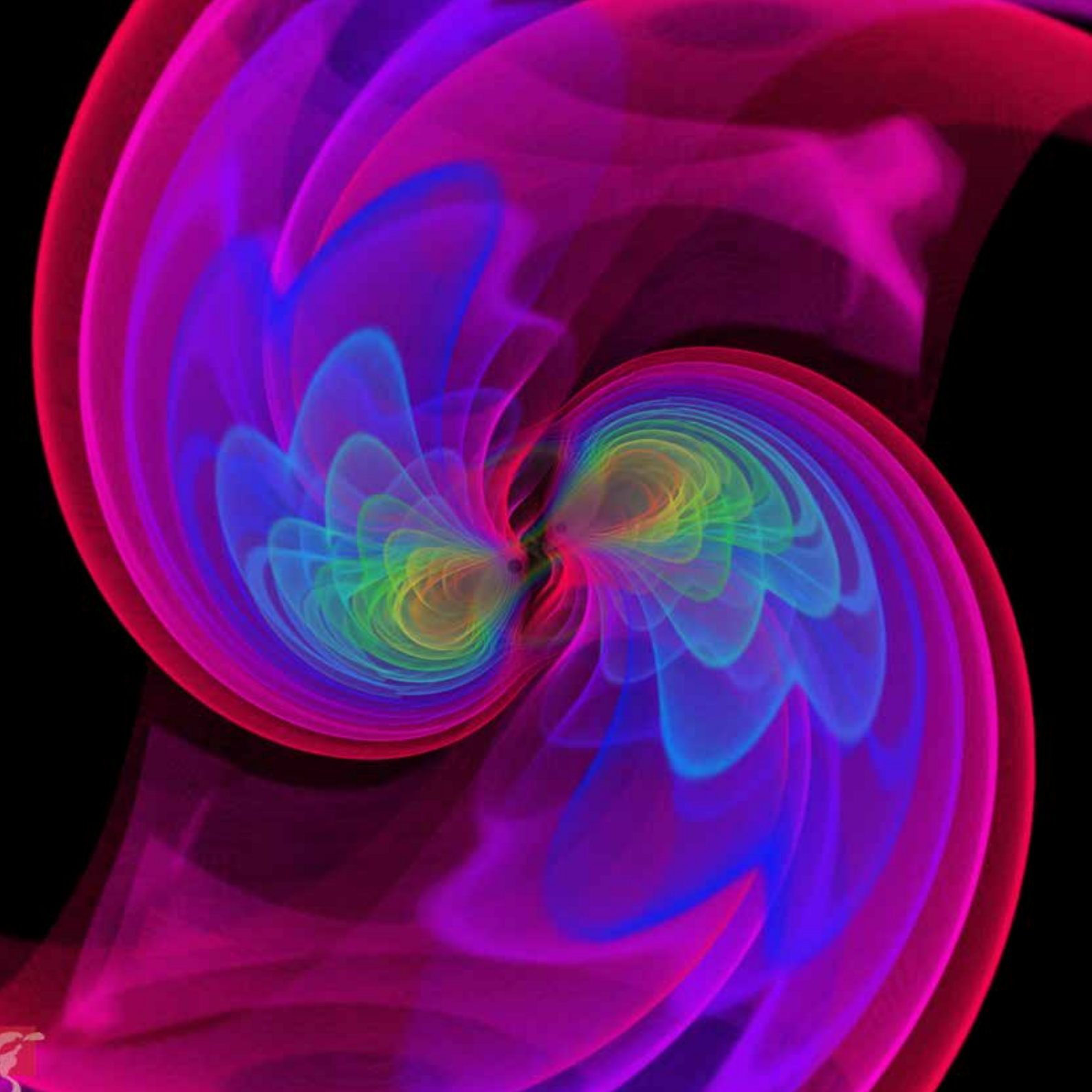
Per rivelare il passaggio di queste impercettibili oscillazioni dello spazio-tempo, **Virgo utilizza l'interferenza di due fasci laser, che si propagano, in ultra-alto vuoto, lungo due bracci perpendicolari di 3 chilometri(1).** Alle loro estremità, **all'interno di campane da vuoto(2) alte 11 metri, due specchi(3) super riflettenti e piatti sono sospesi con dei sottilissimi fili di vetro a grandi ammortizzatori antisismici(4),** che li mantengono perfettamente immobili. Gli specchi riflettono i fasci laser, che si ricongiungono all'incrocio dei bracci, producendo una particolare figura di interferenza.(5)

Al passaggio di un'onda gravitazionale i bracci vengono deformati per una frazione di secondo, uno si allunga e uno si accorcia di una quantità pari a un millesimo del diametro di un protone (ovvero un milionesimo di milionesimo di millimetro). Questo cambia la lunghezza del percorso dei due laser, e quindi modifica la figura di interferenza. Così Virgo riesce a rivelare il passaggio delle onde gravitazionali!





UNA
NUOVA
ASTRO
NOMIA



La scoperta delle onde gravitazionali, annunciata nel febbraio 2016, dalle Collaborazioni Scientifiche di LIGO e Virgo è un momento epocale della storia dell'Astronomia. Una scoperta che ha innescato una vera e propria rivoluzione scientifica, considerata da molti paragonabile a quella realizzata da Galileo con il suo cannocchiale. Al di là della conferma della teoria di Einstein, **la capacità di rivelare le onde gravitazionali ci ha dotato di un nuovo 'senso', un nuovo modo per ascoltare i più remoti segnali cosmici.** Ciò ci ha permesso di ottenere nuove informazioni sui buchi neri, sulle loro masse, la loro distribuzione e il modo in cui si formano, illuminando un paesaggio cosmico che non conosceamo. Nel 2017, la scoperta è valsa il premio Nobel agli scienziati di LIGO Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne.

Virgo, menzionato nella motivazione del premio, non aveva partecipato sperimentalmente alla rivelazione del primo segnale gravitazionale, avvenuta a Settembre del 2015, ma solo all'analisi dei dati. Due anni dopo, però, avrebbe contribuito in modo decisivo a un altro traguardo epocale. **Il 17 Agosto del 2017 i due interferometri LIGO e Virgo identificano per la prima volta il segnale gravitazionale della fusione di due stelle di neutroni.** In queste collisioni si generano, oltre alle onde gravitazionali, segnali di natura completamente diversa: onde radio, luce visibile, raggi X, raggi gamma...

Quel giorno la triangolazione dei tre rivelatori gravitazionali ha permesso di individuare la direzione della sorgente e di realizzare, per la prima volta, un'osservazione coordinata dello stesso fenomeno cosmico di oltre 70 telescopi sul pianeta e in orbita. Iniziò così quella che la comunità scientifica chiama Astronomia Multimessaggera.

pag. 14
**Rappresentazione artistica
della coalescenza tra
un buco nero e una stella
di neutroni**

pag. 16
**Simulazione numerica della
coalescenza binaria di buchi
neri GW150914**

Belgio
Katholieke Universiteit Leuven
Université de Liège
Université catholique de Louvain
Université libre de Bruxelles
Universiteit Antwerpen
Universiteit Gent
Vrije Universiteit Brussel

Brasile
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Instituto de Ciências e Tecnologia -
Universidade Federal de Alenas
Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Federal University of Rio Grande do Norte
Universidade Estadual Paulista
Universidade Federal de Itajubá

Burkina Faso
Laboratoire de Physique et de Chimie de
l'Environnement, Université Joseph KI-ZERBO

Danimarca
Niels Bohr Institute, Copenhagen University

Francia
Aix-Marseille Université, Université de Toulon,
CNRS, CPT
Aix Marseille Université
Aix Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM
Université Paris Cité, CNRS, Astroparticule
et Cosmologie
Université Côte d'Azur, Observatoire de la
Côte d'Azur, CNRS, Artemis
Centre de Calcul IN2P3
Centre de Physique Théorique, Aix-Marseille
Université
Centre national de la recherche scientifique
Corps des Mines, Mines Paris, Université PSL
Centre de Physique des Particules de
Marseille
Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
Université Côte d'Azur, Observatoire de la
Côte d'Azur, CNRS, Geoazur
GIPSA-Lab
Institut d'Astrophysique de Paris
Institut des Hautes Etudes Scientifiques
Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLab
Institut des Nanotechnologies de Lyon
Institut des Nanosciences de Paris
Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med,
Institut Fresnel
Université de Lyon, Université Claude Bernard
Lyon 1, CNRS, Institut Lumière Matière
Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, IP2I
Lyon / IN2P3, UMR 5822
Université de Strasbourg, CNRS, IPHC UMR
7178
Laboratoire des 2 Infinis - Toulouse (L2IT-
IN2P3)
Laboratoire de Physique de l'École Normale
Supérieure, ENS, (CNRS, Université PSL,
Sorbonne Université, Université Paris Cité)
NAVER
Université Côte d'Azur, Observatoire de la
Côte d'Azur, CNRS, Lagrange
Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Laboratoire
d'Annecy de Physique des Particules - IN2P3
Laboratoire d'Acoustique de l'Université du
Mans
Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne
Université, CNRS
Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS,
Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA),
IP2I Lyon / IN2P3, UMR 5822
Laboratoire de Physique Corpusculaire Caen
Laboratoire Univers et Théories
Observatoire Astronomique de Strasbourg
Observatoire de Paris
Subatech, CNRS/IN2P3 - IMT Atlantique -
Nantes Université
Université de Normandie
Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR
6082
Université Paris-Saclay, Université Paris Cité,
CEA, CNRS, AIM
Université PSL

Germania
Institut für Theoretische Physik, Johann
Wolfgang Goethe-Universität
Institut fuer Theoretische Astrophysik,
Zentrum fuer Astronomie Heidelberg,
Universitaet Heidelberg
Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-
Schiller-Universität Jena

Greece
Department of Physics, Aristotle University
of Thessaloniki
Department of Physics, National and
Kapodistrian University of Athens

Hungary
HUN-REN Institute for Nuclear Research
HUN-REN Wigner Research Centre for Physics

Israel
Ariel University

Italia
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto
dei Sistemi Complessi
CNR-SPIN
DIFA- Alma Mater Studiorum Università di
Bologna
Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIIN),
Università di Salerno
Dipartimento di Ingegneria, Università del
Sannio
Dipartimento di Farmacia, Università di
Salerno
Dipartimento di Fisica "E.R. Caianiello",
Università di Salerno
Dipartimento di Medicina, Chirurgia e
Odontoiatria "Scuola Medica Salernitana",
Università di Salerno
Dipartimento di Fisica, Università degli studi
di Milano
European Gravitational Observatory (EGO)
Gran Sasso Science Institute (GSSI)
INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza
dello Spazio
INAF, Osservatorio Astronomico di Brera
sede di Merate
INAF, Osservatorio Astronomico di Padova
Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali
di Roma
Istituto Nazionale di Astrofisica - Osservatorio
di Roma
Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare - Sezione
di Bologna
INFN Cagliari
INFN, Sezione di Firenze
INFN, Sezione di Genova
INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
INFN, sezione di Milano
INFN, Sezione di Milano-Bicocca
INFN, Sezione di Napoli
INFN, Sezione di Napoli, Gruppo Collegato
di Salerno
INFN, Sezione di Padova
INFN, Sezione di Milano Bicocca, Gruppo
Collegato di Parma
INFN, Sezione di Perugia
INFN, Sezione di Pisa
INFN, Sezione di Roma
INFN, Sezione di Roma Tor Vergata
INFN, Sezione di Roma Tor Vergata
INFN Sezione di Torino
INFN, Trento Institute for Fundamental
Physics and Applications
INFN, Sezione di Trieste
Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare - Sezione
di Bologna
INFN-CNAF - Bologna
Museo Storico della Fisica e Centro Studi e
Ricerche "Enrico Fermi"
Scuola Normale Superiore
Scuola Internazionale Superiore di Studi
Avanzati
Scuola di Ingegneria, Università della
Basilicata
Università di Camerino
University of Catania
Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra,
Università Degli Studi di Ferrara
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi
di Genova
Università degli Studi di Milano-Bicocca
Università di Napoli "Federico II"
Università di Padova, Dipartimento di Fisica
e Astronomia
Dipartimento di Scienze Matematiche, Fisiche
e Informatiche, Università di Parma
Università di Perugia
Università di Pisa
Università di Roma Tor Vergata
Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Elettronica e Meccanica, Università degli Studi
"Roma Tre"
Università di Roma "La Sapienza"
Università degli Studi di Sassari
Università di Siena, Dipartimento di Scienze
Fisiche, della Terra e dell'Ambiente
Università di Trento, Dipartimento di Fisica
Dipartimento di Fisica, Università di Trieste
Dipartimento di Scienze Matematiche,
Informatiche e Fisiche, Università di Udine
Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo"
Università degli Studi di Cagliari
Università di Firenze

Giappone
Gravitational Wave Science Project, National
Astromical Observatory of Japan (NAOJ)

Paesi Bassi
Findhoven University of Technology
GRAPPA, Anton Pannekoek Institute for
Astronomy and Institute for High-Energy
Physics, University of Amsterdam
Institute for Gravitational and Subatomic
Physics (GRASP), Utrecht University
Institute for High-Energy Physics, University
of Amsterdam
Maastricht University
Nikhef
Department of Astrophysics/IMAPP, Radboud
University Nijmegen
Department of Physics and Astronomy, Vrije
Universiteit Amsterdam

Polonia
Astronomical Observatory Warsaw University
Nicolaus Copernicus Astronomical Center,
Polish Academy of Sciences
Center for Theoretical Physics, Polish
Academy of Sciences
Academic Computer Centre CYFRONET of
the University of Science and Technology
in Cracow
Faculty of Physics, University of Warsaw
Institute of Mathematics, Polish Academy
of Sciences
National Center for Nuclear Research
Faculty of Physics, University of Bia(ł)ystok
Astronomical Observatory, Jagiellonian
University
Institute of Theoretical Physics, University
of Wrocław

Portogallo
Centro de Astrofisica e Gravitaçao
Centro de Fisica das Universidades do Minho
e do Porto, Universidade do Minho
Universidade de Coimbra

Republica di Corea
Korea Astronomy and Space Science Institute

Spagna
Centro de Investigaciones Energéticas
Medioambientales y Tecnológicas
Departamento de Astronomía y Astrofísica,
Universitat de València
Departamento de Matemáticas, Universitat
de València
Departamento de Fisica - ETSIDI, Universidad
Politécnica de Madrid
Departament de Física Quàntica i Astrofísica
(FQA), Universitat de Barcelona (UB)
Institut de Ciències del Cosmos (ICCUB),
Universitat de Barcelona (UB)
Institutio Catalana de Recerca i Estudis
Avançats (ICREA)
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya
Institut de Física d'Altes Energies (IFAE), The
Barcelona Institute of Science and Technology
Instituto de Fisica Teorica UAM-CSIC,
Universidad Autonoma de Madrid
Observatori Astronòmic, Universitat de
València

Svizzera
Département d'Astronomie, Université de
Genève
Département de Physique Nucléaire et
Corpusculaire, Université de Genève
Gravitational Wave Science Center (GWSC),
Université de Genève
University of Applied Sciences and Arts of
Western Switzerland - HEPH
Department of Astronomy, University of
Geneva
Gravitational Wave Science Center, UniGe

NETWORK INTERNA ZIONALI

Una comunità internazionale di circa 1000 membri, provenienti da 160 istituzioni di 17 Paesi, è impegnata nel funzionamento del rivelatore di onde gravitazionali Virgo, ospitato dall'Osservatorio Gravitazionale Europeo di Cascina (PI), e analizza i dati che produce. I membri della collaborazione ricoprono un'ampia varietà di ruoli: **sono fisici, matematici, ingegneri e tecnici.**

Scienziate e scienziati della Collaborazione Virgo lavorano insieme a LIGO e KAGRA per formare la Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK). Si tratta di una rete globale che collabora al funzionamento dei quattro più grandi rivelatori di onde gravitazionali del mondo e alla produzione congiunta di risultati scientifici. Anche GEO600, un rivelatore di onde gravitazionali più piccolo che si trova in Germania, contribuisce ai risultati scientifici e tecnologici della rete internazionale, ospitando importanti attività di ricerca e sviluppo.



IN
ASCOL
TO DELL
AMBIE
NTE



Per rilevare le onde gravitazionali, deformazioni dello spazio-tempo più piccole delle dimensioni di un nucleo atomico, scienziate e scienziati di EGO e Virgo hanno dovuto utilizzare tecnologie all'avanguardia, molte delle quali sviluppate per la prima volta a questo scopo.

Una delle sfide tecnologiche più estreme e affascinanti è quella di **discriminare i segnali gravitazionali da tutti i possibili 'rumori' generati dall'ambiente o dagli esseri umani**: fenomeni atmosferici, vibrazioni sismiche del suolo, moti ondosi del mare, traffico stradale, pale eoliche, elicotteri o aerei... Per isolare il laser e le altre componenti dell'esperimento, Virgo contiene il più grande volume di vuoto ultra-alto d'Europa (il terzo al mondo). Gli specchi dell'interferometro, in particolare, sono sospesi a dei grandi ammortizzatori sismici, torri di pendoli multipli alte 11 metri, che costituiscono un altro gioiello tecnologico del rivelatore.

Ciononostante alcuni flebili rumori possono superare i sofisticati sistemi di isolamento e raggiungere l'interferometro, per cui è in atto un costante monitoraggio ambientale, che consente tramite algoritmi intelligenti di identificare e sottrarre in tempo reale i segnali spuri dall'output del rivelatore.

Virgo dunque non solo osserva l'universo profondo, ma è anche **un sensibilissimo orecchio in ascolto dell'ambiente e del mondo circostante**, che registra informazioni che in futuro potrebbero servirci a studiare la Terra, il mare o il clima.

pag. 20
Il braccio nord
dell'interferometro Virgo

pag. 22
Il braccio ovest
dell'interferometro Virgo
e l'edificio terminale della
cavità Mode Cleaner,
che "pulisce" il laser prima
che entri nell'interferometro

-0.533367371708424, -0.46656659941507644, -0.39527954585314595, -0.3548860814121655, -0.358275
-0.3929774968013803, -0.35825675888268804, -0.3343616855985247, -0.3478532168465118, -0.39170496028
-0.31043496060235753, -0.18987616158836035, -0.10415123849472045, -0.09673891583123534, -0.1546599275
-0.10534683323371324, 0.038456420197898376, 0.14188604976047745, 0.14120519503555437, 0.0403535684068
.12210409175423938, 0.001469262170338867, 0.14068628230989655, 0.23240666871177368, 0.264418921942402
6290823909, 0.47949745603081406, 0.4989002359048282, 0.4246332506934664, 0.28748125679199393, 0.16328
28, 0.21585721761278964, 0.21240421647168797, 0.10562427466754003, -0.06577883526877834, -0.206467416
0.07335701571134803, 0.2384178195213199, 0.30806635887564754, 0.27687396563393774, 0.19348032182835
691721552686057, -0.12673222343639284, -0.2787969379816858, -0.4309091577197799, -0.5214459525082672,
995226350736, -0.21570830783732065, -0.15883664503127753, -0.10844156121532611, -0.024983823464402973
9703765877, 0.28480428419751136, 0.17938029852285914, 0.05173273922005395, -0.02430442115308727, -0.0
2459238, 0.274733966269615, 0.289088581779605, 0.26541573783419115, 0.2525114077396925, 0.28647579406
81302119241337, 0.3549731540971786, 0.21019535408487094, 0.07565435764828209, 0.024539081771869448, 0
92669916, 0.3422175830349822, 0.23032618023632467, 0.03170161209819695, -0.17144506659424158, -0.3048
7, -0.2523003182711572, -0.2124263392805551, -0.19151328695522177, -0.16993072413762755, -0.131416299
, -0.04009519454953398, -0.05313675620475547, -0.04666596927941701, 0.01791407935369984, 0.1457818266
81117519756409, 0.2933719785183527, 0.132846533714208, -0.010790944975535392, -0.08626205678419956, -
53327358114, -0.09477518998055581, -0.15385545819763266, -0.20068766621551562, -0.20979868215774025,
034098442924, -0.1858061156298114, -0.2092178351532754, -0.195448915417393, -0.13066560467905686, -0.
0772934, -0.38955907463306527, -0.200317962106077, -0.09039705786551197, -0.08175800552165785, -0.151
833, -0.431285068772702, -0.47085769310536985, -0.4702204864083096, -0.42495217276584085, -0.33777383
-0.058458460325057915, -0.04680305334006207, -0.0714959189463393, -0.09393459109012116, -0.075536667
, 0.20757469140374518, 0.2591150938992642, 0.2464902408579807, 0.18763080190608827, 0.120329736369728
4967992647314, 0.14109291562910425, 0.16167924528806976, 0.1560428604203371, 0.12250141094868891, 0.0
586903929, -0.1320811753831026, -0.16194784682336125, -0.16565158170456218, -0.15688832734955488, -0.
203821799, -0.26906757138676696, -0.321969758900126, -0.3745297850566703, -0.43176535332306437, -0.49
06946, -0.533367371708424, -0.46656659941507644, -0.39527954585314595, -0.3548860814121655, -0.358275
, -0.3929774968013803, -0.35825675888268804, -0.3343616855985247, -0.3478532168465118, -0.39170496028
-0.31043496060235753, -0.18987616158836035, -0.10415123849472045, -0.09673891583123534, -0.1546599275
-0.10534683323371324, 0.038456420197898376, 0.14188604976047745, 0.14120519503555437, 0.0403535684068
.12210409175423938, 0.001469262170338867, 0.14068628230989655, 0.23240666871177368, 0.264418921942402
6290823909, 0.47949745603081406, 0.4989002359048282, 0.4246332506934664, 0.28748125679199393, 0.16328
28, 0.21585721761278964, 0.21240421647168797, 0.10562427466754003, -0.06577883526877834, -0.206467416
0.07335701571134803, 0.2384178195213199, 0.30806635887564754, 0.27687396563393774, 0.193480321828354
691721552686057, -0.12673222343639284, -0.2787969379816858, -0.4309091577197799, -0.5214459525082672,
995226350736, -0.21570830783732065, -0.15883664503127753, -0.10844156121532611, -0.024983823464402973
9703765877, 0.28480428419751136, 0.17938029852285914, 0.05173273922005395, -0.02430442115308727, -0.0
2459238, 0.274733966269615, 0.289088581779605, 0.26541573783419115, 0.2525114077396925, 0.28647579406
81302119241337, 0.3549731540971786, 0.21019535408487094, 0.07565435764828209, 0.024539081771869448, 0
92669916, 0.3422175830349822, 0.23032618023632467, 0.03170161209819695, -0.17144506659424158, -0.3048
7, -0.2523003182711572, -0.2124263392805551, -0.19151328695522177, -0.16993072413762755, -0.131416299
, -0.04009519454953398, -0.05313675620475547, -0.04666596927941701, 0.01791407935369984, 0.1457818266
81117519756409, 0.2933719785183527, 0.132846533714208, -0.010790944975535392, -0.08626205678419956, -

DATI

In un anno di osservazioni Virgo raccoglie oltre 1 PB di dati, equivalenti a 150 computer che trasmettono un film in streaming contemporaneamente. Si tratta non solo dell'output del rivelatore, ma anche di un'enorme quantità di quelli che vengono chiamati "dati ausiliari". In ogni momento Virgo monitora l'ambiente circostante (attività sismica, attività umana, condizioni atmosferiche, moto ondoso) così da ottenere un quadro accurato delle condizioni ambientali al momento della rivelazione dei segnali gravitazionali.

Quando un'onda gravitazionale raggiunge Virgo il primo step di identificazione avviene tramite un algoritmo automatico, che riconosce il possibile segnale nei dati. Questo produce un alert: viene attivato un team, che in pochi minuti valuta l'affidabilità della rivelazione. Se considerata valida, **una stima della posizione dell'evento che ha generato il segnale gravitazionale viene comunicata a una rete globale di telescopi sulla Terra e nello Spazio.** L'obiettivo è quello di dare la caccia ad altri segnali di natura diversa (principalmente elettromagnetica) emessi dallo stesso evento cosmico, come già avvenuto nella famosa osservazione multi-messaggera del 17 agosto 2017.



VUOTO,
LUCCE
SPECCHI



Le torri di Virgo, dove si trovano gli specchi e i loro superattenuatori, sono in uno stato detto di ultra-alto vuoto, **la cosa più vicina al vuoto assoluto esistente sulla Terra, con una pressione residua di circa 10^{-9} millibar, simile a quella dello spazio profondo.**

Questa ardua impresa tecnologica permette di evitare che la contaminazione da polveri rovini le delicate componenti di Virgo, e assicurarsi che il cammino della luce laser non venga deviato dalla presenza di aria e altre particelle.

I superattenuatori sono una tecnologia, appositamente realizzata dalla Collaborazione Virgo, con la quale è possibile attenuare di un fattore di oltre mille miliardi tutte le vibrazioni che potrebbero raggiungere gli specchi del rivelatore. Sono costituiti da una **lunga catena di pendoli e da una serie di sensori e controlli attivi, regolati da un sofisticato sistema elettronico.** A questi straordinari attenuatori sono sospesi, tramite sottilissime fibre di vetro, gli specchi ultrapiatti su cui si riflette il laser. Le fibre, spesse meno di mezzo millimetro, sono realizzate con lo stesso materiale utilizzato per i substrati degli specchi (silice fusa), per ridurre al minimo la dissipazione meccanica. La loro realizzazione e la sospensione degli specchi richiede una tecnologia ad hoc.

pag. 26

Scienziato di Virgo al lavoro sullo specchio della cavità mode cleaner, che 'pulisce' il laser prima che entri nell'interferometro

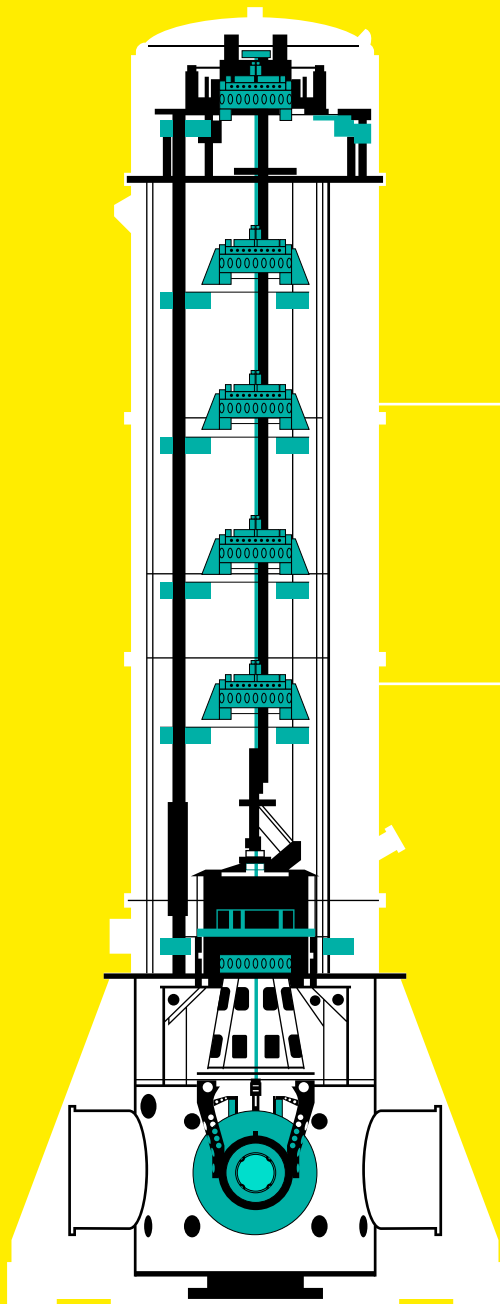
pag. 28

Due ricercatrici nell'edificio centrale di Virgo, dove si trovano la maggior parte delle torri ad ultra-alto vuoto che ospitano gli specchi e i superattenuatori di Virgo

Infine, gli specchi del rivelatore sono oggetti unici costruiti (anche per LIGO) nel laboratorio Virgo di Lione, in Francia. Progettati per riflettere la luce infrarossa del laser, sono trasparenti alla luce visibile. **Sono cilindri di quarzo purissimo del peso di 42 kg, ai quali è stato applicato un rivestimento di $7\ \mu\text{m}$ (0,0007 cm) per riflettere il 99,9999% della luce.**

Per evitare la dispersione del fascio luminoso, la superficie dello specchio deve essere perfettamente piana, con una precisione pari a una dozzina di atomi.

SFIDE TECNOLOGICHE

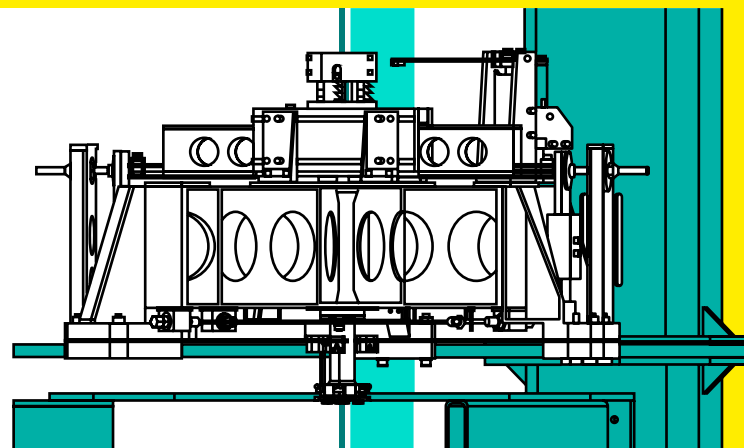


Superattenuatori e attenuazione del rumore

Attenuazione data dalle sospensioni: **un fattore 10^{12}**
numero di sensori ambientali: **oltre 1.000**

Vuoto

Volume: **7000 m^3**
Area: **23000 m^2**
Livello: **fino a 10^{-9} millibar**
N. Stazioni di pompaggio: **30**



Specchi

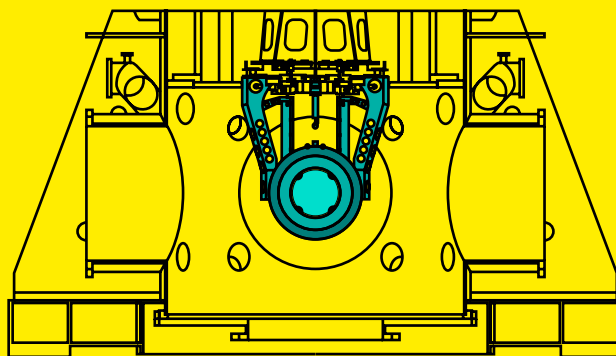
Peso: **40 kg**

Diametro: **35 cm**

Deformazioni
della superficie: **0.01 micron**

Percentuale
di luce riflessa: **99.9999%**

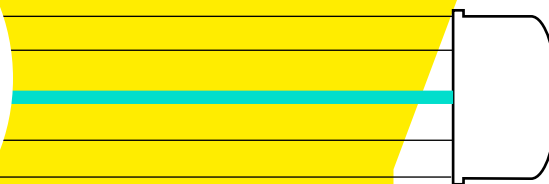
Spessore delle fibre
di vetro: **0.4 mm**



Laser

Potenza nei bracci
circa 90kW

km equivalenti
che percorre
un fotone: **900 km**





COIN
VOLGERE
LE
COMU
NITÀ



L'Osservatorio Gravitazionale Europeo e la Collaborazione Virgo sono costantemente impegnati in iniziative rivolte al grande pubblico, su scala locale, nazionale e internazionale. L'area dell'esperimento è accessibile al pubblico regolarmente due volte a settimana ed è divenuta negli ultimi anni **una delle principali mete di turismo scientifico in Italia, arrivando ad ospitare oltre 10.000 visitatori l'anno provenienti da tutto il mondo.**

Un canale di comunicazione privilegiato è quello con i giovani: studenti di ogni età vengono in visita o scoprono la ricerca di Virgo in conferenze-spettacolo, mostre o festival. In questi contesti, per coinvolgere tutti i tipi di pubblico, EGO ha creato **installazioni interattive e multimediali, giochi di ruolo e perfino un van**, che gira l'Europa portando il racconto delle onde gravitazionali nelle strade e nei quartieri più periferici: la Big Bang Machine.

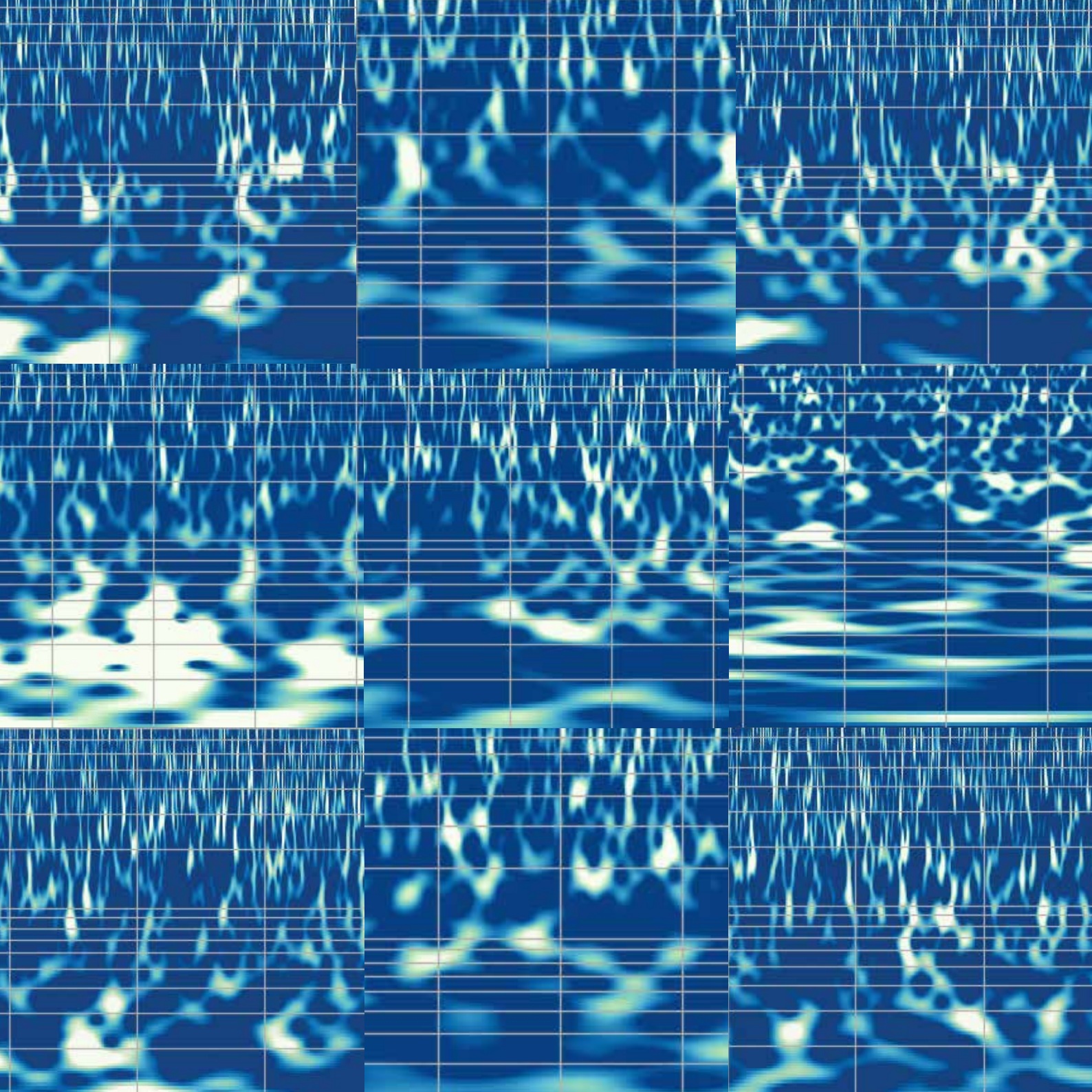
Un'altra strada che abbiamo esplorato per raccontare la scienza è quella del dialogo, e talvolta della vera e propria fusione, con l'arte. Numerosi artisti e artiste, anche di fama internazionale, si sono ispirati alla magia delle onde gravitazionali: Virgo è stato protagonista di grandi mostre d'arte, opere di land art, elaborazioni musicali, spettacoli teatrali e molto altro.

pag. 32

Un gruppo di visitatori durante
l'Open Day di EGO

pag. 34

Giulia Perelli e Amedeo Balbi
durante l'evento "La Musica
Nascosta dell'Universo" a EGO,
luglio 2025



Scopri
GWitchHunters:



SCIENZA PER TUTTE E TUTTI

Tutte e tutti, anche coloro che non hanno una formazione scientifica, possono contribuire alla ricerca delle onde gravitazionali. Infatti, EGO e Virgo hanno lanciato qualche anno fa un programma di citizen science che permette a chiunque, grazie a un'applicazione online (GWitchHunters), **di aiutare gli scienziati e le scienziate a isolare i segnali gravitazionali dai disturbi esterni o da quelli generati dell'interferometro stesso (i cosiddetti glitch).**

Dopo una breve sessione di formazione online, persone di tutte le età possono, come veri scienziati, aiutare a cancellare dai dati di Virgo i fastidiosi "disturbi" che potrebbero mascherare il segnale delle onde.

Un altro strumento attraverso cui è possibile accedere ai dati di Virgo in modo più immediato è la sonificazione, ovvero la loro trasformazione in suoni. In questo modo possiamo ascoltare, in un certo senso, l'eco di fusioni di buchi neri avvenute a milioni o miliardi di anni luce di distanza dalla Terra. **La sonificazione non solo ci offre l'esperienza di ascoltare i segnali cosmici, ma permette anche alle persone non vedenti di accedere ai dati scientifici.** Inoltre, può diventare uno strumento aggiuntivo per l'analisi dei segnali, che potrebbe aiutarci a cogliere aspetti e dettagli nascosti nei dati visualizzati su uno schermo. In futuro anche la caccia ai "rumori" che disturbano l'interferometro potrebbe essere più uditiva che visuale.

pag. 36

Una visualizzazione
dei glitch del rivelatore
Virgo, come appaiono
nell'app di citizen science
Gwitchhunters



IL
FUT
URO



L'era dell'astronomia gravitazionale è appena iniziata, e sono numerose le domande a cui potrebbe trovare risposta. **Conosciamo solo il 5% della materia nell'universo; la restante porzione è composta di materia oscura ed energia oscura, la cui natura è completamente ignota.** Studiare i buchi neri e scoprire cosa avviene durante gli eventi più violenti del cosmo ci fornirà preziose informazioni per indagare questi enigmi e altri legati all'origine e all'evoluzione dell'Universo.

I rivelatori LIGO, Virgo e KAGRA continueranno ad essere migliorati fino ai limiti della loro sensibilità, ma nel frattempo sono già iniziati i lavori per progettare e realizzare i loro discendenti, gli interferometri per onde gravitazionali di terza generazione. Quello che verrà costruito in Europa si chiamerà Einstein Telescope (ET), in onore del fisico che per primo teorizzò l'esistenza delle onde gravitazionali.

ET avrà bracci circa cinque volte più lunghi di quelli di Virgo, verrà costruito sotto terra per minimizzare i disturbi dovuti ai rumori ambientali, e potrà sfruttare tecnologie ancora più innovative, grazie agli anni di ricerca e all'esperienza guadagnata con i rivelatori esistenti. Questo gli permetterà di raggiungere livelli di sensibilità ora impensabili, osservare segnali sempre più flebili e lontani, fino ad **ascoltare l'eco gravitazionale della origine stessa dell'universo, il Big Bang.**

Il luogo più "silenzioso" e già naturalmente vuoto per un grande interferometro gravitazionale è però lo Spazio. Per questo motivo, **la missione dell'Agenzia Spaziale Europea LISA (Laser Interferometer Space Antenna) sarà un gigantesco rivelatore spaziale di forma triangolare.** La luce laser viaggerà nel vuoto dello spazio tra i suoi vertici, che orbitano intorno al Sole a una distanza di 2,5 milioni di chilometri l'uno dall'altro.

pag. 38
Scienziate e scienziati di Virgo nella sala di controllo del rivelatore

pag. 40
Il braccio ovest dell'interferometro Virgo (a destra) e il tunnel della cavità mode cleaner (a sinistra), che pulisce il laser prima che entri nell'interferometro

pag. 42-43
Scienziate di EGO e Virgo vestite con le tute usate per entrare nelle torri ad ultra-alto vuoto e nelle camere pulite di Virgo





L'Osservatorio Gravitazionale Europeo è un consorzio di:



Virgo fa parte della collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA



Crediti fotografici

© Enrico Sacchetti, pag. 2, 10, 26
© Maurizio Perciballi, copertina e pag. 4
© Lorenzo Roi, pag. 8
© Carl Knox OzGrav, pag. 14
© S. Ossokine, A. Buonanno (Max Planck
Institute for Gravitational Physics), Simulating
eXtreme Spacetimes project, D. Steinhauser
(Airborne Hydro Mapping GmbH), pag. 16
© Massimo d'Andrea/EGO, pag. 20, 32, 34, 40
© Marco Pinarelli, pag. 22, 28, 38, 42, 43

Crediti grafici

© Federica Grigoletto, pag. 12-13, 30-31
© Cristina Chiappini e Lavinia Cozza, pag. 6

www.ego-gw.it
www.virgo-gw.eu

Facebook EGO & The Virgo Collaboration
Instagram @egovirgo_waves, @ligo_virgo
X @ego_virgo
Bluesky @ego_virgo

Progetto grafico e impaginazione
Cristina Chiappini e Lavinia Cozza

Copywriting
EGO Communication

Stampato
nel 2025 da Tipografia Ograro, Roma
