Il futuro dell'osservazione di Onde Gravitazionali con l'Einstein Telescope (ET)

F. Frasconi – INFN Pisa

Dieci anni di Onde Gravitazionali

Dipartimento di Fisica,

Università di Pisa – 24 Settembre 2025

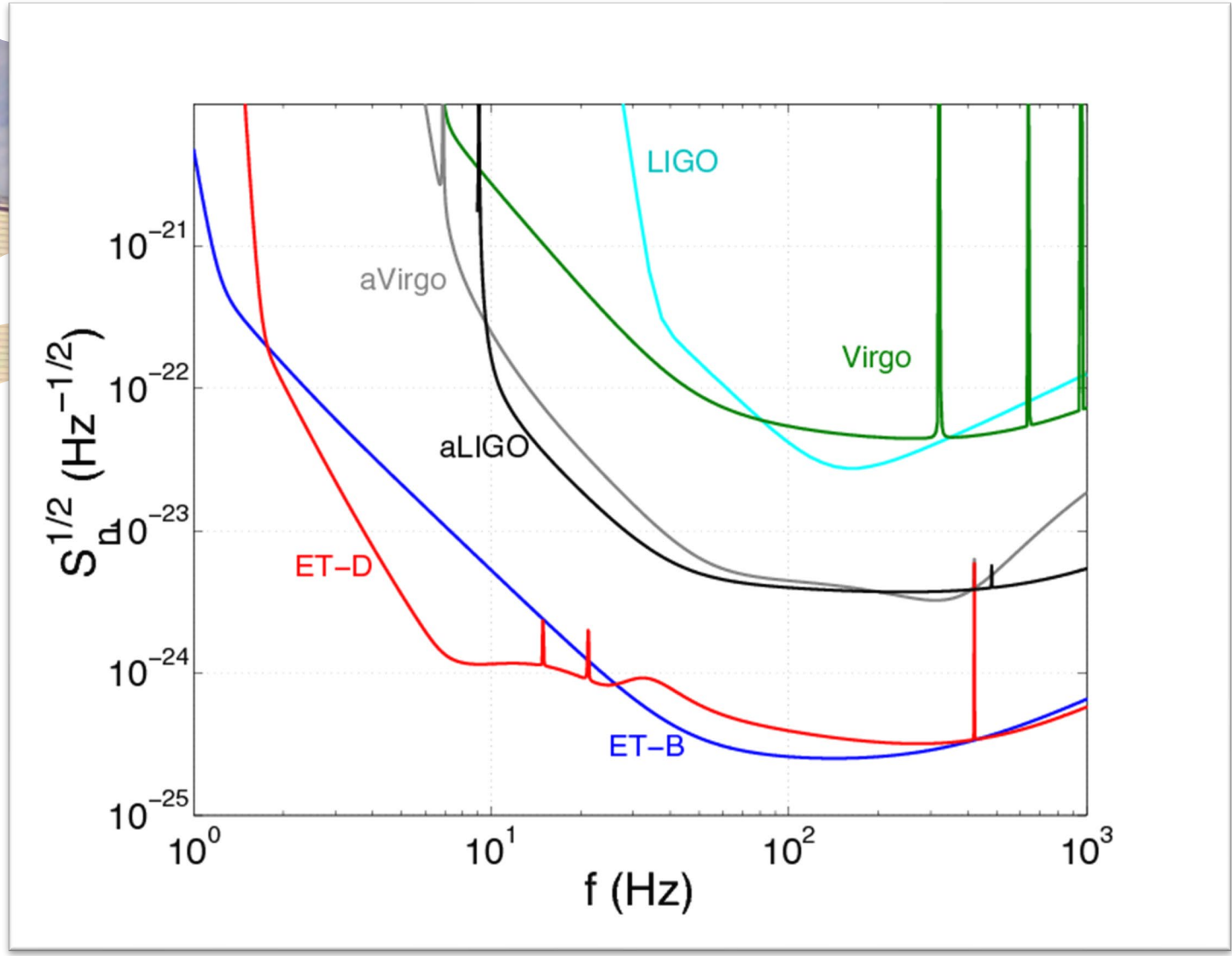
… riannodiamo i fili

Vista Aerea del laboratorio EGO con l'interferometro Advanced VIRGO rivelatore di Onde Gravitazionali di 2ª Generazione (2G)

Cosa è l'Einstein Telescope (ET) ?

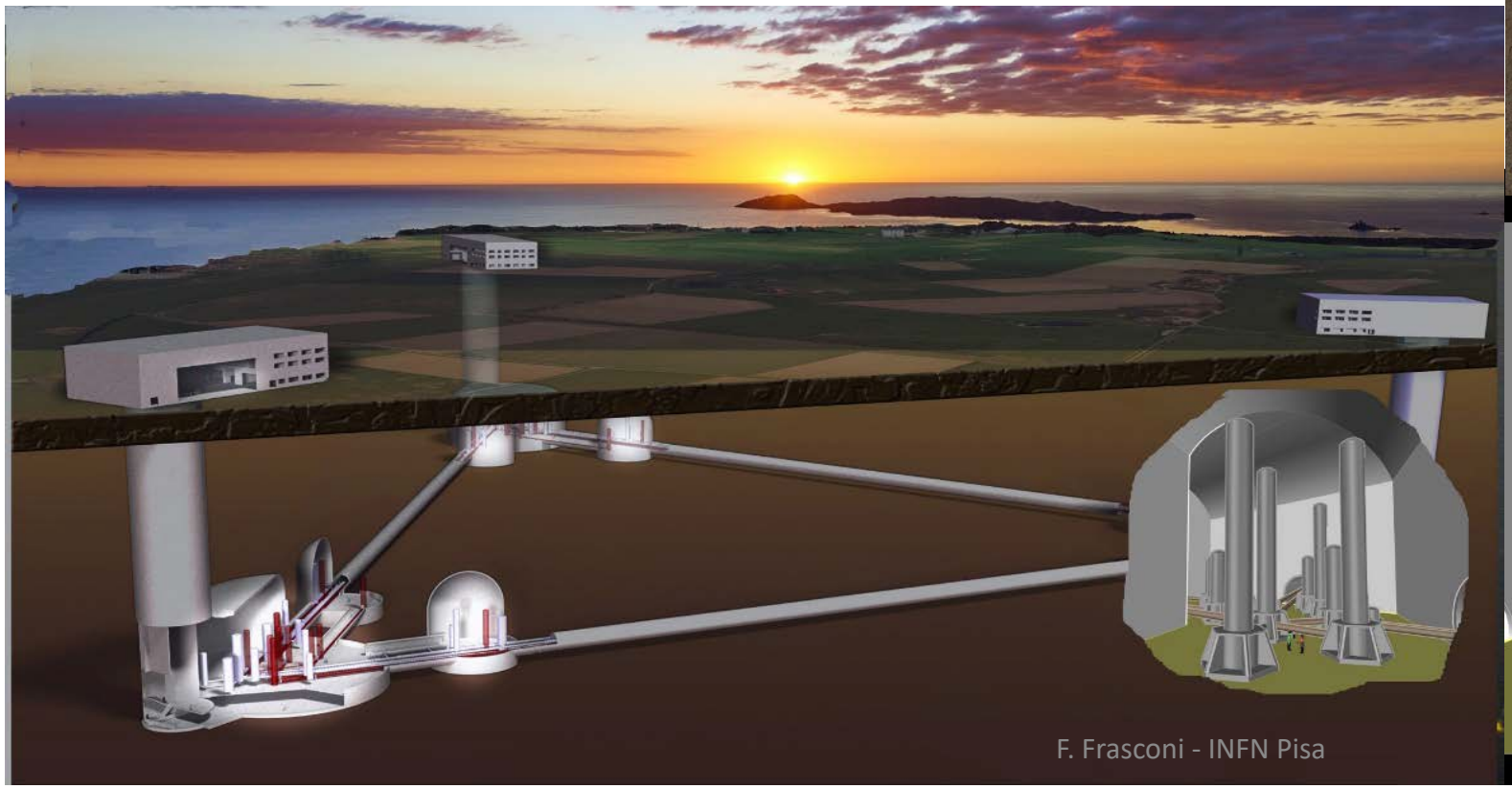
- ET è il progetto per la realizzazione in Europa della terza generazione (3G) di interferometri adibiti alla rivelazione e lo studio delle Onde Gravitazionali (GW) in un Osservatorio di Grandi Dimensioni (Giant Laboratory);
- E' una idea pionieristica (2011) che ha permesso di definire i concetti basilari per uno strumento 3G per la rivelazione di GW ancorato a terra e basato sull'interferometria laser:
  - Incremento della sensibilità di un fattore 10 rispetto a quella degli Advanced Detectors (2G) su di una larga porzione della banda di rivelazione;
  - Ampliamento della banda (di frequenza) di rivelazione possibilmente al di sotto di 5 Hz;
  - Alta affidabilità e migliorata capacità osservativa (elevato "duty cycle").
- ET ha una lunga e importante tradizione: è stata formata per prima la ET Community (ruolo fondamentale di EGO), ora si va verso un ET Project preliminare e (Giugno 2022) è stata formata la ET Scientific Collaboration (più di 80 Gruppi di Ricerca Europei).

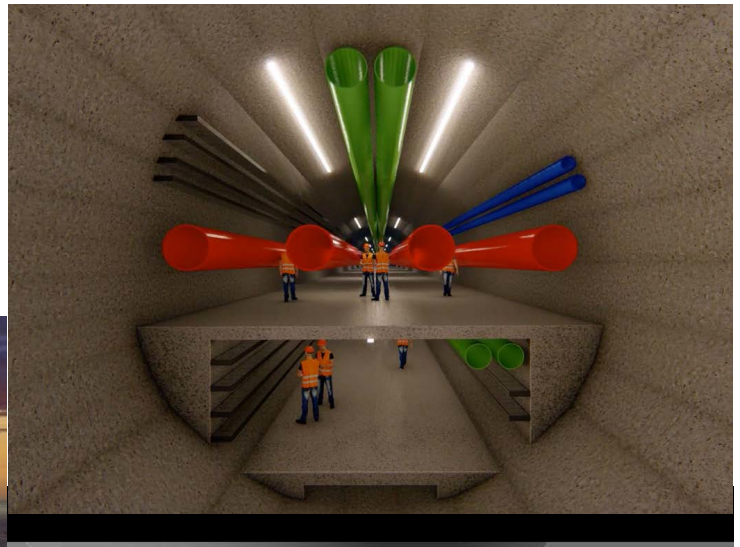
La Terza Genarazione di Detectors

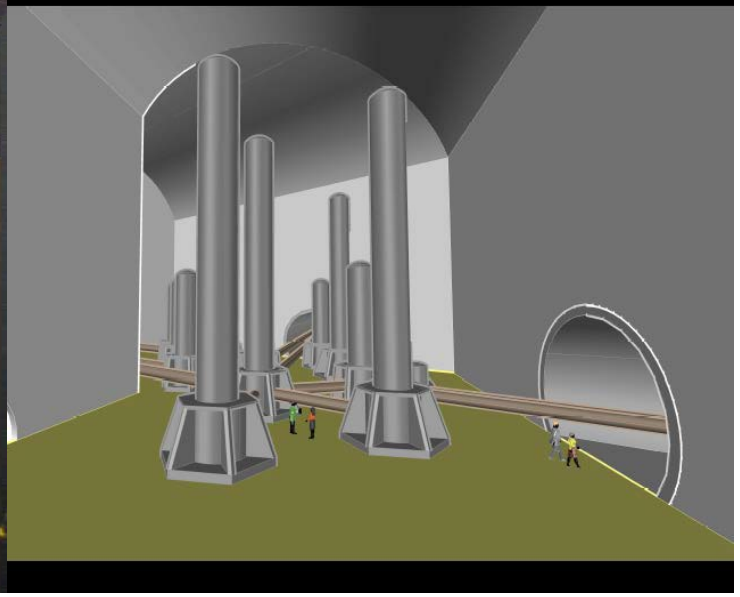


Il laboratorio Einstein Telescope

- La infrastruttura di ricerca ET è una laboratorio su "scala gigante" che ospiterà un interferometro sotterraneo con specchi a temperature criogeniche per la rivelazione delle Onde Gravitazionali (GW)





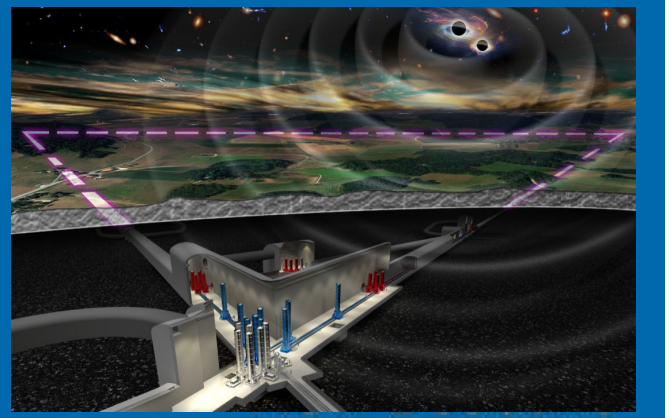


European Strategy Forum on Research Infrastructures

La Roadmap di ESFRI

ET ITALY Einstein Telescope

ESFRI ROADMAP 2021



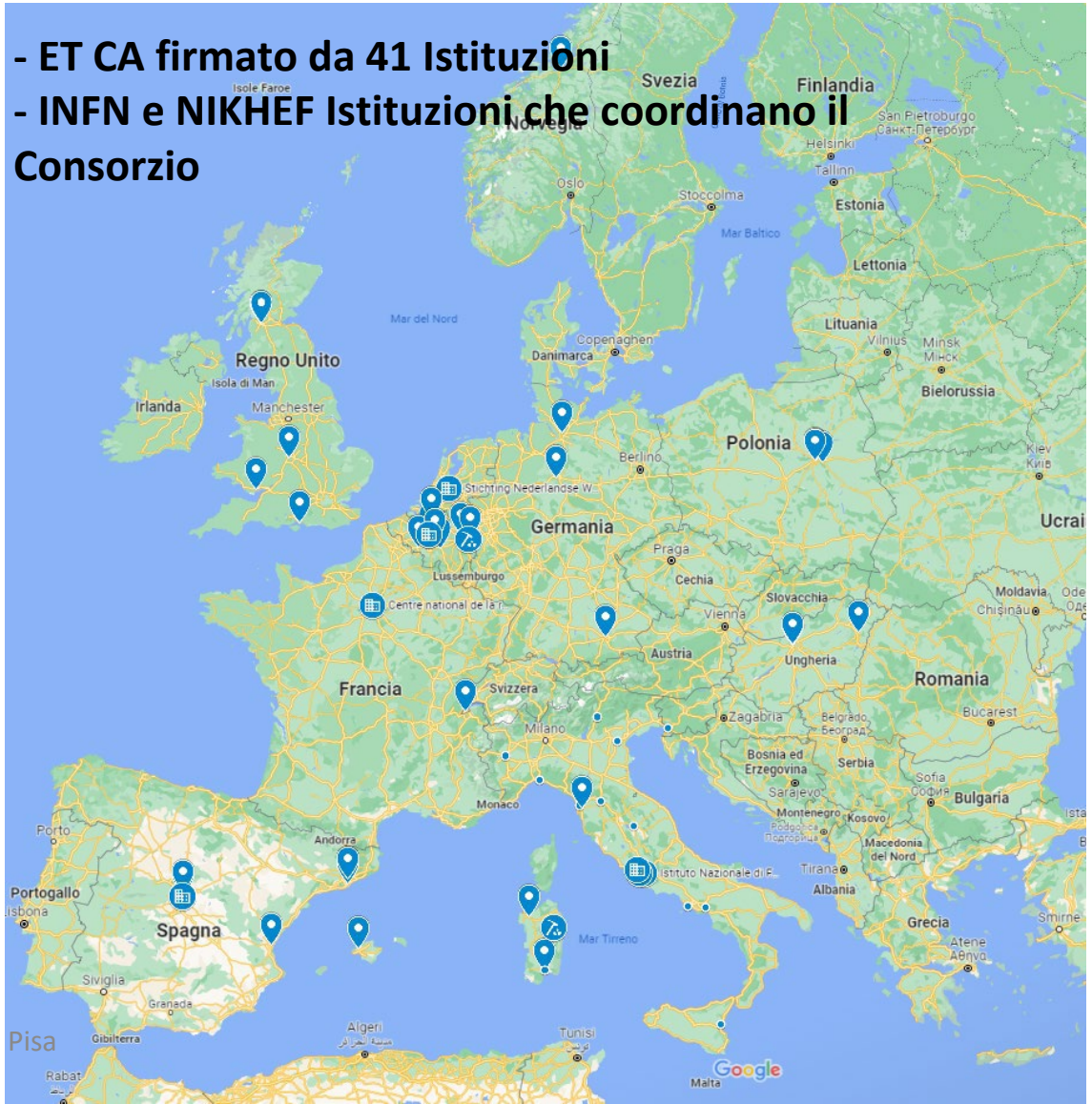
September 9th, 2020

Proposal sottomesso da :

- **Italy (Paese Leader)**
- Belgium
- Netherlands
- Poland
- Spain

Ora sono coinvolti nel Progetto e nella Collaborazione anche Agenzie e Istituti da: France, Germany, Hungary, Switzerland, UK

- ET CA firmato da 41 Istituzioni
- INFN e NIKHEF Istituzioni che coordinano il Consorzio



European Strategy Forum on Research Infrastructures

L'attività scientifica di ET in "pillole"

ET ITALY Einstein Telescope

ASTROPHYSICS

- **Black hole properties**
  - origin (stellar vs. primordial)
  - evolution, demography
- **Neutron star properties**
  - interior structure (QCD at ultra-high densities, exotic states of matter)
  - demography
- **Multi-band and -messenger astronomy**
  - joint GW/EM observations (GRB, kilonova,...)
  - multiband GW detection (LISA)
  - neutrinos
- **Detection of new astrophysical sources**
  - core collapse supernovae
  - isolated neutron stars
  - stochastic background of astrophysical origin

FUNDAMENTAL PHYSICS AND COSMOLOGY

- **The nature of compact objects**
  - near-horizon physics
  - tests of no-hair theorem
  - exotic compact objects
- **Tests of General Relativity**
  - post-Newtonian expansion
  - strong field regime
- **Dark matter**
  - primordial BHs
  - axion clouds, dark matter accreting on compact objects
- **Dark energy and modifications of gravity on cosmological scales**
  - dark energy equation of state
  - modified GW propagation
- **Stochastic backgrounds of cosmological origin**
  - inflation, phase transitions, cosmic strings

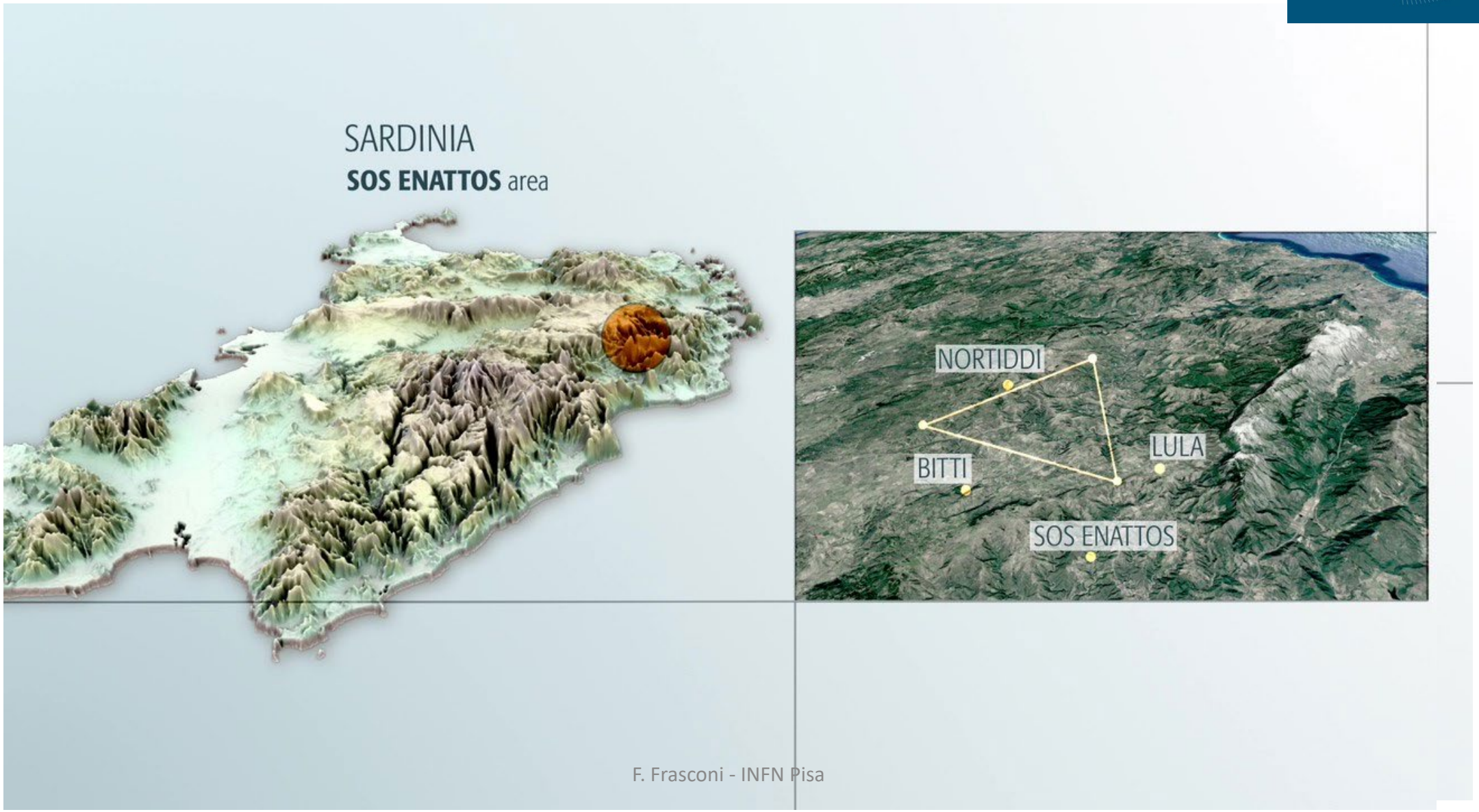
I siti che potrebbero ospitare ET

- Attualmente solo 2 siti in Europa sono candidati per poter ospitare l'ET Giant Laboratory:
  - Il sito **Sardo nella miniera di Sos Enattos – Lula (Nuoro)**;
  - Il sito Europeo EU Regio Rehine-Meusse vicino alla frontiera NL-B-D.
- Al momento una **terza opzione** è rappresentata da un'area della Lusatia **Sassonia (Germania)**, per il momento ancora al vaglio delle autorità Tedesche, per essere considerata una vera e propria candidatura.

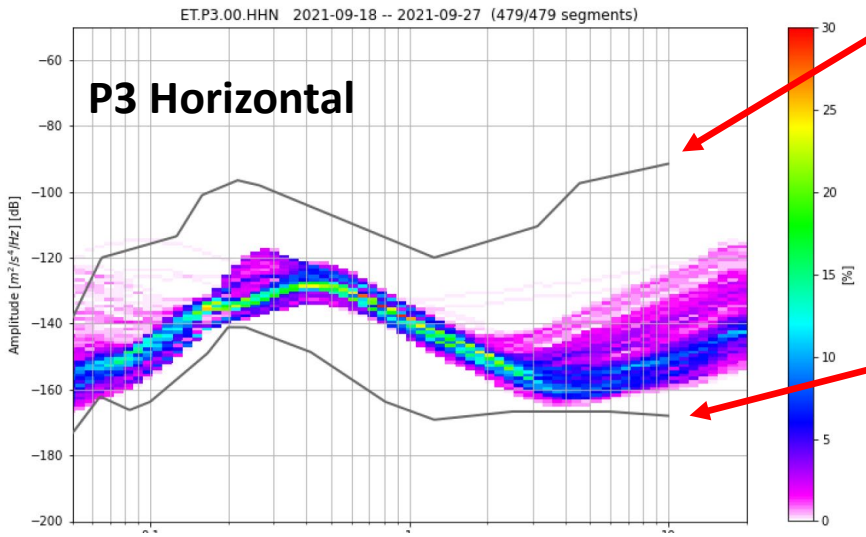
Il sito di Sos Enattos: caratterizzazione sismica

- Processo di caratterizzazione sismica della miniera inziato ormai da tempo. Campagna di caratterizzazione sistematica in uno dei vertici del triangolo, ancora in corso;
- Nucleo iniziale del laboratorio sotterraneo già attivo (SarGrav – esperimento Archimedes per lo sviluppo della sensoristica a bassa frequenza e basse temperature);
- Scavati due pozzi (P1 e P2 profondi circa 260 m) completamente equipaggiati con sensoristica sismica per monitoraggio puntuale del seismic noise (continua acquisizione dati);
- Investigazione & Studio dell'area selezionata Condotta anche in superficie da personale Internazionale: prime misure fatte in estate ed autunno 2021;
- Campagna di misure per la caratterizzazione sismica finanziata dalla Regione Sardegna e ora dai fondi Nazionali (vedi anche ETIC-PNRR).

Sos Enattos: il sito



Misure di Rumore Sismico @ Sos Enattos



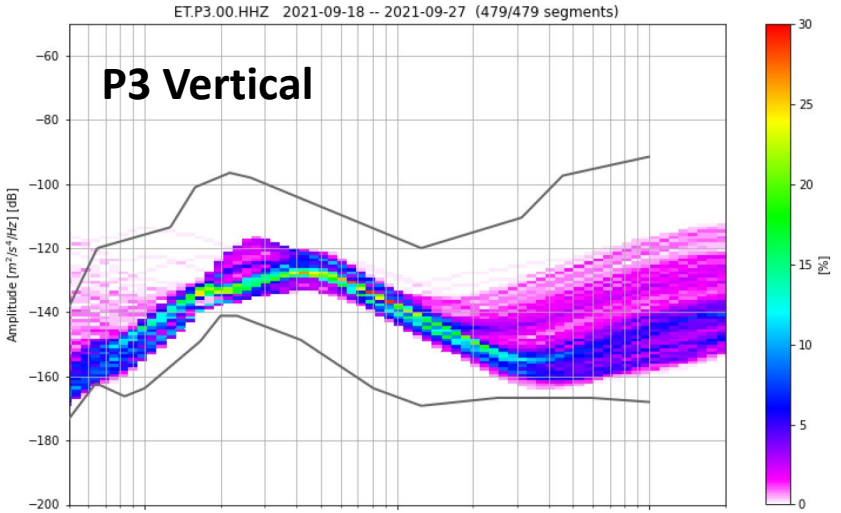
NHNM

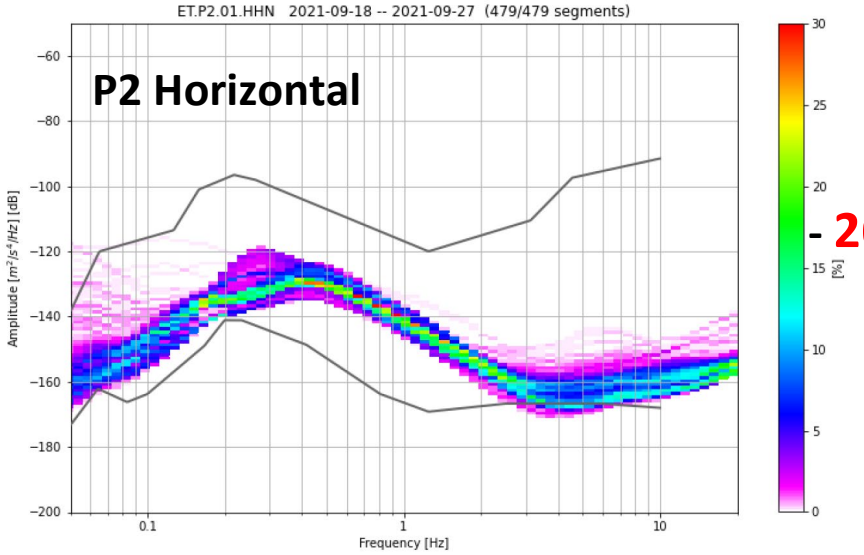
Superficie

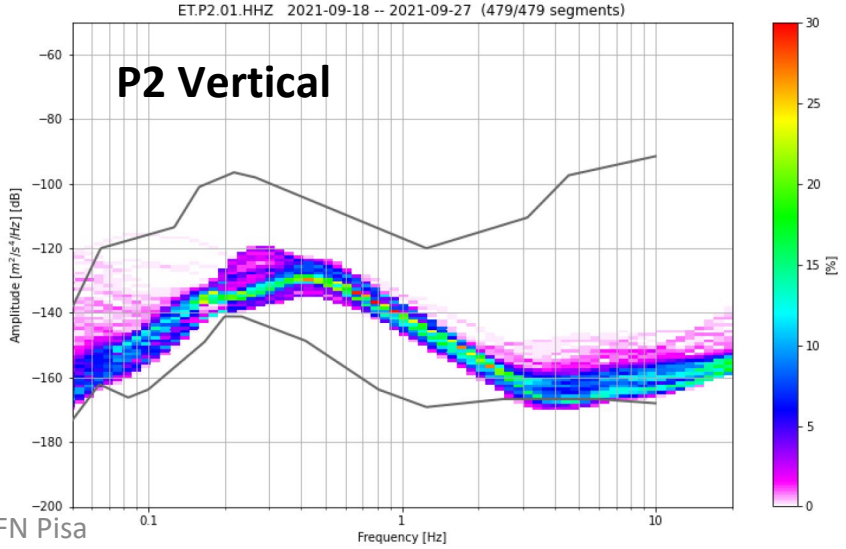
NLNM

Campagna di Misure Settembre 2021

- 264 m Profondità

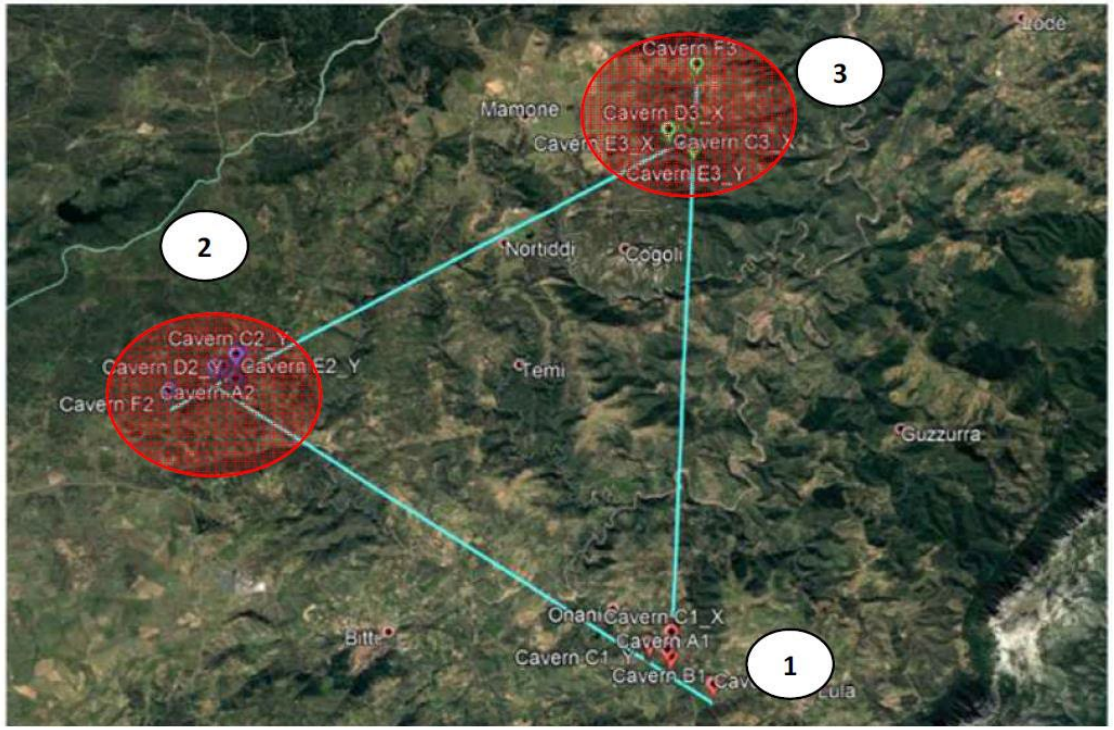




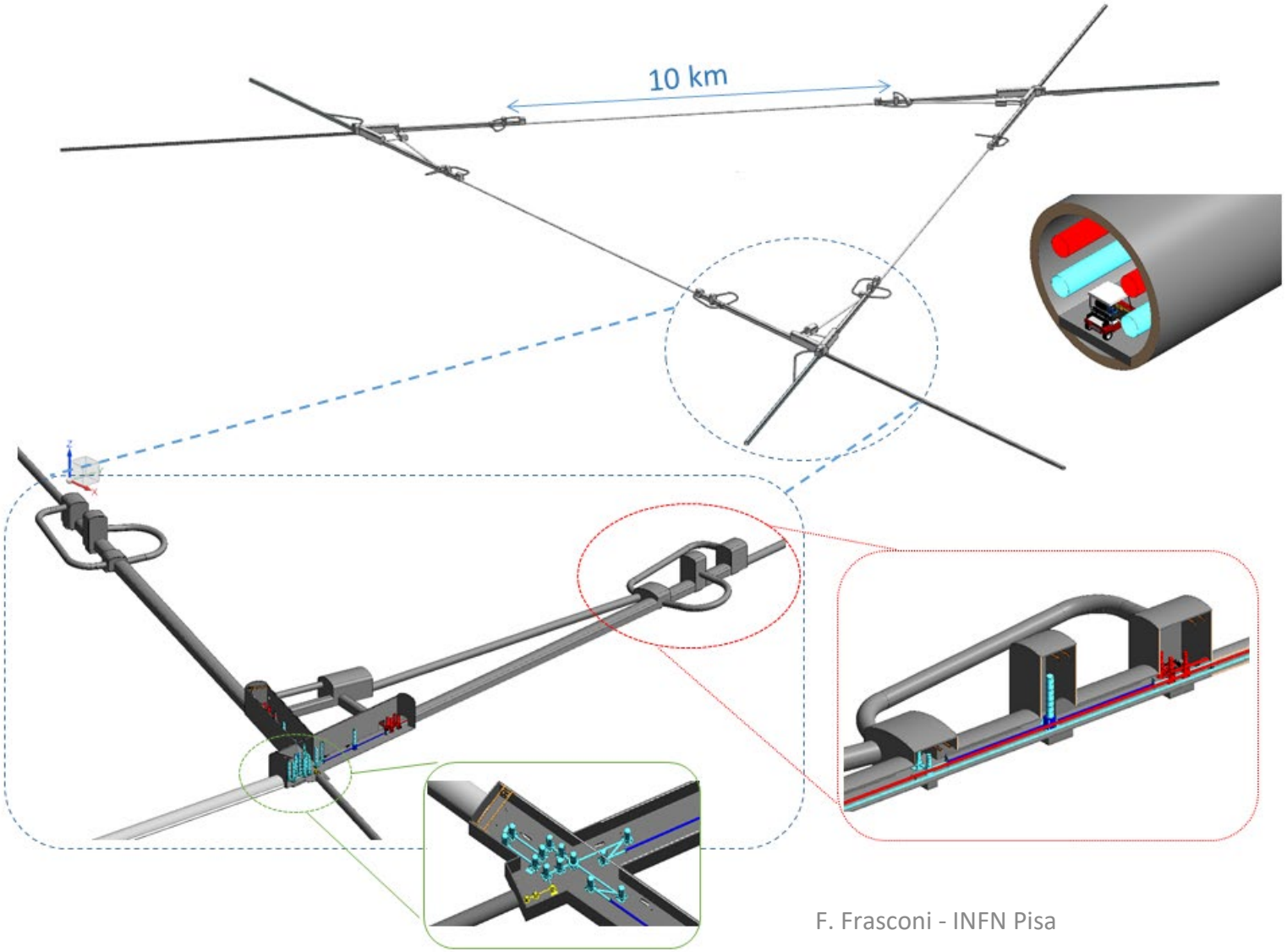


L'atttività sismica @ Sos Enattos

- I primi risultati delle misure sono molto buoni e incoraggianti: l'attenuazione del rumore sismico misurato nei pozzi strumentati con sismometri e sensori di vario tipo è evidente sopra 1 Hz, e in particolare nella banda 2-7 Hz, dove il rumore sismico attraversa le curve di Peterson (Peterson New Low Noise Model - NLNM).



ET: una Infrastruttura Sotterranea di grandi dimensioni

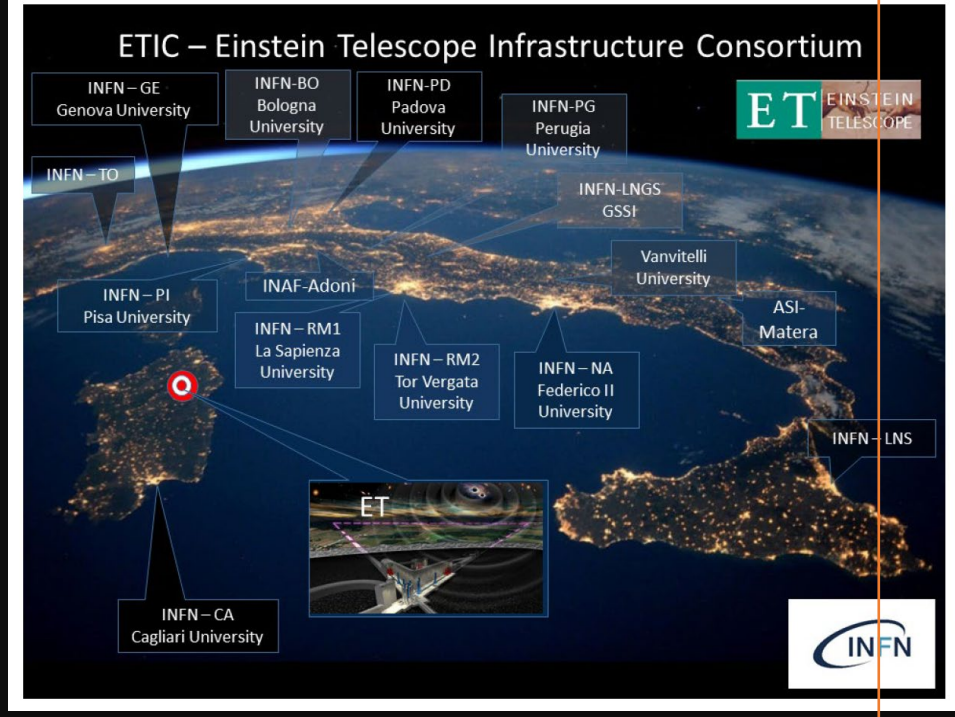


Geometria Triangolare o a forma di "L"?

Sfida Ingegneristica in molti aspetti costruttivi

Il progetto ETIC

- Il progetto **ETIC** ha come obiettivo principale quello di creare in Italia un network di infrastrutture di ricerca e laboratori, in grado di sviluppare ed implementare le tecnologie più all'avanguardia per realizzare l'**Einstein Telescope**;
- Progetto finanziato attraverso il PNRR per le Infrastrutture di Ricerca;
- **NGSA**: Progetto nato nell'ambito di una "Open Call" di CSN5 per lo studio e il miglioramento delle performance dei Superattenuatori di ET.



ET ITALY
Einstein Telescope

Nuove Sfide in Ottica (& Scienze dei materiali)

- ET-LF (Low-Frequency) richiede l'impiego di nuovi materiali per specchi di grandi dimensioni (fino a 500 mm di diametro) da utilizzare fino a temperature criogniche:

  Specchi in Silicio (Zaffiro): grandi dimensioni e geometrie diverse, problematiche di polishing superficiale, studio delle proprietà termo-meccaniche del materiale (Thermal Noise), proprietà ottiche (basso assorbimento), manipolazione e sospensione specchi in ambiente UHV;

  Nuovi Coatings ad alta riflettività: selezione di nuovi materiali, doping, nuove procedure per deposizione di films superficiali, impurità e difetti, proprietà termo-meccaniche e ottiche, problemi di invecchiamento;

  Nuovi Laser: gli attuali rivelatori di GW usano laser a 1064nm λ, ET-LF userà un laser a 1550nm (or ~ 2μm) λ;

  Nuova tecnologia Opto-elettronica: isolatori di Faraday, modulatori elettro-ottici, fibre ottiche, foto-sensori per strumenti a bassissimo rumore.

Nuove Sfide in Meccanica & Criogenia

- Il filtraggio del rumore sismico per ET richiede di migliorare la tecnologia utilizzata per gli strumenti di 2ª generazione (2G):

  - il filtraggio sismico sia attivo sia passivo dovrà essere più performante (efficiente) utilizzando nuove tecnologie e una catena di pendoli più compatta (impatto sul costo degli scavi).

- ET Criogenico:

  - grande sfida per la capacità richiesta di raffreddare le masse di test del peso di centinaia di kg senza disturbare l'interferometro e riducendo il più possible il tempo di raffreddamento (tempo morto);

  - sfida nell'ottimizzazione del disegno e della geometria del payload criogenico che dovrà essere compatibile con le basse temperature e le sue caratteristiche di funzionamento (selezione di materiali opportuni).

Nuove sfide su Sensori & Attuatori

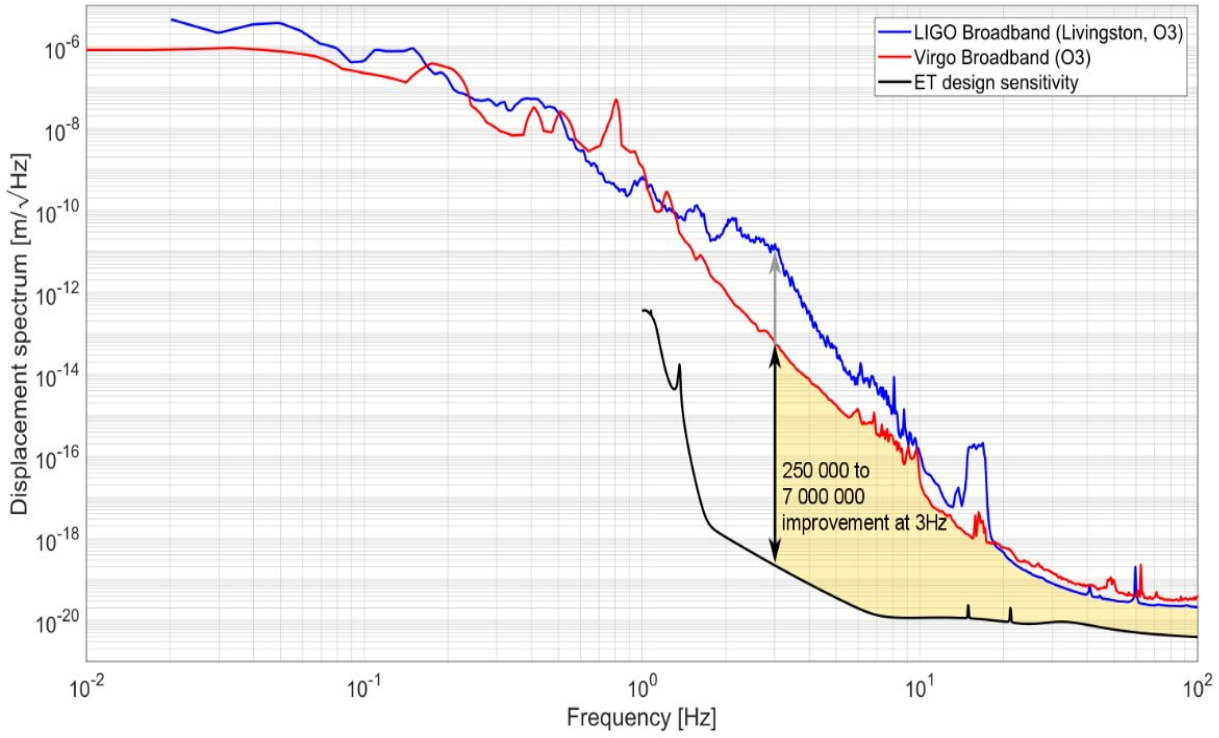
- Nella regione delle basse frequenze (ET-LF), le performance degli attuali rivelatori (2G) sono dominate dai "rumori tecnici"
- L'obiettivo scientifico più ambizioso per ET è legato proprio al miglioramento del detector nella zona delle basse-frequenze (LF). Sfortunatamente, la banda di rivelazione in bassa frequenza è quella in cui vengono utilizzati i controlli in feedback finendo per ri-iniettare i "rumori tecnici"
- Per ET abbiamo necessità di sviluppare:
  - sensori a bassa frequenza e basso rumore
  - nuove strategie di controllo (Machine Learning ?)
  - attuatori a bassa frequenza e basso rumore
  - un sistema efficiente per la compensazione termica delle ottiche
  - ottica adattiva sofisticata

New Generation Superattenuator (NGSA) for seismic noise suppression

Proposal to CSN5 "Open Call" R&D Program Third Generation Gravitational wave detector Einstein Telescope (ET) – Giant Laboratory
(started 2022; ending 2025)

Cosa fare per ET con NGSA

- Sensibilità in spostamento della 2ª generazione (2G) di rivelatori (O3 - Observation run 3) e curva di sensibilità di progetto per ET
- Estendere la banda di rivelazione nella zona delle basse frequenze intorno a 2 Hz, richiede un miglioramento rispetto agli attuali limiti sperimentali di oltre 5 ordini di grandezza



Obiettivi Scientifici di NGSA (dettaglio)

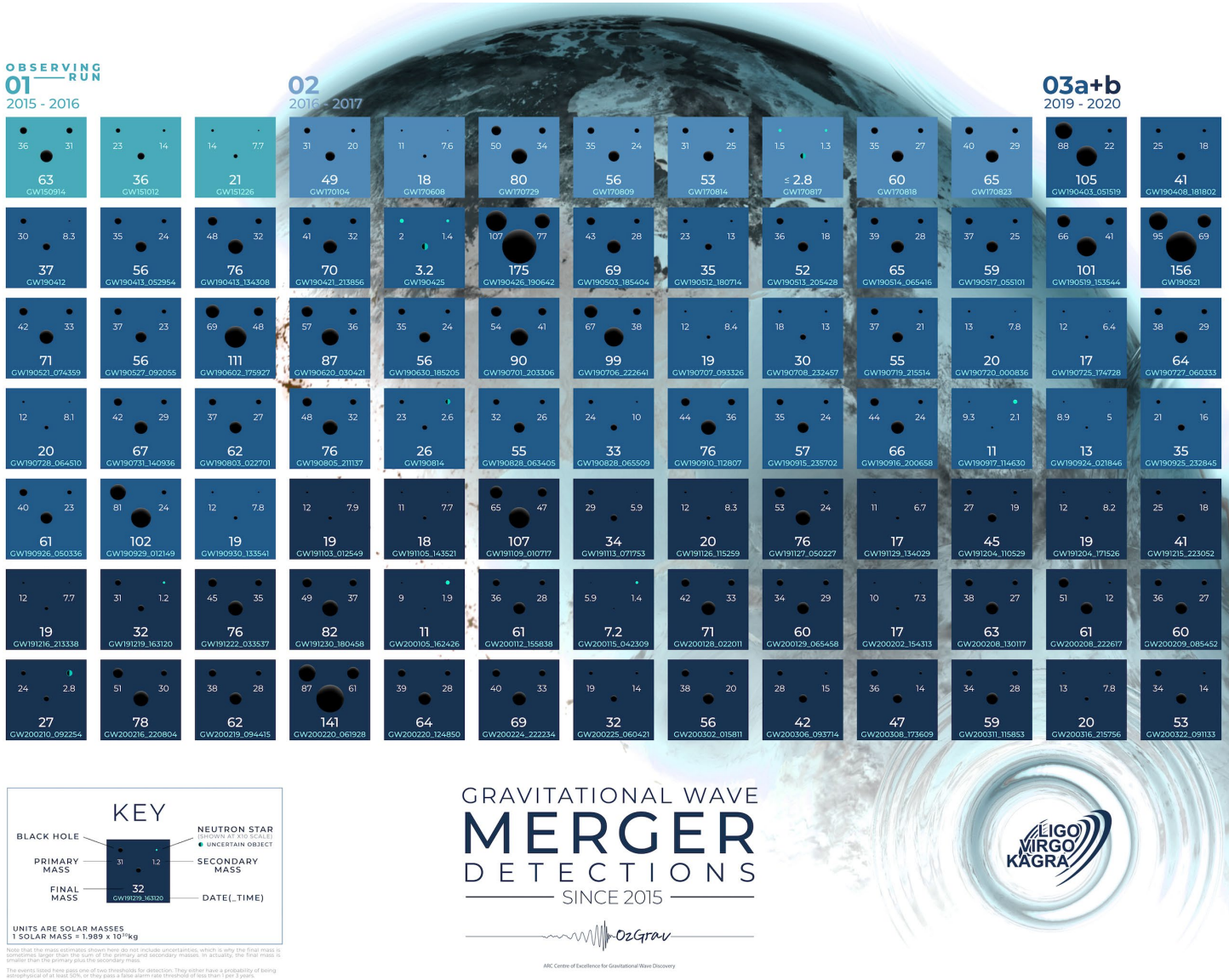
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di PISA

- Definire le linee guida per i futuri sistemi di isolamento sismico da estendere nella zona delle basse frequenze fino a 2 Hz: il rumore sismico è la sorgente di rumore dominante nella regione delle basse frequenze
- **Due diverse linee sperimentali :**

1. Basata **sulla struttura meccanica di AdV** (Pendolo Invertito, catena di Filtri meccanici, payload più pesante e mantenuto a temperature criogeniche) con l'intento di ottimizzare la distribuzione delle masse lungo la catena della sospensione, migliorare le performance di attenuazione verticale e mantenere la lunghezza totale della struttura meccanica intorno a 12 m
2. Basata sull'uso di un **Pendolo Invertito a due-stadi (NIP)**: chiari vantaggi dal punto di vista del sistema di pre-attenuazione orizzontale, ma il sistema non è mai stato utilizzato e apre molte questioni che necessitano studi approfonditi e di lunga durata(stabilità del sistema, controllo automatico, maggior accoppiamento dei gradi di libertà, …)

- **L'attuale sistema meccanico del SA (2G) è considerato comunque adatto ai requirements (richieste) scientifici dei rivelatori 3G (vedi ET Conceptual Design)**

… l'eredità che ci portiamo in dote



Considerazioni Finali

- La seconda generazione di rivelatori per GW è stata equipaggiata, seguendo l' esperienza di VIRGO, con sistemi complessi per isolare le ottiche dal rumore sismico:

  - la banda di rivelazione dei detector è stata estesa nella zona delle basse frequenze al di sotto di 100 Hz

  - migliorata la sensibilità di un fattore 10 con la possibilità di osservare un volume di Universo circa 1000 volte più grande;

- Fino ad oggi sono stati osservati **più di 90 segnali di GW** grazie alla aumentata sensibilità dello strumento:

- ruolo cruciale del Detectors Network per localizzare le sorgenti di GW nel cielo

- stimolata la ricerca della controparte e.m. inviando allerte a molti laboratori in tutto il Mondo (nuove frontiere nella ricerca di base);

- Gli obiettivi scientifici raggiunti e l'esperienza acquisita nel far funzionare questi strumenti complessi, rappresentano pietre miliari per il futuro dell' **Einstein Telescope Laboratory**.