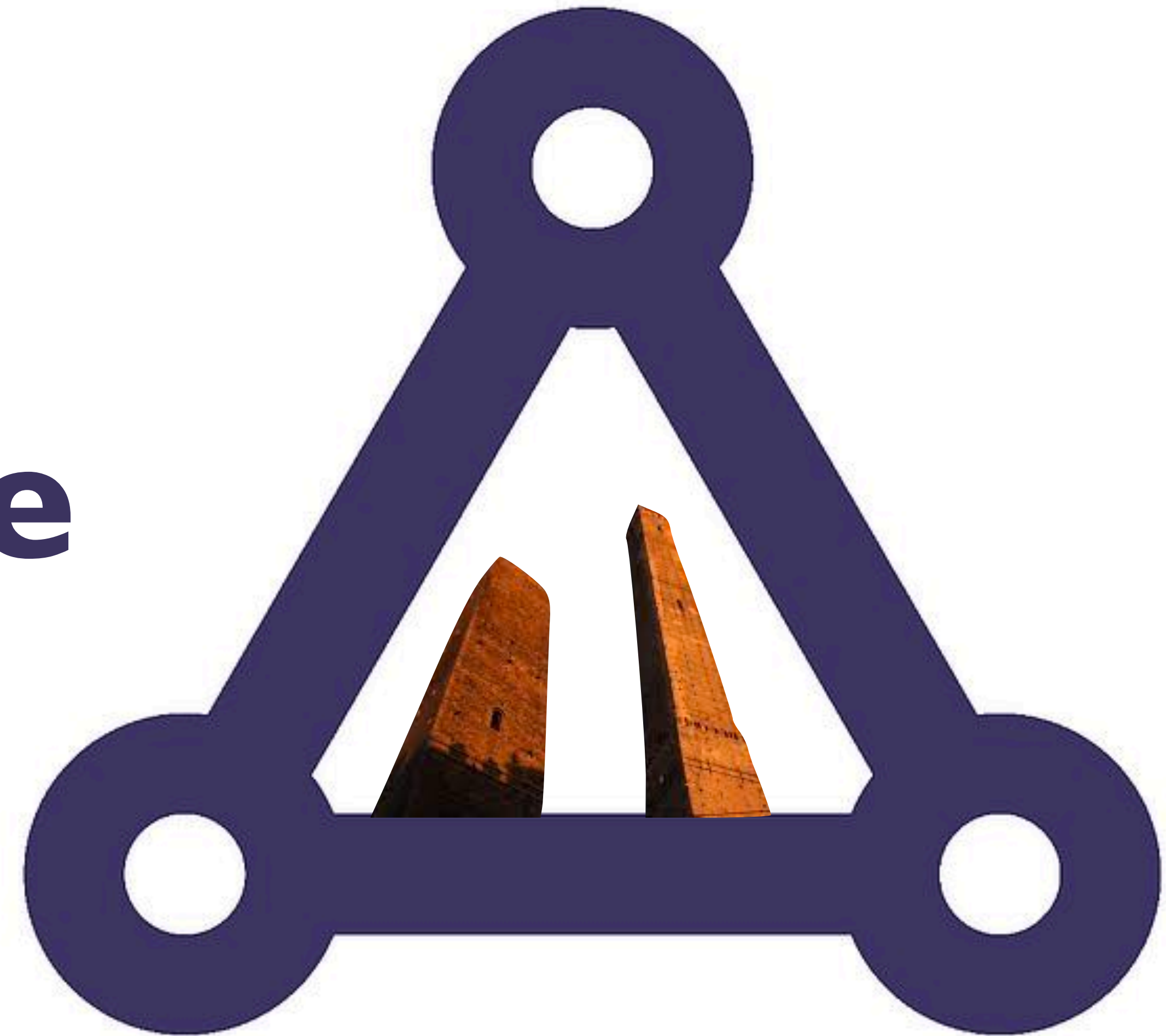


Einstein Telescope

A Bologna



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

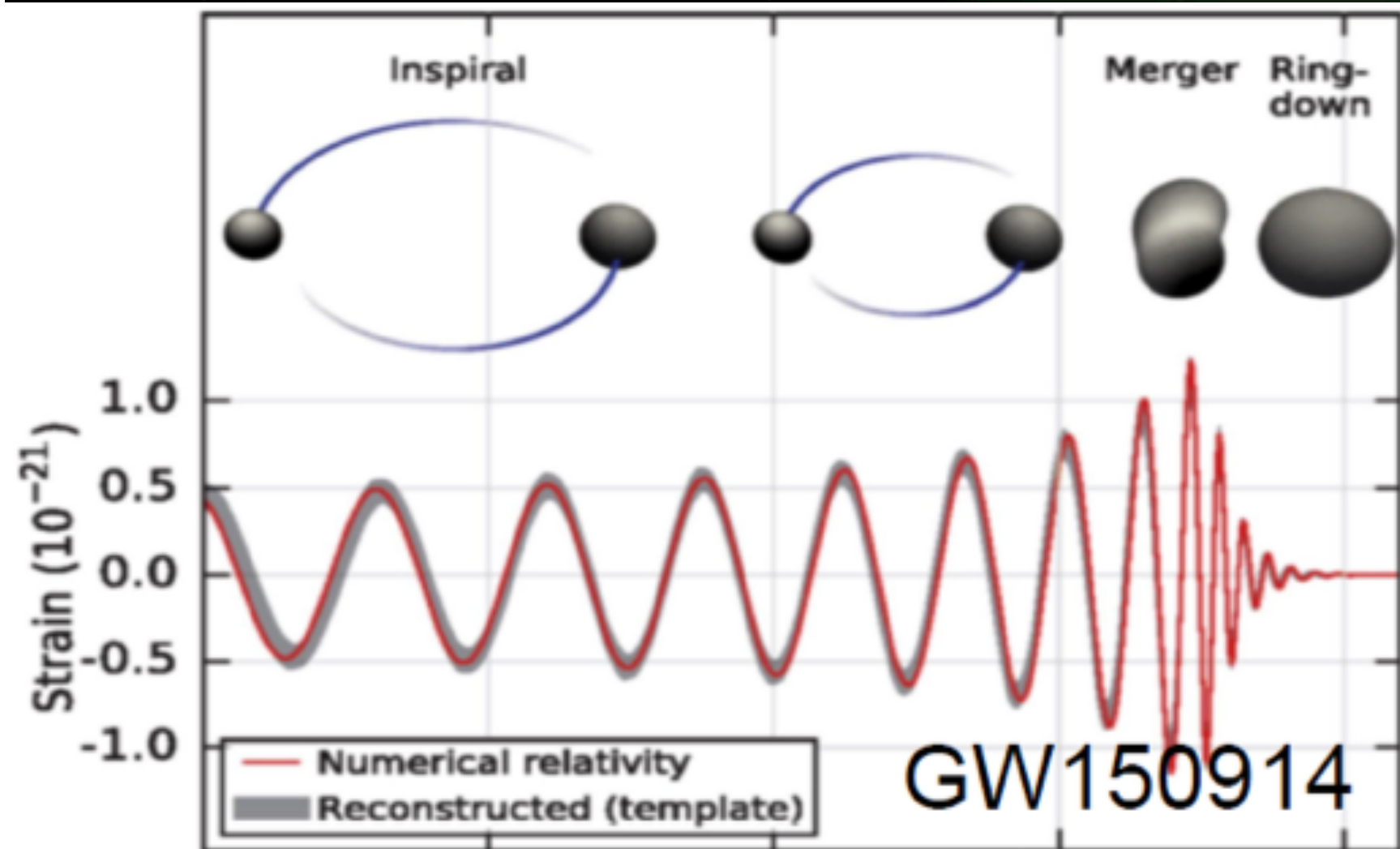
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$\square^2 h_{\mu\nu} = -16\pi G S_{\mu\nu}$$

$$\square^2 h_{\mu\nu} = 0$$

- 1916, **Albert Einstein**: pubblica la Teoria della Relatività Generale ([pdf](#))
- 1974, **Russel Hulse** e **Joseph Taylor**: mostrano l'evidenza indiretta di onde gravitazionali emesse da un sistema binario (con pulsar)
- 2015, **LIGO**: prima evidenza diretta di onde gravitazionali : GW150914 (*Phys. Rev. Lett.* 116, 061102)
- 2017, **LIGO + VIRGO** (+ 62 altre Collaborazioni - tra cui **ANTARES**): GW170817 - primo evento di astronomia multi-messaggera (*Astrophys.J.Lett.* 848 (2017) 2, L12)

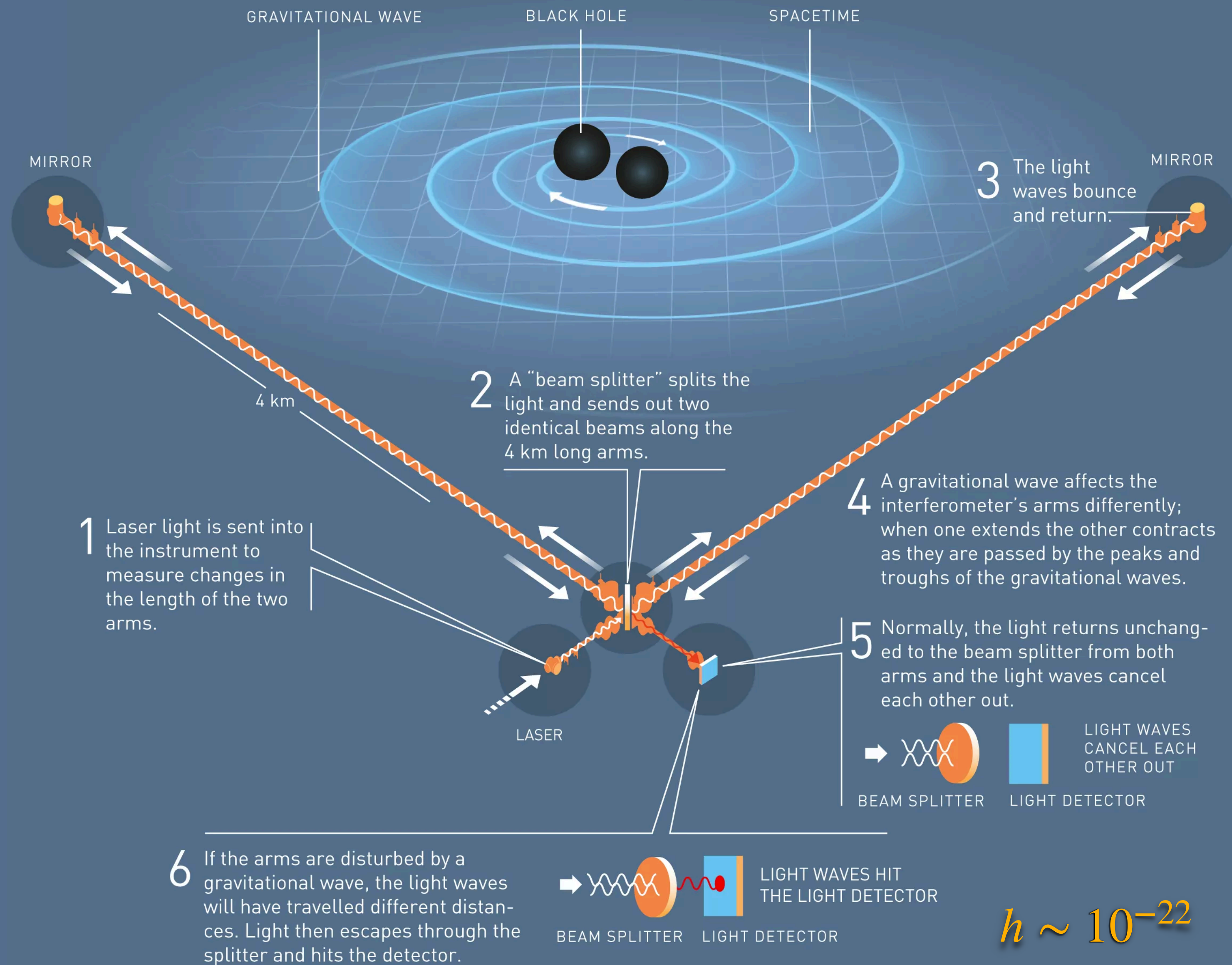
ESO/L. Calcada

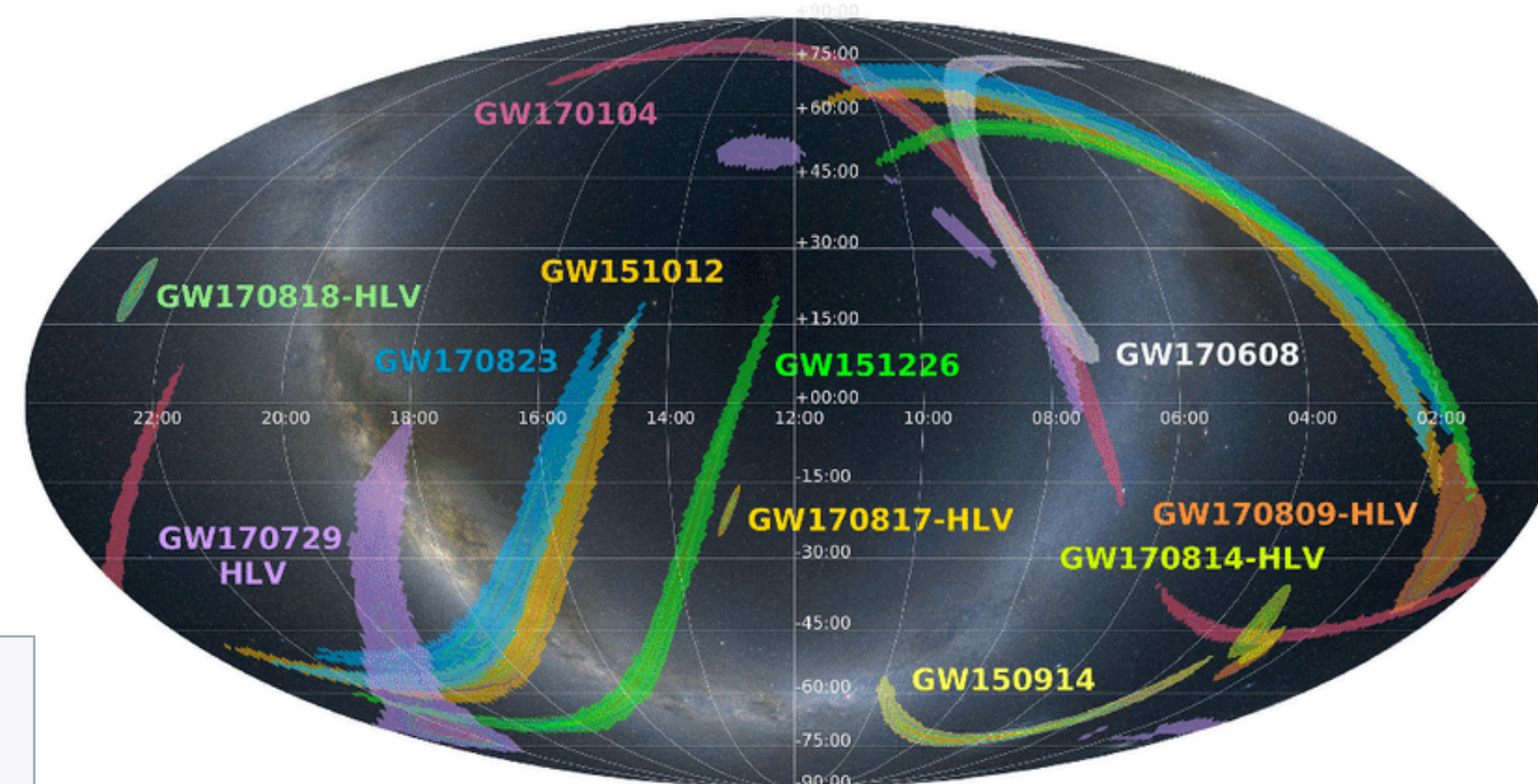
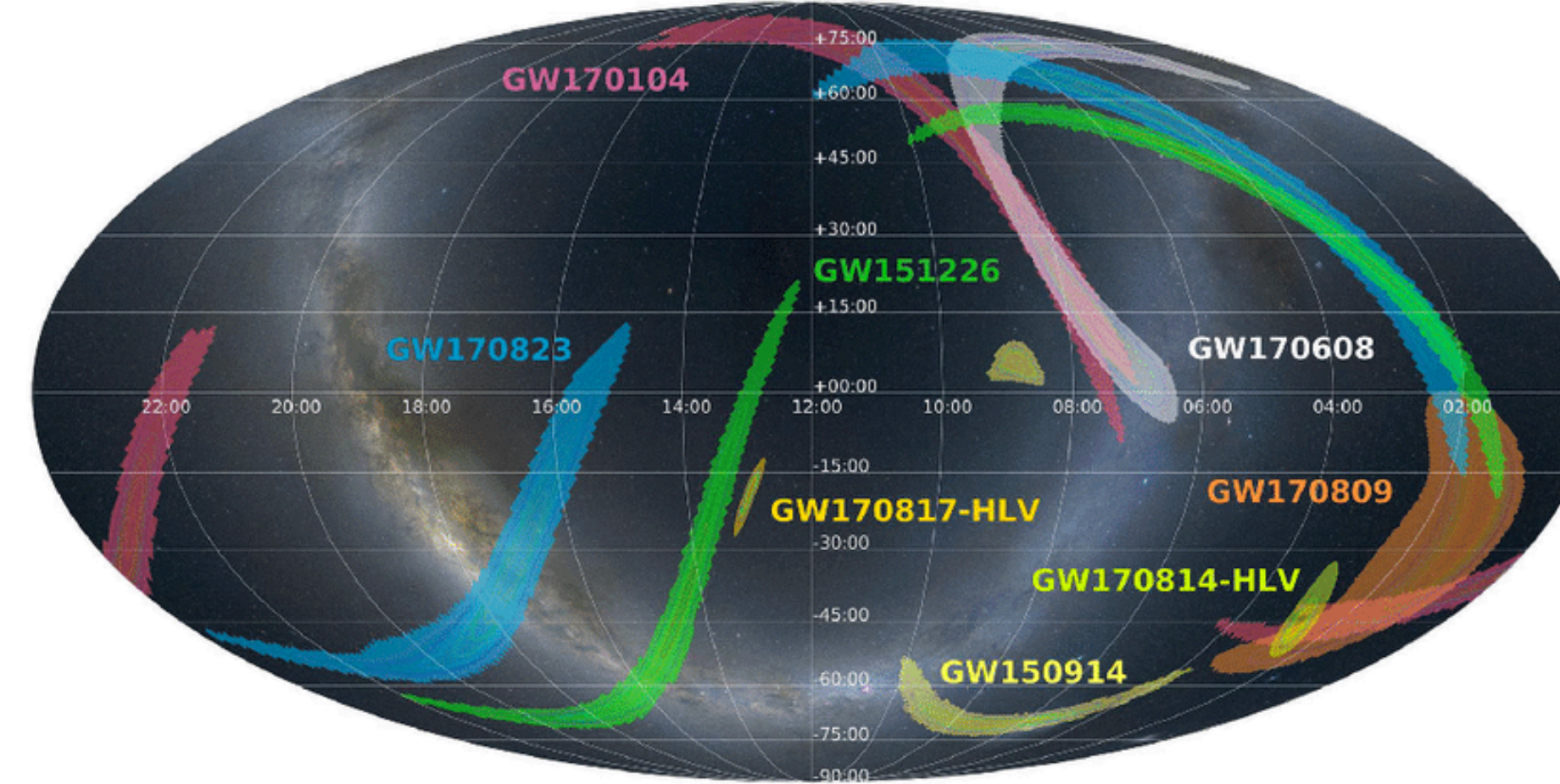


Consideriamo per assurdo
braccio: distanza **Terra-Proxima Centauri**:
4.2 anni luce ($3.9 \cdot 10^{16}$ m)

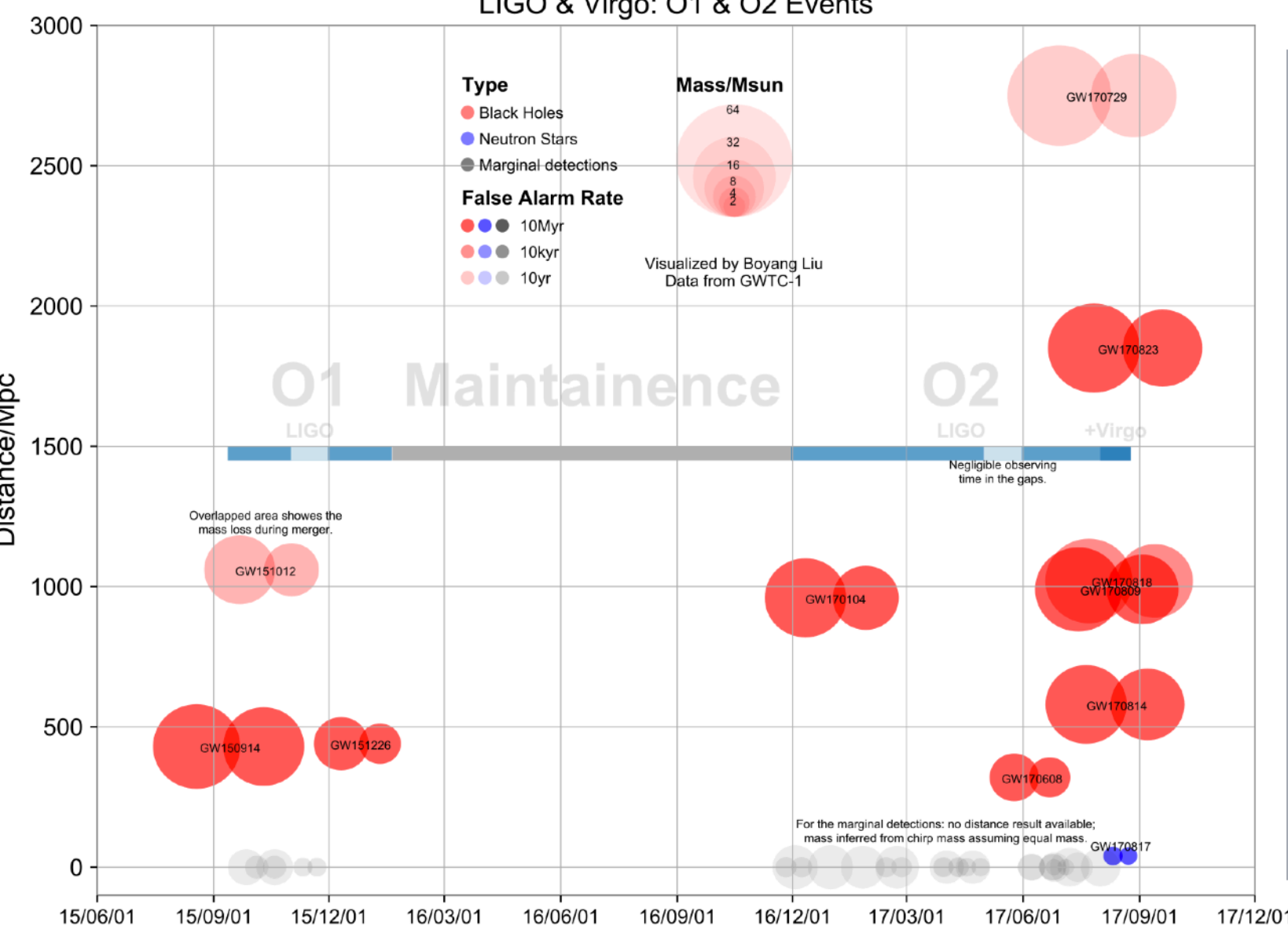
Variazione Braccio: **10 μ m**

A GIGANTIC INTERFEROMETER

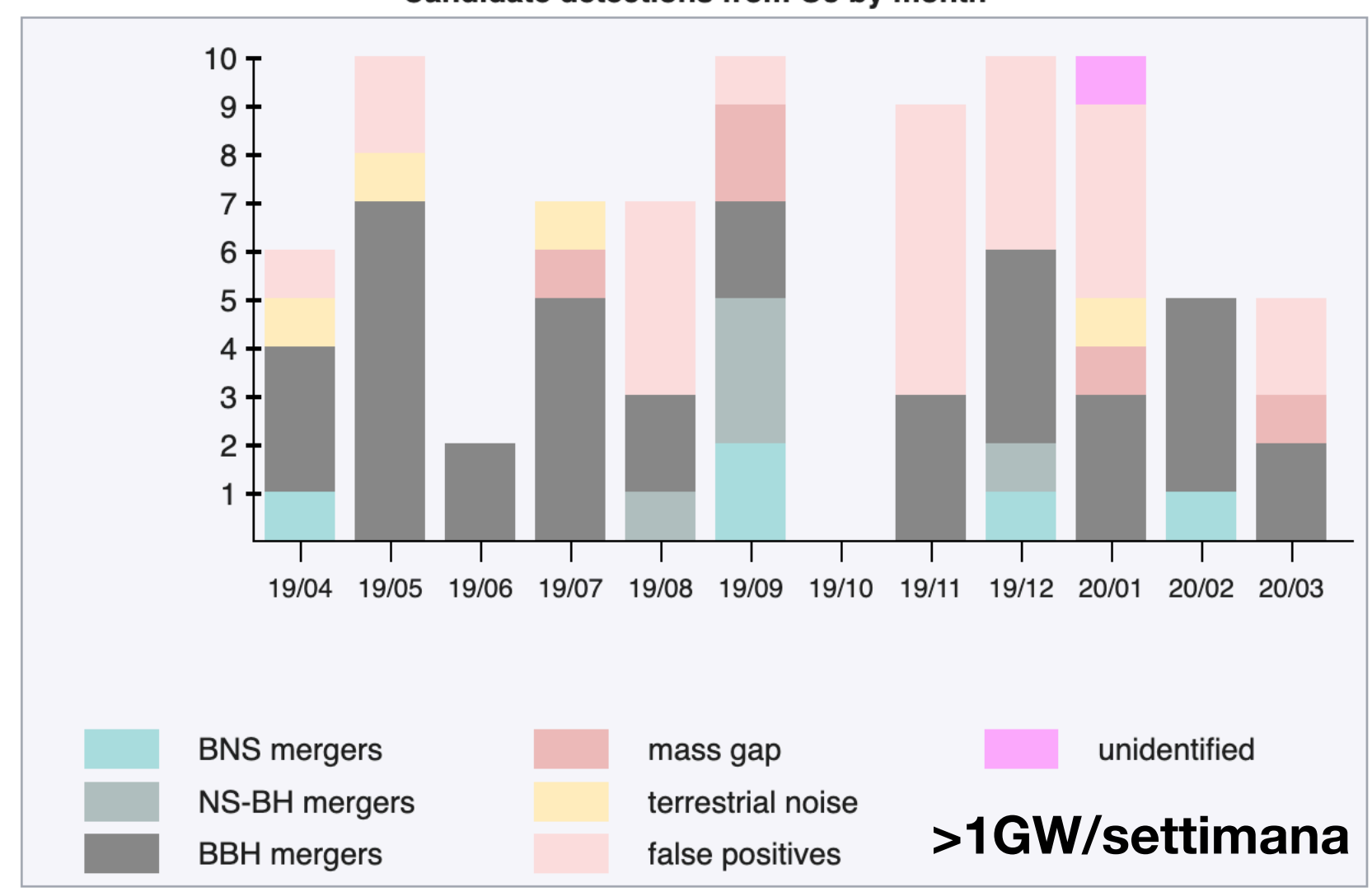




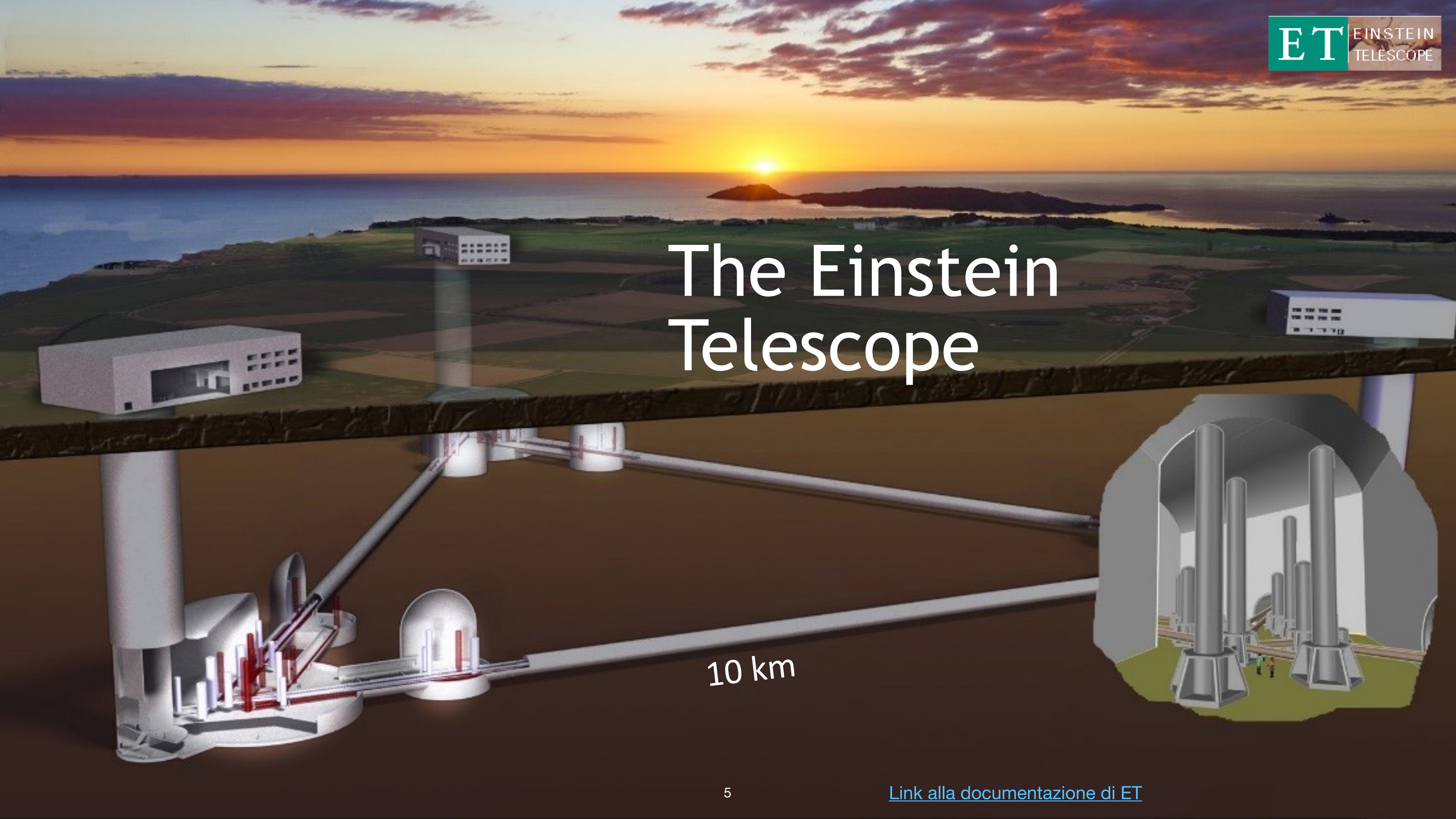
LIGO & Virgo: O1 & O2 Events



Candidate detections from O3 by month



The Einstein Telescope



10 km

Cos'è Einstein Telescope (ET) ?

ET è un progetto per la realizzazione di un Osservatorio GW di 3^a generazione.

Caratteristiche distintive:

- Aumento della sensibilità > 10x risp. telescopi attuali
- Aumento importante della sensibilità per basse frequenze O(1-10) Hz
- Aumento affidabilità e controllo del telescopio

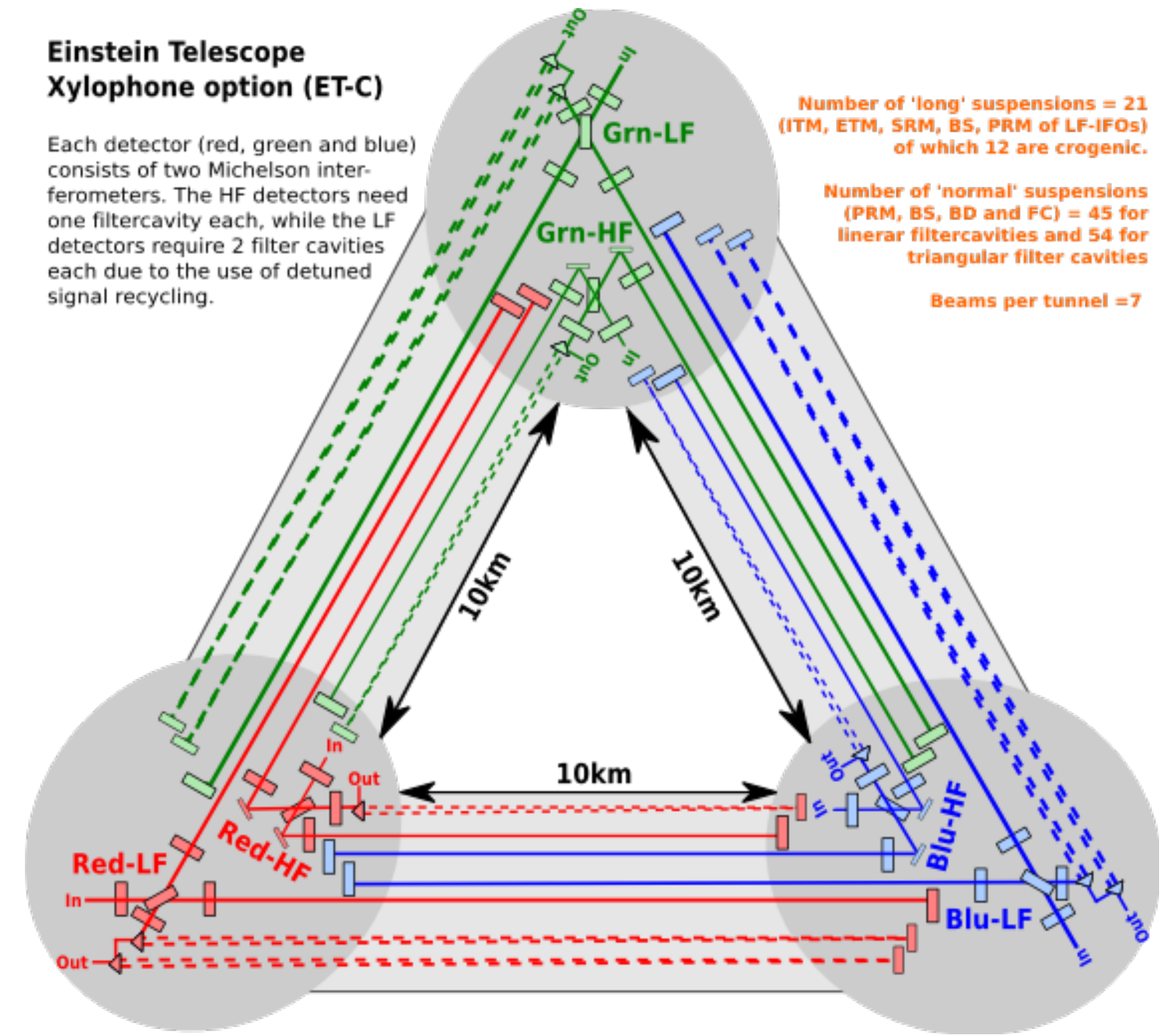
Einstein Telescope Xylophone option (ET-C)

Each detector (red, green and blue) consists of two Michelson interferometers. The HF detectors need one filtercavity each, while the LF detectors require 2 filter cavities each due to the use of detuned signal recycling.

Number of 'long' suspensions = 21 (ITM, ETM, SRM, BS, PRM of LF-IFOs) of which 12 are cryogenic.

Number of 'normal' suspensions (PRM, BS, BD and FC) = 45 for linear filtercavities and 54 for triangular filter cavities

Beams per tunnel = 7



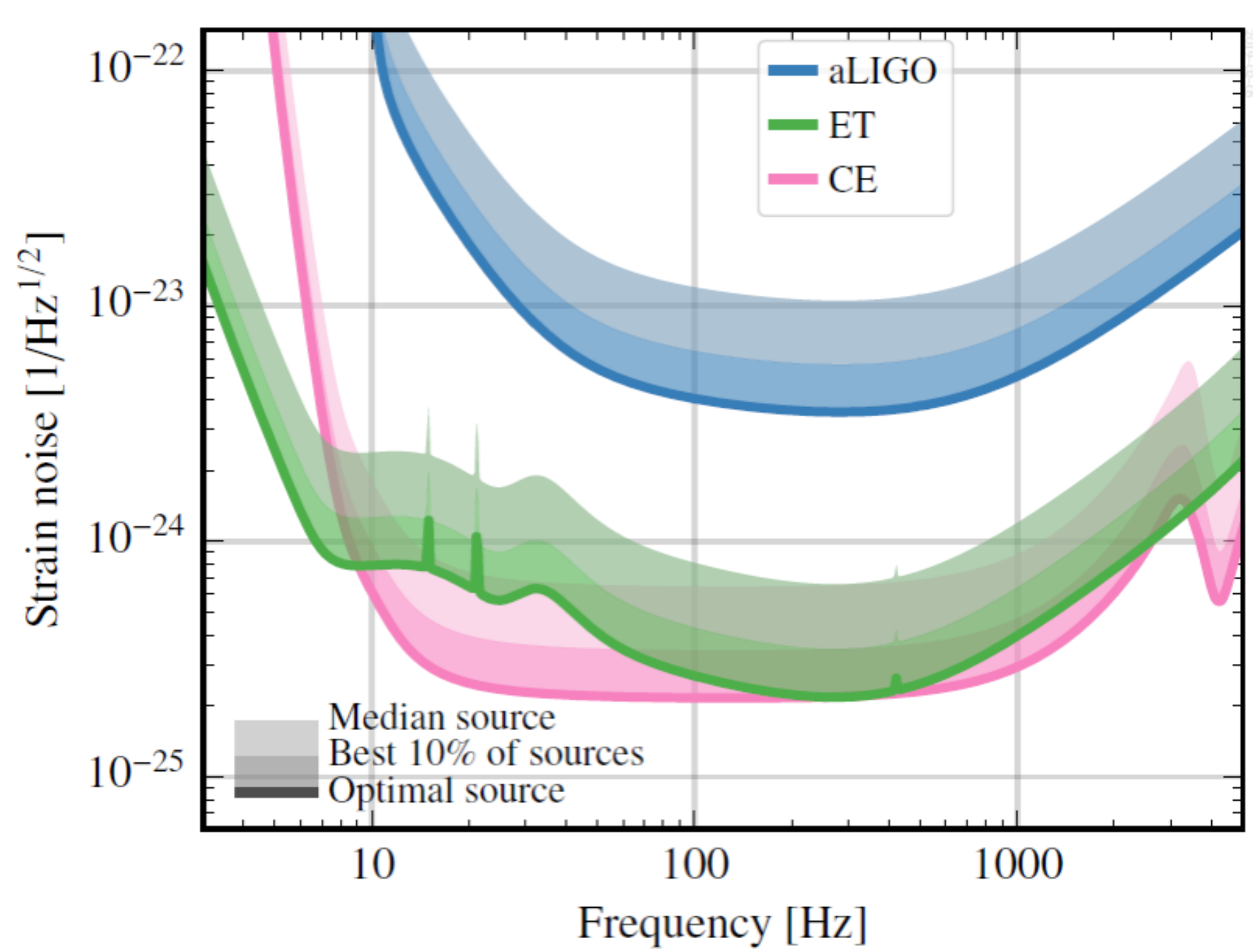
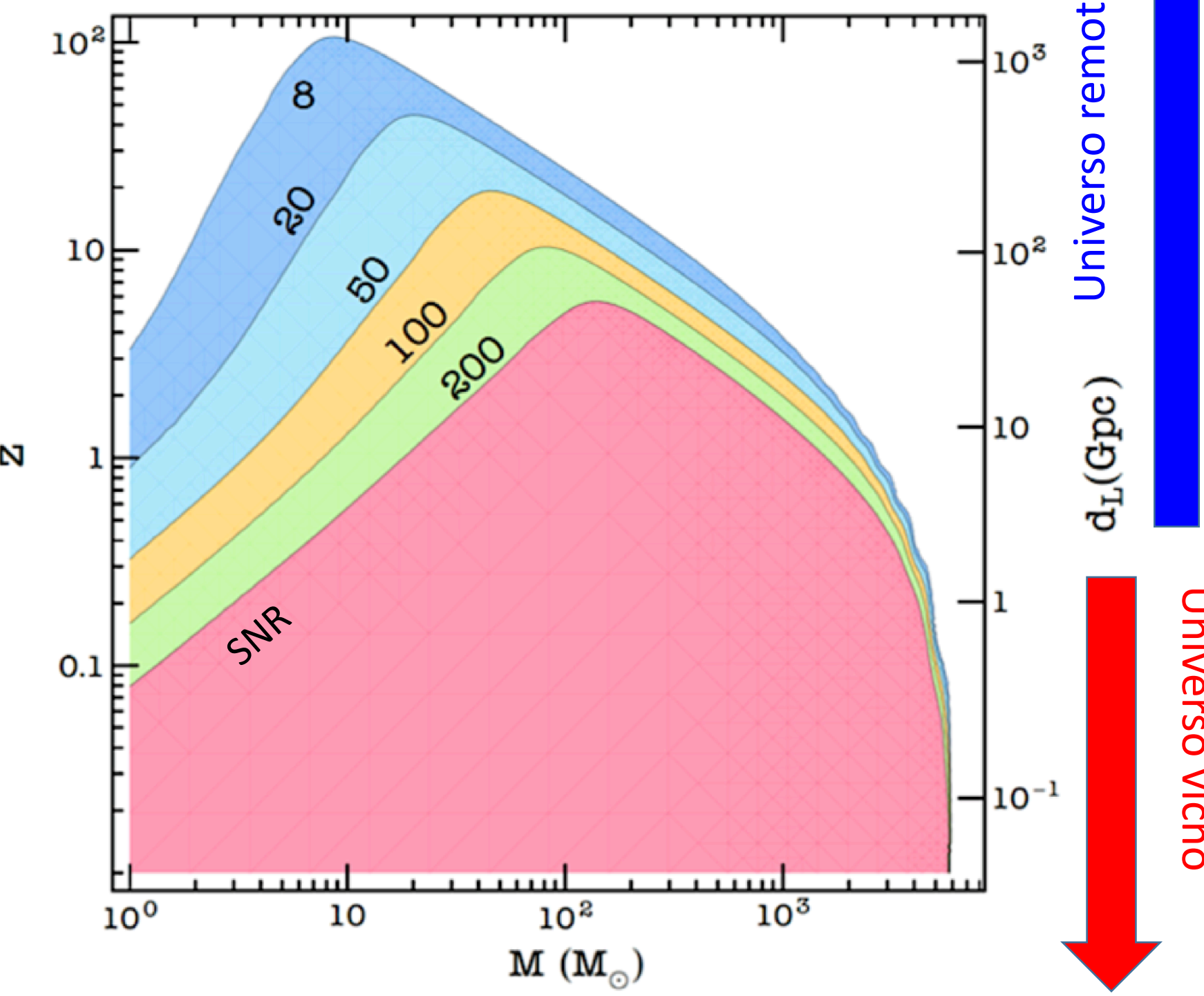
Observation (rather than detection) is the core business:

Requirements

- Wide frequency range
- Massive black holes (LF focus)
- Localisation capability
- (more) Uniform sky coverage
- Polarisation disentanglement
- High Reliability (high duty cycle)
- High SNR

Design Specifications

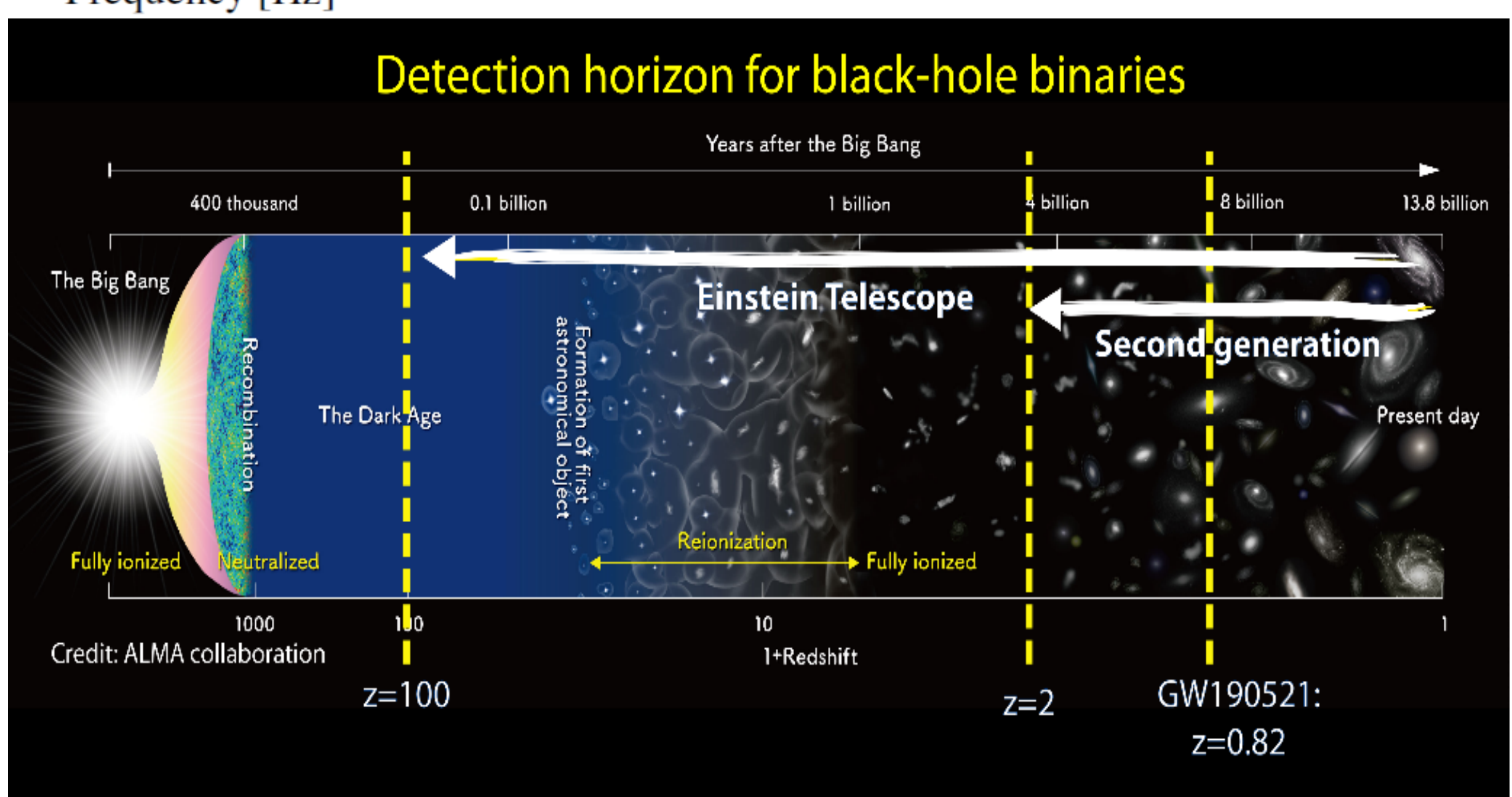
- Xylophone (multi-interferometer) Design
- Underground
- Cryogenic
- Triangular shape
- Multi-detector design
- Longer arms

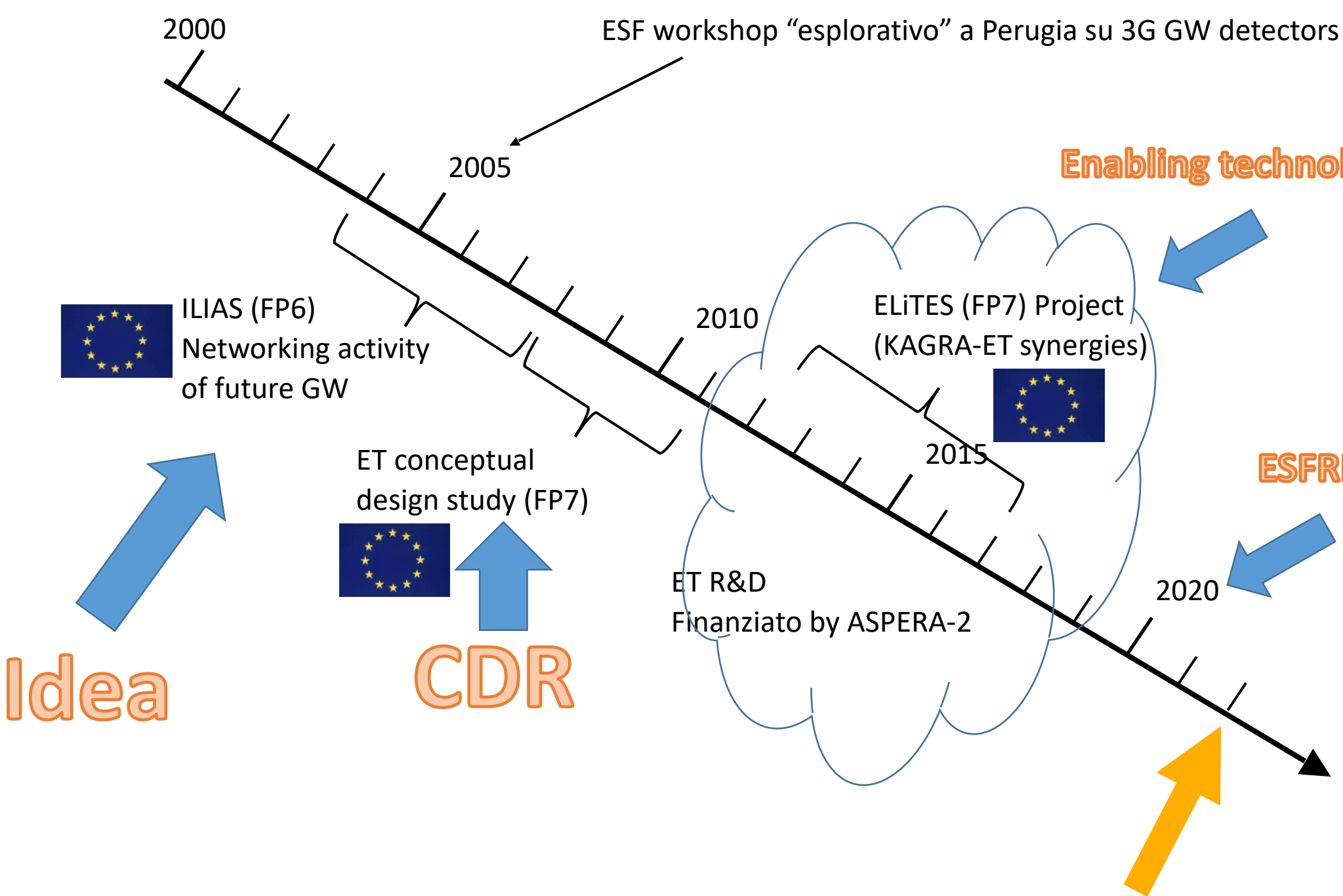


- ET esplorerà quasi tutto l'Universo, ascoltando le onde gravitazionali emessi da buchi neri coalescenti dalla "Dark age" dopo il Big Bang.
- ET rivelerà con ottimo Segnale/Rumore sistemi binari di Stelle a Neutroni per centinaia di migliaia all'anno, permettendo lo studio della struttura interna dei loro nuclei.

- 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





Adesso: verso la formazione di una collaborazione scientifica

In corso la scelta del sito:

* 2 Siti candidati

➡ **Sos Enattos**, Sardegna, IT

➡ **Meuse-Rhine** Euroregion, NL





Proposta sottomessa da:

- **Italia** (Lead Country)
- Belgio
- Olanda
- Polonia
- Spagna

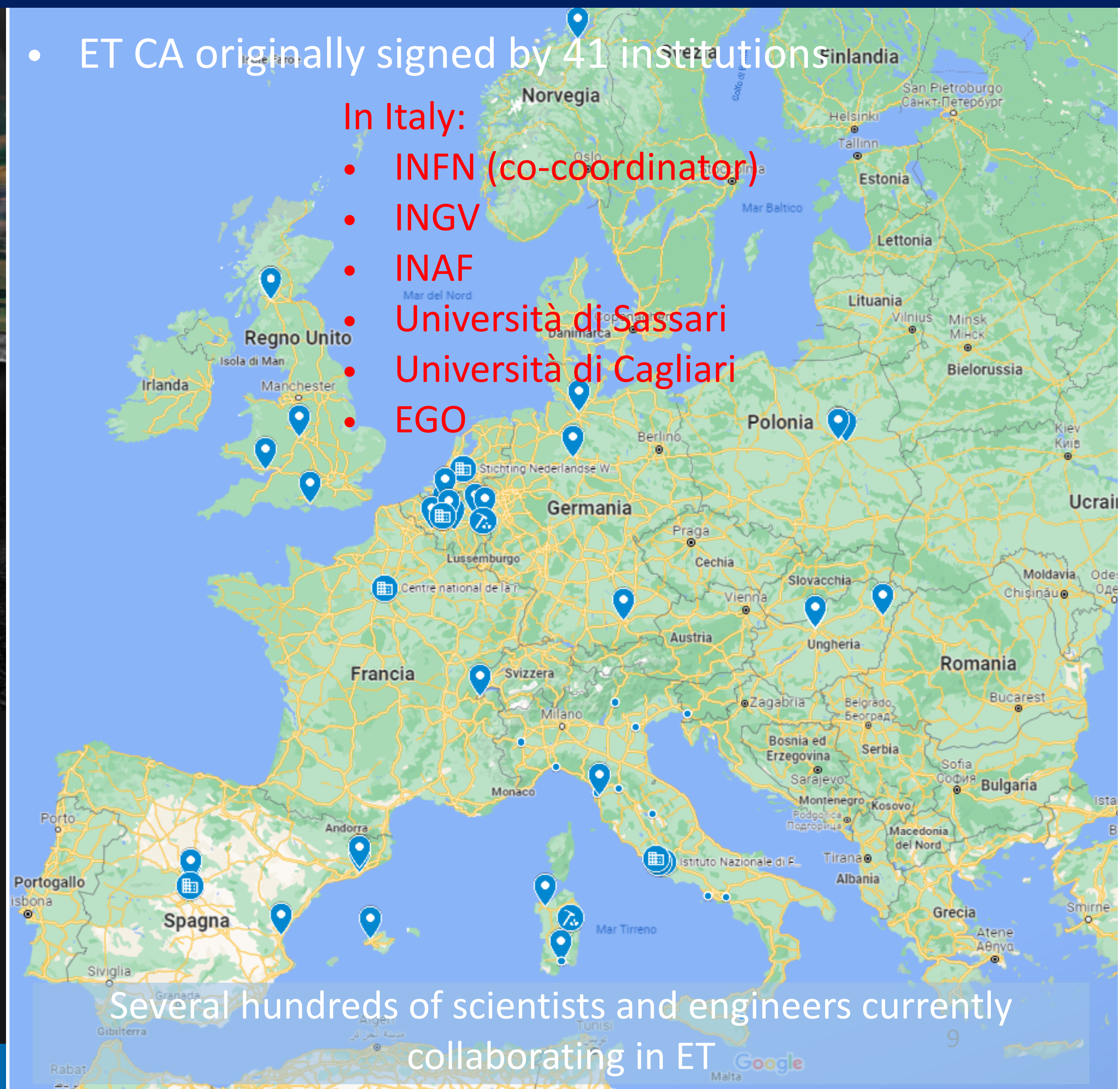
Adesso, nel progetto e nelle attività legate alla formazione della Collaborazione, anche:

- **France**
- **Germany**
- **Hungary**
- **Switzerland**
- **UK**

• ET CA originally signed by 41 institutions

In Italy:

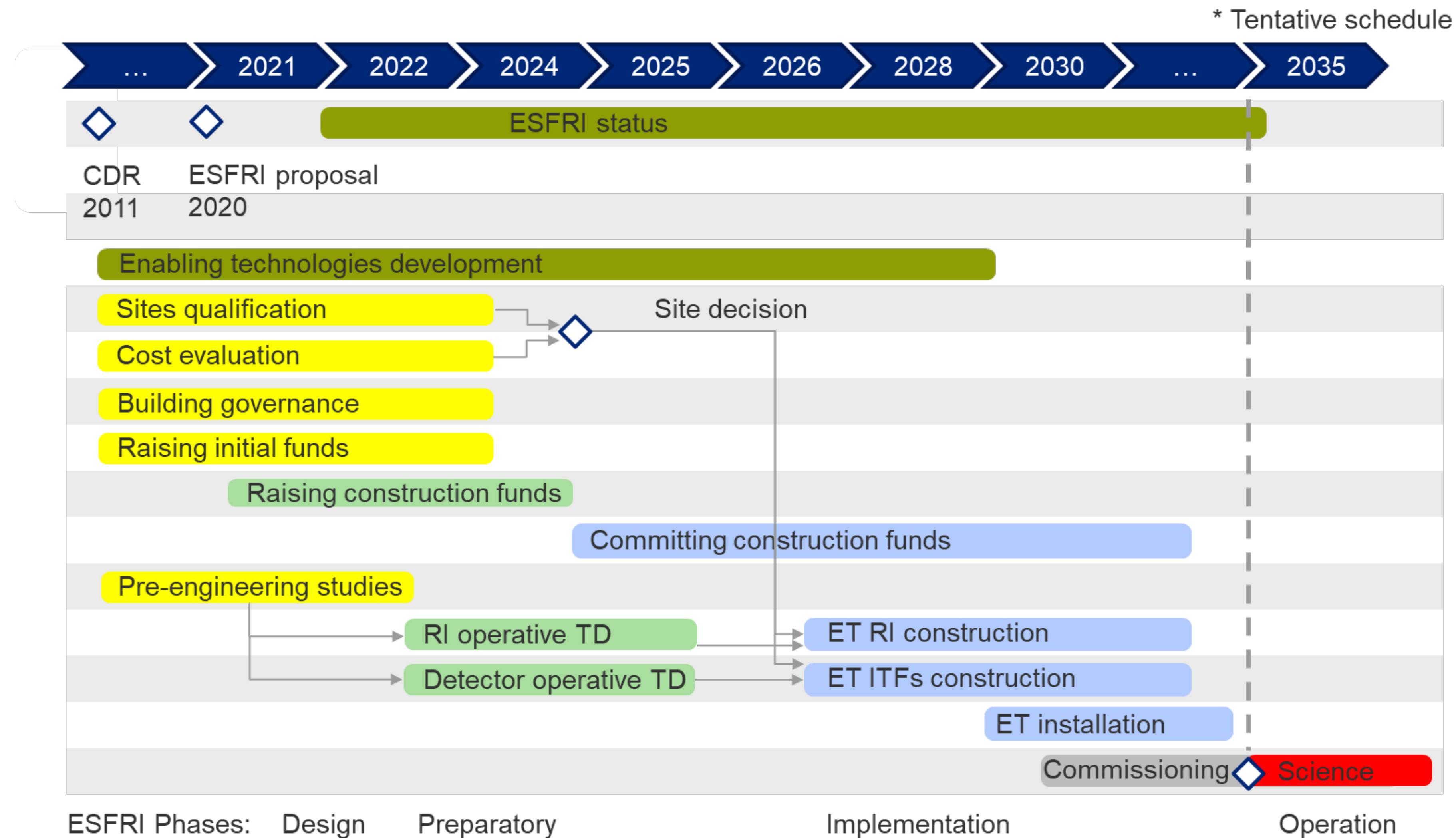
- **INFN (co-coordinator)**
- **INGV**
- **INAF**
- **Università di Sassari**
- **Università di Cagliari**
- **EGO**



Several hundreds of scientists and engineers currently collaborating in ET

ET timeline

- ET timeline presentata ad ESFRI
 - L'approvazione di ESFRI ha accelerato le attività a tutti i livelli (Scienza, Agenzie, Governi)



FP7
ESFRI



Einstein Telescope

Concezione/Progettazione del rivelatore

PNRR



Einstein Telescope *Infrastructure Consortium*

ETIC (Sottomesso fine Febbraio 2022)

Rete *Italiana* di infrastrutture/laboratori per sviluppare le tecnologie e definire i punti chiave del progetto di ET
Studio a 4π (sito, ambiente, società, economia) a supporto della realizzazione di ET in Sardegna

Unità operative:

11 Sezioni/Lab INFN: **Bo**, Ca Ge, LNGS, Na, Pd, Pg, Pi, Rm1, Rm2, To

11 Università: **UniBO**, UniCA, UniGE, GSSI, UniNA, UniVanvitelli, UniPD, UniPG, UniPI, UniSapienza, UniRM2

2 altri Enti per la Ricerca : ASI, INAF

Target 100 M€ - Durata 30 mesi

@Bologna:

INFN → BETIF

DIFA → DIFAET



Bologna ET Integrated Facility

BETIF

Proposta per il PNRR 2022 Infrastrutture di Ricerca

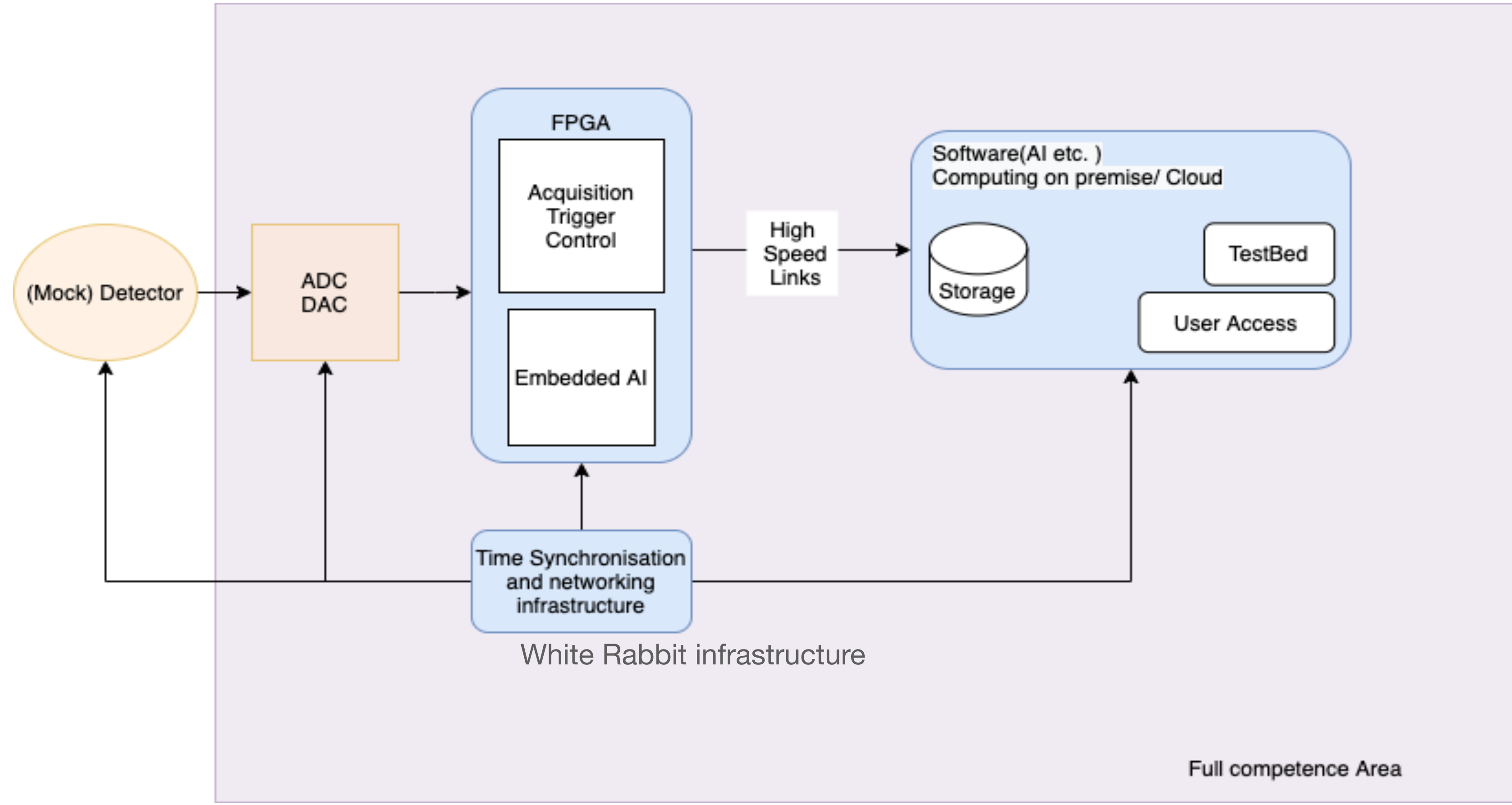
Tommaso Chiarusi, Daniele Bonacorsi, **Riccardo Travaglini (*)**

con la consulenza di Eugenio Scapparone e Gabriele Sirri

(*) *Contact Person* per BETIF

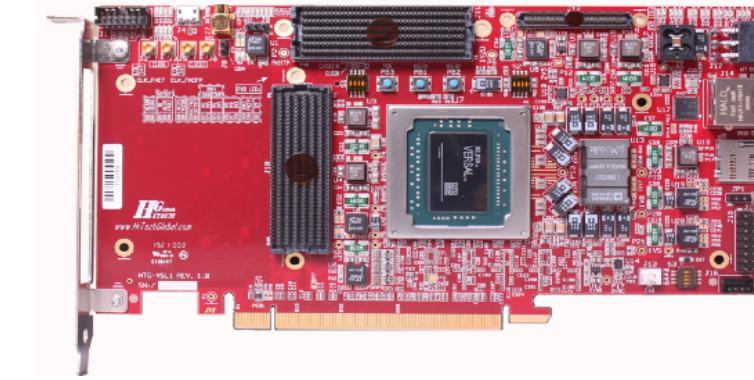
ETIC @ Bologna: BETIF

Infrastruttura dotata di GPU, FPGA, dispositivi White Rabbit, e sistemi di calcolo.



Applicabile per attività in ET come *data acquisition, real time control, characterisation, calibration,...*

Elettronica basata su FPGA



Fase 1:

* Sistema basato su schede commerciali con FPGA

A disposizione per test e sviluppo algoritmi veloci per : processing dei dati "raw"; data formatting, esecuzione real-time e parallela degli algoritmi di ricerca (AI), loop di controllo (algoritmi Simulink in real-time, predictive maintenance, ...)

Tecnologie: Schede PCIe commerciali con FPGA di diversi tipologie - infrastruttura AdvancedTCA

Link High-speed per I/O e comunicazione tra FPGA (fino a 40 Gb/s)

* Server con schede di accelerazione FPGA (sinergico con INFN-cloud)

Fase 2: integrazione presso siti di sviluppo eventualmente interessati del sistema basato su FPGA commerciali

acquisto/sviluppo di ADC+DAC e firmware di interfaccia relativa su FPGA

Esempio di HW : n. 256+256 slow channels (24 bit , 625kS/s) n. 64+64 fast channels (14 bit, 500 MS/s)

Fase 3: progettazione di un prototipo di sistema custom basato su FPGA

Individuazione di una tecnologia di interesse (PCIe, AdvancedTCA)

Realizzazione di un prototipo di sistema



Assets di BOLOGNA:

- esperienza nella progettazione di convertitori analogico-digitali ad ampia banda e basso rumore (digitalizzatore a 1 GS/s per esperimento FAMU)
- esperienza nella progettazione di schede elettroniche digitali con FPGA e link veloci per sistemi di acquisizione e trigger per LHC (DAQ per ATLAS-Pixel; Trigger per CMS Drift Tube)
- esperienza nel firmware per FPGA (5 esperti di VHDL, SystemVerilog, Filtri digitali, algoritmi di Machine Learning)

Software (incl.AI) and Computing

Miglioramento delle prestazioni degli algoritmi attuali per signal detection; **disegno di nuovi algoritmi (incl.AI)** in grado di sfruttare al meglio risorse di calcolo eterogenee per vari use-case (e.g. selezione eventi, analisi dati, predictive maintenance, ...); definizione di metodi efficaci per sfruttare al meglio **acceleratori hardware** (incl. FPGA); esplorazione di algoritmi di **quantum computing** (e **quantum machine learning**) su risorse quantum reali o simulatori/HPC (via Qiskit, Braket, PennyLane, etc).

Assets di BOLOGNA:

- esperienza in [definizione/evoluzione di modelli di calcolo di esperimenti LHC \(CMS\)](#) e [computing coordination \(CMS\)](#)
- esperienza in [disegno/coordinamento/esecuzione di Data Challenges in WLCG](#) (e.g. WLCG STEP'09 scale test)
- esperienza con [strumenti di workload management](#) (e.g. HTCondor in caratterizzazioni tipo DAGman)
- esperienza in [Applied Machine/Deep Learning](#) (ricerca in HEP/LHC + didattica)
- esperienza in [ultra-low latency inference di modelli di Deep Learning su risorse FPGAs](#) (e.g. CMS muon trigger)
- [collaborazione sinergica con DIFA@UniBO](#)
 - partecipazione attiva di personale e strutture DIFA a iniziative HPC/AI, resp. scientifica unità “AI and Hard Sciences” nel Centro Inter-Dipartimentale Alma-AI, etc
 - filiera L, LM, Master(s), PhD + flusso regolare di giovani dal nuovo Dottorato in Data Science and Computation

Sincronizzazione e rete

1. esigenze intrinseche dell'apparato - $O(<10)$ ns:

1.1 riduzione del livello di rumore relativo al tempo di digitalizzazione del segnale della GW ([lista sorgenti rumore di LIGO](#));

1.2 Controllo dell'interferometro (CDR-ET 2020 - sect. 6.6.1 p. 123)

2. esigenze esterne, per la sincronizzazione tra vari GW detectors - fenomeni transienti - $O(< 10)$ ms:

2.1 una interferometria di alta qualità (riduzione incertezza su polarizzazione e direzione della GW).

2.2 rivelazione sincrona di eventi multi-sito → Astronomia Multi-messaggera

3. Elementi condizionanti:

3.1 Distanze significative tra gli apparati di ET: $O(10)$ km

3.2 Clock per RF interferometro: meglio di 2^{26} Hz \sim 64 MHz → passo di ~ 15 ns [[Advanced LIGO timing system](#)]

3.3 Throughput (Raw Data) $\sim O(1-10)$ Gbps

→ sincronizzazione + rete dati combinati : sistema **White Rabbit** [[WR open hardware](#)]

- alta precisione temporale (sub-ns) provvista a $O(1000)$ elementi distribuiti entro $O(10)$ km
- Low-phase noise
- Ethernet sincrona - attualmente tecnologia 1 GbE.
- sistema integrabile su FPGA e su commodity-computer (con opportuna scheda di rete)

Assets di Bologna:

- esperienza di integrazione calibrazione e ottimizzazione infrastruttura WR (KM3NeT)
- coordinazione sistema di acquisizione dati (KM3NeT; streaming readout @ Class12 -JLab) - realizzazione di test-bed
- stretti contatti con i) nucleo sviluppo WR al CERN; ii) azienda leader nella produzione (Seven Solutions, Spagna) e rivendita (Sincron Sistemi, Italia) di infrastrutture WR

ETIC @ Bologna: BETIF

Possibili modi di essere coinvolti in BETIF

- Sviluppo DAQ, readout e sincronizzazione
- Sviluppo ed implementazione algoritmi su FPGA e GPU
- Simulazione data challenge
- Supporto allo sviluppo del detector (acquisizione digitale)
- test e validazione parti detector

impostare lavori che puntano ad ET ma che possono avere **use-case applicabili in Virgo**

Ad esempio:

- implementazione ed ottimizzazione di algoritmi di cross-correlation su FPGA
- Analisi degli stream di raw data (2THz) per Data Quality,
- studi di algoritmi di veto

contattare Riccardo, Daniele, me

ETIC @ Bologna: BETIF

Richiesti

- **1 CTER + 2 Tecnologi**
- Circa **1.5 M€ di attrezzature** per la facility

Focus su

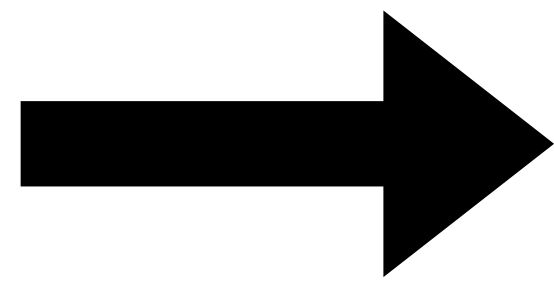
- FPGA,
- GPU - A100/V100
- WRS e kit di sviluppo

più attrezzatura di supporto laboratorio (rack, strumenti di misura, pc)

PNRR finanzia per 30 mesi, ma BETIF deve essere garantito per almeno 10 anni come facility di ET

➡ **Creazione Sigla ET in Sezione** - già manifestazione di interesse di ~ 3.5 FTE tra afferenti (INFN ed UniBo) del Gr.1, Gr. 2, Gr. 4, Tecnologi INFN.

EU-Horizon 2022
INFRA-TECH



MultiMessenger Technologies

M2TECH (da sottomettere entro 20/04/2022)

Sinergie tecnologiche per Esperimenti di Astronomia multimessaggera (GW, ν , γ) : ET, KM3NeT, CTAO, MAGIC, VIRGO

Target 10 M€

Responsabilità @Bo

- PI INFN + Coordinamento WP5 (Synchronisation, Monitoring and optimised control) - T.C.

Proposte di ricerca e sviluppo (di interesse primario **ET** e **KM3NeT** e non solo):

- estensione della tecnologia WR a 10 Gb
- digital twin

Possibilità di acquisizione ulteriore strumentazione, fondi per posizioni post-doc

RINGRAZIAMENTI ... COSMICI

per il supporto (dato e futuro):

- al nostro Servizio di Amministrazione,
Martina Allegro e Sara Haghshenas
- al Responsabile Servizio Nazionale Progettazione UE/Internazionale
Alessia D'Orazio