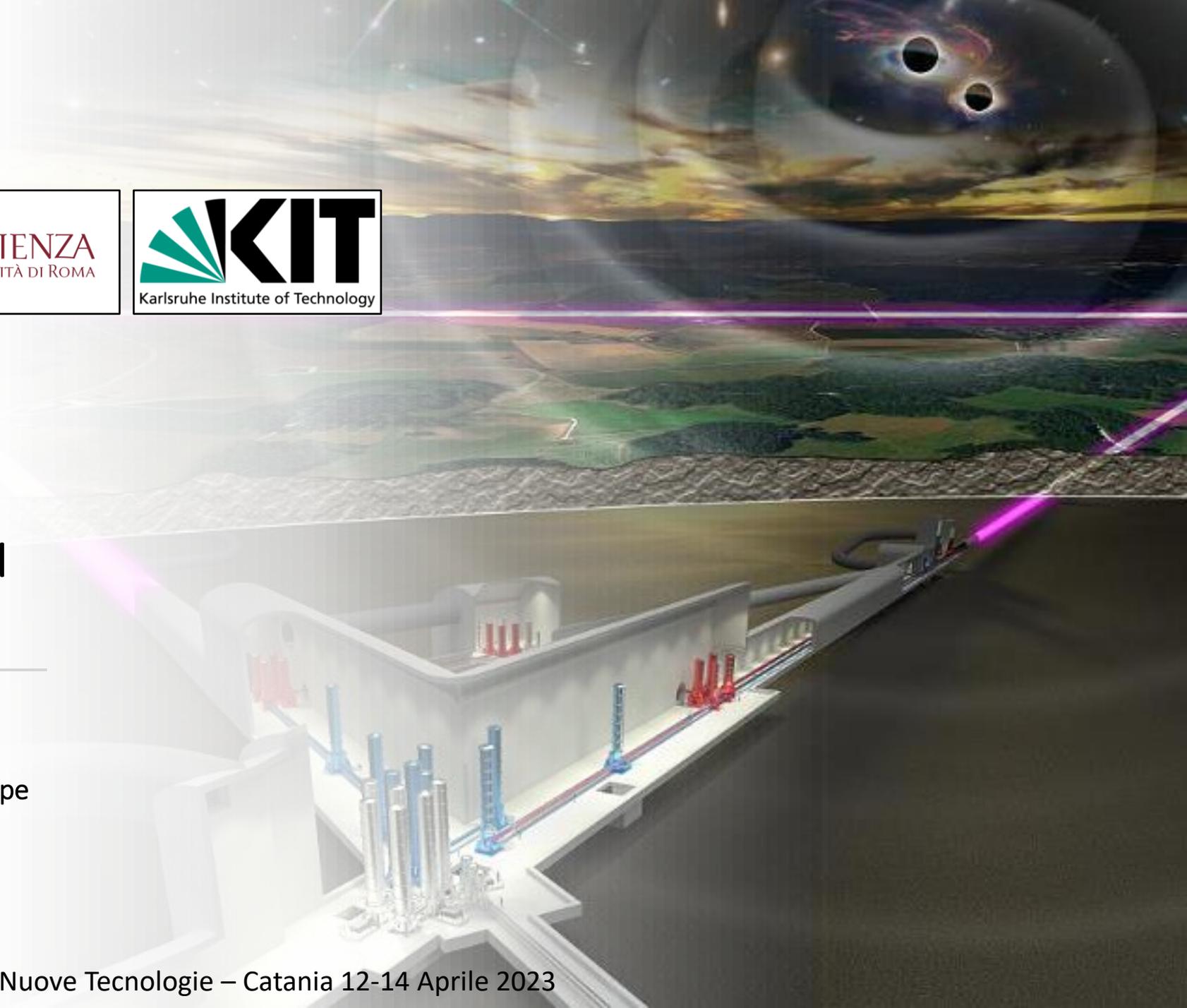
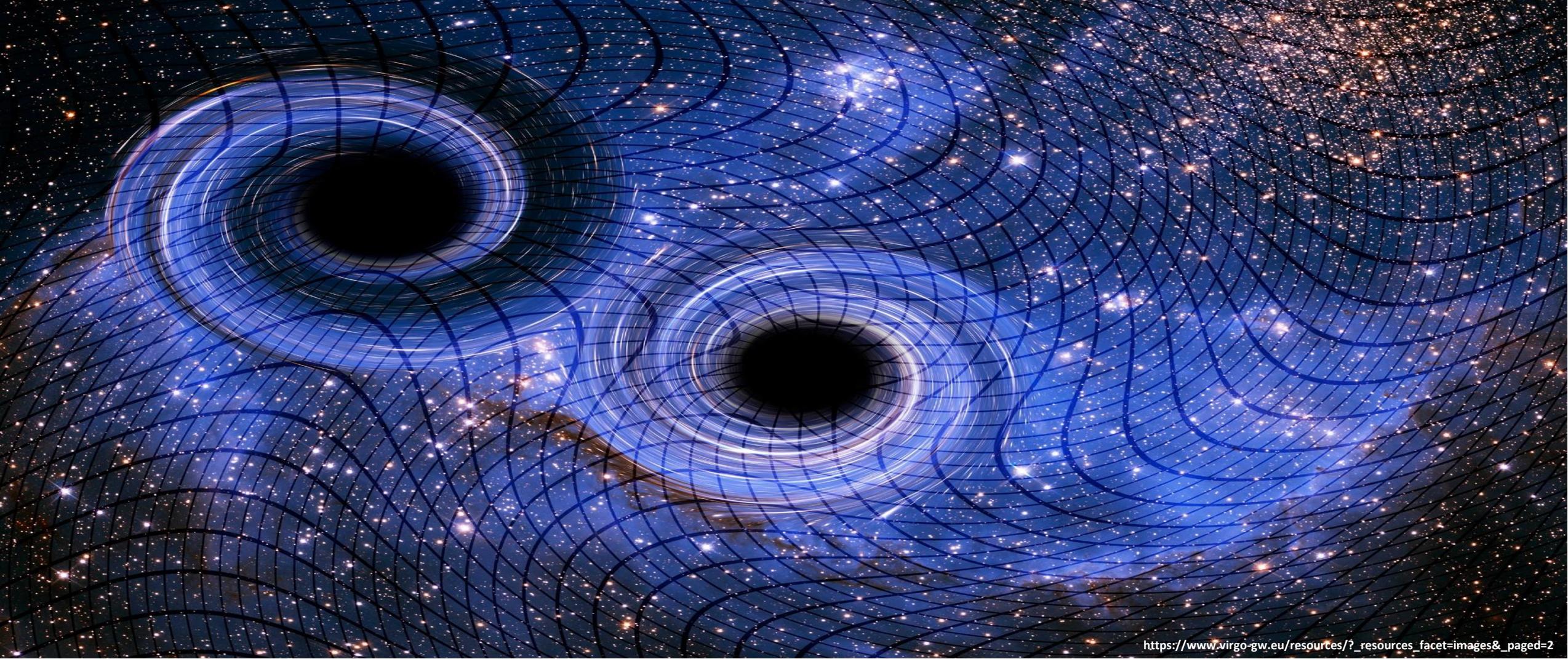




Sistemi criogenici per il raffreddamento dei payload di Einstein Telescope

Dr Valentina Mangano
(INFN Roma – Sapienza)
a nome della Collaborazione Einstein Telescope



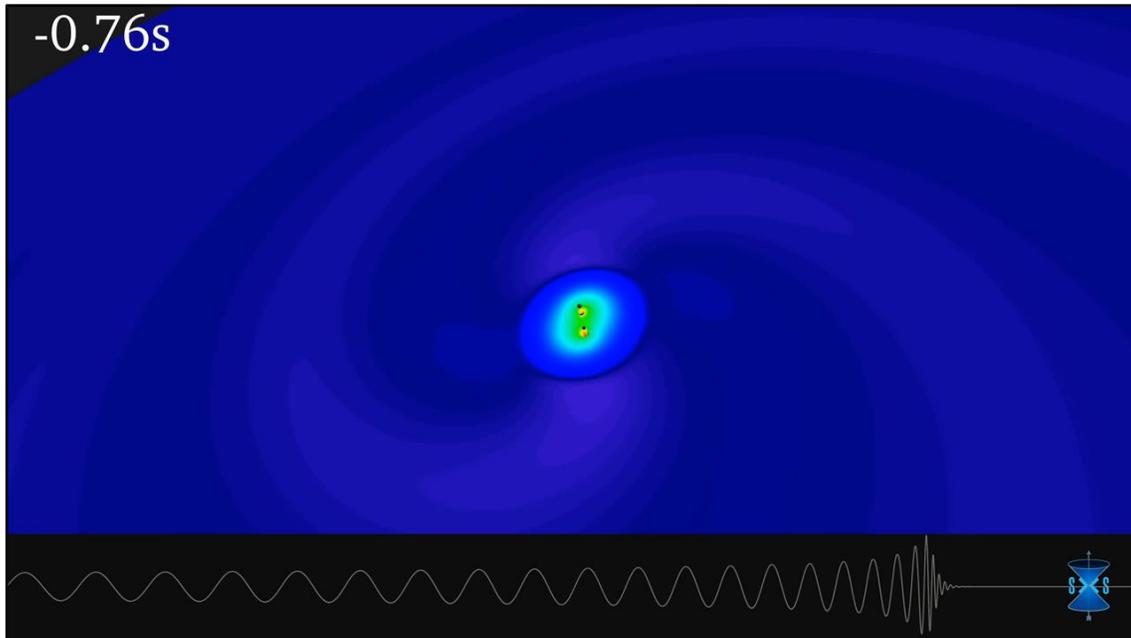


https://www.virgo-gw.eu/resources/?_resources_facet=images&_paged=2

Le onde gravitazionali
e i rilevatori interferometrici
di seconda generazione

Le **onde gravitazionali** sono **increspature dello spazio-tempo**, previste dalla teoria della relatività generale, che si verificano quando un **oggetto dotato di massa elevata e asimmetria subisce un'accelerazione**.

Si propagano nell'universo indisturbate alla **velocità della luce** e possono essere generate da **sistemi binari di buchi neri e/o stelle di neutroni**, esplosioni di supernove, stelle di neutroni in rotazione (pulsar), ...



https://www.youtube.com/watch?v=1agm33iEAuo&ab_channel=LIGOLabCaltech%3AMIT



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

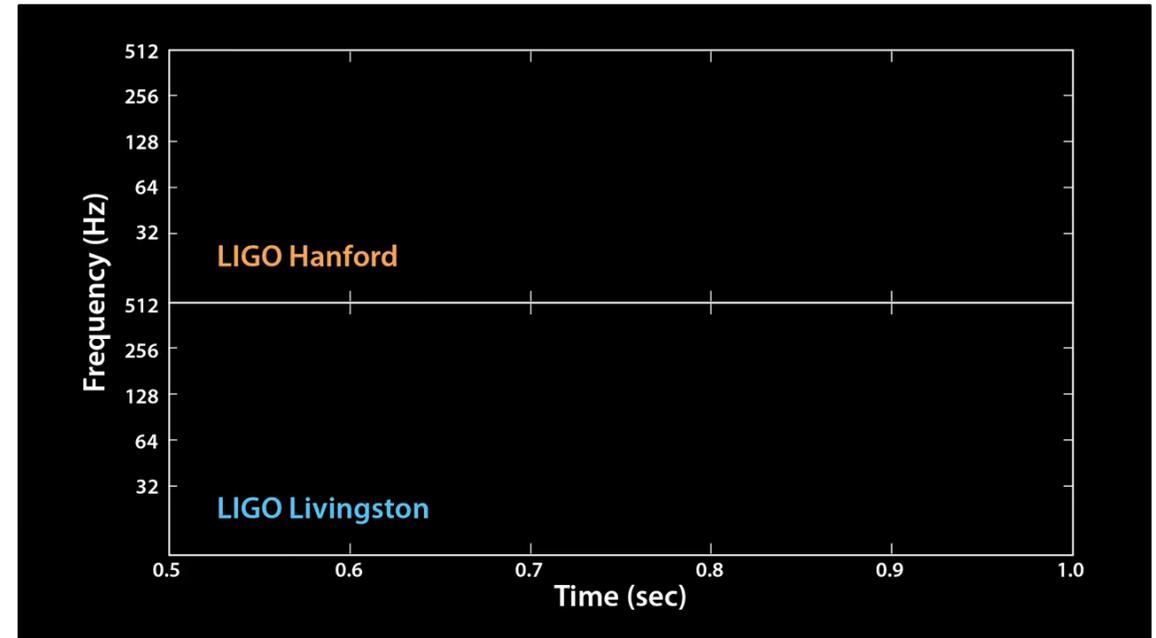
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

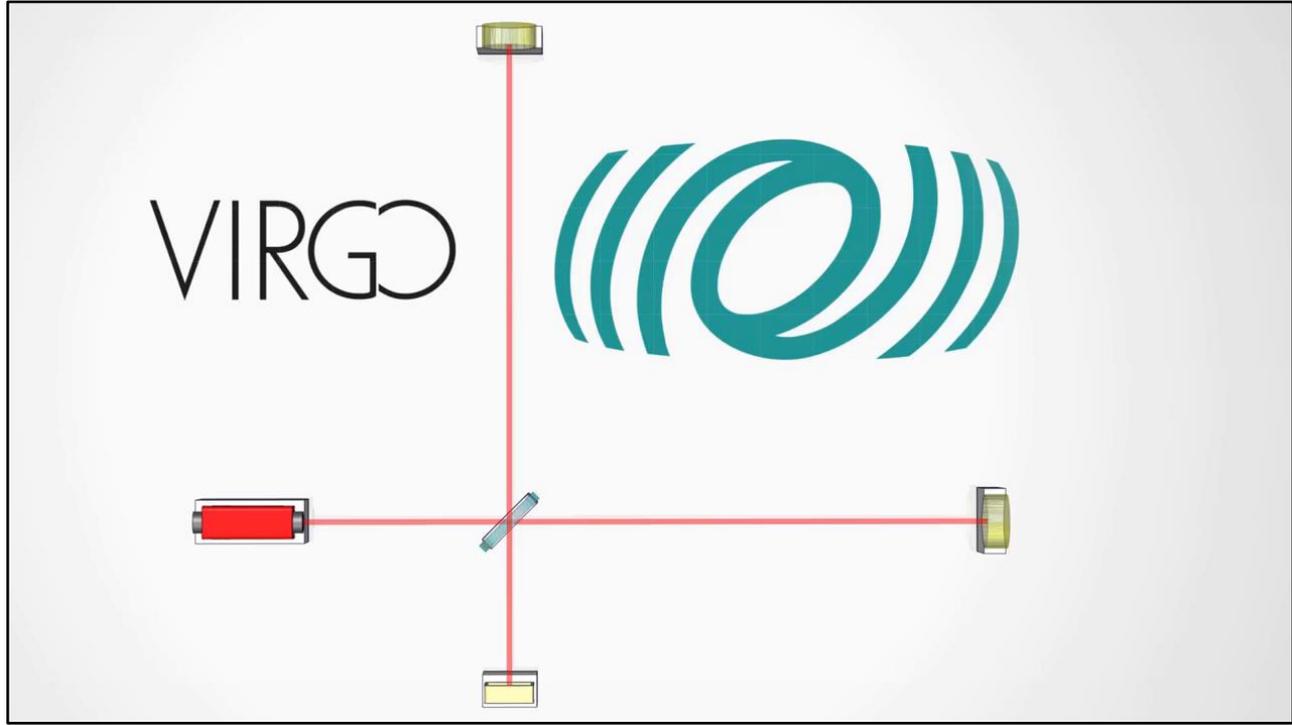
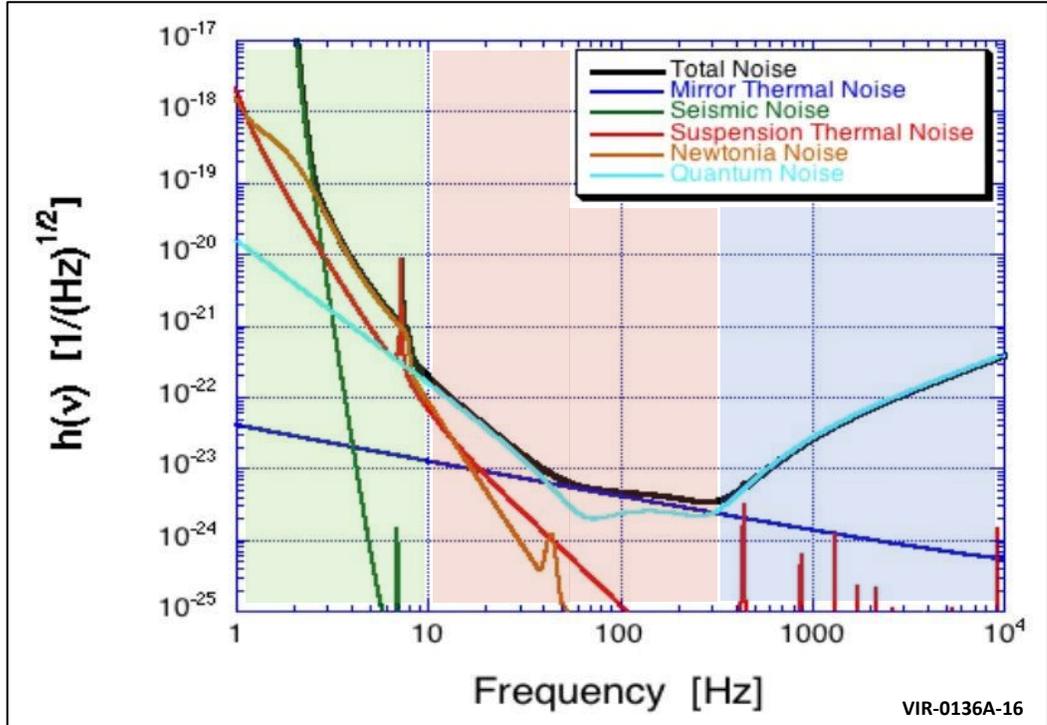
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102



https://www.youtube.com/watch?v=QyDcTbR-kEA&t=1s&ab_channel=LIGOLabCaltech%3AMIT



https://www.youtube.com/watch?v=h_FbHipV3No&ab_channel=Nikhef

$$h = \frac{2\Delta L}{L} \approx 10^{-23} / \sqrt{\text{Hz}} @ 100 \text{ Hz}$$

Low Frequency
- seismic noise $h_{seism} \propto f^{-2}$

Mid Frequency
- thermal noise of the suspensions $h_{th,sus} \propto T^{1/2} m^{-1/2} f^{-5/2}$
- thermal noise of the mirrors $h_{th,mir} \propto T^{1/2} f^{-1/2}$
- radiation pressure noise $h_{rad} \propto m^{-1} L^{-1} P_{in}^{1/2} f^{-2}$

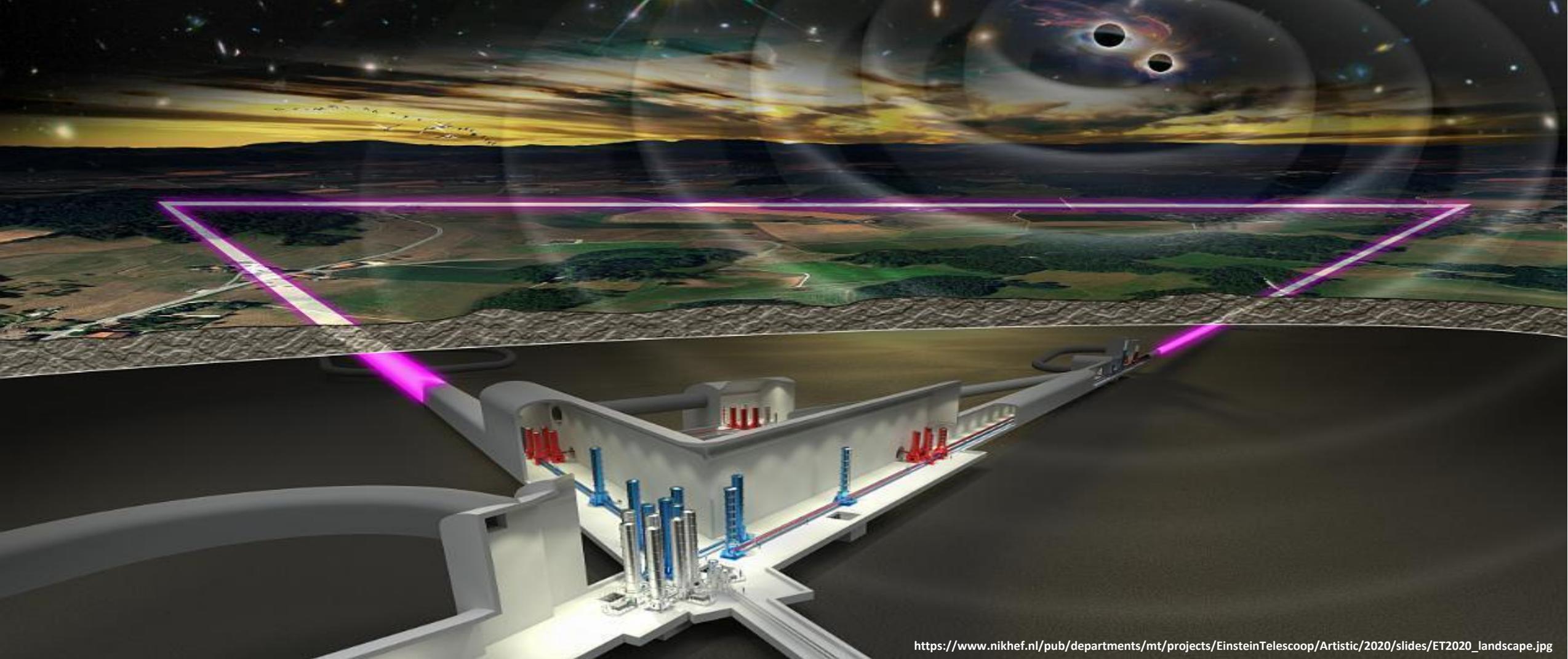
High Frequency
- shot noise $h_{shot} \propto L^{-1} P_{in}^{-1/2}$

Different noise types dominate the various frequency bands and often show opposite responses to different tuning of the same design parameter.

- ▶ Shot Noise vs Radiation Pressure Noise
- ▶ High Power vs Cryogenic Temperature



<https://www.virgo-gw.eu/about/scientific-collaboration/>

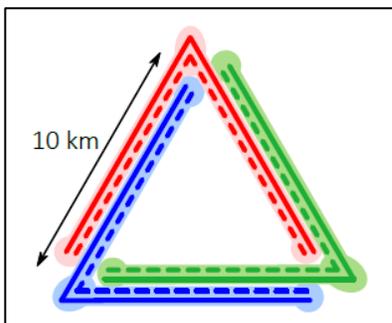


https://www.nikhef.nl/pub/departments/mt/projects/EinsteinTelescoop/Artistic/2020/slides/ET2020_landscape.jpg

Einstein Telescope,
l'osservatorio di onde gravitazionali
di terza generazione in Europa

Einstein Telescope sarà un osservatorio sotterraneo di terza generazione per la rilevazione di onde gravitazionali costruito in Europa con:

- una sensibilità almeno 10 volte migliore di quella dei rivelatori Advanced su un'ampia frazione della banda di frequenza di rilevazione;
- una banda larga (possibilmente più ampia degli attuali rivelatori) che accede alla banda di frequenza inferiore a 10 Hz.



ET consisterà di **tre rivelatori** in una disposizione triangolare.

Ogni rivelatore sarà composto da **due interferometri**:

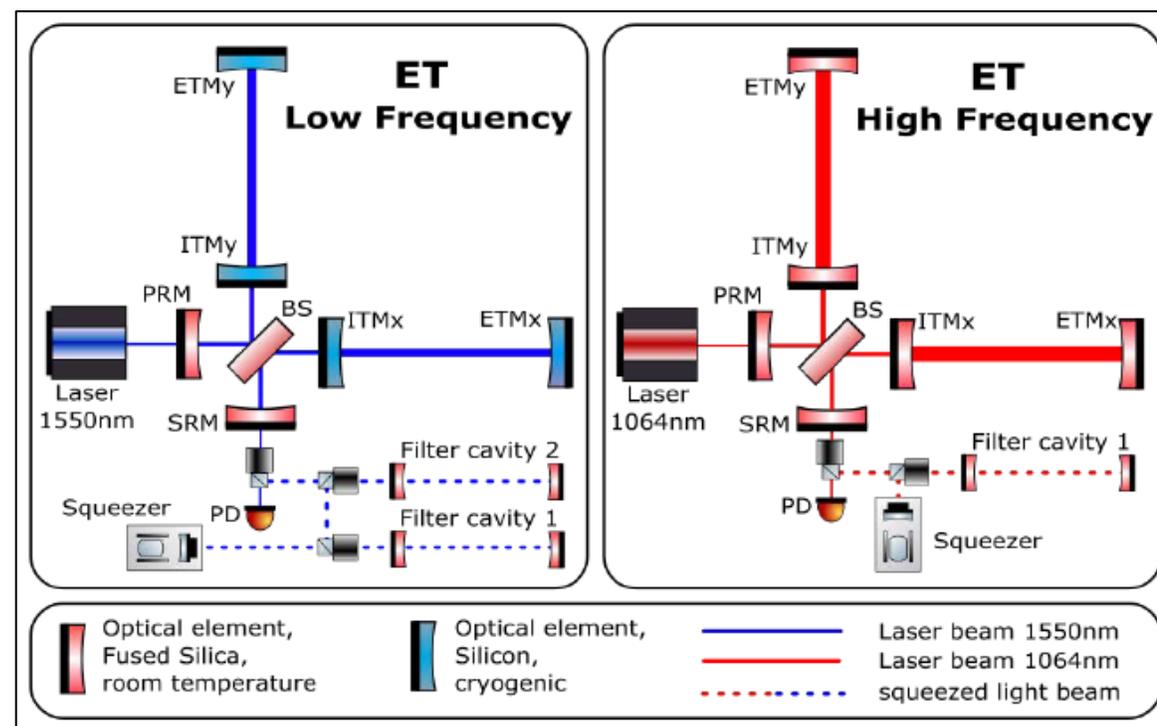
- uno con **bassa potenza e temperature criogeniche** per il rilevamento di onde gravitazionali a **bassa frequenza (ET-LF)**
- uno con **alta potenza e alte temperature** per il rilevamento di onde gravitazionali ad **alta frequenza (ET-HF)**.



https://www.youtube.com/watch?v=HJGVs6-wJG4&ab_channel=Nikhef

Parameter	ET-HF	ET-LF
Arm length	10 km	10 km
Input power (after IMC)	500 W	3 W
Arm power	3 MW	18 kW
Temperature	290 K	10-20 K
Mirror material	fused silica	silicon
Mirror diameter / thickness	62 cm / 30 cm	45 cm / 57 cm
Mirror masses	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase (rad)	tuned (0.0)	detuned (0.6)
SR transmittance	10 %	20 %
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.
Filter cavities	1x300 m	2x1.0 km
Squeezing level	10 dB (effective)	10 dB (effective)
Beam shape	TEM ₀₀	TEM ₀₀
Beam radius	12.0 cm	9 cm
Scatter loss per surface	37 ppm	37 ppm
Seismic isolation	SA, 8 m tall	mod SA, 17 m tall
Seismic (for $f > 1$ Hz)	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$
Gravity gradient subtraction	none	factor of a few

Summary of the most important parameters of the ET high and low frequency interferometers.



Grazie alle buone performance delle sospensioni a pendolo multistadio, l'influenza del **rumore sismico** può essere limitata all'intervallo di frequenza **sotto 2 Hz**.

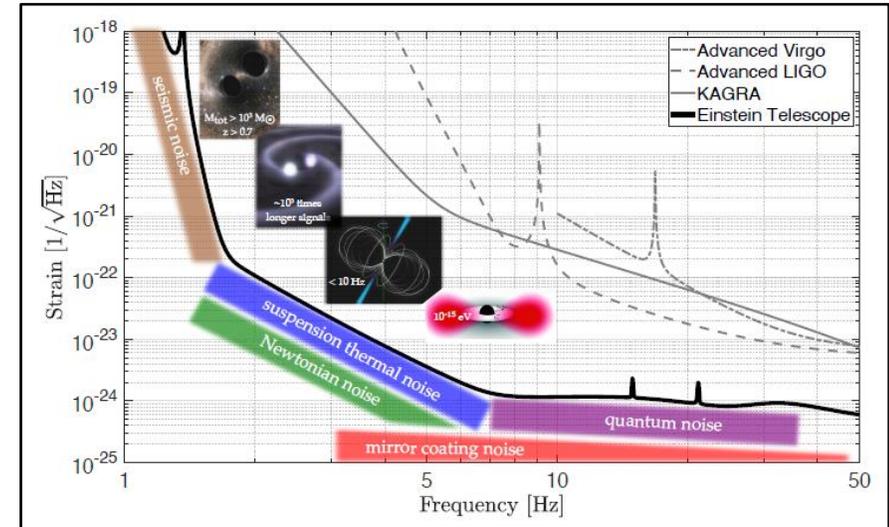
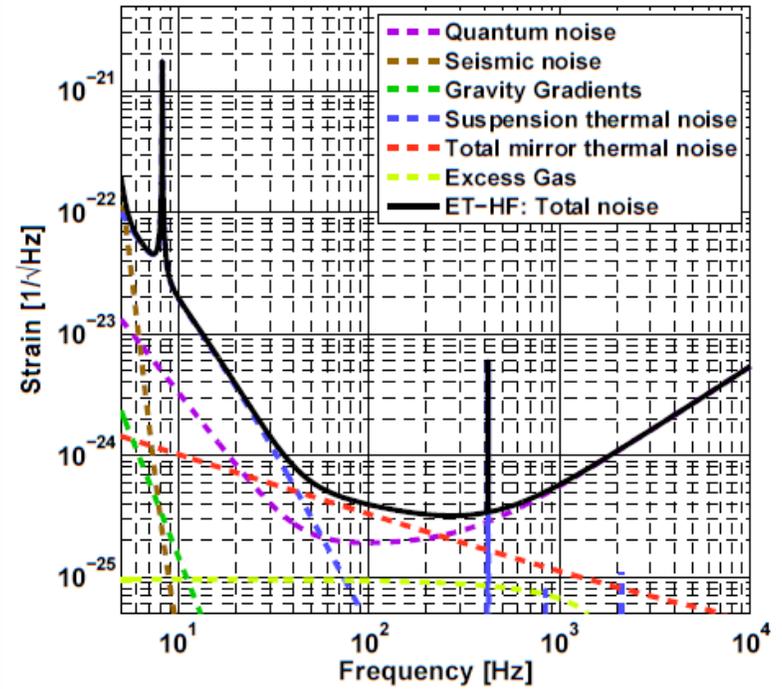
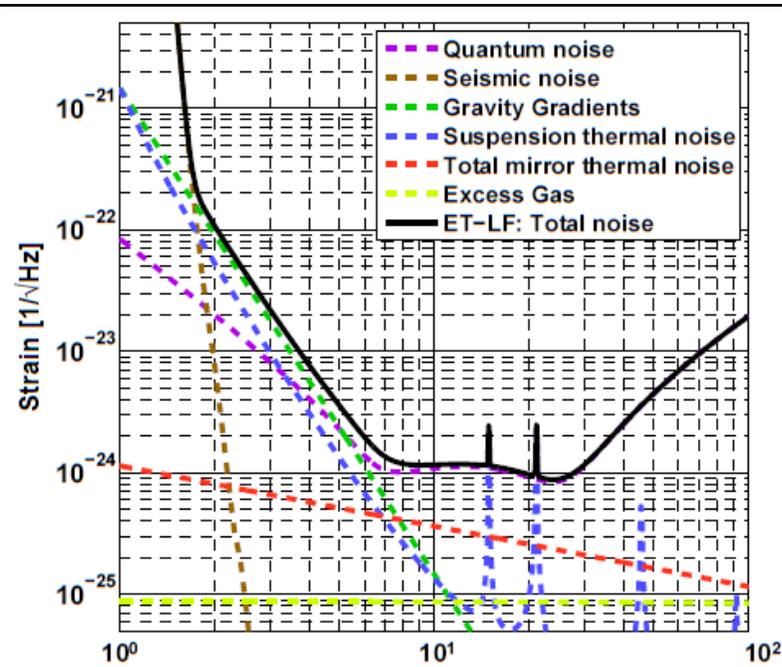
Sotto 7 Hz la sensibilità è limitata da quantità comparabili di **rumore quantistico**, **rumore del gradiente di gravità** e **rumore termico delle sospensioni**.

Lavorare a temperature criogeniche riduce l'influenza del rumore termico delle sospensioni nell'intervallo di frequenza **sopra 7 Hz** al di sotto del **rumore quantistico**.

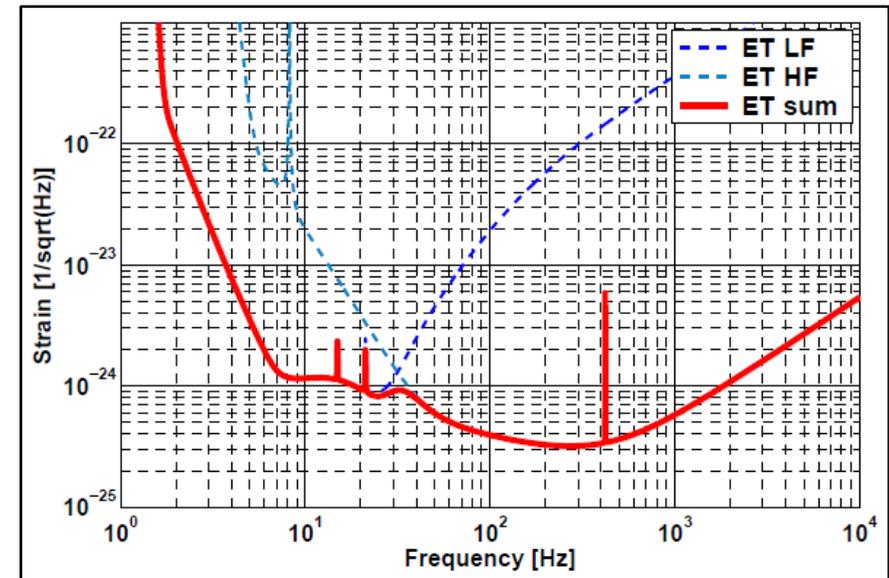
Nella banda di frequenza **da circa 7 Hz a 30 Hz** la sensibilità è limitata dal **rumore termico delle sospensioni**, causato dal funzionamento dell'interferometro a temperatura ambiente.

Da 30 Hz a 500 Hz il **rumore termico degli specchi** limita la sensibilità complessiva.

A frequenze **sopra 500 Hz** la sorgente di rumore dominante è lo **shot noise**.



<https://doi.org/10.3390/galaxies10030065>



Parameter	ET-HF	ET-LF
Arm length	10 km	10 km
Input power (after IMC)	500 W	3 W
Arm power	3 MW	18 kW
Temperature	290 K	10-20 K
Mirror material	fused silica	silicon
Mirror diameter / thickness	62 cm / 30 cm	45 cm/ 57 cm
Mirror masses	200 kg	211 kg
Laser wavelength	1064 nm	1550 nm
SR-phase (rad)	tuned (0.0)	detuned (0.6)
SR transmittance	10 %	20 %
Quantum noise suppression	freq. dep. squeez.	freq. dep. squeez.
Filter cavities	1×300 m	2×1.0 km
Squeezing level	10 dB (effective)	10 dB (effective)
Beam shape	TEM ₀₀	TEM ₀₀
Beam radius	12.0 cm	9 cm
Scatter loss per surface	37 ppm	37 ppm
Seismic isolation	SA, 8 m tall	mod SA, 17 m tall
Seismic (for $f > 1$ Hz)	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$
Gravity gradient subtraction	none	factor of a few

Summary of the most important parameters of the ET high and low frequency interferometers.

Una maggiore sensibilità può essere raggiunta:

- ✓ aumentando significativamente la lunghezza dei bracci del rilevatore a 10 km (oltre la dimensione degli interferometri attualmente disponibili),
- ✓ e andando sottoterra (dove il rumore sismico e soprattutto il suo accoppiamento via gradienti di gravità è più basso di quello in superficie).

→ Sfide per le grandi infrastrutture di ingegneria sotterranea

ET-LF richiede l'uso di nuovi materiali per gli specchi più grandi per operare a temperature criogeniche:

- ✓ Specchi di silicio (zaffiro)
Sfide per dimensione e geometria, lucidatura, proprietà termo-meccaniche (rumore termico), proprietà ottiche (assorbimento), sospensioni.
- ✓ Nuovi rivestimenti ad alta riflettività
Sfide per selezione dei materiali, drogaggio, procedure di deposizione, impurità e difetti, proprietà termo-meccaniche e ottiche, invecchiamento.
- ✓ Nuovi laser
Gli attuali rilevatori di onde gravitazionali usano $\lambda = 1064 \text{ nm}$, ET-LF userà laser con $\lambda = 1550 \text{ nm}$.
ET-HF verso potenze più alte.

→ Sfide per l'ottica e la scienza dei materiali

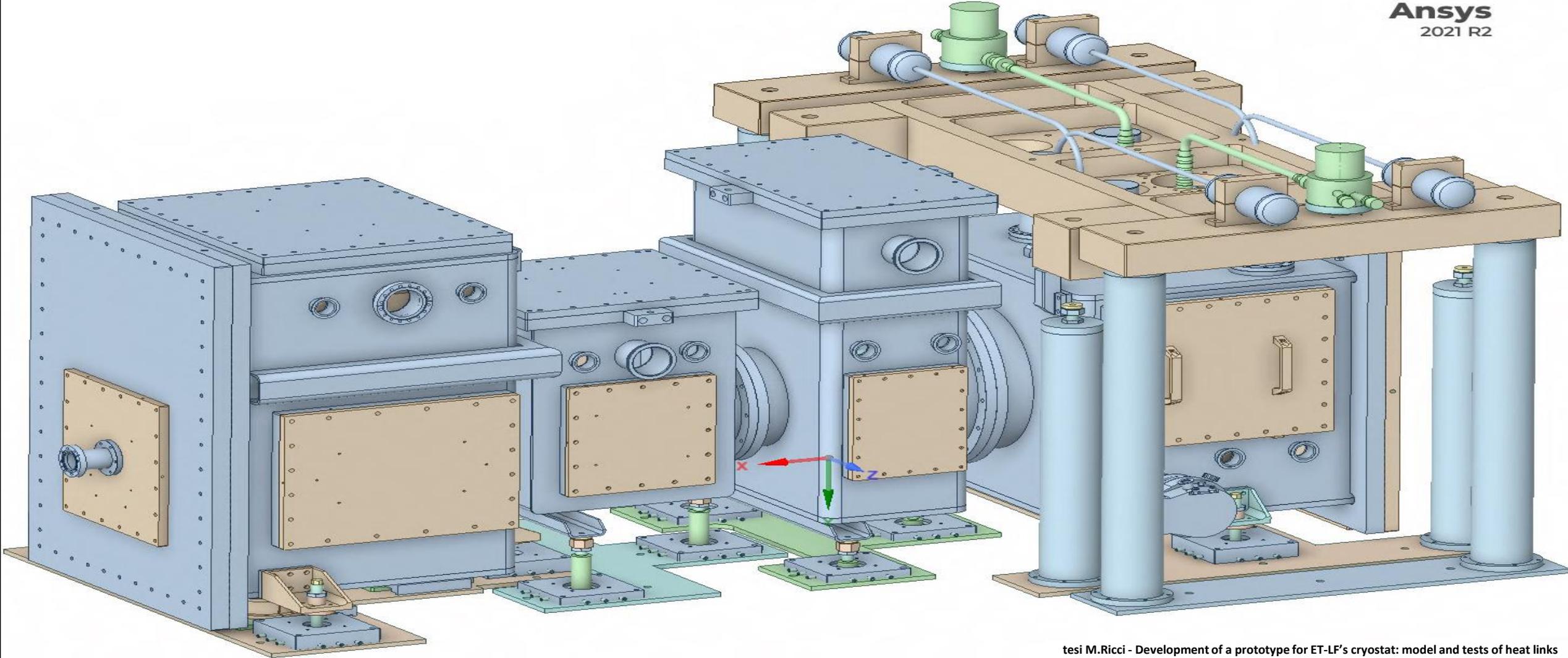
Principali problemi legati alla criogenia:

- ✓ Sfide per capacità di raffreddare gli specchi di alcune centinaia di kg.
- ✓ Assorbimento del laser e estrazione di calore da uno specchio pesante e dai fili di sospensione per un payload criogenico.
- ✓ Riduzione del tempo di raffreddamento.
- ✓ Sicurezza: un problema cruciale quando si opera nel sottosuolo.
- ✓ Evitare la contaminazione degli specchi.
- ✓ Riduzione delle vibrazioni dovute ai cryocooler.
- ✓ Sfide per la produzione di payload compatibile sia con i requisiti criogenici che operativi (geometria, materiali, ...).

→ Sfide per la criogenia

ET-LF:

- ✓ rumore termico delle sospensioni dominante nella banda di frequenza da 2 Hz a 30 Hz
- ✓ ottiche criogeniche a $T = 10 - 20 \text{ K}$
- ✓ metodi di raffreddamento a basso rumore richiesti



tesi M.Ricci - Development of a prototype for ET-LF's cryostat: model and tests of heat links

Sistema di raffreddamento
previsto per ET-LF
basato sulla tecnologia a pulse-tube

Gli **specchi di ET-LF** saranno raffreddati a **10 – 20K** per ridurre il **rumore termico** che rappresenta un limite alla sensibilità a bassa frequenza per la seconda generazione di rivelatori. Il payload sarà raffreddato in un **criostato** che ha due schermi radiativi a **4K e 80 K** ed è collocato nella parte inferiore delle torri a vuoto che ospitano i Superattenuatori.

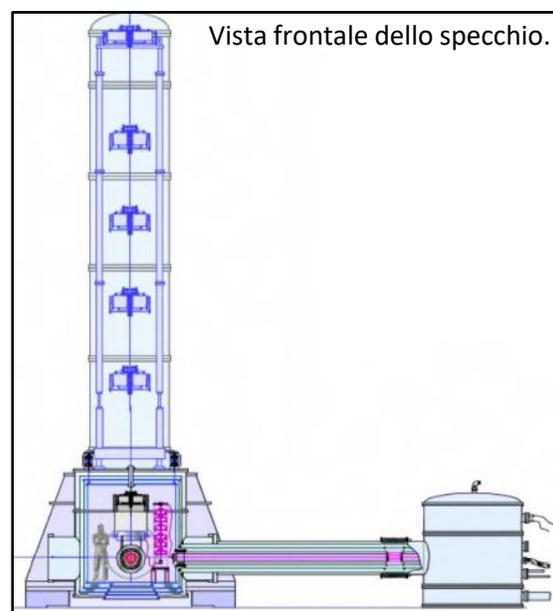
È estremamente importante

non solo garantire un collegamento termico efficiente tra il payload e il sistema di raffreddamento, ma anche preservare l'isolamento meccanico e quindi non introdurre eccessive vibrazioni all'intero sistema.

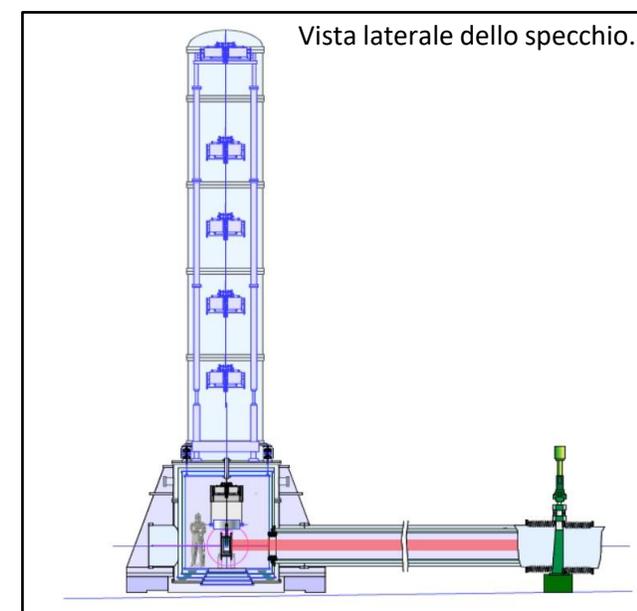
La **sospensione dello specchio** si basa sul disegno monolitico ad alta conduttività ed è indipendente dalla soluzione di raffreddamento.

Al contrario, ci sono due possibili approcci per la **sospensione della marionetta**:

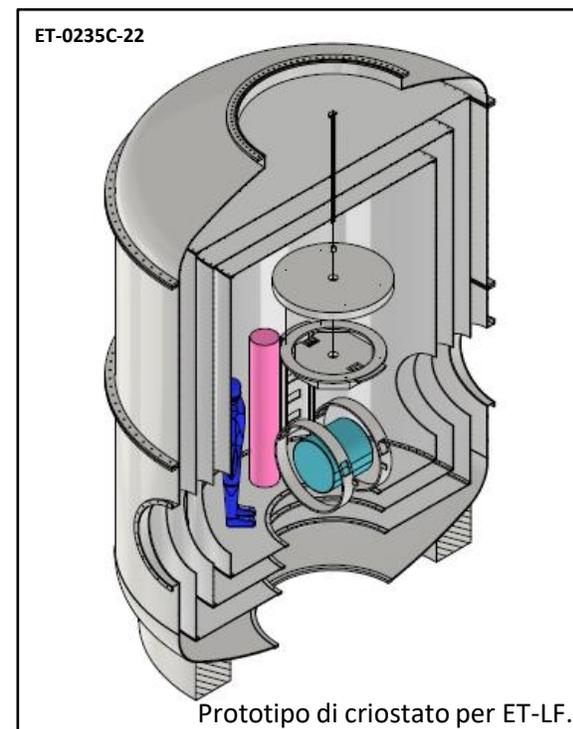
- ✓ **per il sistema di raffreddamento previsto per ET-LF basato sulla tecnologia a pulse-tube,**
sospensioni in zaffiro o silicio con il sistema di raffreddamento collegato alla piattaforma tramite collegamenti termici (heat link) in alluminio estremamente morbidi ad alta conducibilità termica al fine di ridurre al minimo l'accoppiamento del rumore di vibrazione generato dal sistema;
- ✓ **per il sistema di raffreddamento basato su He-II,**
tubo di sospensione riempito di He-II il quale raggiunge la piattaforma tramite una serie di capillari.



tesi M.Ricci - Development of a prototype for ET-LF's cryostat: model and tests of heat links



ET-0007B-20

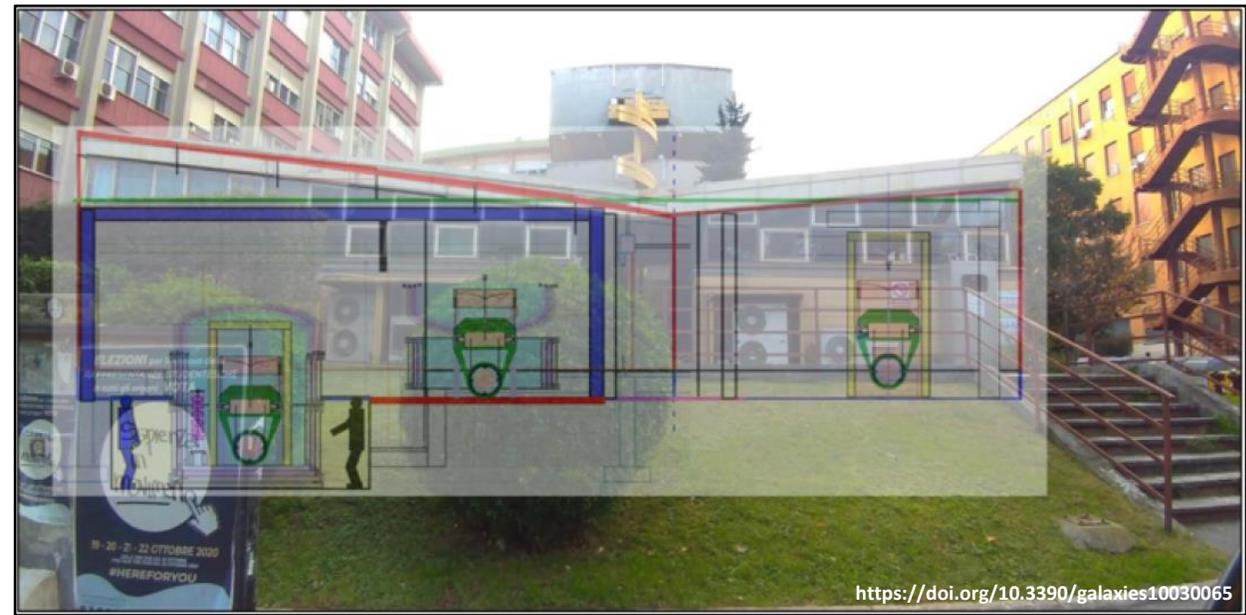


Con un investimento complessivo di 50 milioni di euro (**PNRR, 19-12-2022**), **Einstein Telescope Infrastructure Consortium (ETIC)** si occuperà della preparazione, progettazione ed esecuzione degli **studi di fattibilità e caratterizzazione della miniera dismessa di Sos Enattos** (Sardegna), uno dei siti europei candidati a ospitare ET. Uno degli obiettivi principali di ETIC è **l'identificazione, lo studio e lo sviluppo delle tecnologie** necessarie per raggiungere la sensibilità prevista da ET attraverso il rafforzamento o la creazione di una **rete di laboratori e strutture dedicate** presso le università e le istituzioni.

La Sapienza e INFN Roma sono coinvolti nel progetto e la R&D sarà focalizzata su Criogenia e Payload.

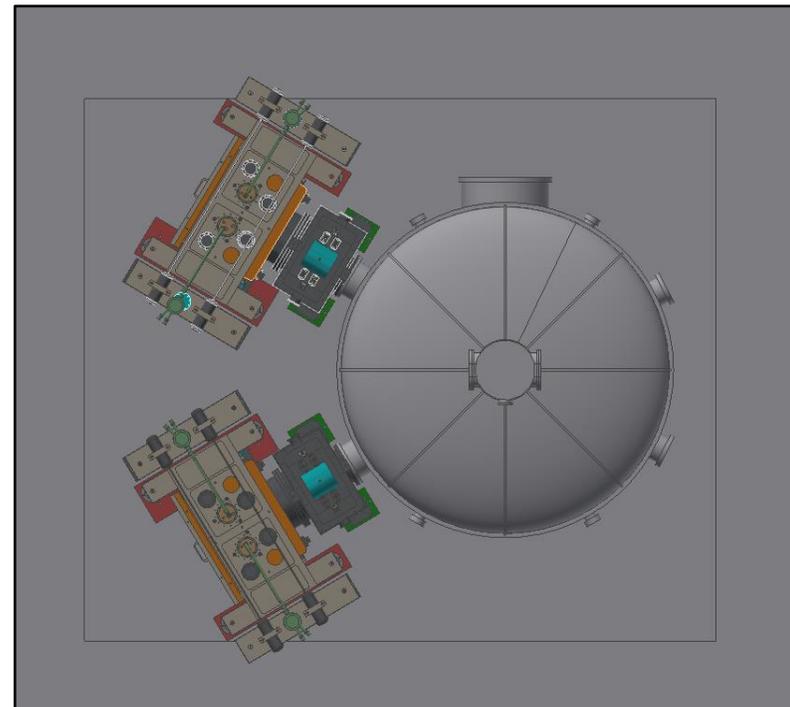
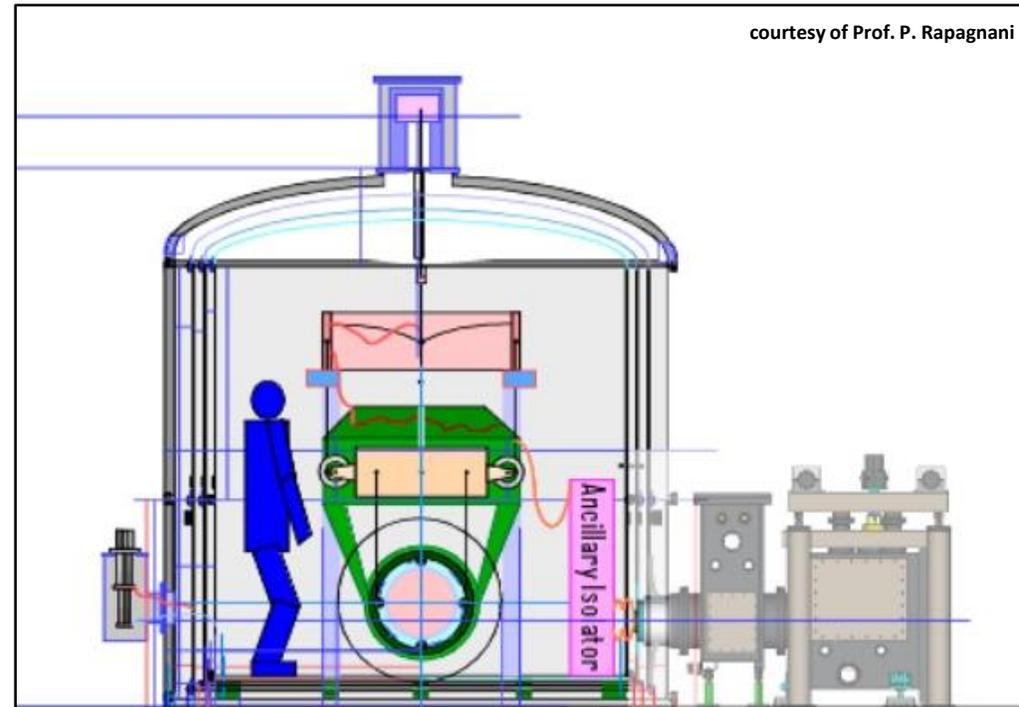
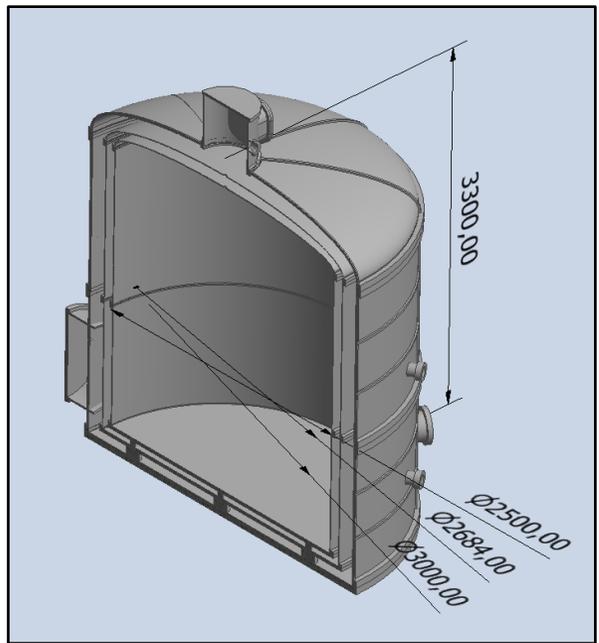
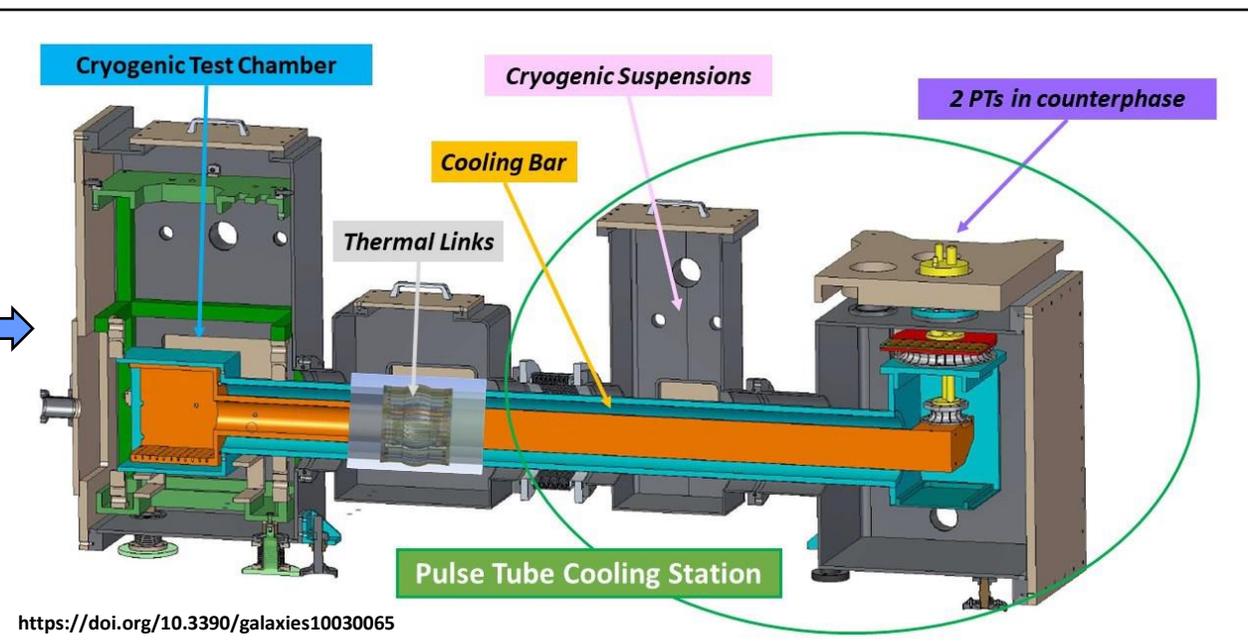
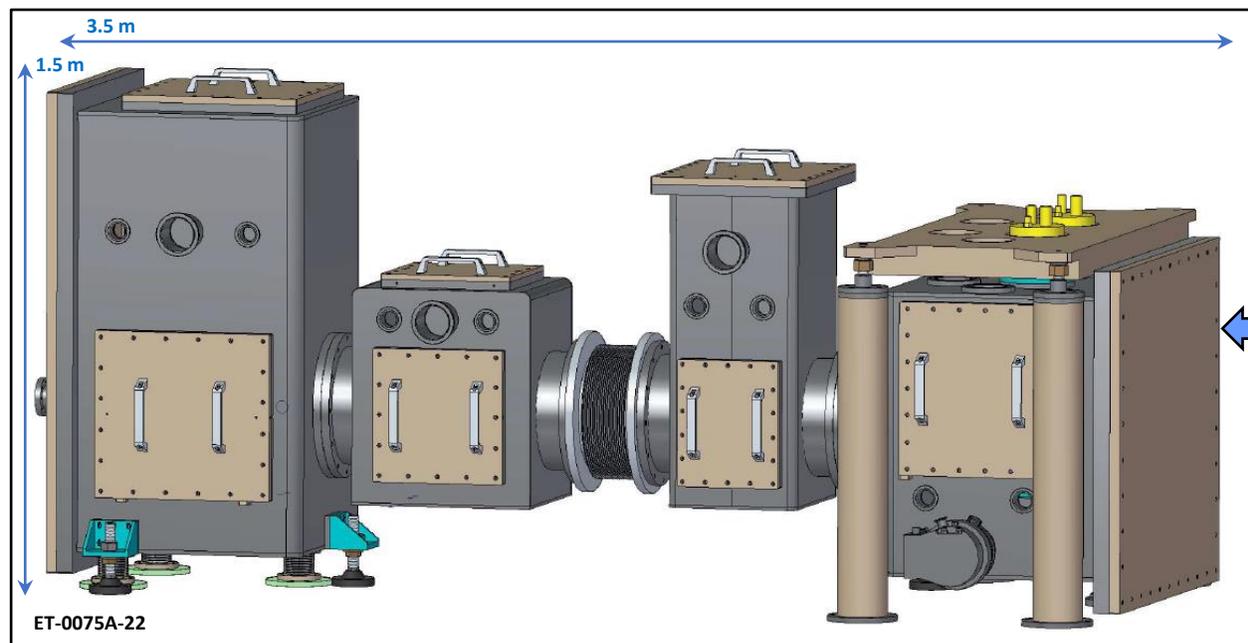
Uno dei laboratori dell'**Amaldi Research Center** ospiterà e testerà un **payload criogenico a grandezza naturale** insieme a un **grande criostato** dotato di **sistema di raffreddamento conduttivo a bassa vibrazione** (pagati sia da ETIC che da ARC).

Questo prototipo di sistema può essere implementato in ET-LF.

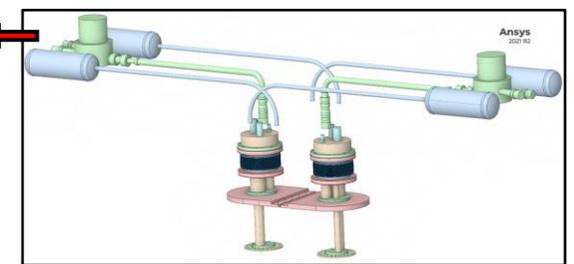
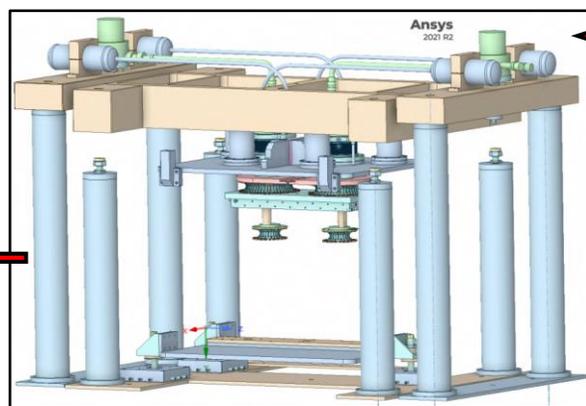
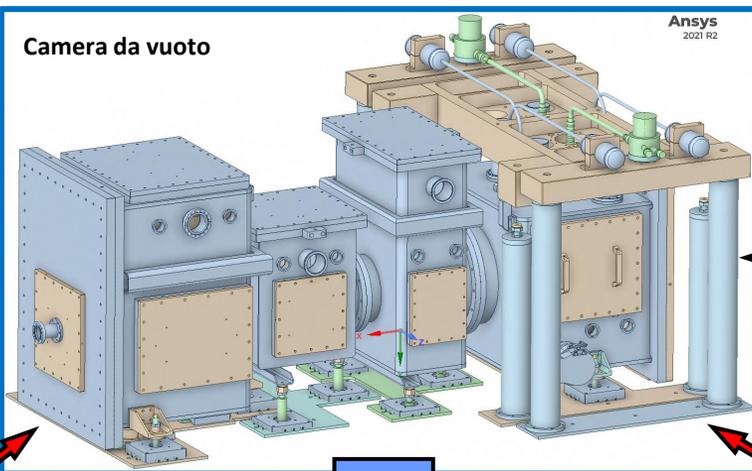


Il programma delle attività è:

1. collaudo del sistema di raffreddamento a pulse-tube in costruzione
2. disegno del payload seguito da test sulle parti cruciali e dalla costruzione del prototipo
3. disegno del criostato basato sulla struttura complessiva della sospensioni e sulla procedura di raffreddamento
4. test del prototipo di payload in camera bianca a temperatura ambiente e studio delle frequenze caratteristiche con la loro dissipazione ad alta e bassa frequenza
5. costruzione del criostato seguita da test criogenici
6. integrazione del payload e test del sistema integrato

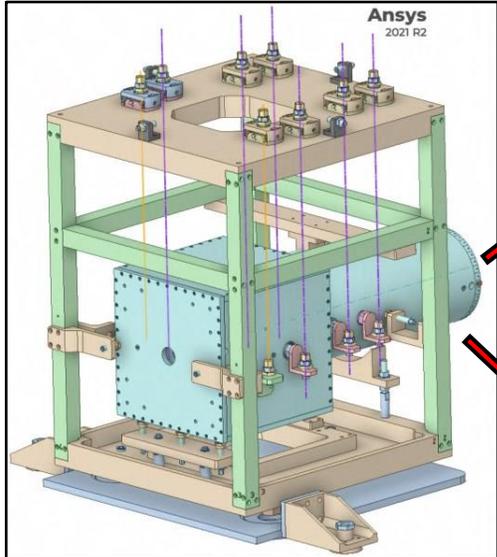


Camera da vuoto

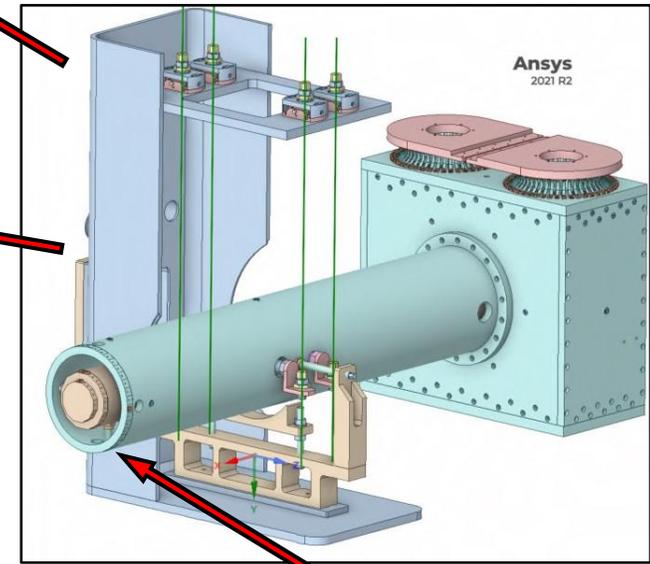
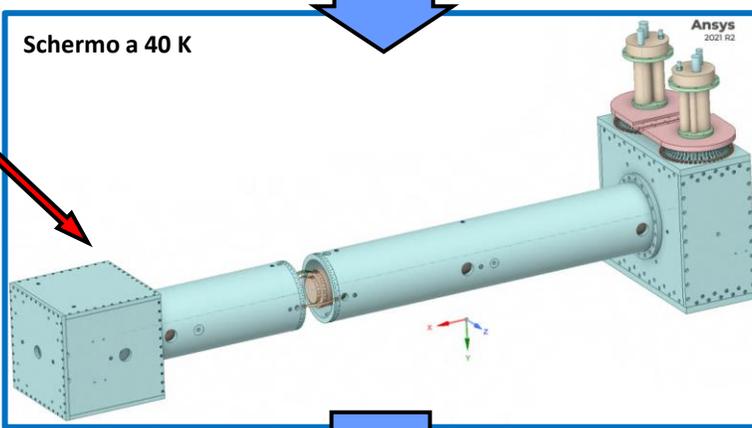


2 pulse-tube – PT420 Cryocoolers di Cryomech Inc.

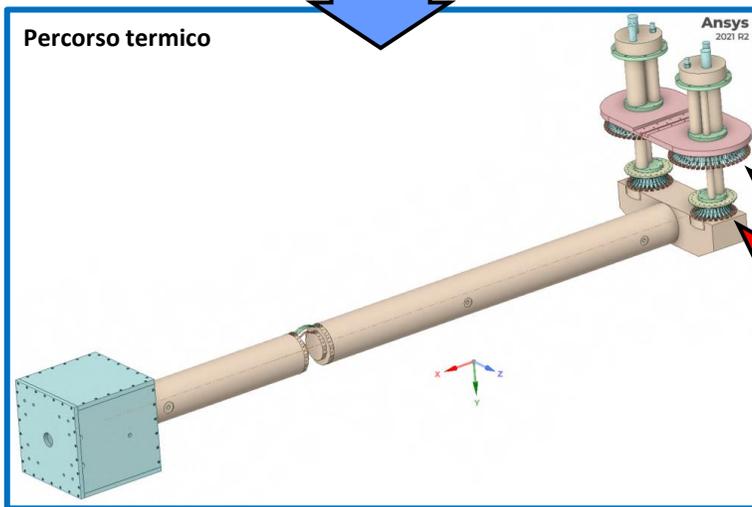
struttura per sostenere i PT e la camera a vuoto che li contiene



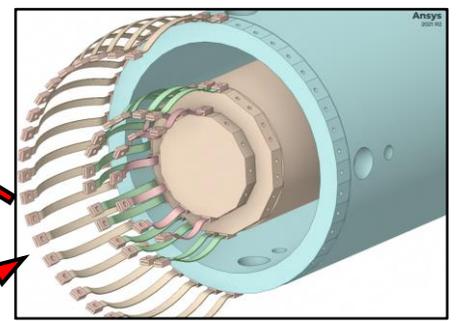
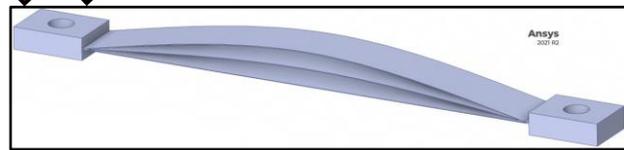
Schermo a 40 K



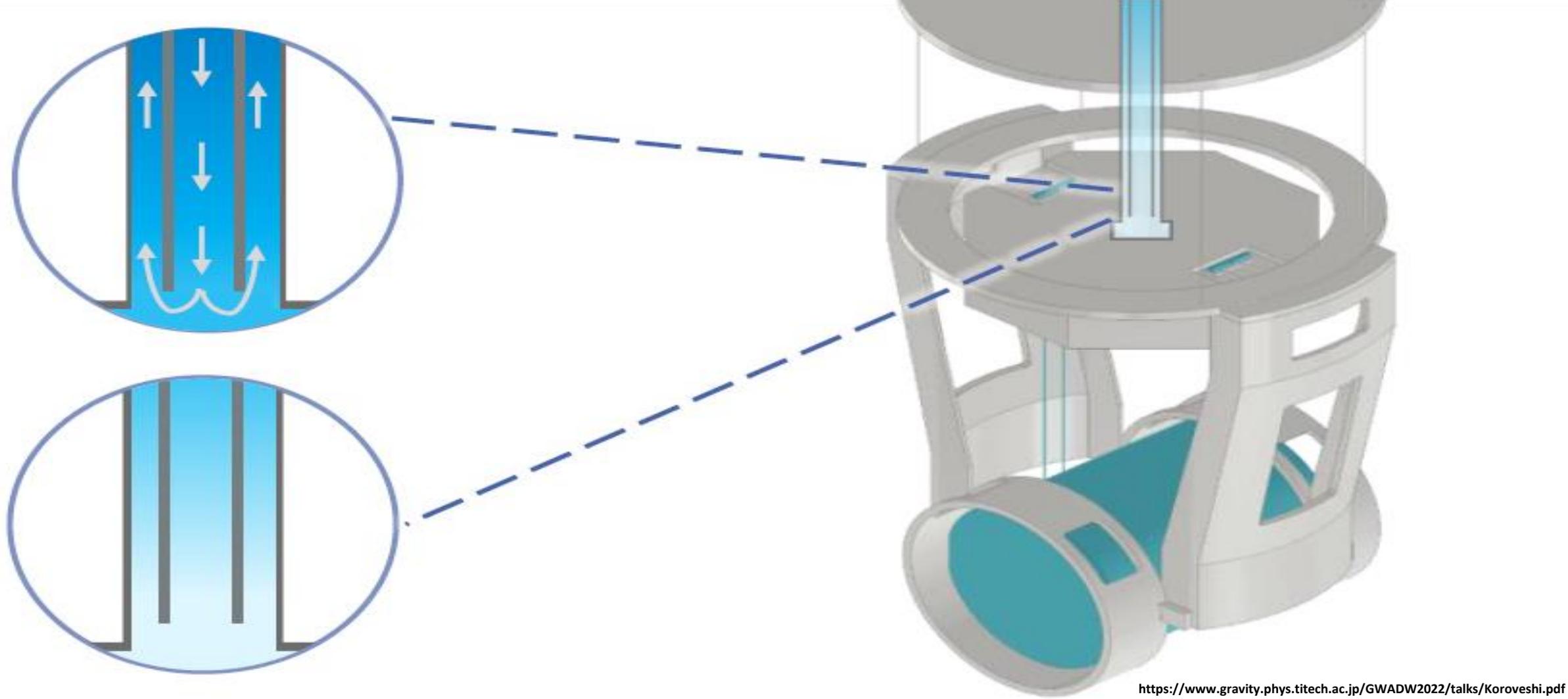
Percorso termico



disegno di un heat-link con tre lamine in parallelo tra i terminali







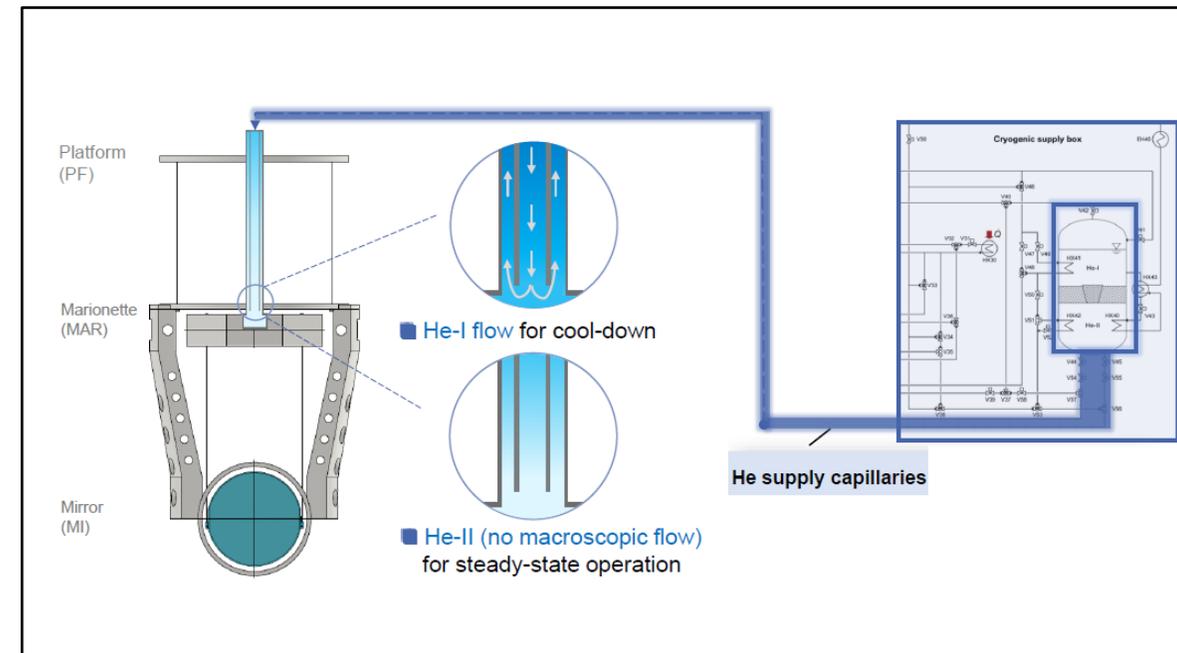
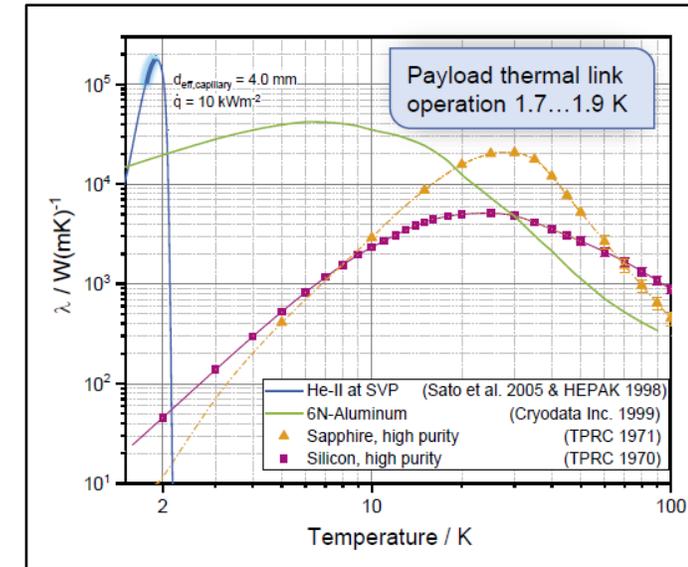
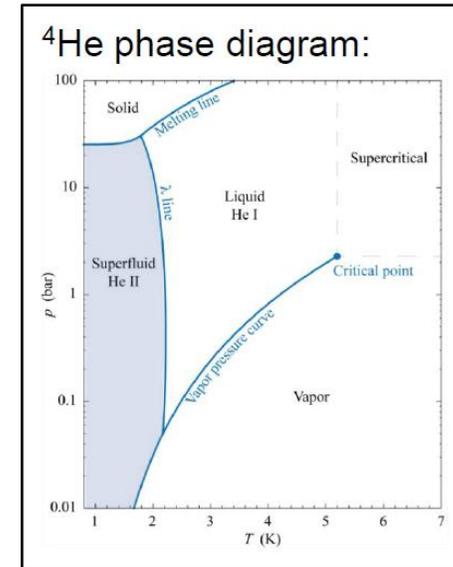
Sistema di raffreddamento
basato su He-II

In alternativa al sistema di raffreddamento basato sulla tecnologia a pulse-tube, è allo studio un **sistema basato sull'elio superfluido (He-II)** per raffreddare gli specchi per le sue eccezionali proprietà di trasporto del calore.

He-II è un fluido quantistico con viscosità zero e può trasportare calore con una conducibilità termica estremamente elevata che consente di fornire più potenza di raffreddamento e di estrarre il calore dagli specchi usando lunghi capillari, tenendo il serbatoio d'elio lontano e riducendo al minimo l'impatto meccanico sul payload.

La marionetta sarà raffreddata a 2 K per mezzo di un tubo di sospensione a doppia parete riempito di He-II.

- Durante il processo di raffreddamento, He-I a temperatura regolabile scorre in contro-flusso attraverso la sospensione a doppia parete per raffreddare la marionetta.
- A regime stazionario, la sospensione è riempita di He-II (liquido a riposo) fornendo un raffreddamento a bassissimo rumore a 2 K tramite conduzione del calore in stato stazionario.



Per maggiori informazioni:

Talk di Claudia Taranto (mercoledì 12-04-2023)

Il rivelatore interferometrico di onde gravitazionali Virgo: stato e prospettive future *Claudia Taranto* 
Auditorium, ex-Monastero dei Benedettini 16:00 - 16:15

Talk di Francesca Badaracco (mercoledì 12-04-2023)

Einstein Telescope: scienza e tecnologia del futuro osservatorio Europeo di onde gravitazionali *Francesca Badaracco* 
Auditorium, ex-Monastero dei Benedettini 16:15 - 16:30

Talk di Michele Punturo, spokesperson della collaborazione ET (venerdì 14-04-2023)

Einstein Telescope: il futuro osservatorio europeo di onde gravitazionali *Michele Punturo*
Auditorium, Ex Monastero dei Benedettini 11:30 - 12:15

*Grazie
per l'attenzione!*

Extra Slides

Gravitational wave signals

can be classified into:

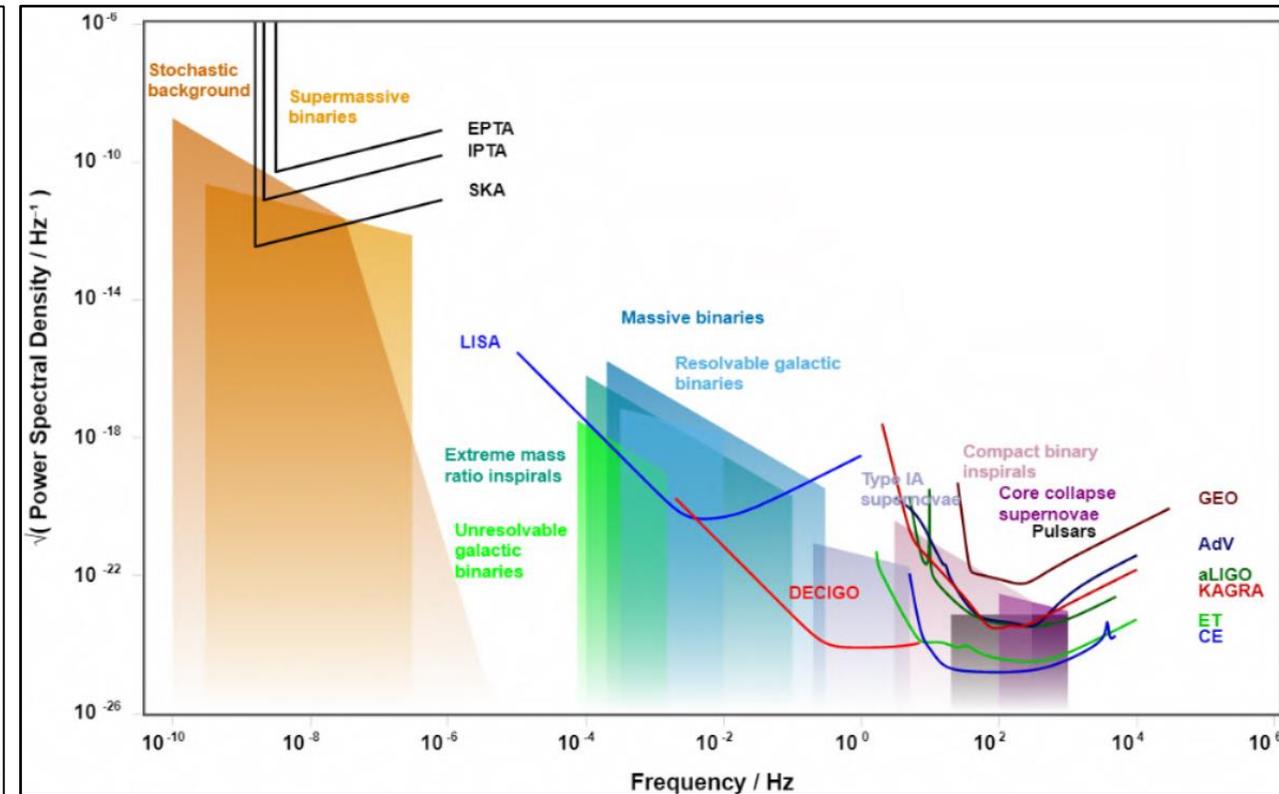
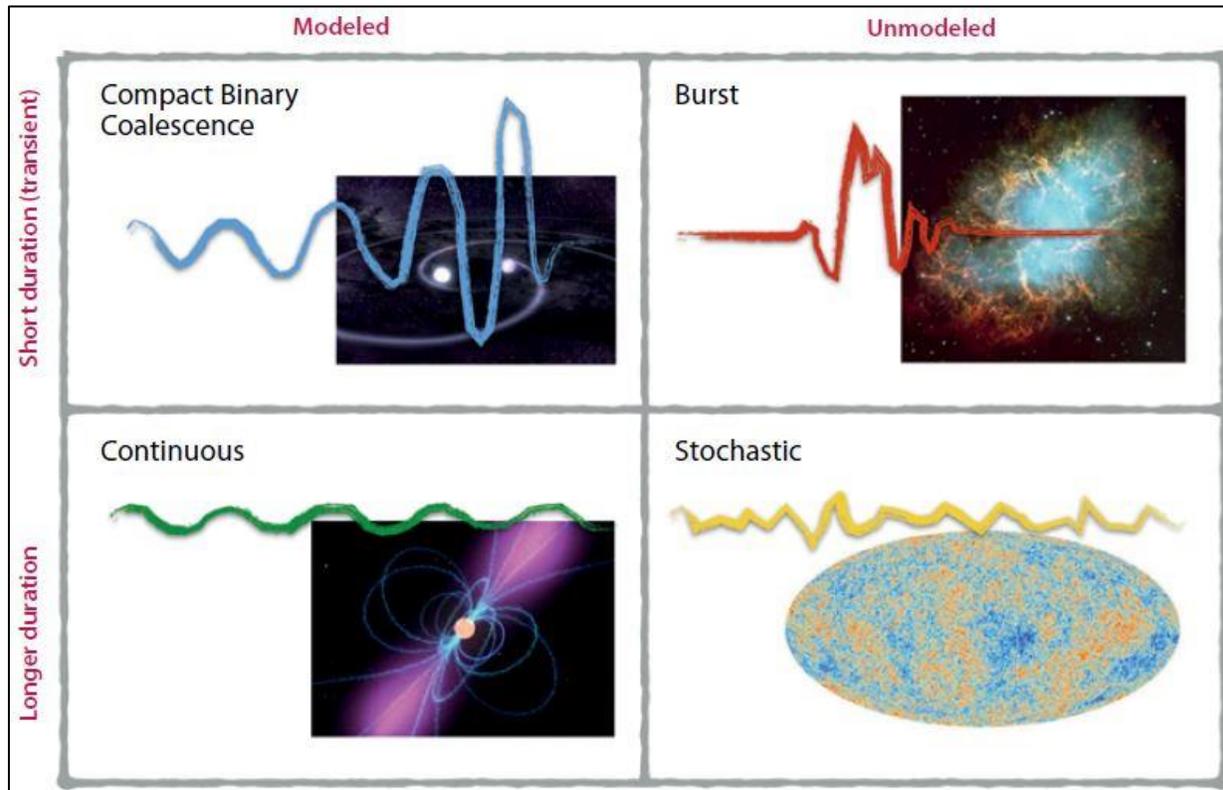
- short duration

such as binary mergers and burst events (e.g. supernova)

- and long duration

such as continuous waves from rotating neutron stars and the stochastic background of gravitational waves

They can also be classified in terms of “**modeled**” and “**unmodeled**” based on how well our astrophysical theories can predict the signal.



GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

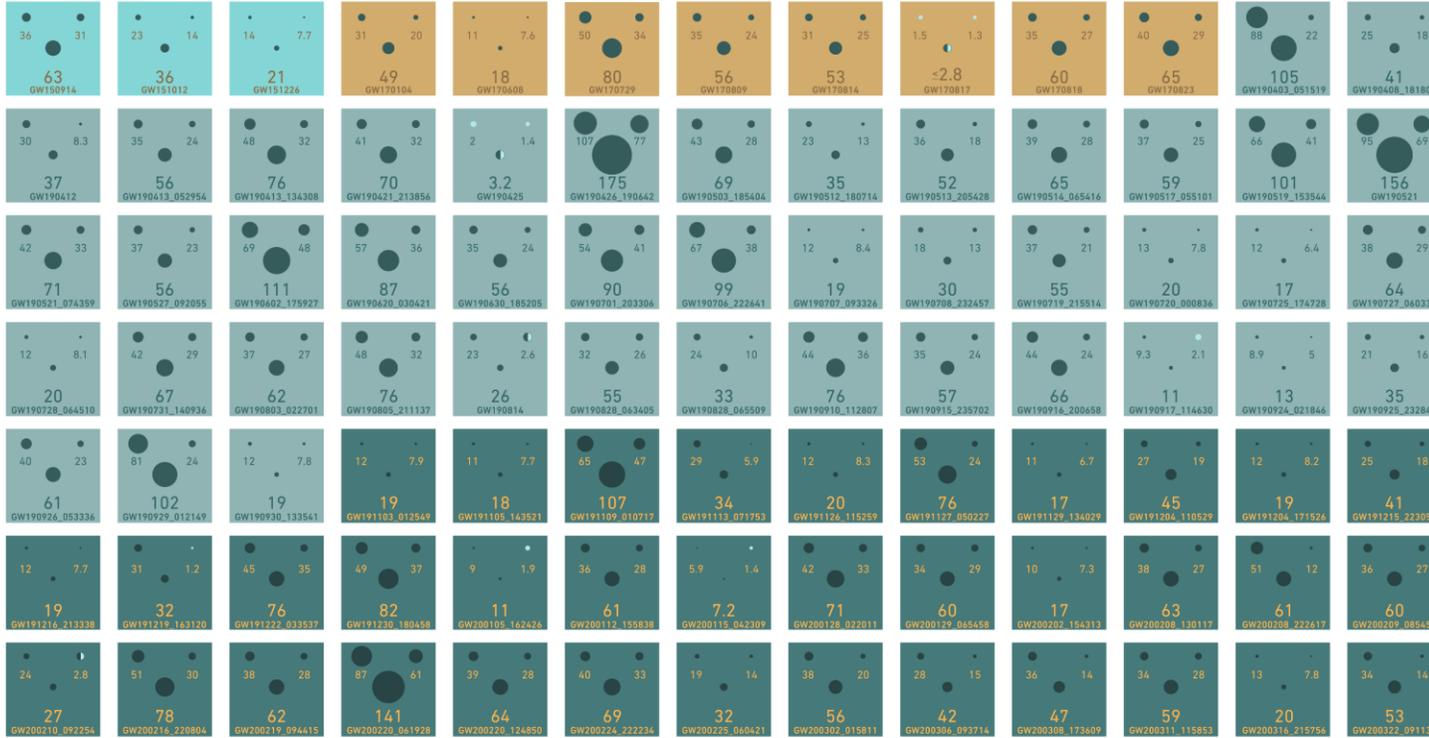
→ SINCE 2015

OBSERVING RUN

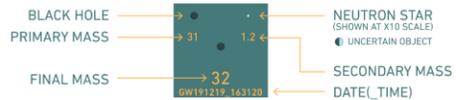
01 2015-2016

02 2016-2017

03a+b 2019-2020



KEY



UNITS ARE SOLAR MASSES
1 SOLAR MASS = 1.989×10^{30} kg

Note that the mass estimates shown here do not include uncertainties, which is why the final mass is sometimes larger than the sum of the primary and secondary masses. In actuality, the final mass is smaller than the primary plus the secondary mass.

The events listed here pass one of two thresholds for detection. They either have a probability of being astrophysical of at least 50%, or they pass a false alarm rate threshold of less than 1 per 3 years.



GW150914

Birth of the Gravitational Wave Astronomy

- ✓ First direct detection of GWs from the merger of two BHs
- ✓ Existence of binary stellar-mass BH systems
- ✓ First observation of a BBH merger

$$35.6^{+4.7}_{-3.1} + 30.6^{+3.0}_{-4.4} \rightarrow 63.1^{+3.4}_{-3.0} (M_{\odot})$$

GW170814

- ✓ First detection of GWs by three detectors
- ✓ First polarisation measurements

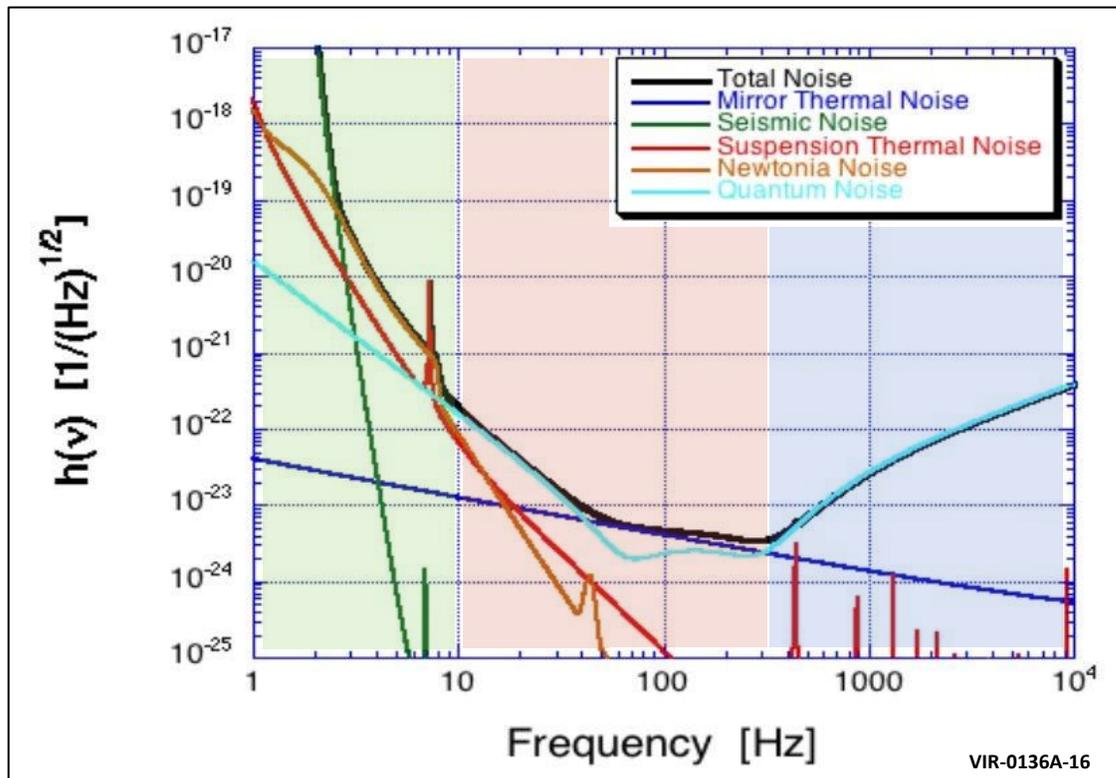
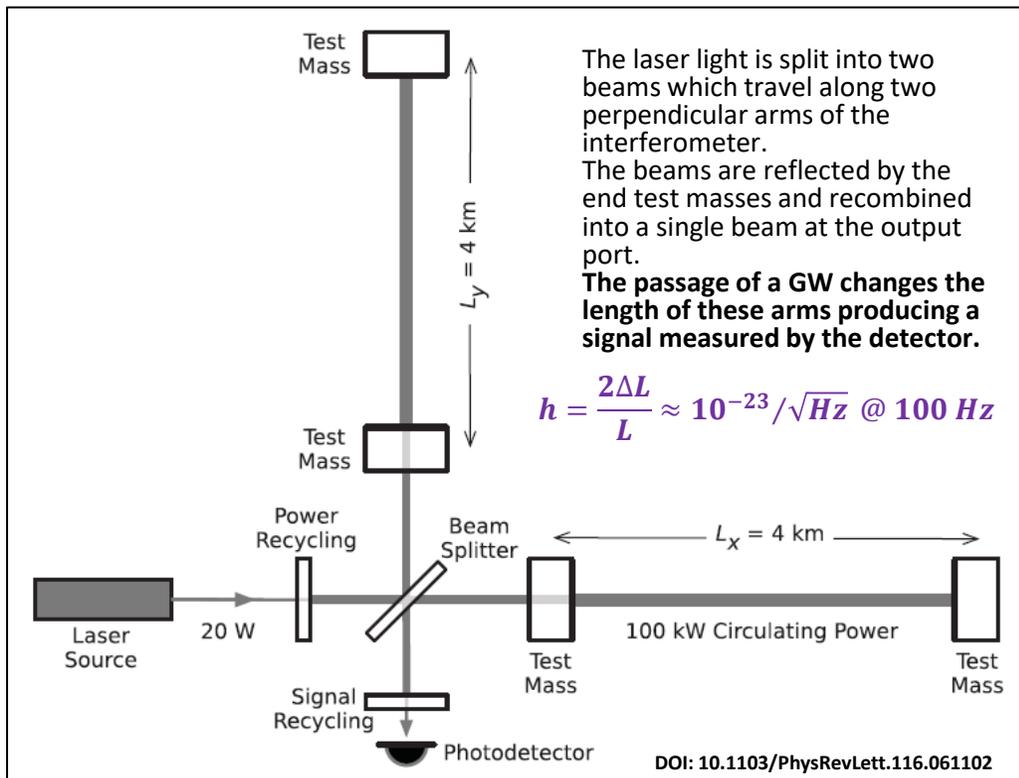
$$30.6^{+5.6}_{-3.0} + 25.2^{+2.8}_{-4.0} \rightarrow 53.2^{+3.2}_{-2.4} (M_{\odot})$$

GW170817

Birth of the Multi-Messenger Astronomy

- ✓ First BNS merger observed in GW
- ✓ First joint detection of gravitational and EM emission (galaxy NGC 4993)
- ✓ First direct evidence of a link between BNS mergers and short γ -rays bursts and kilonova
- ✓ BNS mergers are significant sources of r-process elements heavier than iron (gold and platinum)
- ✓ Speed of gravity and light is very close to zero
- ✓ New measurement of the Hubble constant

$$1.46^{+0.12}_{-0.10} + 1.27^{+0.09}_{-0.09} \rightarrow \leq 2.8 (M_{\odot})$$



Different noise types dominate the various frequency bands and often show opposite responses to different tuning of the same design parameter.

► Shot Noise vs Radiation Pressure Noise

► High Power vs Cryogenic Temperature

Low Frequency

- seismic noise

$$h_{seism} \propto f^{-2}$$

Mid Frequency

- thermal noise of the suspensions $h_{th,sus} \propto \phi_{sus}^{1/2} T^{1/2} m^{-1/2} f^{-5/2}$

- thermal noise of the mirrors $h_{th,mir} \propto \phi_{mir}^{1/2} T^{1/2} f^{-1/2}$

- radiation pressure noise $h_{rad} \propto m^{-1} L^{-1} P_{in}^{1/2} f^{-2}$

High Frequency

- shot noise

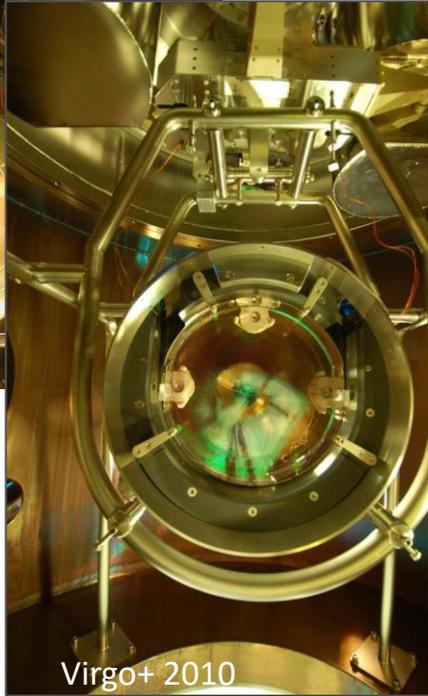
$$h_{shot} \propto L^{-1} P_{in}^{-1/2}$$

After 20 years of effort, the technique for designing and building payloads has become more and more standardized.



Virgo 2003

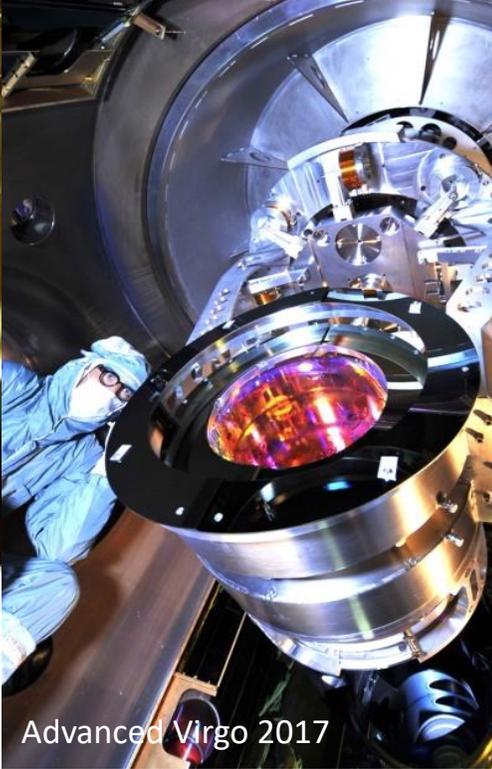
Virgo First scientific run. 20 kg mirror, steel wires suspension



Virgo+ 2010

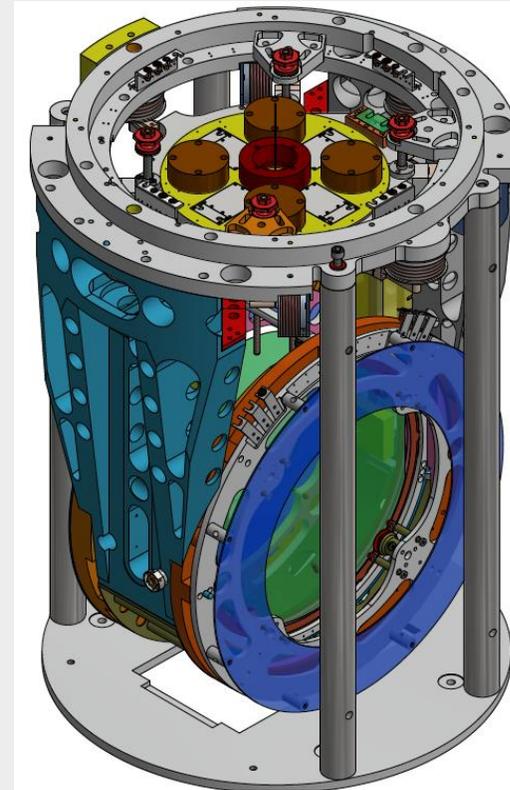
First scientific run with 20 kg mirror with monolithic suspensions,

WEST integra foto : M



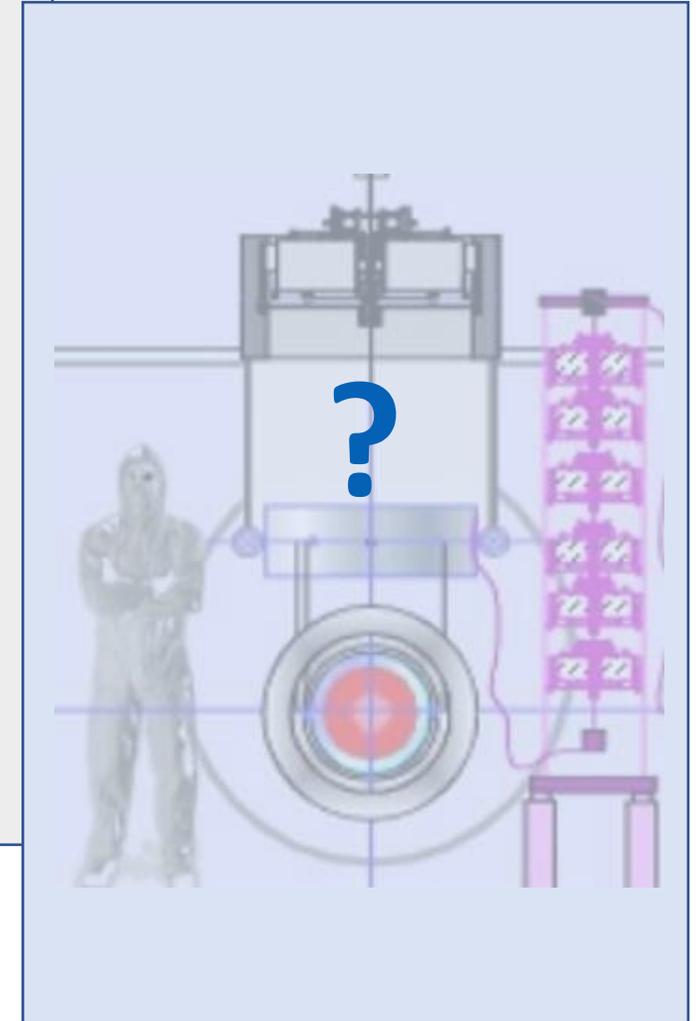
Advanced Virgo 2017

The discoveries and the observations runs. 40 kg mirrors with monolithic suspensions



Advanced Virgo+ phase 2 2023

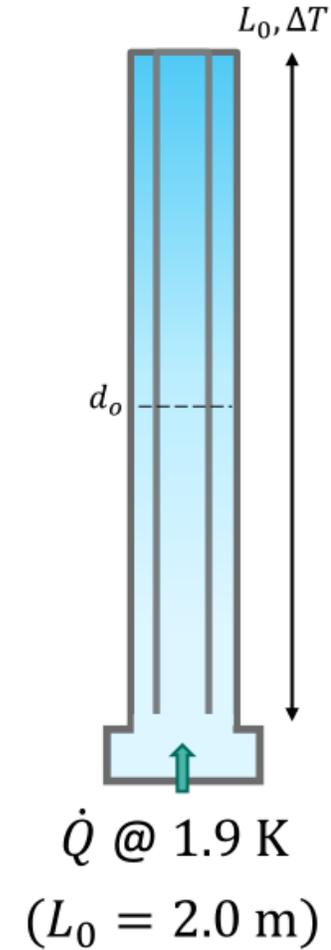
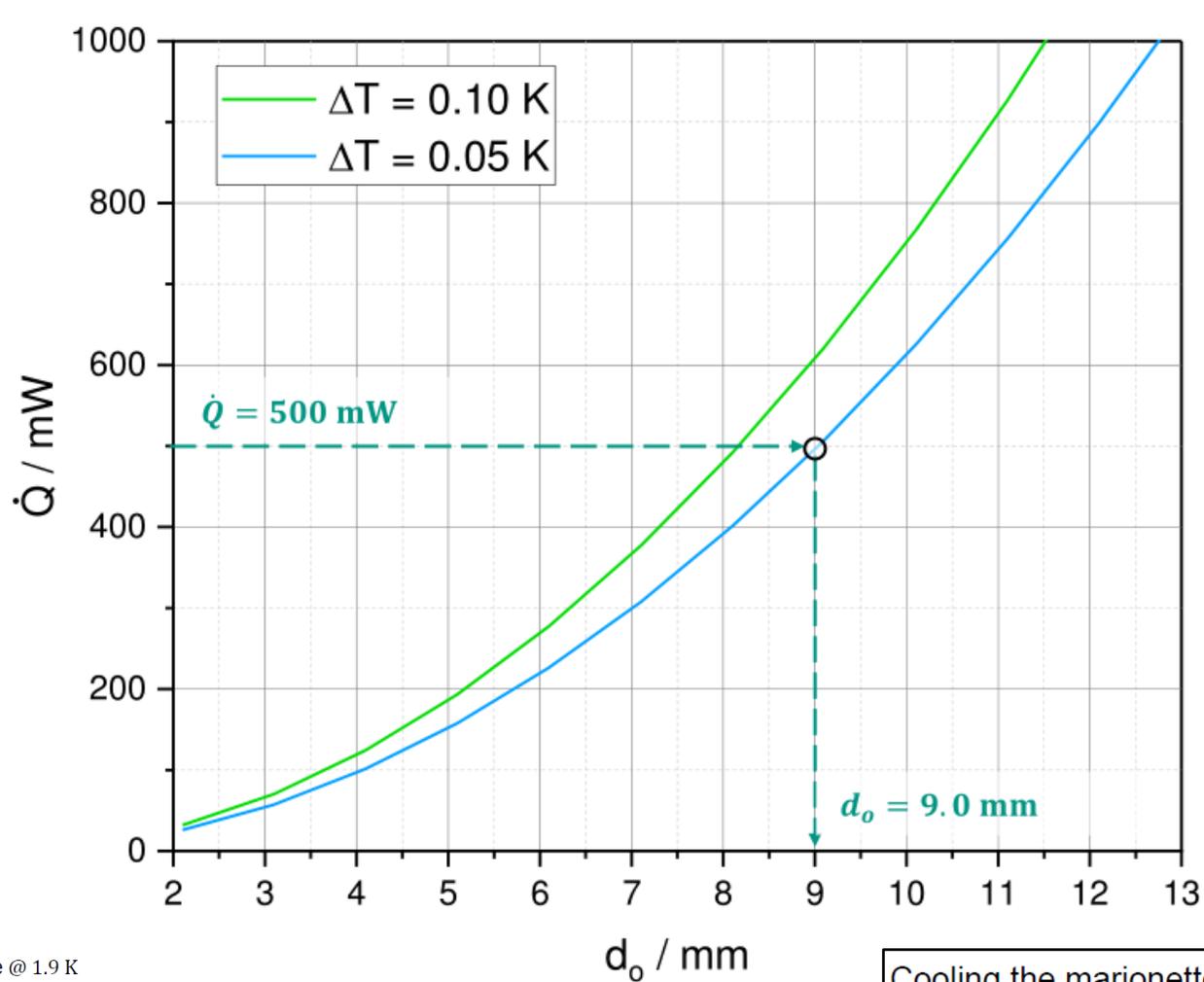
O5 Run in 2023: 100 kg mirrors, monolithic suspensions



The new challenge: ET cryogenic payloads:

200 kg mirrors, with monolithic suspension at $T \leq 20$ K

Cooling capacity via suspension tube



Design parameters:

- T – operational temperature @ 1.9 K
- ΔT – gradient along suspension capillary
- d_i, d_o – inner and outer diameter
- s_i, s_o – inner and outer wall thicknesses
- L_0 – suspension capillary length
- \dot{Q} – cooling capacity

Cooling the marionette @ 2 K using a double-walled, suspension tube filled with He-II is thermally & mechanically feasible:

- Cooling capacities up to 0.5 W, or even up to 1.0 W, are possible.
- $T_{\text{marionette}} @ 2$ K and $T_{\text{mirror}} @ 14 - 20$ K, with $\Delta T \approx 50$ mK along suspension.