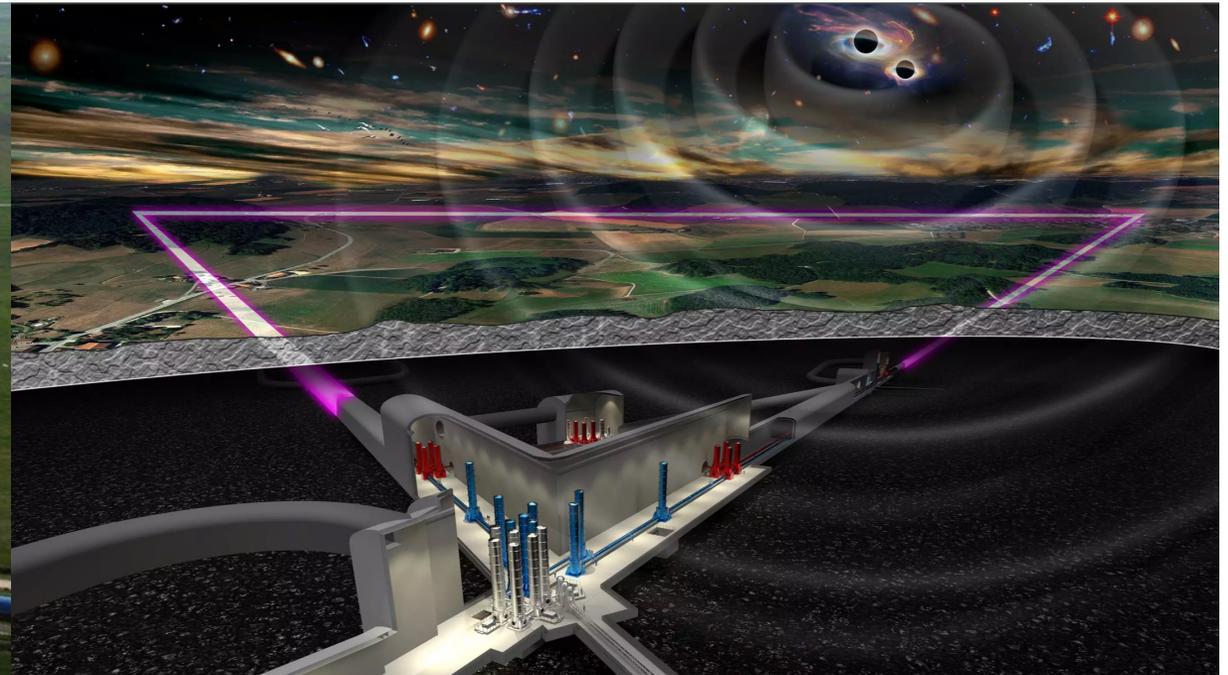




Il Futuro della Scienza Gravitazionale

Ilaria Nardecchia

*INFN-Roma Tor Vergata



Stato dell'arte



- 85 mergers di sistemi binari di BH-BH
- 2 mergers di sistemi binari NS-NS (GW170817-GW190425)
- 2 mergers di sistemi binari misti BH-NS (GW200105/GW210115)

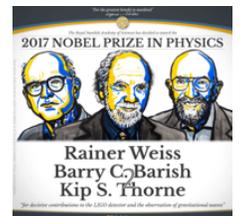
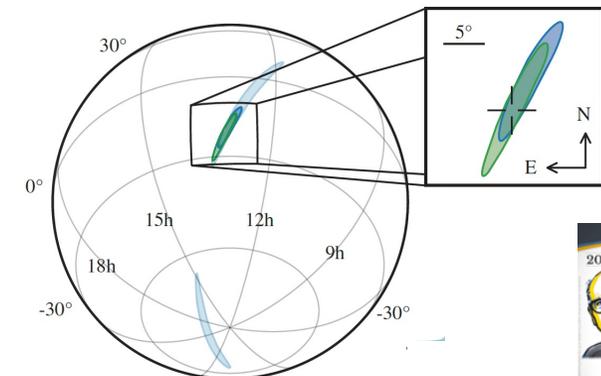
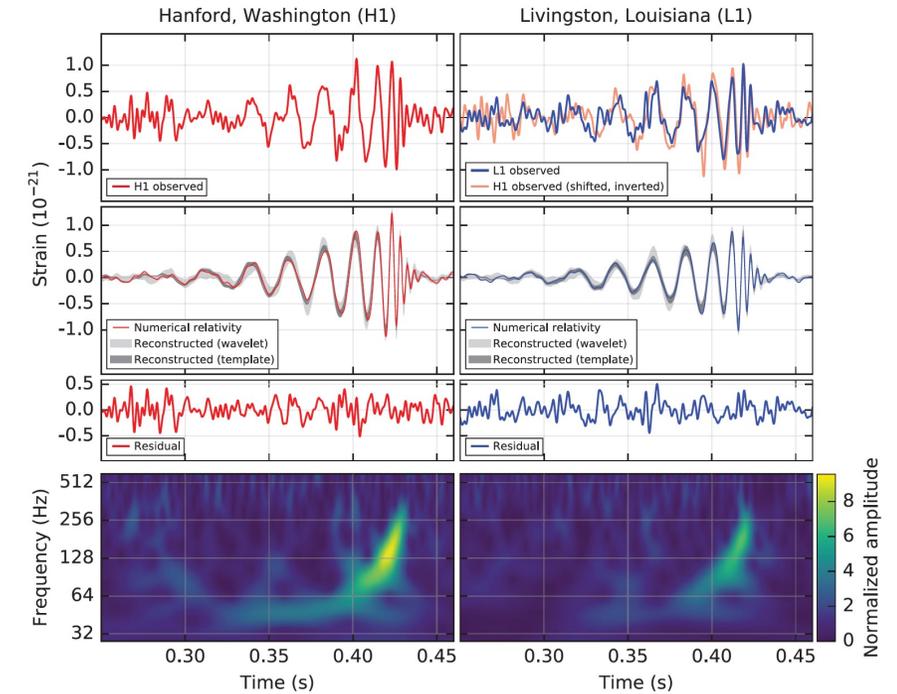
I Primi Eventi:

★ GW150914:

- Prima rivelazione di onde gravitazionali (OG)
- Prima evidenza diretta dell'esistenza di buchi neri
- I buchi neri esistono in coppia
- Prima osservazione della fusione di un sistema binario BH-BH

★ GW170817:

- Prima osservazione della fusione di un sistema binario NS-NS
- Prima rivelazione in entrambe le finestre di osservazione elettromagnetica e gravitazionale
- Prima misura della costante di Hubble
- Identificazione di uno short gamma-ray burst in concomitanza con la fusione del sistema binario.



Scienza gravitazionale



Coalescenza di Buchi neri (BBH) :

- Test della Relatività Generale
→ possibili violazioni
- Distribuzione delle masse dei BH
- Merger di BBH primordiali ($M < M_{\text{sun}}$)
→ Candidati di Materia Oscura

Segnali gravitazionali continui emessi stelle di neutroni:

- Misura dell'ellitticità
- Info sulle equazioni di stato

Segnali gravitazionali continui emessi da nubi di bosoni ultra-leggeri attorno a buchi neri rotanti

→ Candidati di Materia Oscura

Coalescenza di stelle di neutroni (BNS)

(Astrofisica Multi-Messaggera)

- Emissione Gravitazionale
- Emissione elettromagnetica
- Emissione di neutrini
- Osservazione di gamma-ray burst
- Investigazione dei meccanismi all'origine dei jet relativistici
- Studio delle equazioni di stato dalle ultime fasi di spiraleggiamento
- Misura della costante di Hubble

Radiazione gravitazionale emessa dalle esplosioni di Supernova:

(Astrofisica Multi-Messaggera)

- Investigazione dei meccanismi all'origine dell'esplosione
- Osservazione in coincidenza con un gamma-ray burst lungo (> 2 s)



Il futuro di Virgo

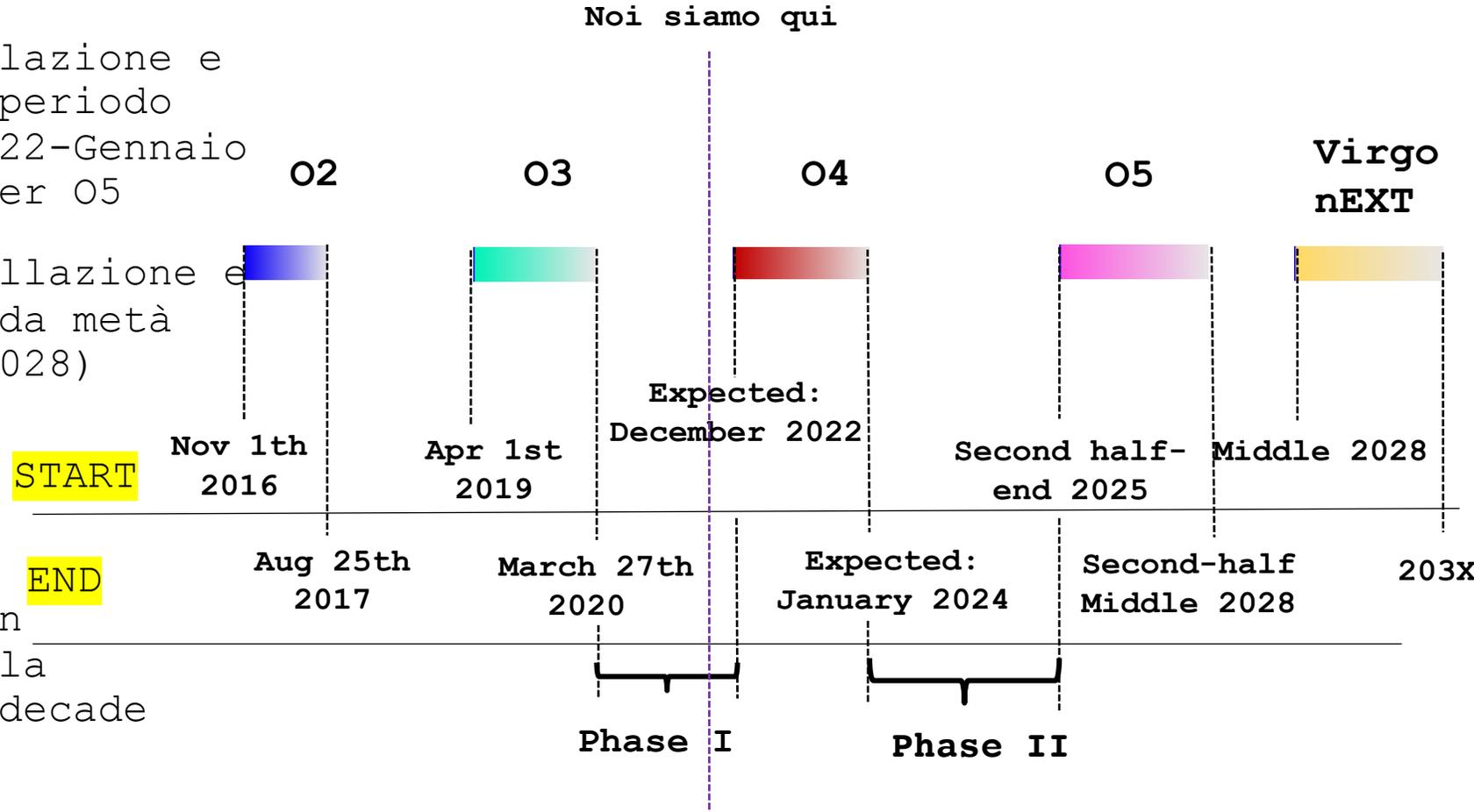
Advanced Virgo+

- **Fase I:** costruzione, installazione e commissioning in vista del periodo osservativo **04** (Dicembre 2022-Gennaio 2024) e completamento R&D per 05
- **Fase II:** costruzione, installazione e commissioning per **05** (Seconda metà del 2025-Seconda metà del 2028)

Virgo nEXT

(exploiting the present infrastructure to its **EXTremes**)

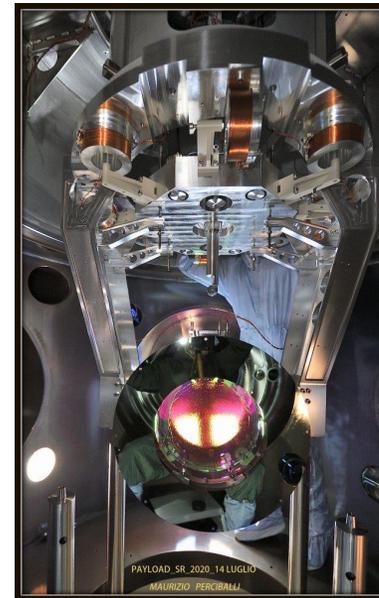
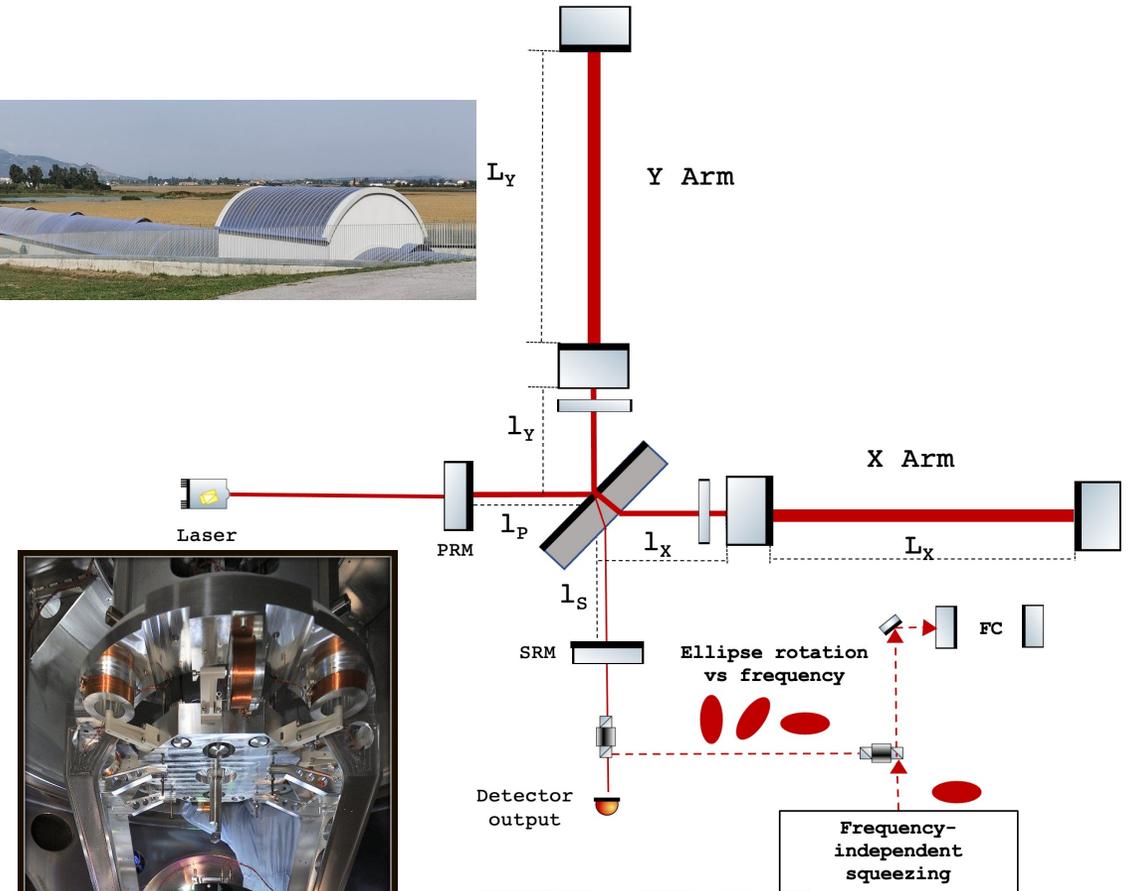
- Studio di fattibilità per un ulteriore miglioramento della sensibilità di Virgo nella decade Post-05 (2028-203X)
- Obiettivi: garantire la rilevanza di Virgo sulla scena internazionale e preparare la transizione verso la 3G.



Advanced Virgo+ Fase I

Configurazione per O4:

- Potenza Target: **40 W** (~ 250 kW **circolante nelle cavità**)
- Cavità di ricircolo di segnale: → per estendere il range di frequenze dove la risposta dell'interferometro al passaggio di un segnale gravitazionale è massima
- Cavità di filtraggio (FC) per iniettare luce squeezed frequency-dependent nel rivelatore: → riduzione del rumore quantistico in tutto il range di frequenze di rivelazione
- **Installazione completata in Aprile 2021**
- **Commissioning dell'interferometro in corso**



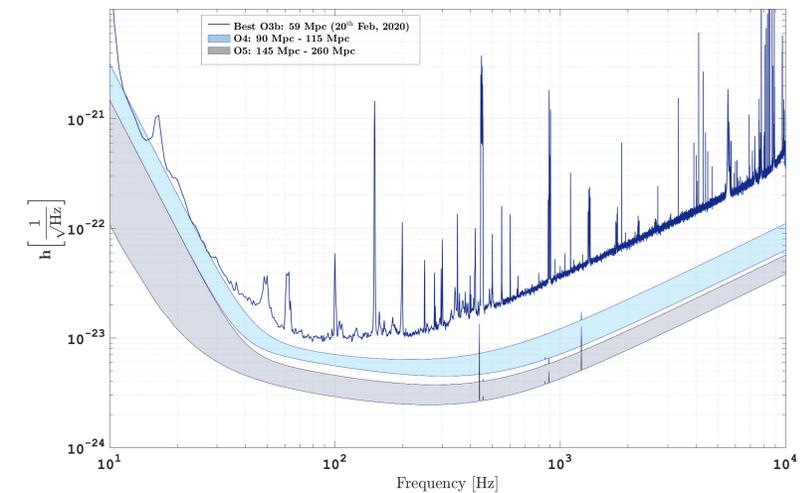
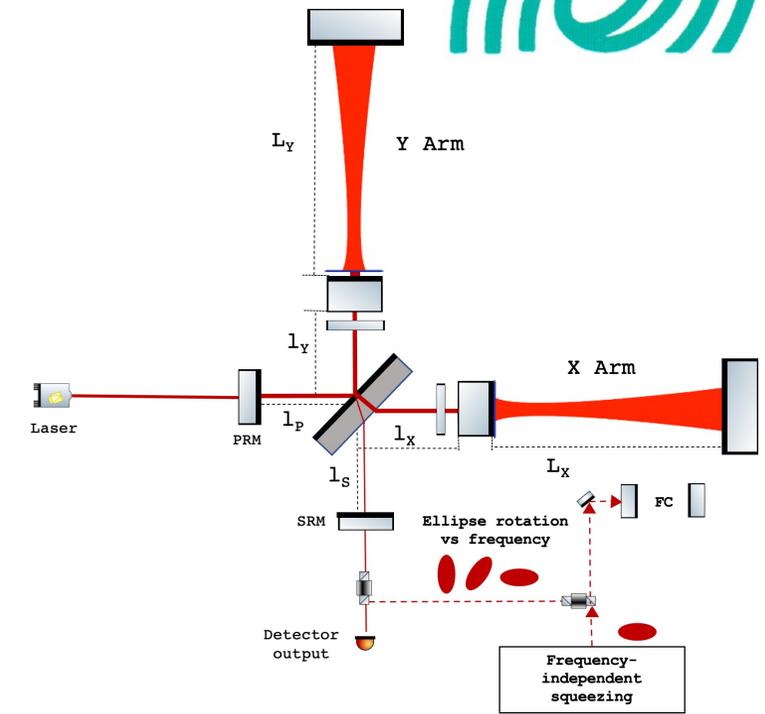
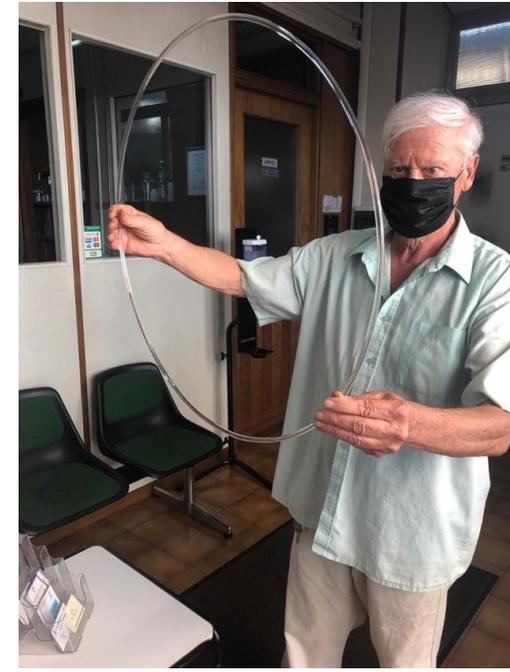


Advanced Virgo+ Fase II

O5:

- Potenza Target: **80 W (~ 500 kW circolante nelle cavità)**
- Fasci più grandi sugli specchi terminali per ridurre il rumore termico
- Diametro: 35 cm → 55 cm

- Specchi terminali più pesanti per ridurre il rumore quantistico nell'intervallo [10-40] Hz
- Peso: 40 kg → 100 kg



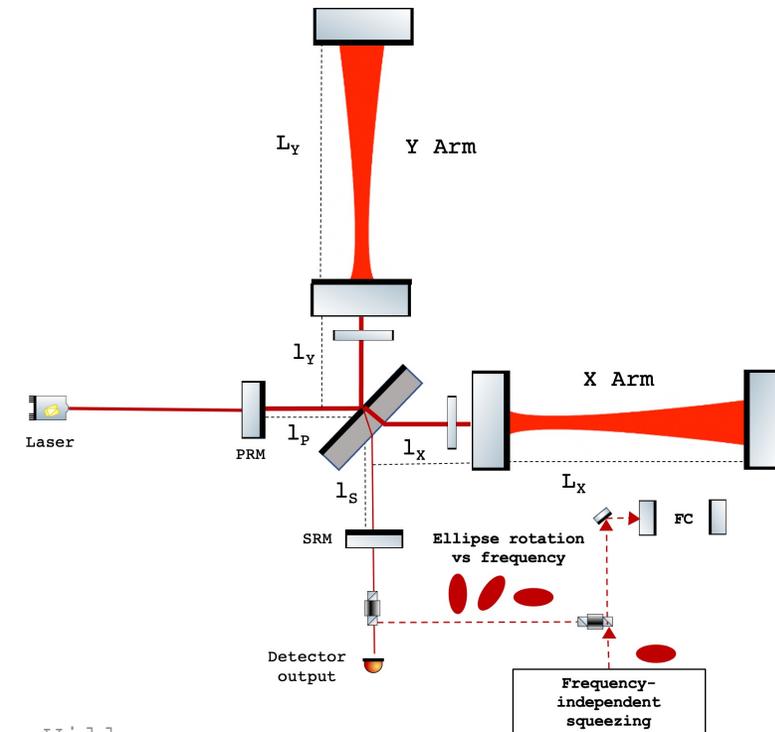
Periodo osservativo	Range di rivelazione BNS
O4	[80-115] Mpc
O5	[145-258] Mpc

Virgo nEXT



- nEXT: exploiting the present infrastructure to its EXTremes
- Test su scala ~ 1:1 di alcune tecnologie per la terza generazione (3G)
- Risk reduction per 3G
- Aumento della sensibilità di un fattore 2 rispetto ad Advanced Virgo+
- Inizio dell'installazione: fine 05
- Potenza Target: **250 W (~ 1.5 MW circolante nelle cavità)**
- Specchi di input più pesanti per ridurre ulteriormente il rumore quantistico nell'intervallo [10-40] Hz
-Peso: 40 kg → 100 kg

Periodo osservativo	Range di rivelazione BNS
04	[80-115] Mpc
05	[145-258] Mpc
Virgo nEXT	[258-500] Mpc

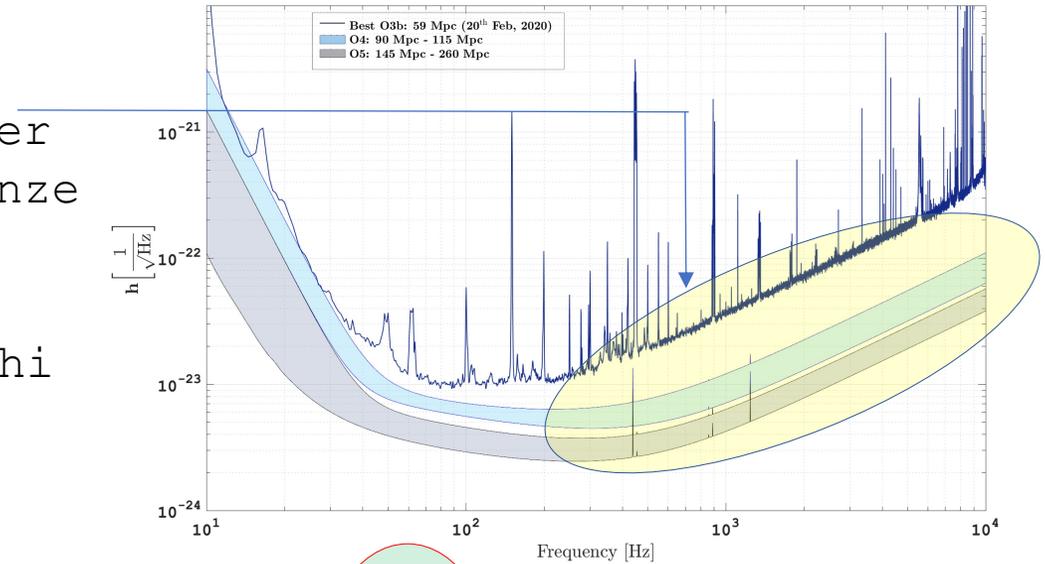


Ottica adattiva in Virgo: il Sistema di Compensazione Termica (TCS)

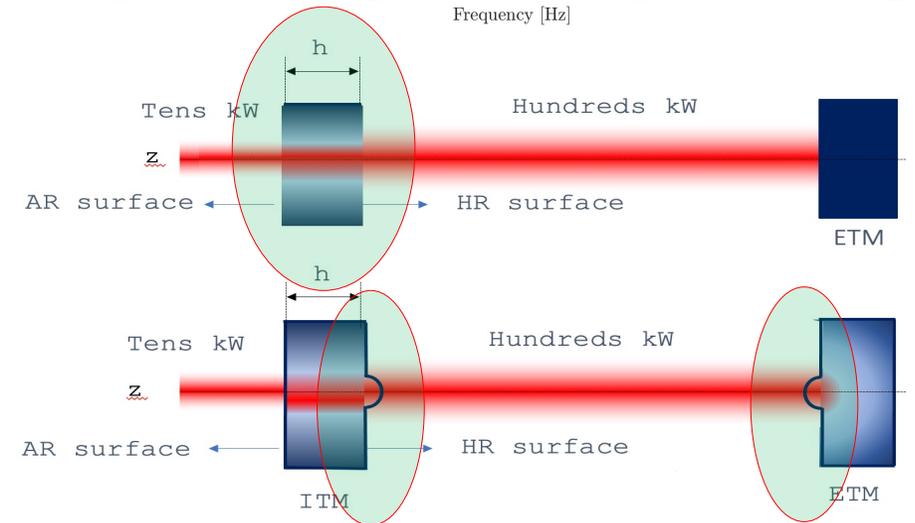


Negli interferometri del futuro la potenza circolante in cavità sarà dell'ordine dei MW per ridurre il rumore quantistico alle alte frequenze [$\propto 1/\sqrt{P \text{ input}}$]

- Riscaldamento dell'area centrale degli specchi
- Alterazione delle proprietà ottiche nominali
- Perdita di sensibilità e della capacità di controllo del rivelatore



- **Lente termica negli specchi di ingresso della cavità ottica**



- **Deformazione termoelastica sugli specchi**

Sviluppo del sistema di ottica adattiva per ripristinare le caratteristiche ottiche nominali degli specchi

Ottica adattiva in Virgo: il Sistema di Compensazione Termica (TCS)

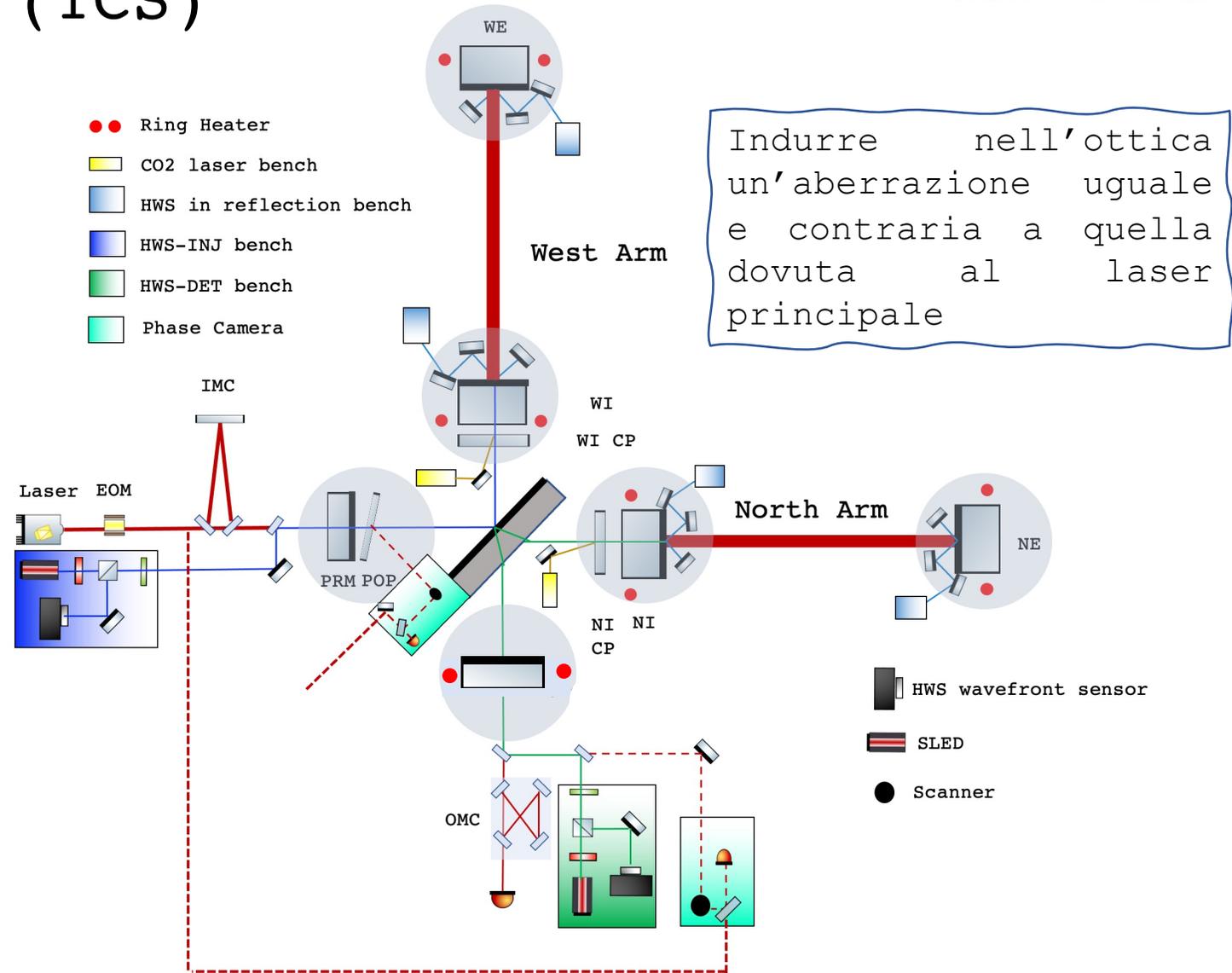


Attuatori TCS:

- **Laser CO₂** per compensare la lente termica negli specchi di ingresso;
- Ring Heater (**RH**) per correggere la deformazione termoleastica sulla superficie HR dello specchio.

Sensori TCS:

- Hartmann Wavefront Sensor nella cavità di ricircolo (**HWS-RC**) per misurare la lente termica;
- Hartmann Wavefront Sensor sulle superfici HR degli specchi (**HWS-HR**) per misurarne la variazione dei raggi di curvatura.

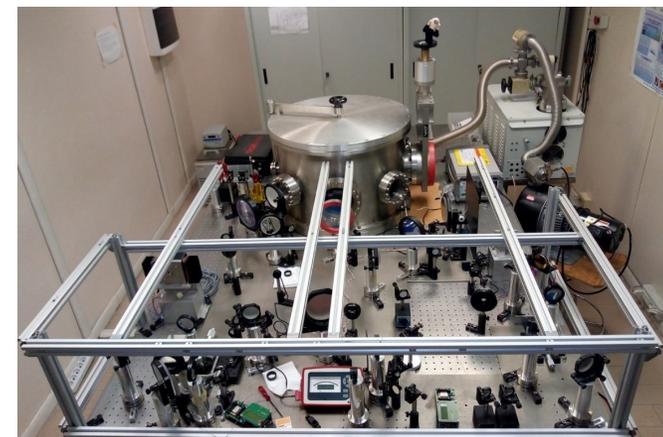


Ottica adattiva in Virgo: il Sistema di Compensazione Termica (TCS)



- Simulazioni agli elementi finiti per valutare l'entità degli effetti termici su ciascuna ottica
- Simulazioni ottiche dell'interferometro per valutare l'impatto degli effetti termici nel comportamento globale
→ definizione delle dinamiche di attuazione
- R&D per lo sviluppo dei sensori e degli attuatori che soddisfino le specifiche richieste
- Costruzione e caratterizzazione nel laboratorio PP1 di Roma ToV
- Installazione presso il sito dell'esperimento
- Commissioning

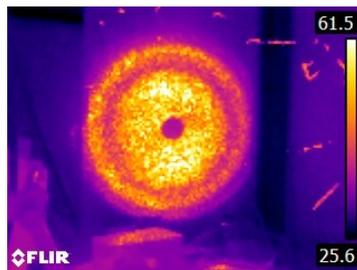
Mini-sistema di compensazione termica presso i laboratori Virgo ToV



Assemblaggio dei RH presso Virgo @ Yury Minenkov



Banchi CO2 installati presso l'interferometro Virgo @ Diana Lumaca



10 Anni INFN- Roma Tor Vergata- Villa Mondragone 11 Maggio 2022



Il sistema di ottica adattiva del futuro

Da Virgo verso ET:

maggiore potenza circolante → sistemi di controllo più sofisticati e performanti

- Nuovi attuatori:
 - Compensazione dei punti assorbitori (osservati in O3)
 - Compensazione dei difetti non assi-simmetrici con specchi deformabili
- Nuovi sensori di fronte d'onda a basso rumore (nuove tecnologie-in collaborazione con il gruppo LIGO dell'Università di Adelaide (AU))

ET

- **Aumento della sensibilità di un fattore 10**
- **Configurazione a xilofono**



ET-HF (High-Frequency):

- Underground
- **Potenza circolante nelle cavità ~3 MW**
- Specchi da 55 cm di diametro
- Nuovi materiali per il coating
- **Sistema di compensazione termica**
- Frequency-dependent squeezing

ET-LF (Low-Frequency):

- Underground
- Criogenico (~ 10 K)
- Specchi di silicio
- Specchi da 55 cm di diametro
- Nuovi materiali per il coating
- Studio di lunghezze d'onda alternative
- Frequency-dependent squeezing

Virgo-ET a Tor Vergata



Advanced Virgo+:

- Ottica adattiva (responsabilità del sistema TCS)
- Commissioning
- R&D su nuovi materiali per i rivestimenti degli specchi di Virgo
- Ricerca di segnali continui da pulsar isolate e in sistemi binari
- Ricerca di segnali gravitazionali prodotti da materia oscura
- Astrofisica Multi-Messaggera

ET:

- Ottica adattiva (responsabilità Work Package wavefront sensing and control)
- R&D materiali innovativi per gli specchi ET-LF e ET-HF
- ...

Virgo nEXT:

- Chair del post-05 committee.



Grazie per l'attenzione