Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU

Ministero dell'Università e della Ricerca

Italiadomani PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA

INFN

Astronomy Astrophysics Space Science PhD - Rome

TOR VERGATA UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
Macroarea di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

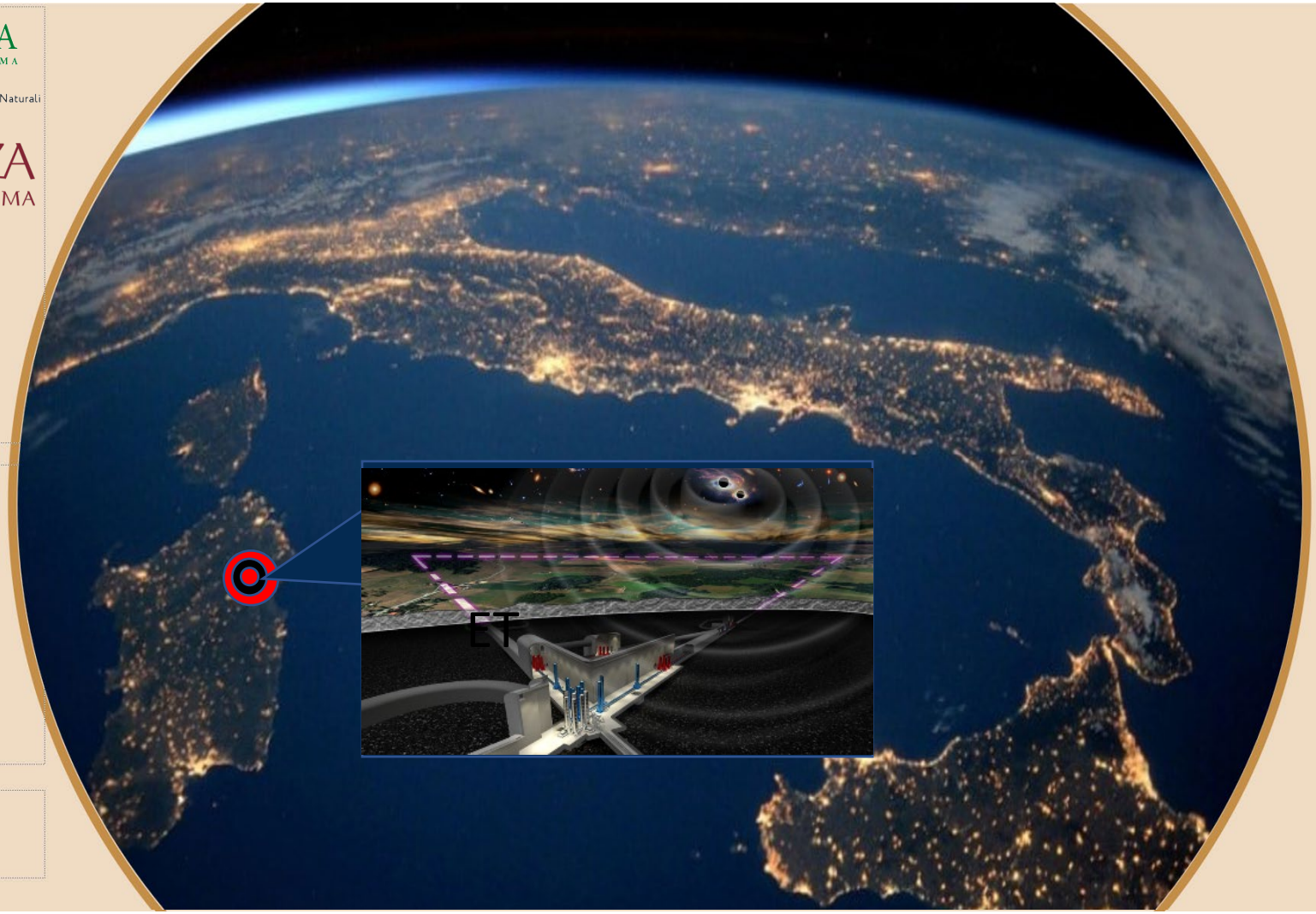
SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA

La sensibilità dei Rivelatori di Onde Gravitazionali: Il Ruolo della Compensazione Termica

M. Ianni, L. Aiello, E. Cesarini, M. Cifaldi, V. Fafone, M. Lorenzini, D. Lumaca, Y. Minenkov, I. Nardecchia, A. Rocchi, V. Scacco, C. Taranto

IFAE 2025

Cagliari 09/04/2025



ET ITALY Einstein Telescope

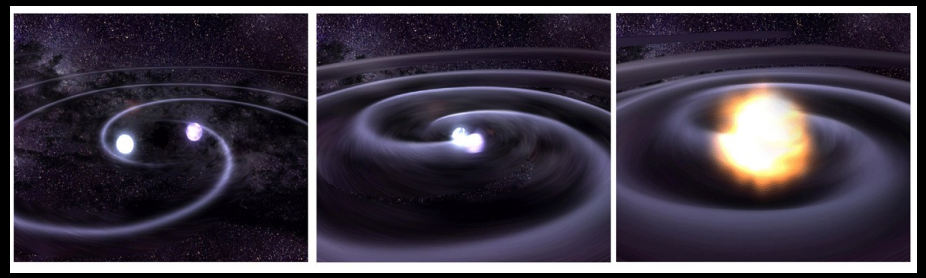
AILV ET ADVANCED OPTICS LAB @ TOR VERGATA FOR ET

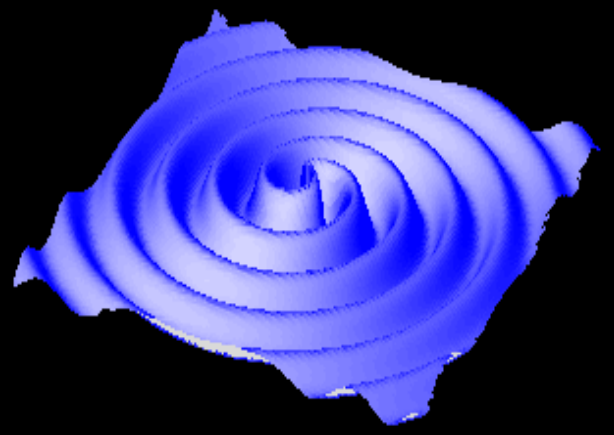
VIRGO

Le Onde Gravitazionali

- Increspature dello spazio-tempo;
- Soluzione dell'equazione di Einstein:

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

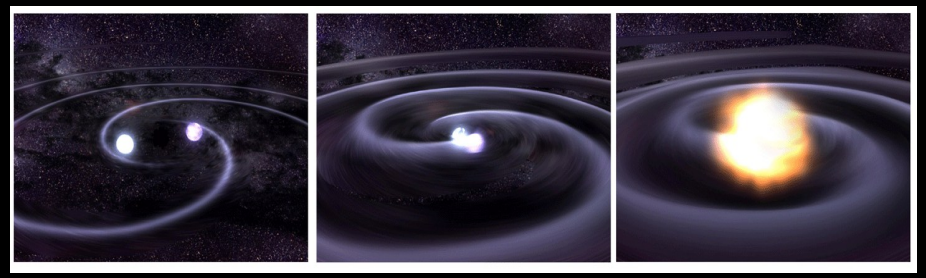




Le Onde Gravitazionali

- Increspature dello spazio-tempo;
- Soluzione dell'equazione di Einstein:

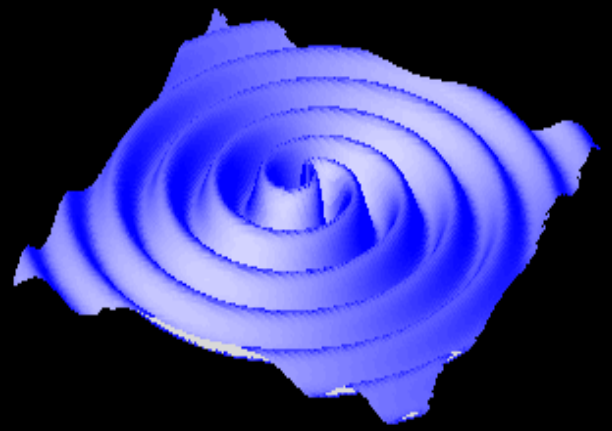
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu};$$



- Emissione di Onde Gravitazionali:

$$L = \frac{2G}{5c^5} \langle \dddot{Q}_{ij} \dddot{Q}^{ij} \rangle \sim \varepsilon^2 \frac{c^5}{G} \left(\frac{R_S}{R}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad \rightarrow$$

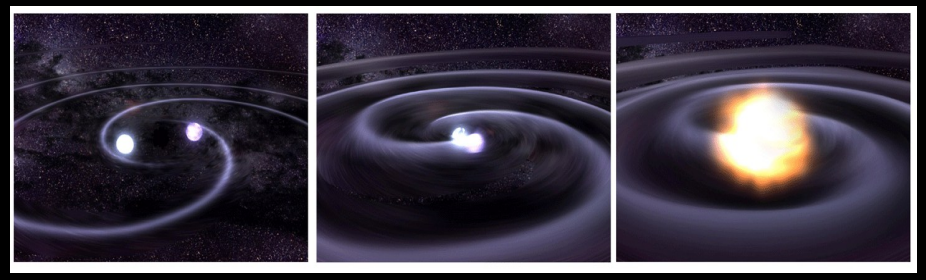
Sorgenti
Asimmetriche – Compatte – Relativistiche



Le Onde Gravitazionali

- Increspature dello spazio-tempo;
- Soluzione dell'equazione di Einstein:

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

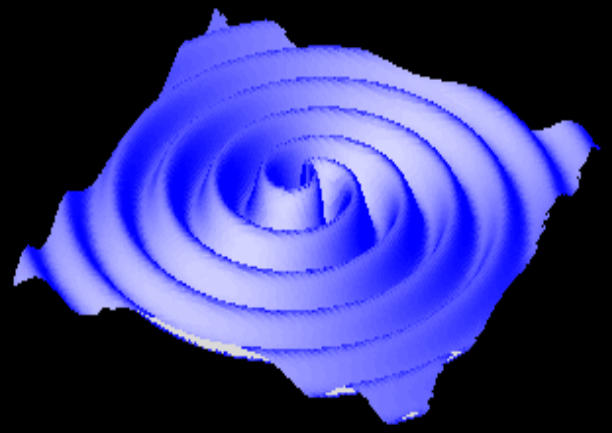


- Emissione di Onde Gravitazionali:

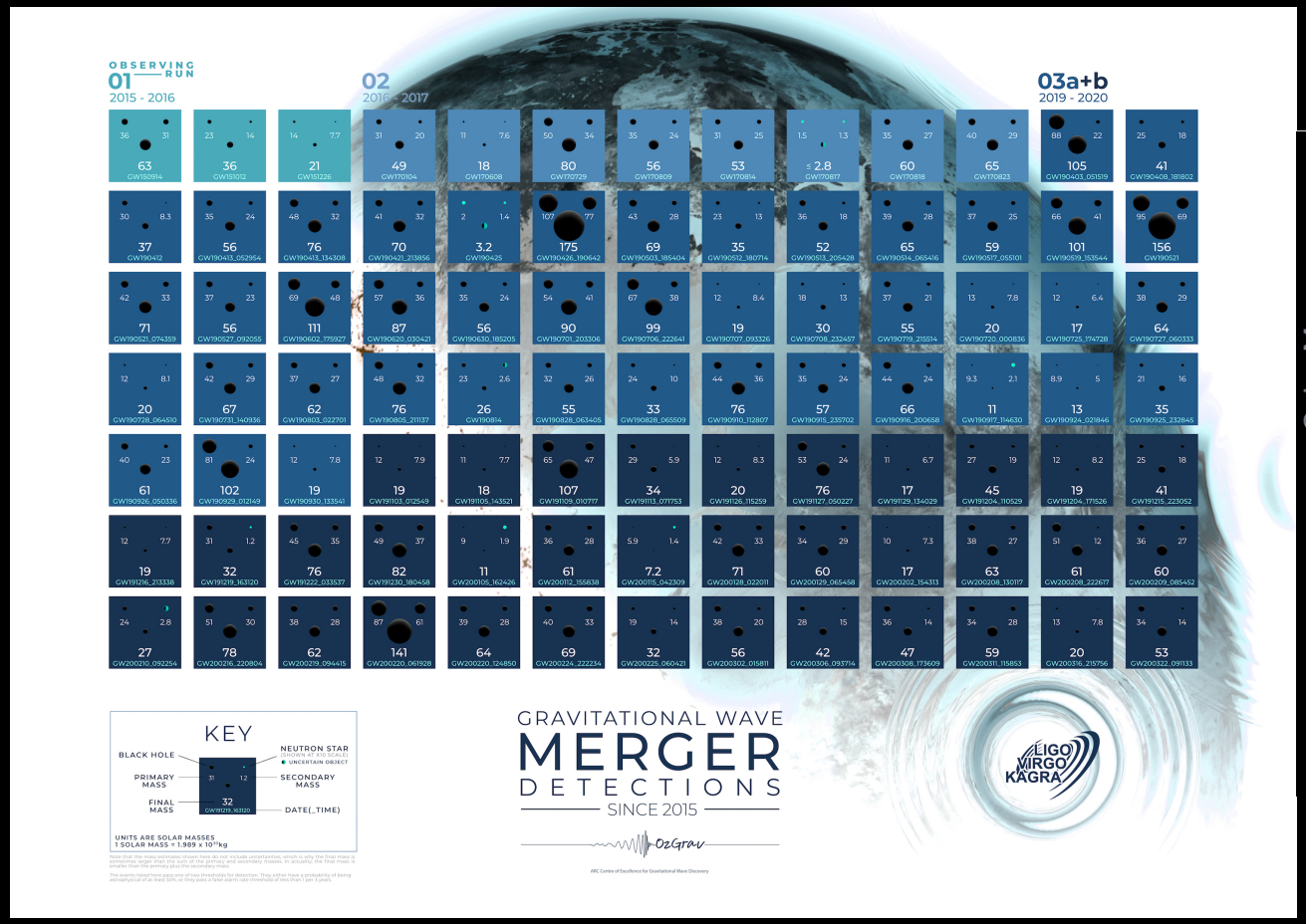
$$L = \frac{2G}{5c^5} \langle \dddot{Q}_{ij} \dddot{Q}^{ij} \rangle \sim \varepsilon^2 \frac{c^5}{G} \left(\frac{R_S}{R}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 \quad \rightarrow$$

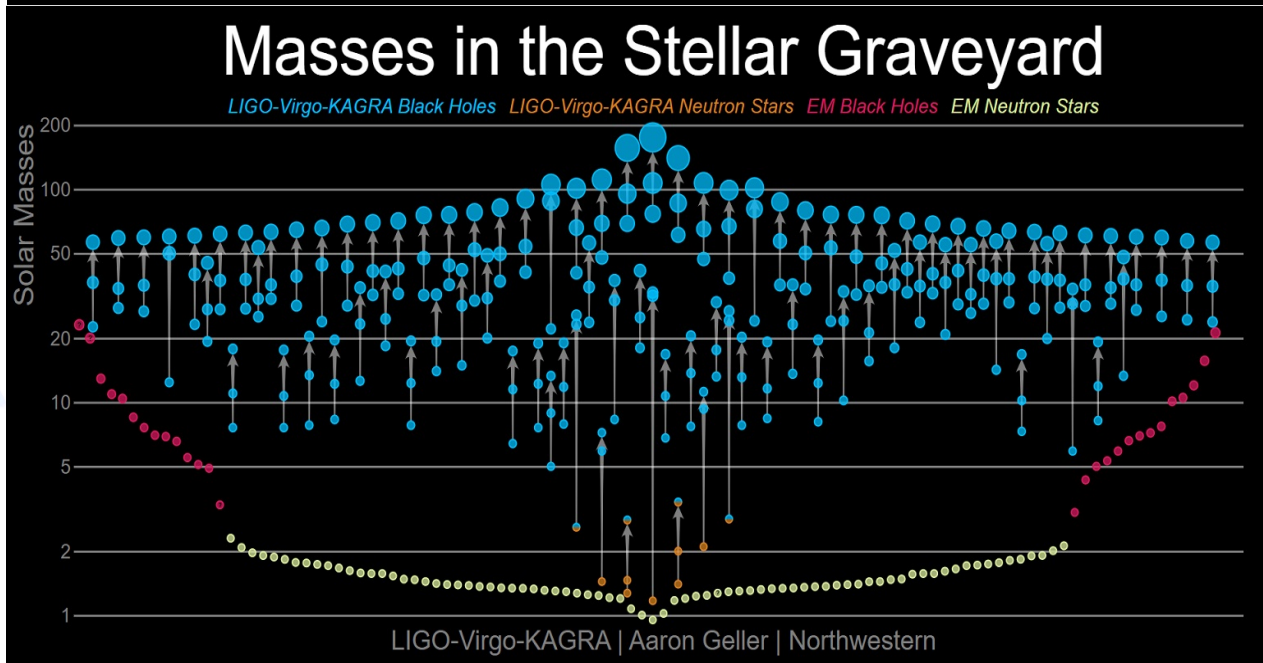
Sorgenti
Asimmetriche – Compatte – Relativistiche

- **Segnali Periodici**
- **Segnali Transienti**
- **Fondo Stocastico**



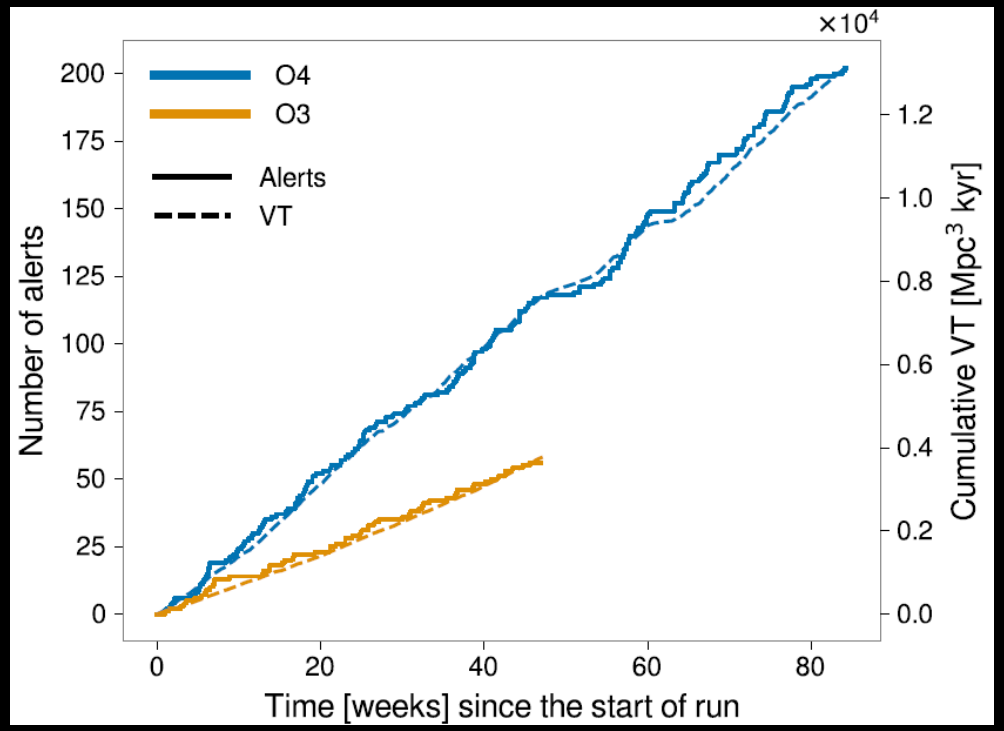
Segnali Transienti Rilevati

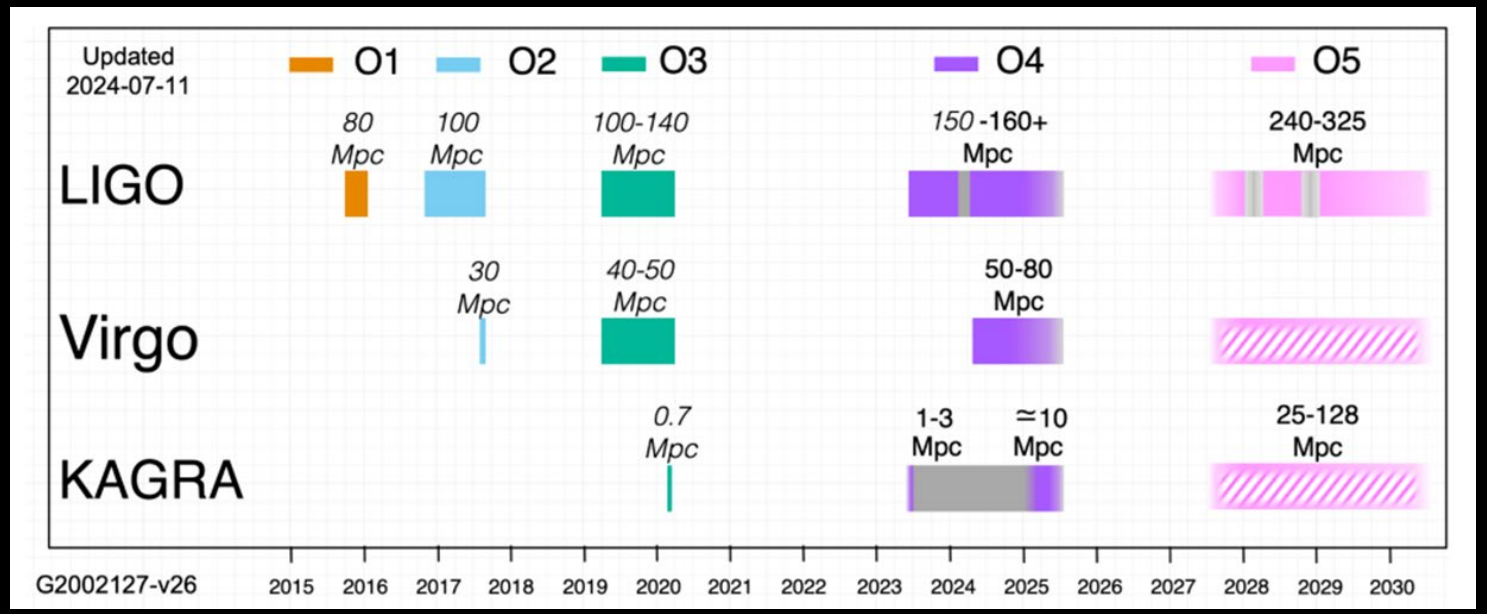




https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/

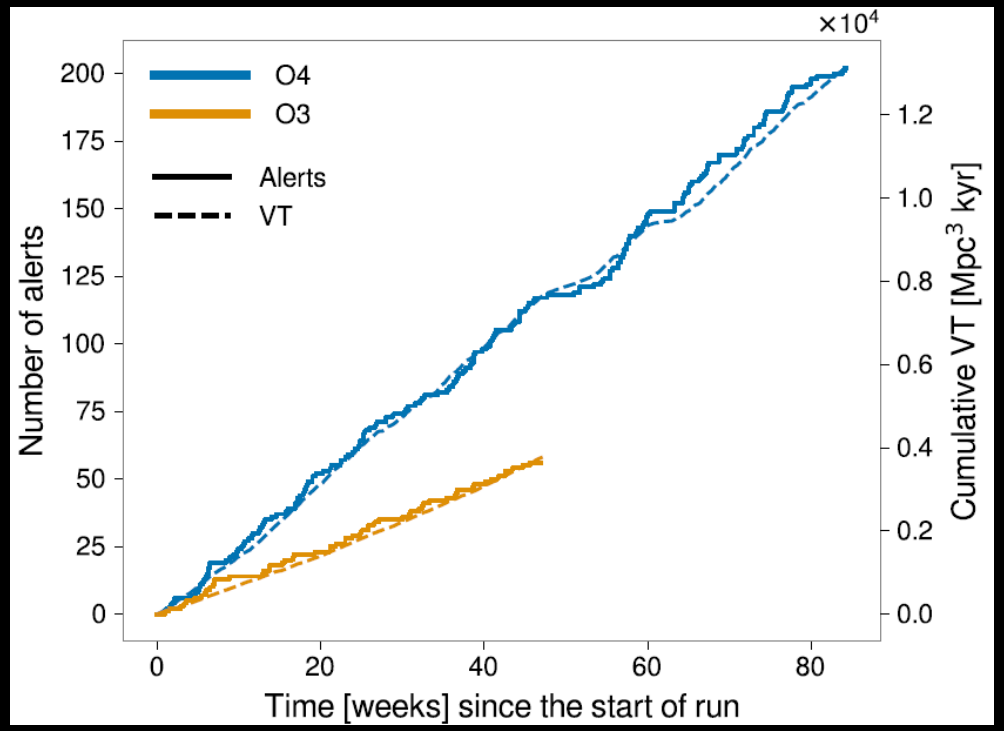
Attività Osservativa e Sviluppi Futuri

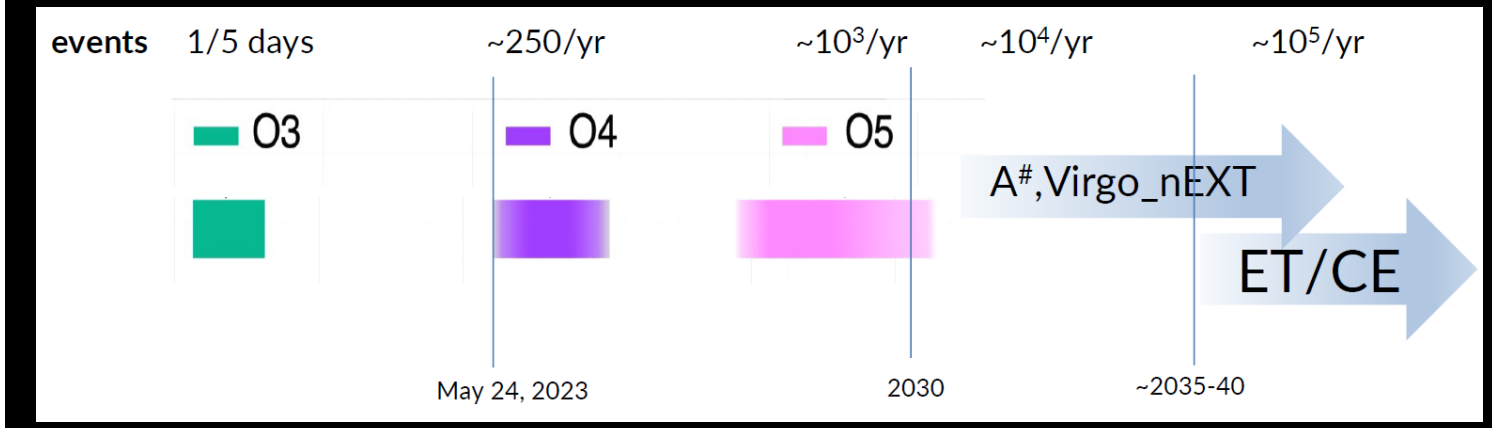




- Ogni miglioramento della sensibilità amplia la portata dell'astronomia gravitazionale e multimessaggera.

Attività Osservativa e Sviluppi Futuri





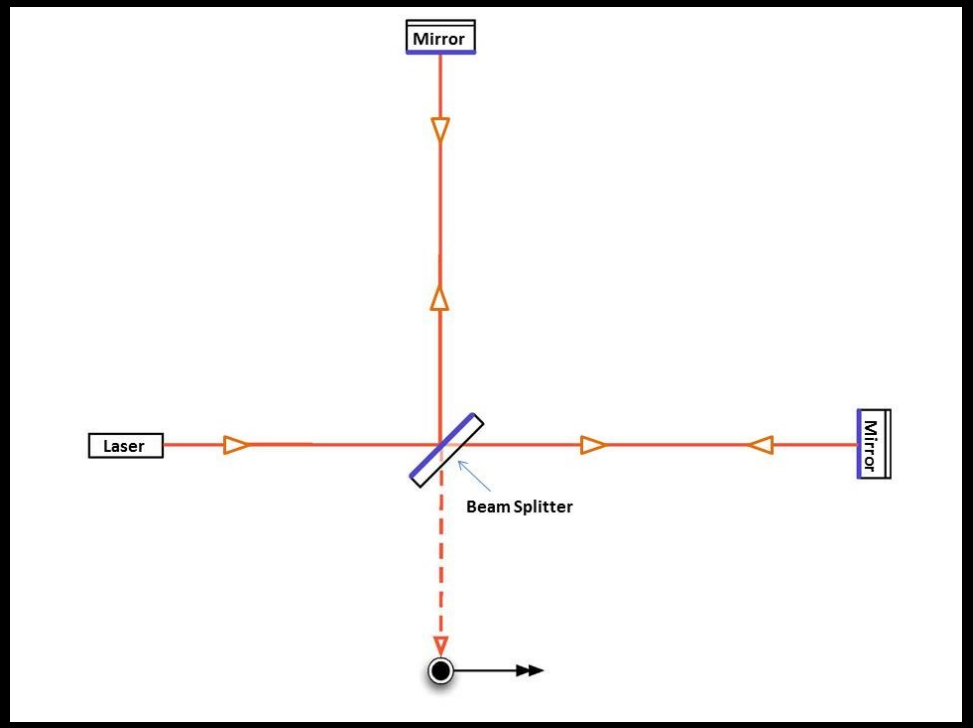
- Ogni miglioramento della sensibilità amplia la portata dell'astronomia gravitazionale e multimessaggera.
- Transizione verso detector di terza generazione (ET – Cosmic Explorer)

Rivelazione Interferometrica

Le Onde Gravitazionali modificano localmente la metrica dello spazio-tempo:

$$\Delta L(\sim 10^{-18}\mathrm{m}) \Rightarrow \Delta P_{out}$$

$$\Delta\phi_{Mich} = \frac{4\pi}{\lambda_L}\Delta L$$



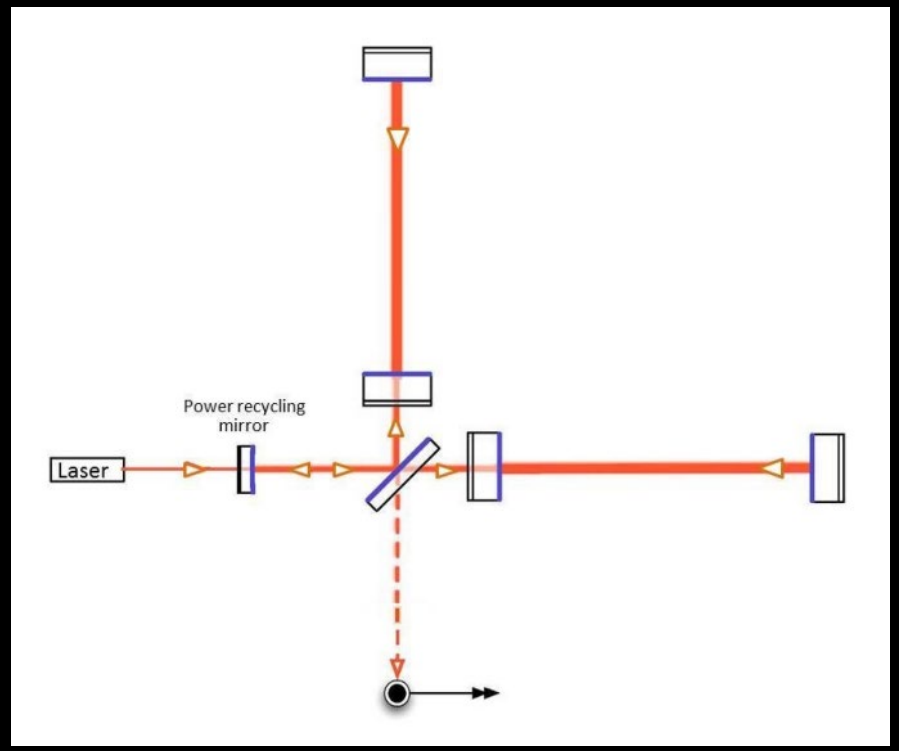
2017, premio Nobel per la fisica a seguito della rivelazione diretta di Onde Gravitazionali.

Rivelazione Interferometrica

Le Onde Gravitazionali modificano localmente la metrica dello spazio-tempo:

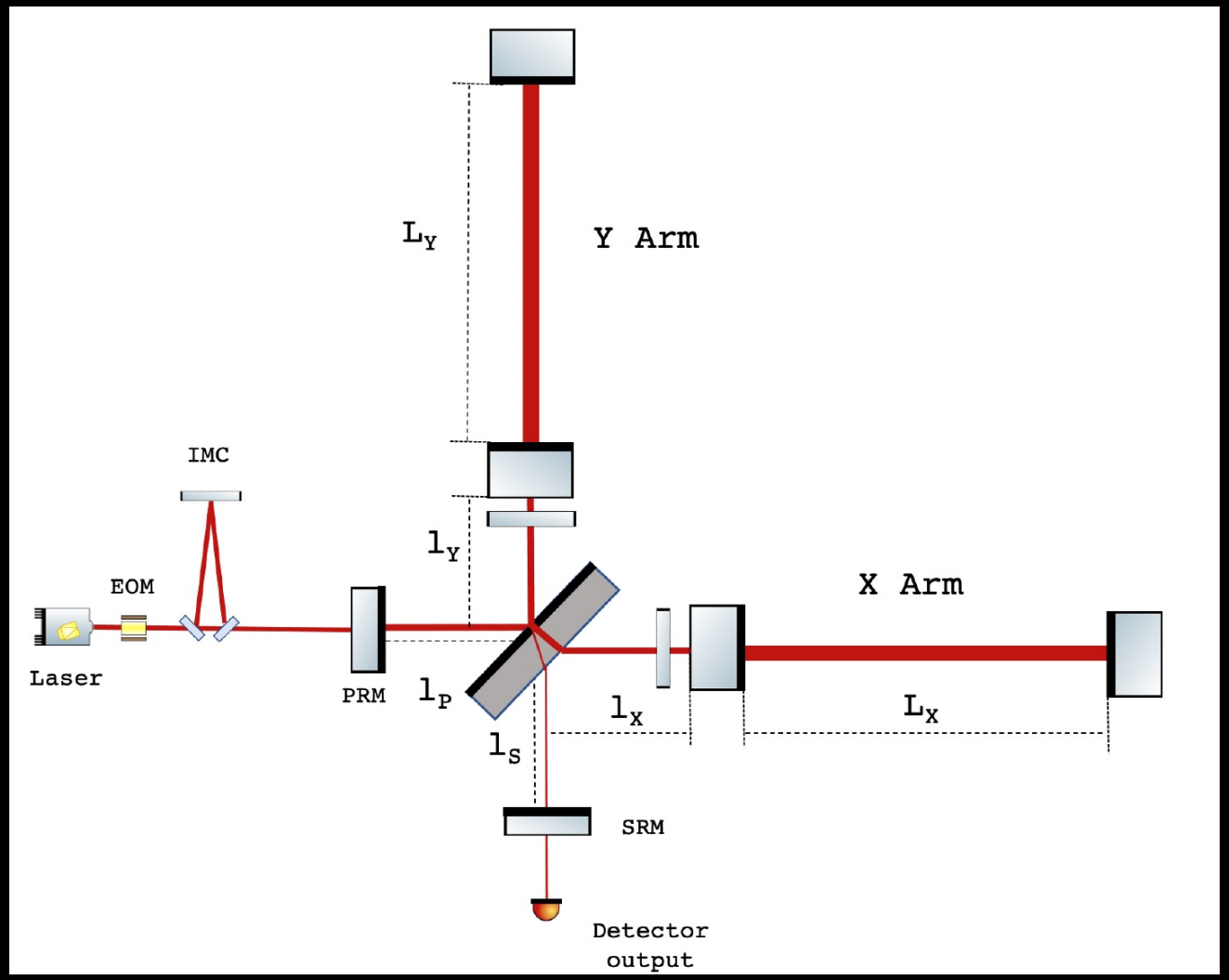
$$\Delta L(\sim 10^{-18}\mathrm{m}) \Rightarrow \Delta P_{out}$$

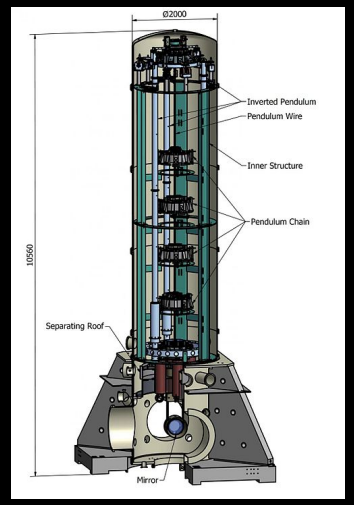
$$\Delta\phi_{Mich} = \frac{4\pi}{\lambda_L}\Delta L \quad \Rightarrow \quad \Delta\phi_{FP} = \frac{2F}{\pi}\Delta\phi_{Mich}$$



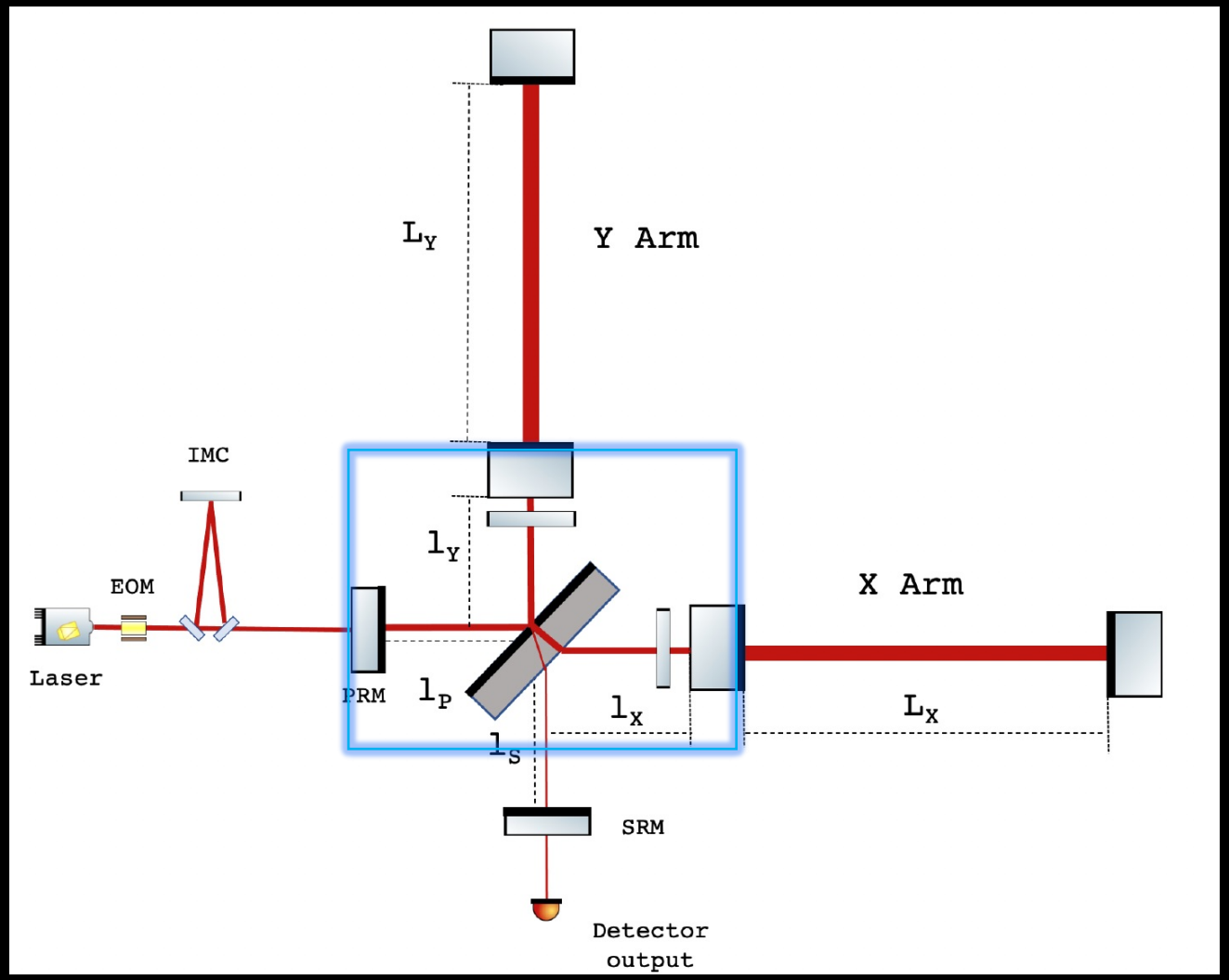
2017, premio Nobel per la fisica a seguito della rivelazione diretta di Onde Gravitazionali.

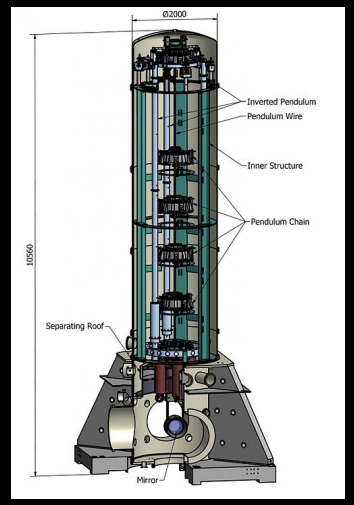
Advanced Virgo



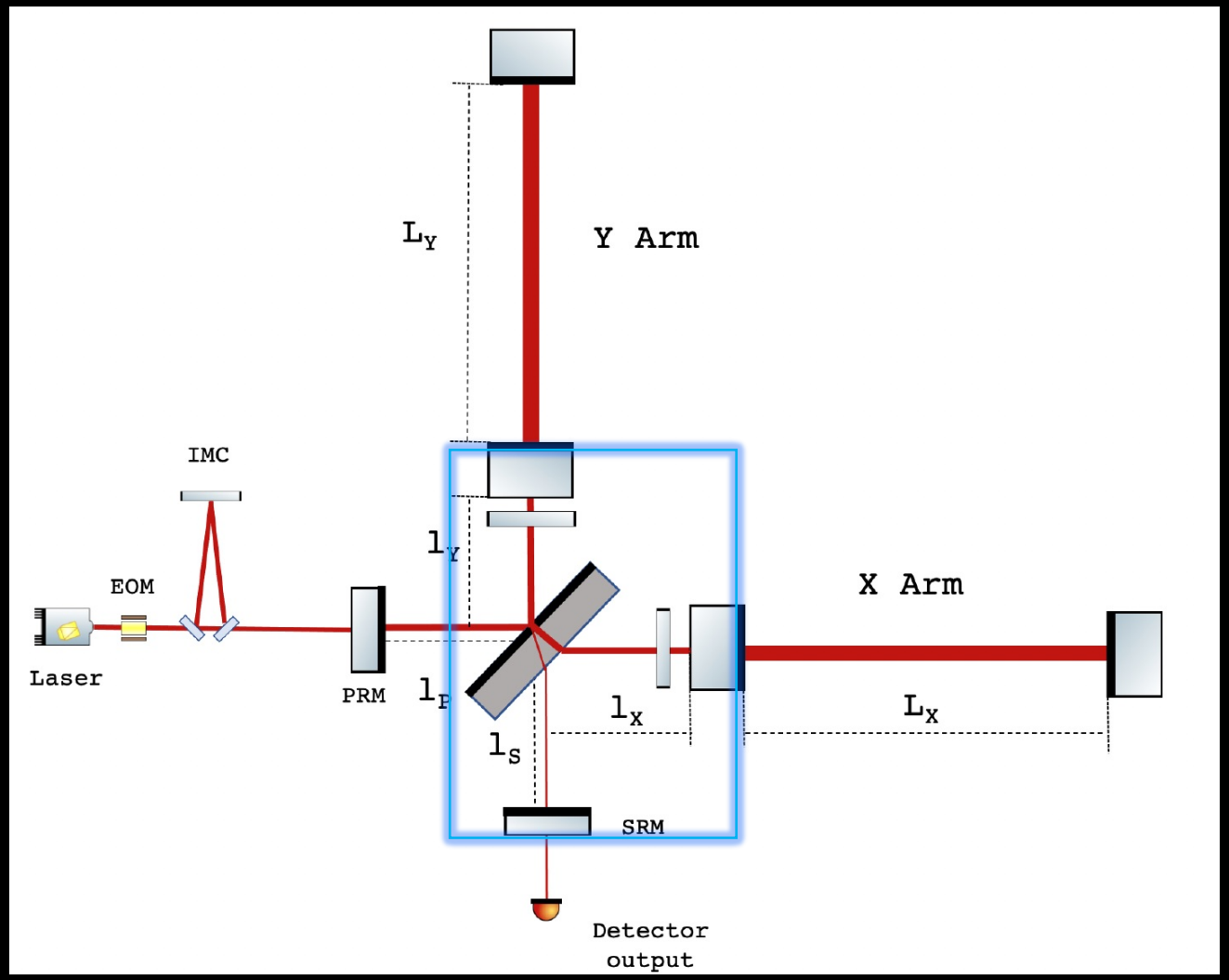


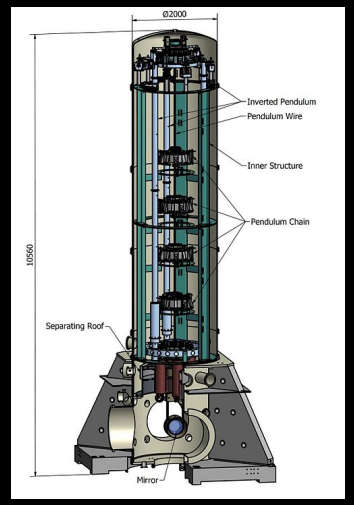
Advanced Virgo



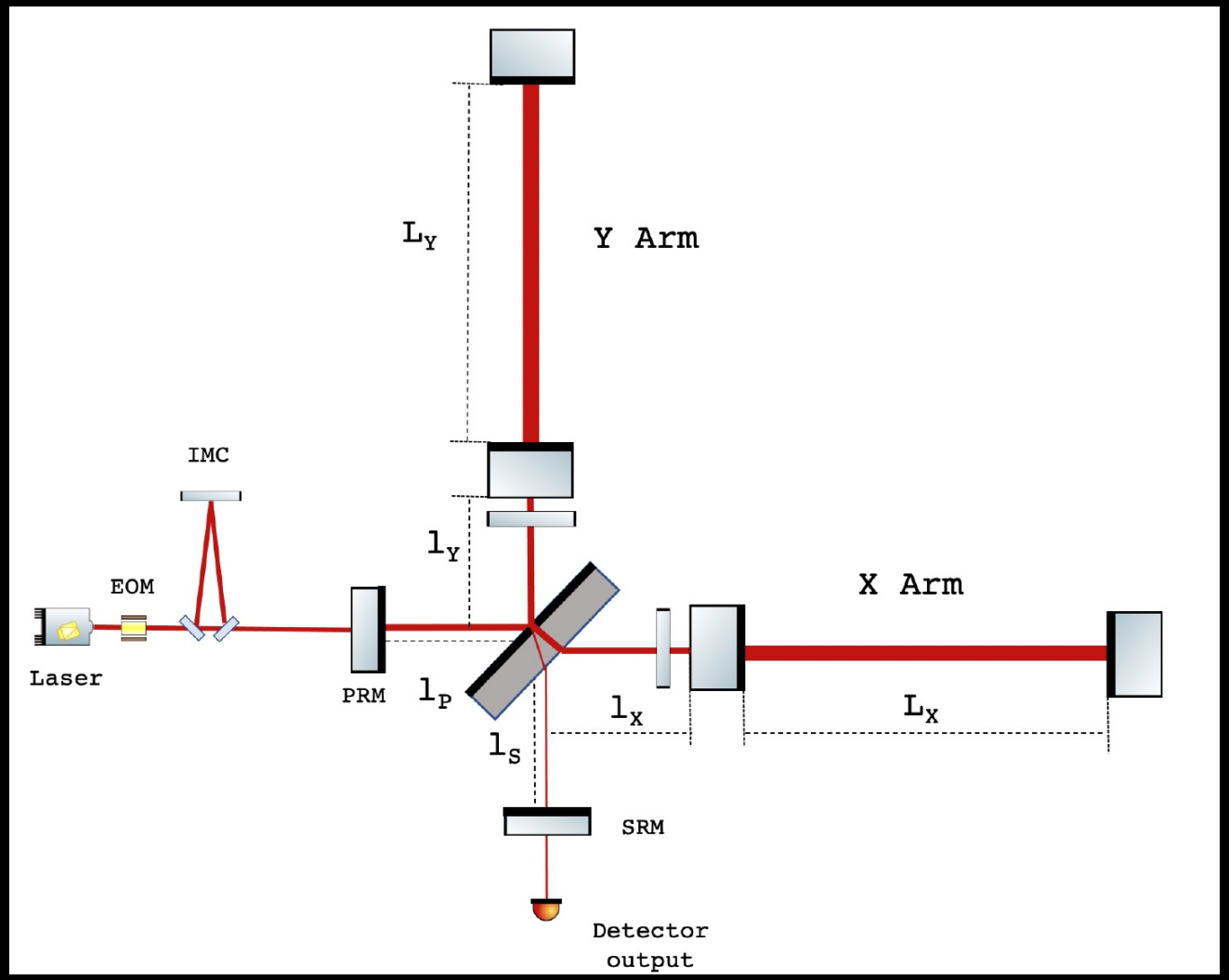


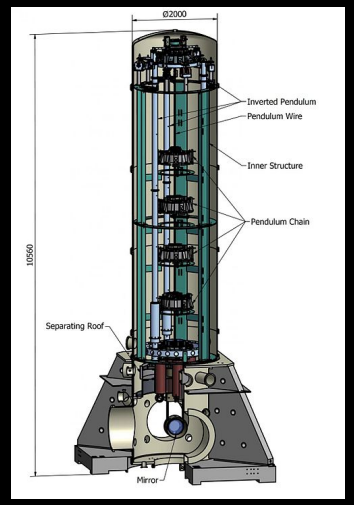
Advanced Virgo



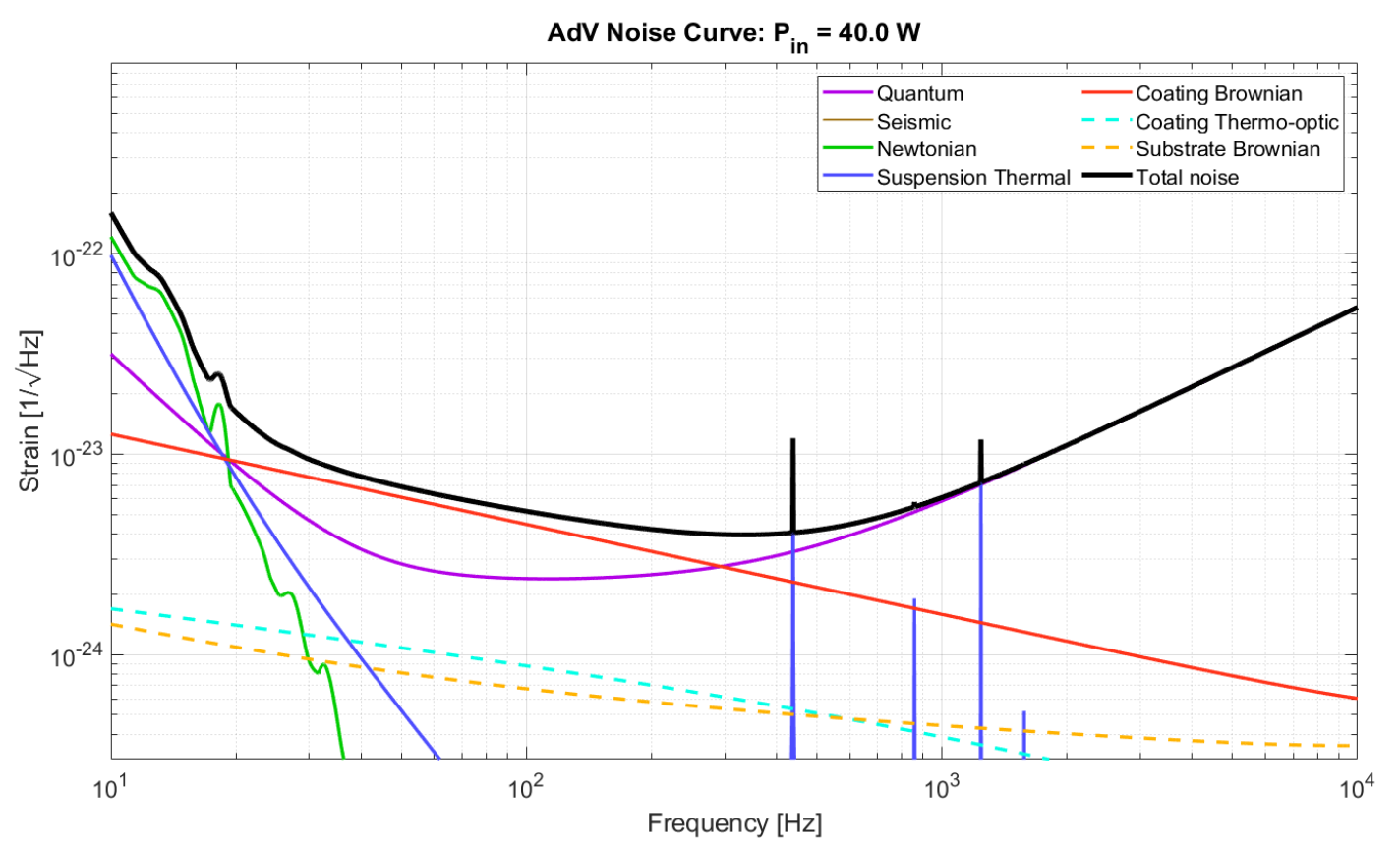


Advanced Virgo



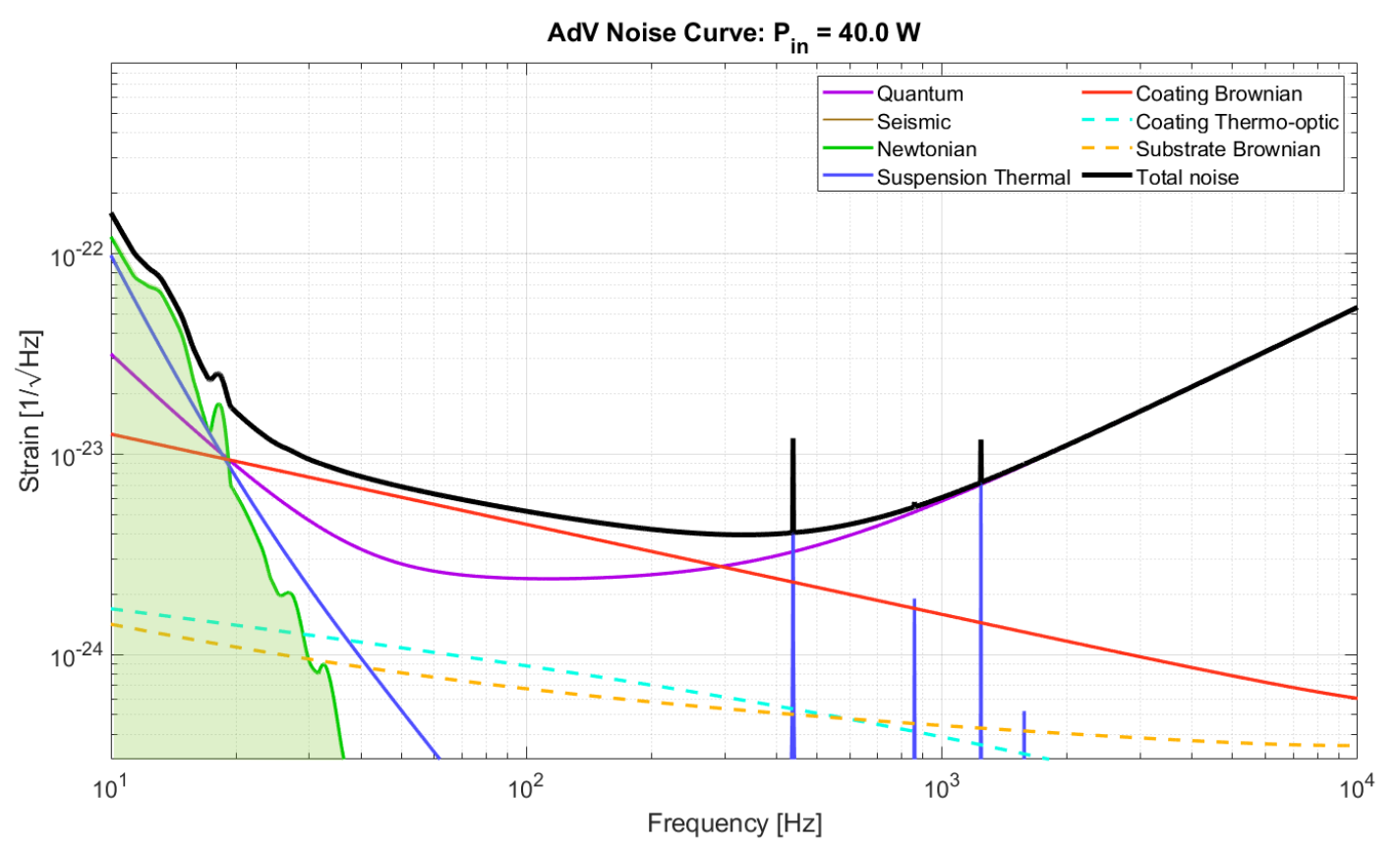


Sorgenti di Rumore



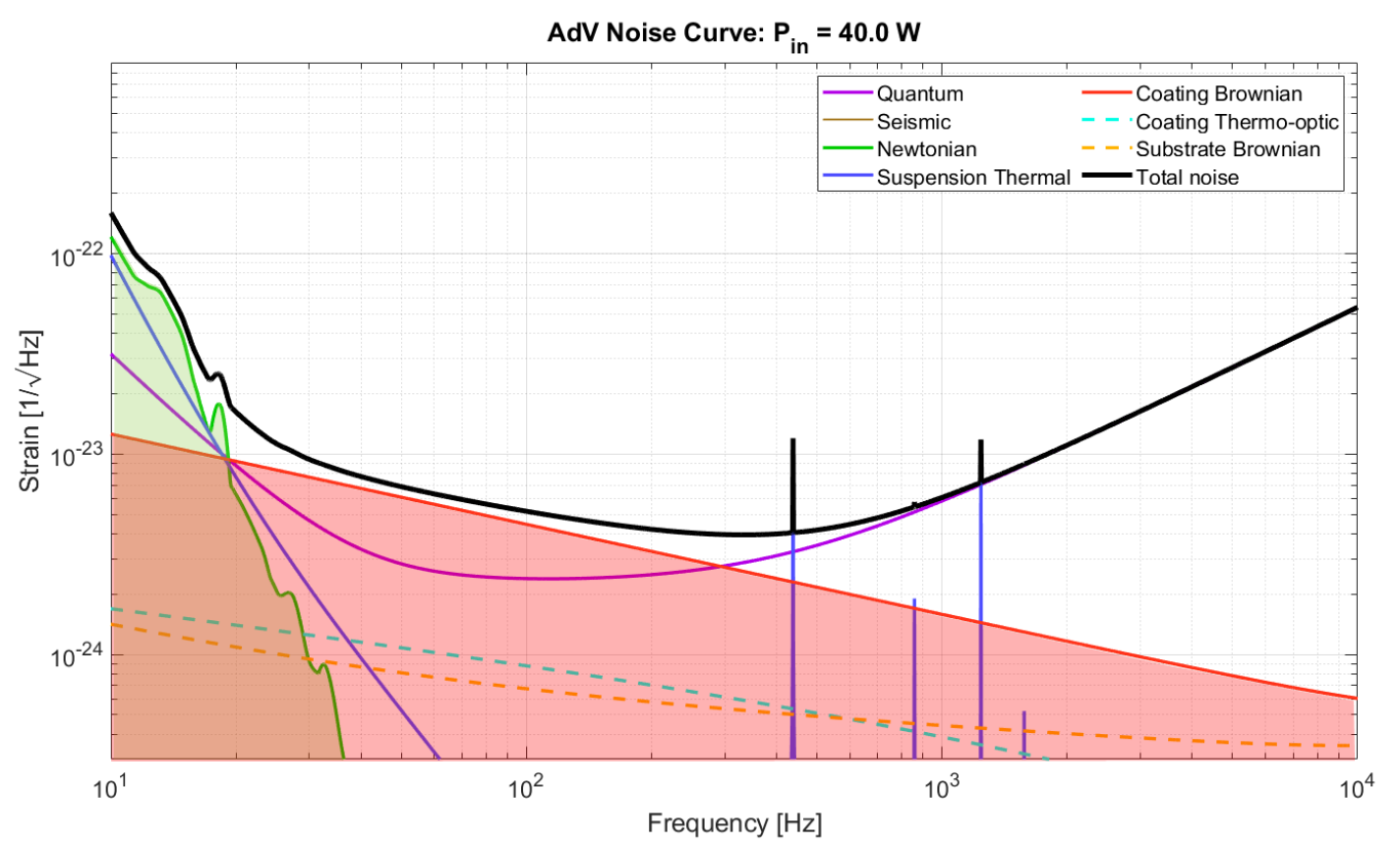
Sorgenti di Rumore

- **Rumore Newtoniano < 20 Hz;**



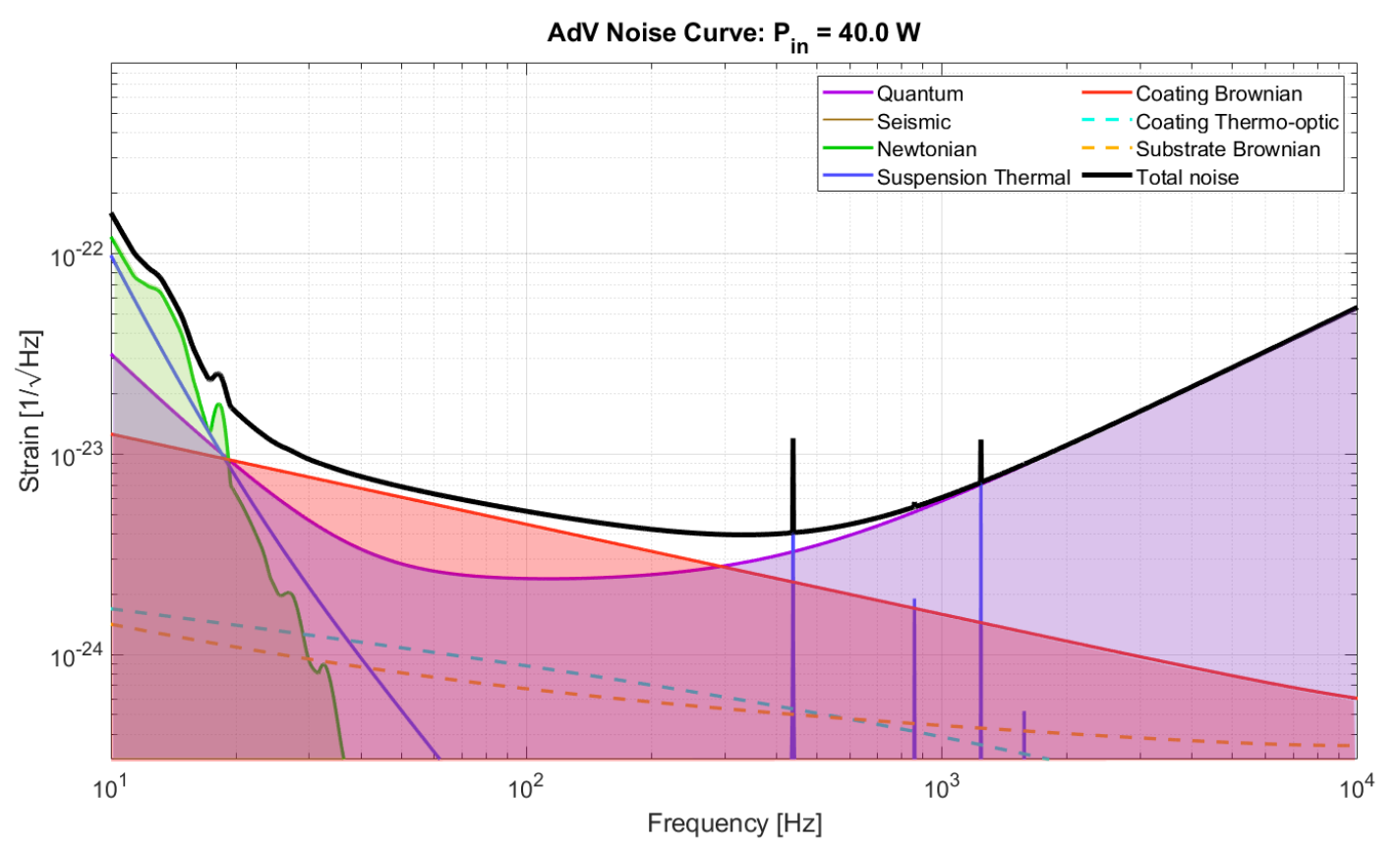
Sorgenti di Rumore

- **Rumore Newtoniano < 20 Hz;**
- **Rumore Termico [20-300] Hz;**



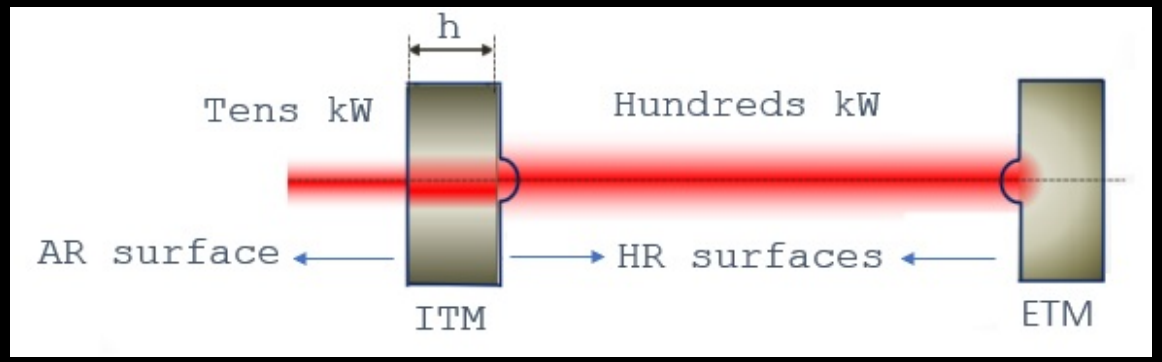
Sorgenti di Rumore

- **Rumore Newtoniano < 20 Hz;**
- **Rumore Termico [20-300] Hz;**
- **Rumore Quantistico > 300 Hz**:
  - Shot noise $\propto \sqrt{1/P_{in}}$;
  - Pressione di radiazione $\propto \sqrt{P_{in}}$.



Aberrazioni del Fronte d'Onda

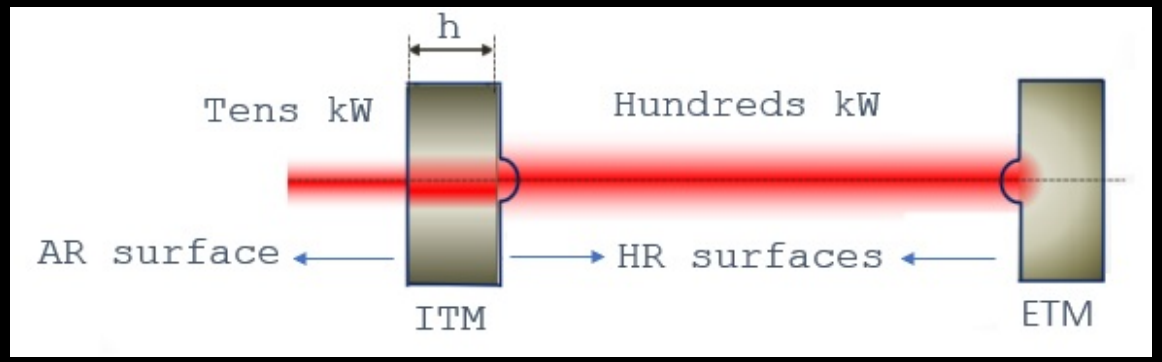
Assorbimento di Potenza



Aberrazioni del Fronte d'Onda

Assorbimento di Potenza

Gradiente di Temperatura



$$\Delta W(r,\theta) \approx \beta \int_0^h \Delta T(r,\theta,z)dz$$

Aberrazioni del Fronte d'Onda

Assorbimento di Potenza

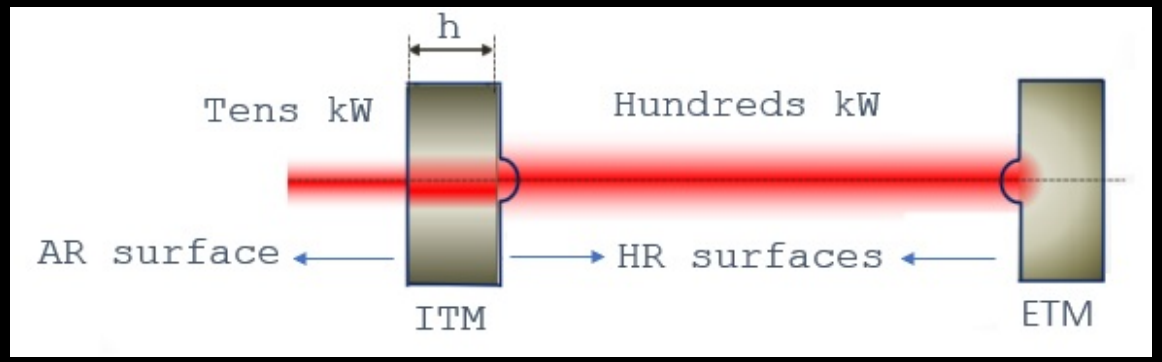
↓

Gradiente di Temperatura

↓

Riduzione delle performance dell'ITF

$$\Delta W(r,\theta) \approx \beta \int_0^h \Delta T(r,\theta,z)dz$$



Aberrazioni del Fronte d'Onda

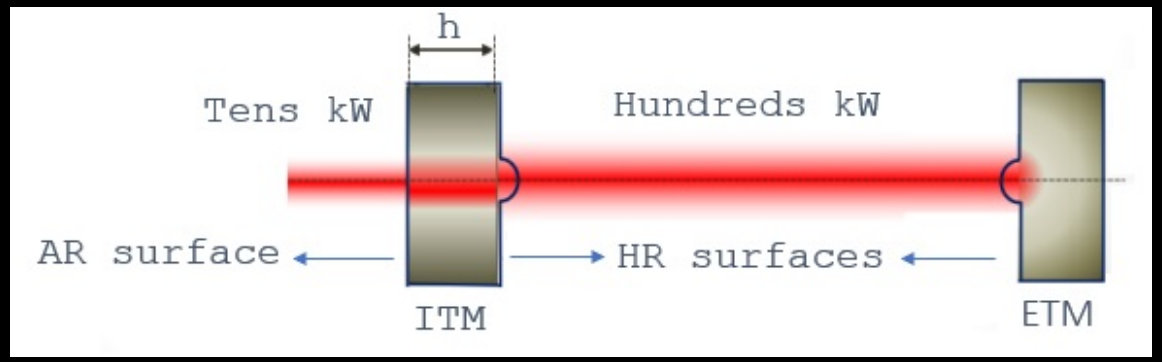
Assorbimento di Potenza

↓

Gradiente di Temperatura

↓

Riduzione delle performance dell'ITF



$$\Delta W(r,\theta) \approx \beta \int_0^h \Delta T(r,\theta,z)dz$$

$$\beta \approx \frac{dn}{dT}$$

- n: indice di rifrazione;

- **Termo-ottico:** variazione di n nel substrato ;

Aberrazioni del Fronte d'Onda

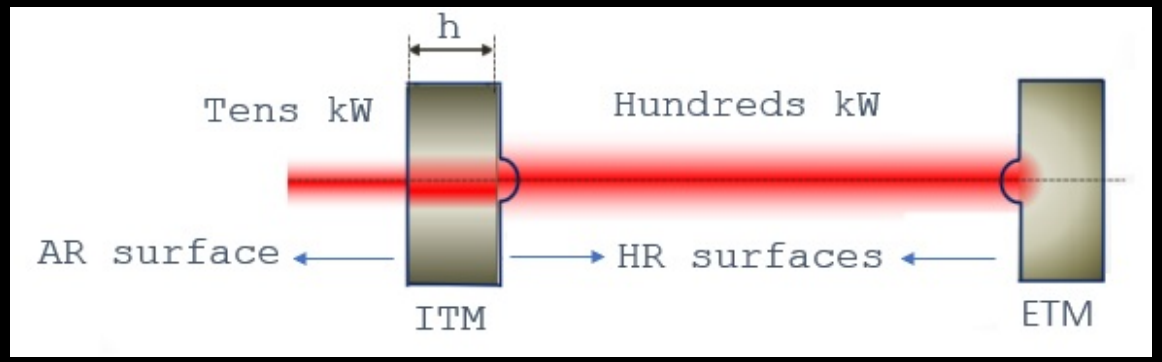
Assorbimento di Potenza

↓

Gradiente di Temperatura

↓

Riduzione delle performance dell'ITF



$$\Delta W(r,\theta) \approx \beta \int_0^h \Delta T(r,\theta,z)dz$$

$$\beta \approx \frac{dn}{dT} \quad +\alpha(1+\sigma_P)(n-1)$$

- n: indice di rifrazione;
- α: coefficiente di espansione termica;
- σ_P: rapporto di Poisson.

- **Termo-ottico:** variazione di n nel substrato ;
- **Termo-elastico:** deformazione superficiale;

Aberrazioni del Fronte d'Onda

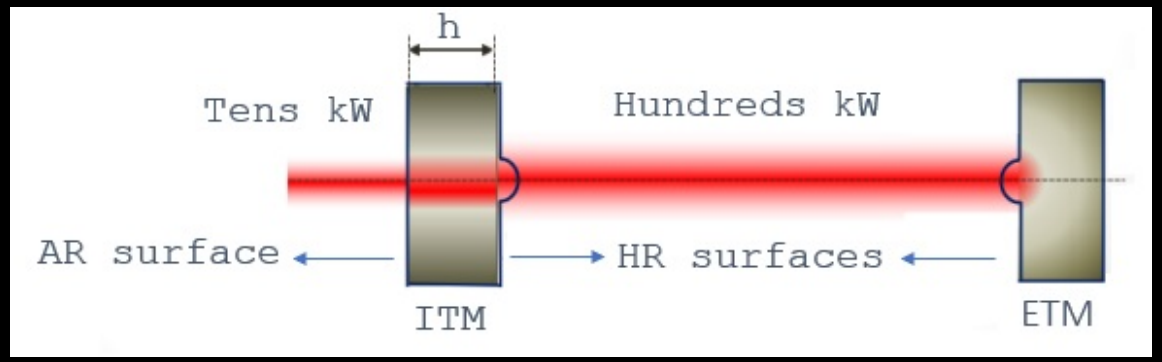
Assorbimento di Potenza

↓

Gradiente di Temperatura

↓

Riduzione delle performance dell'ITF



$$\Delta W(r,\theta) \approx \beta \int_0^h \Delta T(r,\theta,z)dz$$

$$\beta \approx \frac{dn}{dT} \quad +\alpha(1+\sigma_P)(n-1)$$

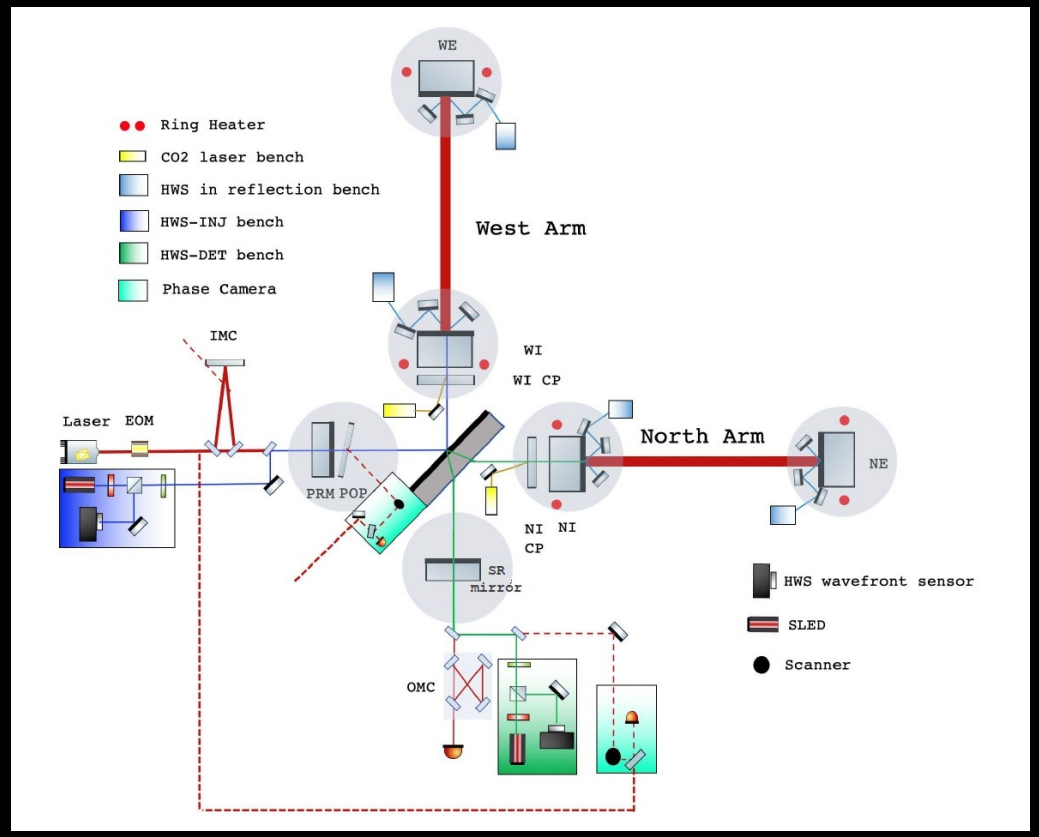
- n: indice di rifrazione;
- α: coefficiente di espansione termica;
- σ_P: rapporto di Poisson.

- **Termo-ottico:** variazione di n nel substrato ;
- **Termo-elastico:** deformazione superficiale;
- **Difetti freddi:** imperfezioni delle ottiche;

Sistema di Compensazione Termica

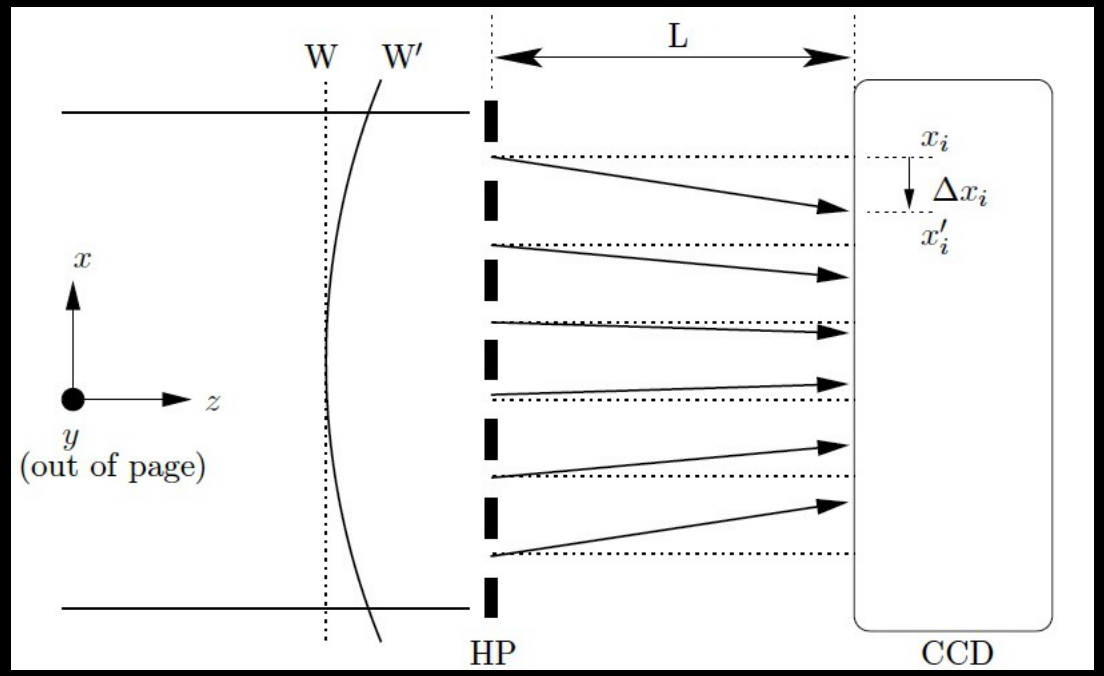
Mitigazione delle aberrazioni ottiche derivanti sia dagli effetti termici che dai difetti freddi per ripristinare la configurazione ottica nominale dell'interferometro.

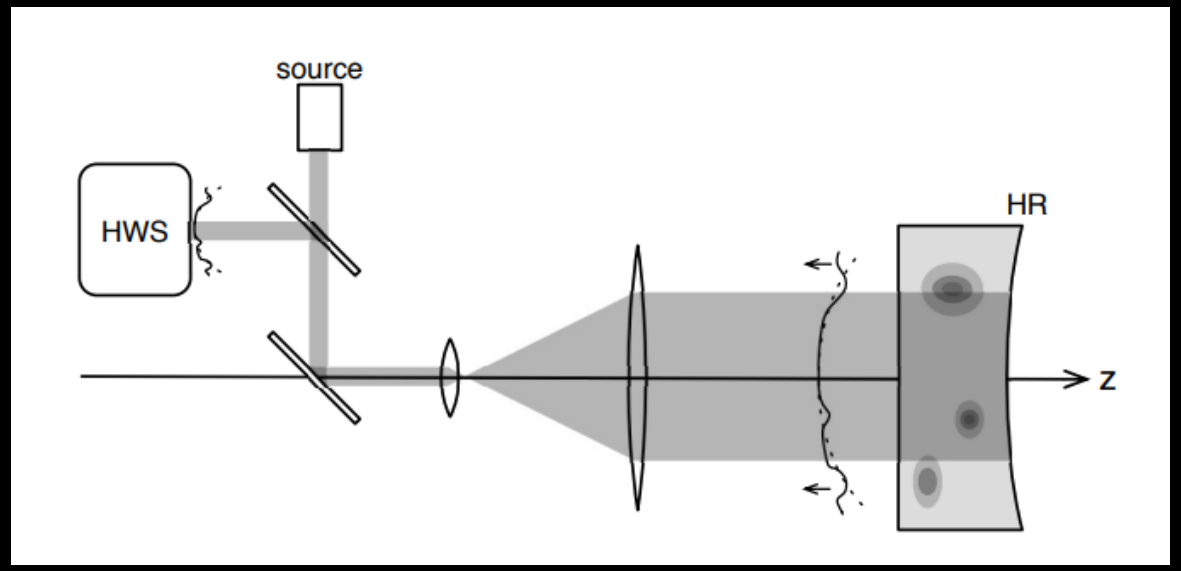
- **Sensori**:
  - Hartmann Wavefront Sensor (HWS);
  - Phase Camera (PC);
- **Attuatori**:
  - Ring Heater (RH);
  - CO_2 Laser: Double Axicon System (DAS);
  - CO_2 Laser: Central Heating (CH);



Sensore di fronte d'onda Hartmann (HWS)

- Sensore **differenziale** che misura le variazioni del fronte d'onda di un fascio sonda rispetto al valore riferimento.





Integrazione Numerica

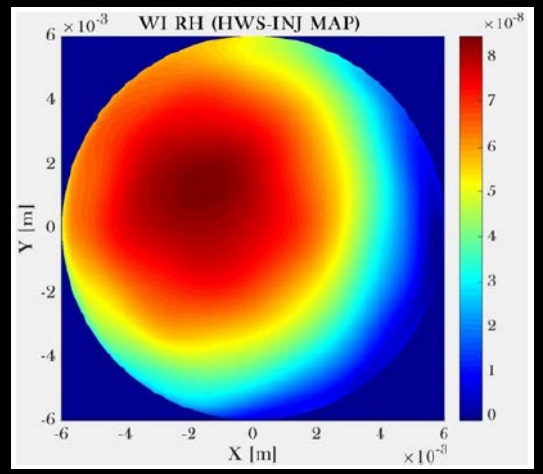
$$\frac{\partial \Delta W}{\partial x} = \frac{\Delta x_i}{L} \longrightarrow \Delta W$$

Sviluppato dal gruppo LIGO – University of Adelaide (AU)

Sensore Hartmann:
uno strumento, molteplici utilizzi

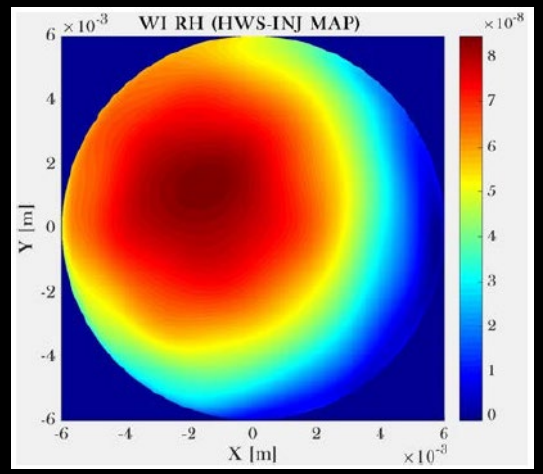
Sensore Hartmann: uno strumento, molteplici utilizzi

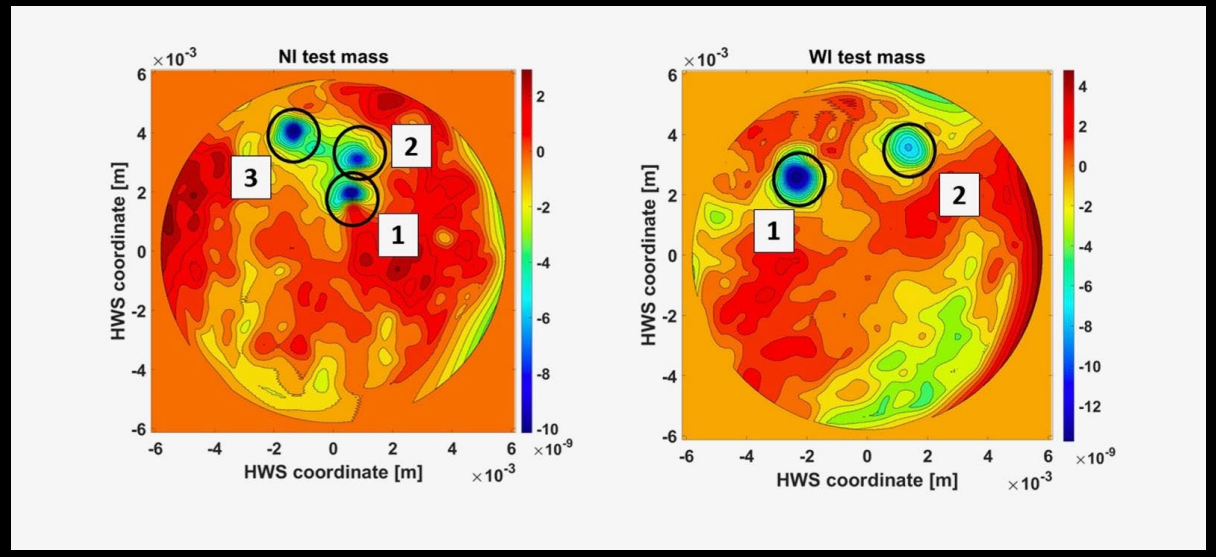
- Centraggio degli attuatori;

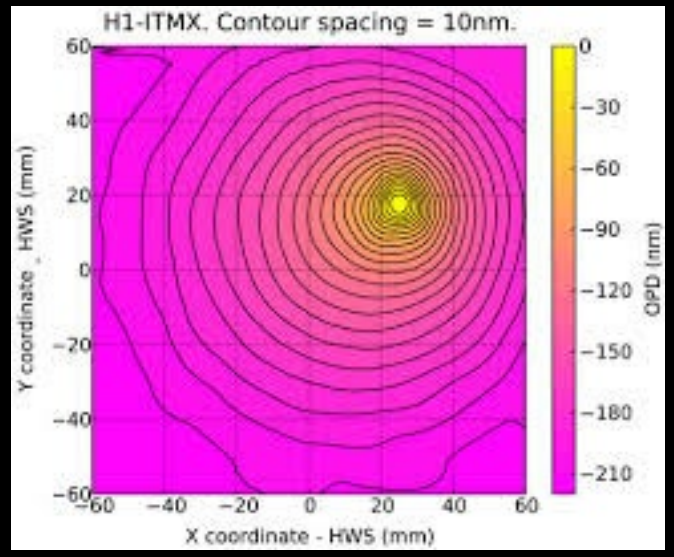


Sensore Hartmann: uno strumento, molteplici utilizzi

- Centraggio degli attuatori;
- Identificazione dei “Point Absorber”;

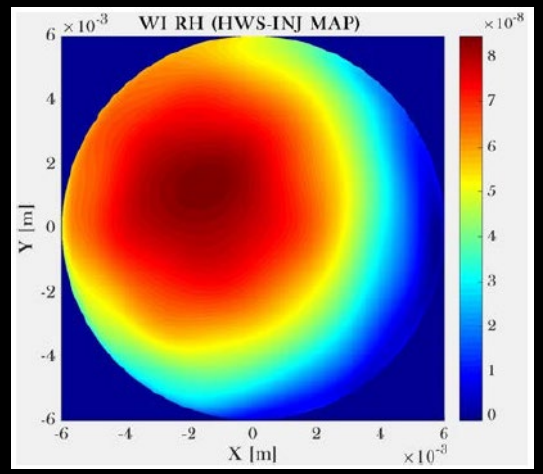


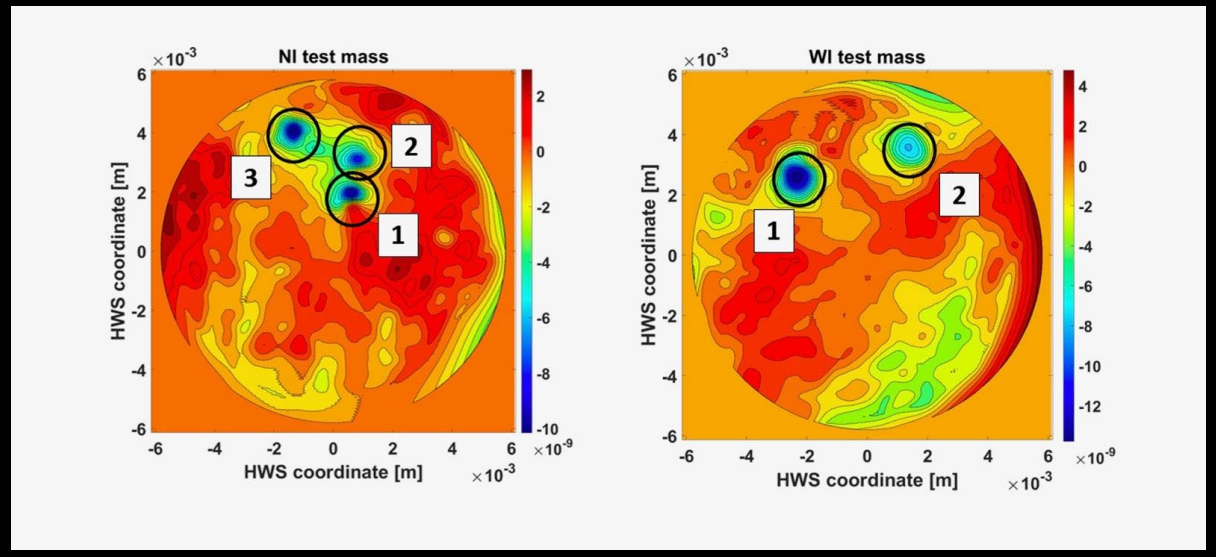


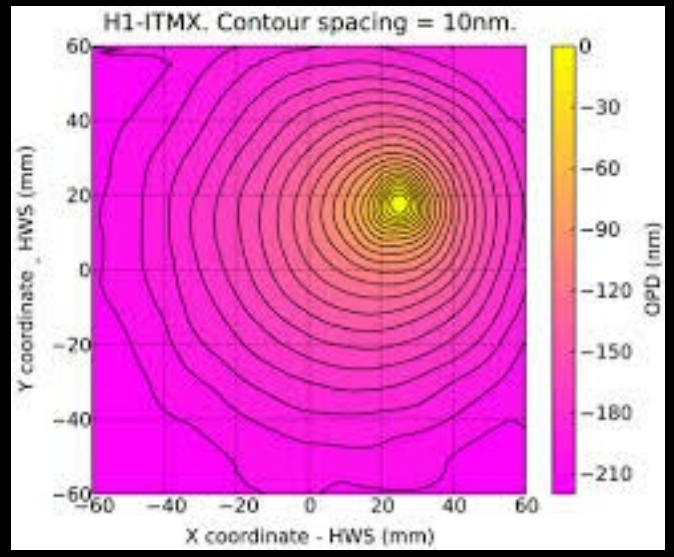


Sensore Hartmann: uno strumento, molteplici utilizzi

- Centraggio degli attuatori;
- Identificazione dei “Point Absorber”;
- Misure dell’assorbimento del Coating delle ottiche.



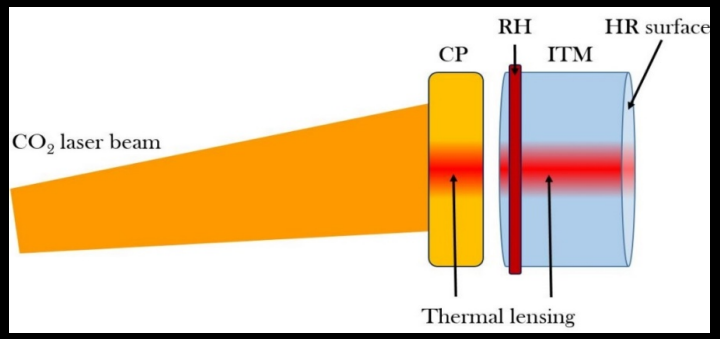


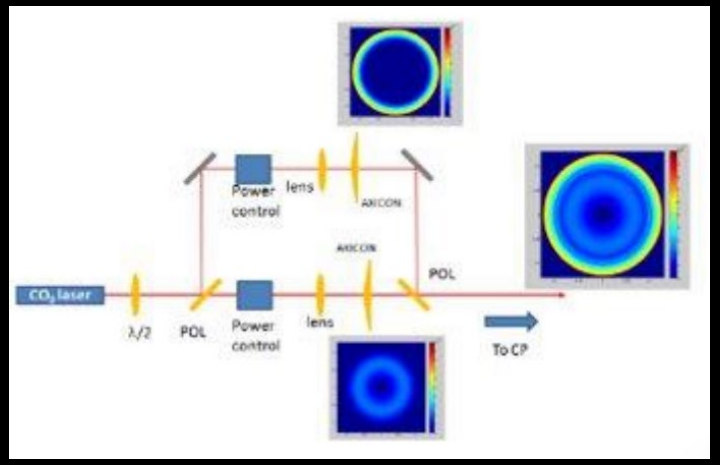


Attuatori della TCS

- I Ring Heater circondano le ottiche e le riscaldano riducendone il Raggio di Curvatura (**RoC**), compensando l'effetto termo-elastico.

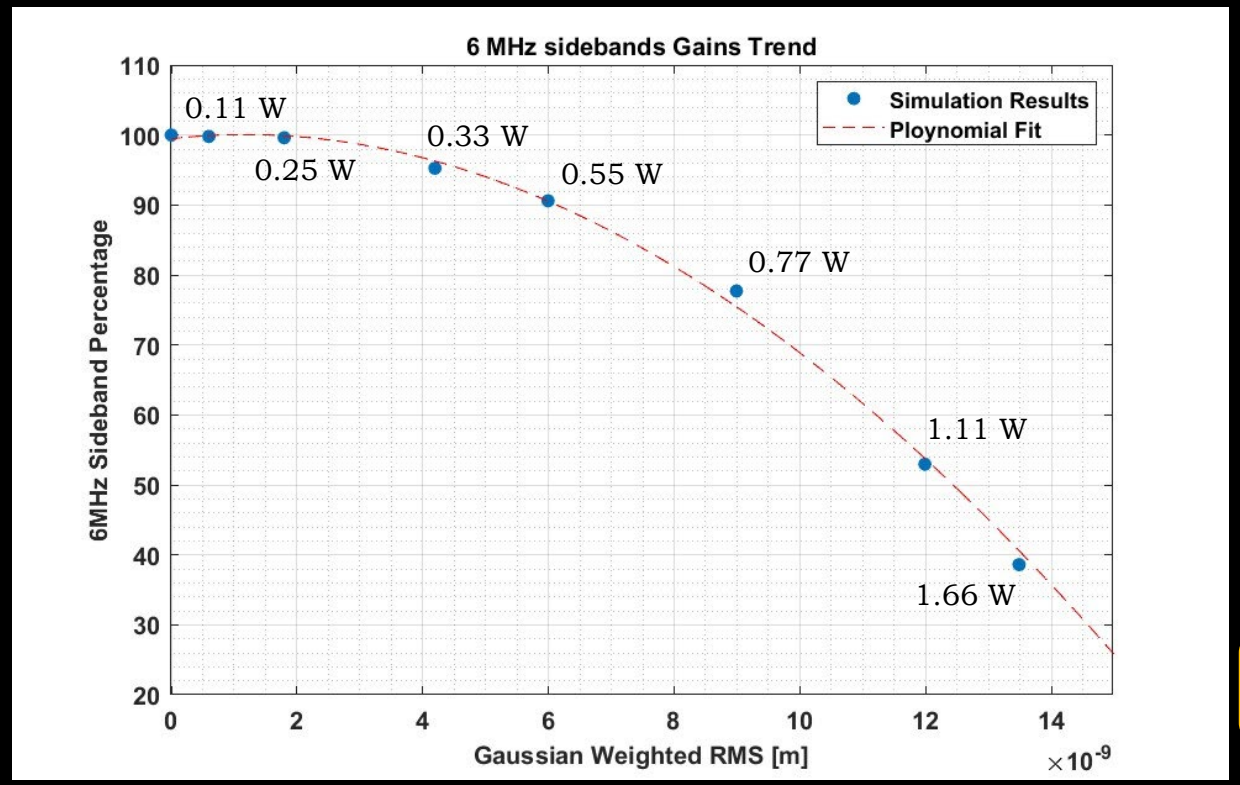
- Il laser CO_2 agisce su delle piastre di compensazione (CP) e il suo profilo viene modellato per produrre pattern correttivi assi-simmetrici:
  - Central Heating (CH), riscaldamento della parte centrale dello specchio, usato per mantenerne lo stato termico delle ottiche in assenza del laser principale;
  - Riscaldamento anulare, generato tramite un sistema ottico a Doppio Axicon (DAS) e usato per compensare aberrazioni di fronte d'onda statiche e la lente termica indotta dal laser principale.

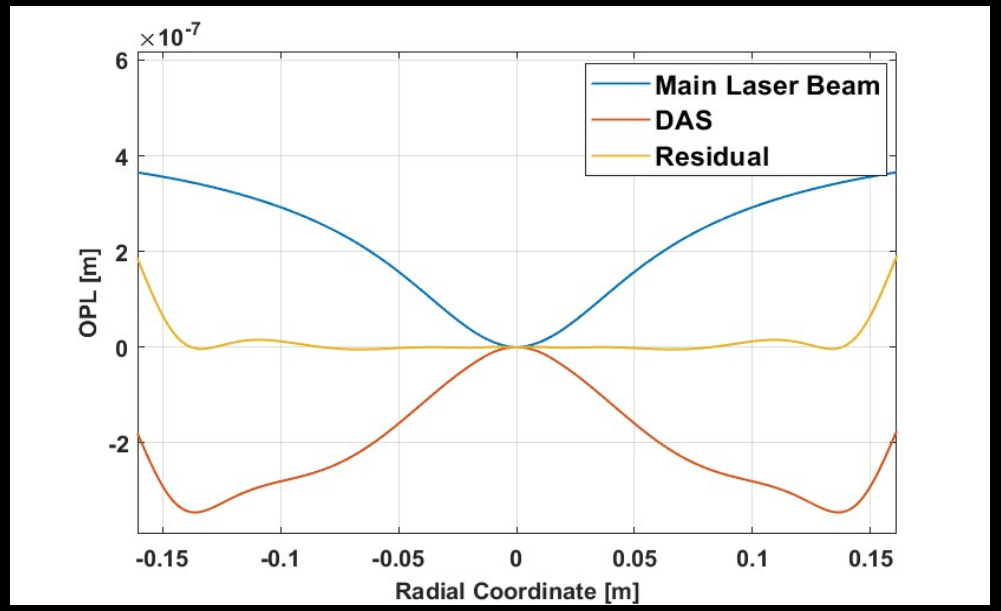




Aumento di Potenza e Residui

L'aumento della potenza circolante, necessaria per migliorare sensibilità alle alte frequenze, comporta un aumento degli effetti termici e conseguentemente delle aberrazioni di fronte d'onda.



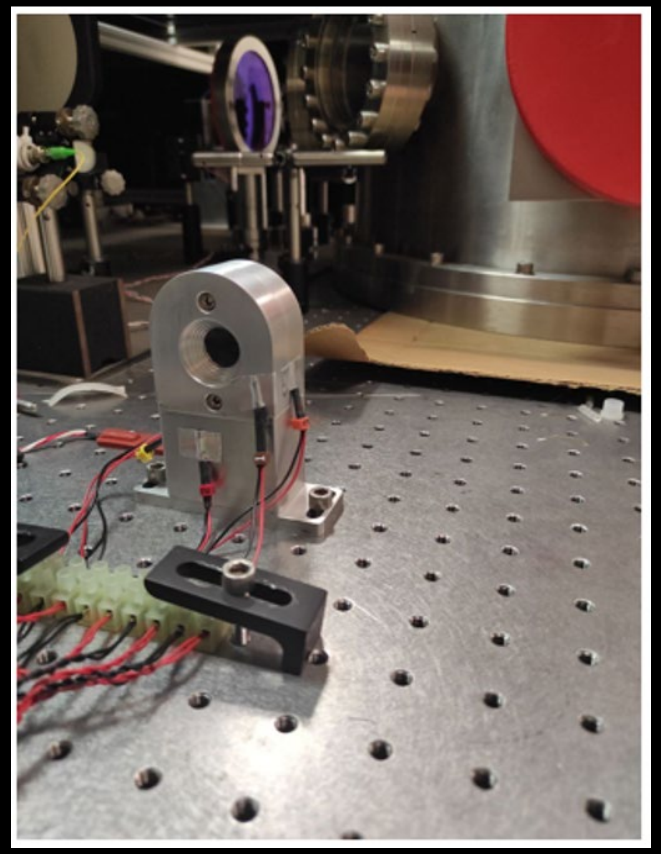


Deterioramento dei segnali di controllo

Nuovo HWS

Nuovo sensore CMOS per sostituire la CCD Dalsa Pantera 1M60 (fuori produzione)

- Sensore CMOS Ximea testato
- Sensibilità del nuovo HWS compatibile con requisiti AdV+ (RMS ≤ 0.4 nm)



Parameter		Ximea	DALSA
Pixel array size (H × V)	[pixel]	2048 × 2048	1024 × 1024
Active area size (H × V)	[mm]	11.27 × 11.27	11.27 × 11.27
Pixel size (H × V)	[µm]	5.5 × 5.5	12 × 12
Full Well Capacity (FWC)	[ke⁻]	13.5	350
Amplifier noise	[e⁻]	12 (RMS)	1.2 (RMS)
Dark current	[e⁻/s]	125 (25° C)	813 (45° C)
Digitization	[bit]	10	12
Framerate	[fps]	90	60

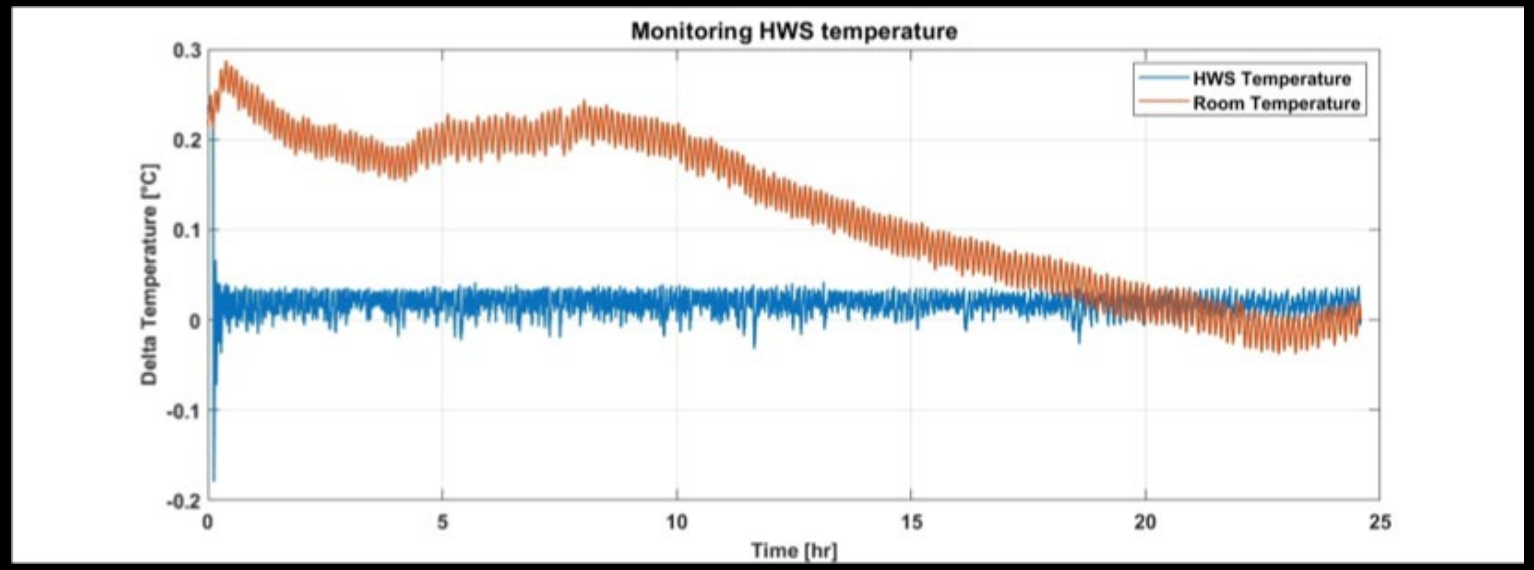
Sensibilità Richiesta: $2\frac{\langle \Delta W_{max} \rangle}{10} \sim 0.4\ nm$

wavefront RMS [nm]		
N_{img}	Ximea	DALSA
1	0.96	0.57
100	0.11	0.12
1000	0.04	0.05

Fluttuazioni di temperature, inducendo un defocus termico, limitano le performance del sensore.

Nuovo HWS

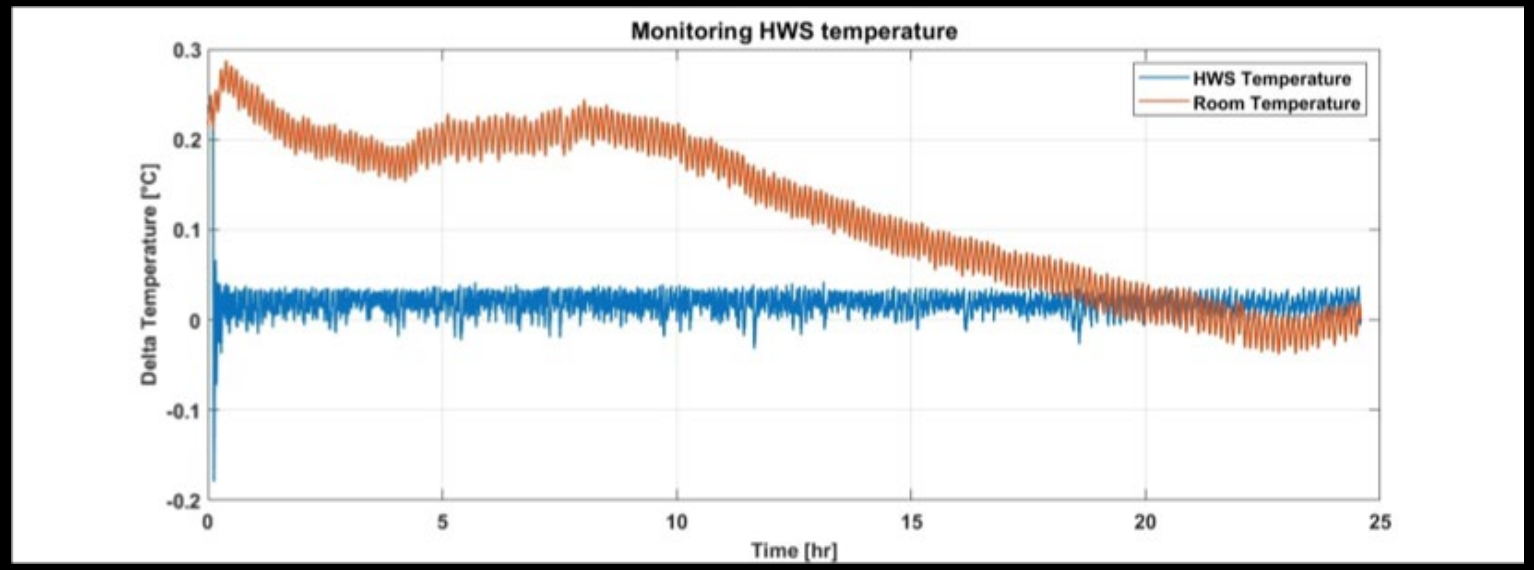
Sistema di controllo della temperature con celle di Peltier, testato e funzionante.



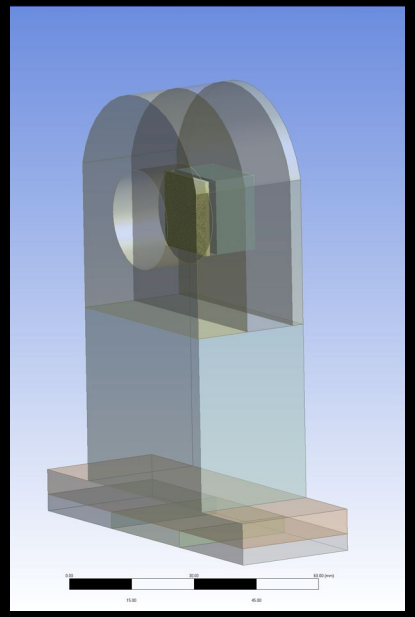
$\Delta T < 40$ mK

Nuovo HWS

Sistema di controllo della temperature con celle di Peltier, testato e funzionante.



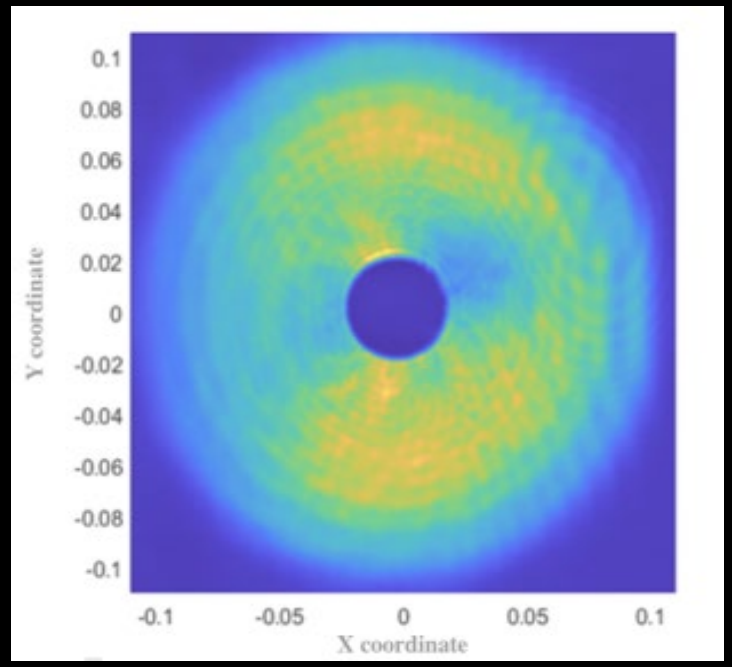
$\Delta T < 40$ mK



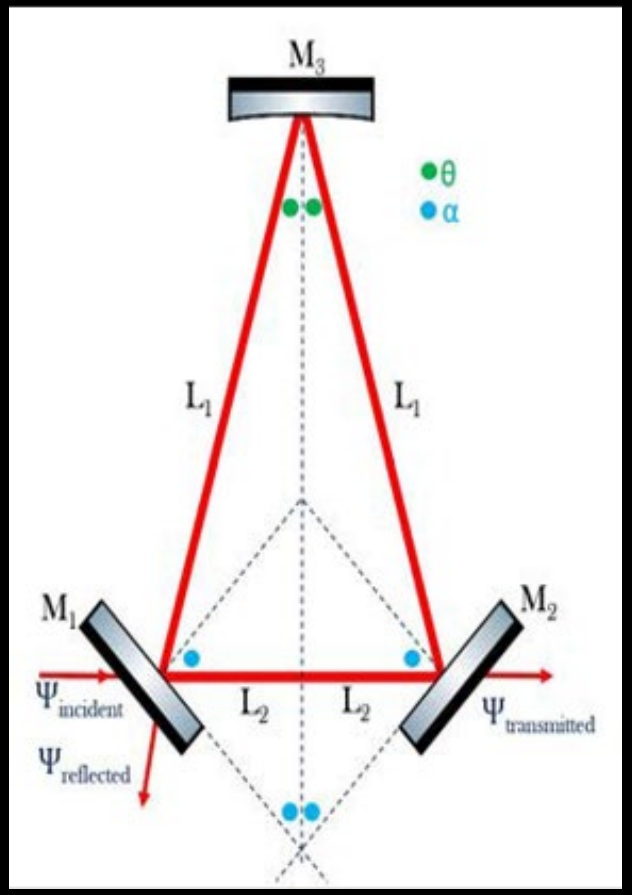
Miglioramento dello scambio termico con l'ambiente ottimizzando i materiali di cui è composto l'involucro.

- Simulazioni termiche e strutturali ANSYS per determinare i materiali ottimali.

Miglioramenti TCS: Mode Cleaner Laser CO_2



La qualità del profilo di riscaldamento del DAS è influenzata dalla presenza di Modi di Ordine Superiore (HOMs) che si sovrappongono al modo fondamentale (TEM00) del laser CO_2.



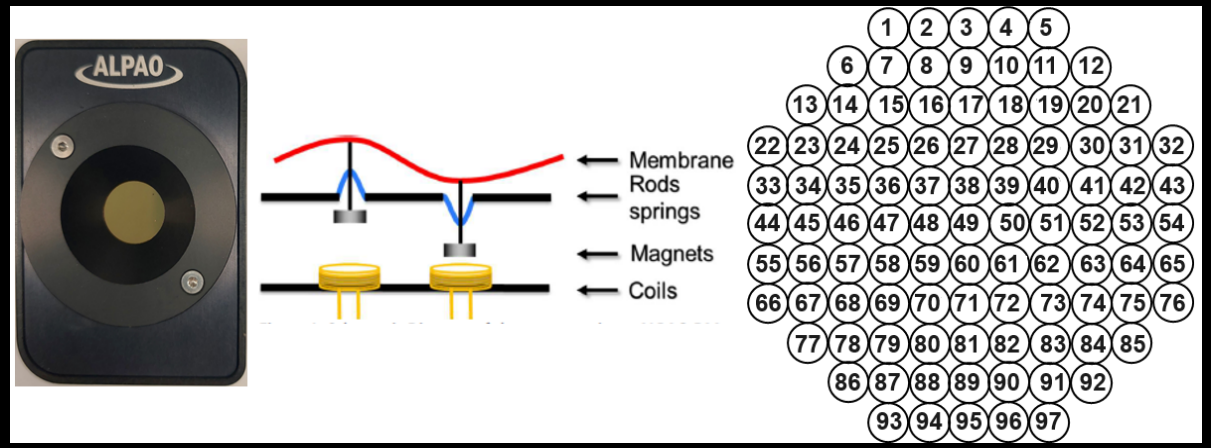
Per filtrare i modi di ordine superiore e migliorare la qualità del fascio laser CO_2 utilizzato, in Advanced Virgo verranno installate apposite cavità ottiche dette **Mode Cleaner**.

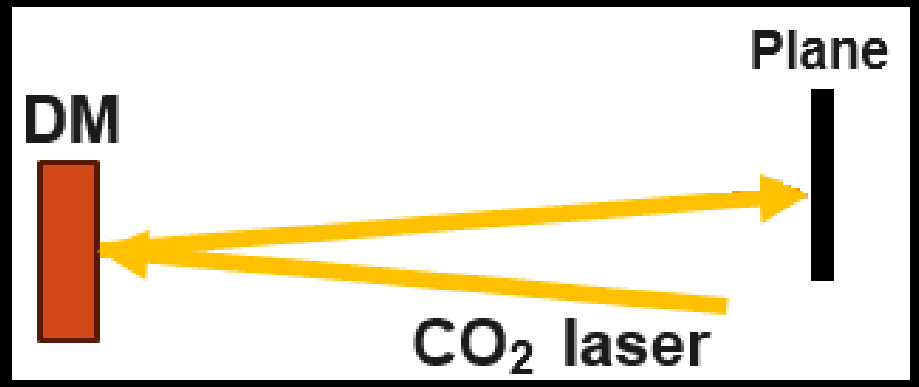
Miglioramenti TCS: Compensazione Residui

Per consentire una compensazione mirata dei residui non assi-simmetrici è in corso lo sviluppo e la caratterizzazione di un nuovo attuatore, uno **Specchio Deformabile**.

Quando un fascio laser CO_2 viene riflesso dallo specchio deformabile, questo applica la fase necessaria per ottenere il profilo di intensità desiderato.

La correzione risultante è statica e adattiva, **non introduce rumore nel rivelatore**.





Conclusioni

- L'aumento della potenza circolante negli interferometri impone un controllo delle aberrazioni ottiche sempre più accurato al fine di mantenere le prestazioni e la stabilità del sistema richieste.

- Sono in corso sviluppi e ottimizzazioni della TCS per affrontare le sfide dei prossimi run scientifici.

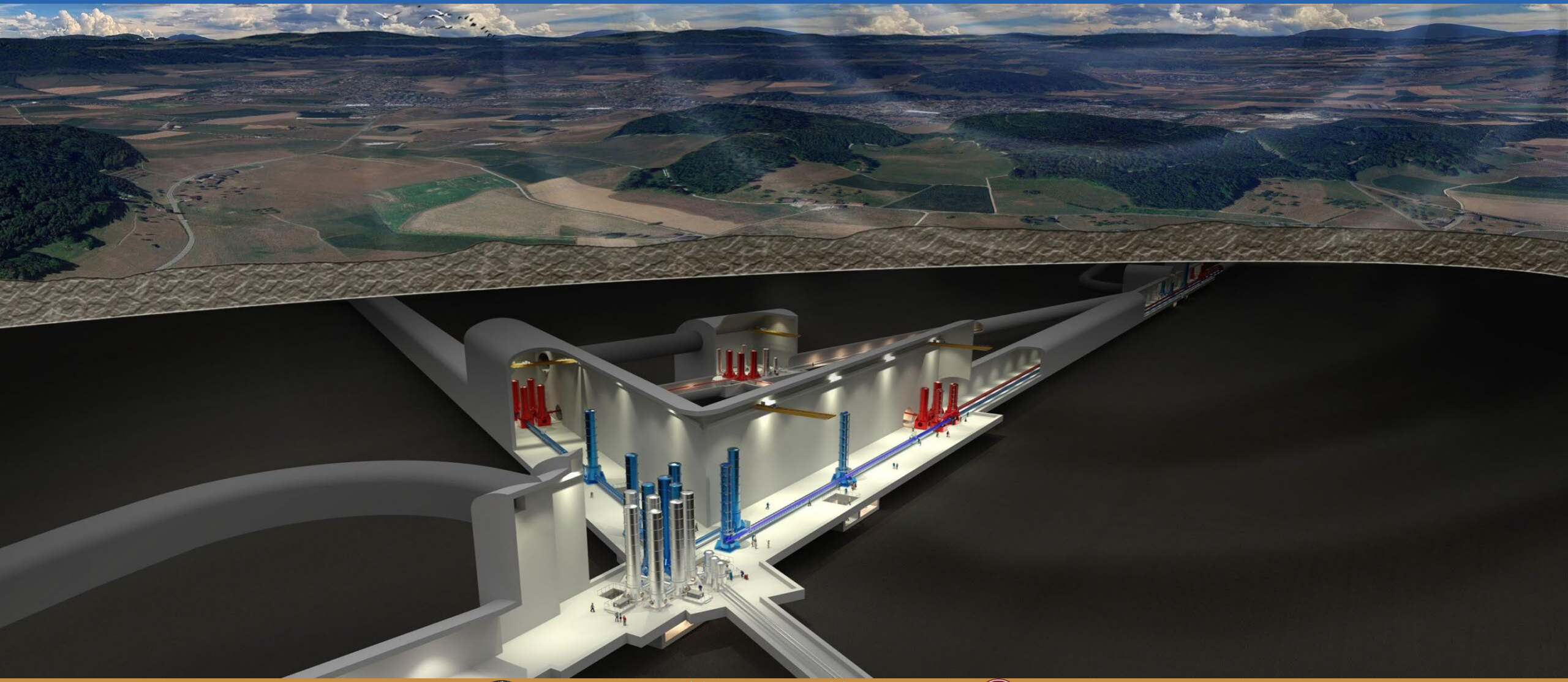
- Le conoscenze e le competenze maturate negli anni stanno contribuendo alla progettazione di soluzioni avanzate, preparando il terreno per i rivelatori di terza generazione.

Finanziato dall'Unione europea
NextGenerationEU

Ministero dell'Università e della Ricerca

Italiadomani
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA

INFN



ET ITALY Einstein Telescope

ALV ET ADVANCED OPTICS LAB @ TOR VERGATA FOR ET

TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
Macroarea di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

VIRGO