

# TCS: misura e compensazione delle aberrazioni ottiche in Advanced Virgo



Pier Paolo Palma<sup>1,2,3</sup>, L. Aiello<sup>1,2</sup>, E. Cesarini<sup>2</sup>, M. Cifaldi<sup>2</sup>, V. Fafone<sup>1,2</sup>,  
M. Ianni<sup>1,2,3</sup>, M. Lorenzini<sup>1,2</sup>, D. Lumaca<sup>2</sup>, Y. Minenkov<sup>2</sup>,  
I. Nardecchia<sup>2</sup>, A. Rocchi<sup>2</sup>, V. Scacco<sup>1,2</sup>, C. Taranto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Università di Roma Tor Vergata, Dipartimento di Fisica, Roma, Italia  
<sup>2</sup> INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, Roma, Italia  
<sup>3</sup> Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Fisica, Roma, Italia



ppalma@roma2.infn.it

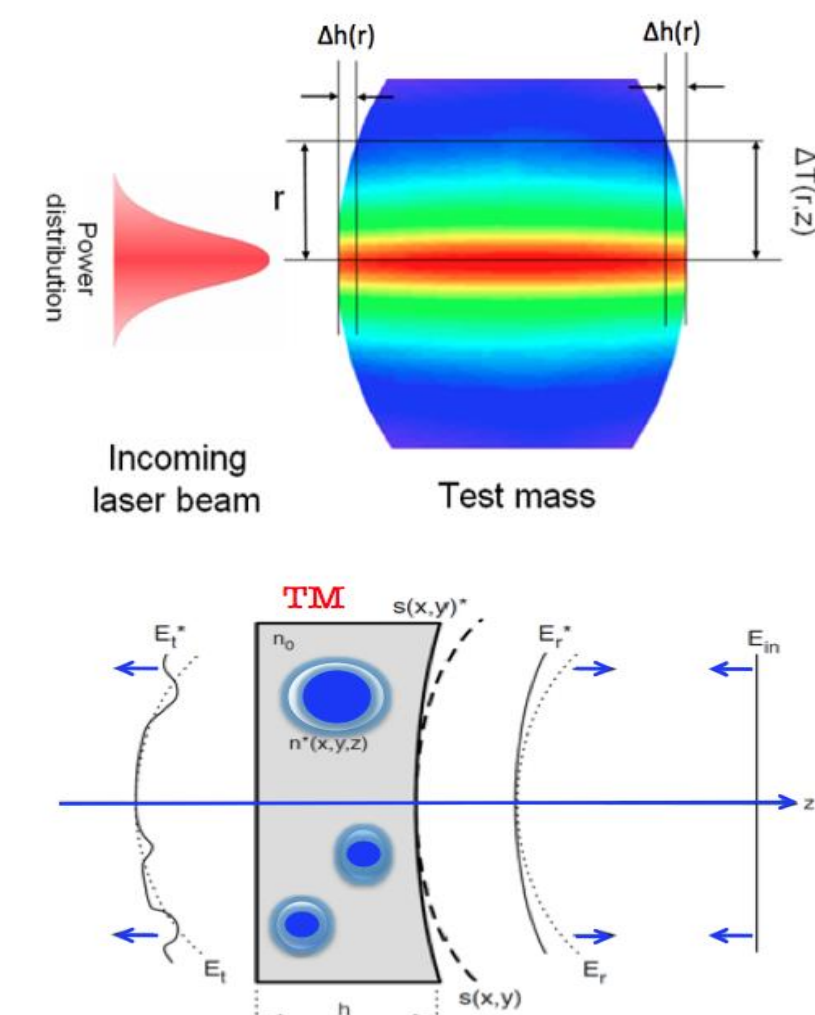
La sensibilità e l'operabilità dei rivelatori interferometrici avanzati per la ricerca di onde gravitazionali sono fortemente limitate dalla presenza di aberrazioni ottiche dovute sia a difetti intrinseci (o freddi) che ad effetti termici che deteriorano la configurazione ottica nominale dello strumento; questi ultimi in particolare sono intensificati all'aumentare della potenza del laser in ingresso all'interferometro poiché causati dalla percentuale di potenza assorbita dagli specchi che formano le cavità Fabry-Perot dell'interferometro. Il sistema di compensazione termica (TCS) dell'interferometro Advanced Virgo è tanto complesso quanto versatile ed ha un duplice scopo: caratterizzare e poi correggere le suddette aberrazioni ottiche. L'installazione e l'integrazione del sistema di compensazione termica sono il frutto di numerosi anni di studio ed esperienza nella progettazione di attuatori termici e nell'implementazione di strategie specifiche per la messa a punto del sistema. Gli effetti termici vengono monitorati mediante l'utilizzo di molteplici configurazioni atte a misurare le aberrazioni ottiche accumulate da fronti d'onda di fasci-sonda: effetti termici come quello termo-elastico e quello termo-ottico vengono poi corretti con appositi attuatori. Le varie fasi di messa a punto del sistema di compensazione termica che si sono succedute negli anni sono state un'occasione estremamente proficua per comprendere a fondo le caratteristiche di questi effetti termici e le strategie per compensarli con la maggiore accuratezza possibile.

## Aberrazioni ottiche: effetti termici e difetti freddi

La distorsione del fronte d'onda del fascio laser circolante nell'interferometro risulta essere un fattore limitante per le prestazioni dello strumento.

Le principali cause della distorsione includono:

- **Effetti termici:** assorbimento di una percentuale della potenza del laser da parte del substrato o del rivestimento delle ottiche, realizzate in silice fusa (SiO<sub>2</sub>).
- **Difetti freddi:** disomogeneità presenti nelle ottiche dovute ad errori di fabbricazione.



## Sistema di compensazione termica (TCS)

L'incremento della potenza del laser in ingresso all'interferometro è uno dei metodi adottati negli strumenti di seconda generazione per ridurre il rumore quantistico ad alta frequenza [1]. L'effetto collaterale è rappresentato dall'amplificarsi degli effetti termici.

### Conseguenze degli effetti termici

1. Lente termica asferica negli specchi di input:

- Modi di ordine superiore del laser risuonano nelle cavità di ricircolo
- Perdita di potenza nelle «sidebands» utilizzate per controllare l'interferometro

2. Deformazione della superficie altamente riflettente (HR):

- Decrescita della potenza circolante nelle cavità FP
- Aumento del rumore quantistico «shot noise»

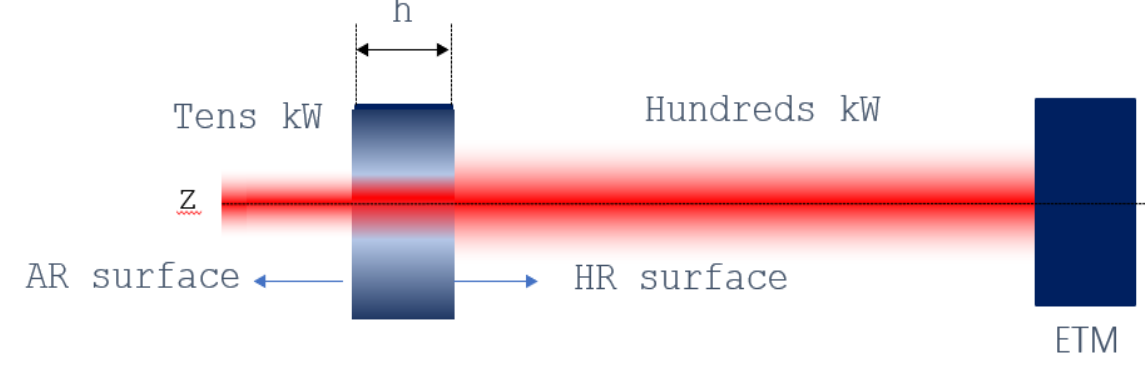
Gli specchi dell'interferometro sono sospesi e in ultra-alto vuoto. L'unico modo per agire su di essi al fine di compensare gli effetti termici (e freddi) è quello di scaldarli utilizzando una radiazione completamente assorbita.

**Un'aberrazione uguale e contraria a quella causata dal laser principale (Nd:YAG) viene indotta nelle ottiche al fine di ristabilire la loro configurazione nominale [2].**

### Effetto termo-ottico

L'effetto termo-ottico si manifesta come una variazione dell'indice di rifrazione della silice fusa dovuto al gradiente di temperatura. Questo fenomeno provoca una variazione del cammino ottico della luce che si propaga nell'interferometro.

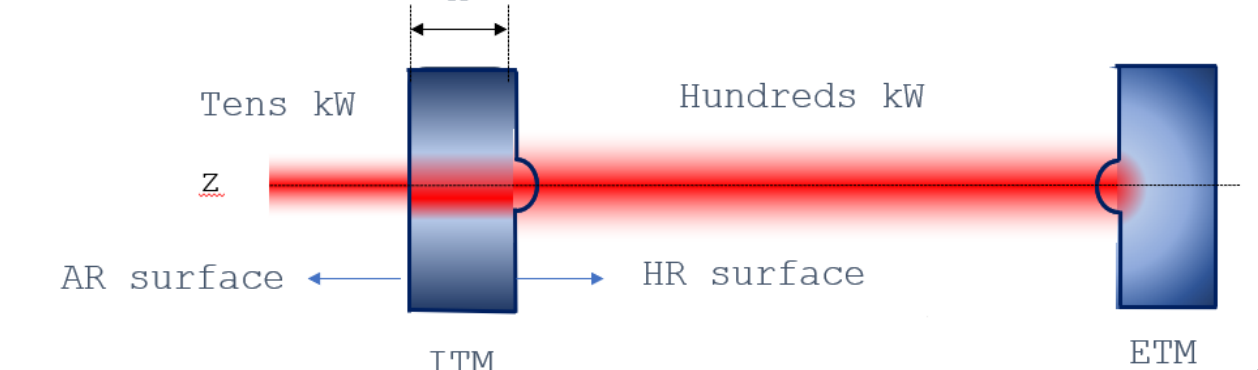
$$\Delta OPL_T = (dn/dT + (n-1)(1+\alpha)) \int_0^h \Delta T dz$$



### Effetto termo-elastico

L'effetto termo-elastico descrive la deformazione degli specchi dovuta all'espansione termica. Tale effetto ne altera il Raggio di Curvatura (RoC) nominale.

$$\Delta OPL_T \approx 2\alpha \int_0^h \Delta T dz$$

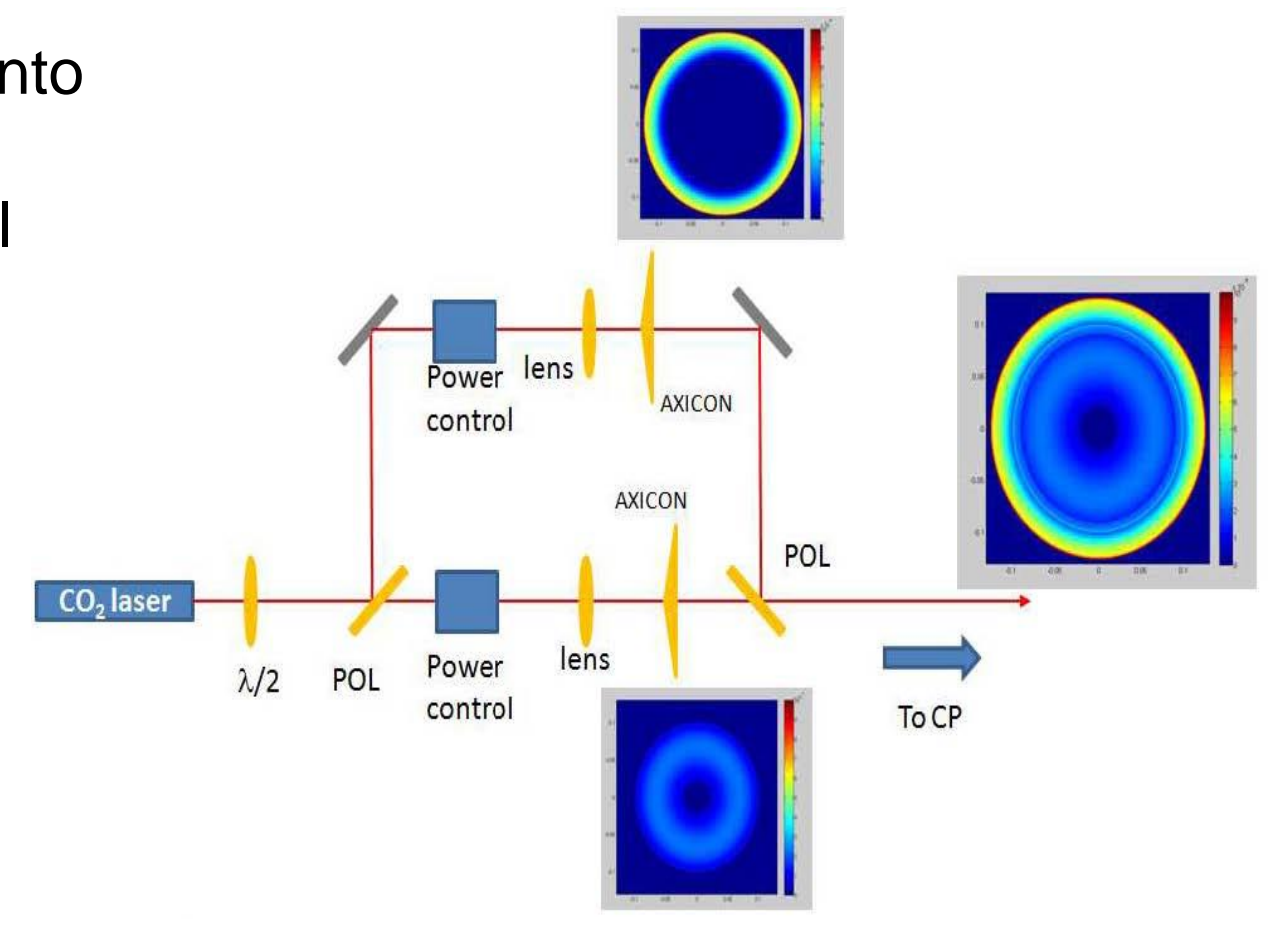


## Attuatori TCS: proiettori laser a CO<sub>2</sub>

- Laser a CO<sub>2</sub> (λ=10.6 μm) ad alta potenza utilizzati per correggere la lente termica
- Radiazione completamente assorbita dalla silice fusa.
- Profilo di riscaldamento proiettato su un elemento ottico apposito, il «compensation plate» (CP), posizionato prima delle cavità FP.

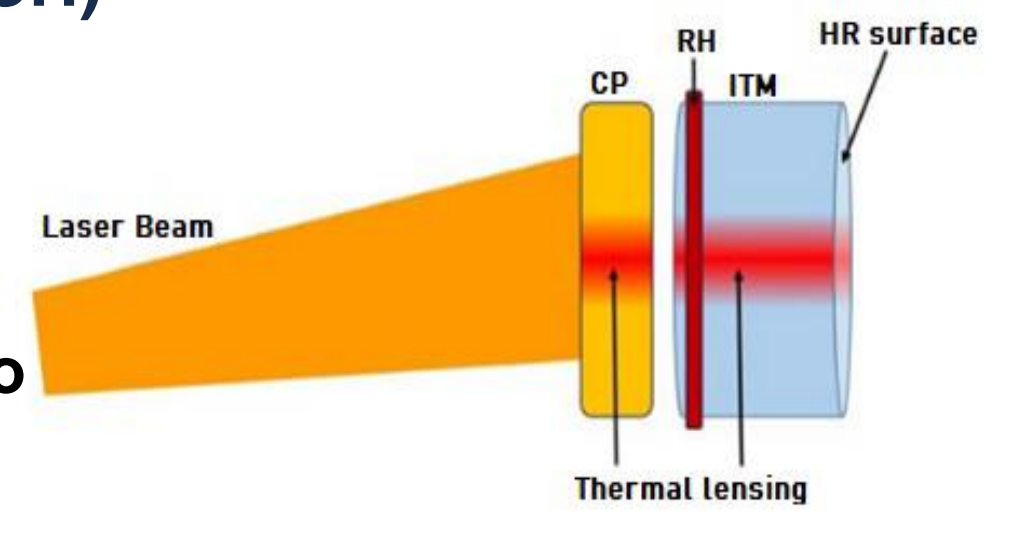
### Double Axicon System (DAS)

- Laser CO<sub>2</sub> principale: profilo di riscaldamento a simmetria assiale, caratterizzato da un anello interno ed uno esterno, proiettato al centro dell'ottica.
- Axicon utilizzato per trasformare un fascio gaussiano in uno di forma anulare
- Utilizzato per compensare la lente termica a simmetria assiale: la somma dei due profili di riscaldamento è la soluzione più performante



### Central Heating (CH)

- Laser CO<sub>2</sub> ausiliario: profilo di riscaldamento a simmetria assiale proiettato al centro dell'ottica per mimare il fascio laser principale.
- Utilizzato per evitare il transiente termico (dovuto allo YAG) che ha luogo quando l'interferometro non è nella sua condizione di lavoro.



### Attuatori TCS: Ring Heater (RH)

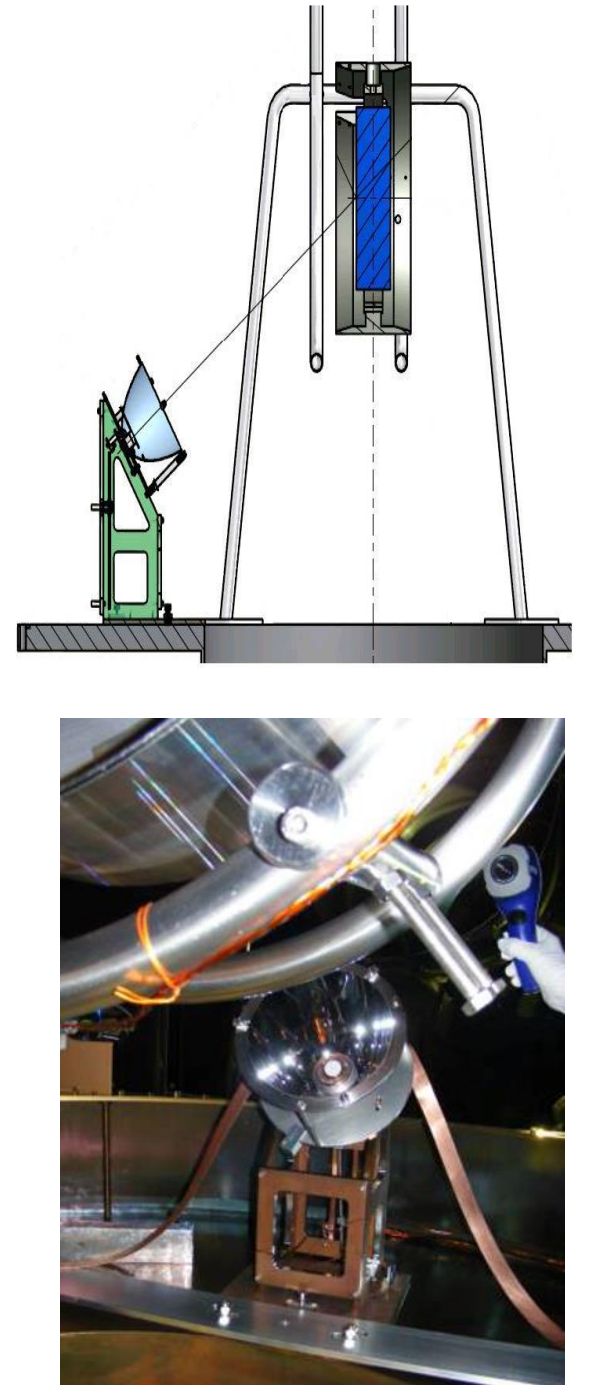
- Elemento radiativo che scalda la periferia dello specchio
- Composto da 2 anelli di vetro Pyrex, un filo conduttivo di NiCr e uno scudo di rame
- RH utilizzato per compensare la deformazione termoelastica della superficie HR



Installato attorno a ciascuno specchio dell'interferometro: ETM / ITM / PR / SR

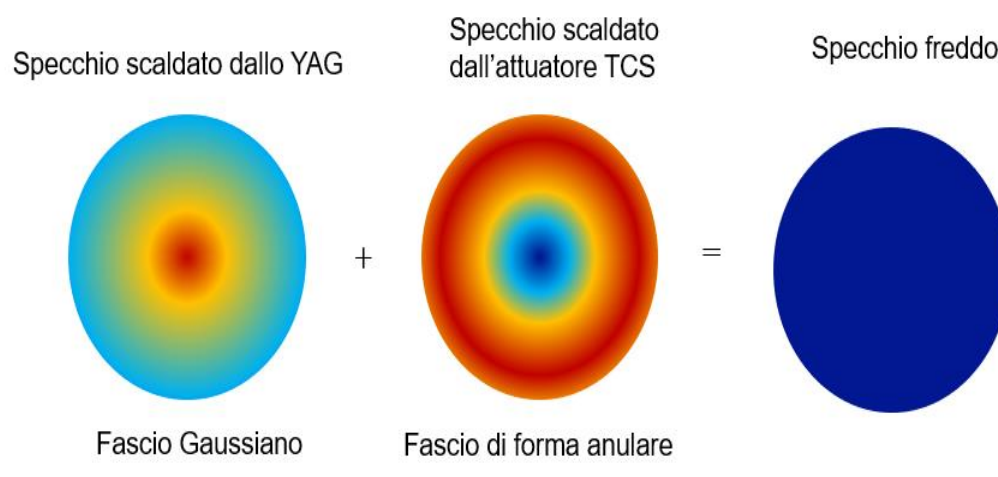
### Attuatori TCS: CHRoCC\*

- Elemento radiativo formato da uno schermo parabolico riflettente ed un riscaldatore centrale [4]
- Torre PRM: agisce sul RoC equivalente della cavità di ricircolo di potenza (PRC)



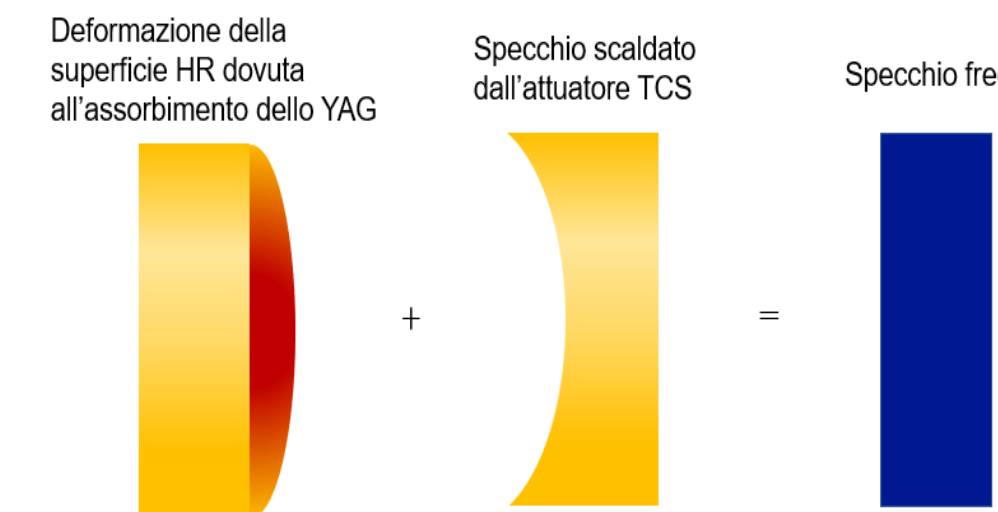
\*sviluppato dallo European Gravitational Observatory

### 1. Lente termica asferica negli specchi di input

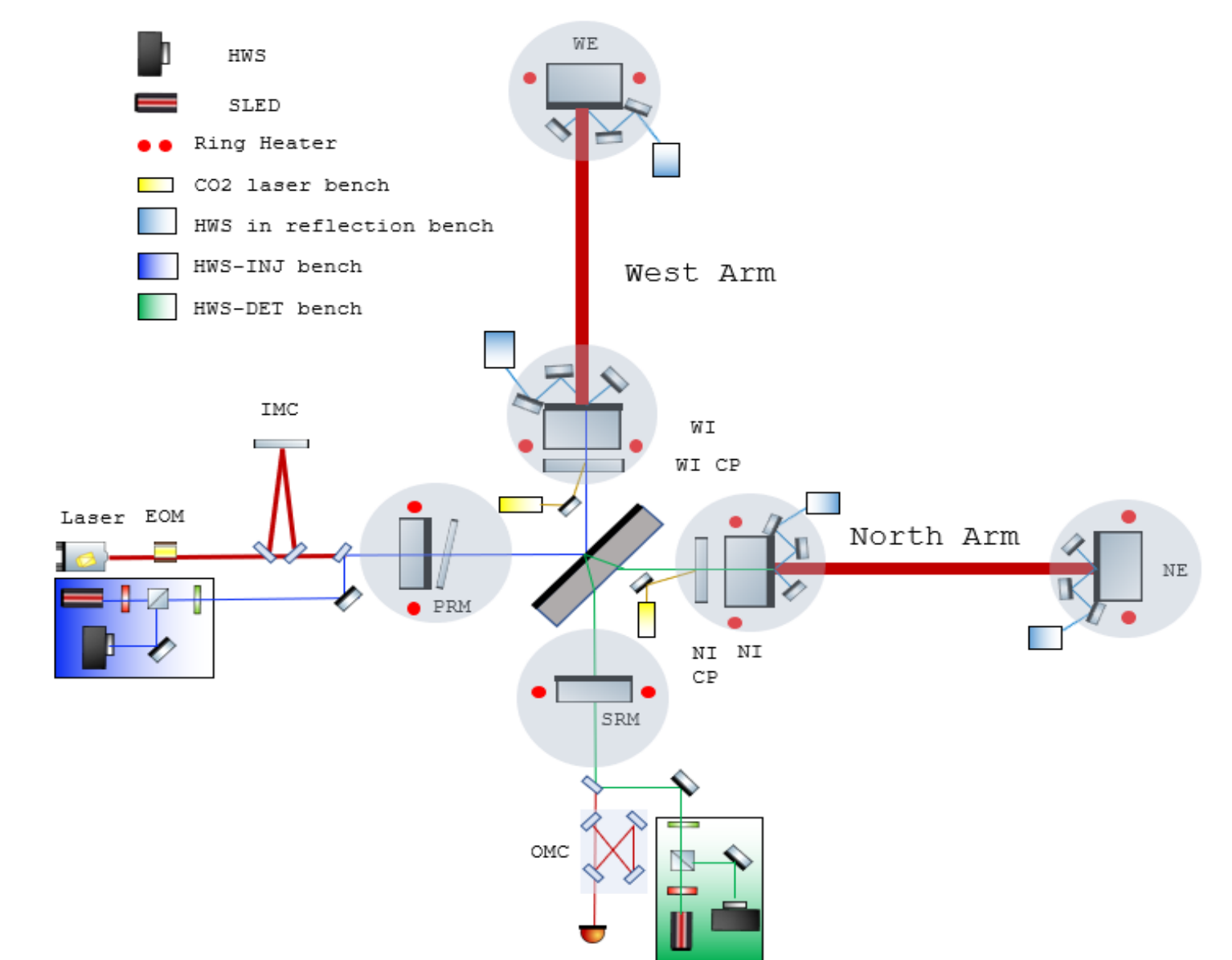


La strategia è quella di scaldare lo specchio utilizzando un fascio laser anulare.

### 2. Deformazione della superficie HR



La strategia è quella di scaldare la zona periferica della superficie HR dello specchio.



### Requisiti TCS [3]

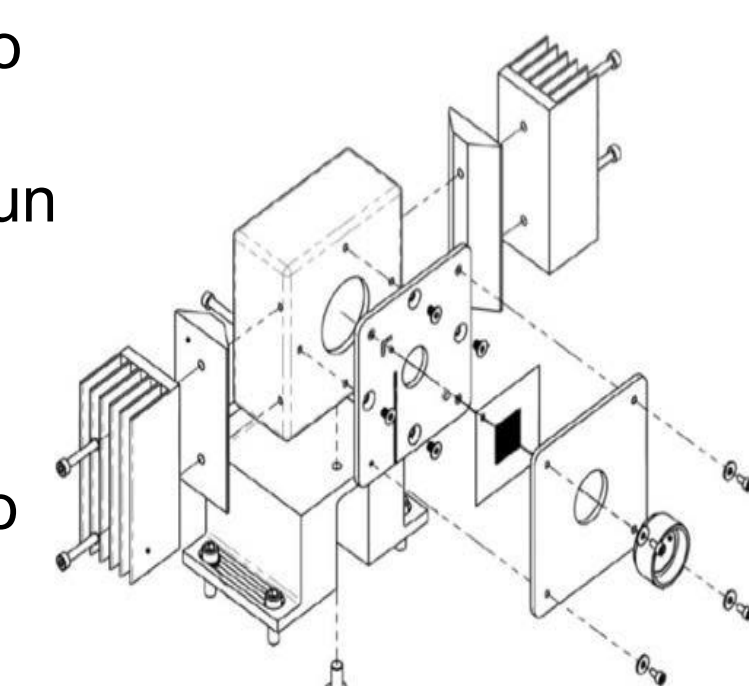
- Le aberrazioni di fronte d'onda devono essere compensate con una precisione migliore di 2 nm RMS.
- Il raggio di curvatura (RoC) degli specchi deve essere controllato entro ± 2 m.

### Sensori TCS: Hartmann Wavefront Sensor (HWS)\*

- Sensore «locale», ogni specchio ha un sensore dedicato
- Misura in tempo reale le distorsioni del fronte d'onda di un fascio-sonda incoerente (SLED) rispetto ad un fronte d'onda di riferimento: sensore differenziale [5]
- «Hartmann Plate» divide il fascio incidente sui fori che lo caratterizzano: dal profilo d'illuminazione sulla CCD si ricostruisce il gradiente locale del fronte d'onda

$$\partial \Delta W / \partial x = \Delta x_i / L$$

- Due differenti configurazioni: «on-axis» e «off-axis»
- HWS-RC: misura la lente termica nelle cavità di ricircolo
- HWS-HR: misura la deformazione termoelastica della superficie HR



\*sviluppato dal gruppo di ricerca dell'Università di Adelaide (Australia)

### Sensori TCS: Phase Camera (PC)\*

- Sensore «globale»
- Misura, simultaneamente, l'ampiezza e la fase del fascio laser che circola nelle cavità [6]
- Monitora la presenza di aberrazioni nella PRC e nel fascio in uscita dall'interferometro

\*sviluppato dal gruppo di ricerca di Nikhef

Il gruppo di ricerca responsabile della progettazione e della messa a punto degli attuatori e sensori in seguito installati su Advanced Virgo svolge il proprio lavoro presso l'Università di Roma Tor Vergata.

L'enorme sforzo dedicato al loro sviluppo, o caratterizzazione, è continuo ed è focalizzato costantemente al miglioramento del sistema nel suo complesso, anche in vista della terza generazione di interferometri per la ricerca di onde gravitazionali.

Il sistema di compensazione termica di Advanced Virgo svolge un ruolo cruciale e imprescindibile.

### Referenze

- [1] The Virgo Collaboration, *Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector*, *Class. Quantum Grav.*, 32 (2015);
- [2] A. Rocchi, E. Coccia, V. Fafone, V. Malvezzi, Y. Minenkov, L. Sperandio, *Thermal effects and their compensation in Advanced Virgo*, *Journal of Physics: Conference Series* 363, 012016 (2012);
- [3] The Virgo Collaboration, *Advanced Virgo Technical Design Report*, VIR-0128A-12 (2012);
- [4] CHRoCC team, TCS: CHRoCC motivation, preparation and commissioning, VIR-0696A-22 (2022);
- [5] Brooks A.F., *Hartmann Wavefront Sensors for Advanced Gravitational Wave Interferometers*, Ph.D. Thesis (2007);
- [6] L. van der Schaaf et al., *Advanced Virgo phase cameras*, *Journal of Physics: Conference Series* 718, 072008 (2016);