



CONTROLLO DELLE ABERRAZIONI OTTICHE NEI RIVELATORI INTERFEROMETRICI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Nardecchia I., Cesarini E., Coccia E., Fafone V.,
Lorenzini M., Malvezzi V., Minenkov Y., Rocchi A., Sequino V.

SIF, 101° Congresso Nazionale, 21-25 Settembre 2015, Roma

✓ Outline

** Introduzione alle onde gravitazionali, da Virgo ad Advanced Virgo

** Effetti termici e sistema di compensazione termica

** TeTis

** Conclusioni

Le onde gravitazionali: predizione e rivelazione

Corpi in moto con momento di quadrupolo accelerato

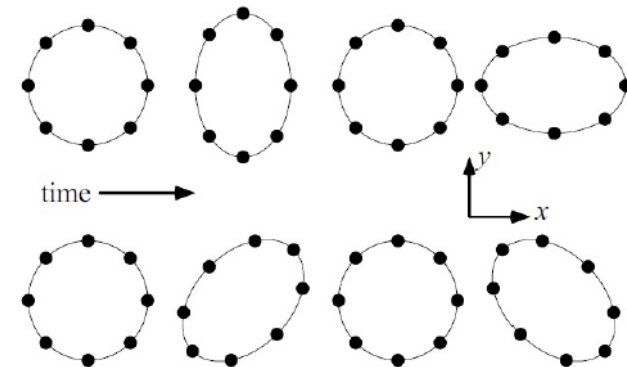
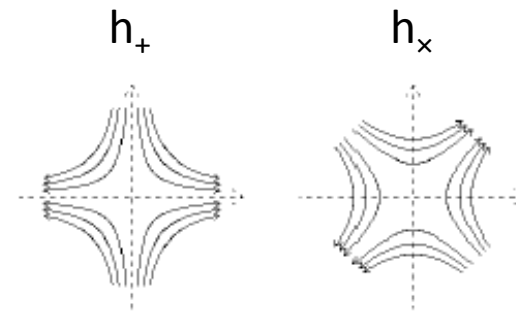


Perturbazioni della metrica dello spazio tempo



ONDE GRAVITAZIONALI:

- hanno due stati di polarizzazione;
- inducono una deformazione di natura quadrupolare;
- contraggono o dilatano la distanza tra due punti materiali posti su un diametro della quantità:



$$\Delta l = \frac{h}{2} l$$

Sorgenti di Onde Gravitazionali

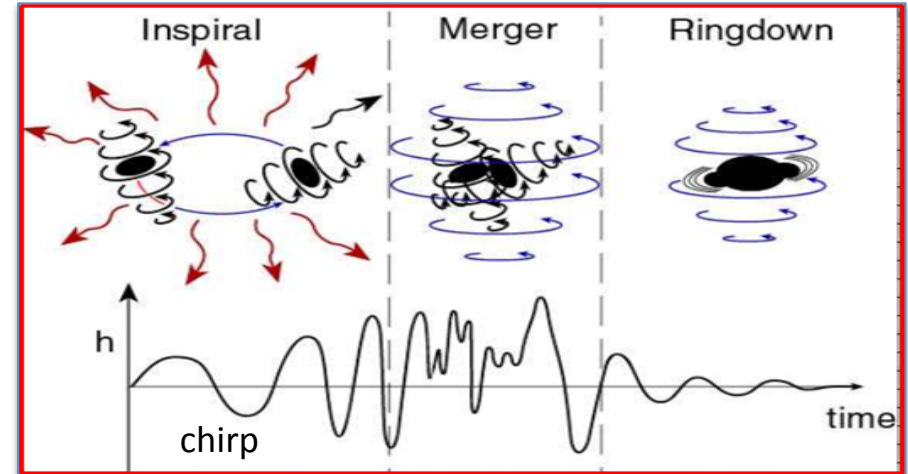
Segnali Transienti

Supernovae di tipo II (SN)

- OG emesse dal collasso asimmetrico di una stella massiva.

Sistemi binari coalescenti (NS-NS) (BH-BH) (NS-BH)

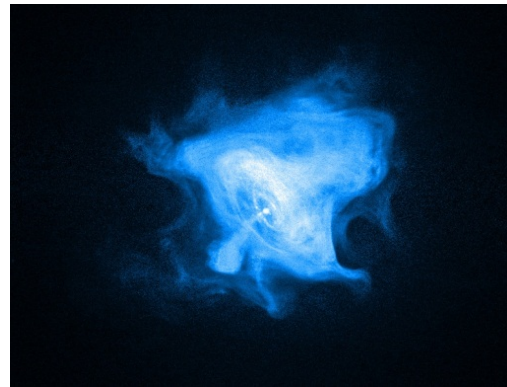
- Coalescenza; inspiral-merger-ring down



Vela



Crab



Fondo stocastico

Componente cosmologica

- Residuo della radiazione gravitazionale emessa durante il Big Bang (i.e. modello inflazionario, nucleosintesi primordiale).

Segnali periodici

Pulsars

$$\epsilon = 1 - \frac{a_2}{a_1}$$

- Distribuzione asimmetrica della massa

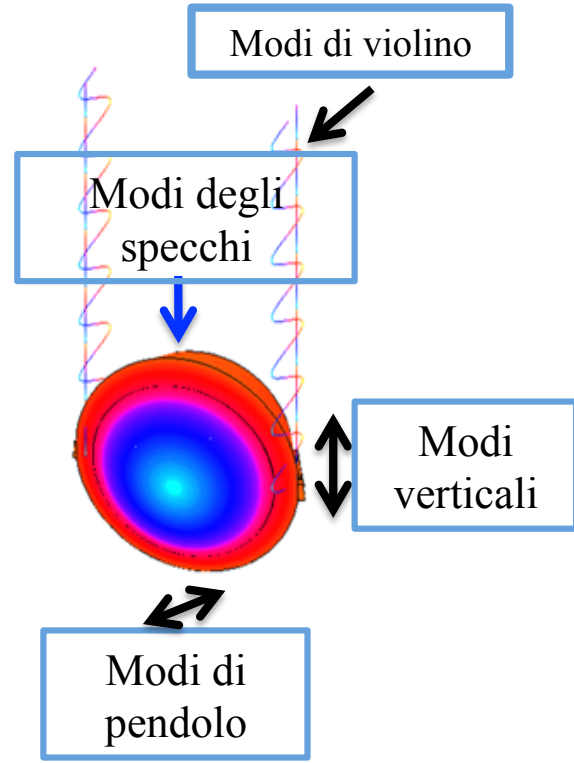
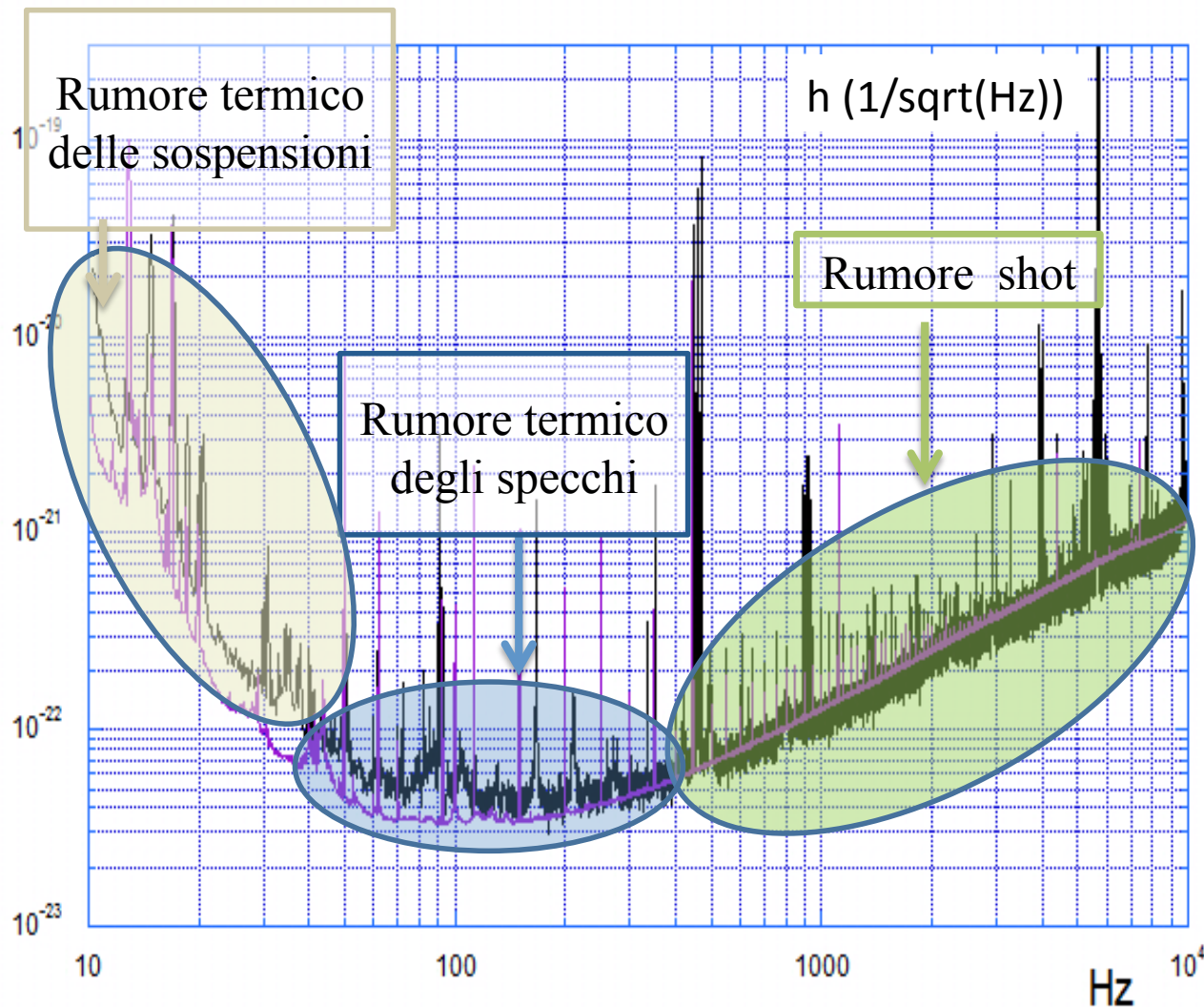
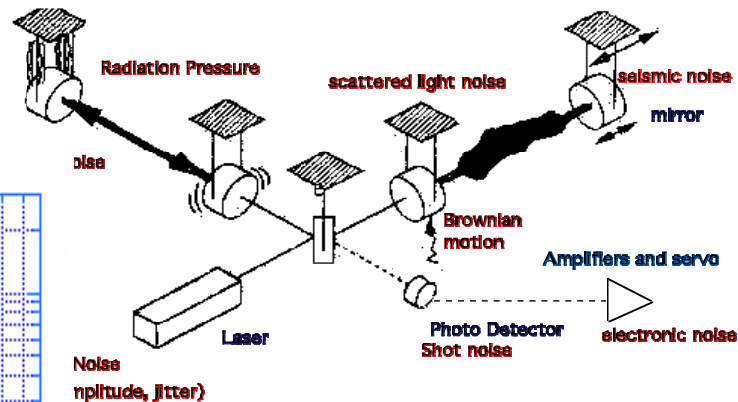
$$h = 10^{-26} \frac{\epsilon}{10^{-6}} \left(\frac{\nu}{100 \text{ Hz}} \right)^2 \left(\frac{10 \text{ kpc}}{r} \right) \left(\frac{I_3}{10^{38} \text{ kg m}^2} \right)$$

$$h_{sd} = 8 \times 10^{-25} \sqrt{\left(\frac{|\dot{\nu}|}{10^{-10} \text{ Hz/s}} \right)} \cdot \left(\frac{\nu}{100 \text{ Hz}} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{d}{1 \text{ kpc}} \right)^{-1}$$

Componente astrofisica

- Sovrapposizione di sorgenti astrofisiche non risolte (i.e. sistemi binari, pulsars).

I RUMORI INTRINSECI



$$h_{shot} \propto \frac{1}{\sqrt{P_{in}}}$$

17 W (Virgo) -> 125 W (AdV Virgo)

✓ Outline

** Introduzione alle onde gravitazionali, da Virgo ad Advanced Virgo

**** Effetti termici e sistema di compensazione termica**

** TeTis

** Conclusioni

Aberrazione di fronte d'onda (W)

- Variazione di un fronte d'onda (punti caratterizzati dalla stessa fase) rispetto ad uno nominale di un campo elettromagnetico accumulato dopo la riflessione o la trasmissione attraverso un elemento ottico aberrato;

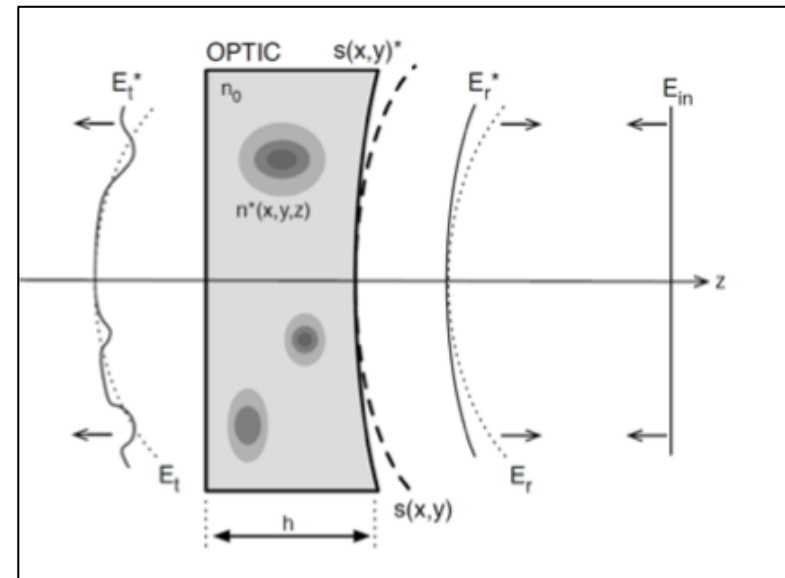
E_{in} : campo elettromagnetico incidente,

E_r : campo elettromagnetico riflesso non aberrato

E_r^* : campo elettromagnetico riflesso aberrato per effetto della distorsione superficiale s^*

E_t : campo elettromagnetico trasmesso non aberrato

E_t^* : campo elettromagnetico trasmesso per effetto di disomogeneità n^* presenti all'interno dell'ottica.



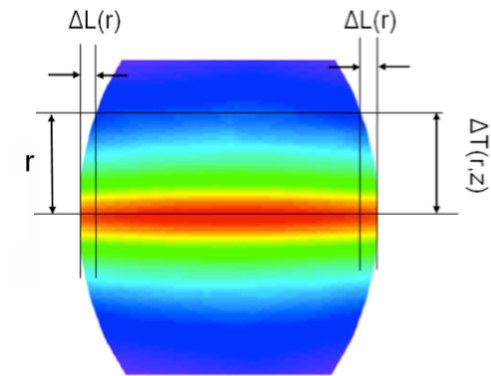
Le sorgenti delle aberrazioni di fronte d'onda in un rivelatore interferometrico sono dovute a:

- imperfezioni nella produzione dei materiali per la realizzazione degli specchi; -> **Difetti freddi** indipendenti dal tempo e dallo stato del rivelatore;
- riscaldamento delle ottiche.

Principali effetti dell'assorbimento di potenza da parte degli specchi:

- **Lente termica:** aumento di temperatura $\rightarrow dn/dT \rightarrow$ aumento del cammino ottico (OPL) della luce nello specchio. Sia il cammino S:

$$\Delta OPL_T \approx \frac{dn}{dT} \int_S \Delta T ds$$



- **Effetto termoelastico:** deformazione meccanica dello specchio lungo l'asse ottico.

$$\Delta OPL_R \approx 2\alpha \int_S \Delta T ds$$



Conseguenze:

1. Variazione del raggio di curvatura (RoC) degli specchi
 - > modi di ordine superiore al TEM_{00}
 - > aumento del rumore shot -> perdita di sensibilità dell'interferometro;
2. Difficoltà nel controllo dell'interferometro

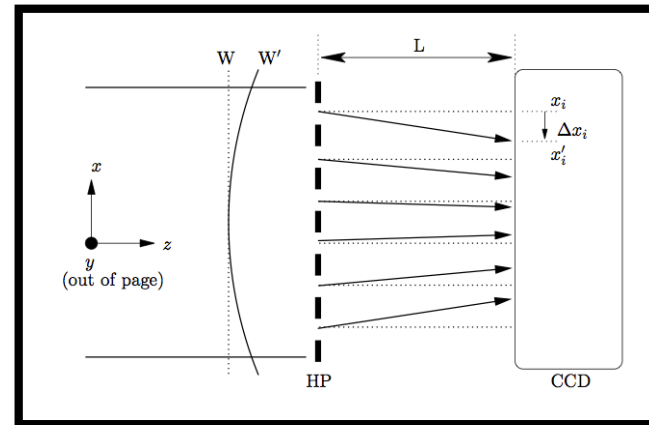
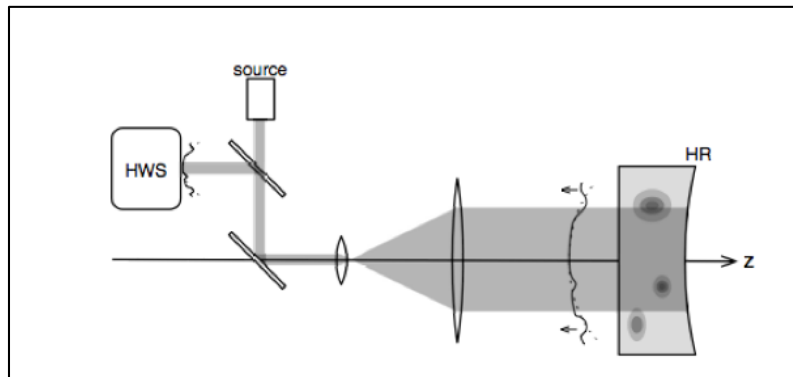


Sistema di compensazione termica (TCS)

SENSORI

Sensore di fronte d'onda Hartmann (HWS):

- misura la differenza di un fronte d'onda 'live' rispetto ad un fronte d'onda di riferimento attraverso un fascio sonda che si riflette sull'ottica aberrata e/o l'attraversa.

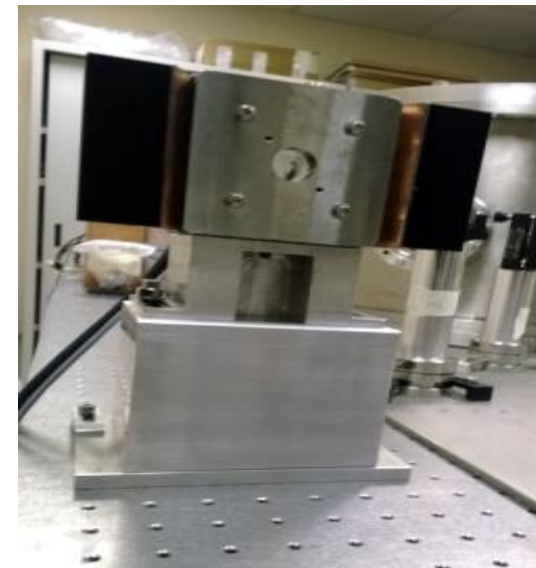


$$\frac{\partial \Delta W}{\partial x} = \frac{\Delta x_i}{L}$$

Gradiente del
fronte d'onda

- Posizionato nel piano immagine della superficie aberrata

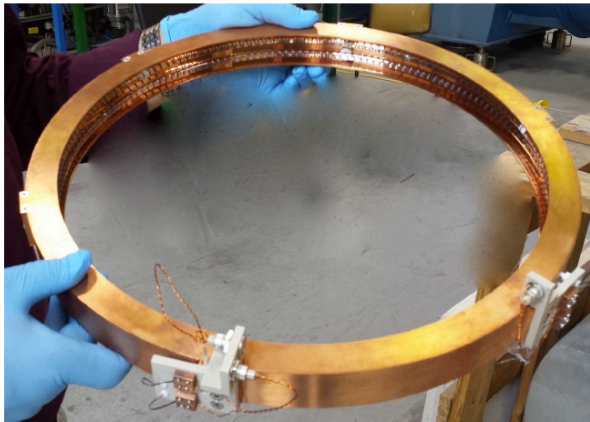
$$ROC_{TM} = M_{op}^2 ROC_{HWS}$$



Brevettato dal gruppo LIGO
dell'Università di Adelaide (Australia)

ATTUATORI

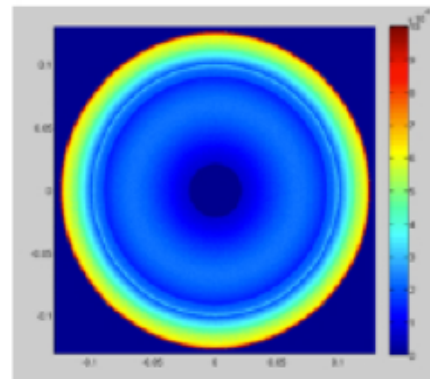
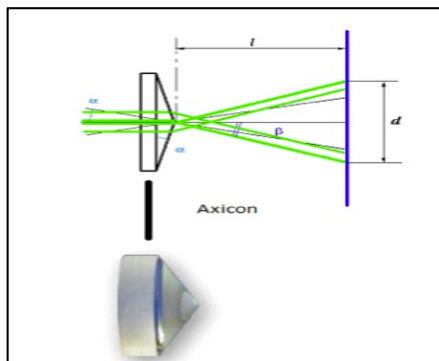
1. **Ring Heater:** corregge il raggio di curvatura degli specchi a freddo (difetti progettuali) e agisce nel tempo per compensare la variazione di RoC dovuto all'assorbimento di potenza



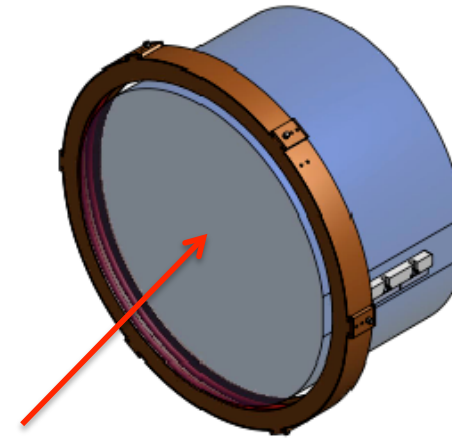
Schermo di rame per aumentare l'efficienza

Anelli di vetro con avvolgimenti di NiCr.

2. **Sistema a doppio axicon:** due fasci anulari realizzati con un laser CO₂ incidenti su un piatto di compensazione (CP) per correggere i termini a simmetria assiale dell'effetto di lente termica.

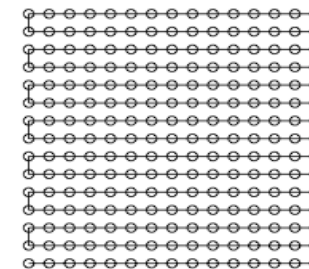


Specchio e RH nel nuovo payload di AdV



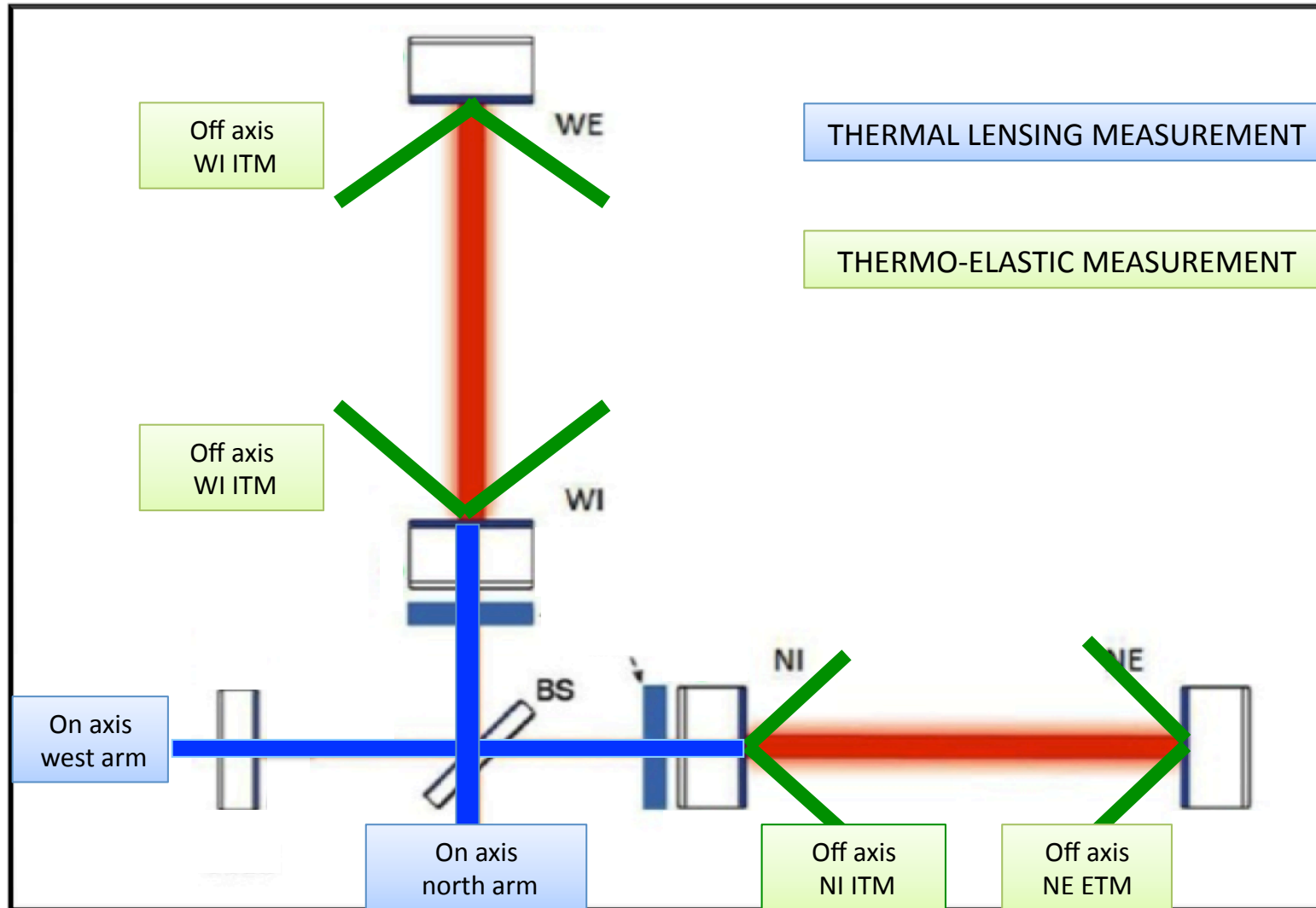
Superficie dello specchio non affacciata nella cavità Fabry-Pérot

3. **Sistema laser a scansione:** una coppia di specchi galvanometrici permette la movimentazione del fascio CO₂ incidente sulla CP depositando in ogni punto una certa quantità di potenza necessaria per correggere i difetti asimmetrici.

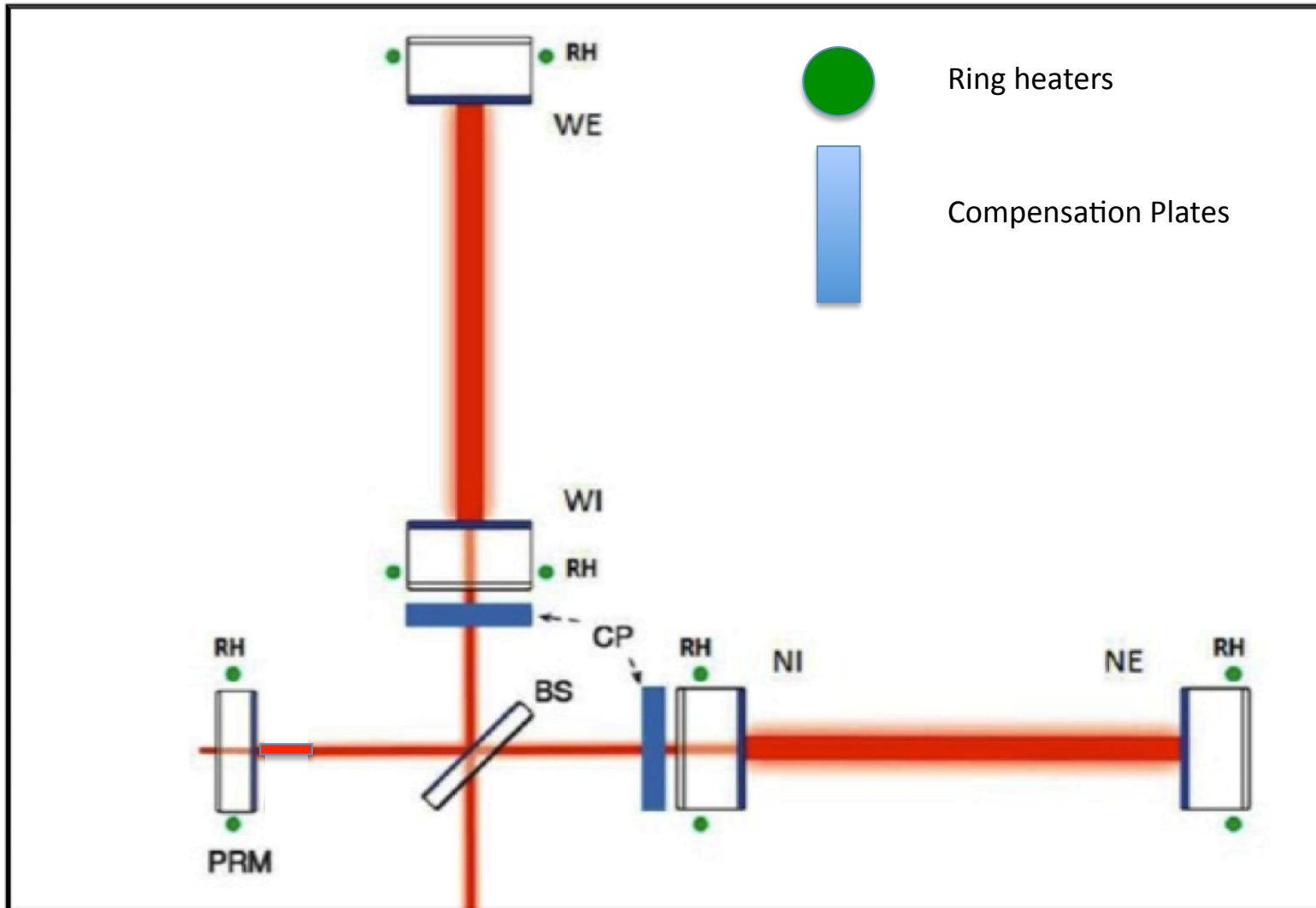


Pattern di scansione

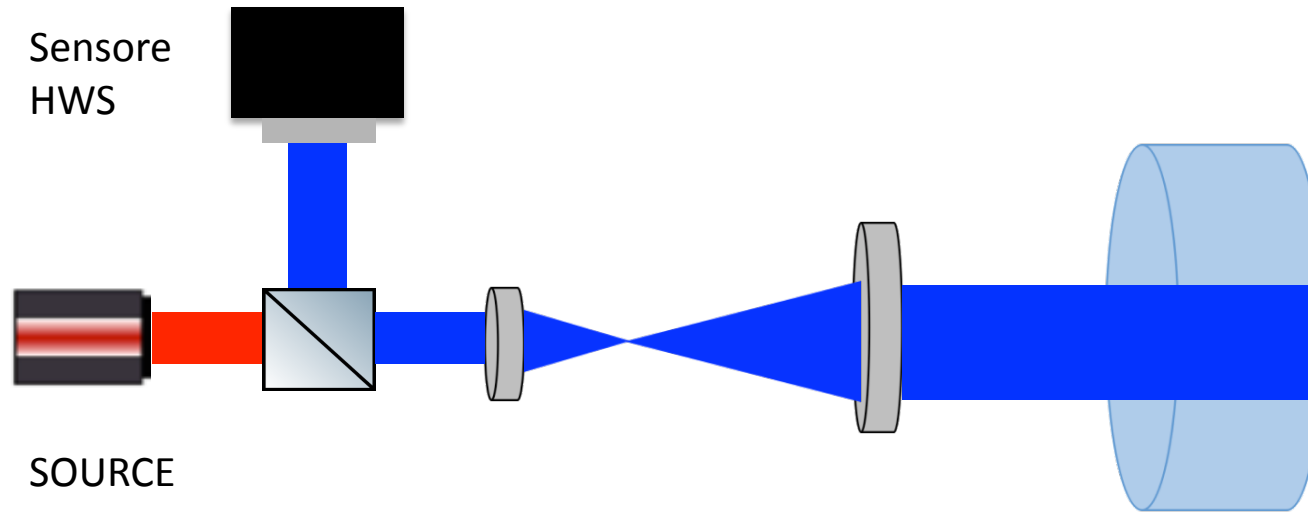
Schema della TCS IN AdV: sensori



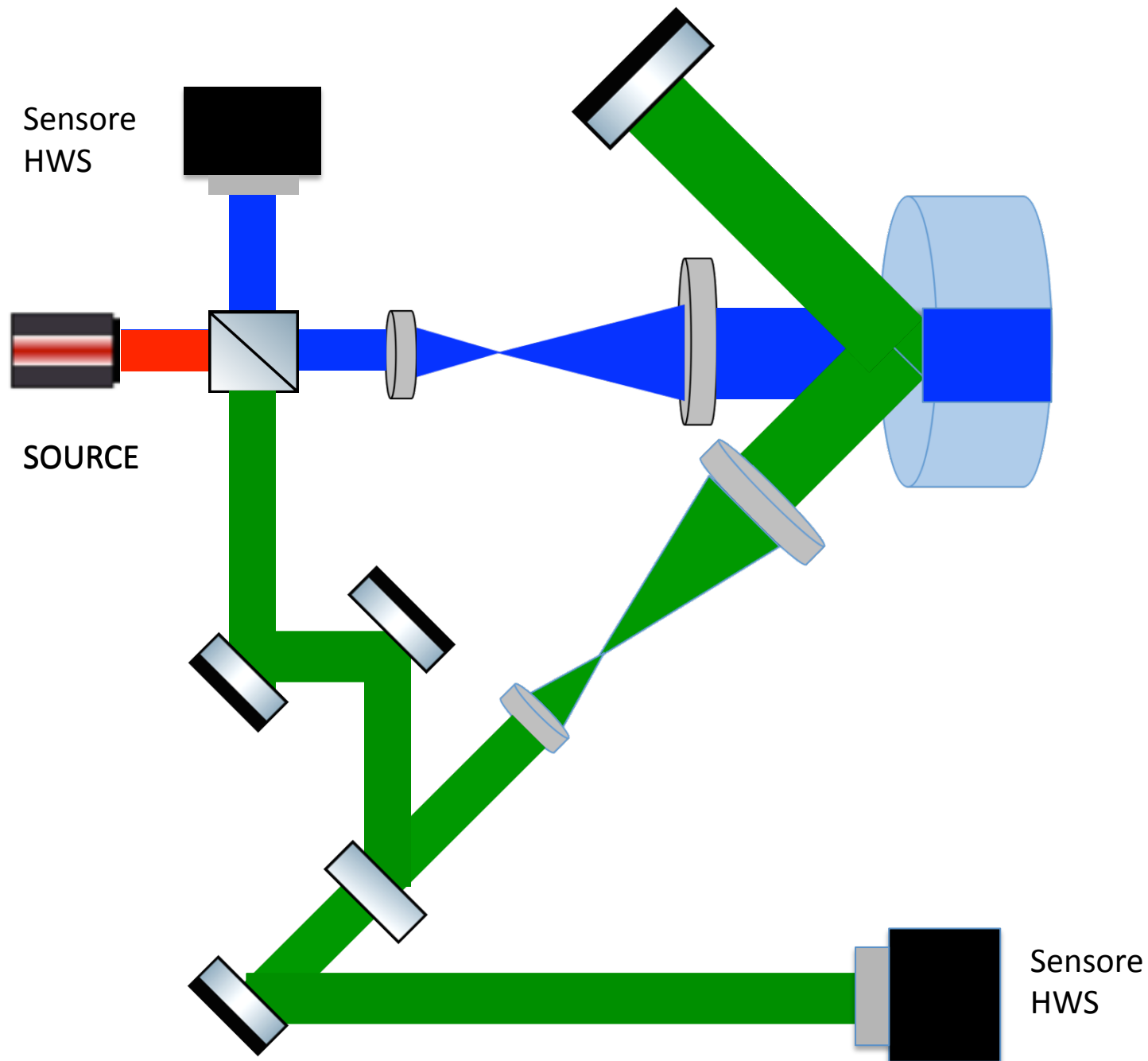
Schema della TCS IN AdV: attuatori

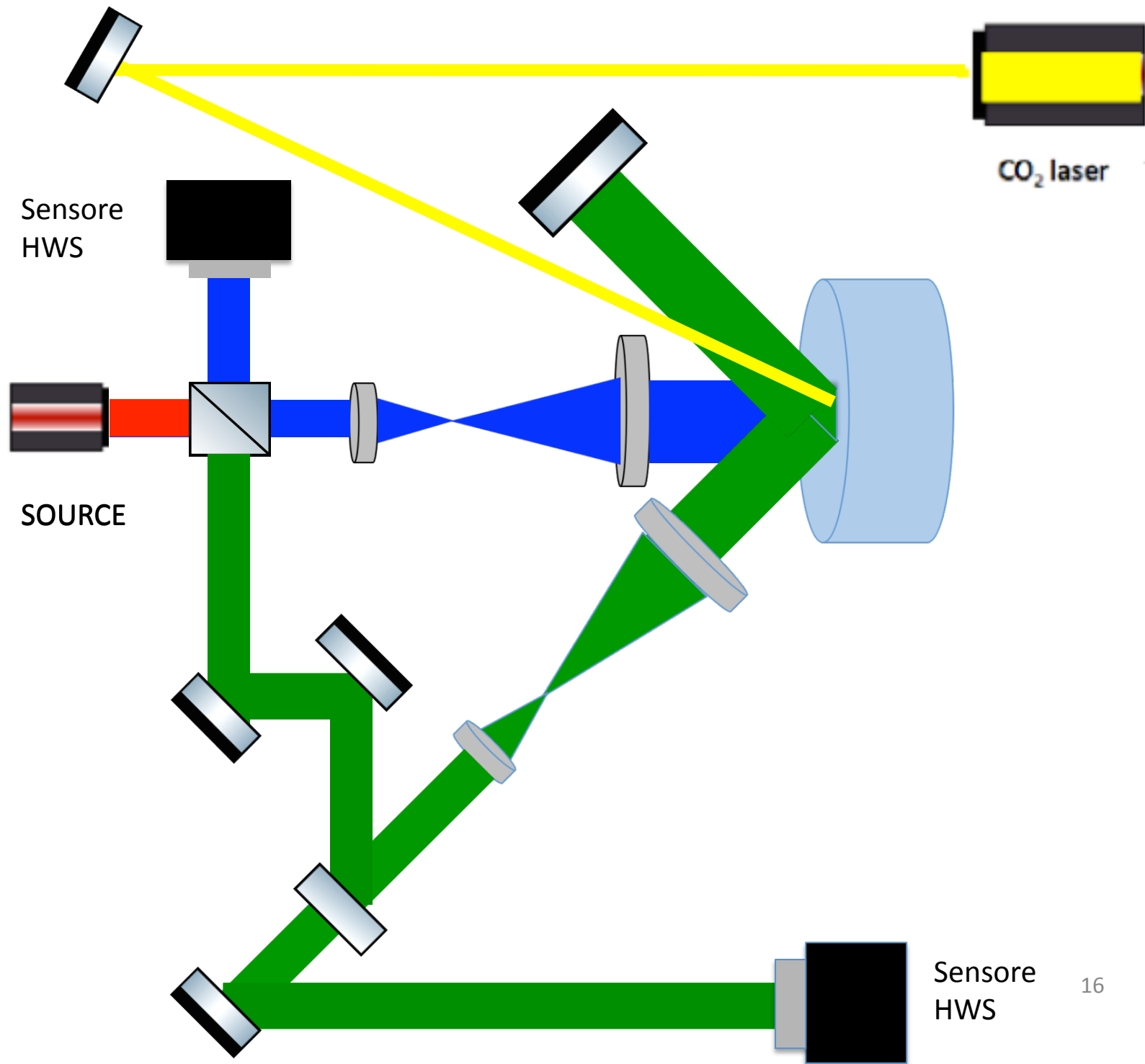


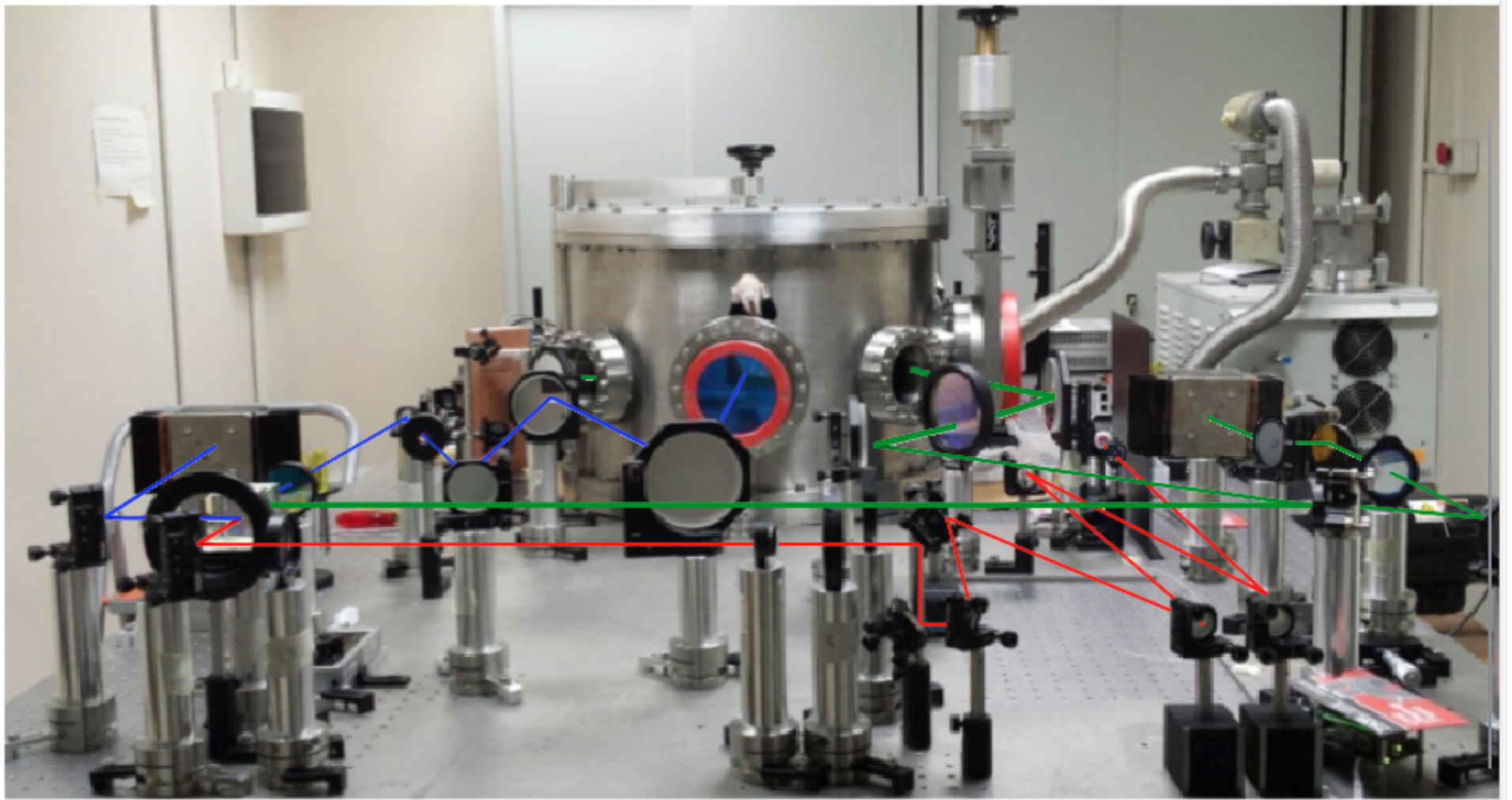
TeTis (Testing the Effects of Tcs Integrated Strategies)



On Axis, misura
lente termica

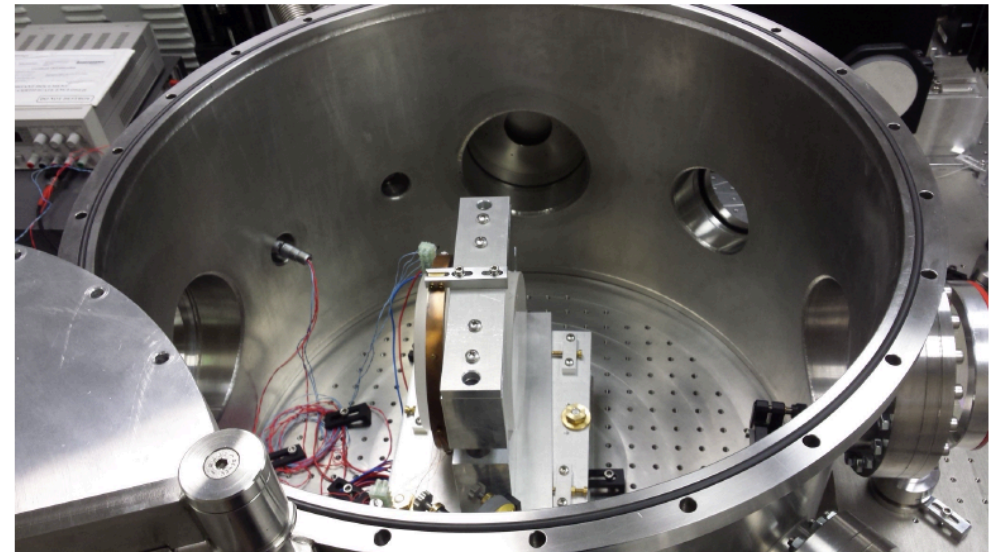




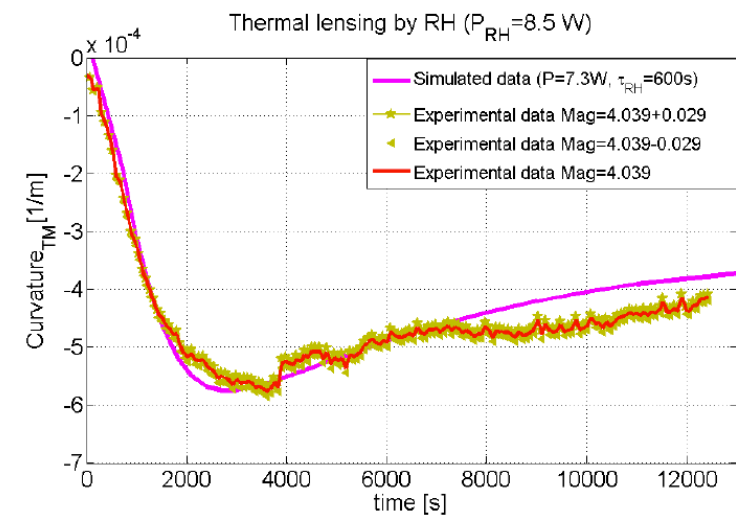
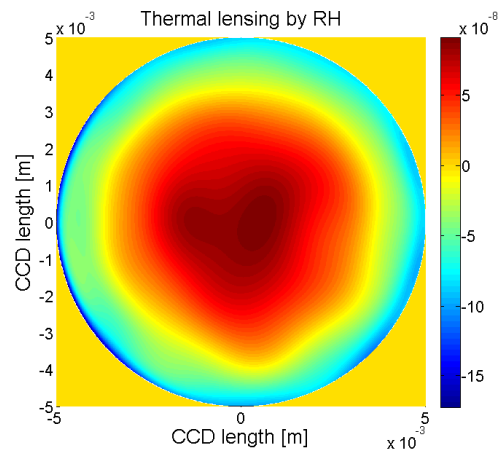
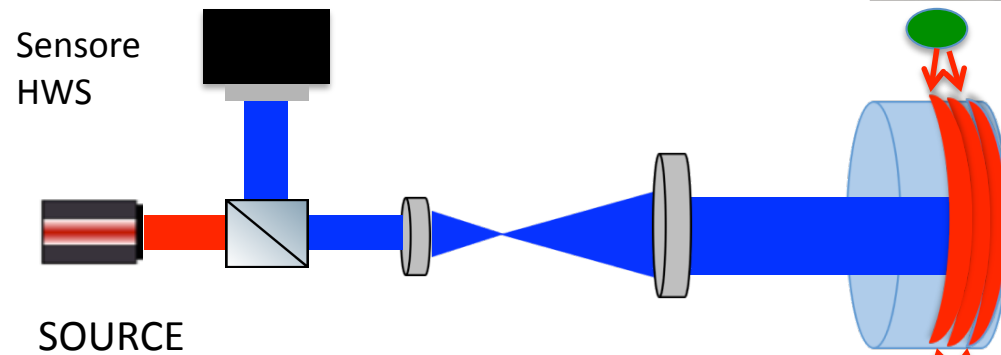


Effetto di lente termica dovuto al ring heater

- Misura on-axis della curvatura dello specchio dovuto all'aumento di OPL attraverso lo specchio
- La deviazione dell'andamento sperimentale rispetto a quello misurato dopo circa 2 ore potrebbe essere dovuto ad un effetto di deriva termica dell'ambiente.

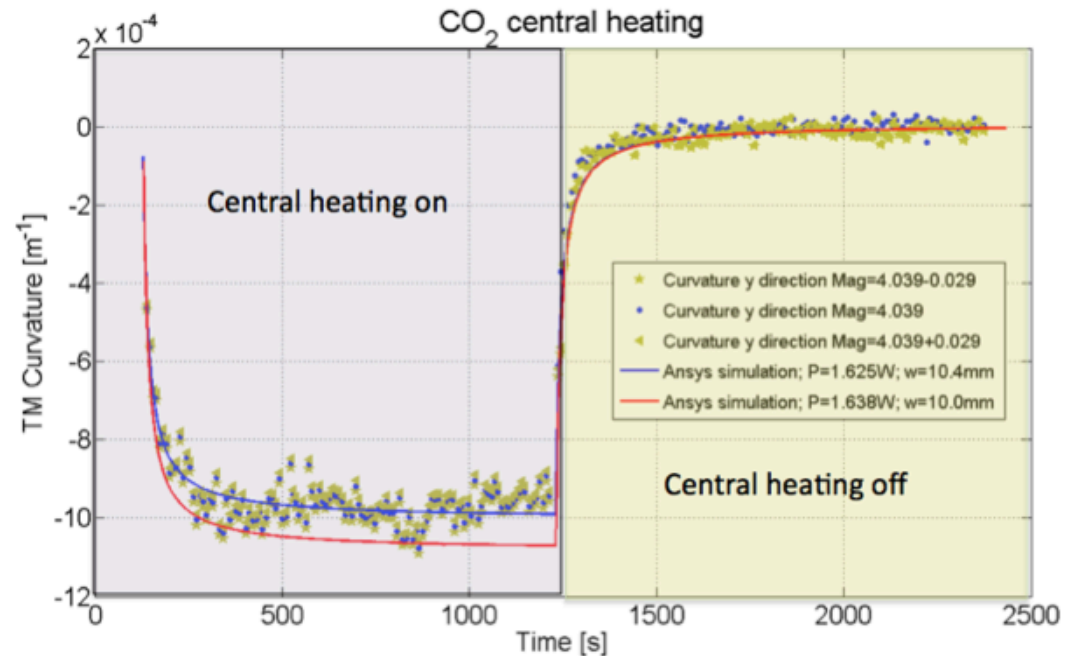
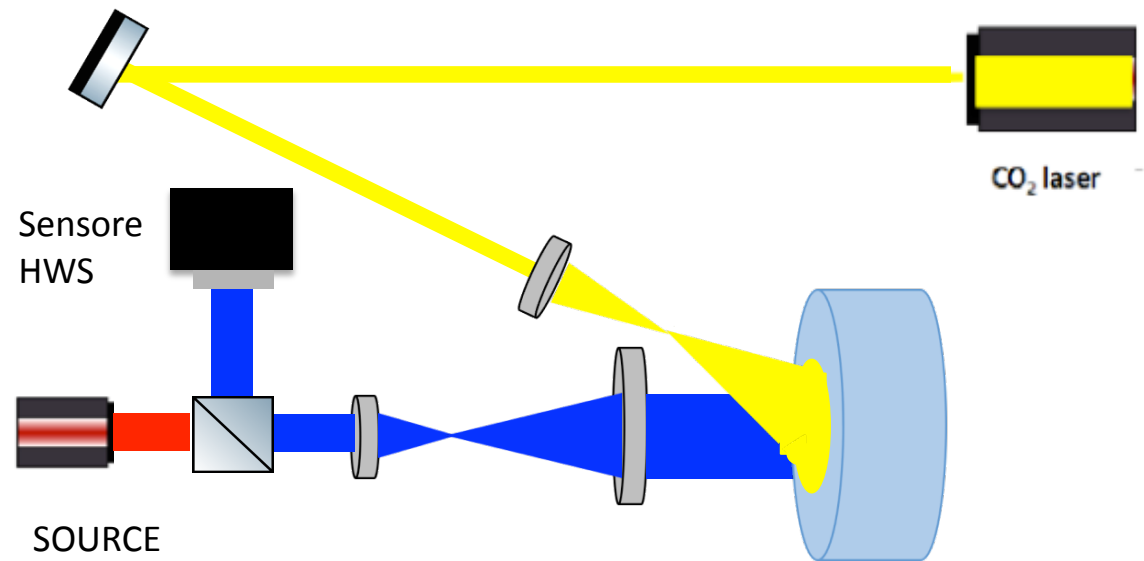
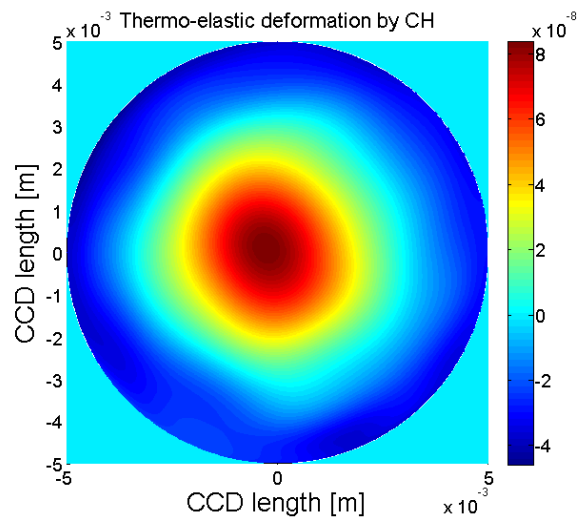


RH



Effetto termoelastico dovuto al riscaldamento centrale con il laser CO₂

- Misura on-axis della curvatura dello specchio sulla superficie dello specchio dove incide il fascio CO₂.
- L'angolo di incidenza del fascio CO₂ è di circa 20°: solo il profilo Y del fascio è stato misurato.
- Gli errori sono dovuti:
 - All'incertezza del telescopio;
 - Alle fluttuazioni di potenza del laser CO₂ ;
 - Incertezza della spot size del fascio CO₂ sullo specchio (la più importante);



✓ Outline

** Introduzione alle onde gravitazionali,
da Virgo ad Advanced Virgo

** Effetti termici e sistema di compensazione termica

** TeTis

** Conclusioni

Conclusioni

- Per i rivelatori interferometrici avanzati che prevedono l'uso di laser ad alta potenza (circa 100 W) è fondamentale lo sviluppo di un sistema di compensazione per correggere gli effetti termici sulle ottiche;
- un attento studio è stato portato avanti per definire la migliore strategia di compensazione termica: sensori e attuatori sono stati testati e realizzati in accordo con le specifiche previste per AdV;
- contemporaneamente all'attività di installazione del sistema di compensazione su AdV, presso il laboratorio dell'INFN dell'Università di Roma Tor Vergata è stata realizzata una facility, TeTis, per investigare le funzionalità dei diversi sensori e attuatori e per integrarli nel sistema di controllo che verrà poi implementato su AdV.

