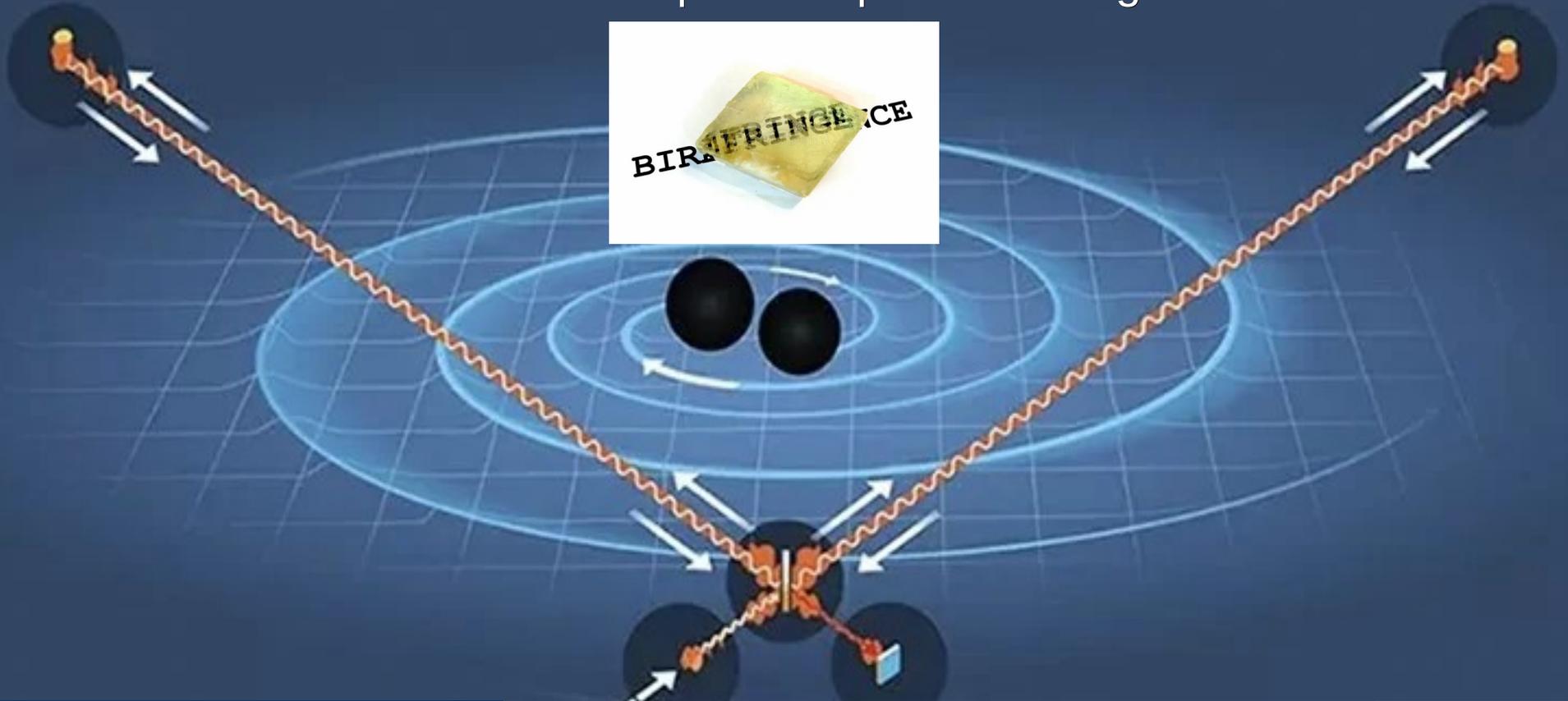


Studio della birifrangenza degli specchi di Einstein Telescope a temperatura criogenica



Einstein Telescope

Cos'è l'Einstein Telescope?

- Rivelatore di onde gravitazionali di terza generazione
- Interferometri Michelson con cavità Fabry-Pérot
- Sensibilità migliorata di $\sim 10\times$ rispetto agli attuali interferometri

Geometria e Struttura

- Triangolo equilatero o doppia L con lati da 10 km
- Costruzione sotterranea ($\sim 100\text{--}300$ m)

Configurazione Duale

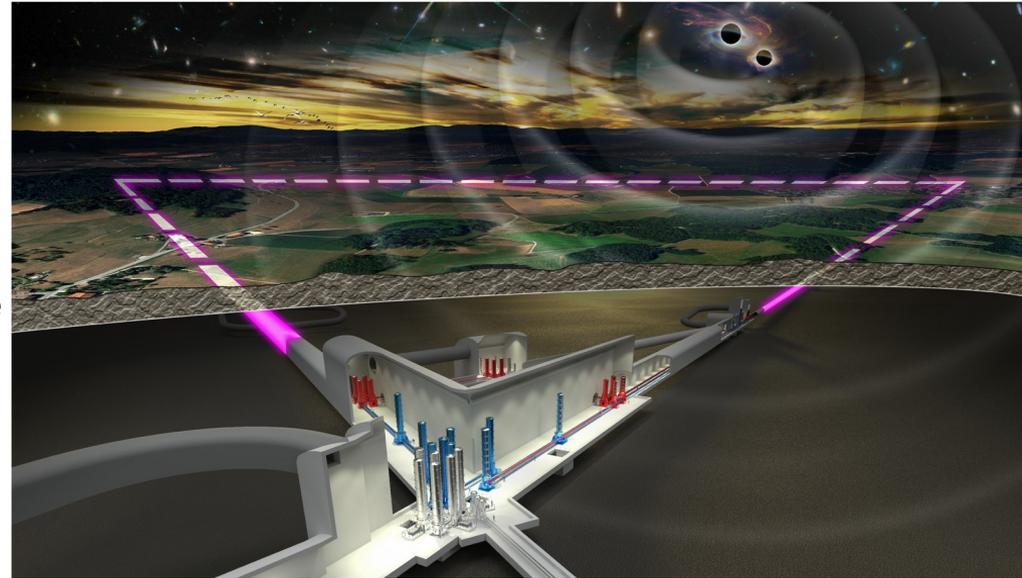
- ET-HF: High Frequency (10 Hz - 10 kHz), a temperatura ambiente
- ET-LF: Low Frequency (1 - 40 Hz), criogenico ($\sim 10\text{--}20$ K)

Specchi & Laser

- Specchi in silicio monocristallino/ fused silica (fino a 60 cm)
- Coating a basso rumore termico
- Laser a 1064 nm (HF) e 1550 nm (LF)

Obiettivi scientifici

- Fusione di buchi neri/stelle di neutroni
- Espansione cosmica, test di Relatività
- Sensibilità da 1 Hz a 10 kHz



Einstein Telescope

Cos'è l'Einstein Telescope?

- Rivelatore di onde gravitazionali di terza generazione
- Interferometri Michelson con cavità Fabry-Pérot
- Sensibilità migliorata di $\sim 10\times$ rispetto agli attuali interferometri

Geometria e Struttura

- Triangolo equilatero o doppia L con lati da 10 km
- Costruzione sotterranea ($\sim 100\text{--}300$ m)

Configurazione Duale

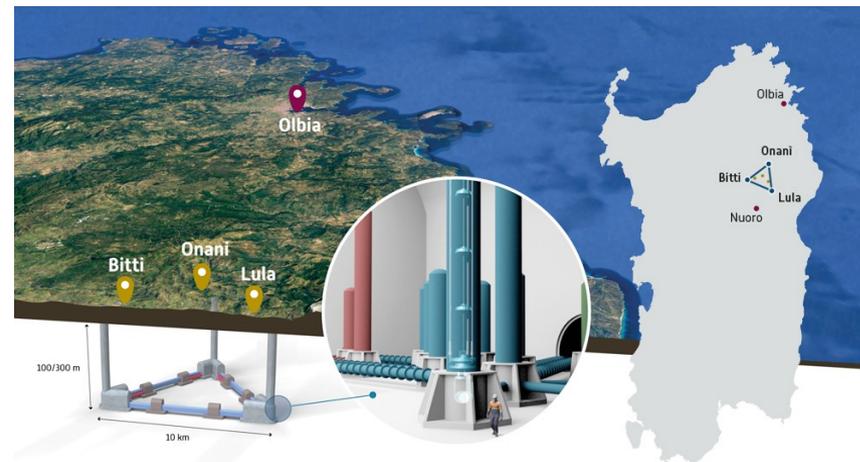
- ET-HF: High Frequency (10 Hz - 10 kHz), a temperatura ambiente
- ET-LF: Low Frequency (1 - 40 Hz), criogenico ($\sim 10\text{--}20$ K)

Specchi & Laser

- Specchi in silicio monocristallino/ fused silica (fino a 60 cm)
- Coating a basso rumore termico
- Laser a 1064 nm (HF) e 1550 nm (LF)

Obiettivi scientifici

- Fusione di buchi neri/stelle di neutroni
- Espansione cosmica, test di Relatività
- Sensibilità da 1 Hz a 10 kHz



Localizzazione

- 3 Candidati: - Sardegna (miniera di Sos Enattos),
- Sassonia,
- Olanda

Tempistiche previste

- Costruzione: ~ 2030 | Inizio operazioni: ~ 2035

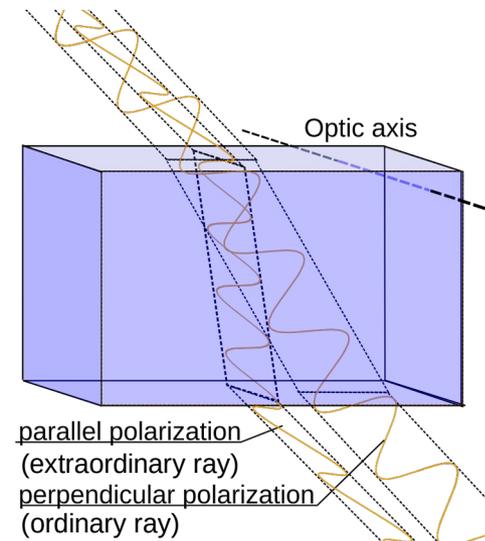
La birifrangenza

La **birifrangenza** è un fenomeno ottico che si manifesta in particolare in materiali **anisotropi**

La luce si divide in due raggi con diversa velocità e direzione di propagazione, ciascuno con un diverso indice di rifrazione.

Materiali birifrangenti anisotropi, cioè hanno proprietà ottiche che variano con la direzione:

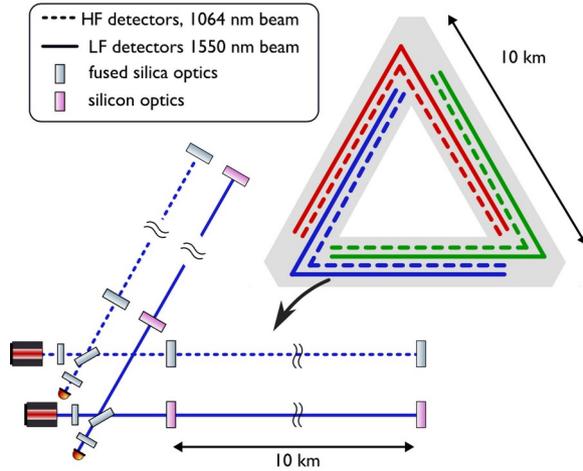
- Cristalli anisotropi come calcite, quarzo, mica
- Polimeri stirati (es. plastica sottoposta a sforzi meccanici)
- Alcuni liquidi cristallini (fluidi altamente anisotropi che esistono fra la fase solida cristallina e quella liquida isotropa)



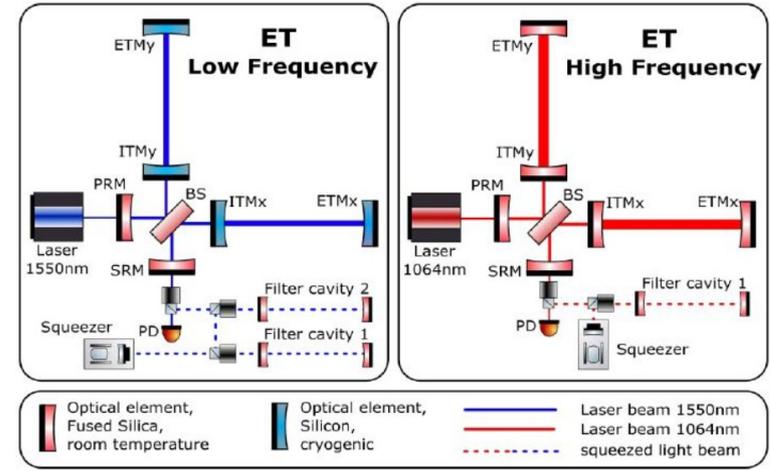
$$n_e > n_o$$

La birifrangenza in ET

Configurazione triangolare



Configurazione a doppia L



Gli specchi in **silicio monocristallino** saranno usati nei bracci dell'interferometro a **bassa frequenza (ET-LF)**, sotterranei e **criogenici**, per rilevare onde gravitazionali a bassa frequenza (2–40 Hz)

Motivo dell'uso: Il silicio è scelto per le sue eccellenti proprietà meccaniche e termiche a bassa temperatura, come:

Bassa perdita meccanica → meno rumore termico.

Alta conducibilità termica → facilita il raffreddamento criogenico.

Lunghezza d'onda usata: **1550 nm** (il silicio è trasparente nell'infrarosso ma opaco alla luce visibile)

La birifrangenza in ET

Il silicio cristallino non è intrinsecamente birifrangente in condizioni ideali, perché ha una struttura cristallina cubica, otticamente isotropa
Quindi in teoria non introduce birifrangenza lungo nessun asse.

Tuttavia...

In pratica, possono comunque manifestarsi effetti di birifrangenza dovuti a:

- **Stress meccanici o termici** nel materiale (residui della lavorazione, raffreddamento criogenico, ecc.).
- **Difetti cristallini o impurezze.**
- **Anisotropie introdotte da rivestimenti ottici (coatings)** applicati sugli specchi.
- **Tensioni dovute alle sospensioni** dello specchio.



La birifrangenza indotta va **studiata e minimizzata** perché può degradare le prestazioni ottiche del rivelatore in una misura di così alta precisione

Birifrangenza ed ellitticità

Un fascio linearmente polarizzato (come quello di ET) che attraversa un mezzo birifrangente acquista un'ellitticità $\Psi = \pm a/b$

In un mezzo birifrangente si ha $n_{\parallel} \neq n_{\perp}$

All'uscita dal mezzo avrà accumulato uno sfasamento:
$$\Delta\phi = \frac{2\pi(n_{\parallel} - n_{\perp})L}{\lambda}$$

Ed una ellitticità:
$$\psi = \frac{\pi\Delta n L}{\lambda} \sin 2\vartheta$$

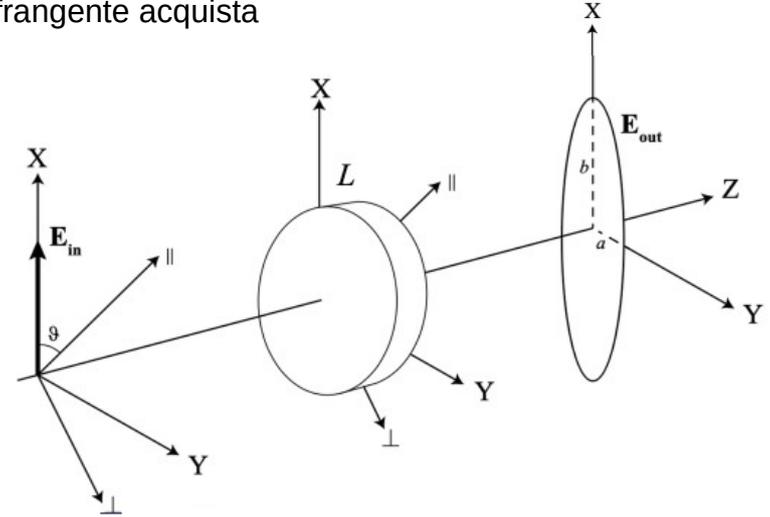
Se la birifrangenza è uniforme:

- in linea di principio si può allineare la polarizzazione con l'asse di birifrangenza della cavità

Se la birifrangenza non è uniforme:

- non è possibile alcun allineamento della polarizzazione perché non esiste un asse definito.

Ciò comporta un profilo del fascio distorto che genera modi di ordine superiore, perdita di potenza nei bracci, aumento del rumore, e quindi una ridotta sensibilità



Esperienza di KAGRA

Birifrangenza $\Delta n \approx 10^{-6}$ con un substrato di zaffiro spesso 15 cm

Mappa di birifrangenza del substrato non uniforme (in ampiezza e direzione). Lo sfasamento per andata e ritorno è ≈ 1.6 radianti.

Con, ad esempio, $\Delta n \approx 10^{-7}$ in ET con uno spessore di 57 cm \rightarrow sfasamento per andata e ritorno ≈ 0.5 radianti.

Se uniforme \rightarrow allineare la polarizzazione con l'asse della birifrangenza del sistema (come?). Se non uniforme... è un problema.

La sensibilità di ET sarà più di 10 volte superiore a quella di KAGRA, VIRGO, LIGO \rightarrow **il requisito è $\Delta n < 10^{-8}$** .

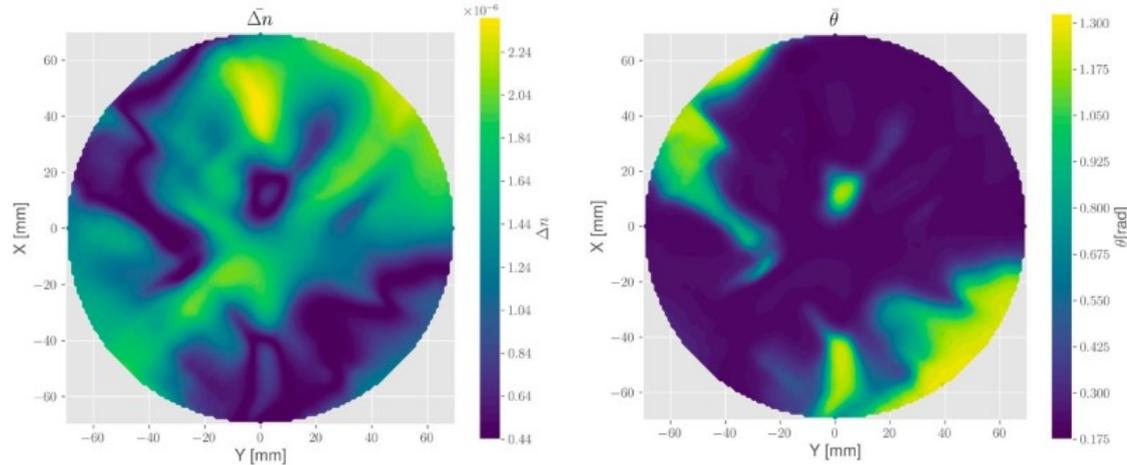


Figure 4. Mean distribution of both birefringence Δn and θ -angle, calculated from the six input-polarization combinations which led to no miscalculations.

4

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-45928-0>

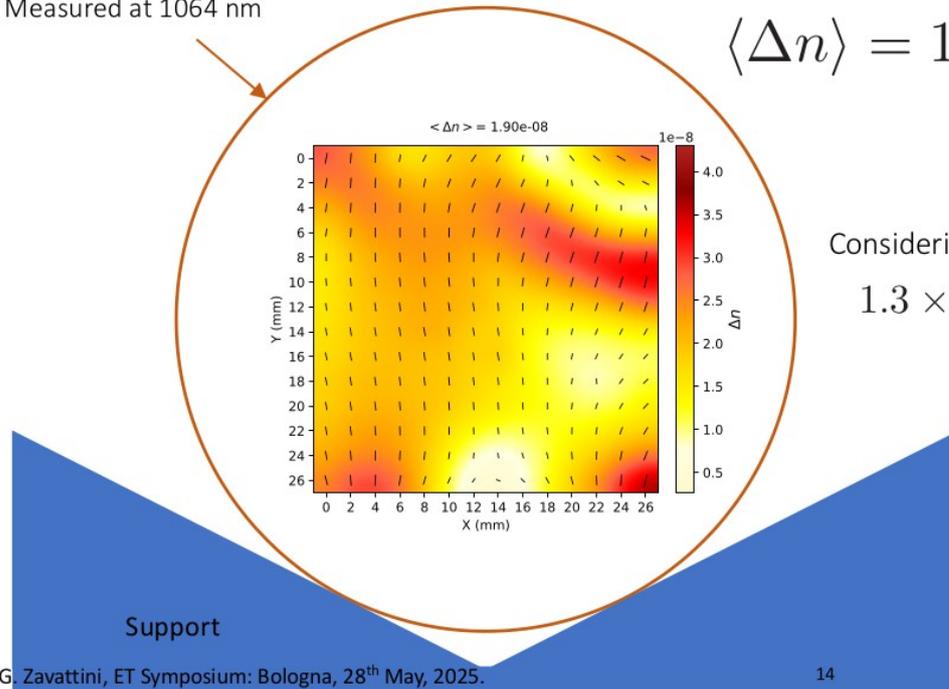
Misure effettuate a Ferrara (a temperatura ambiente)

ET Pathfinder Silicon samples WW01-02*

Sample grown by IKZ, Berlin
Diameter: 5 cm; thickness: 5 mm
Measured at 1064 nm

The average birefringence is

$$\langle \Delta n \rangle = 1.9 \times 10^{-8}$$



Considering that, at the center, gravity contributes for $\Delta n \approx \frac{\pi D \rho_{\text{Si}} g}{4} C$
 $1.3 \times 10^{-8} < \Delta n_{\text{gravity}} < 2.2 \times 10^{-8}$

$$\Delta n_{\text{sample}} \lesssim 10^{-8}$$

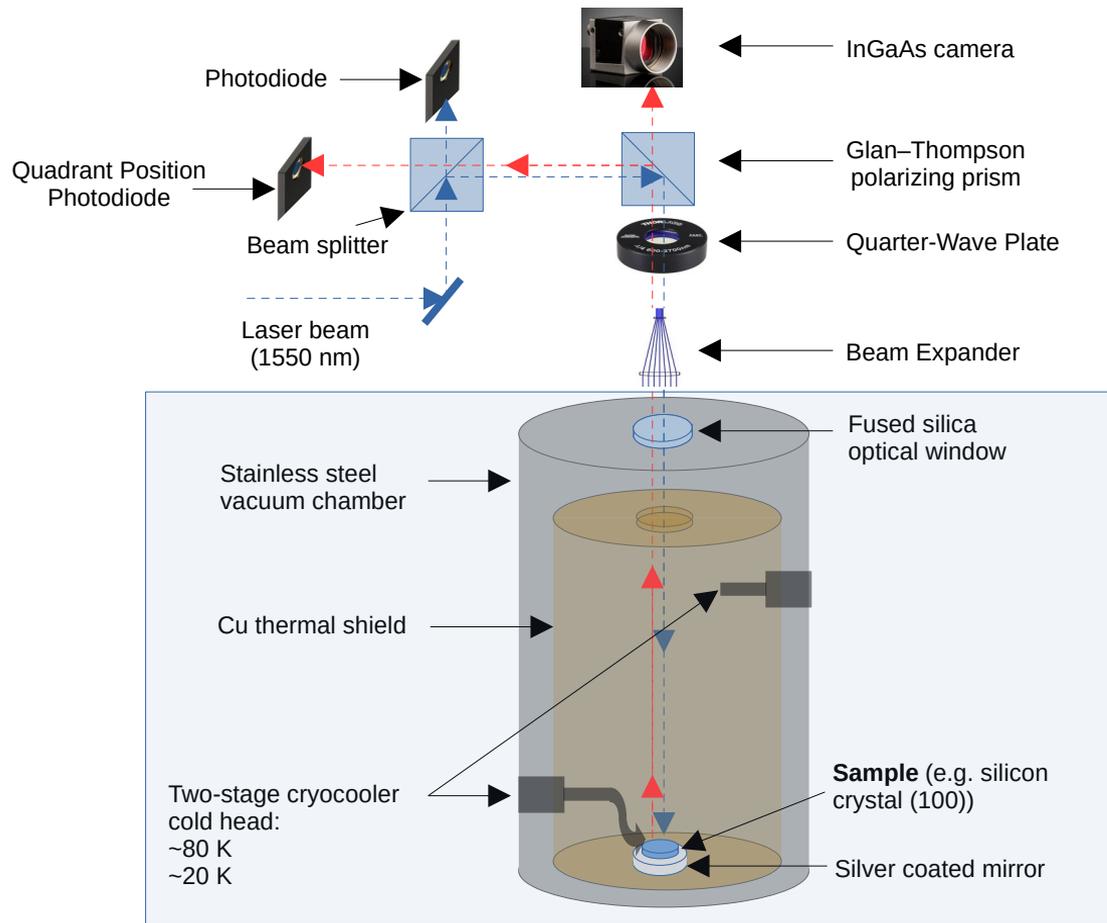
Finite element simulations are underway

Setup criogenico

- Camera in acciaio cilindrica: $d \sim 65$ cm, $h \sim 80$ cm
- Finestra di accesso frontale: $d \sim 50$ cm + altre flangie CF, KF ed ISO-K più piccole (pompe, sensori, teste fredde, ecc.)
- Scudo termico in rame attualmente collegato allo stadio primario di due teste fredde
- 2 teste fredde bistadio con relativi cryodrive
- Sistema di pompaggio: primaria a secco + turbo
- Sensori di temperatura CLTS + sistema di lettura



Setup ottico e criogenico



Parte criogenica

Il gruppo di ET Milano

	Family Name	First Name	Position	FTE
RL	Toso	Valerio	Post-doc	0.3
	Potenza	Marco	Staff researcher	0.3
	Paroli	Bruno	Staff researcher	0.2
	Siano	Mirko	Staff researcher	0.4
	D'Angelo	Davide	Staff researcher	0.2
	Giliberti	Marco	Staff researcher	0.4
	Haskell	Brynmor	Staff researcher	0.4
	Torri	Marco	Post-doc	0.6
	Castelli	Fabrizio	Staff researcher	0.2
	Piazzoni	Claudio	Engineers or Technician	0.5
	Cavaliere	Francesco	Engineers or Technician	0.2
	Leone	Augusto	Engineers or Technician	0.6



Cosa è stato fatto finora

- Presi contatti con i colleghi di Ferrara (Guido Zavattini, Giuseppe Ciullo, Luca Barion)
- Individuato il task per il gruppo di Milano (misura di birifrangenza dei substrati e coating degli specchi in criogenia)
- Definito il gruppo di lavoro
- Individuato a Ferrara il criostato e spostato a Milano
- Individuato il luogo dove effettuare queste misure (all'interno dei locali CIMAINA)
- Sviluppato il setup ottico e criogenico
- Presi contatti con il responsabile nazionale INFN di ET (Domenico D'Urso) ed il gruppo ET
- Partecipato al XV ET Symposium | Bologna
- Presi contatti con un gruppo di LNF per le problematiche legate alle misure ottiche in criogenia



Stato attuale

- Camera collocata temporaneamente nell'officina UNIMI
- Primi test di vuoto superati (10^{-6} mbar)
- Primi test di raffreddamento in corso con chiller in prestito
- Preventivi 2026 quasi completamente definiti
- Research Unit in ET da definire (RU Milano Celoria o RU di Milano assieme ai colleghi di Bicocca: contattato Bruno Giacomazzo)

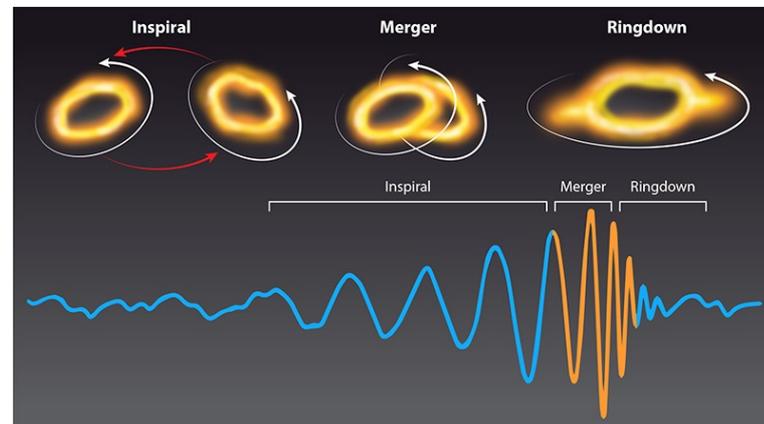
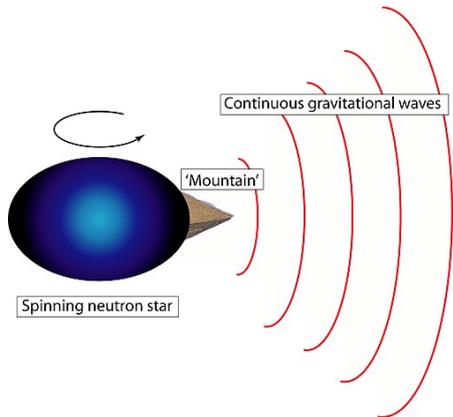


Il gruppo teorico di ET Milano

Il gruppo teorico si concentrerà principalmente sulle previsioni relative ai segnali continui e ai segnali transitori lunghi nella banda di frequenze più alta del rivelatore.

In particolare, l'attenzione sarà rivolta alle **stelle di neutroni in rapida rotazione** che potrebbero emettere onde gravitazionali a causa di deformazioni, le cosiddette "montagne", nella crosta o nel nucleo della stella, e ai modi di oscillazione di stelle isolate, ma anche dei resti di fusioni.

In questo contesto, l'interesse sarà rivolto alla possibilità di utilizzare i segnali di **ring-down** provenienti da buchi neri e stelle di neutroni per distinguere la firma dell'equazione di stato della materia densa, ma anche per indagare la fisica esotica e possibili modifiche della gravità.



Richieste finanziarie 2026

Strumentazione per mettere in funzione il criostato (IVA inclusa):

- Chiller (attualmente in prestito, da restituire): **10.5 k**
- Cryodrive (attualmente in prestito, da restituire): **15 k**
- Acquisizione dati Keithley per temperature (attualmente in prestito da restituire): **3.5 k**
- Raccorderia da vuoto/pressione: **3 k**
- Gate valve CF100: **4 k**
- Rame per scudo termico: **0.5 k**
- Profilati in alluminio/viteria varia/utensili **2.5 k**

Strumentazione per il setup ottico (IVA inclusa):

- Laser 633 nm: **4 k**
- Laser 1550 nm: **8 k**
- CCD InGaAs per misura birifrangenza: **24 k**
- Finestra ottica in fused silica CF160: **4.5 k**
- Movimentazione elementi ottici: **8 k**
- Banco ottico: **1.5 k**
- Elementi ottici (collimatori, beam splitter, polarizzatori, lamina lambda/4, fotodiodi, power meter, beam expander, specchio): **11.5 k**

Missioni: 29.5 k

Totale: 130 k



Grazie



Stress induced birefringence for Si crystal

$$\Delta n = C(\phi) \Delta \sigma$$

Depending on the stress direction w.r.t. the crystal orientation

$$1.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1} < C(\phi) < 2.5 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$$

At the center of a cylindrical Si sample supported vertically from the bottom

$$\Delta n \approx \frac{\pi D \rho_{\text{Si}} g}{4} C_{\text{SO}}$$

Considering $D = 5 \text{ cm}$

$$1.3 \times 10^{-8} < \Delta n_{\text{gravity}} < 2.2 \times 10^{-8}$$

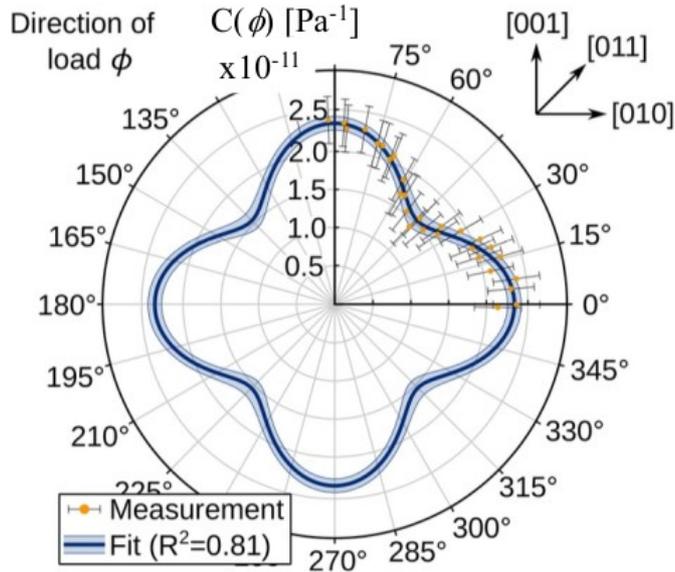
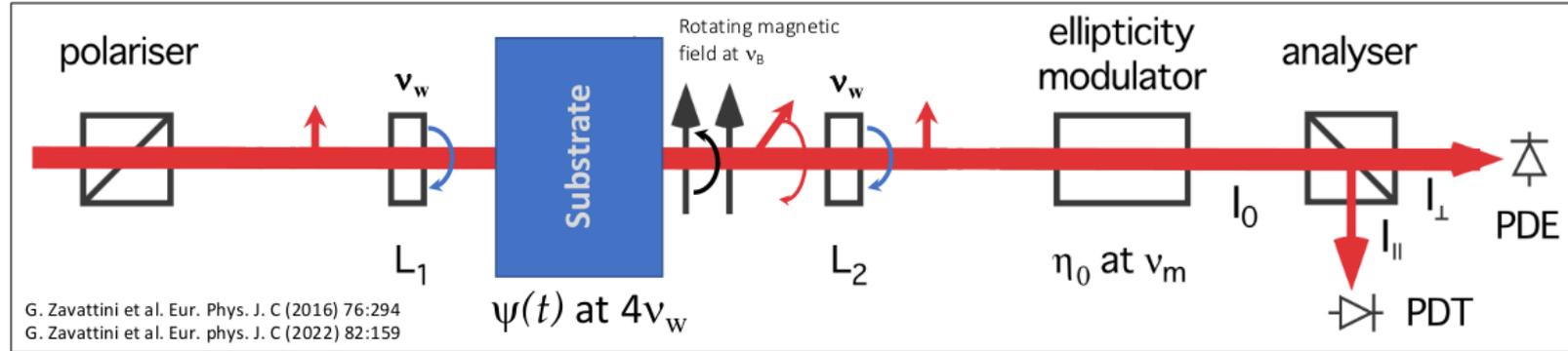


Figure 8. Stress-optical law for a {100}-silicon wafer with 95 % confidence level (blue band), and the angle-dependent stress-optical coefficients $C(\phi)$ with a 95 % confidence level (yellow). Stress-optical coefficients are displayed neglecting shear stresses.

Substrate birefringence measurements

- Single pass ellipticity: $\psi(t) = \frac{\pi \Delta n L}{\lambda} \sin 2\vartheta(t) = \psi_0 \sin 2\vartheta(t)$
- Here $\vartheta(t)$ is the angle between the polarisation and the birefringence axis. $\phi(t)$ is the HWP angle: $\vartheta(t) = 2\phi(t)$



- Add a known time varying ellipticity $\eta(t)$ to ψ . With $\eta(t)$, $\psi \ll 1$, these add algebraically
- Also make the ellipticity $\psi(t)$ time dependent by rotating the polarization inside the sample using a HWP
- Possibly induced rotations $\Phi(t)$ will not beat with the ellipticity modulator \rightarrow only ellipticities are detected

$$P_{\text{out}} = P_0 \left\{ \sigma^2 + |\Phi(t) + i\psi(t) + i\eta(t)|^2 \right\} = I_0 \left\{ \sigma^2 + \eta^2(t) + 2\eta(t)\psi(t) + \Phi(t)^2 \dots \right\}$$

The output power is now linear in the ellipticity $\psi(t)$.