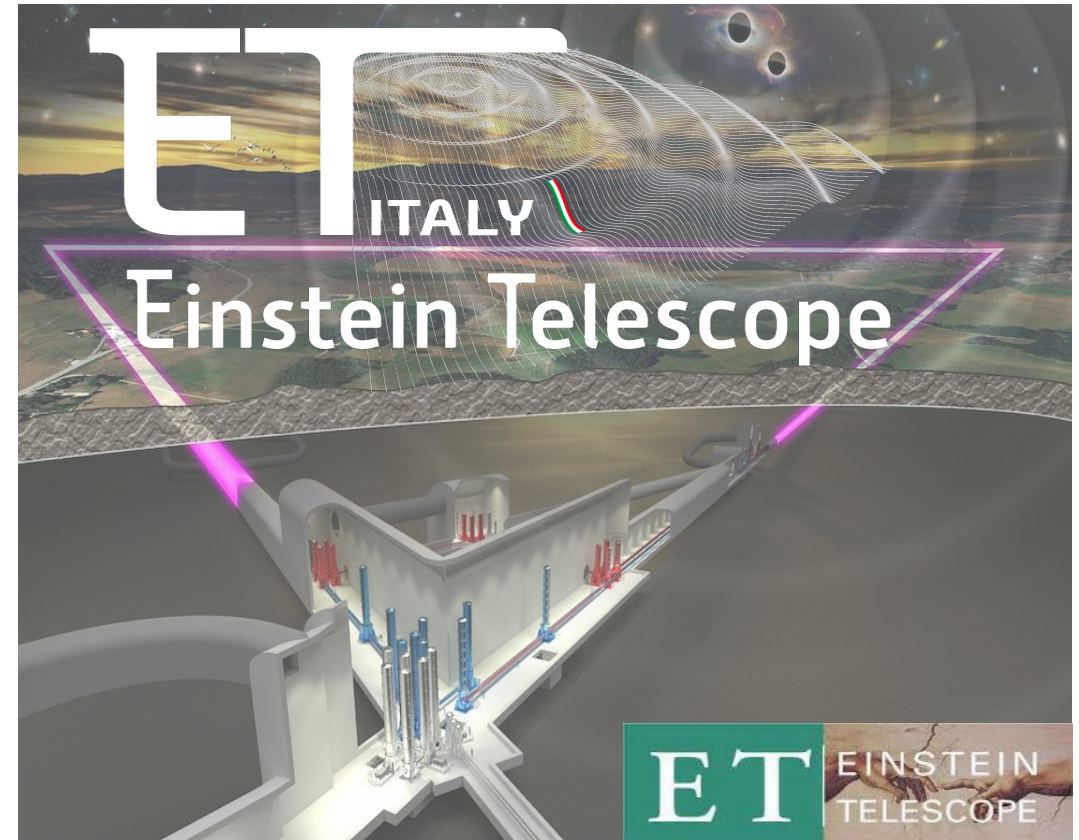


R&D PLAN ET_Italia – Coatings –

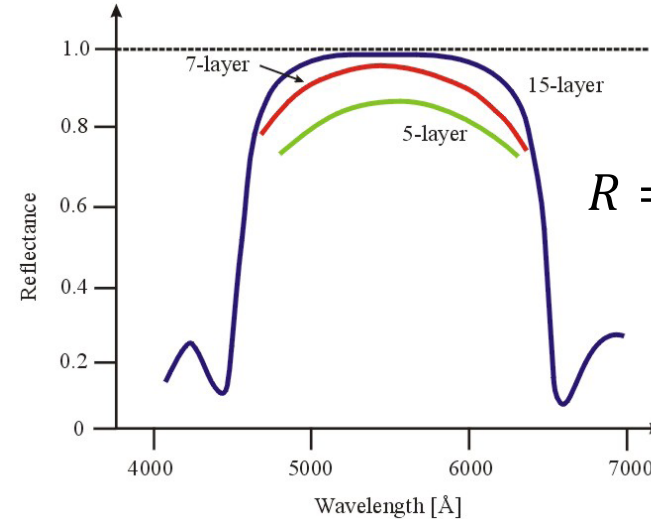
E. Cesarini for CRD ET_Italia
INFN Roma Tor Vergata



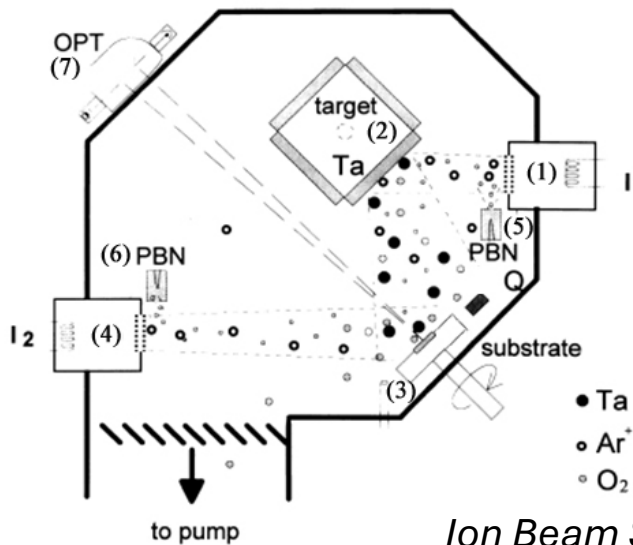
I COATING NEI RIVELATORI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Riflettore di Bragg

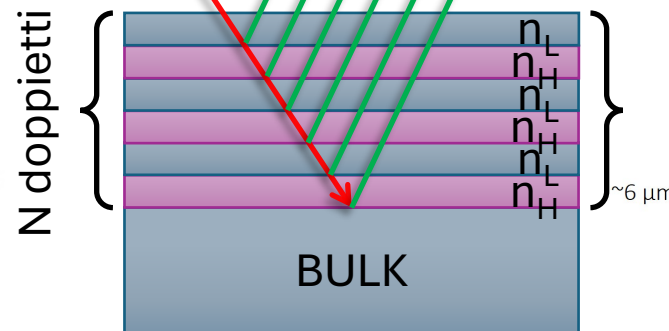
- Multistrato con alternanza di materiale ad alto e basso indice di rifrazione
- Scelta accurata dello spessore $\cong \lambda/4$
 - Interferenza costruttiva
 - Riflettore di alta qualità



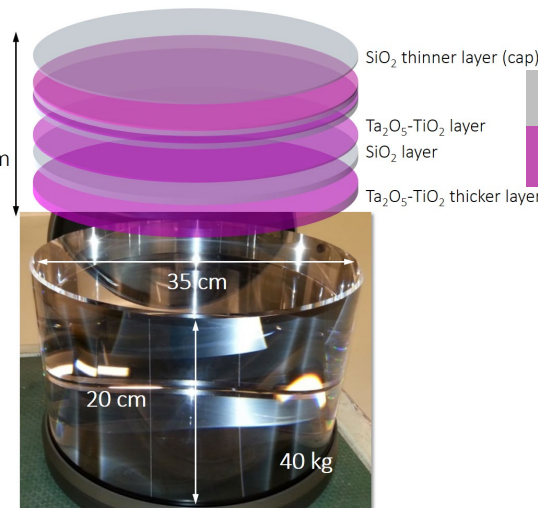
$$R = |r^2| = \frac{1 - n_{sub} \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2N}}{1 + n_{sub} \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2N}}$$



Ion Beam Sputtering (IBS) deposition



Itali



SiO₂ thinner layer (cap)

Ta₂O₅-TiO₂ layer

SiO₂ layer

Ta₂O₅-TiO₂ thicker layer

Silica SiO₂ n=1.45

Tantala TiO₂:Ta₂O₅ n=2.09

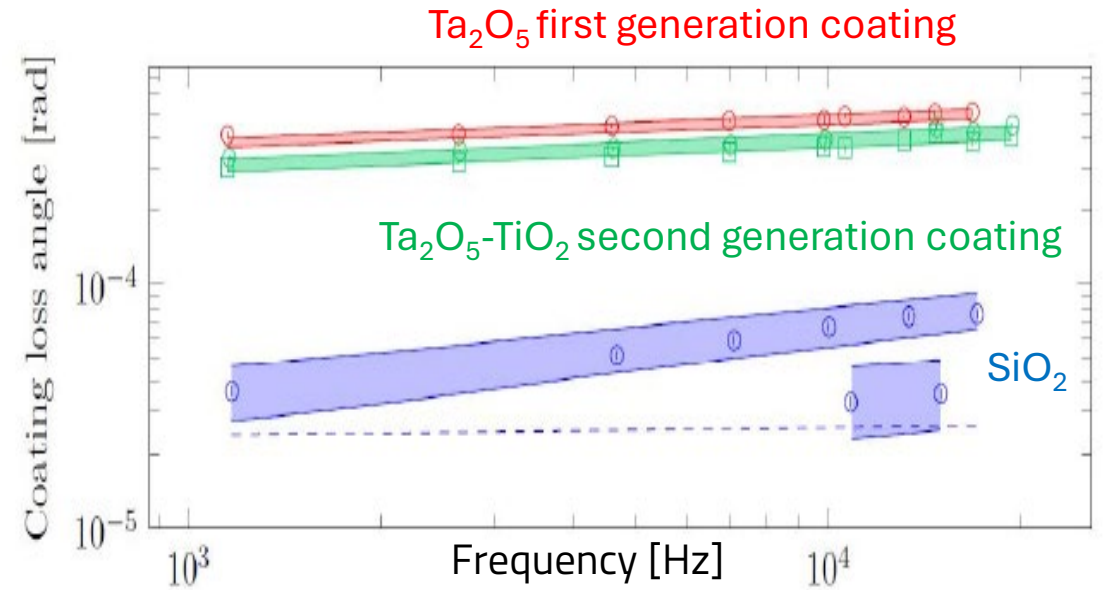


I COATING NEI RIVELATORI DI ONDE GRAVITAZIONALI

Requisiti:

- Bassa diffusione (da difetti, micro-rugosità o micro-cristalli) per evitare la luce diffusa nell'ITF
- Basso assorbimento ottico: inferiore a 1 ppm (10^{-6}) per evitare effetti termici
- Basso rumore termico del rivestimento legato alla dissipazione meccanica dei materiali, temperatura e dimensione del fascio incidente

Flatness	Thickness uniformity	Absorption	Scattering
<0.5 nm RMS (within \varnothing 150 mm)	0.05% (within \varnothing 150 mm)	<0.4 ppm	<10 ppm



TEMPERATURA

DISSIPAZIONE MECCANICA

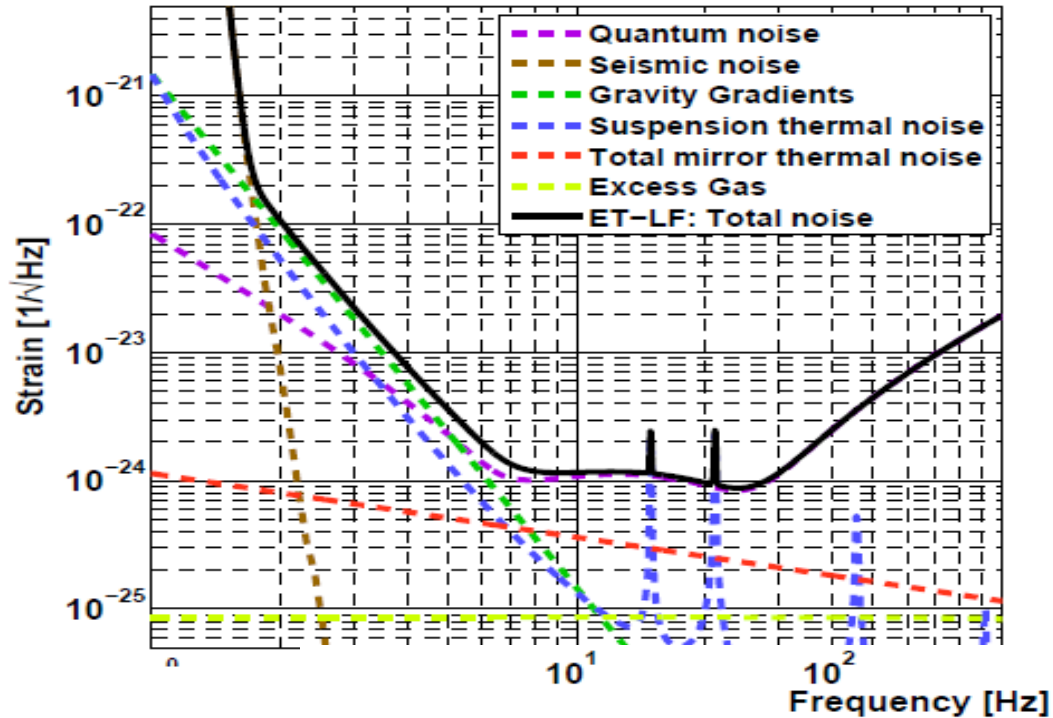
SPESSORE

$$CTN(f) \propto \frac{\sqrt{\frac{T}{f} \frac{1}{w_b^2} \varphi t_{coat}}}{L}$$

DIMENSIONE FASCIO

I COATING IN EINSTEIN TELESCOPE

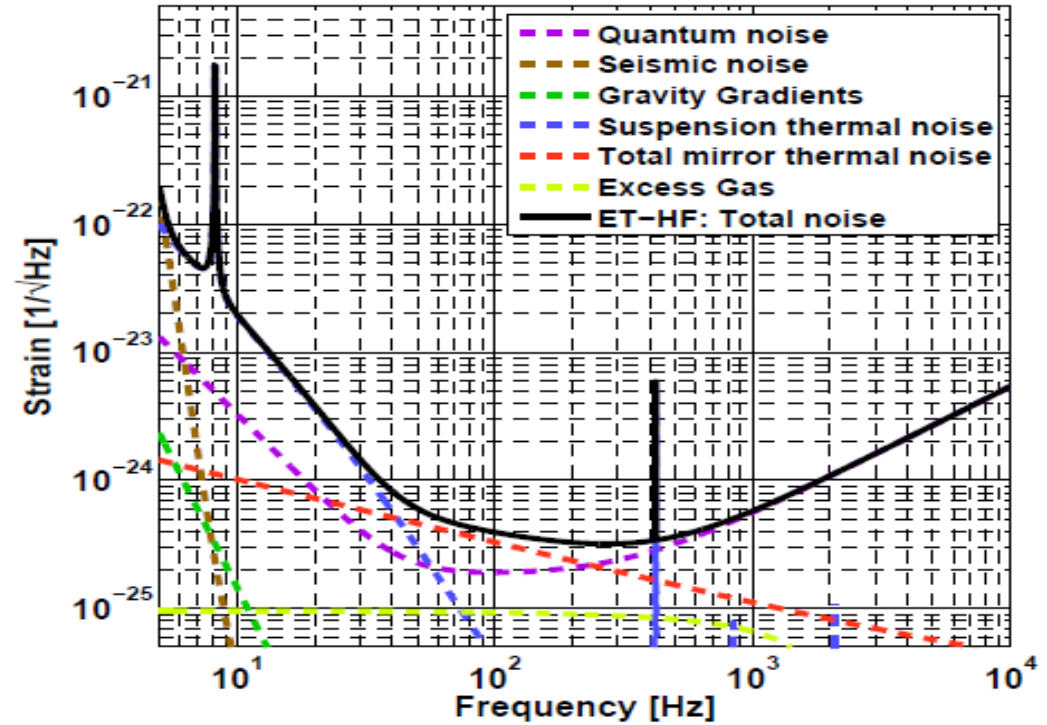
Curva di sensibilità LF-ET



Possibili lunghezze d'onda laser diverse, materiali diversi (substrati e coating):

- controllare l'assorbimento per prevenire il funzionamento criogenico.

Curva di sensibilità HF-ET



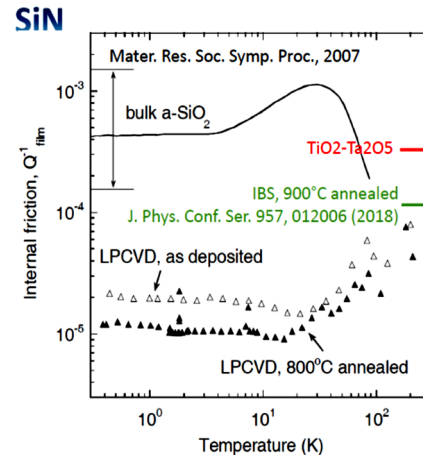
Stessa lunghezza d'onda, stesso substrato e stessa temperatura dei rivelatori LIGO e Virgo:

- Nuovi materiali in grado di tollerare l'operazione ad alta potenza.

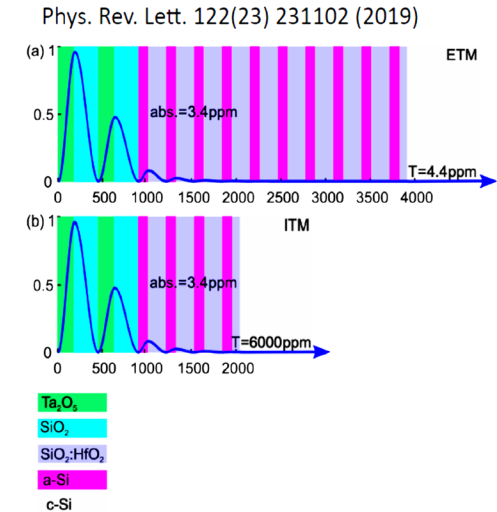
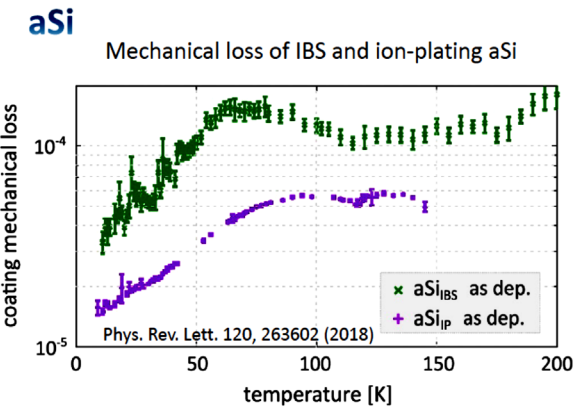
RICERCA SUI COATING

Materiali promettenti:

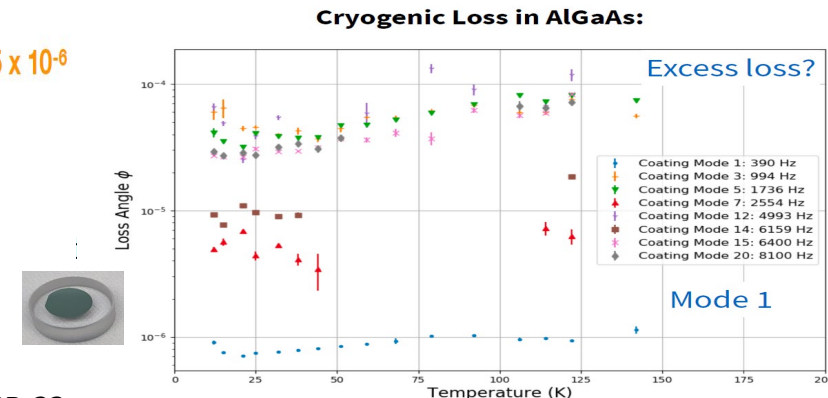
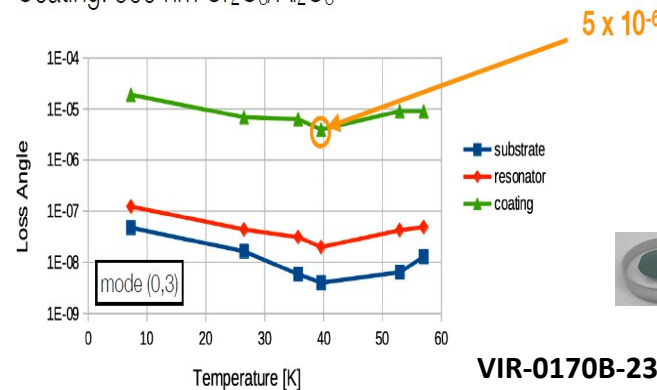
- **Ossidi metallici** in forma amorfa
- Materiali ad alto numero di coordinazione: **Nitruri** (SiN_x, GaN), **Semiconduttori amorfi** (a-Si, GaP, GaAs, InP): struttura atomica più rigida diminuisce la densità stati metastabili e di conseguenza la dissipazione.
- **Coating multimateriali** o **ternari** (basati su Ossidi o Nitruri): gli strati superiori, dove l'intensità ottica è più alta, consistono di materiali con basso assorbimento ottico, gli strati inferiori consistono di materiali con basse perdite meccaniche
- **Coating cristallini** - (Semiconduttori o Ossidi): rivestimenti cresciuti epitassialmente che consistono in strati alternati di materiali ad alto e basso indice di rifrazione. Possibilità di ridurre drasticamente le perdite sia ottiche che meccaniche



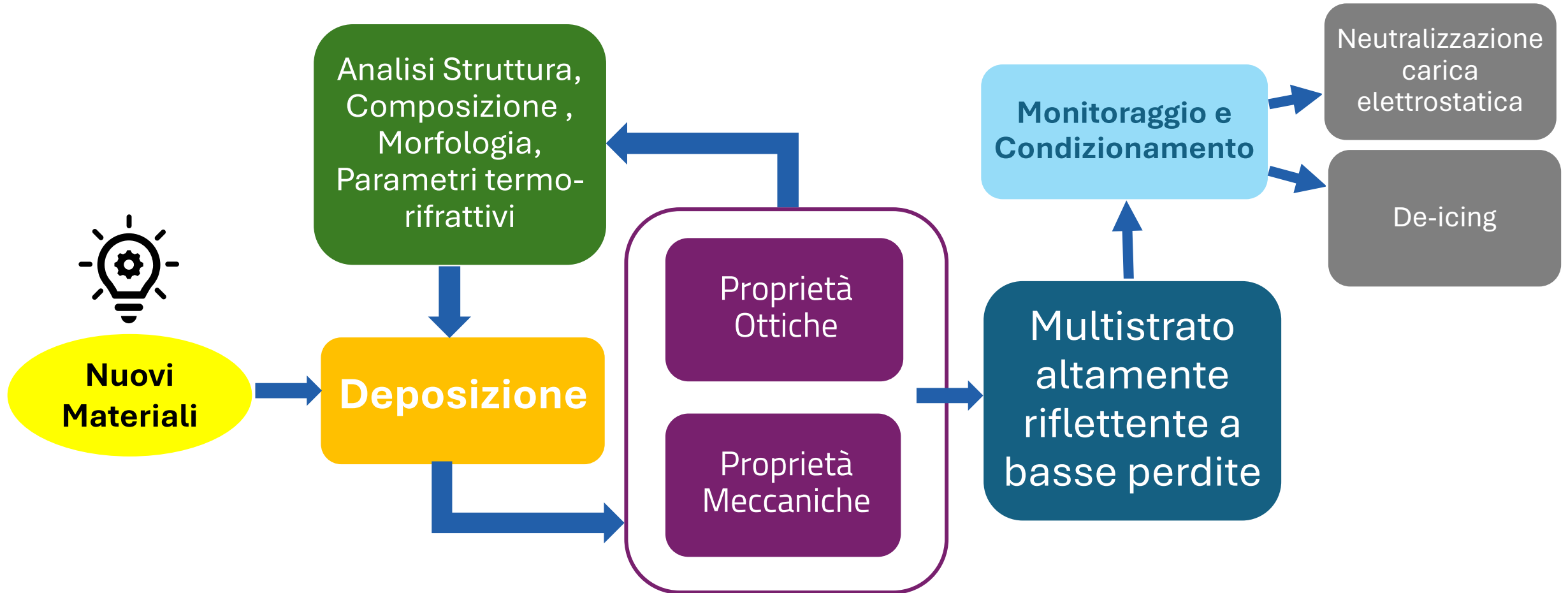
Chao & al., LIGO-G1700304, 2017



• Coating: 500 nm Cr₂O₃/Al₂O₃



RICERCA SUI COATING IN ITALIA



DEPOSIZIONE (T)

SISTEMI DI DEPOSIZIONE MATERIALI AMORFI

➤ Nuovi sistemi di deposizione da ETIC (CoMET - PD, Galileo – GE)

- **Magnetron Sputtering** (4 sorgenti sia RF che DC pulsato, diagnostica in-situ, fino a 700°C; **obiettivo**: deposizione di coating multimateriale con tecnica complementare, studio del processo di deposizione)
- **IBS** (4 materiali diversi, 1 con composizione variabile e controllata, diagnostica in situ, fino a 800°C, IAD; **obiettivo**: prototipazione di nuovi materiali con stretto controllo della stechiometria)
- **IBS** (obiettivo: campioni ultrapuri, minimizzazione contaminanti)

➤ Sistemi di deposizione Virgo già presenti (Sannio)

- e-beam con IAD

➤ Sistemi di deposizione di supporto (Bologna, Cagliari, Pisa, Roma ToV)

➤ Attuali punti aperti:

- Presenza di contaminanti
- Ruolo della stechiometria
- Uniformità su larga scala (difetti puntuali e assorbenti, delaminazione)

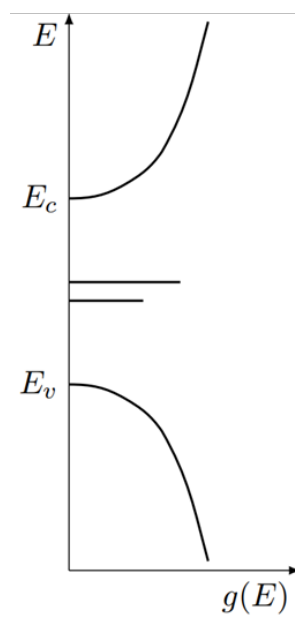


R&D IN CORSO – PROPRIETA' OTTICHE (S)

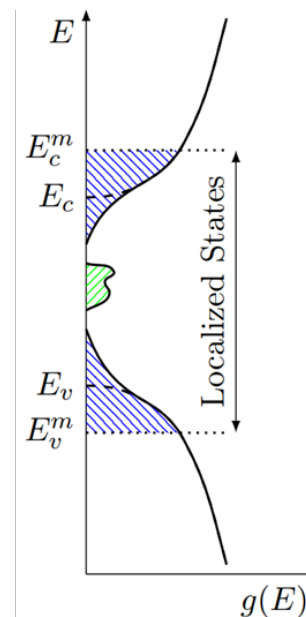
ORIGINE ASSORBIMENTO nei MATERIALI AMORFI

➤ Eccitazione delle transizioni elettroniche:

- Non esiste ancora un modello ben definito
- I valori target per ciascun materiale sono dati dalla forma cristallina
- La struttura amorfa produce stati localizzati nel gap della banda
- **R&D in corso (Genova, Padova, Roma ToV)**



Crystals



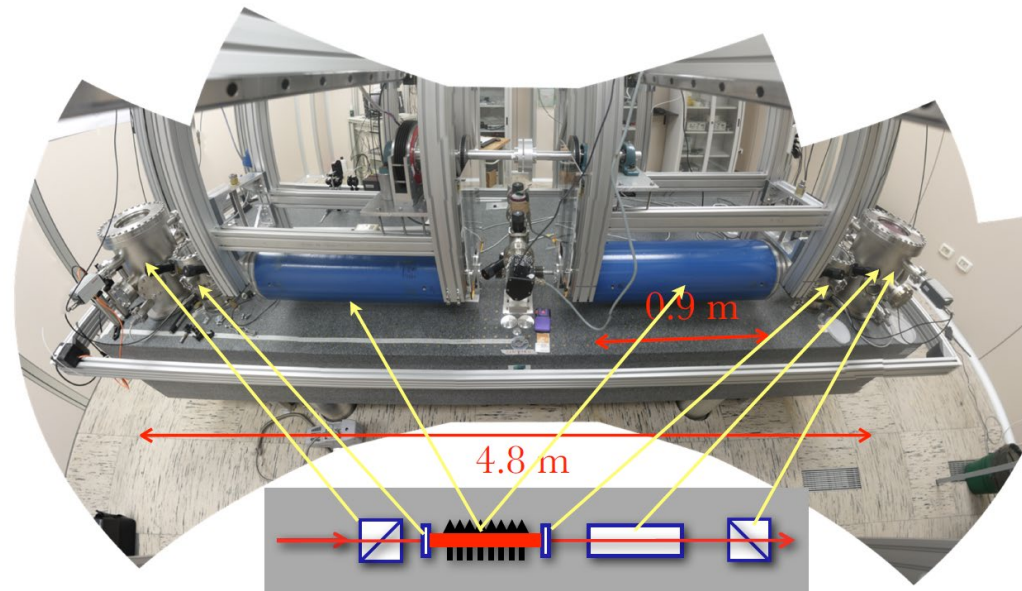
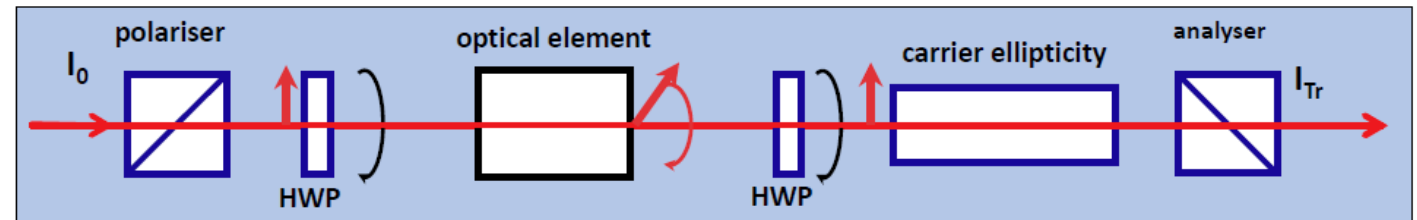
Amorphous

il band gap deve essere molto maggiore del valore corrispondente alla lunghezza onda del laser (hc/λ) per impedire **le transizioni dirette** tra le bande di valenza e di conduzione. Tuttavia, la **struttura disordinata**, la presenza di **contaminanti** o **difetti del legame covalente** che comportano lievi **deviazioni dalla stechiometria ideale**, possono causare la presenza di piccole frazioni di stati elettronici localizzati che si trovano all'interno del band gap e quindi consentono l'assorbimento ottico dovuto alla transizione tra questi e la banda di conduzione

R&D IN CORSO – PROPRIETA' OTTICHE (S)

BIRIFRANGENZA

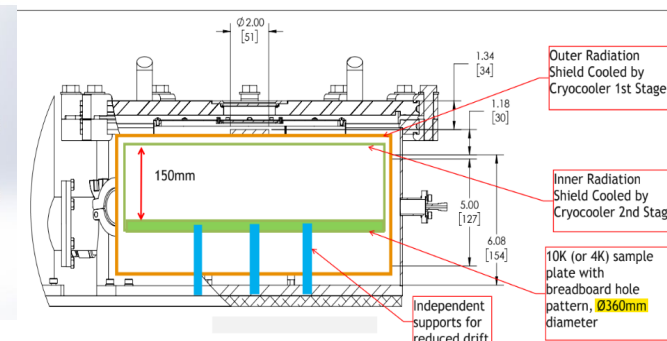
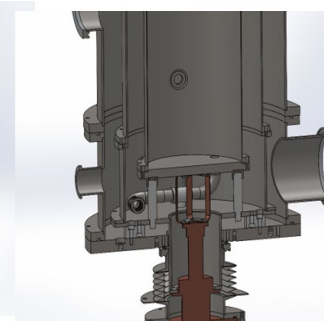
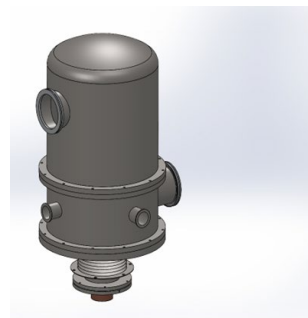
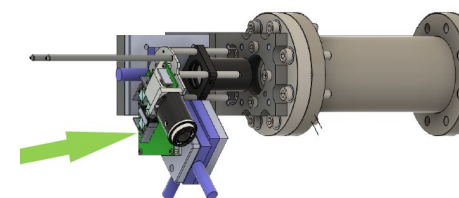
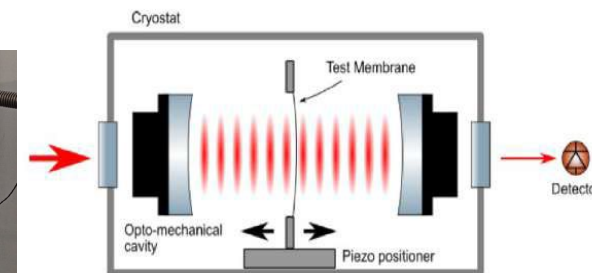
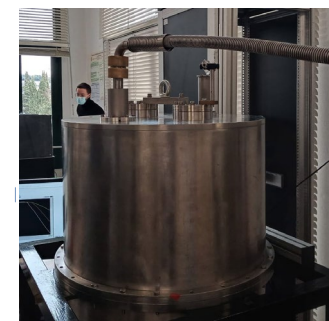
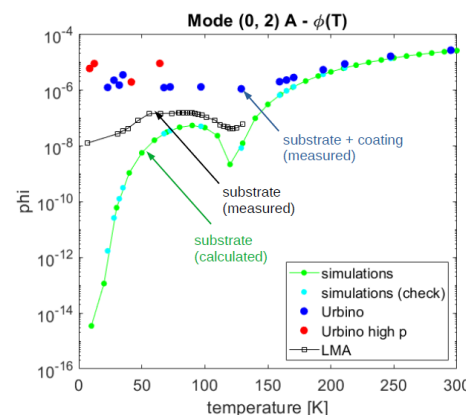
- **Birifrangenza statica:** Misura della birifrangenza statica in substrati e coating in riflessione, attraverso sistemi di misura della polarizzazione basati su lamina a mezzo d'onda rotante.
- **Rumore di birifrangenza:** Studio del rumore di birifrangenza nei coating cristallini riflettenti attraverso sistemi basati su una cavità ad elevata finezza.
- **R&D in corso a Ferrara**



R&D IN CORSO – PROPRIETA' MECCANICHE (T/S)

STUDIO DELLE PROPRIETA' MECCANICHE E DEI MECCANISMI DI DISSIPAZIONE

- **Misure angolo di perdita con sospensione GeNS:** estendere il protocollo di misura a basse T (studio di nuovi materiali e meccanismi di dissipazione).
- **Misure di angolo di perdita su membrane libere:** sviluppo di un nuovo sistema basato su membrane libere in cavità risonante (dissipazione e assorbimento).
- **Misura diretta del rumore termico:** tramite sistema interferometrico a quadratura di fase
- **Teoria e Modellizzazione:** Studio dei meccanismi di dissipazione e calcolo rumore termico
- **R&D in corso (Padova, Perugia, Firenze, Roma ToV, Sannio)**



SISTEMI DI CARATTERIZZAZIONE

CARATTERIZZAZIONI MULTI-TECNICHE

Al fine di indagare l'origine microscopica delle proprietà osservate e supportare l'attività di fabbricazione del campione sono necessarie caratterizzazioni ausiliarie. Sforzo diffuso possibile grazie alla natura a rete della nostra collaborazione.

- **Tecniche di analisi con fasci ionici:** (RBS, ERDA, SIMS...)
- **Tecniche di caratterizzazione tramite scattering di raggi X** (XRD, PDF, SAXS...)
- **Tecniche Spettroscopiche** (Raman, FTIR, ellissometria, XPS, EDX, EXAFS, calorimetria a chip rapido)
- **Analisi Microscopiche** (SEM, HR-TEM, AFM...)

Nuova classe di materiali, coating cristallini (ossidi, semiconduttore), che possono crescere direttamente su zaffiro o silicio o essere trasferiti e incollati su masse di prova cristalline. Questa soluzione innovativa necessita di essere accelerata.

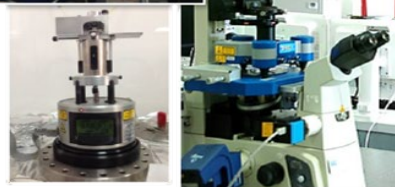
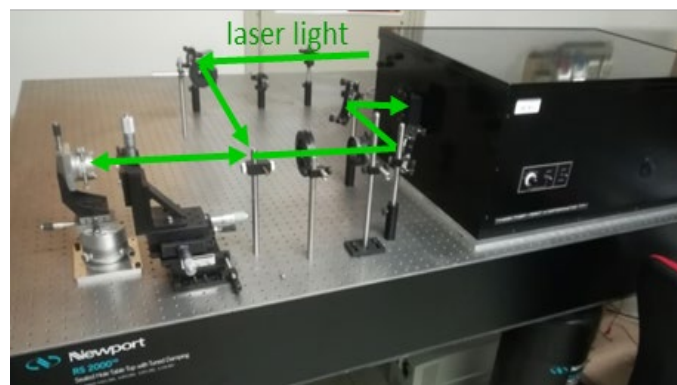
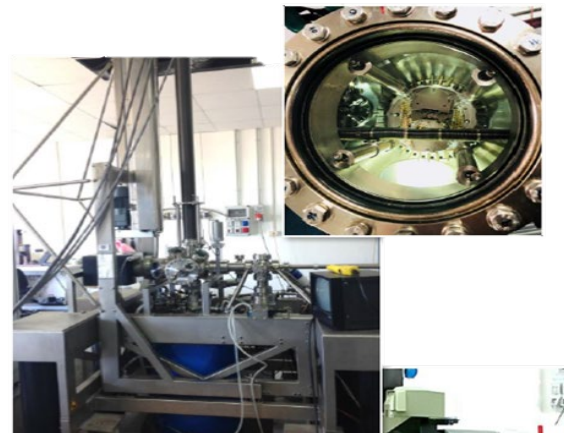
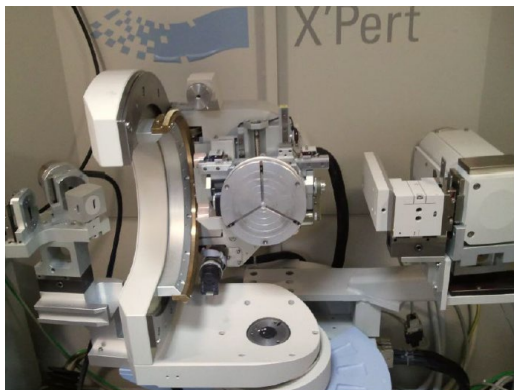
- **Studio dei parametri reticolari e dello stress** nello strato cristallino appena cresciuto, può fornire indicazioni sulla uniformità dello spessore, sulla presenza di difetti e sulla composizione chimica (XPS, RAMAN, Brillouin)
- **Caratterizzazioni morfologiche ed elettroniche** dei rivestimenti cristallini sono fondamentali per valutarne la qualità, l'omogeneità e le prestazioni (XPS, SEM, TEM, AFM)

SISTEMI DI CARATTERIZZAZIONE

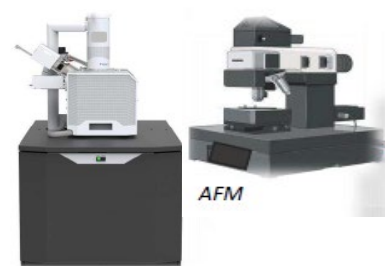
X = already present
V = ready within 2025

LAB	XRF XRD	XPS	RAMAN	AFM	SEM	RBS	XAS	OUT_ GAS	FTIR	TEM	Brill	GeNS	Cryo GeNS	Cavity Memb	TN	Abs.	Spct- FM /Scatt	SE	T-opt	BF
BOLOGNA	X				X		X										X			
CAGLIARI				X														X		
FERRARA																				X
URBINO				X	X							X	X						X	
GENOVA		X	X	X												V	X	X		
PADOVA	X		X	X		X			X					V		V	X	X		
PERUGIA	X		X		X		X		X		X	X	V							
PISA			X	X	X				X	X										
ROMA1		X	X	X				X												
ROMA TV	X	X		X								X	V		V	V	X	X		
SALERNO	X		X	X	X											V		V		

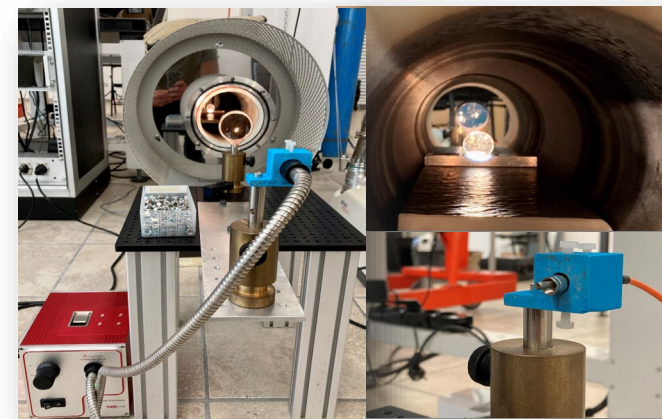
SISTEMI DI CARATTERIZZAZIONE



Thin-film XRD



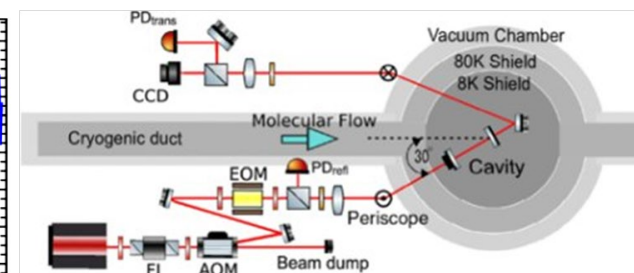
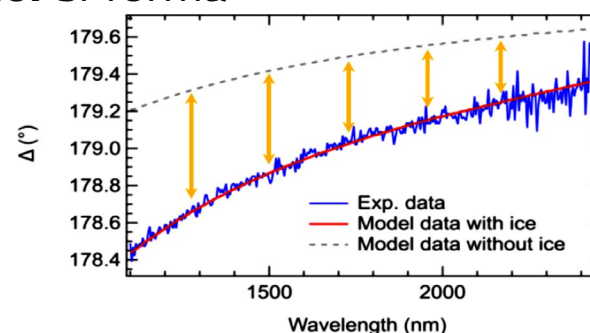
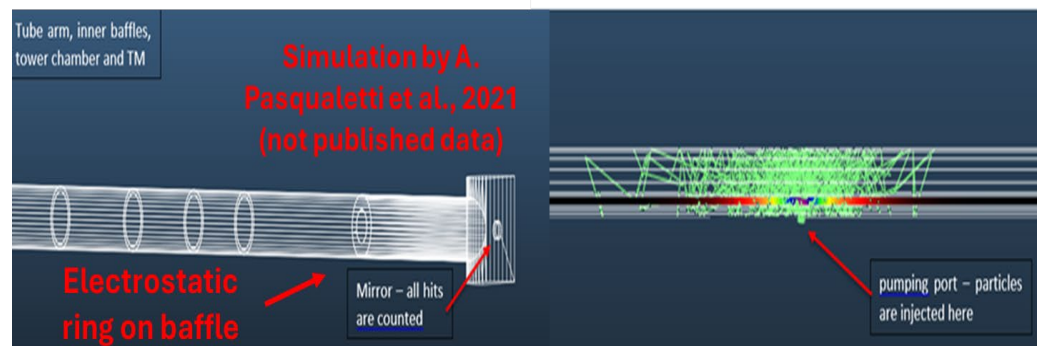
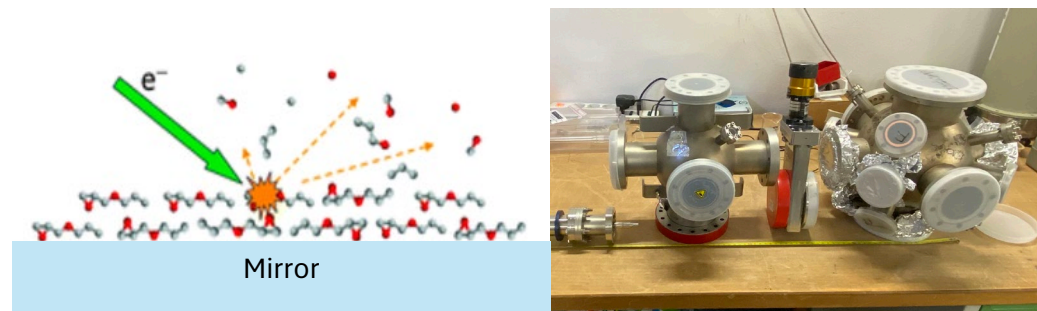
SEM-EDX



R&D IN CORSO – METODI DI CONDIZIONAMENTO SPECCHIO (S/T)

METODI DI MONITORAGGIO/CONDIZIONAMENTO DELLA SUPERFICIE DELLO SPECCHIO

- **Neutralizzazione della carica:** ottiche isolate in vuoto presentano una distribuzione di carica disomogenea che va neutralizzata.
 - **Metodo attivo:** irradiazione con elettroni di bassa energia per mitigare la carica, studio della **qualità della superficie** dopo irraggiamento elettronico
 - **Metodo passivo:** integrazione di anelli elettrostatici per mitigare il flusso di cariche dai tubi da vuoto alla torre dello specchio
- **Sistema di sensing e attuazione dello specchio in criogenia:** nuovi sensori e sistemi di attuazione adatti alle T criogeniche
- **Monitoraggio e condizionamento dello strato di ghiaccio:** si forma superficialmente per crio-adsorbimento di gas residui
 - **Monitoraggio proprietà ottiche tramite SE**
 - **Rimozione ghiaccio con elettroni di bassa energia**
 - **Rimozione ghiaccio tramite laser a CO2**
- **R&D in corso (Frascati, Genova, Roma TOV)**



Grazie per l'attenzione



RICERCA SUI COATING (SPARE1)

Vibrations around equilibrium positions

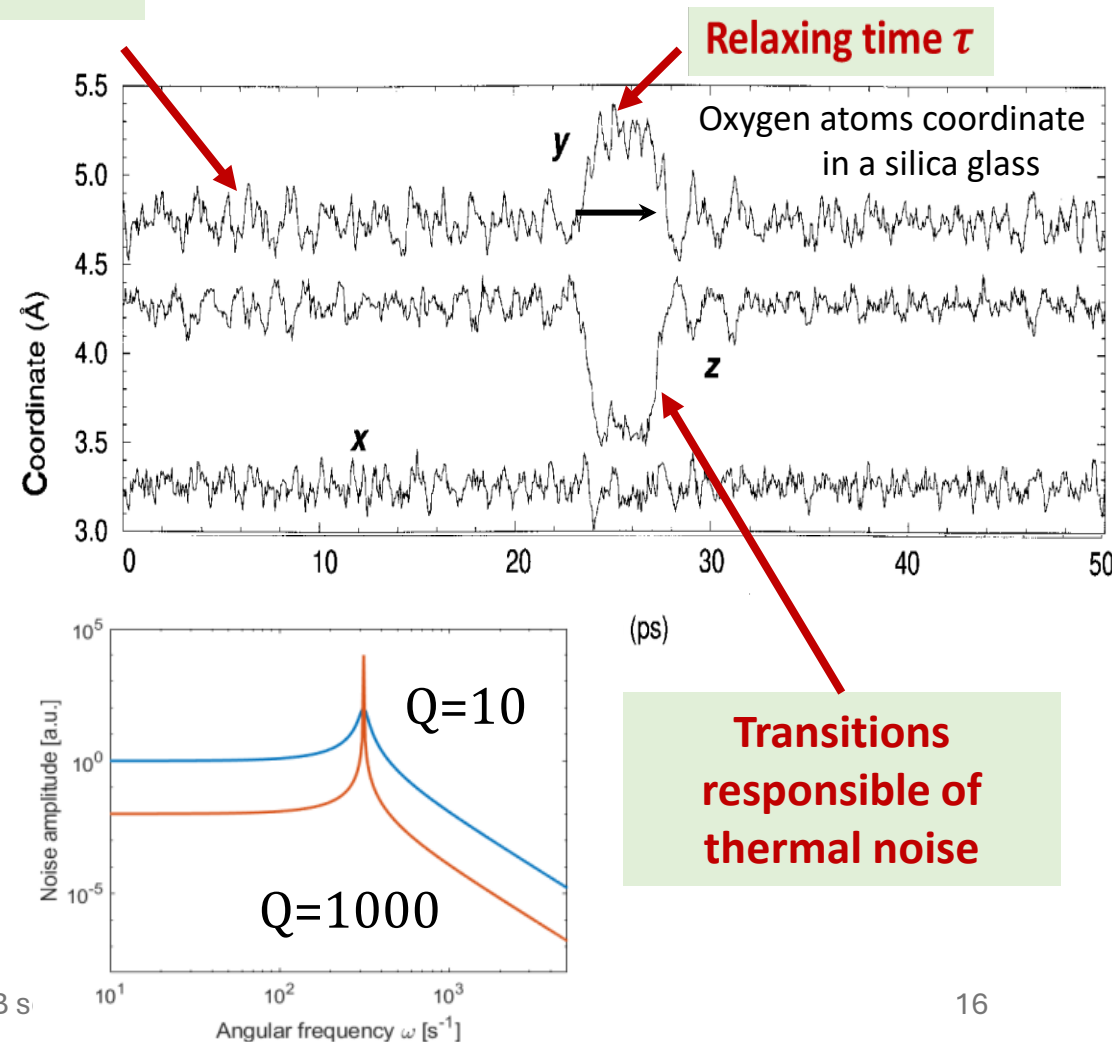
THERMAL NOISE

- Thermal noise is a feature of **linear, dissipative systems** at thermal equilibrium
- Mechanical thermal noise is due to irreversible processes associated to typical **time constants** and **energy scales**
- The same mechanisms are responsible of the vibrational **energy dissipation** and of the **thermal fluctuations**

$$S_{xx}(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega^2} \text{Re}(Y(\omega))$$

Fluctuation-dissipation theorem
H. B. Callen, T. A. Welton (1951)

- These processes make possible a **leakage of energy** from quasi-normal modes to the off-resonance part of the spectrum



RICERCA SUI COATING (SPARE2)

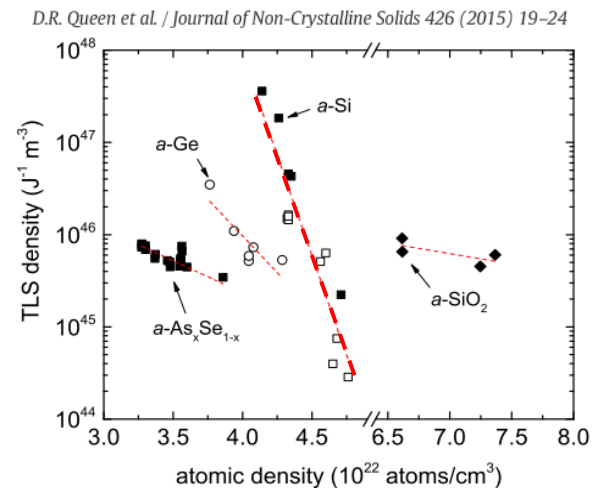
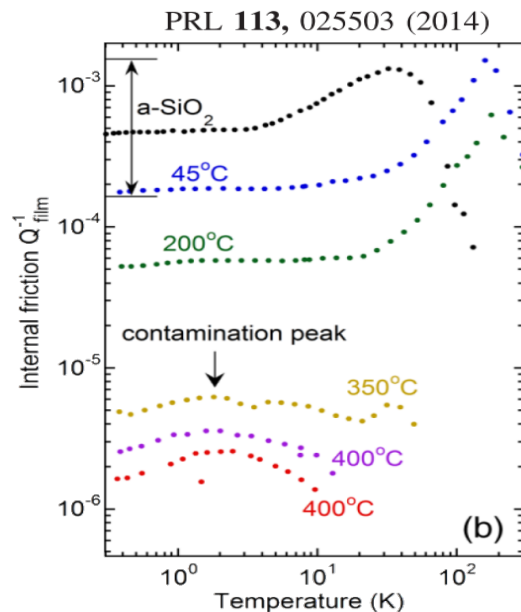
- The anelastic behavior of amorphous materials is explained by the presence of a number of **metastable states**. Any two of these states that are **separated by an energy barrier** is called a **Two Level System (TLS)**.

K. S. Gilroy & W. A. Phillips *Philosophical Magazine B* 43,5 (1981)

- In order to reduce the loss angle of amorphous materials two basic ideas can be pursued

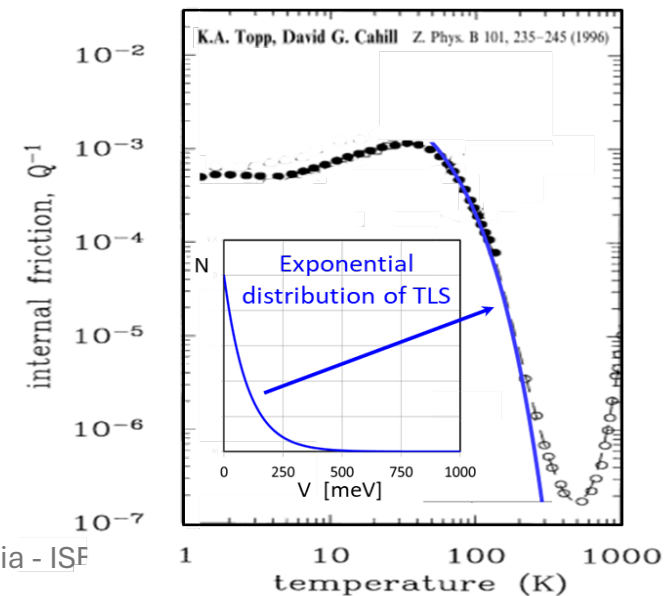
- **TLS density reduction:**

- Example: high temperature deposition aSi



- **TLS distribution shaping, reducing TLS with $E_b \sim 0.5 \text{ eV}$:**

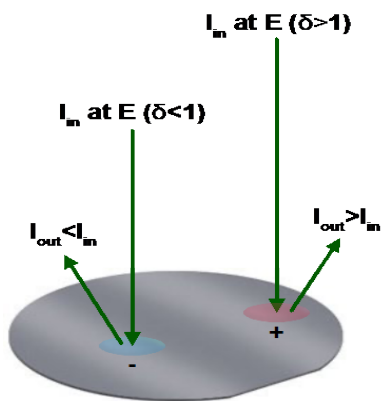
- Example: fused silica post deposition annealing



F. Travasso et al.
Materials Science and Engineering A
521–522 (2009) 268–271

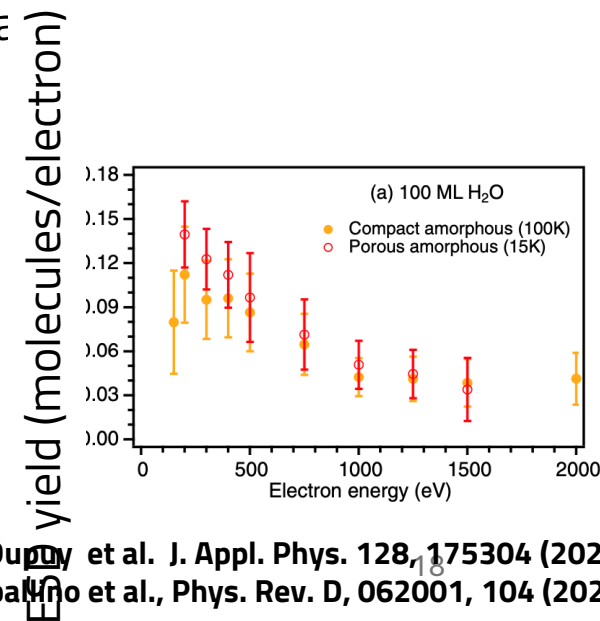
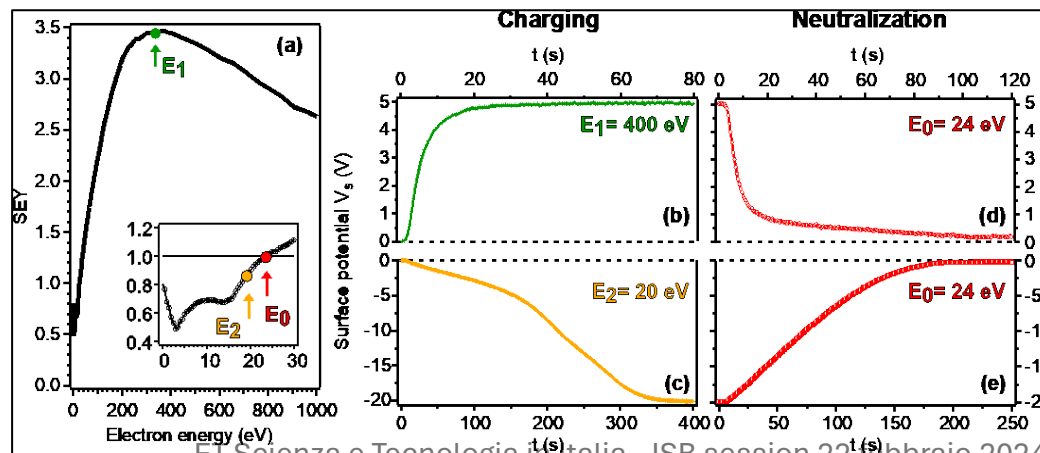
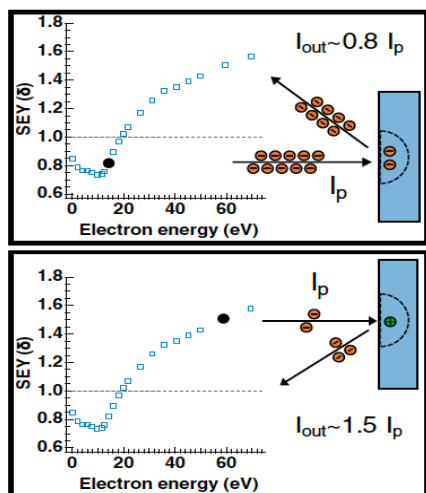
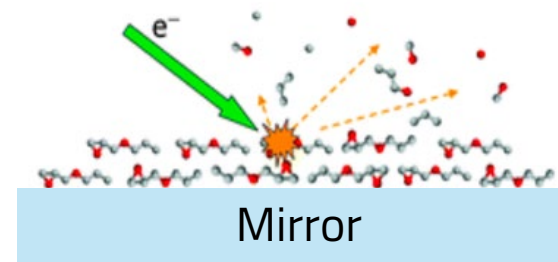
RICERCA SUI COATING IN ITALIA (SPARE 3)

➤ Metodo di mitigazione attiva: l'irraggiamento con elettroni a bassa energia può rimuovere il ghiaccio ("Frost") e mitigare la carica elettrostatica (LNF in collaborazione con ISB Cryogenics&Vacuum)



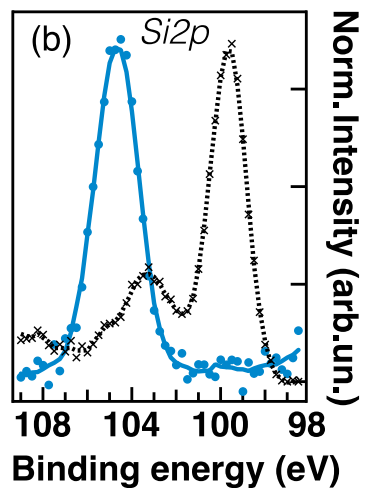
1. **Misure di caricamento e neutralizzazione** su campioni piccoli (10x10 mm²) di test e specifici per le ottiche dei detector, a temperatura ambiente e criogenica (RT e LT)

2. **Definizione dei parametri** del fascio di elettroni per neutralizzare la carica superficiale.



RICERCA SUI COATING IN ITALIA (SPARE 4)

XPS



- 3. Caratterizzazione dello stato delle superfici, multilayer e della loro contaminazione** tramite Secondary Electron Yield (SEY), X-Ray Photoemission Spectroscopy (XPS) e Raman
- 4. Misure sulla qualità della superficie** dopo irraggiamento elettronico (crystallization status, optical defects, scattering centers, scattering losses, mechanical losses,...) (in collaborazione con altri gruppi del CoreOptics)
- 5. Realizzazione di un setup UHV dedicato** per lo studio della distribuzione della carica e del processo di neutralizzazione mediante Kelvin Probe su campioni "grandi" (1 pollice) appositamente prodotti per la collaborazione ET.

