



Nuove strategie di attenuazione sismica a bassa frequenza per i rivelatori di onde gravitazionali di terza generazione

Incontri di Fisica delle Alte Energie
2024/04/03

M. Vacatello, INFN Pisa – Università di Pisa
S. Ardito, M. Baratti, G. Bartoli, L. Bellizzi, G. Demasi,
F. De Santi, F. Fidecaro, A. Fiori, L. Muccillo, M. A. Palaia, L. Papalini, M. Razzano
E-Mail: michele.vacatello@phd.unipi.it

I rivelatori di onde gravitazionali

Interferometri

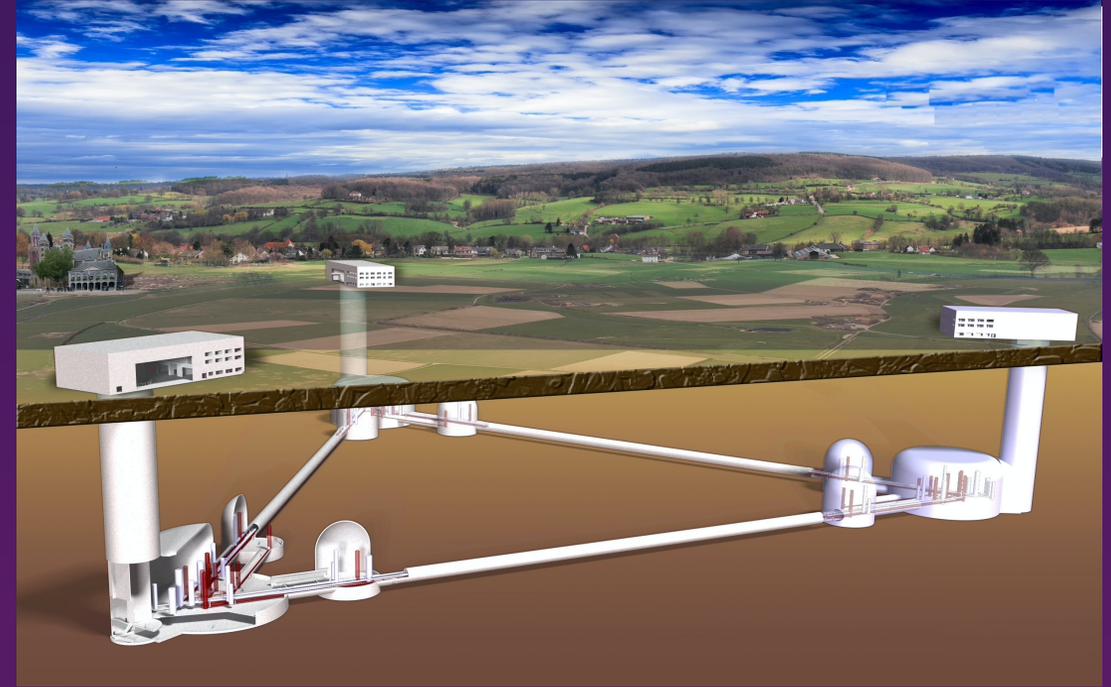
- bracci lunghi Km
- cavità Fabry-Perot

Sorgenti di rumore:

- **Sismico** ($f < 10\text{Hz}$)
- Newtoniano ($f < 5\text{Hz}$)
- Termico ($f \sim 100 - 300\text{Hz}$)
- Quantistico

Einstein Telescope:

- Tre rivelatori in **formazione triangolare** (disaccoppiamento polarizzazioni e antenna pattern function più isotropa)
- Conflitti tra tecnologie necessarie per le basse ($f \sim 3 - 30\text{ Hz}$) e alte ($f \sim 30\text{ Hz} - \text{alcuni kHz}$) frequenze: ogni rivelatore formato da **due interferometri**
- **Costruzione sotto terra** (200 – 300 m, necessario per soddisfare i requisiti sul rumore sismico)



Tipico segnale *strain* $h \sim 10^{-21}$



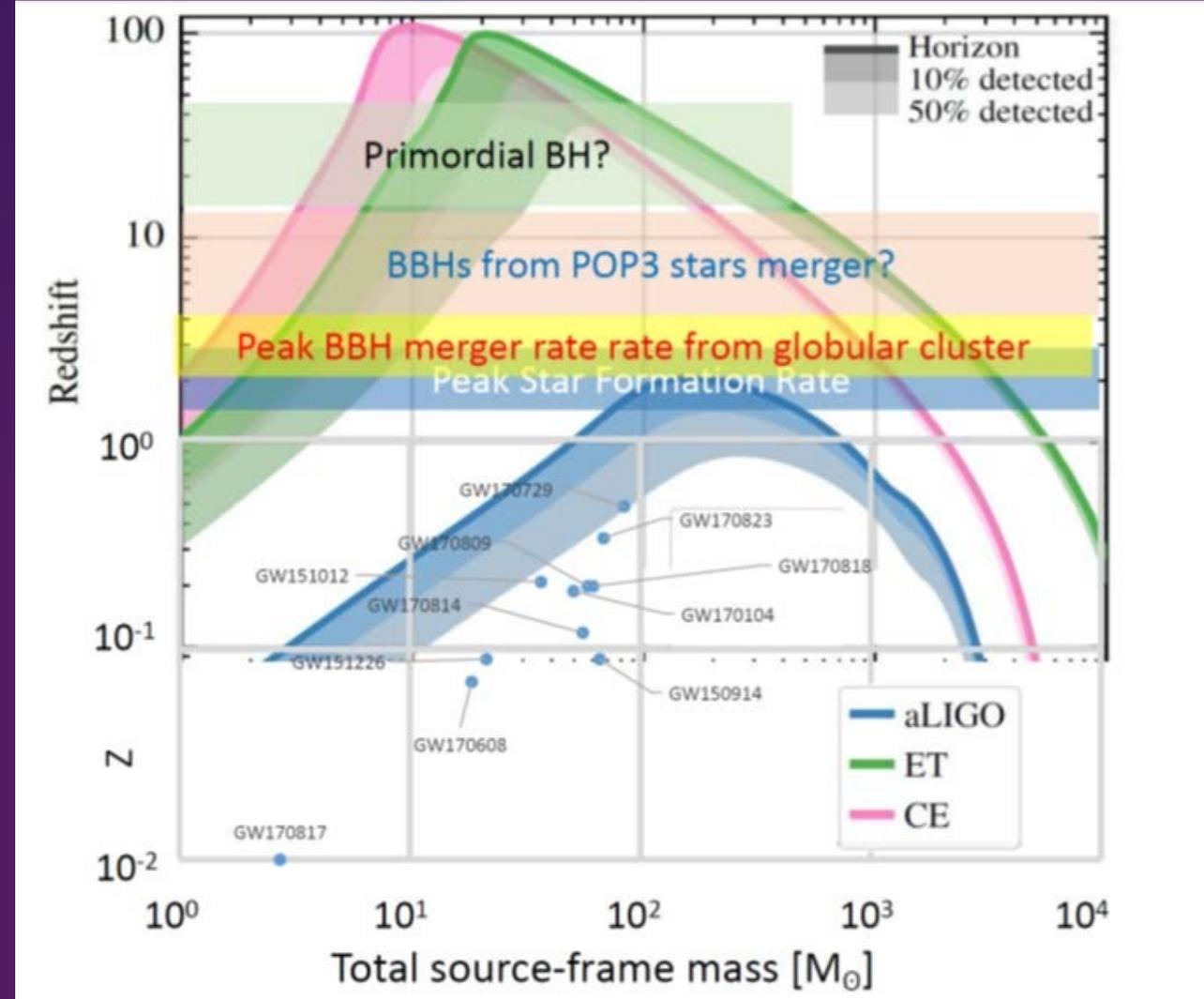
Spostamento indotto $\sim 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$

Einstein Telescope Technical Design Report, The Einstein Telescope Collaboration, 2020

Perchè le basse frequenze?

Sensibilità maggiore a basse frequenze per rivelatori di onde gravitazionali:

- Segnali a redshift elevato ($z \gtrsim 30$, M. Maggiore et al, 2020), **universo primordiale**
- Permanenza del segnale più a lungo (per binarie di stelle di neutroni anche ore, S. Ronchini et al, 2022) nella banda sensibile del rivelatore (**Early Warning per follow-up elettromagnetico**)
- **Sorgenti mai osservate** come pulsar isolate ($f \sim 10 - 200 \text{ Hz}$) e sistemi binari a massa elevata ($M_{tot} \sim 100 - 1000 M_{\odot}$) (M. Maggiore et al, 2020)



Einstein Telescope Technical Design Report, The Einstein Telescope Collaboration, 2020

Il rumore sismico

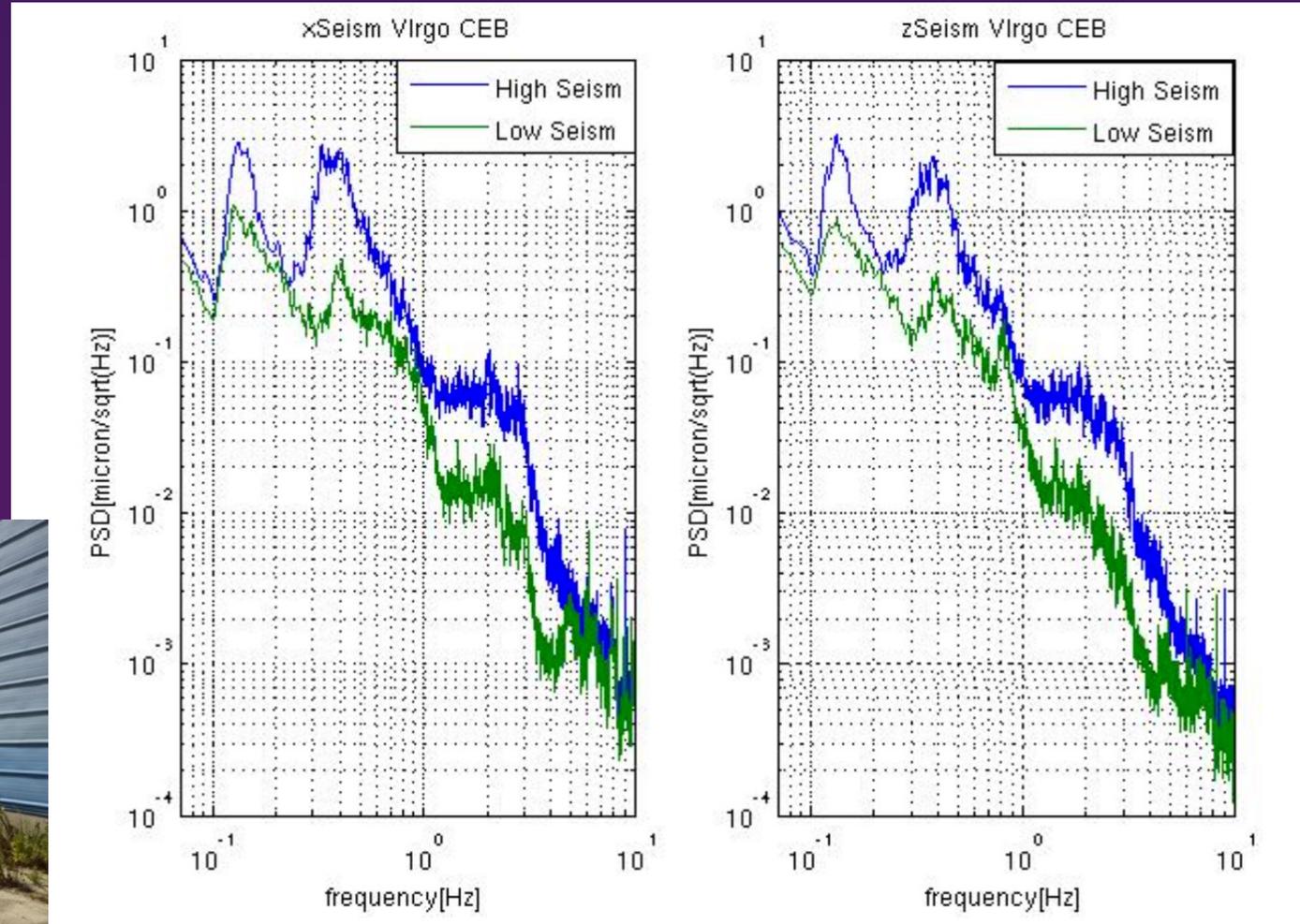
Modello empirico

dello spettro sismico (P. R. Saulson, 1994):

$$\tilde{x}_s(f) = A \left(\frac{1\text{Hz}}{f} \right)^2 \frac{m}{\sqrt{\text{Hz}}} \quad A \sim 10^{-7} / 10^{-9}$$

Fattori principali:

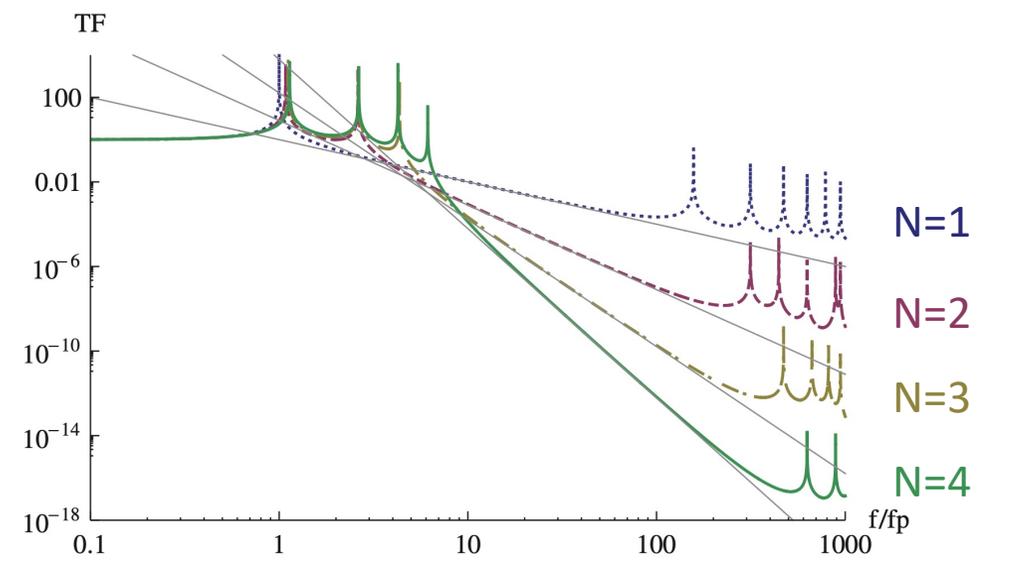
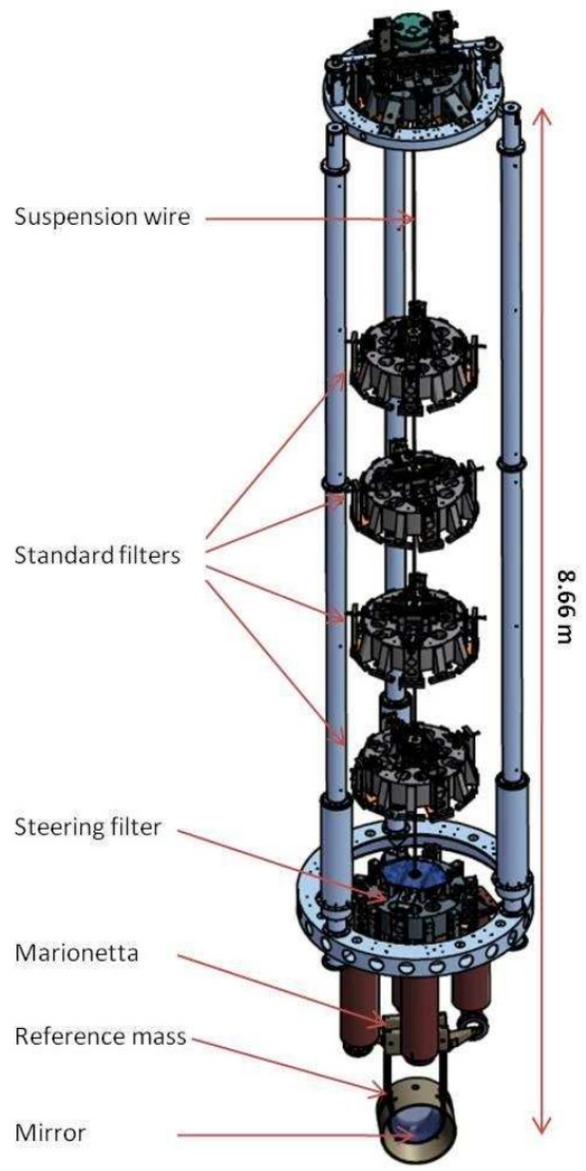
- Microsisma ($f < 1\text{Hz}$)
- Meteo e vento ($f \sim 1\text{Hz}$)
- Attività umane ($f \sim 10\text{Hz}$)



Virgo Logbook

L. Trozzo PhD thesis, 2018

Il superattenuatore di Advanced Virgo – la catena di pendoli



G. Cella and A. Giazotto, 2011

Rumore sismico a $f = 1\text{Hz}$ per Virgo:
 $10^{-7} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$



Attenuazione richiesta
 dell'ordine di 10^{-11} (AdV TDR)

Superattenuatore:

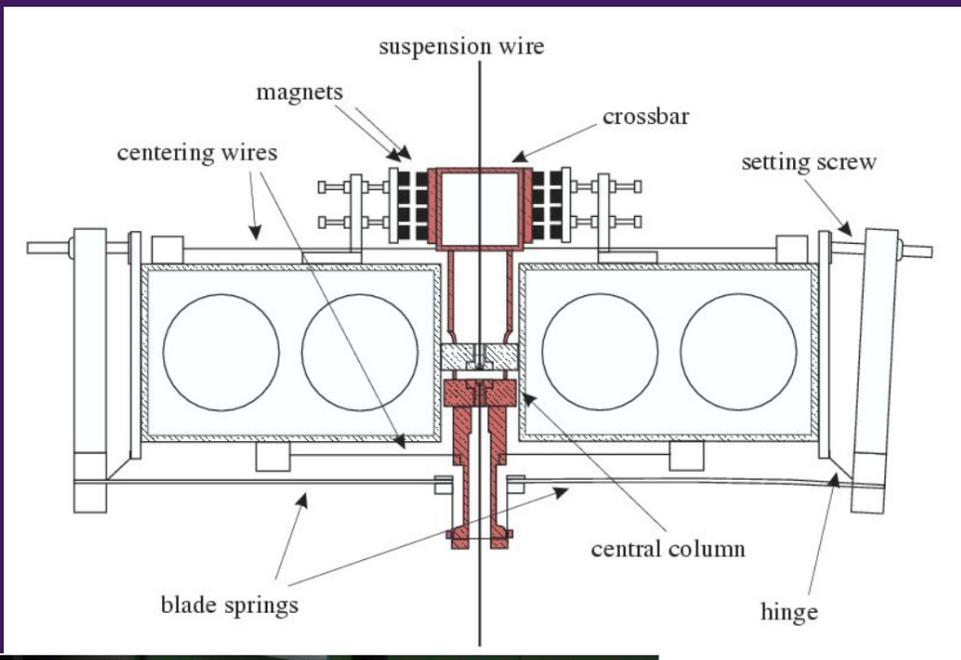
- **Preattenuazione** (pendolo invertito)
- **5 filtri** (catena di pendoli)
- **Payload** (specchio e marionetta)
- Modi normali dei filtri $f_0 \sim 0.5\text{Hz}$
- Camere a vuoto

$$A_{tot}(\omega) = \prod_{i=1}^N A_i(\omega) \approx \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^{2N}$$

Vibrazioni intinseche della catena
 a frequenze oltre la risonanza

AdV technical design report, The Virgo Collaboration, 2012

Il superattenuatore di Advanced Virgo – i filtri



Filtri in acciaio con alto momento di inerzia per ridurre i modi rotazionali (diametro 70cm, altezza 18.5cm, peso 100Kg - Adv TDR, 2012)

Attenuazione verticale: **lame elastiche** pre-piegate

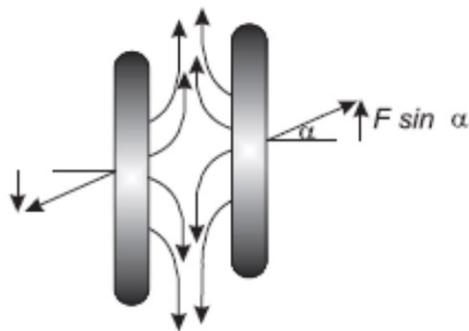
Modi verticali
 $f_0 \sim 1.4\text{Hz}$



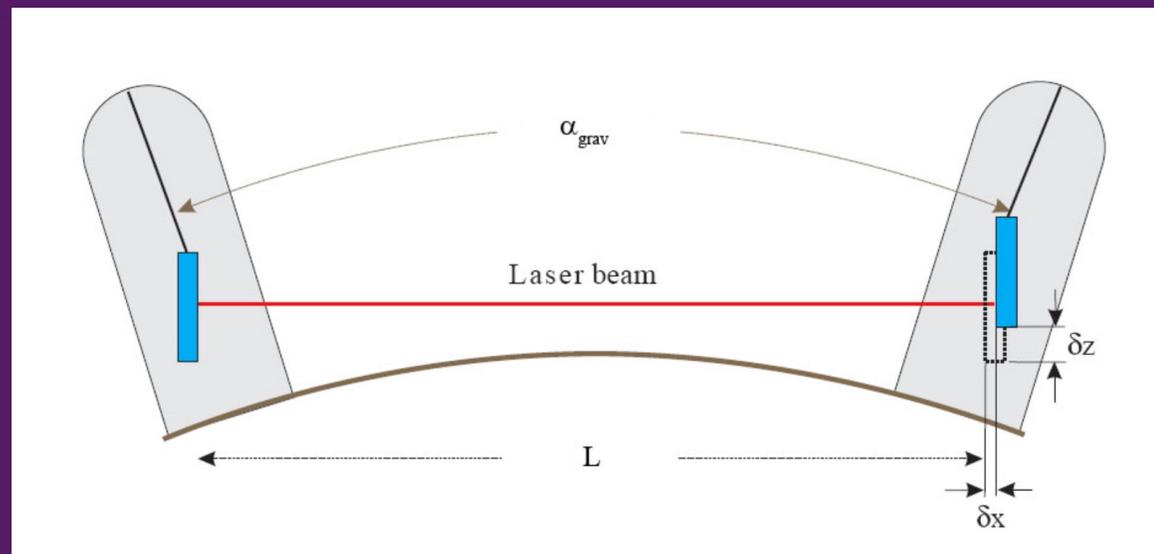
Aggiunta di
antimolle magnetiche

Modi verticali ridotti a $f_0 \sim 0.4\text{Hz}$

V. Boschi PhD Thesis, 2010



M. Beccaria et al. 1997



V. Boschi PhD Thesis, 2010



I progetti R&D sulle sospensioni nel gruppo Virgo-ET Pisa

Lunga tradizione ed expertise nel campo delle sospensioni:

ETIC (Einstein Telescope Infrastructure Consortium)

PI: Michele Punturo (INFN Perugia, Università di Perugia), finanziato dal **MUR** con circa 50M€ dall'Unione Europea (NextGenerationEU) all'interno del **PNRR**.

A Pisa: caratterizzazione del **sito candidato di Sos Enattos, in Sardegna** e studio per **attenuazione sismica e di controllo a bassa frequenza**.

NGSA (New Generation Super-Attenuator)

PI: Luciano Di Fiore (INFN Napoli), finanziato dall'INFN (Commissione 5).

A Pisa: Mechanical filter with improved Magnetic Anti-Spring (WP2 - F. Frasconi) / Sensing and Control (WP4 - A. Gennai).

BHETSA (Black Holes for ET in Sardinia)

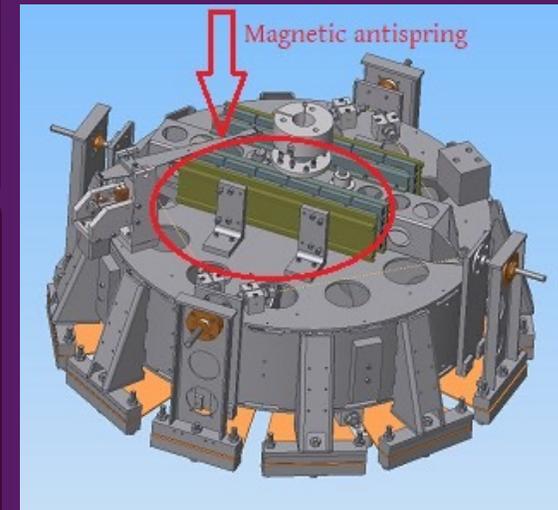
PI: Francesco Fidecaro (INFN Pisa, Università di Pisa), finanziato dal **MUR** nell'ambito del **PRIN**.

A Pisa: infrastruttura software, simulazioni per funzioni di trasferimento, studio di un nuovo **filtro compatto**, il **Pendulum Inverted Pendulum (PIP)**.

ET-ITALIA

Responsabile locale Pisa: Alberto Gennai

A Pisa: **preisolatore attivo, sistema di controllo sospensioni**, nuovi accelerometri



L. Di Fiore et al., 2023



Il Pendulum-Inverted-Pendulum (PIP)

Rumore sismico a Sos Enattos:

$$3 \cdot 10^{-10} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad \text{a } f = 2\text{Hz}$$

Requisiti per ET:

$$10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad \text{a } f = 2\text{Hz}$$

Considerando tutti gli stadi obbligatori
(pendolo invertito, marionetta, specchio) →

Attenuazione richiesta:
 $5.6 \cdot 10^{-5}$ a $f = 2\text{Hz}$

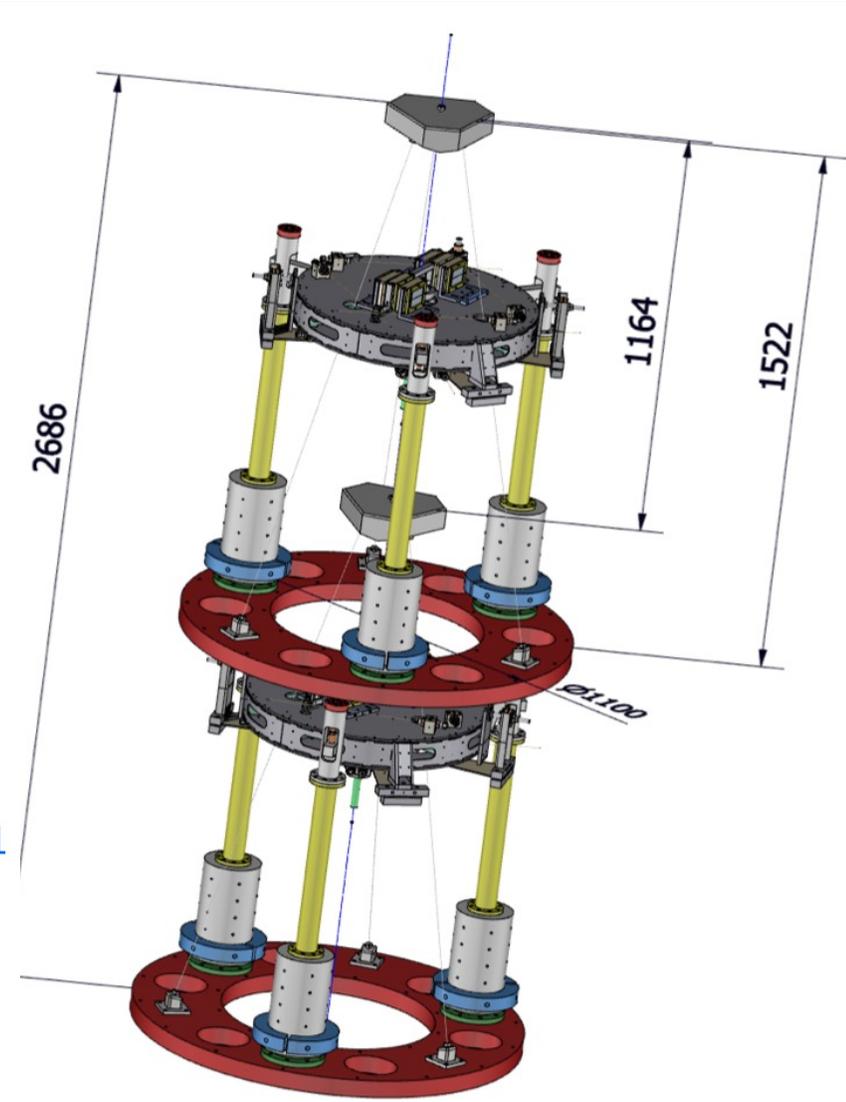
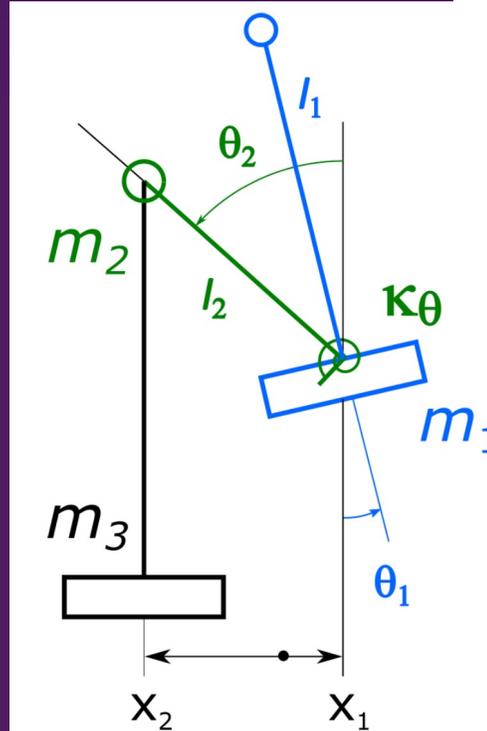
R&D per prototipo compatto: **Applicare l'idea dell'inverted pendulum a un singolo filtro (il PIP)**
(Nel TDR di ET è previsto un superattenuatore di 17m)

$$A(\omega) = \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right)^2$$

Singolo PIP risparmia un **fattore 2 in altezza**

Una catena di 3 PIP soddisfa alle richieste:

- Attenuazione di $1.9 \cdot 10^{-5}$ a $f = 2\text{Hz}$



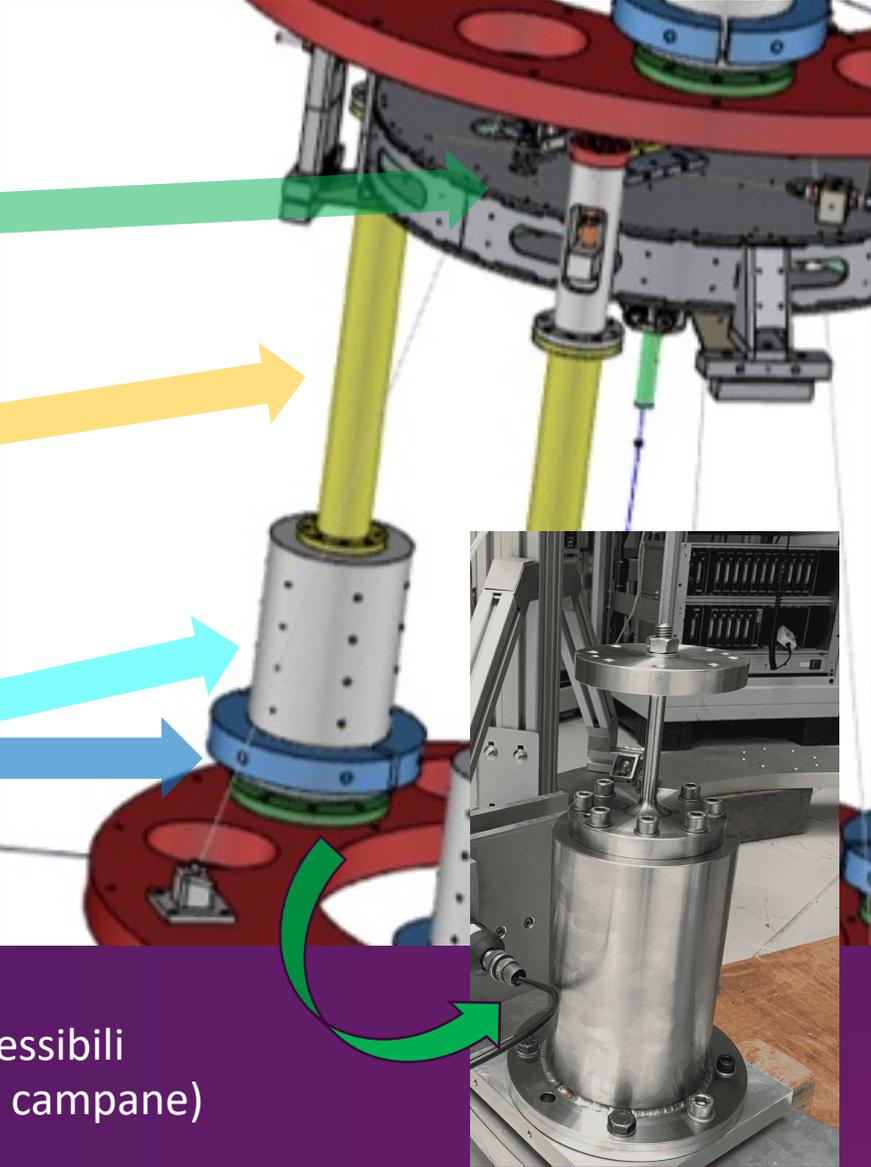
Il Pendulum-Inverted-Pendulum (PIP)



Pesi (per riprodurre i **filtri**)

Gambe

Campane con **contrappesi**
per cambiare il centro di massa



Giunti flessibili
(sotto le campane)

Il Pendulum-Inverted-Pendulum (PIP)

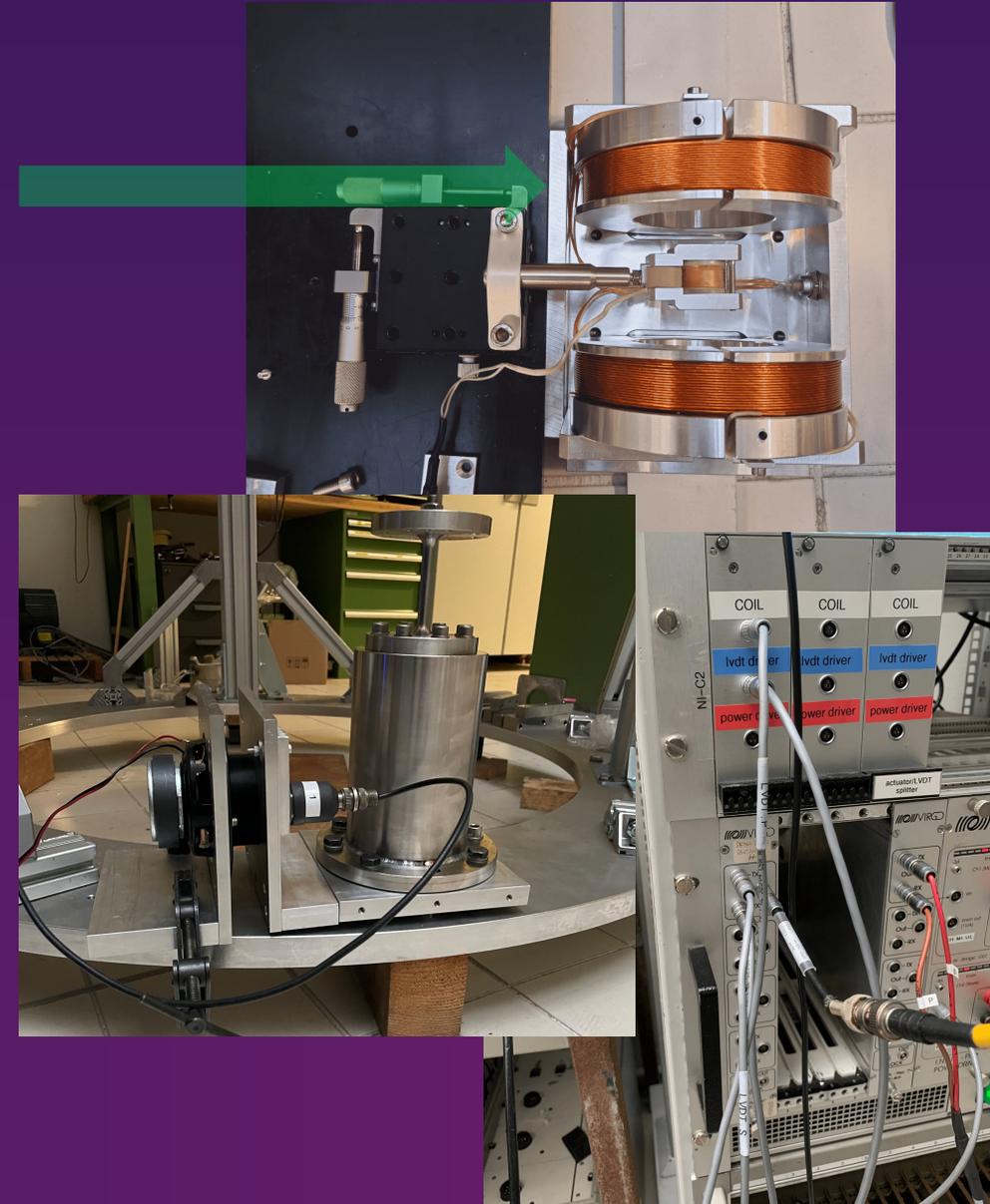


LVDT (Linear Variable Differential Transformer) per misure di posizione

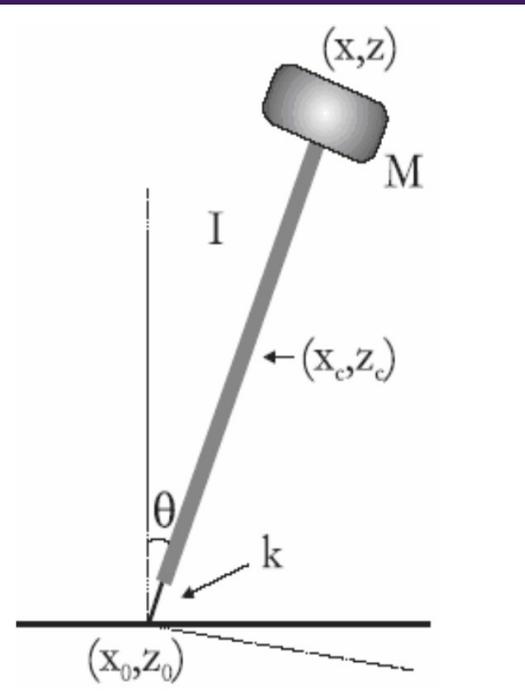
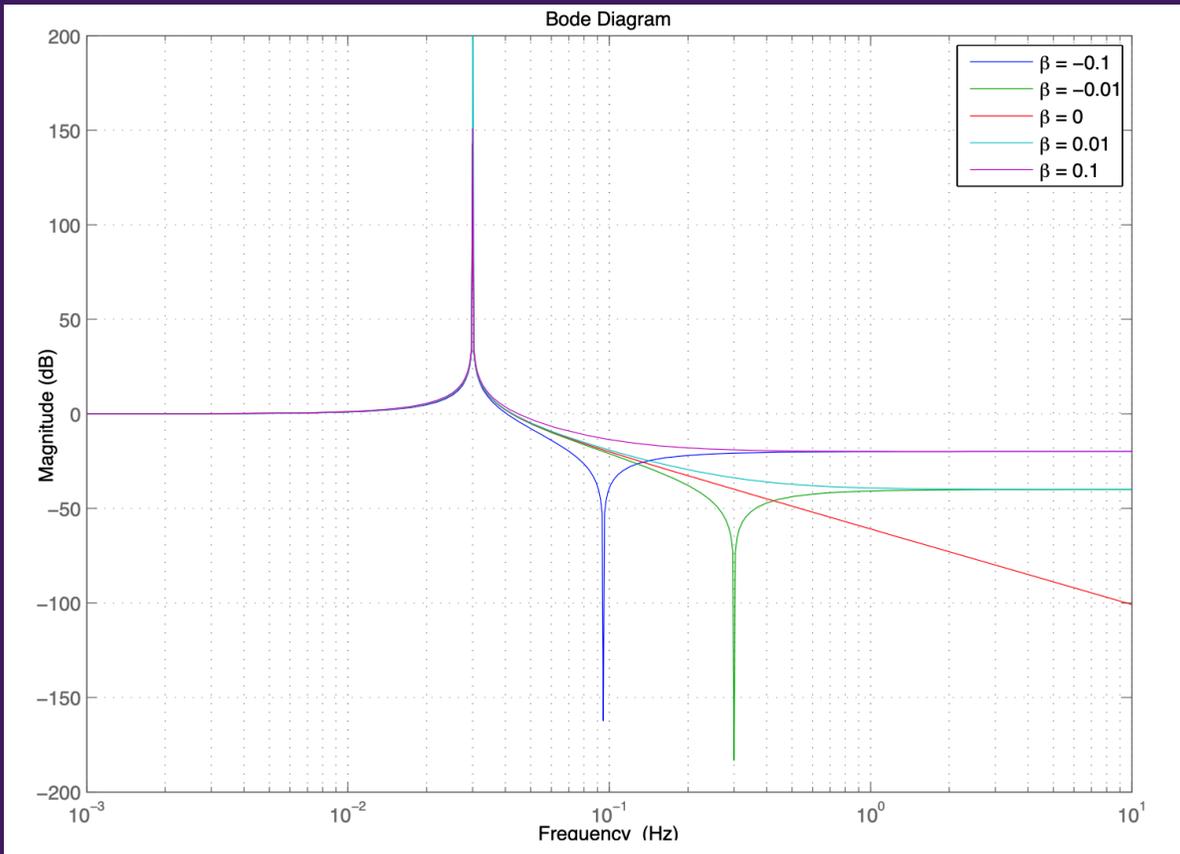
Rumore trasmesso da **woofer** montati alla base della gamba

Generatore di forme d'onda **MokuPro** per i segnali di rumore

Obiettivo: caratterizzare le parti meccaniche e trovare le **funzioni di trasferimento orizzontali delle gambe**



Caratterizzazione delle gambe Inverted-Pendulum (IP)



V. Boschi PhD Thesis, 2010
G. Losurdo PhD Thesis, 1998

Funzione di trasferimento

$$A(\omega) = \frac{\omega_0^2 + \beta\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

M massa carico
 L lunghezza asta
 m massa asta
 I inerzia asta
 k richiamo elastico

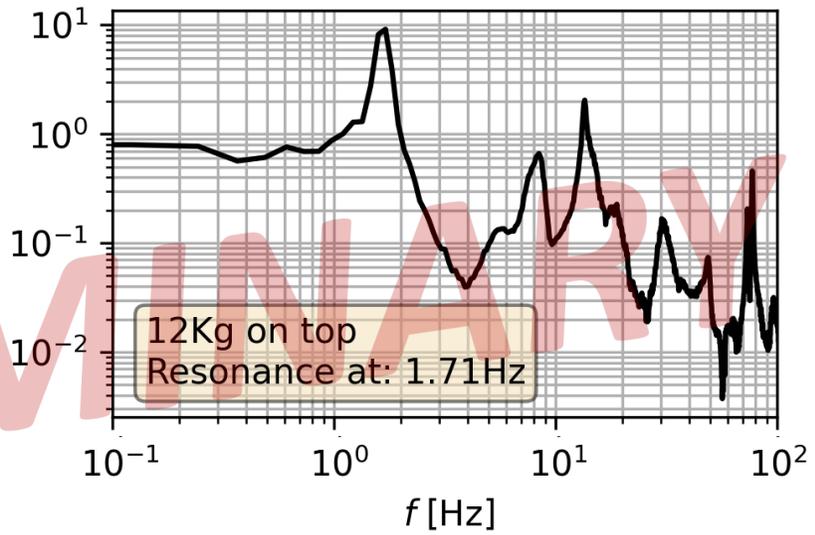
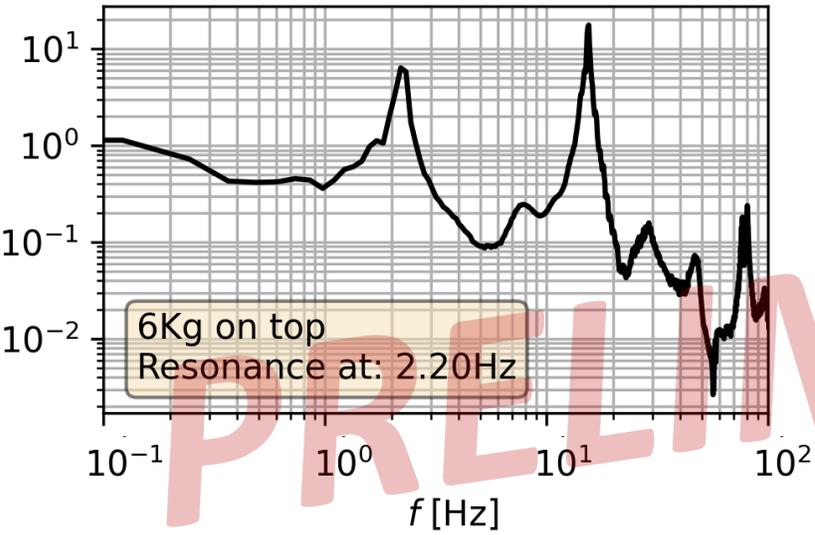
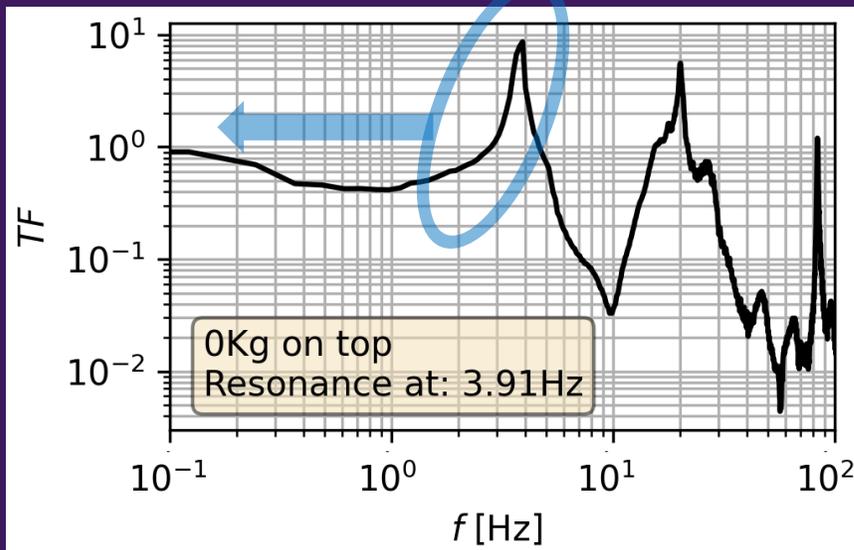
Effetto del **centro di percussione**

$$\beta = \frac{m/4 - I/L^2}{M + m/4 + I/L^2}$$

Spostamento **risonanza con la massa di carico**

$$\omega_0^2 = \frac{k - (M + m/2)g/L}{M + m/4 + I/L^2}$$

Studio delle risonanze al variare del carico



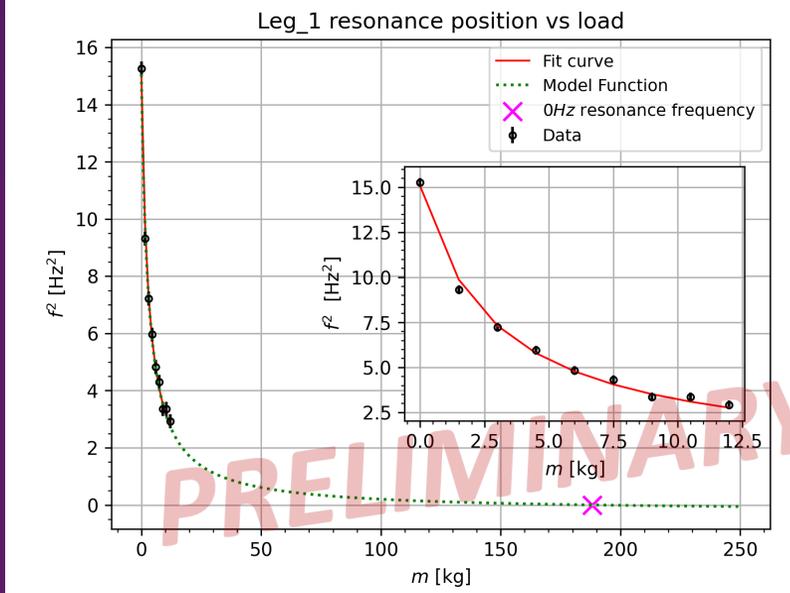
Perturbazione della base della gamba con sweep sinusoidale a 4Vpp tra 100mHz e 100Hz (in 5s)

Campionato segnali del generatore di forme d'onda, il woofer e i due LVDT per 3 minuti a 500Sa/s

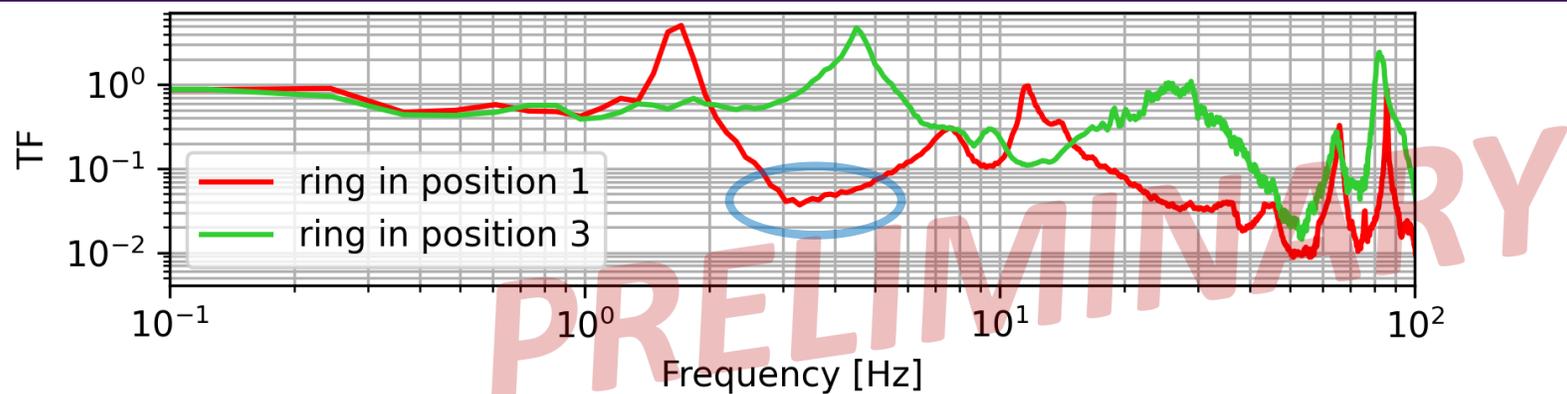
$$\omega_0^2 = \frac{k - (M + m/2)g/L}{M + m/3}$$

Valori ottenuti per i fit:

Leg_1	Leg_2
$k = 1775 \text{ N/m}$	$k = 1816 \text{ N/m}$
$M_{0Hz} = 188 \text{ Kg}$	$M_{0Hz} = 193 \text{ Kg}$



Studio dell'attenuazione con il centro di percussione

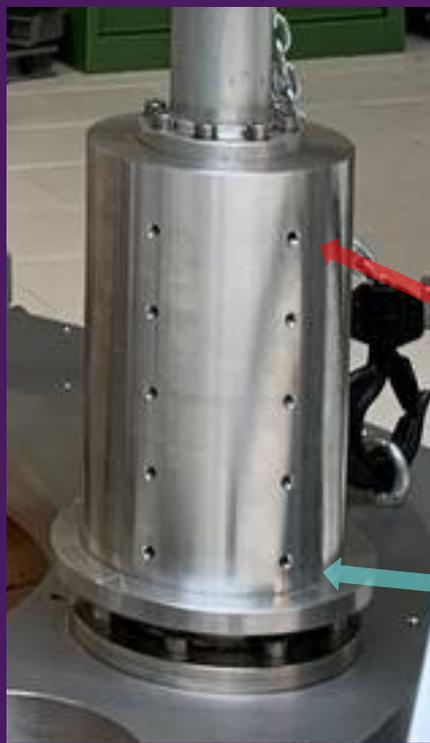


Effetto del **centro di percussione**

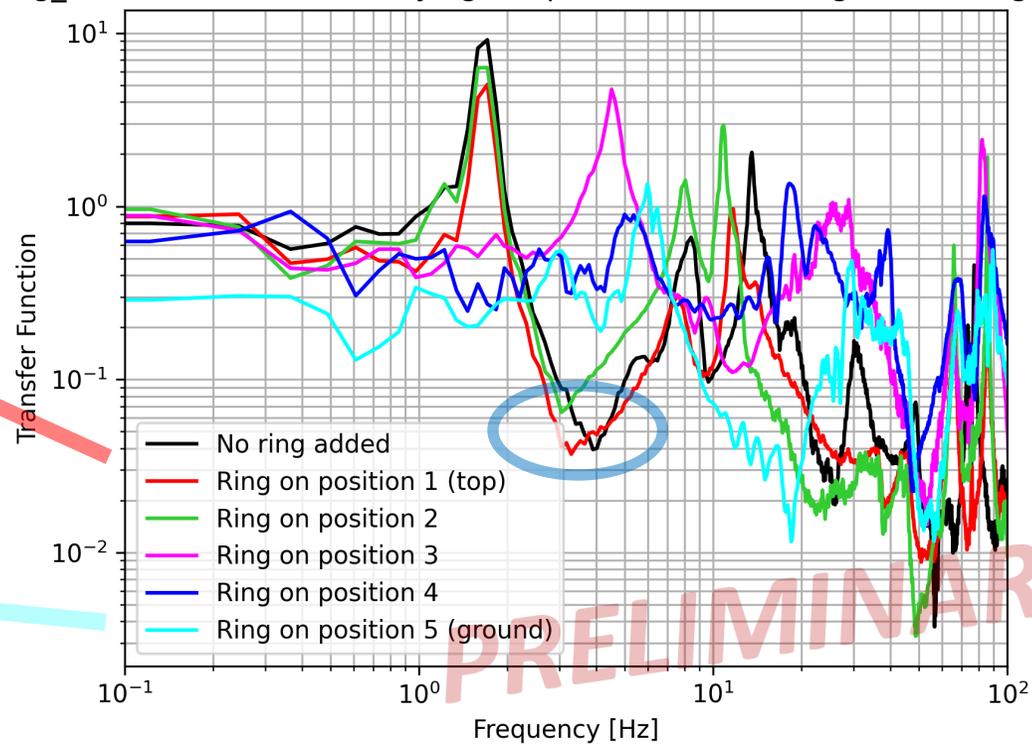
Una possibile soluzione: **contrappesi alla base del pendolo invertito** (anelli di 4.7 kg)

Perturbazione della base della gamba con sweep sinusoidale a 4Vpp tra 100mHz e 100Hz (in 5s)

Campionamento segnali del generatore di forme d'onda, il woofer e i due LVDT per 3 minuti a 500Sa/s



Percussion Center Study
Leg_1 transfer functions varying the position of base ring, extra 12kg on top



Infrastruttura software

Simulazioni: pacchetto **Octopus**

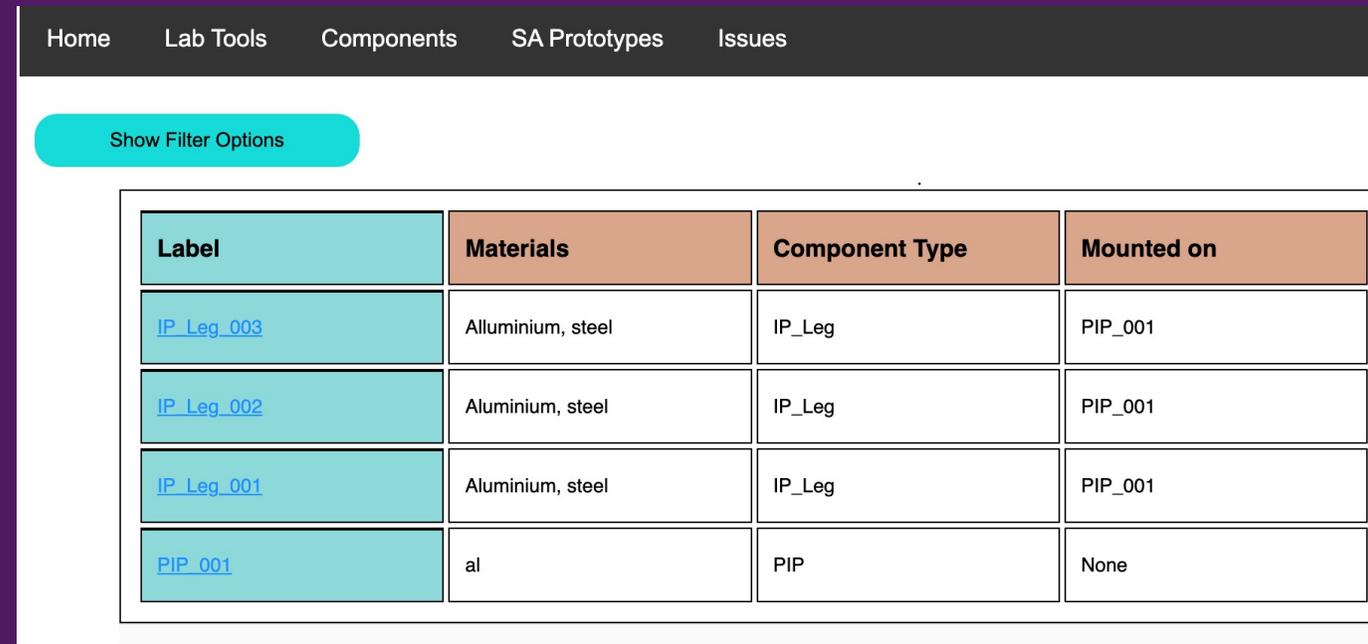
- Obiettivo: trovare la **funzione di trasferimento**
- Approccio delle **matrici di impedenza** (G. Cella & A. Vicerè 2001, Ruggi et al in preparazione)
- Unire numerosi componenti semplici in una **struttura complessa**

Misure: **Database** per il laboratorio

- Obiettivo: controllare **status componenti** e organizzare **dati, media** etc.
- **Database relazionale e interfaccia web** per tenere traccia della struttura (con MySQL, Flask)
- Online e funzionante

$$\begin{pmatrix} \vec{x}_{out}(\omega) \\ \vec{F}_{out}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\omega) & B(\omega) \\ C(\omega) & D(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{x}_{in}(\omega) \\ \vec{F}_{in}(\omega) \end{pmatrix}$$

$$T(\omega) = \frac{\vec{x}_{out}(\omega)}{\vec{x}_{in}(\omega)} = [{}^tD(\omega)]^{-1}$$



The screenshot shows a web application interface with a navigation bar at the top containing 'Home', 'Lab Tools', 'Components', 'SA Prototypes', and 'Issues'. Below the navigation bar is a 'Show Filter Options' button. The main content area displays a table with four columns: 'Label', 'Materials', 'Component Type', and 'Mounted on'. The table contains four rows of data.

Label	Materials	Component Type	Mounted on
IP_Leg_003	Alluminium, steel	IP_Leg	PIP_001
IP_Leg_002	Aluminium, steel	IP_Leg	PIP_001
IP_Leg_001	Aluminium, steel	IP_Leg	PIP_001
PIP_001	al	PIP	None

Conclusioni e prospettive future

Cosa abbiamo fatto:

- Caratterizzato il **rumore dei sensori LVDT e la risposta delle tre gambe IP**
- Montato il **PIP completo** in laboratorio
- Creato **solido supporto software** per dati e simulazioni

Sviluppi futuri:

- Caratterizzare il **PIP e trovare la funzione di trasferimento**
- Raffinare le **simulazioni per il PIP** per i casi a più dimensioni



Grazie per l'attenzione!