

LAG_2 (Liquid Actuated Gravity)

Esperimento proposto in CSN2

Durata proposta: 4 anni

Responsabile nazionale: Luciano Di Fiore

Unità partecipanti: INFN Napoli

INFN Tor Vergata

Cal Poly Humboldt – USA: C.D. Hoyle

Introduzione

- L'obiettivo di questa attività è realizzare un esperimento per provare la dipendenza **dall'inverso della distanza dell'interazione gravitazionale** (ISL) e testare il **principio di equivalenza in forma debole** (WEP) nel range **dal mm al cm**.
- Nelle misure utilizzeremo un pendolo di torsione (facility PETER, eredità di LISA-PF). La novità del nostro esperimento è l'uso come sorgente del campo gravitazionale (**Field Mass FM**) di un contenitore all'interno del quale è possibile cambiare **il livello di un liquido in modo controllato e ripetibile** per modulare la forza su una **massa di prova (Test mass TM)**, sospesa al pendolo di torsione (uniformità di densità e riduzione dei disturbi meccanici)
- La proposta di LAG_2 si basa su una lunga attività di R&D finanziata da CSN5
 - **LAG R&D (dal 2019 al 2022)** ha dimostrato con successo il principio di operazione di un attuatore liquido (H₂O) usando la facility di LISA PF
 - **MAG R&D (2023-2024)** stiamo sperimentando l'uso del mercurio come liquido e validando due sistemi per la misura di livello

Obiettivi scientifici

- Abitualmente **possibili deviazioni da ISL** sono parametrizzate usando una espressione alla Yukawa che per il potenziale prodotto da una massa puntiforme M ad una distanza r è:

$$V_{Yukawa}(r) = -G_{\infty} \frac{M}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

dove G è le costante di gravitazione, α l'ampiezza delle deviazione e λ è la scala a cui la deviazione dovrebbe manifestarsi. Andremo ad analizzare la scala intorno e sotto al cm che non è stata ancora esplorata.

- **Nel caso di violazione WEP** l'interazione gravitazionale si allontana dalla legge di Newton in relazione alla composizione delle masse \rightarrow violazione dell'universalità della caduta libera. Anche in questo caso le deviazioni vengono parametrizzate con un'energia potenziale alla Yukawa:

$$U(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r} \left(1 + \tilde{\alpha} \left[\frac{\tilde{q}}{\mu} \right]_1 \left[\frac{\tilde{q}}{\mu} \right]_2 e^{-r/\lambda} \right)$$

$\tilde{\alpha}$ = coupling constant

q = "charge" depending on Z and N

μ = atomic mass

- Il WEP è stato testato con grande precisione su una scala di distanze da 0.1m alla scala planetaria, ma **non è stato ancora testato a distanze sotto il cm.**

Metodo di misura

- Per misurare la **dipendenza dell'inverso del quadrato della distanza (ISL)** si misura il valore della forza gravitazionale a due o più distanze e si costruisce la variabile γ che nel caso di masse puntiformi è:

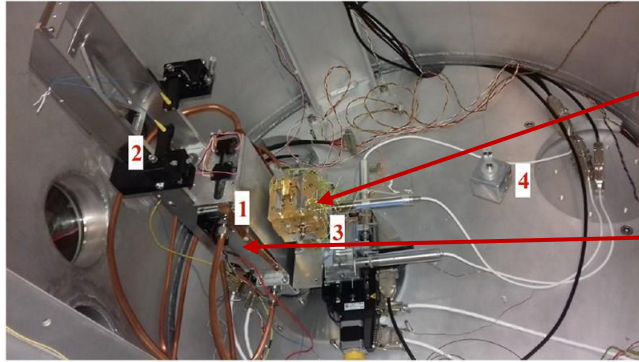
$$\gamma = \frac{F_N}{F_F} \left(\frac{r_N}{r_F} \right)^2$$

dove F_N e F_F sono le forze misurate rispettivamente alla distanza r_N e r_F .

Le deviazioni si manifestano con **valori di γ diversi da 1**.

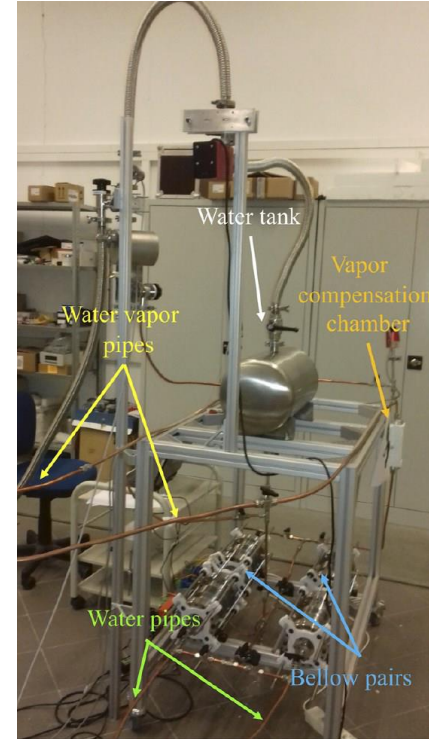
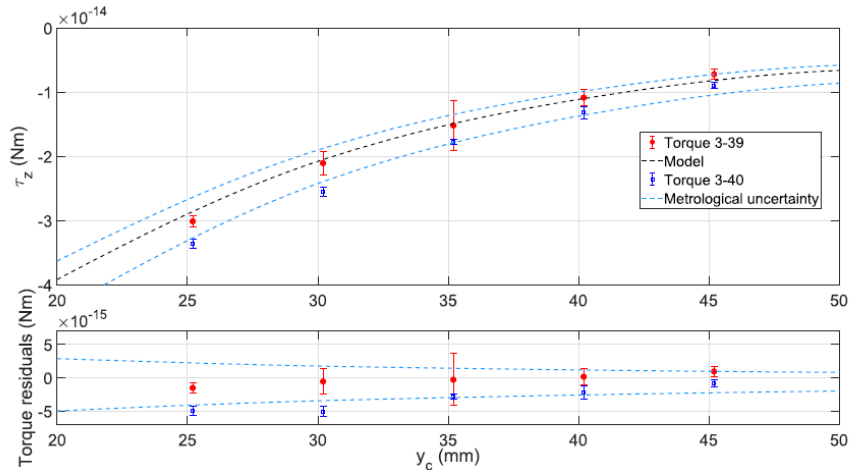
- Per misurare **violazioni del principio di equivalenza (WEP)** si realizza una massa test, i cui spostamenti sono misurati dal pendolo di torsione, composta da materiali con caratteristiche molto differenti in modo che si possa osservare una modulazione del segnale prodotto dalla massa sorgente dovuto alla differente risposta dei materiali usati

LAG e MAG R&D



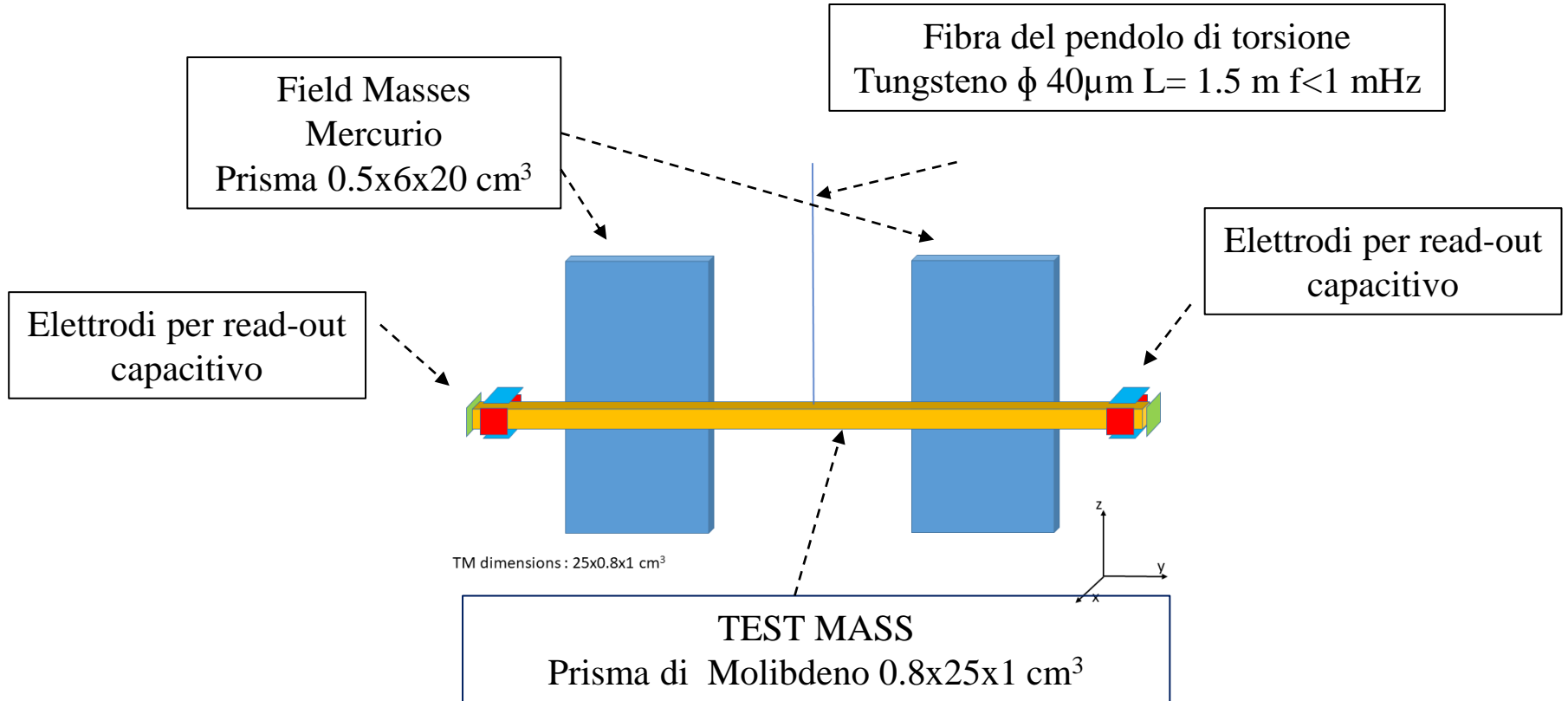
Test Mass

Contenitore
della Field Mass



Sistema di controllo del
flusso di liquido

Modello concettuale ISL



Error budget

- Dimensioni fisiche TM e FM**
Ditta specializzata con CMM
Accuratezza 10 μm (valore conservativo)
- Distanza assoluta FM-TM**
Misura FSR di una cavità ottica accuratezza 1 μm
- Spostamenti x-y TM**
Encoder lineare stepper motors PI accuratezza 0.2 μm
(valore nominale)
- Spostamenti z TM**
DC motor verticale accuratezza 100 μm
Non rilevante nell'error budget
- Errore Sperimentale**
Sensibilità in coppia accuratezza $4 \cdot 10^{-16}$ N m
valore misurato in LAG R&D
Contiamo di poterlo migliorare

| Metrological errors | Geometrical parameter | Coefficient m^{-1} | accuracy (m) | $\Delta\delta^2$ | $\Delta\delta$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|------------------|----------------|
| Test Mass | x dimension | 4,90E-01 | 1,00E-05 | 2,41E-11 | 4,90E-06 |
| | y dimension | 1,76E+00 | 1,00E-05 | 3,11E-10 | 1,76E-05 |
| | z dimension | 1,39E-02 | 1,00E-05 | 1,94E-14 | 1,39E-07 |
| Field Mass | x dimension | 4,87E-01 | 1,00E-05 | 2,37E-11 | 4,87E-06 |
| | y dimension | 6,20E-01 | 1,00E-05 | 3,85E-11 | 6,20E-06 |
| | z dimension | 2,86E-01 | 1,00E-05 | 8,18E-12 | 2,86E-06 |
| TM x offset | distance | 1,09E+00 | 1,00E-06 | 1,18E-12 | 1,09E-06 |
| TM x_near offset | distance | 1,76E+01 | 2,00E-07 | 1,24E-11 | 3,53E-06 |
| TM x_far offset | distance | 1,87E+01 | 2,00E-07 | 1,40E-11 | 3,74E-06 |
| TM y offset | distance | 2,40E+00 | 2,00E-07 | 2,30E-13 | 4,80E-07 |
| TM y_near offset | distance | 1,20E+01 | 2,00E-07 | 5,79E-12 | 2,41E-06 |
| TM y_far offset | distance | 9,63E+00 | 2,00E-07 | 3,71E-12 | 1,93E-06 |
| TM z offset | distance | 8,39E-05 | 1,00E-04 | 7,03E-17 | 8,39E-09 |
| TM z_near offset | distance | 5,07E-05 | 1,00E-04 | 2,57E-17 | 5,07E-09 |
| TM z_far offset | distance | 1,35E-04 | 1,00E-04 | 1,81E-16 | 1,35E-08 |
| Experimental errors | measurement error | Nm^{-1} | Accuracy N m | | |
| τ_m exp. error | torque | 1,29E+10 | 4,00E-16 | 2,65E-11 | 5,15E-06 |
| τ_r exp. error | torque | 1,69E+10 | 4,00E-16 | 4,59E-11 | 6,77E-06 |
| Total error | | | | 5,15E-10 | 2,27E-05 |

Risultati attesi ISL

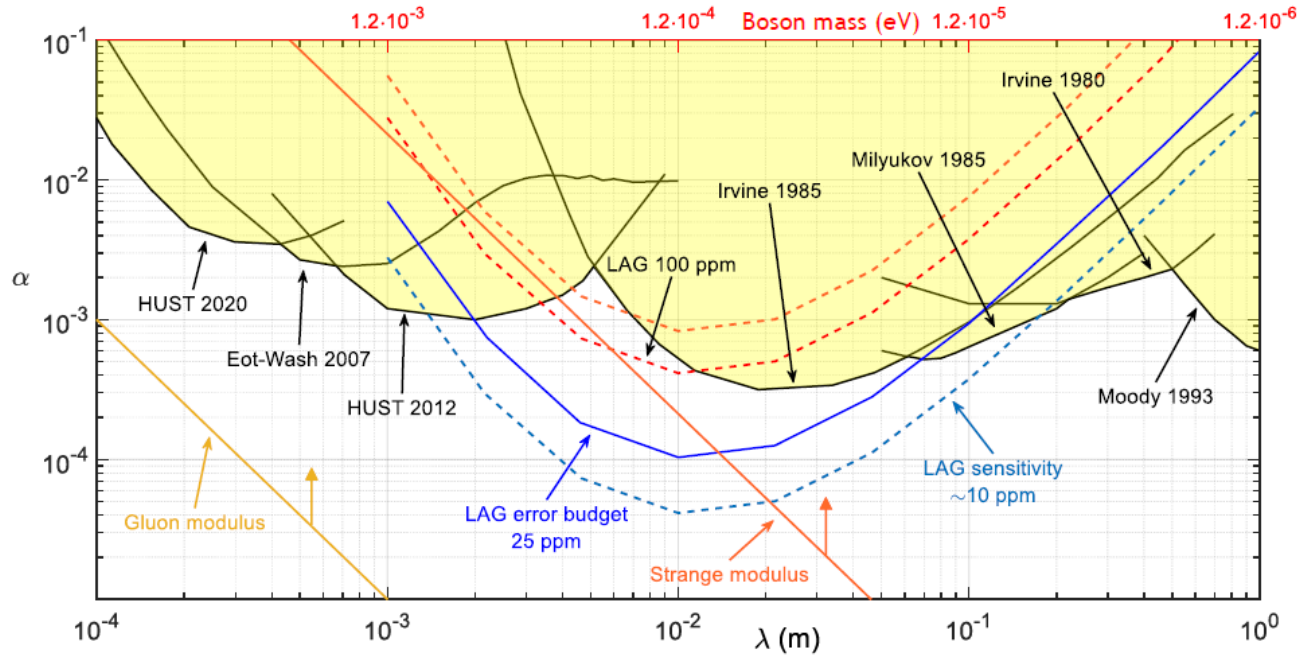
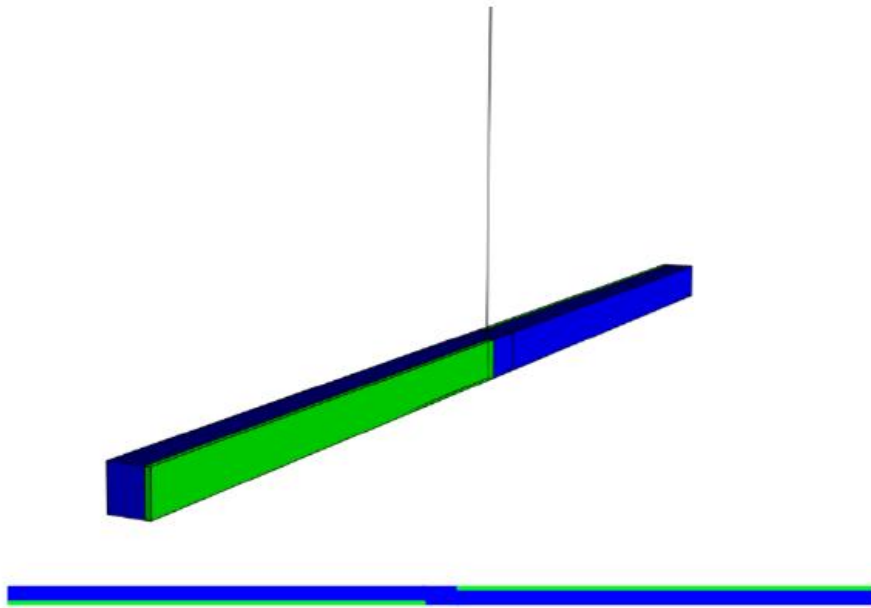


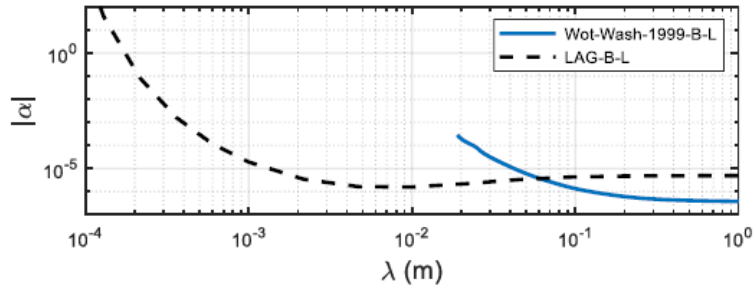
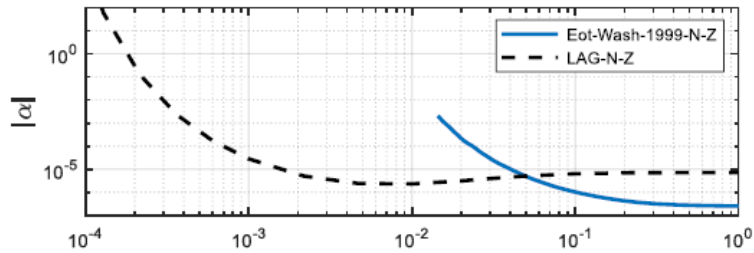
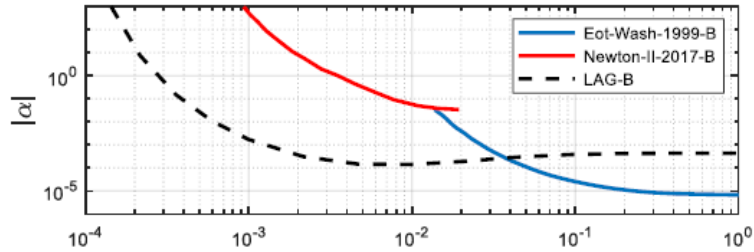
Figure 7 - α - λ exclusion plot in the .0001 to 1 m range. We also show the area potentially excluded by LAG (blue solid line) assuming 25 ppm accuracy and the limitation due to metrology accuracy at 200, 100 and 10 μ m (dashed lines form up to down)

Modello concettuale WEP



| Materiale | Z | N |
|-----------|----|-----|
| Tantalo | 73 | 107 |
| Alluminio | 13 | 14 |
| Mercurio | 80 | 116 |

Le dimensioni totali della massa test per la verifica del WEP sono identiche a quelle della massa da usare per le misure ISL in modo da passare da una misura all'altra con poche modifiche.



Violazioni di WEP in relazione ad accoppiamenti dipendenti da:

- Numero atomico \mathbf{Z}
- Numero dei neutroni \mathbf{N}
- Numero leptonico \mathbf{L}
- Numero barionico $\mathbf{B=Z+N}$

Richieste economiche

Le richieste di finanziamento previste per il 2025 della sezione di Tor Vergata sono:

- Missioni per le misure presso la sezione di Napoli **2k**
- Materiale e lavorazioni meccaniche **2k**

- Costo presunto totale dell'esperimento su 4 anni 225 k

Composizione del gruppo a Tor Vergata

- Massimo Visco 40%
- Massimo Bassan -
- Anna Sgarlata 30%
- Manuela Scarselli 30 %
- David Lucchesi 10%

1.1 FTE

- 3 FTE a Napoli

Compiti della sezione

- **Coordinamento dell'attività di modellazione**
- Definizione dell'apparato di misura
- Analisi di problemi relativi a materiali e superfici
- Partecipazione alle misure
- Analisi dati