

GGG e Galilei (GG)

2 Luglio 2012, INFN Sezione di Pisa

GGG e Galileo Galilei (GG): un accelerometro differenziale in rotazione veloce per la verifica del principio di equivalenza.

> Anna Nobili e Raffaello Pegna INFN Sezione di Pisa e Università di Pisa.







OUTLINE

- L'accelerometro differenziale GGG (e GG)
- Reiezione passiva del tilt del terreno alle basse frequenze
- Un nuovo metodo di reiezione del tilt
- Il sensore capacitivo e la sua elettronica di lettura
- Risultati sperimentali
- Attività per il 2013
- Anagrafica e richieste per il 2013







Galileo Galilei (GG) (I)

• Collaborazione con JPL-NASA e accordo col Presidente ASI nel 2010: candidare GG per una missone a leadership NASA e partnership ASI (PI Mike Shao, Co-PI A. Nobili) nel programma Explorer della NASA

Bando Explorer di fine 2010: GG ritirata ad una settimana dalla scadenza per la notizia ESA del non funzionamento della tecnologia dei thruster FEEP, richiesta per il darg free control, con conseguente ritiro di NASA da LISA (onde gravitazionali nello spazio) e ulteriore notevole ritardo della missione LISA pathfinder. GG ha una durata missione di soli 9 mesi GG, quindi richiede poco propellente e ha una alternativa valida con i Cold Gas Thrusters (teconologia provata). Riaffermato l'interesse di JPL a sottoporre GG al prossimo bando Explorer previsto per fine 2013 (anche con una lettera al Presidente di CSNII di INFN)

• Marzo 2012: Bando ESA per una piccola missione da lanciare nel 2017 con 50ME di contributo ESA, in collaborazione con paesi membri e possibile partecipazione esterna

GG sottoposta ad ESA (15 Giugno 2012): È previsto che JPL partecipi attraveso il bando NASA per Mission Of Opporrtunity (MOO) che uscirà in autunno 2012 (problema di sfasatura di qualche mese tra la procedura ESA e il bando MOO di NASA..); si cerca di concretizzare l'interesse di altri paesi membri. In questo caso, PI A. Nobili, Co-PI Mike Shao piu altri Co-PI di paesi membri che accetteranno di contribuire alla missione. Forte problema di competizione con la missione francese μ SCOPE (obiettivo 100 volte meno sensibile di GGG ma con contributo ESA deciso nel 2001)







Prospettive per la missione spaziale Galileo Galilei (GG) (II)

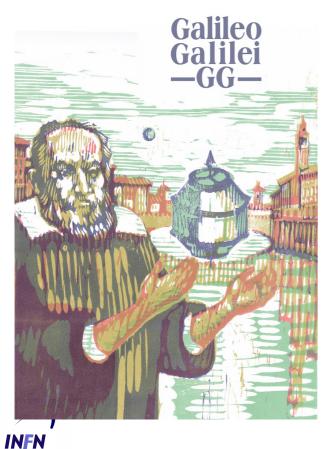
- ASI su GG: Interesse espresso dal Presidente ASI su GG nella competizione ESA. È fondamentale perchè il contributo ESA non è sufficiente e senza disponibilità del paese proponente la missione verrebbe scartata (costo GG 85ME a fronte dei 50ME massimo del contributo ESA).
- ASI su GGG: Per rafforzare la collaborazione con JPL ci sarà uno specifico contributo ASI ad INFN (sigla GGG) per una laser interferometry gauge tipo JPL da studiare e implementare sul prototipo GGG con la consulenza di Mike Shao (JPL) e la partecipazione di Guido Zavattini (Univ. Ferrara e INFN). Il contributo ASI coprirà in particolare un Art. 23 per Raffaello Pegna







GG al bando ESA per una piccola missione con lancio nel 2017



Galileo Galilei (GG): a small mission to test the weak equivalence principle of Galileo, Newton and Einstein to 10⁻¹⁷

Submitted 15 June 2012 in response to ESA "Call for a small mission opportunity for launch in 2017" Contact person: Anna M. Nobili, University of Pisa, Department of Physics "E. Fermi" Largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy; nobili@dm.unipi.it

```
Anna M. Nobili
                      University of Pisa and INFN, Italy
Michael Shao
                      Jet Propulsion Laboratory, USA
Raffaello Pegna
                      INFN. Italy
Slava Turvshev
                      Jet Propulsion Laboratory, USA
                      CERN, Switzerland
Georgi Dvali
Guido Zavattini
                      University of Ferrara and INFN, Italy
David M. Lucchesi
                      INAF- IAPS Roma and INFN, Italy
Andrea De Michele
                      University of Pisa, Italy
                      Jet Propulsion Laboratory, USA
Robert Spero
Paolo de Bernardis
                      University of Roma "La Sapienza," Italy
Valerio Iafolla
                      INAF- IAPS Roma, Italy
Federico Palmonari
                      University of Bologna and INFN, Italy
Joseph A. Burns
                      Cornell University, USA
Kim Aaron
                      Jet Propulsion Laboratory, USA
Rana Adhikari
                      Caltech, USA
Suresh Doravari
                      Caltech, USA
Michael Kramer
                      MPIfR Bonn, Germany
                      IfE-Leibniz University Hannover, Germany
Juergen Mueller
Norbert Wex
                      MPIfR Bonn, Germany
Reiner Rummel
                      TII Munchen Germany
Harald Schuh
                      TU Wien, Austria
Johannes Boehn
                      TU Wien, Austria
Rudolf Dvorak
                      University of Vienna, Austria
Reza Tavakol
                      Queen Mary, University of London, UK
Joao Magueijo
                      Imperial College London, UK
Federico Ferrini
                      EGO Pisa, Italy
Francesco Pegoraro
                      University of Pisa, Italy
                      INFN Pisa, Italy
Angela Di Virgilio
                      University of Pisa, Italy
Dino Leporini
Carlo Bradaschia
                      INFN Pisa, Italy
                      University of Sannio, Italy and University of Tokyo, Japan
Riccardo De Salvo
Massimo Inguscio
                      LENS and University of Firenze, Italy
Guglielmo Tino
                      University of Firenze and INFN, Italy
Maria Luisa Chiofalo
                      University of Pisa, Italy
Giovanni Mengali
                      University of Pisa, Italy
Valeria Ferrari
                      University of Roma "La Sapienza," Italy
Sabino Matarrese
                      University of Padova, Italy
                      INAF-OAT Trieste, Italy
Paolo Molaro
Fernando De Felice
                      University of Padova, Italy
Silvia Masi
                      University of Roma "La Sapienza," Italy
Paolo Tortora
                      University of Ferrara, Italy
Maria Teresa Crosta
                      INAF-OATO Torino, Italy
Roberto Peron
                      INAF-IAPS Roma, Italy
Giuseppe Bertin
                      University of Milano, Italy
Andrea Ferrara
                      SNS Pisa, Italy
                      INFN Firenze, Italy
Enrico Iacopini
                      INFN Pisa, Italy
Angelo Scribano
Angelo Tartaglia
                      Politecnico di Torino, Italy
C. S. Unnikrishnan
                      TATA Institute, Mumbai, India
G. Rajalakshmi
                      TATA Institute, Mumbai, India
Christian Trenkel
                      ASTRIUM, UK
Alberto Anselmi
                      TAS-I Torino, Italy
                      TAS-I Roma, Italy
Giuseppe Catastini
Gianfranco Sechi
                      TAS-I Torino, Italy
Stefano Cesare
                      TAS-I Torino, Italy
                                                            No matter how small an undertaking,
                                                             it cannot start or come to fruition
```

Niuna impresa, pur minima che sia pud avere Cominiciamento o fine Senza queste Tre Cose: Senza Sapere Senza Potere

senza con amore Volere (anonimo fiorentino, 1300)

Cover and logo: color and black and white xylographies by Alice Milani Comparetti



without knowledge, without means,

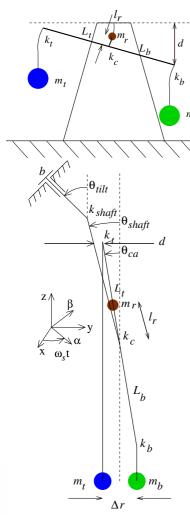
or without loving tenacity.

(anonymous from Florence, 1300)





L'accelerometro differenziale GGG: schema dinamico





Ha la stessa struttura di una bilancia analitica a doppio piatto in cui il braccio della bilancia è verticale e i centri di massa delle masse test m_t e m_b sono alla stessa altezza. La bilancia ruota a frequenza **supercritica** attorno ad un asse verticale (lo shaft) insieme al sistema di misura dello spostamento delle masse test: **modulazione del segnale**. È costruita per essere sensibile alle accelerazioni differenziali nel **piano orizzontale**. Il periodo differenziale T_d dipende dalle costanti elastiche k_t , k_c , k_b : in generale è non-isotropo nelle due direzioni α e β del rotante. Il terremoto dell'Emilia ha danneggiato uno dei giunti: stiamo disegnando un set di nuovi giunti (con migliore isotropia).

$$T_d^2 \simeq 4\pi^2 \frac{m_t L_t^2 + m_b L_b^2 + m_r l_r^2}{k_t + k_c + k_b + m_t q L_t - m_b q L_b - m_r q l_r}$$

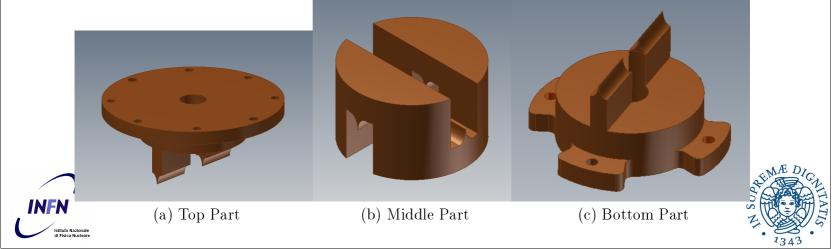






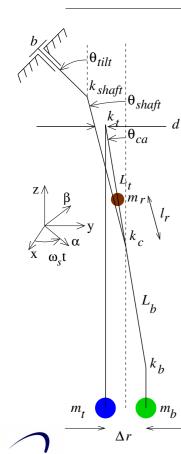
2–D Flexures Joints







Il moto relativo delle masse test



Soluzione semplificata delle equazioni del moto per GGG in rotazione supercritica che mostra gli aspetti fisici più importanti:

1 il self-centering supercritico 2 risposta alla forza differenziale esterna \vec{F} :

modulazione ad alta frequenza senza attenuazione!!!

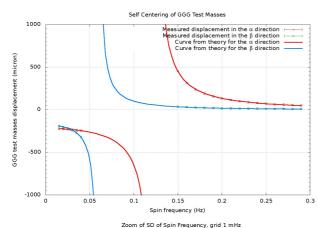
3 il ruolo delle perdite $\phi(\omega_{spin})$ 4 il fenomeno del whirl forward e backward

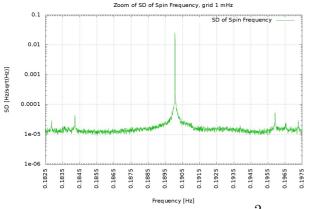
$$\vec{\Delta r}(t) \simeq -\vec{\epsilon} \left(\frac{\omega_d}{\omega_{spin}}\right)^2 \left(\frac{\cos(\omega_{spin}t + \varphi)}{\sin(\omega_{spin}t + \varphi)}\right) + \frac{\vec{F}}{k} - \phi(\omega_{spin})\frac{\vec{\omega}_{spin}}{\omega_{spin}} \times \frac{\vec{F}}{k} + A_0 e^{\phi(\omega_{spin})\omega_d t/2} \left(\frac{\cos(\omega_d t + \varphi_A)}{\sin(\omega_d t + \varphi_A)}\right) + B_0 e^{-\phi(\omega_{spin})\omega_d t/2} \left(\frac{\cos(-\omega_d t + \varphi_B)}{\sin(-\omega_d t + \varphi_B)}\right)$$





Self-centering delle masse test





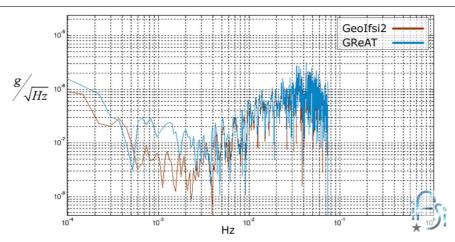
 $\Delta r_{lpha,eta}(
u_{spin}) = arepsilon_{lpha,eta} \cdot rac{
u_{lpha,eta}^2}{
u_{lpha,eta}^2 -
u_{spin}^2}$

Self-centering in rotazione supercritica. Inizialmente $\varepsilon_{\alpha} \simeq -220 \ \mu \text{m} \ \text{e} \ \varepsilon_{\beta} \simeq -180 \ \mu \text{m}$. Le forze centrifughe nel regime sub-critico ($\nu_{spin} \le \nu_{\alpha} = 0.123 \text{ Hz}$ e $\nu_{\beta} = 0.06$ Hz) tendono ad aumentare Δr . Nel regime supercritico Δr cambia verso e si riduce come $\frac{\nu_{\alpha,\beta}^2}{\nu_{spin}^2 - \nu_{\alpha,\beta}^2}$ Rumore: meccanismo di accoppiamento tra il rumore nella frequenza di spin ν_{spin} e lo spostamento Δr . Poichè la rotazione modula il segnale alla frequenza ν_{spin} la componente spettrale rilevante di questo rumore è quella attorno alla frequenza di spin. Esigenza di una velocità di spin molto costante oppure controllata: è difficile avere motori con $\frac{\Delta \nu_{spin}}{\nu_{snin}} \leq 10^{-3}$. Stiamo costruendo un sistema elettronico di controllo della velocità di spin. Diverse semplici soluzioni possibili ma bisogna trasferire uno o due segnali dal rotante.

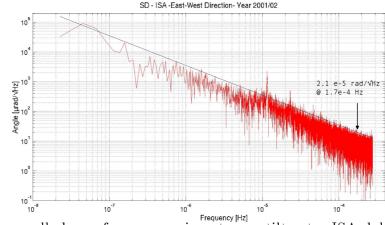


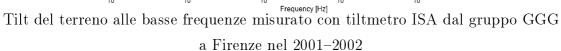


Il tilt del terreno



Tilt del terreno alle basse frequenze misurato con tiltmetro ISA da Valerio Iafolla (IAPS Roma)

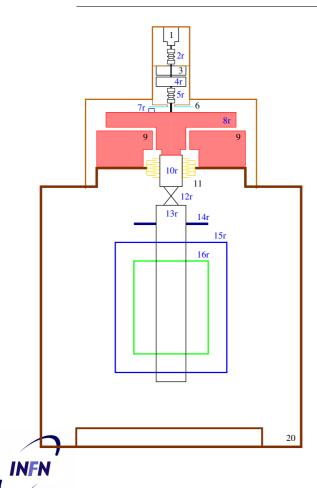








I cuscinetti a sfera e l'air bearing

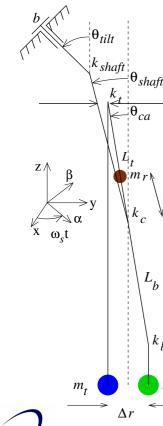


Precision grade ball bearings are manufactured with typical ~ 100 nm geometric tolerances: balls are manufactured with ~ 100 nm sphericity and ~ 500 nm diameter tolerance. Very roughly, a 5 cm diameter ball bearing can then cause a shaft fitted to the inner race to tilt by some μ rad. The complexity of the ball bearing result in $\simeq \mu rad$ shaft tilt noise in the low frequency region of interest for GGonGround. On the other side, air bearings require very tight bearing gaps for proper operation (10 μ m) which translates into extremely high accuracy motion with best noise performance. Typical rotary runout can be as low as 1 nm and tilt characteristics as low as $0.02 \,\mu\text{rad}$.





Reiezione passiva dei tilt



 θ_{tilt} : richiede un giunto flessibile rotante k_{shaft} . Questo presenta numerosi vantaggi (si elimina il frame sospeso e le sue dilatazioni termiche e deformazioni). Alle basse frequenze si ha: $\chi_{tilt} \simeq \frac{k_{shaft}}{M_{tot}ql_{cm}}$

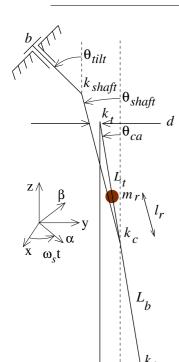
Attenuazione passiva del tilt del terreno e dei cuscinetti



Attualmente $\chi_{tilt} \simeq 10^{-3}$ e non si può ridurre significativamente senza aumentare l_{cm} .



Effetti di tilt del terreno e dei bearings



Il tilt del terreno si accoppia al braccio della bilancia tramite la costante elastica del giunto centrale. In termini degli angoli:

$$\chi_{\theta} \equiv \frac{\theta_{ca}}{\theta_{shaft}} = \frac{k_c}{k_t + k_c + k_b + m_t g L_t - m_b g L_b - m_r g l_r}$$

In termini di sensibilità alle accelerazioni di modo comune $g\theta_{shaft}$, misurando le accelerazioni differenziali da $\Delta r = 2L\theta_{ca}$:

$$\chi_{cma} \equiv \frac{a_d}{g\theta_{shaft}} = \frac{4\pi^2}{T_d^2} \frac{2L\theta_{ca}}{g\theta_{shaft}} = \frac{k_c}{mgL}$$

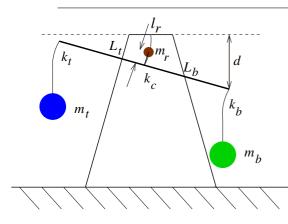
Attualmente in GGG si ha $\chi_{cma} \simeq 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ms}^{-2}/\text{ms}^{-2}$ e si può ridurre di un fattore piccolo (≤ 4).







Un nuovo metodo di reiezione dei tilt (I)



$$\chi_{\theta} = \frac{k_c}{k_t + k_c + k_b + m_t g L_t - m_b g L_b - m_r g l_r}$$

È possibile regolare la posizione della massa m_r

in modo da annullare con la molla gravitazionale negativa $-m_rgl_r$ la somma delle costanti elastiche $k_t + k_b$; è cioè possibile ottenere $\chi_\theta \simeq 1$. Il braccio della bilancia **segue quindi il tilt** del terreno (alle

L'idea è di misurare non più (non solo) la distanza Δr tra i CM delle masse test ma (anche) la distanza d tra un estremo del braccio di accoppiamento e un punto sullo shaft. In questo modo i tilt dello shaft sono rigettati dalla misura mentre lo strumento è sensibile come prima all'accelerazione differenziale delle masse test. Imporre la condizione $\chi_{\theta} \simeq 1$ significa **vincolare** il periodo differenziale T_d :

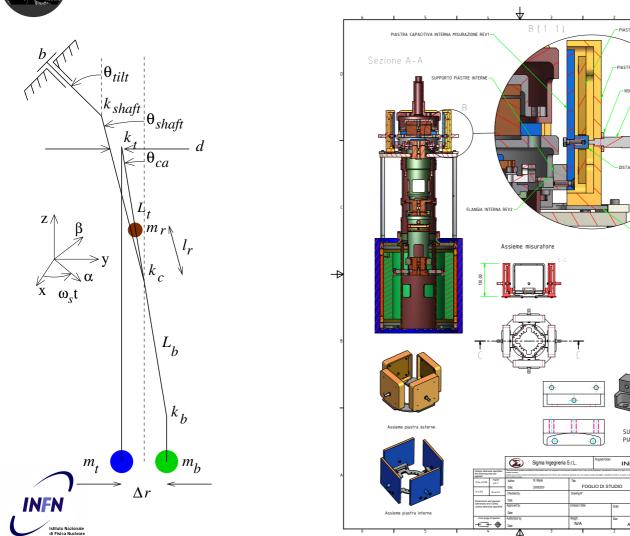
$$T_{d(\chi_{\theta} \simeq 1)} \simeq 2\pi \sqrt{\frac{m_t L_t^2 + m_b L_b^2 + m_r l^2}{k_c}}$$

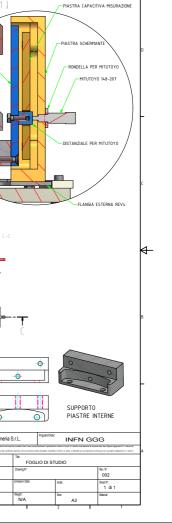
Con $m_t = m_b \simeq 10$ Kg $L_t = L_b = 0.183$ m e $k_c \simeq 0.11 \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{rad}}$ si ottiene $T_{d(\chi_{\theta} \simeq 1)} \simeq 15$ s. Le **simulazioni numeriche** SimMechanics hanno confermato la validità di questo metodo nel caso di rotazione supercritica: ulteriore reiezione di un fattore **1000** ottenibile





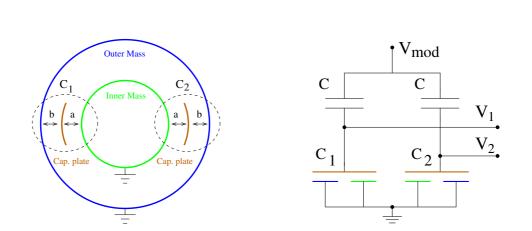
Un nuovo metodo di reiezione del tilt (II)







Il sensore capacitivo e il readout (I).



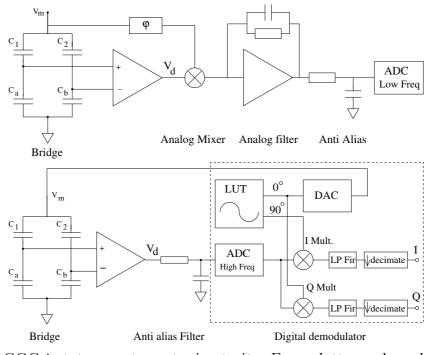
Le componenti meccaniche del ponte capacitivo di GGG (a sinistra) e lo schema (a destra) del ponte di Wheatstone. Ogni capacità è formata da due superfici, una per ogni massa test (a massa elettrica) e una piastra capacitiva a cui è applicato il segnale sinusoidale V_{mod} . Le altre due capacità C del ponte sono fisse. Ogni spostamento differenziale delle masse causa uno sbilanciamento del ponte e quindi una tensione $V_{diff} = V_2 - V_1 \simeq \frac{V_{\text{mod}} C_1 - C_2}{4}$. In GGG si ha $\frac{V_{diff}}{\Delta r_{dm}} \simeq 1 \frac{\mu V}{nm}$





INFN

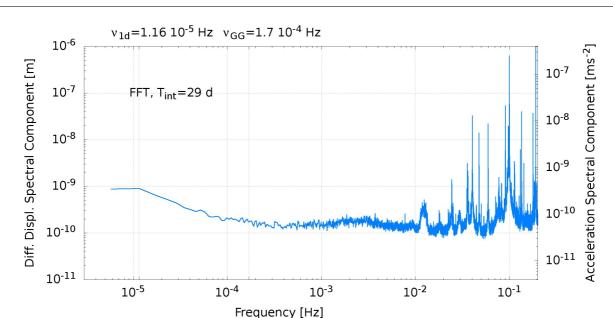
Il sensore capacitivo e il readout (II)



L'elettronica di readout di GGG è stata recentemente ricostruita. Essa adotta un demodulatore analogico (in alto) e ottiene delle prestazioni sufficienti (noise $\simeq 10^{-8} \frac{\text{m}}{\sqrt{\text{Hz}}}$, migliorabile, limitato dal mixer e dall'ADC). Il range dinamico è limitato a circa 19 bits dall'ADC. L'evoluzione naturale è lo schema a demodulazione digitale (in basso), che adotta un campionamento diretto del segnale modulato (ad alta frequenza) e mixer e filtri digitali. Può ottenere un rumore inferiore e un range dinamico maggiore.



Risultati sperimentali



Recente run di 29 giorni: attenuazione passiva del tilt con giunto rotante sullo shaft, misura della distanza tra le masse. L'accelerazione differenziale misurata alla frequenza di un giorno è compatibile con un tilt di $\simeq 1 \ \mu \text{rad}$.

Gradienti termici nel laboratorio di $\simeq 0.1$ °C/m e periodo 1 d possono avere lo stesso effetto di tilt di $\simeq 1~\mu$ rad sulla struttura di sostegno di acciaio ($\alpha \simeq 10^{-5}$) della camera a vuoto.





Difficoltà delle condizioni di lavoro

Il sistema di riscaldamento-condizionamento è guasto dall'inizio dell'inverno: temperatura del capannone molto bassa in inverno e ora in estate molto alta.







Lavori recenti

- R. Pegna, A. M. Nobili M. Shao, S. G. Turyshev, G. Catastini, A. Anselmi, R. Spero, S. Doravari, G. L. Comandi, A. De Michele,
 - Abatement of thermal noise in 2-D oscillators with rapidly rotating test masses, Phys. Rev. Lett. 107, 200801 (2011)
- R. Pegna et al., Integration time of high sensitive equivalence principle experiments in space, to be submitted
- R. Pegna et al., *Upconverting low frequency signals above resonance*, to be submitted
- A. M. Nobili, M. Shao, R. Pegna, G. Zavattini, S. G. Turyshev, D. M. Lucchesi, A. De Michele, S. Doravari, G. L. Comandi, T. R. Saravanan, F. Palmonari, G. Catastini, A. Anselmi "Galileo Galilei" (GG): space test of the weak Equivalence Principle to 10⁻¹⁷ and laboratory demonstrations

 Class. Quantum Grav. focus issue on the WEP, in press (2012)
- Nobili et al.,

 Null checks in space experiments to test the Equivalence Principle,
 to be submitted
- Nobili et al., On the universality of free fall, the equivalence principle and gravitational redshift, to be submitted
- R. Pegna et al.,
 Making a ground based differential accelerometer insensitive to low frequency tilts, in preparation.



Attività previste per il 2013 per l'esperimento GGG

- Miglioramento e verifica rumore nuova elettronica
- Sostituzione di tutti i giunti in CuBe e verifica della sensibilità dello strumento
- Realizzazione del controllo della velocità di rotazione
- Realizzazione del nuovo sistema di reiezione del tilt
- Studio e inizio realizzazione del sistema con Air Bearing
- Studio di una Laser Interferometry gauge per GGG







Anagrafica per l'esperimento GGG (Anno 2013)

A. M. Nobili	PA	100 %

100 % R. Pegna Art. 23

G. Mengali PA 70 %

40 % F. Pegoraro PO

P. Paolicchi 40 % PA 40 % M. L. Chiofalo PA

Totale Ricercatori Equivalenti (FTE) 4.2

Ricercatore INAF

Numero Totale Ricercatori Richieste alla Sezione: normale supporto per acquisti e ordinaria amministrazione; 2 settimane di Andrea Basti per





30 %

D. M. Lucchesi



Richieste finanziarie per il 2013 (in KE)

Missioni Italia	2.5
Missioni estero	7
Consumo lab	10
Costr. apparato	30 (air bearing, ferrofluid feedthrough, motorizz., meccanica, disegni)
Inventario	5

Nota: si tratta di richieste ben ponderate, suffragate da offerte e limitate al minimo (non si è chiesto di più per ottenere quel che serve una volta applicati tagli lineari...)

54.5

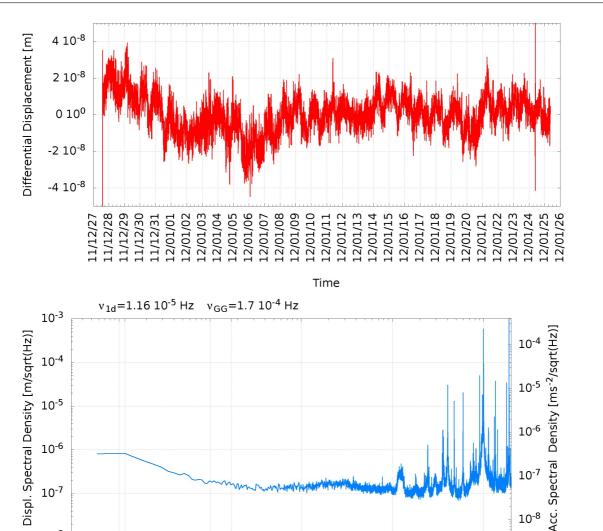


Totale





Risultati sperimentali (II)



10⁻³

10⁻²

10⁻¹



10⁻⁸

10⁻⁵

10-4

