

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Fisica

**Studio della stabilità spazio-temporale di G:  
modello di laboratorio di un apparato per  
sonde interplanetarie**

**Relatore:**  
Prof. Marco Prevedelli

**Presentata da:**  
Ivan Cagnani

**Correlatore:**  
Prof. Federico Palmonari

**Sessione II**  
**Anno Accademico 2015/2016**



## Abstract

L'isolamento gravitazionale delle sonde dello spazio profondo durante le loro fasi di crociera ed i loro esigui livelli di vibrazioni, le rendono la migliore collocazione possibile per mini-laboratori automatici di fisica fondamentale da installare su di esse come strumenti scientifici. Date le note difficoltà di misurazione della costante di gravitazione universale, probabilmente dovute alla collocazione terrestre dei laboratori, si propone di dedicare un mini-laboratorio alla misurazione del valore locale ed istantaneo della costante  $G$  ed alla sua stabilità spazio-temporale durante il moto della sonda. La misurazione di  $G$  nel mini-laboratorio può essere effettuata rilasciando con attuatori elettrostatici, senza velocità relativa, due masse campione, preferibilmente due sfere d'oro da 1Kg, a distanza di 1 mm, e monitorando il loro libero moto, dominato dall'attrazione gravitazionale reciproca, con un sensore di spostamento laser interferometrico multicanale. Dopo il congiungimento le masse dovrebbero essere riposizionate e rilasciate nuovamente per una misurazione quasi continua della costante. Un meccanismo dovrebbe invece bloccare le masse durante le fasi dinamiche della sonda. Un sensore di spostamento interferometrico a fibre ottiche, FPS3010 della Attocube, appariva adatto ed un esperimento è stato realizzato per provarlo in un apparato simulante il mini-laboratorio. In una campana del vuoto isolata dalle vibrazioni, due cilindri in tungsteno da 1Kg sono stati sospesi orizzontalmente tramite micro-Dyneema a piastre in alluminio movimentate da nanoposizionatori piezoelettrici dotati di encoder ottico nanometrico. Il sensore ha monitorato il moto radiale dei cilindri, le cui basi combacianti sono state posizionate a distanze di separazione variabili da 10 micron a 5000 micron. Malgrado il rumore meccanico ed una sorgente ignota di errore sistematico, un moto attrattivo è stato riscontrato differenzialmente o direttamente in molte misurazioni e nessuna ha mostrato un moto repulsivo. In alcune misurazioni è direttamente visibile la rotazione dell'asse di oscillazione dei cilindri sospesi. Il sensore si è comportato egregiamente.



Dedico questa tesi a mio padre, Giancarlo Cagnani, deceduto il 23/12/2013 a Faenza. Questo lavoro sperimentale è stato possibile anche grazie a lui.

Ivan Cagnani

# Indice

## Sommario

### Capitolo 1 Introduzione

1.1	$G$ è una costante o una variabile? .....	10
1.2	Insufficienza della microgravità artificiale e orbitale .....	13
1.3	Possibile missione spaziale indipendente.....	16
1.4	Strumento di una sonda planetaria.....	20
1.5	Modelli preliminari terrestri.....	21

### Capitolo 2 Apparato sperimentale

2.1	Introduzione.....	22
2.2	Fasi preliminari.....	22
2.3	Modello matematico .....	24
2.4	Descrizione del telaio .....	29
2.5	Progettazione e realizzazione del telaio .....	30
2.6	Descrizione delle piastre di sospensione .....	31
2.7	Progettazione e realizzazione delle piastre di sospensione	34
2.8	I nanoposizionatori piezoelettrici.....	34
2.9	Il sistema del vuoto.....	36
2.10	Isolamento acustico e delle vibrazioni .....	40
2.11	Il sensore interferometrico di spostamento .....	46
2.12	I cilindri in tungsteno .....	50

### Capitolo 3 Prima prova di laboratorio

3.1	Introduzione.....	53
3.2	Obiettivi e procedura sperimentale seguita.....	54
3.3	Risultati ottenuti.....	56
3.4	Problemi riscontrati ed errori compiuti.....	64

### Capitolo 4 Seconda prova di laboratorio

4.1	Introduzione.....	74
4.2	Obiettivi e procedura sperimentale seguita.....	75
4.3	Risultati ottenuti.....	79
4.4	Problemi riscontrati ed errori compiuti.....	87

<b>Conclusioni</b> .....	92
--------------------------	----

<b>Bibliografia</b> .....	93
---------------------------	----

<b>Appendici</b> .....	94
------------------------	----



## Sommario

L'isolamento gravitazionale di una sonda interplanetaria lontana dai corpi celesti è una condizione epistemologicamente invidiabile che non può essere riprodotta in un laboratorio terrestre, od in un laboratorio spaziale in un'orbita planetaria. Le sonde dello spazio profondo possono quindi diventare sedi privilegiate di esperimenti di fisica fondamentale, come ad esempio la ripetuta misurazione locale di alcune costanti fisiche allo scopo di studiarne la stabilità spazio-temporale.

In particolare, la misurazione che più trarrebbe beneficio dalla peculiare condizione di isolamento delle sonde è senz'altro quella della costante di gravitazione universale,  $G$ . Nonostante i progressi tecnologici e tecnici, i risultati delle migliori misurazioni terrestri di  $G$  continuano ad essere eccessivamente disomogenei tra loro, mostrando anche un possibile andamento periodico, quest'ultimo probabilmente dipendente dai moti terrestri. In ogni caso la collocazione terrestre dei laboratori contribuisce significativamente alla variabilità delle misurazioni, essendo una sorgente primaria di errori sistematici.

Il metodo migliore per eliminare gli errori sistematici indotti dalla Terra è semplicemente allontanare il laboratorio da essa, portandolo nello spazio. I satelliti in orbita terrestre sono ambienti sufficientemente isolati per molti esperimenti impossibili sulla Terra, tuttavia per alcuni esperimenti fisici a bassa energia l'azione residua del campo gravitazionale terrestre è ancora troppo rilevante.

Una sonda in orbita ellittica solare può essere un laboratorio più isolato, specialmente negli intervalli di maggiore lontananza dai corpi celesti, tuttavia anch'essa non è la migliore collocazione possibile, a causa dell'attrazione gravitazionale residua del Sole.

Una sonda che si muove lungo un'orbita solare iperbolica, ovvero con velocità sempre superiore alla velocità di fuga dal sistema solare, come le sonde Voyager I e II e la New Horizons, può raggiungere il massimo isolamento gravitazionale possibile per un oggetto di costruzione umana. Non esiste quindi una migliore collocazione di quest'ultima per un laboratorio dedito a misurazioni delle debolissime forze gravitazionali tra corpi artificiali.

Se la sonda ha anche lo scopo dell'esplorazione planetaria, la misurazione di  $G$  può essere eseguita durante tutte le fasi della traiettoria lontane dai pianeti e dal Sole, con esclusione delle rare fasi di propulsione correttiva.

Se invece il laboratorio viene installato su di una piccola sonda specializzata, essa può essere sprovvista di propulsione purché venga lanciata direttamente dalla Terra con velocità superiore a quella di fuga solare. La sua traiettoria iperbolica può essere complanare all'eclittica ma dovrebbe massimizzare la distanza dai pianeti ed altri corpi celesti. Con tale sonda la misurazione di  $G$  potrebbe essere ripetuta per molti anni in modo continuativo.

La struttura della sonda planetaria o della sonda specializzata dovrebbero essere il più possibile simmetriche per minimizzare i gradienti gravitazionali locali, tuttavia, ad esclusione dell'eventuale propellente, i campi gravitazionali endogeni sarebbero immutabili nel tempo quindi non avrebbero alcun impatto su una misurazione della variabilità temporale di  $G$ .

L'apparato sperimentale del piccolo laboratorio installato sulla sonda dovrebbe necessariamente essere molto leggero e compatto, e permettere la ripetizione illimitata della misurazione del valore locale di  $G$  in modo completamente automatico.

In microgravità l'uso delle tradizionali bilance a torsione, di Cavendish o di altro tipo, non sarebbe affatto necessario. L'esperimento potrebbe essere molto semplificato rispetto ad i corrispettivi terrestri e ricondotto alla semplice misurazione del libero moto di due corpi rilasciati a distanza molto ravvicinata tra loro e riposizionati roboticamente al termine di ogni misurazione. I corpi dovrebbero essere caratterizzati da una forma geometrica elementare, preferibilmente sferica, una densità molto elevata ed omogenea, ed una carica elettrica neutra ed uniforme.

Il moto dei due corpi dovrebbe essere monitorato con sensori ad alta precisione e senza contatto. In particolare, per descrivere il moto lineare dei corpi nelle tre dimensioni, e calcolare la distanza reciproca dei loro centri di massa nel tempo, un sensore di spostamento laser di tipo interferometrico e a più canali potrebbe adempiere allo scopo.

Un sensore di spostamento senza contatto e multicanale può essere usato per la misura dello spostamento delle masse nelle tre dimensioni, mentre un sistema di aggrappo, posizionamento e rilascio nonché un sistema di

posizionamento fine, senza contatto, potrebbero essere utilizzati per ristabilire la separazione iniziale tra le masse dopo ogni misurazione. Il sistema di aggrappo potrebbe anche proteggere i due corpi durante il lancio, nonché nelle eventuali fasi di esplorazione planetaria e propulsive.

Tecnologie di tracciamento e manipolazione senza contatto di masse campione, con prestazioni anche migliori di quelle richieste per la misurazione proposta sono state già sviluppate per la sonda LISA Pathfinder, prototipo tecnico dell'interferometro spaziale per onde gravitazionali eLISA, tuttavia si tratta di soluzioni completamente ad hoc per la missione eLISA, molto costose e non facilmente riadattabili ad un altro esperimento.

L'utilizzo di strumentazione industriale e già commercializzata potrebbe notevolmente ridurre i costi ed i tempi di realizzazione dell'apparato proposto. Dopo una ricerca sullo stato dell'arte delle proposte del mercato è stato deciso di effettuare una prova tecnica con lo strumento che per caratteristiche sembrava più adatto alla missione. Tale strumento, modello FPS3010 della Attocube, è un sensore di spostamento laser multicanale a fibre ottiche, molto compatto e leggero, basato sul principio dell'interferometro di Fabry-Pérot.

Nella prova tecnica lo strumento è stato utilizzato per misurare il moto radiale, condizionato dalla reciproca attrazione gravitazionale, di due cilindri in tungsteno da 1 Kg sospesi come pendoli e con le basi poste a distanza ravvicinata. La distanza iniziale tra le basi viene regolata con precisione movimentando i fili di sospensione dei cilindri tramite due nanoposizionatori piezoelettrici, modello ECS3030 della Attocube, dotati di encoder ottico.

Molte delle misurazioni sono state effettuate in medio vuoto all'interno di una campana di vetro evacuata prima delle misurazioni mediante una pompa a bagno d'olio a due stadi. La base della campana è stata isolata dalle vibrazioni esterne, incluse quelle a bassa frequenza, tramite l'utilizzo di un isolatore meccanico da tavolo a rigidità negativa, prodotto dalla Minus-K, con frequenza di risonanza orizzontale modificata a 0,4 Hz e frequenza verticale standard di 0,5 Hz.

La prima prova di laboratorio è stata piagata da una serie di inconvenienti ed errori che hanno reso necessaria una seconda prova, con obiettivi molto più limitati. La prima prova ha comunque consentito di caratterizzare i cilindri sospesi come pendoli e ha dimostrato l'impossibilità di

accompagnare con i nanoposizionatori il loro moto naturale per simularne il comportamento in microgravità.

Dopo una modifica superficiale delle masse attrattive è stata eseguita la seconda prova, avente il semplice obiettivo di monitorare lo spostamento nel tempo della posizione media dei cilindri, corrispondente alla deflessione dell'asse di oscillazione dei pendoli. La seconda prova ha fornito una notevole quantità di dati, ma è stata afflitta da un alto livello di rumore e da un errore sistematico. I dati ripuliti illustrano però chiaramente l'effetto dell'attrazione gravitazionale tra i pendoli.

Le misurazioni della seconda prova sono state effettuate a distanze tra i cilindri comprese tra 10 e 5000 micron, concentrandosi nell'intervallo tra 200 micron e 1000 micron. La frequenza di campionamento maggiormente utilizzata è stata 1,5 kHz ma frequenze fino a 97,7 kHz sono state utilizzate.

Il sensore interferometrico a fibre ottiche si è dimostrato ampiamente soddisfacente nel tracciamento del moto delle masse, consigliandone quindi il suo utilizzo in una futura prova con un apparato più simile a quello spaziale, portato in microgravità da voli parabolici o razzi suborbitali.

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 $G$ è una costante o una variabile?

Il principio cosmologico, alla base della cosmologia fisica, assume una fondamentale omogeneità e isotropia su larghissima scala dell'universo. Tali proprietà, confermate dalle recenti missioni di mappatura della radiazione cosmica di fondo, sono possibili solo in universo in cui anche le leggi fisiche sono omogenee.

E' quindi ragionevole pensare che un osservatore a distanza di milioni di anni luce dalla Terra, misurando l'attrazione reciproca di due masse neutre, debba convenire con un osservatore terrestre che la forza tra le due è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza e direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse.

In entrambi i casi tuttavia, il valore esatto misurato dipenderà da un ulteriore fattore di proporzionalità,  $G$ . In base al principio cosmologico, il valore di questo parametro non può essere significativamente diverso in regioni anche remote dell'universo, e se così non fosse ne avremmo delle chiare indicazioni dalle osservazioni astrofisiche e cosmologiche.

Il principio cosmologico non impone però un'assoluta immutabilità del valore localmente misurabile di  $G$  in tutto l'universo ed in tutto il tempo in quanto piccole fluttuazioni di breve periodo oppure modestissime variazioni secolari, connesse quest'ultime all'età o alle dimensioni dell'universo, possono coesistere con il principio cosmologico. Tuttavia esse non sono compatibili con il Principio di Equivalenza Forte della Relatività Generale, che implica uguali risultati in uguali esperimenti gravitazionali eseguiti in ogni parte dell'universo.

Nel corso del XX secolo (1) (2) sono state sviluppate teorie gravitazionali alternative alla Relatività Generale, e alcune di esse, come le teorie scalare-tensore, pur rispettando il Principio di Equivalenza Debole, ovvero l'equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale, non possono rispettare il principio di Equivalenza Forte in quanto in tali teorie la costante di gravitazione universale è in realtà un parametro dipendente da

altri parametri cosmici, come l'età o le dimensioni dell'universo, dipendenti a loro volta dalla costante di Hubble, che in tali teorie può essere una costante più fondamentale di  $G$ .

Alcune di queste teorie alternative sono già state falsificate da risultati sperimentali di tipo astrofisico, altre invece sono ancora in fase di verifica, altre infine non possono ancora essere falsificate allo stato attuale della tecnologia sperimentale.

In molti casi è soltanto possibile circoscrivere sempre più strettamente l'ambito dell'eventuale validità di tali teorie, verificandone con osservazioni dirette o indirette gli effetti predetti. Ad esempio, la variabilità temporale della costante di gravitazione universale è stata fortemente circoscritta nel sistema Terra-Luna, ed in modo meno rigido anche nel sistema Sole-Saturno ed in quello Sole-Mercurio. In tutti e tre i casi sono state effettuate misurazioni dirette delle distanze tra strumenti osservativi sulla Terra e missioni spaziali dirette a tali corpi celesti.

In particolare, utilizzando appositi retroriflettori lasciati sul suolo lunare da tre delle spedizioni umane del programma Apollo e due robot russo-francesi, è stato possibile monitorare dal 1969 ad oggi la distanza Terra-Luna con una risoluzione eccellente ed in continuo miglioramento.

Il limite più stringente riguardo alla possibile variabilità temporale di  $G$  è stato ottenuto nel 2014 dal suddetto tipo di misurazione (12) (13) (14):

$$\frac{\dot{G}}{G} = 1,2 \pm 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ yr}^{-1}$$

Tuttavia per quest'ultimo studio sono stati utilizzati soltanto i dati ottenuti dopo l'anno 2000 in quanto in quell'anno un rinnovamento tecnologico ha ulteriormente aumentato la precisione della misurazione del tempo di ritorno del laser ed il numero di fotoni riflessi rilevati.

Sulle altre scale spaziali e temporali ci sono state negli ultimi anni notevoli miglioramenti soprattutto da parte degli astrofisici sperimentali, ma si tratta di misurazioni meno dirette e dipendenti dai modelli astrofisici utilizzati. Ad esempio, con metodi di cosmologia osservativa sono stati effettuati studi della variabilità a lunghissimo periodo di  $G$ , utilizzando molteplici soggetti stellari come pulsar, nane bianche (3) e supernovae Ia (4). Nessuno di questi studi ha validato le teorie scalare-tensore o rilevato violazioni del principio di equivalenza forte (5).

In tutt'altra scala temporale e spaziale, un altro mistero coinvolge la costante G: la sua misurazione diretta nei laboratori terrestri tende a fornire risultati definitivi eccessivamente discordanti tra loro. Tale problema non è nemmeno migliorato nel tempo, come ci si potrebbe aspettare considerando il progresso tecnologico e l'accumulazione collettiva di conoscenza ed esperienza sperimentale.

La spiegazione prevalente della dispersione dei valori di G è ritenuta essere un'oggettiva difficoltà da parte dei ricercatori ad identificare e valutare adeguatamente tutte le sorgenti di errore sistematico che agiscono sugli esperimenti (6).

Molto recentemente è stato pubblicato uno studio in cui viene rilevata una variazione periodica del valore di G misurato negli esperimenti più avanzati degli ultimi decenni (7). Tale variazione, ad andamento sinusoidale, viene confrontata con l'andamento ciclico della durata del giorno, inteso come rotazione completa della Terra rispetto al suo asse. Le due sinusoidi, di periodo 5,9 anni, mostrano una significativa correlazione. Gli autori dello studio hanno anche considerato la posizione sul geoide terrestre dei differenti laboratori in cui sono state eseguite le misurazioni oltre ad altri parametri geofisici per escludere eventuali correlazioni spaziali locali invece che temporali.

Nel grafico riportato dagli autori l'unico risultato che sembra avere un andamento anti-ciclico, e quindi sembra non essere correlato al moto di rotazione terrestre o subirne addirittura un'influenza opposta, è la misurazione eseguita nel 2013 a Firenze (8) (9) con un interferometro atomico, una tecnologia radicalmente diversa dalle altre utilizzate fino ad ora, e per questo, anche secondo gli autori dello studio (7), non soggetta agli stessi errori sistematici che affliggono le bilance a torsione, lo strumento storicamente ed attualmente più utilizzato per la misurazione di G (15).

Lo studio citato ha suscitato immediatamente nuove pubblicazioni, una delle quali considera un numero lievemente maggiore di misurazioni di G, cercando anche di stimare più accuratamente le date di esecuzione degli esperimenti (10). Il risultato è una correlazione meno marcata tra i valori di G misurati e la sinusoidi di 5,9 anni considerati nello studio precedente.

Un altro degli articoli pubblicati in risposta allo studio citato prende in considerazione l'ipotesi che invece di essere correlato alla durata del giorno, l'andamento sinusoidale dei risultati delle misurazioni derivi da una reale variazione del valore della costante, almeno nella regione di

universo attraversata dal sistema solare negli ultimi 10 anni. Utilizzando le precisissime misurazioni delle posizioni orbitali di Saturno effettuate negli ultimi 10 anni tramite la presenza della sonda Cassini in orbita intorno ad esso, l'articolo descrive la ricerca, con esito negativo, degli effetti evidenti che tale variazione ciclica di  $G$  avrebbe avuto sull'orbita di Saturno (11).

## **1.2 Insufficienza della microgravità per la misurazione di $G$**

Alcune missioni spaziali hanno cercato di ricreare all'interno della sonda il sistema fisico più isolato possibile. In particolare, la missione Gravity Probe B ha cercato di fare interagire i perfetti giroscopi sferici al suo interno esclusivamente con la metrica locale condizionata dalla presenza e dalla rotazione della Terra, isolando il più possibile le sfere da ogni altra interazione, sia di origine interna che esterna. Nonostante gli immensi sforzi di progettazione e realizzazione della sonda, i dati ottenuti hanno richiesto anni di ripulitura da tutte le sorgenti di errori sistematici prima che i ricercatori potessero estrarre le informazioni fisiche necessarie e confermare entro i limiti di errore le previsioni della Relatività Generale.

La missione LISA-Pathfinder invece, la più tecnologicamente simile a quella proposta in questa tesi, conterrà due masse di prova all'interno di un satellite predisposto anche in questo caso non solo per isolarle dalle forze esterne, ma anche da se stesso, in quanto tramite uno speciale sistema di rilevazione interferometrico dello spostamento delle masse campione supportato da sensibilissimi sensori di posizione capacitivi nelle 3 dimensioni, il libero moto di una delle due masse campione sarà seguito dalla sonda stessa, tramite mini-propulsori capaci di generare forze inferiori al micronewton se necessario. La posizione della seconda massa campione rispetto alla sonda verrà controllata senza contatto, tramite un sofisticato sistema di attuatori elettrostatici. Si tratta quest'ultimo di un'evoluzione del sistema di levitazione elettrostatica originalmente inventato dall'ESA per mantenere in posizione la massa campione dell'accelerometro principale del satellite GOCE, dedicato alla mappatura ad alta risoluzione del campo gravitazionale terrestre.

Concettualmente tuttavia la missione proposta in questa tesi non si può paragonare né alla missione Gravity Probe B né all'interferometro spaziale per onde gravitazionali eLISA di cui LISA-Pathfinder è il prototipo, in quanto sia GP-B sia eLISA hanno l'obiettivo di fare interagire le masse

campione interne con perturbazioni della metrica locale generate da corpi astronomici esterni alla sonda, mentre nella missione proposta viene misurato esclusivamente l'effetto dell'interazione gravitazionale tra due masse campione interne alla sonda, e nessuna interazione di esse con l'universo esterno alla sonda è desiderata.

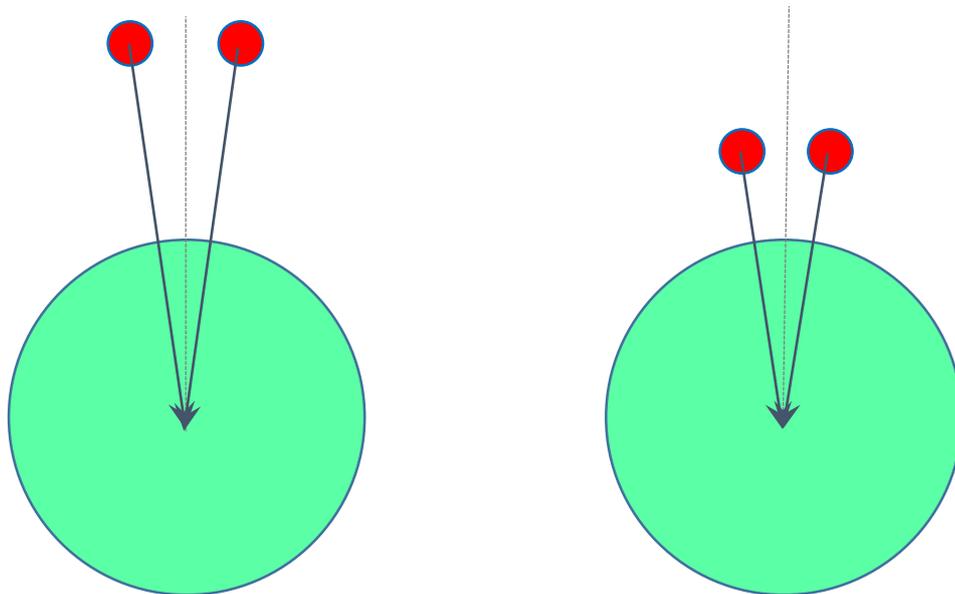
L'apparato per la misurazione di  $G$  su di una sonda spaziale può essere piuttosto semplice, poiché in un ambiente gravitazionalmente isolato e sostanzialmente privo di vibrazioni, non è necessario l'utilizzo di una bilancia a torsione, e l'esperimento può consistere nella semplice misurazione della traiettoria radiale di due masse identiche rilasciate ad una minima distanza di separazione, prive di quantità di moto e di momento angolare, rispetto sia alla massa opposta che alla sonda. Le masse campione accelereranno linearmente verso il centro di massa del sistema fino a collidere dolcemente. Se le posizioni e condizioni dinamiche iniziali delle due masse sono successivamente ristabilite, possibilmente con attuatori senza contatto, il tracciamento del loro libero moto può essere ripetuto indefinitamente finché le condizioni fisiche interne ed esterne alla sonda rimangono costanti. Associando ogni misurazione di  $G$  alla lettura dell'orologio della sonda ed alla posizione della sonda rispetto al sole, è possibile analizzare eventuali variazioni spazio temporali del valore locale di  $G$ .

Un esperimento come quello proposto dovrebbe essere effettuato su di una sonda dello spazio profondo con velocità istantanea superiore alla velocità di fuga dal sistema solare (come New Horizons, Voyager I e II, Pioneer 10 e 11). Un suo prototipo può essere testato in condizioni di microgravità, tenendo conto però che c'è una fondamentale differenza tra la debolezza del campo gravitazionale percepito a bordo di una sonda in uscita dal sistema solare e la microgravità percepita da due corpi in una torre di caduta, in un aereo in volo parabolico, in un razzo sub-orbitale, o nella stazione spaziale. Il motivo è semplice: la microgravità in tutti questi ultimi casi è data dal moto del contenitore dell'esperimento rispetto al campo gravitazionale della terra mentre nel primo caso è dovuta non solo alla velocità della sonda ma anche dalla semplice distanza dalle sonde rispetto al sole ed ai pianeti.

Nel caso della microgravità artificiale il campo gravitazionale continua ad avere lo stesso valore. Come noto, per il Principio di Einstein, un osservatore non può distinguere tra l'essere in assenza di un campo gravitazionale oppure all'interno di una capsula in caduta libera nel vuoto, tuttavia questo esempio vale solo se all'interno della vi è un solo osservatore. In presenza di due osservatori, nel caso di un'effettiva assenza

del campo gravitazionale, se i due osservatori sono privi di massa, la distanza tra i due rimarrà costante. Se due osservatori privi di massa si trovano all'interno di una capsula in caduta libera verso il centro di massa di un terzo corpo, i due osservatori si avvicineranno necessariamente, anche in assenza di forze di attrazione gravitazionali, in quanto, come illustrato in Figura 1, le loro linee geodetiche non sono parallele ma convergono al centro di massa del terzo corpo. Si verifica quindi un effetto simile a quello di una forza attrattiva tra i due osservatori.

Nel caso i due osservatori abbiano anche una massa, si verifica una classica forza Newtoniana tra di loro, che nel caso dell'assenza di altri campi gravitazionali, è l'unica forza che determina lo spostamento reciproco degli osservatori. Nel caso i due osservatori dotati di massa siano in una capsula in caduta libera verso un terzo corpo, l'effetto dell'attrazione gravitazionale reciproca si sommerebbe all'effetto di avvicinamento che si ha anche nel caso di mancanza della loro massa. La misurazione della sola forza attrattiva tra loro diverrebbe quindi più complessa dovendo conoscere perfettamente l'effetto che si avrebbe in assenza di massa degli osservatori.



*Figura 1* Due corpi in caduta libera verso il centro di massa di un terzo corpo si avvicinano obbligatoriamente a causa delle direzioni delle loro geodetiche.

In condizioni di comune microgravità artificiale si creerebbe quindi un effetto perturbativo, difficile da misurare e sottrarre esattamente, che impedirebbe una misurazione accurata della forza attrattiva tra le masse.

Completamente diversa è invece la situazione di due corpi all'interno di una sonda con velocità superiore a quella di fuga dal sistema solare e diretta in senso opposto rispetto alla posizione del sole. In tal caso la debolezza del campo gravitazionale sarebbe determinata non da una condizione di caduta libera ma da un'effettiva distanza dalle sorgenti di campi gravitazionali.

### **1.3 Una sonda spaziale indipendente**

Per quanto sia la soluzione più costosa, e quindi di più improbabile realizzazione, è utile descrivere inizialmente una sonda dedicata esclusivamente alla misurazione locale di  $G$ , per capire meglio la portata dei compromessi necessari all'implementazione dell'esperimento su di una sonda dedicata anche all'esplorazione del sistema solare esterno.

Scopo fondamentale di una sonda spaziale per la misurazione di  $G$  è quello di allontanare il più possibile le masse campione da qualsiasi altro corpo dotato di massa, per minimizzare le perturbazioni della metrica locale, che dovrebbe essere determinata il più possibile dai corpi campione. Una sonda dedicata all'esperimento inoltre, oltre ad allontanarsi il più possibile dal Sole e dai corpi celesti, dovrebbe proteggere il più possibile le masse campione da qualunque fonte di energia o particelle.

Per una sonda in moto inerziale, una traiettoria iperbolica che la allontani il più velocemente possibile, e senza necessità di ulteriori correzioni, dai principali corpi del sistema solare, è possibile in alcuni intervalli di lancio.

Le dinamiche del sistema solare forniscono ad esempio una finestra di lancio nel mese di marzo 2024 (Figura 2), quando tutti i corpi del sistema solare si troveranno tutti nel quadrante solare opposto rispetto alla Terra.

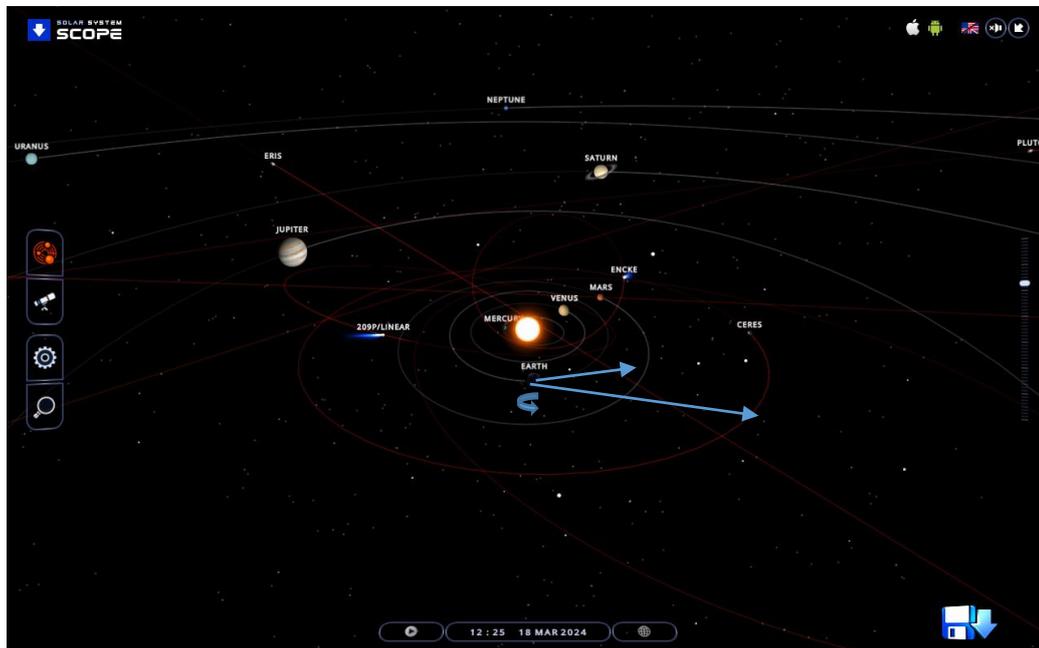


Figura 2 Una piccola sonda dedicata potrebbe essere lanciata il 18 marzo 2024 in direzione opposta ai pianeti. Il lancio potrebbe avvantaggiarsi della rotazione e della rivoluzione terrestre per ottenere una velocità lineare superiore alla velocità di fuga solare. Elaborazione dell'autore di un'immagine ottenuta con il software Solar System Scope (<http://www.solarsystemscope.com/>).

Un altro requisito fondamentale della sonda è quello di non essere lei stessa causa di errori nell'esperimento, quindi ad esempio deve procedere con moto inerziale e stabilizzazione giroscopica tri-assiale, come le sonde Voyager I e II e la sonda Cassini, invece che con stabilizzazione rotatoria come le Pioneer 10 e 11 e la New Horizons.

Naturalmente anche la materia con cui è costruita la sonda stessa esercita un'azione gravitazionale sulle masse campione, modificando la metrica interna alla sonda, tuttavia, a condizione che la geometria e la massa della sonda rimangano invariate nel tempo, si tratta di un effetto perturbativo statico, che genera quindi un errore sistematico costante. Poiché l'esperimento non si prefigge di misurare il valore assoluto e universale di  $G$ , posto che esso esista, ma di verificare la stabilità spazio-temporale di  $G$ , ovvero le variazioni del valore locale di  $G$  lungo la traiettoria della sonda, tale sorgente di errore sistematico non impedirebbe la misurazione desiderata.

Inoltre con un'opportuna scelta dei materiali e della configurazione geometrica della sonda, è possibile minimizzare gli effetti perturbativi. Ad esempio, la sonda potrebbe essere composta da una sfera centrale, contenente l'apparecchiatura strettamente sperimentale, e 8 sfere esterne, contenenti l'avionica ed i giroscopi stabilizzatori. Se le 8 sfere fossero posizionate simmetricamente all'esterno della sfera e la loro massa fosse uguale, gli effetti perturbativi sarebbero trascurabili.

Purtroppo la densità delle componenti dell'avionica è molto disomogenea, quindi progettare la sonda in modo tale che ogni sfera abbia massa uguale sarebbe estremamente impegnativo. E' possibile invece progettare sfere esterne di densità e dimensioni variabili in modo tale da generare un campo gravitazionale di uguale intensità al centro della sfera centrale. In questo caso l'annullamento per sovrapposizione dell'effetto perturbativo sul sistema delle due masse campione sarebbe meno perfetto ma comunque calcolabile ed accettabile.

Il migliore tipo di lancio per questo tipo di sonda sarebbe l'inserzione diretta in un'orbita solare iperbolica collocata sul piano dell'eclittica. Per inserirsi immediatamente in un'orbita iperbolica, la velocità lineare della sonda al lancio deve essere superiore al valore locale della velocità di fuga dal sistema solare.

Maggiore è l'energia cinetica della sonda, minore è la sua sensibilità alle perturbazioni gravitazionali, quindi è conveniente che la sonda abbia una massa molto contenuta, per convertire la maggior parte di propellente del razzo in velocità lineare. Inoltre in tale lancio sarebbe possibile usare l'effetto Oberth, che permette di trarre vantaggio dalla rotazione della Terra e dal suo moto di rivoluzione intorno al sole per aumentare ulteriormente la velocità iniziale della sonda.

Ad esempio la sonda New Horizons del JPL/NASA, che ha recentemente esplorato il pianeta nano Plutone, è stata progettata con una massa totale contenuta per poter essere lanciata con inserzione diretta in un'orbita di fuga solare, anche se prima del lancio è stato scelto di utilizzare ugualmente l'effetto-fionda di un passaggio ravvicinato con Giove per aumentare ulteriormente la sua velocità lineare e risparmiare propellente della sonda.

Nella sonda proposta tuttavia un sistema di propulsione non sarebbe necessario, e ciò diminuirebbe sensibilmente la sua massa. Una sonda di questo tipo dovrebbe comunque utilizzare soluzioni innovative per la minimizzazione del consumo energetico, in quanto non è possibile

installare un generatore a radionuclidi, sia per la notevole densità del plutonio, che renderebbe difficoltosa l'equilibratura delle densità di materia intorno alla sfera principale, sia soprattutto per evitare problemi dovuti all'effetto accelerativo della radiazione termica dispersa dai radiatori e riflessa dalle altre superfici della sonda, che con ogni probabilità è stata la causa del famoso effetto Pioneer.

Dei pannelli solari, disposti simmetricamente su tutti i lati, o direttamente posti sulle superfici delle sfere, non costituirebbero un problema rilevante dal punto di vista del disturbo gravitazionale prodotto. Allo stesso modo sarebbe accettabile se quattro delle sfere esterne contenessero delle batterie, ed altre quattro delle componenti elettroniche, purché la densità di ognuna delle sfere fosse uguale.

La grande antenna ad alto guadagno tipica delle sonde dello spazio profondo probabilmente non sarebbe necessaria in quanto la sonda, incapace di compiere manovre e priva di strumenti scientifici tranne quelli necessari all'esperimento al suo interno non avrebbe bisogno di ricevere comandi dalla Terra. L'esperimento è infatti pensato per essere automaticamente eseguito e ripetuto. I dati raccolti ad ogni misurazione verrebbero automaticamente ridotti, analizzati e valutati dalla sonda. La sonda produrrebbe una minima quantità di dati finali che potrebbero essere infrequentemente inviati sulla Terra senza problemi usando una piccola antenna a basso guadagno.

Di fondamentale importanza per questo tipo di missione sarebbe il sistema di astro-navigazione passiva (GPS stellare) e l'orologio. Entrambe queste funzioni potrebbero egregiamente essere svolte da un sensore XNAV, ovvero un sensore dei segnali nella banda dei raggi X emessi da alcune stelle pulsar caratterizzate da un'emissione estremamente regolare in frequenza ed un periodo in alcuni casi dell'ordine dei millisecondi (16) (17).

All'interno della sfera maggiore, il comparto principale della sonda, oltre alle masse campione, è necessaria la presenza di almeno tre sotto-sistemi: un sistema di blocco meccanico delle masse campione per proteggerle durante le fasi del lancio e assestamento, un sistema di posizionamento senza contatto a sei dimensioni per riposizionare le masse campione dopo ogni misurazione, ed un sistema di tracciamento senza contatto del loro moto, anche in questo caso a sei dimensioni.

## 1.4 Utilizzo di una sonda planetaria

Ad un costo di sviluppo e di lancio molto inferiore si potrebbe considerare un modulo per la misurazione della variabilità locale di  $G$  come strumento di una sonda planetaria, dedicata per esempio all'esplorazione di Urano o di Nettuno.

In questo caso sarebbe necessario trovare il giusto compromesso tra le esigenze osservative della sonda e le esigenze del mini-laboratorio. Il compromesso più ovvio per quest'ultimo è che esso potrà effettuare le sue misurazioni di  $G$  soltanto quando la sonda si troverà sufficientemente distante da qualsiasi pianeta.

Un compromesso per la sonda è che essa dovrebbe usare la stabilizzazione tri-assiale invece che rotatoria durante le misurazioni, a meno che l'asse tra le due masse campione sia anche l'asse di rotazione della sonda.

La sonda dovrebbe effettuare manovre correttive in fase di crociera solo in caso di estrema necessità (questo già avviene per risparmiare idrazina), ed essere progettata con una forma geometrica che per quanto possibile limiti i gradienti gravitazionali in prossimità del mini-laboratorio. Un altro requisito per la sonda è quello di usare solo l'antenna a basso guadagno durante la fase di crociera, per evitare manovre di puntamento dell'antenna ad alto guadagno.

Differentemente dal caso di una sonda dedicata, in cui il sistema di blocco delle masse campione sarebbe del tutto inutile dopo la fase del lancio, nel caso dell'utilizzo di una sonda osservativa, il sistema di blocco dovrebbe essere riutilizzabile e attivarsi ogni volta che, a causa della posizione o della prevista manovra della sonda, le misurazioni del mini-laboratorio automatico dovessero essere sospese.

E' importante osservare che poiché il sistema di blocco meccanico per quanto possa essere ben progettato non può essere in grado di rilasciare le masse campione senza impartire loro una minima ma misurabile velocità angolare o lineare, è necessario che il sistema di manipolazione senza contatto venga attivato prima del rilascio delle masse campione dal sistema di blocco.

## 1.5 Modelli preliminari terrestri

I moti della Terra, del Sistema Solare e della Galassia rispetto al sistema di riferimento della radiazione cosmica di fondo (CMB) rendono di fatto ogni laboratorio terrestre un laboratorio spaziale, ma collocato in una posizione particolarmente sfavorevole per misurare con precisione ed accuratezza costanti di natura universale.

A causa della complessa e dinamica natura del pianeta, e dell'ancora più complessa e variabile attività umana, sulla Terra sono presenti innumerevoli sorgenti di rumore in tutti gli spettri (elettromagnetico, sismico, acustico e gravitazionale). Con la sola eccezione dei campi gravitazionali, esistono tecniche di isolamento per ognuno degli spettri considerati, tuttavia esse hanno un'efficacia limitata specialmente in alcune bande di frequenza. Per esempio è particolarmente difficile isolare un pendolo dallo spettro sismico a bassa frequenza, e questo ad esempio limita la sensibilità dell'osservatorio per onde gravitazionali VIRGO alle frequenze inferiori ai 10Hz.

Per quanto riguarda nello specifico gli esperimenti gravitazionali, piagati storicamente da un basso rapporto Segnale/Rumore, i vantaggi di un laboratorio spaziale sono molto più evidenti che negli studi sulle costanti elettromagnetiche, come la velocità della luce e la carica dell'elettrone.

Ciò nonostante, ogni missione spaziale non può prescindere da un lunghissimo lavoro preparatorio nei laboratori terrestri, e quello che viene presentato in questa tesi è un umilissimo, e in parte vergognoso primo passo, o meglio un primo inciampo vista la quantità di errori, nello sviluppo della futura apparecchiatura spaziale.

Retrospectivamente, visto il livello di rumore dei risultati ottenuti, è possibile affermare che la scelta di usare un sistema di sospensione a fili nelle prove effettuate invece di un più complesso sistema di levitazione, o meglio ancora, di microgravità come quella generata nei voli parabolici, sia stata una scelta poco mirata, di cui l'autore si assume la piena responsabilità. Tuttavia, alcuni risultati ottenuti sono stati incoraggianti e probabilmente è stata una prova necessaria proprio per determinare la corretta configurazione di una futura prova in microgravità, che a sua volta potrà determinare la configurazione migliore di una futura missione spaziale.

## Capitolo 2

# Apparato sperimentale

### 2.1 Introduzione

La motivazione iniziale che ha motivato la decisione di realizzare l'esperimento è stata quella di verificare nella pratica la semplicità di realizzare un apparato estremamente compatto per la misurazione automatica del moto, condizionato dall'attrazione gravitazionale reciproca, di due corpi ravvicinati caratterizzati da una geometria semplice, una densità molto elevata ed omogenea, ed una carica neutra.

Scoperto e visionato di persona lo strumento FPS3010 della Attocube, la seconda e non meno importante motivazione della prova di laboratorio è stata determinare l'applicabilità di tale strumento alla misurazione desiderata, valutandone sinteticamente le prestazioni, la facilità d'uso ed il livello di automatismo raggiunto.

La terza motivazione iniziale della prova è stata quella di testare un metodo di simulazione terrestre del libero moto attrattivo di due corpi attraverso la movimentazione cadenzata dei punti di sospensione dei pendoli.

A causa delle note difficoltà oggettive di realizzare una misurazione di  $G$  di accettabile accuratezza e precisione, giungere ad una attendibile nuova misurazione di  $G$  non mai è stato un obiettivo specifico della prova.

### 2.2 Fasi preliminari

La prima fase preliminare come di norma è consistita in un'estensiva consultazione della letteratura con l'obiettivo di trovare esperimenti simili precedenti e studiare le tecniche utilizzate. Poi è stata effettuata un'indagine sulla teoria di base e lo stato dell'arte delle varie tecnologie necessarie (tecniche del vuoto, isolamento delle vibrazioni, misurazione ad alta risoluzione spaziale di spostamenti lenti, e posizionamento con precisione nanometrica di corpi dell'ordine del chilogrammo).

Avendo definito i livelli minimi e massimi richiesti dalle varie tecnologie (per esempio, avendo deciso di accontentarsi del massimo livello di vuoto

raggiungibile con una pompa ad olio e non aggiungere una pompa di secondo livello) è stata effettuata un'ampia ricerca delle offerte commerciali disponibili, per trovare i prodotti che più si avvicinavano ai requisiti. A questa fase sono seguiti contatti con le aziende produttrici per avere maggiori informazioni tecniche sui prodotti e valutarne la possibilità di integrazione tra loro.

L'interazione con le aziende ha portato frequentemente a modifiche del disegno dell'apparato. La maggior parte dei prodotti applicati sono stati adattati dalle aziende alle caratteristiche dell'esperimento, tuttavia anche questa fase non è stata del tutto lineare, e modifiche richieste da un'azienda determinavano una richiesta di modifica all'altra azienda.

Il rapporto con le aziende è stato molto produttivo in quanto ciascuna delle aziende coinvolte ha aggiunto competenza e consigli tecnici che hanno permesso di semplificare il disegno dell'esperimento e renderlo più economico. Il costo dell'esperimento è comunque stato coperto interamente dall'autore, tramite il lascito in titoli del padre, e non è ricaduto sull'istituto, per volontà dello stesso autore, in quanto non si è trattato di un esperimento ufficialmente approvato dall'istituto, ma soltanto tollerato all'interno di esso grazie alla magnanimità ed enorme pazienza del co-relatore.

I primi contatti con la ditta Attocube di Monaco di Baviera, avvenuti nel mese di giugno 2014, sono stati provvidenziali, in quanto i responsabili marketing della ditta hanno consigliato all'autore di partecipare al congresso dell'Associazione Italiana Velocimetria Laser che si sarebbe svolto a breve ad Ancona, ed a cui avrebbero partecipato due scienziati della ditta stessa. Scoperto che il congresso avrebbe incluso anche un corso introduttivo e dimostrazioni di laboratorio delle tecniche di misurazione laser più utilizzate, l'autore si è iscritto immediatamente.

Scoprendo inoltre che la ditta produceva anche nanoposizionatori lineari con caratteristiche idonee a muovere le masse campione, unico componente già acquistato all'epoca oltre ai fili di sospensione, l'autore decise di riprogettare l'esperimento a partire dai prodotti Attocube.

L'autore arrivò quindi al congresso con un progetto ben definito, che presentò privatamente agli scienziati Attocube. Da questo incontro seguirono altri colloqui privati sia durante il congresso, che successivamente, via Skype, che contribuirono a definire meglio sia le capacità che i limiti degli strumenti Attocube scelti.

Particolarmente positiva è stata la collaborazione con il fisico Dr. Andreas Straub della Attocube, con cui l'autore ha stabilito a partire dal congresso rapporti d'amicizia.

I rapporti con le aziende internazionali sono stati gestiti direttamente dall'autore. I rapporti con le aziende italiane sono stati mediati e facilitati invece dall'orafo Sig. Siro Lombardini, senza le cui capacità tecniche e conoscenze nel mondo industriale l'esperimento non sarebbe stato possibile.

### 2.3 Modello matematico e fisico

Il sistema dei due cilindri equilateri è rappresentato in scala in coordinate cilindriche in figura 3.

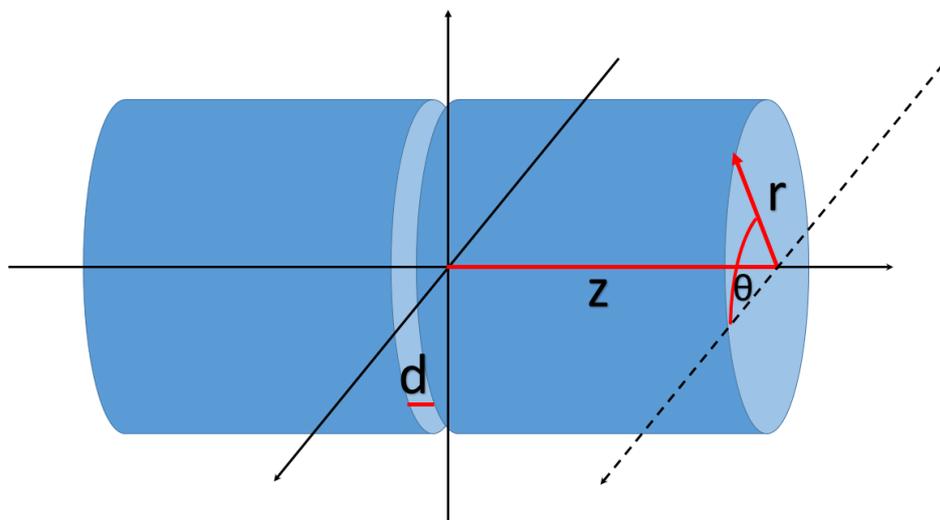


Figura 3 L'attrazione tra i due cilindri viene modellata in coordinate cilindriche

Di fondamentale importanza per distinguere il segnale gravitazionale dal rumore è calcolare l'accelerazione gravitazionale di un cilindro rispetto all'altro. Per tale calcolo è conveniente usare le coordinate cilindriche. In tali coordinate l'asse di entrambi i cilindri sarà allineato con l'asse z.

Senza perdere di generalità consideriamo inizialmente la posizione dei cilindri con distanza di separazione zero tra le basi, ovvero la posizione a cui era portato il sistema all'inizio di ogni misurazione.

L'accelerazione gravitazionale su un cilindro dovuta all'altro cilindro sarà quindi:

$$a_c = \frac{G \rho}{\pi R^2 H} \int \frac{r_1 r_2 (z_1 - z_2) dV_1 dV_2}{[(r_1 \cos \theta_1 - r_2 \cos \theta_2)^2 + (r_1 \sin \theta_1 - r_2 \sin \theta_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.1)$$

Dove  $V_1 = \pi r_1^2 h_1$  e  $V_2 = \pi r_2^2 h_2$  sono i volumi dei due cilindri in coordinate cilindriche, R ed H rispettivamente il raggio medio e l'altezza media tra i due cilindri e  $\rho$  la loro densità media.

Dividendo le lunghezze per R si ottiene  $u_i = \frac{r_i}{R}$  e  $v_i = \frac{z_i}{R}$  e l'equazione precedente diventa:

$$a_c = \frac{G m}{\pi^2 H^2} \int \frac{u_1 u_2 (v_1 - v_2) d\theta_1 du_1 dv_1 d\theta_2 du_2 dv_2}{[(u_1 \cos \theta_1 - u_2 \cos \theta_2)^2 + (u_1 \sin \theta_1 - u_2 \sin \theta_2)^2 + (v_1 - v_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.2)$$

Si può vedere chiaramente che la formula dall'accelerazione gravitazionale è formata da due componenti: un primo fattore che definisce l'ordine di grandezza della misura,

$$a_c = \frac{G m}{H^2} \quad (2.3)$$

ed un secondo fattore,  $\xi$  che definisce il valore esatto dell'accelerazione:

$$\xi = \frac{1}{\pi^2} \int \frac{u_1 u_2 (v_1 - v_2) d\theta_1 du_1 dv_1 d\theta_2 du_2 dv_2}{[(u_1 \cos \theta_1 - u_2 \cos \theta_2)^2 + (u_1 \sin \theta_1 - u_2 \sin \theta_2)^2 + (v_1 - v_2)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2.4)$$

I primi due dei tre addendi nella parentesi quadra al denominatore si possono semplificare in:

$$k^2 = u_1^2 + u_2^2 - 2 u_1 u_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.5)$$

Si può quindi procedere ad una prima integrazione in  $\theta_1$  con risultato  $2\pi$ .

Definito  $\psi = \theta_1 - \theta_2$ , è quindi possibile integrare in quest'ultimo angolo nell'intervallo  $[0, 2\pi]$ . Successivamente è possibile integrare in  $v_1$  nell'intervallo  $[-2, 0]$  ed in  $v_2$  nell'intervallo  $[0, 2]$ .

Dopo queste integrazioni si giunge al risultato:

$$\xi = \frac{2}{\pi} \iiint 2 \left[ \sinh^{-1} \frac{2}{k} - \sinh^{-1} \frac{4}{k} \right] u_1 u_2 d\psi du_1 du_2 \quad (2.6)$$

che si può integrare numericamente nelle 3 rimanenti variabili, ottenendo come risultato:

$$\xi = 1,317 \dots \quad (2.7)$$

Moltiplicando poi i due fattori,

$$a_c = \frac{G m}{H^2} \xi \quad (2.8)$$

Usando per m ed H il valore medio sperimentale di 1029,46 g e di 41,11 mm rispettivamente, e per G il più recente valore internazionale di  $6,67408 \cdot 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$  otteniamo come risultato:

$$a_c = 5,35 \cdot 10^{-8} \frac{m}{s^2} \quad (2.9)$$

Tale parametro è molto utile per confrontarlo sia con altre geometrie e materiali delle masse attrattive, sia con sorgenti di errore sistematico certe o possibili. Consideriamo l'esempio più importante per ciascuno di questi tre casi.

- 1) In un sistema di due masse sferiche di tungsteno da 1029,46 g con distanza di separazione zero, ciascuna sfera, del raggio di 23,37 mm, esercita sull'altra sfera un'accelerazione di:

$$a_s = \frac{G m}{r_s^2} = 3,15 \cdot 10^{-8} \quad (2.10)$$

La geometria a cilindro equilatero delle masse campione consente quindi di generare una maggiore accelerazione gravitazionale di quasi il 59% a parità di massa e di materiale.

- 2) Una sorgente di errore certa è ad esempio la pressione di radiazione del sensore laser di spostamento FPS3010 in quanto essa agisce sui cilindri nella stessa direzione e verso dell'attrazione gravitazionale. Inoltre il laser viene riflesso quasi totalmente dallo specchio del cilindro, quindi il valore della pressione di radiazione è doppio rispetto ad un materiale assorbente nell'infrarosso.

La potenza in uscita, P, del laser dello strumento dichiarata da Attocube è di 0,15 mW. La pressione di radiazione è quindi:

$$a_p = \frac{2P}{mc} = 9,7 \cdot 10^{-13} \frac{m}{s^2} \quad (2.11)$$

L'accelerazione dovuta alla pressione di radiazione è quindi inferiore di alcuni ordini di grandezza a quella gravitazionale dovuta all'altro cilindro.

- 3) Una sorgente possibile di errore sistematico è invece la presenza di cariche elettrostatiche residue sui cilindri dovute ad un erroneo procedimento di scarica all'inizio di una sessione di misurazione.

Essendo il tungsteno un conduttore le cariche elettrostatiche eventualmente presenti tendono a distribuirsi su l'intera superficie del cilindro tuttavia la presenza ravvicinata di due cilindri rende la distribuzione delle cariche su di essi non omogenea. Le cariche di ugual segno tendono a disporsi sulle basi opposte dei cilindri rendendo l'unica possibile interazione tra le cariche residue quella di tipo attrattivo. Inoltre è sufficiente che le cariche residue siano presenti su uno solo dei due cilindri per generare un effetto attrattivo tramite la polarizzazione indotta della carica neutra dall'altro cilindro.

Per semplicità consideriamo le basi adiacenti dei cilindri come un comune condensatore piano. In questo caso la distanza le basi non può essere zero perché altrimenti non potrebbe esservi una differenza di potenziale tra i cilindri, tuttavia è opportuno scegliere una distanza minuta e rilevate per l'esperimento.

Chiamando C la capacità del condensatore, V la differenza di potenziale tra le due basi, A la loro area, d la loro separazione, m la massa media tra i due cilindri e  $\rho$  la loro densità media, l'accelerazione dovuta alla carica residua elettrostatica è quindi:

$$a_e = \frac{C V^2}{d m} = \frac{\epsilon_0 A V^2}{d^2 m} = \frac{\epsilon_0 V^2}{d^3 \rho} \quad (2.12)$$

che per completezza risolviamo anche per V,

$$V = \sqrt{\frac{d^3 \rho a_e}{\epsilon_0}} \quad (2.13)$$

Per l'accelerazione gravitazionale useremo invece questa formula semplificata:

$$a_c = \frac{G m}{(H+d)^2} \xi \quad (2.14)$$

Poniamo  $a_c = a_e$  :

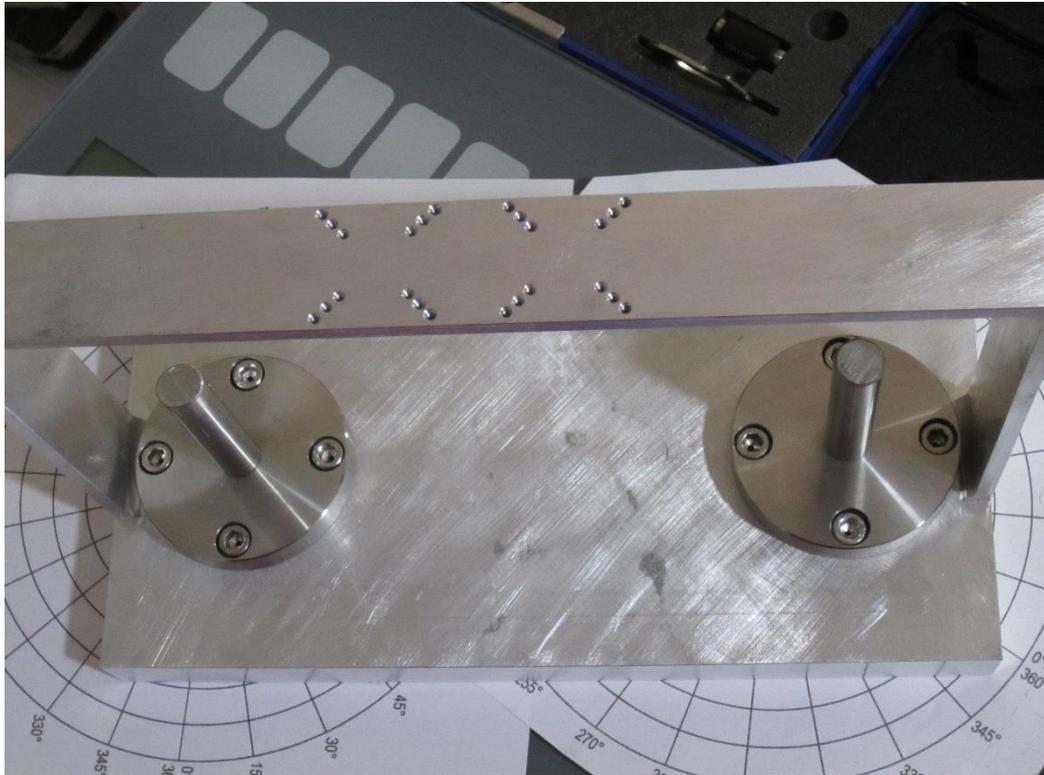
$$\frac{\epsilon_0 V^2}{d^3 \rho} = \frac{G m}{(H+d)^2} \xi \quad (2.15)$$

e risolviamo per  $V$ :

$$V = \sqrt{\frac{d^3 \rho G m}{\epsilon_0 (H+d)^2} \xi} \quad (2.16)$$

Risolvendo l'equazione per una distanza di 300 micron, a cui è avvenuta la migliore misurazione sperimentale, otteniamo che è necessaria una differenza di potenziale di 55 mV per eguagliare elettrostaticamente l'attrazione gravitazionale tra i cilindri. Si tratta di un valore elevato per una carica residuale, quindi è improbabile che la carica residuale sia la principale causa dei moti attrattive misurati.

## 2.4 Descrizione del telaio



*Figura 4 Il telaio di supporto è composto da una base massiva, dalle colonne dell'ottica, e da un ponte con fori filettati per l'avvitamento dei posizionatori.*

Il telaio è un manufatto monoblocco in Ergal con lunghezza 250 mm, altezza 150 mm, una larghezza alla base di 120 mm e una larghezza al ponte di 30 mm ed una massa di 1830 g. Lo spessore della base è di 20 mm mentre il ponte è spesso 5 mm. Tra il lato superiore della base ed il lato inferiore del ponte vi è uno spazio di 125 mm, che limita l'altezza dell'apparato sperimentale, mentre tra le facce interne delle due pareti verticali del ponte invece lo spazio è di 240 mm, che costituisce il limite nell'asse orizzontale.

Sul ponte sono presenti 24 fori filettati per viti M2 anche se nella pratica ne vengono usati soltanto 4 per ogni motore piezoelettrico.

Nella base del telaio sono presenti otto fori passanti per ospitare viti traforate  $\frac{1}{4}$ -20 che assemblano al telaio le due basette circolari delle colonnine porta-lenti. Le basette sono il modello PB1 della Thorlabs in acciaio inox con diametro 63 mm, altezza 10,2 mm e massa 220 g.

Le colonnine modello TR4 della Thorlabs sono anch'esse in acciaio inox, hanno un diametro di 12,7 mm, un'altezza di 101,6 mm e una massa di 97 g.

La base del telaio è stata volutamente progettata molto più larga e spessa del ponte per spostare verso il basso il baricentro del sistema complessivo e minimizzare la propagazione di eventuali vibrazioni generate dal moto dei cilindri o dei motori piezoelettrici.

## **2.5 Progettazione e realizzazione del telaio**

La progettazione e realizzazione del telaio ha richiesto un notevole sforzo da parte dell'autore in collaborazione con l'orafo Siro Lombardi, il quale ha volontariamente e gratuitamente agito da collaboratore tecnico, essendo egli esperto di metallurgia, meccanica di precisione, e meccanica in generale.

Dopo un lungo lavoro di progettazione CAD, caratterizzato da errori e numerose correzioni e ripensamenti, l'autore ha potuto consegnare i disegni definitivi all'orafo, il quale ha trovato ed incaricato un'azienda del territorio di realizzare il manufatto in Ergal. L'Ergal è una particolare lega leggera di alluminio e zinco, con parti di magnesio, rame ed altri metalli, presenta caratteristiche di forte robustezza strutturale e notevole durezza, accompagnati però da una scarsa lavorabilità meccanica.

L'operatore che ha manualmente realizzato il telaio ha affermato che partire da un blocco di Ergal ha richiesto la sostituzione per usura di sei punte del tornio durante le due giornate di lavorazione. Perfino i fori di diametro non comune hanno costituito un piccolo problema, risolto dall'autore provvedendo alla ditta i filettatori per i fori M2 e  $\frac{1}{4}$ -20.

Sapendo che il telaio sarebbe stato utilizzato nel vuoto l'operatore ha effettuato tutta la lavorazione in atmosfera modificata ed uno speciale trattamento finale ha rimosso qualsiasi traccia dell'olio di lavorazione.

L'utilizzo di una lega speciale è stato necessario poiché il telaio è di per se un generatore di campo gravitazionale. Lo spessore delle colonne portanti e del ponte doveva essere il minore possibile per ridurre la massa tuttavia esso doveva anche essere sufficiente spesso per permettere alle minuscole viti M2 di sostenere saldamente i nanoposizionatori ed il loro carico di 1,2 Kg ciascuno.

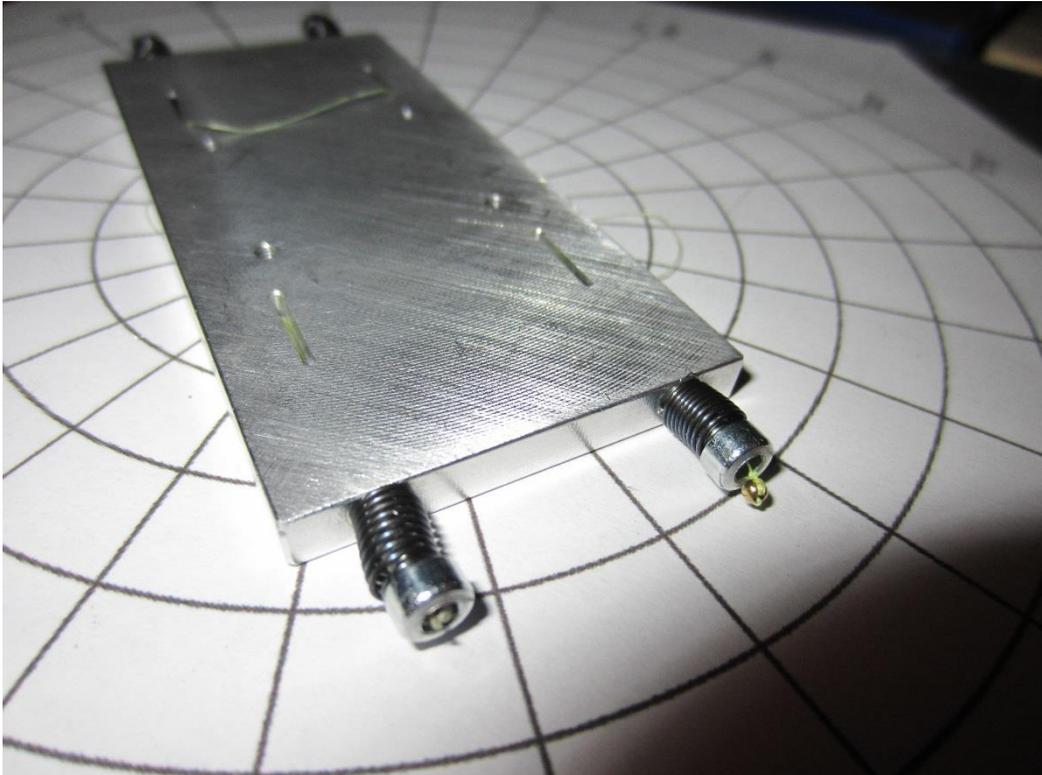
Era fondamentale che i carichi appesi ed il loro movimento non causassero alcuna deformazione, anche minima, mantenendo tutta la lunghezza del ponte perfettamente parallela alla base, e l'Ergal rispondeva a queste caratteristiche.

Infine era importante scegliere un materiale con un basso coefficiente di espansione termica per evitare che la distanza tra i fori di attacco dei nanoposizionatori piezoelettrici potesse variare nel tempo durante una lunga misurazione, variando la distanza tra i posizionatori stessi.

Appena ricevuto il telaio, mediante un calibro digitale ed un micrometro digitale è stata subito verificata dall'autore insieme al Sig. Lombardini la corrispondenza del manufatto con le misure dei disegni, compresi i diametri dei fori e le loro distanze reciproche. Poi con una riga d'acciaio, un goniometro digitale ed un puntatore laser è poi stata verificata la simmetria ed il parallelismo tra le parti. Tutto è risultato soddisfacente entro i limiti di accuratezza e ripetibilità degli strumenti.

## **2.6 Descrizione delle piastre di sospensione**

Le piastre di sospensione sono parallelepipedi rettangolari di lega di alluminio di lunghezza 90,1 mm, larghezza 41,1 mm, spessore 5,3 mm ed una massa di 55 g. Quattro fori con filettatura per viti M2 sono presenti nella parte centrale di ogni piastra per connetterla saldamente al proprio nanoposizionatore piezoelettrico mentre un sistema di scanalature e di fori verticali e orizzontali consente al filo di sospensione di Dyneema di scorrere liberamente tra i registri ed i rispettivi cilindri.



*Figura 5 Piastra di sospensione con una sferetta d'oro estratta. Un filo di Dyneema da 0.1 mm di diametro parte dalla sferetta d'oro alloggiata nella testa della vite, continua all'interno di essa poi, tramite una scanalatura ed un foro, scende. Passa sotto al cilindro e risale tramite un foro nell'altra metà della piastra. Qui attraversa superficialmente la piastra e scende tramite un altro foro, passa sotto l'altra metà del cilindro. Risale tramite un foro ed una scanalatura nella metà della piastra originaria e passando internamente all'altra vite registro arriva fino alla seconda sferetta d'oro a cui è annodato.*

Ogni piastra dispone di quattro registri tuttavia si è riscontrato sperimentalmente che è conveniente usarne solo due per ogni cilindro e passare il filo sopra la piastra dal foro uscente a quello entrante dall'altro lato del cilindro.

Un sistema a quattro regolatori utilizza due fili per la sospensione di un cilindro comportando necessariamente una maggiore rigidità del sistema ed un maggiore fattore di smorzamento.

Un sistema di sospensione a filo unico passante due volte sotto il cilindro ha il vantaggio di riequilibrarsi spontaneamente, mantenendo il cilindro parallelo alla base del telaio e la tensione del filo la più bassa ed omogenea possibile in ogni punto.

Il maggiore Q del sistema di sospensione a singolo filo continuo è verificabile perfino ad occhio nudo. I registri sono in realtà delle viti M3 con testa cilindrica ad esagono incassato. Sono state traforate longitudinalmente dal Sig. Lombardini per consentire al filo di scorrervi all'interno. Tale foro del diametro di 1 mm deve essere estremamente liscio in quanto abbiamo osservato che una vite che presentava un'irregolarità nella canalina interna ha causato la rottura del Dyneema nella prima prova.

Come illustrato fotograficamente, il filo alle due estremità viene annodato a due sferette d'oro traforate. Le sferette vengono inserite nella testa delle viti M3 ma esse sono libere di ruotare, e quando il filo non è in tensione, ovvero quando un cilindro non è sospeso sul filo, esse sono anche libere di uscire dalla testa della vite. Anche le viti M3 non sono rigidamente fissate alle piastre ma tenute ad una tensione costante da delle molle molto dure.

Il sistema di regolazione della tensione dei fili con registri è l'unica parte dell'esperimento non disegnata direttamente dall'autore ma dall'orafo Siro Lombardini, a cui l'autore ha apportato la modifica di usare un sistema a singolo filo.

L'uso delle molle si è reso necessario perché i regolatori sono viti e come tutte le viti quando non sono inserite fino in fondo possono avere un gioco tale da diventare oscillanti, ed esso doveva assolutamente essere evitato in ogni posizione del regolatore.

Il filo di sospensione è una bava composta da tre trecce di micro-Dyneema termicamente fuse insieme. E' stato selezionato per le sue caratteristiche di spiccata anelasticità, robustezza e ed elevato rapporto tra capacità di carico e diametro. Dopo prove preliminari è stato selezionato il filo di diametro di 0,1 mm con una capacità di carico di 5,9 Kg.

La distanza tra il lato del cilindro e la piastra è di 4 mm mentre la distanza tra la piastra ed il centro del cilindro è di 25 mm.

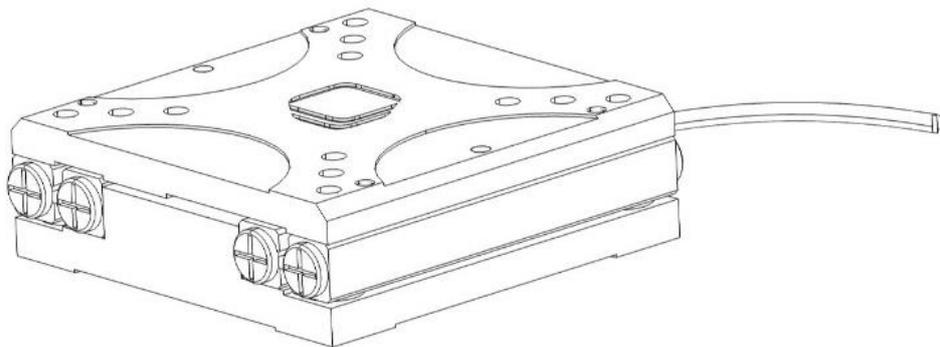
## 2.7 Progettazione e realizzazione delle piastre di sospensione

Le piastre di sospensione, nella loro ultima e definitiva configurazione, sono state realizzate in una lega di alluminio molto più facilmente lavorabile di quella scelta per il telaio.

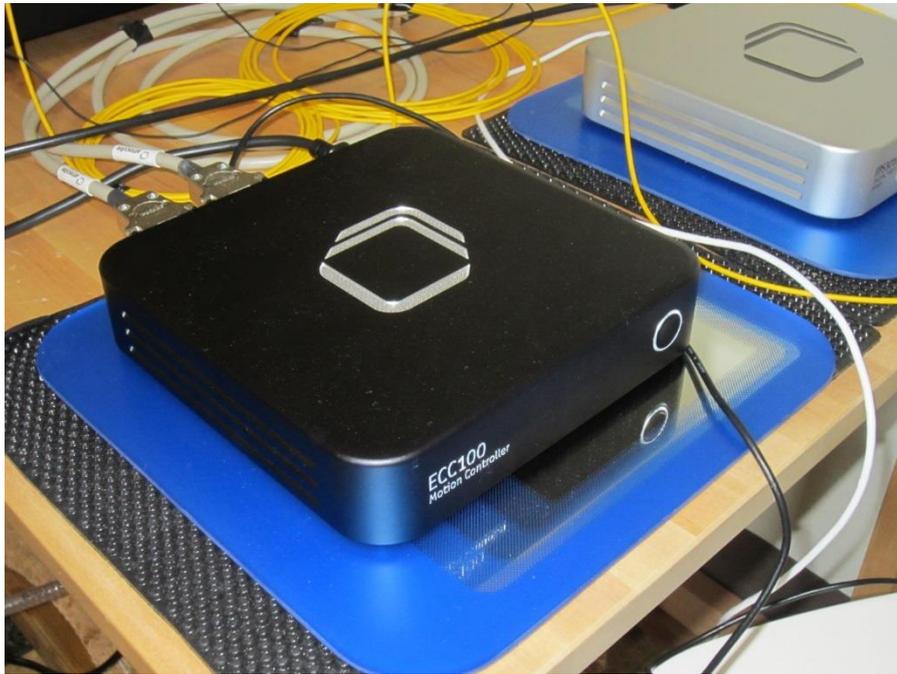
Nella progettazione si è tenuto conto che esse non dovevano soltanto fungere da interfaccia di collegamento tra i nanoposizionatori lineari ed i cilindri, ma anche mantenere le masse attrattive cilindriche perfettamente orizzontali e parallele rispetto alla base del telaio.

Era inoltre importante escogitare un meccanismo per tendere i fili pur consentendo la regolazione fine delle loro lunghezze. Era inoltre da evitare un attacco troppo rigido perché il materiale dei fili, essendo particolarmente inelastico, può condurre vibrazioni se la tensione è molto elevata. Infine per quanto estremamente resistente rispetto al suo diametro ed al suo peso, il Dyneema non è indistruttibile e una rottura improvvisa avrebbe potuto, con la caduta di un cilindro, danneggiare il suo specchio, come infatti è successo durante la prima prova di laboratorio.

## 2.8 I nanoposizionatori piezoelettrici



*Figura 6 Nanoposizionatore ECS3030. Immagine generata da un file CAD di Attocube Systems AG*



*Figura 7 Controller dei posizionatori.*

I nanoposizionatori, noleggiati per l'esperimento dalla Attocube, sono motori lineari con uno spostamento massimo di 20 mm, una linearità di 50 nanometri, ed una portata massima di 2 Kg. Su consiglio di Andreas Straub della Attocube è stato utilizzato il modello ECS3030 /HV /NUM di dimensione 3.0 x 3.0 x 0.95 cm con corpo in acciaio inox adatto all'alto vuoto e dotato di un dispositivo di feedback numerico della sua posizione assoluta tramite una guida ottica interna illuminata da un diodo laser e letta da un sensore ottico.

Il loro moto è causato dalla espansione e contrazione di due elementi paralleli in ceramica piezoelettrica, disposti perpendicolarmente rispetto all'asse di movimento, guidata da un segnale sinusoidale in corrente alternata proveniente da un controller, di dimensione 21\*21\*5 cm, interfacciato tramite porta USB ad un computer Windows.

Il segnale di controllo può essere definito dall'utente in termini di frequenza (max. 5000Hz per un dispositivo o 2000Hz per più dispositivi) e di tensione (max. 45V).

Grazie al feedback numerico è possibile sia conoscere costantemente la posizione assoluta del motore con precisione di 1 nanometro sia

comandare uno spostamento relativo rispetto alla posizione attuale. La linearità garantita del sistema di posizionamento è di 50 nanometri.



*Figura 8 I nanoposizionatori sono posti tra il telaio e le piastre di sospensione.*

## **2.9 Il sistema del vuoto**

Una campana del vuoto in vetro borosilicato con diametro esterno di 315 mm, interno di 301 mm ed altezza di 356 mm, poggia tramite una guarnizione di gomma Nitrile su di una base realizzata su misura in acciaio inox 304 del diametro di 350 mm e spessore 20 mm. La base si poggia su tre colonnine di acciaio alte 86 mm con basi in gomma di 60 mm di diametro.

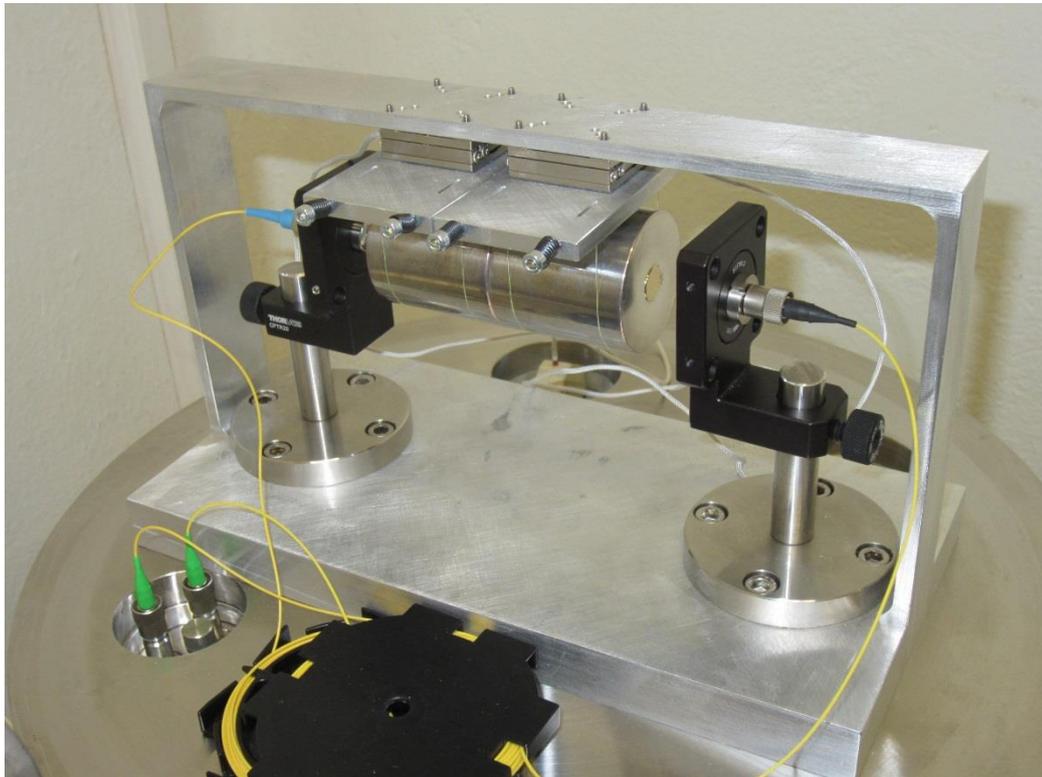
Nella base sono presenti in posizioni decentrate quattro porte, una per la rimozione dell'aria e tre porte di tipo KF40 per le interfacce.

Alla base inoltre sono collegate due valvole di collegamento alle pompe, una valvola di rilascio, ed un manometro. La campana di Pirex è protetta contro la implosione da una campana cilindrica più grande, in acrilico.

La base della campana è stata realizzata su misura ed è stata fornita già dotata di due interfacce sub-D da 15 pin per il collegamento dei nanoposizionatori piezoelettrici. L'interferometro è stato collegato tramite la terza porta KF40 utilizzando un interfaccia per tre fibre ottiche noleggiata da Attocube.



Figura 9 Campana del vuoto durante l'evacuazione dell'aria.



*Figura 10 Nella foto sono visibili le interfacce per il vuoto, davanti a sinistra quella per le fibre ottiche, in fondo quelle per i posizionatori.*

La tenuta del vuoto della campana è così elevata che una volta raggiunto il fondo scala del manometro per vuoto, è possibile spegnere la pompa e lavorare per una giornata intera senza una discesa misurabile del livello di vuoto.

Ad una valvola di uscita dell'aria è stata collegata una pompa a bagno d'olio a due stadi con motore General Electric in presa diretta, in tutto equivalente al nuovo modello Direct Drive da 55L/m della HyVac.

La pompa ha una capacità di vuoto di  $1^{-4}$  mTorr ed è stata scelta per la sua caratteristica di produrre pochissimo rumore e vibrazioni, caratteristica ulteriormente aumentata da un supporto autocostruito che la distanzia dal suolo e da qualunque oggetto rigido. Il supporto ha la forma di un telaio in legno e tende come una amaca una stuoia in fibra di cocco che sospende la pompa dal suolo e la distanzia da qualunque oggetto rigido. Il supporto, a forma leggermente arcuata, si poggia al suolo solo su quattro punti.

La campana, la base, gli accessori e le interfacce sub-D 15-pin sono state progettate e fornite dalla Applied Vacuum Engineering di Thornbury (GB). La pompa per il vuoto è stata acquistata di seconda mano da Ebay canadese e revisionata completamente in tutte le sue parti.



*Figura 11 La pompa per il vuoto è sospesa da terra in una sorta di amaca costruita artigianalmente con legno e fibra di cocco.*

## **2.10 Isolamento acustico e delle vibrazioni**

Sono state effettuate delle misurazioni del livello medio e dello spettro acustico del laboratorio sia prima che durante le misurazioni. Allo stesso modo, sono stati effettuati semplici campionamenti dello spettro di vibrazioni percepito sul pavimento.

Le principali sorgenti di rumore acustico nel laboratorio sono il traffico stradale, eventuali estemporanee voci umane nel laboratorio o nel corridoio, ed all'interno del laboratorio il rumore delle ventole di raffreddamento degli strumenti Attocube, in particolare del controller dei nanoposizionatori. Nelle ore serali la fermata degli autobus, a circa 30 metri di distanza, costituisce la principale sorgente di rumore nelle basse frequenze.

La relativa vicinanza della strada, un'arteria principale di Bologna disposta parallelamente all'asse dei cilindri, costituisce anche la principale sorgente di vibrazioni, specialmente in corrispondenza del passaggio dei mezzi pesanti. Le sorgenti più ravvicinate di vibrazioni sono invece il camminare umano nel corridoio di fronte al laboratorio e soprattutto il camminare dell'operatore durante la misurazione.

Un livello non quantificato di isolamento acustico dei cilindri è fornito dal vuoto moderato all'interno della campana di vetro e dalla protezione cilindrica in acrilico anti-implosione, di circa 1 cm di spessore. Quest'ultima ha un'apertura circolare al centro della base superiore che dopo l'attuazione del vuoto viene coperta con un blocco di sughero.



Figura 12 Isolatore da tavolo BM-4 modificato a 0,4 Hz orizzontali.

La base della campana del vuoto poggia sopra una piattaforma antivibrazione da tavolo della Minus-K. Si tratta di una versione del modello 100BM-4 modificata dalla Minus-K per le esigenze dell'esperimento.

Le piattaforme Minus-K sono isolatori passivi di tipo meccanico utilizzando una tecnologia brevettata che combina una meccanica a pendolo invertito e materiali a rigidità negativa. Sono caratterizzate da una frequenza di risonanza inferiore a 1 Hz sia nel piano orizzontale che nella direzione verticale.

I modelli BM-4 hanno una frequenza di risonanza verticale di 0.5 Hz, capace di un assorbimento delle vibrazioni verticali di -40dB per le vibrazioni a 4Hz e di -60dB per le vibrazioni a 12Hz.

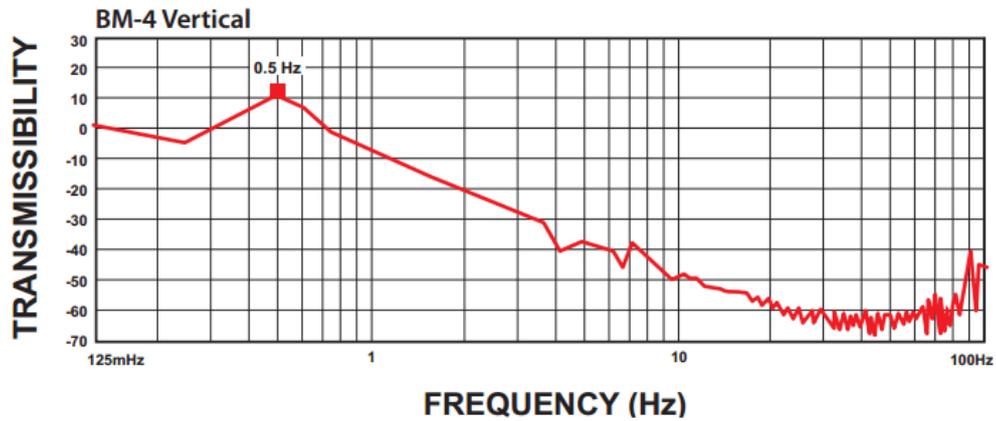


Figura 13 Trasmissibilità delle vibrazioni verticali negli isolatori da tavolo Minus-K BM-4. Illustrazione tratta da BM-4 Bench Top Vibration Isolation Platform, copyright 2012 Minus K Technology, Inc

La frequenza orizzontale dipende invece dalla massa dell'apparato sovrastante. L'attenuazione orizzontale delle vibrazioni, in decibel, fornita dalla macchina, dipende dalla formula:

$$40 \log_{10} \left( \frac{\nu}{f} \right) - 10 = a$$

Dove  $a$  esprime in decibel l'attenuazione di una vibrazione di frequenza  $\nu$  quando la macchina ha una frequenza di risonanza  $f$ .

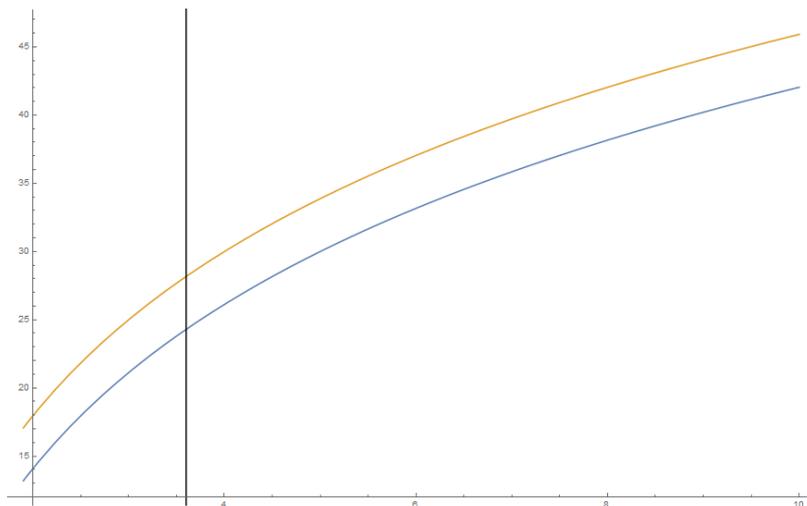


Figura 14 Attenuazione teorica orizzontale in decibel, con isolatore impostato a 0.5 Hz (blu) e a 0.4 Hz (arancione) di frequenza di risonanza.

Nel caso specifico della macchina utilizzata per l'esperimento, essa è stata modificata dalla ditta produttrice per avere una frequenza di risonanza orizzontale di 0.4 Hz per un carico sovrastante compreso tra i 27Kg ed i 30 Kg. La sua frequenza di risonanza verticale è invece 0.5Hz come nel modello standard.



*Figura 15 Il tavolo poggia su semisfere di Sorbothane incollate a terra.*

Il tavolo IKEA modello RINGAMÅLA in legno di betulla, con dimensioni di 119x74x74 cm ed una massa di 24Kg, è stato scelto in base alla stabilità dopo test in negozio. Le sue gambe a sezione quadrata sono unite angolarmente con rondelle antivibrazione.

Le gambe del tavolo poggiano sopra la calotte di semisfere di Sorbothane del diametro di 6.35 cm, le cui basi sono state incollate con biadesivo 3M al pavimento. Le semisfere sono in Sorbothane®, la cui durezza, 50 duro, misurata nella scala Shore 00, è stata scelta in base alla massa calcolata di tutta l'apparecchiatura, tavolo compreso.

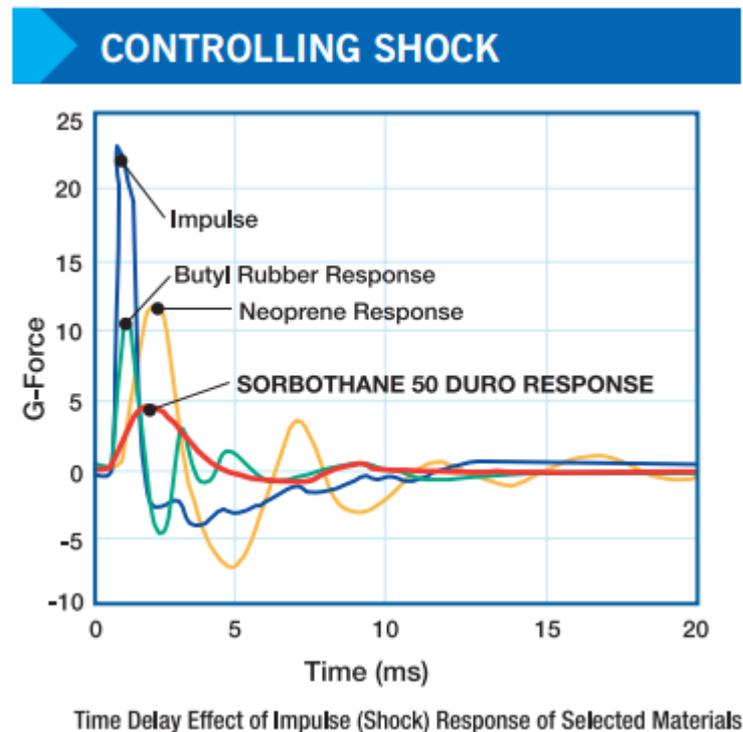


Figura 16 Confronto tra le proprietà isolanti del Sorbothane con altri materiali utilizzati per il contenimento delle accelerazioni esterne. Illustrazione tratta da Data Sheet 102: performance curves, pubblicato da Sorbothane Inc. Copyright Sorbothane Inc, 2015.

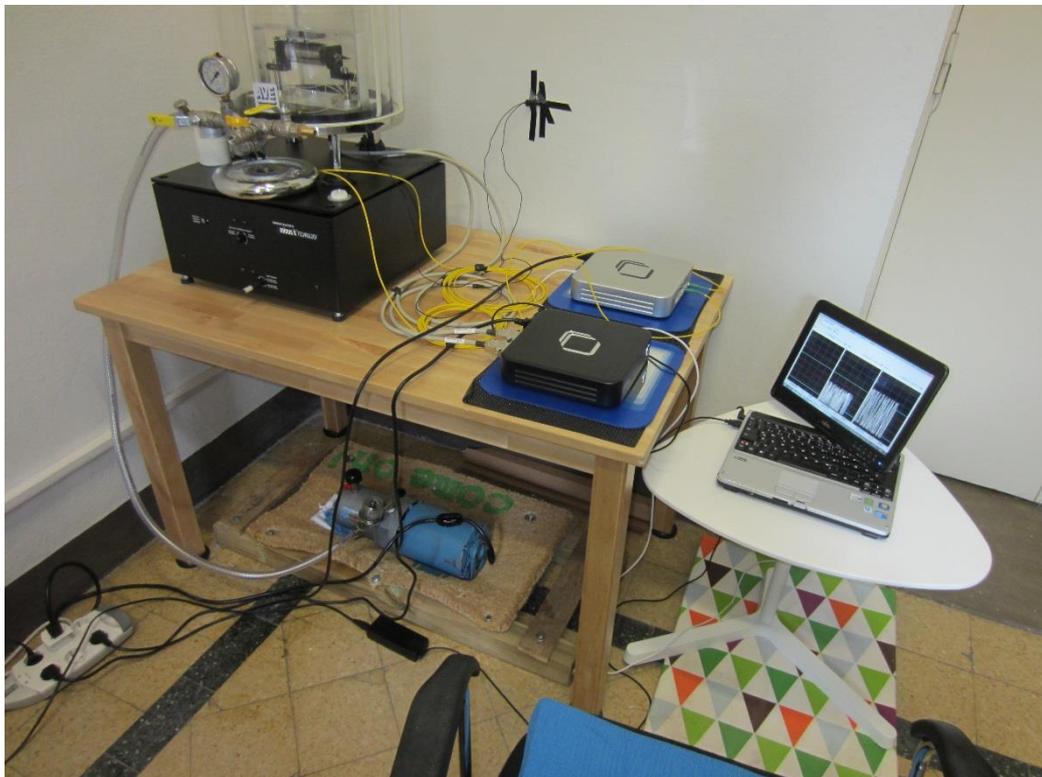
Il Sorbothane è una gomma poliuretanicica a base di polietere con proprietà visco-elastiche sotto stress compressivo simili a quelle di un fluido. Comparato ad altre gomme, esso è un ottimo assorbitore di vibrazioni, in quanto la maggior parte dell'energia trasmessa dalle sollecitazioni meccaniche viene assorbita e trasformata in energia termica, ovvero ha una significativa isteresi, molto maggiore dell'isteresi della gomma naturale.

Oltre all'isolatore delle vibrazioni sul tavolo sono presenti soltanto il controller dei nanoposizionatori piezoelettrici, il sensore di spostamento interferometrico ed i relativi cavi dati e fibre ottiche. I due apparati elettronici, il cui unico contributo di vibrazioni consiste nel moto continuo delle ventole di raffreddamento, sono posti sopra una pesante lastra di vetro specchiato posto a sua volta sopra uno strato di foglio isolante in

Sorbothane con durezza 40 della scala Shore 00.

Tali fogli, estremamente morbidi e flessibili, sono formati da una moltitudine di piccole semi-sfere unite da una superficie dello stesso materiale e sono progettati per l'assorbimento sia delle emissioni acustiche che delle vibrazioni.

Altri accorgimenti sono stati adottati per ridurre le vibrazioni percepite dai pendoli, come ad esempio posare nella seconda prova il computer su un supporto esterno e la base di quest'ultimo sopra un materasso di gommapiuma, materasso su cui anche l'operatore deve posare i piedi durante la misurazione.



*Figura 17 L'operatore è la principale sorgente locale di vibrazioni, quindi deve sedersi su un cuscino di gommapiuma, posare i piedi sul materasso di gomma piuma e possibilmente evitare qualsiasi movimento durante la misurazione. Il tavolino porta computer è regolato più basso del tavolo per evitare rischi di contatto tra loro.*

## 2.11 Il sensore interferometrico di spostamento FPS3010

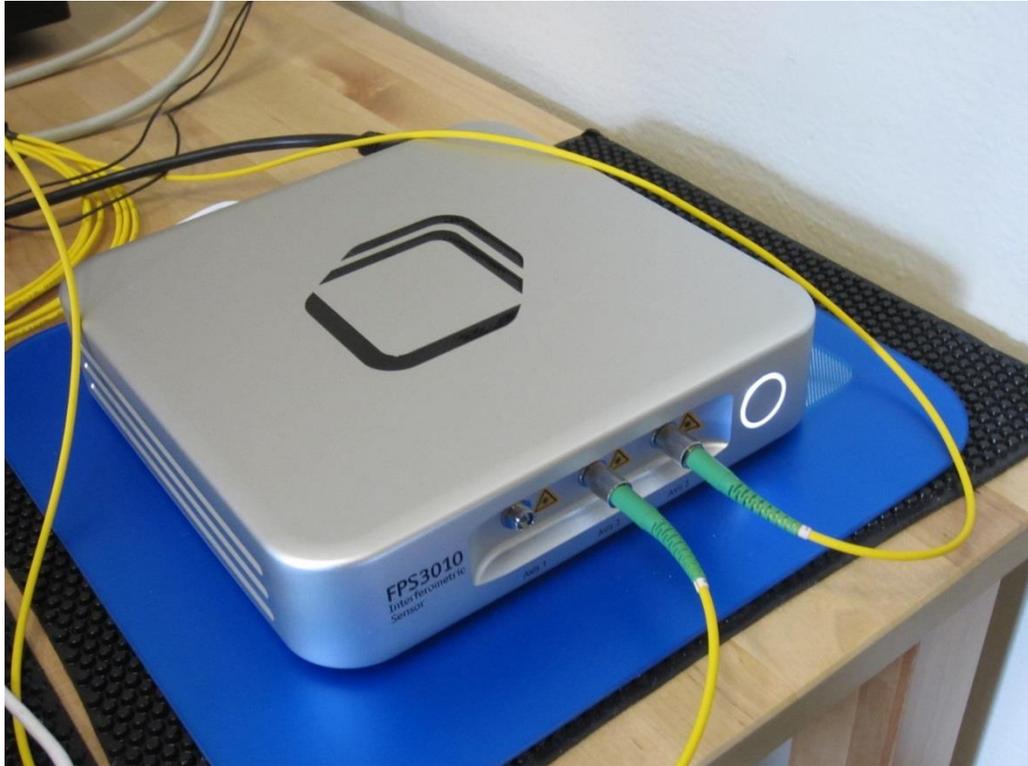
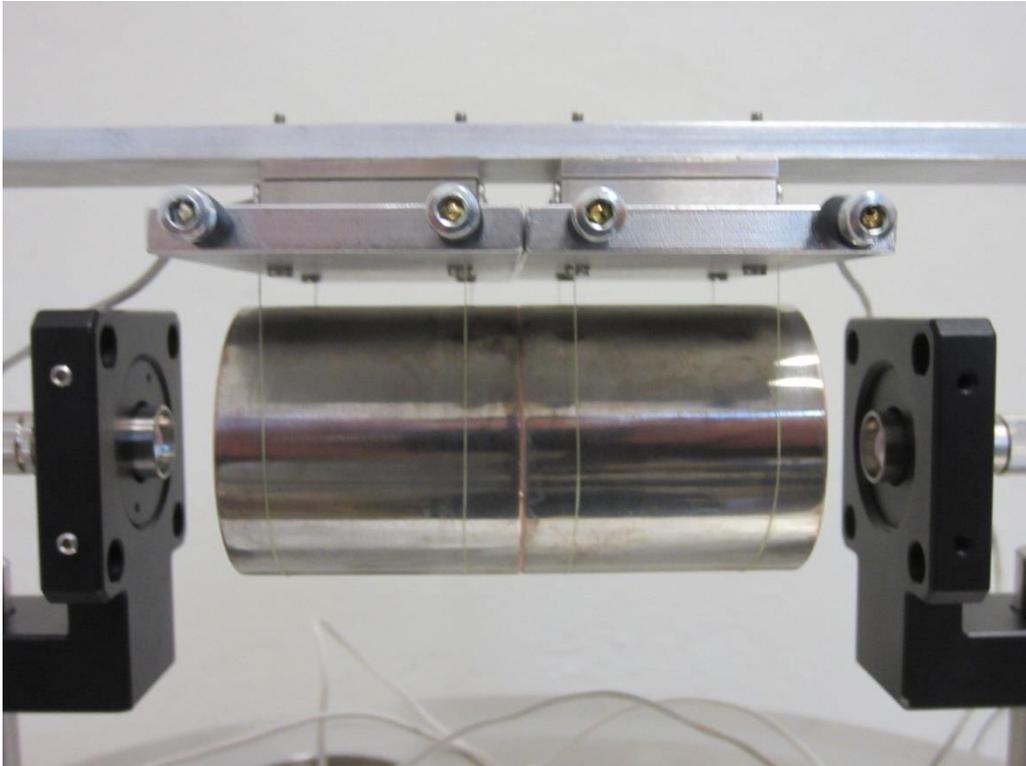


Figura 18 Il sensore interferometrico FPS3010

Il sensore interferometrico di spostamento FPS3030 si basa sull'interferometro di Fabry-Pérot, il quale normalmente utilizza una cavità formata da due elementi riflettenti, ma minimamente trasparenti per creare figure di interferenza dipendenti dalla distanza tra gli specchi.

Nel suo schema più semplice tale interferometro può misurare soltanto spostamenti dell'ordine dei micron con risoluzione dell'ordine dei nanometri (18).

Tale limite è dovuto alla lunghezza d'onda della luce utilizzata, in quanto è essa che determina la ripetizione periodica della stessa figura di interferenza con l'aumentare della distanza. Inoltre un oggetto in avvicinamento od allontanamento determina la stessa variazione periodica della figura, quindi non è possibile misurare in quel modo la direzione del moto.



*Figura 19 Cilindri sospesi in posizione zero. Tra i gli specchi sulle basi dei cilindri e le lenti si formano due cavità di Fabry-Pérot.*

Nel caso dello strumento Attocube, la ditta ha deciso di utilizzare due fasci dello stesso laser modulati in quadratura, ovvero con una differenza di fase di 90 gradi. Le figure di Lissajous ottenute dal fotosensore come interferenza dei segnali di ritorno possono essere demodulate con due procedure differenti.

Nella prima un filtro elettronico passa-basso viene utilizzato in parallelo ad un demodulatore impostato sulla frequenza di modulazione utilizzata.

Nella seconda invece vengono impiegati soltanto due demodulatori, di cui uno impostato alla frequenza di modulazione, ed uno al doppio di essa. La prima procedura si utilizza quando la lente è perfettamente allineata ad una superficie debolmente riflettente, come un vetro, ed è l'unica procedura utilizzabile con le lenti miniaturizzate opzionali.

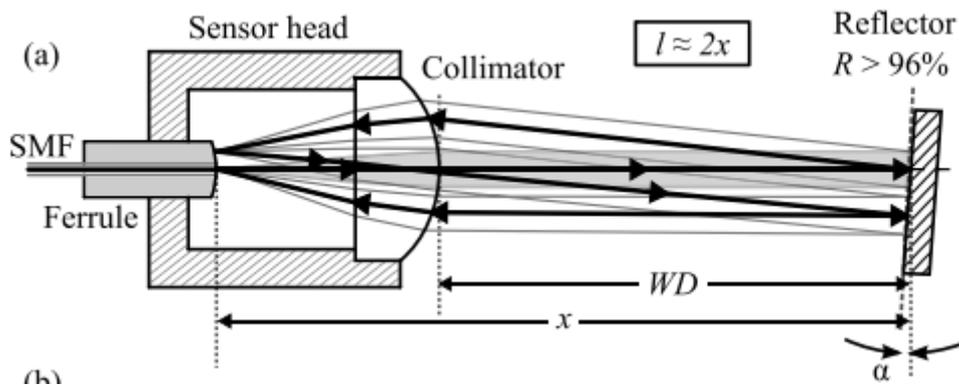


Figura 20 Tra la lente M12 e uno specchio non perfettamente perpendicolare all'asse della lente si generano due cavità di Fabry-Pérot, una di lunghezza doppia all'altra. Immagine tratta da Klaus Thurner et al., *Fiber-based distance sensing interferometry*, *Applied Optics* vol. 50 n. 10, April 2015.

La seconda procedura invece è stata pensata per permettere all'utente, tramite l'utilizzo di lenti di maggiore diametro come le lenti M12 utilizzate nelle prove effettuate, di avere una tolleranza di oltre 4 gradi nell'angolo di riflessione. Tali lenti funzionano sul principio del doppio passaggio, ovvero parte della luce laser riflessa dall'oggetto viene riflessa dalla lente nuovamente verso l'oggetto stesso, e da esso nuovamente verso la lente. In questo modo al fotosensore giungono sia una luce riflessa da una cavità di lunghezza  $x$ , che una luce riflessa da una cavità di lunghezza  $2x$ . L'utilizzo dei due demodulatori permette a questo punto di estrarre le informazioni richieste dal segnale di ritorno.

Un'esigenza per l'utilizzo di quest'ultima procedura è un'altissima riflettività dell'oggetto monitorato alla lunghezza d'onda del laser. Poiché il laser dell'FPS3030 ha una lunghezza d'onda di 1530 nanometri Poiché lo strumento deve essere metricamente validato, i ricercatori di Attocube hanno deciso di utilizzare un diodo laser con lunghezza d'onda regolabile, ed hanno costruito un circuito di controllo continuo di tale parametro. Tale circuito illumina con un fascio secondario del laser una minuscola ampolla contenente Acetilene-12 allo stato gassoso, la cui frequenza di assorbimento è uno standard spettroscopico internazionale.

Utilizzando quindi un fotosensore, viene controllato che l'assorbimento della luce laser sia sempre al massimo livello possibile, in caso contrario la frequenza del laser viene immediatamente corretta. Con tale sistema viene garantita una stabilità della lunghezza d'onda di 50 parti per miliardo.

La lunghezza d'onda del laser viene continuamente stabilizzata tramite il confronto con l'assorbimento di un campione di Acetilene-12 illuminato da un altro fascio del laser. Il doppietto di assorbimento di tale molecola è infatti perfettamente conosciuto e costituisce una standard spettroscopico internazionale.

Le massime prestazioni dello strumento dipendono dalla stabilità dell'indice di rifrazione del mezzo in cui viene creata la cavità: nel caso dell'aria l'indice di rifrazione dipende dalla pressione, dalla temperatura, dall'umidità ed in parte minore dalla percentuale di biossido di carbonio presente. I primi tre parametri possono essere misurati continuamente da una sonda opzionale fornita con lo strumento e connessa ad esso. Tale sonda non è ovviamente necessaria per le misurazioni in camera del vuoto, quindi non è stata noleggiata.

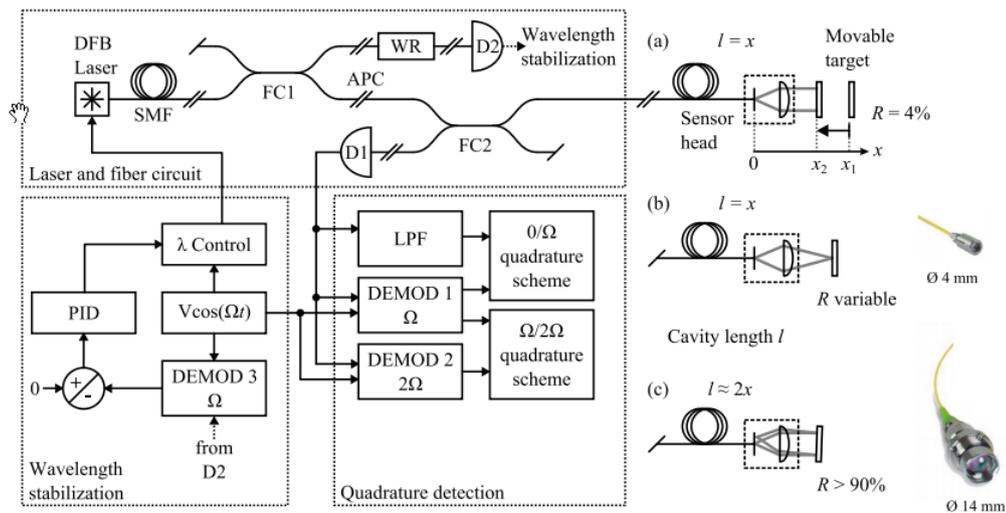


Figura 21 Lo strumento FPS3010 è composto da tre parti principali, l'interferometro in fibra ottica single-mode, il circuito di regolazione fine della lunghezza d'onda del laser, ed il circuito per la demodulazione dei segnali in quadratura. Illustrazione tratta da Klaus Thurner et al., Fiber-based distance sensing interferometry, Applied Optics, vol. 50 n. 10, Aprile 2015.

## 2.12 I cilindri in tungsteno

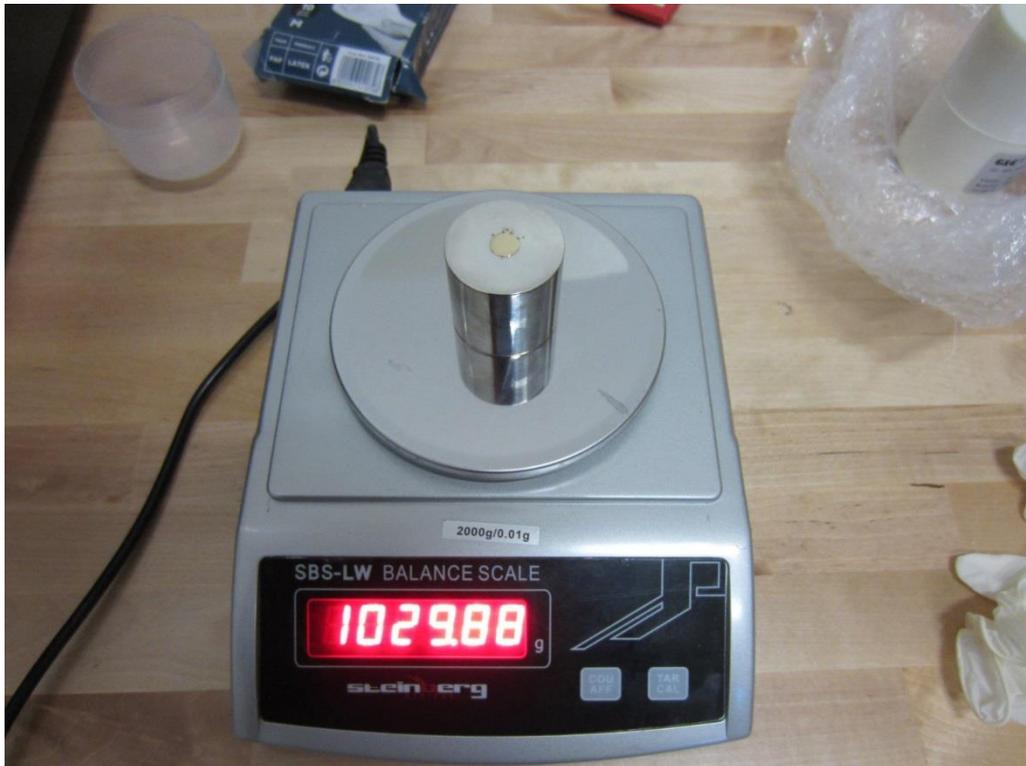


Figura 22 Misurazione della massa del cilindro destro

Le masse attrattive utilizzate nell'esperimento sono cilindri rettangoli in tungsteno quasi puro. Entro i limiti strumentali della macchina a controllo numerico che li ha realizzati, sono cilindri equilateri di diametro 4,1 cm e massa 1030 g quello sinistro e 1029 g quello destro. La loro massa diverge quindi di meno dell'1 per mille e comprende anche lo specchio d'oro puro, del diametro di 10 mm, dello spessore di 0,3 mm e del volume di 23,56 mm<sup>3</sup>. La massa degli specchi non è purtroppo stata misurata ma al volume in oro di ciascuno specchio dovrebbe corrispondere una massa di 455 mg.

I cilindri sono stati realizzati negli USA da un produttore di campioni di elementi chimici che vende i cilindri a scopo museale e didattico. Non esportati verso l'estero, sono stati ottenuti dall'autore tramite la collaborazione di un'amica americana. Gli specchi invece sono stati procurati, lavorati, levigati e saldati al laser dall'orafo Siro Lombardini.

Per distinguere i due cilindri è stato praticato un segno, con un evidenziatore giallo, nel cilindro sinistro, sulla sua base contenete lo specchio.



*Figura 23 Misurazione dei cilindri. La carta goniometrica è stata usata per controllare l'uniformità angolare del diametro e dell'altezza.*

I cilindri sono stati misurati prima con un calibro digitale, con risoluzione 0,01 mm tarato allo zero, poi con un micrometro digitale con risoluzione di 0.001 mm tarato con un campione di lunghezza da 25 mm.

Sono state stampate delle carte goniometriche per controllare se il diametro fosse uguale in ogni direzione, e se le altezze parallele a quella centrale, non misurabile per non rovinare gli specchi, fossero uguali a varie angolazioni dal centro.

Sono stati pesati molte volte, prima e dopo le prove di laboratorio, con una bilancia digitale Steinberg modello SBS-LW con portata di 2 Kg e risoluzione di 10 mg. La bilancia veniva calibrata ogni dieci pesature con un chilogrammo campione di acciaio in classe F2, quindi con un errore massimo di 16 mg, prodotto dalla tedesca G&G, manipolato con i guanti.

Sono state registrate leggere irregolarità nel diametro e nella altezza, che impediscono di definire le misure medie con un errore inferiore ai 50 micron. La variabilità tra le pesature è invece inferiore.

Valori medi misurati	Cilindro sinistro	Cilindro destro
Massa (g) (con specchio)	1029,88±0,02	1029,03±0,02
Altezza (mm)	41,13±0,05	41,08±0,05
Diametro (mm)	41,09±0,05	41,09±0,05

*Tabella 1 Dimensioni e massa dei cilindri*

La differenza tra la densità del cilindro sinistro, 18,85 g/cm<sup>3</sup> e del cilindro destro, 18,89 g/cm<sup>3</sup> è spiegabile dall'incertezza nelle misure.

In ogni caso, i cilindri non raggiungono la densità massima del tungsteno di 19,25 g/cm<sup>3</sup>.

Per mancanza di strumenti adeguati e per non rischiare di danneggiarli non sono state effettuate altre misurazioni sulle proprietà fisiche dei cilindri come ad esempio la suscettibilità magnetica.

## Capitolo 3

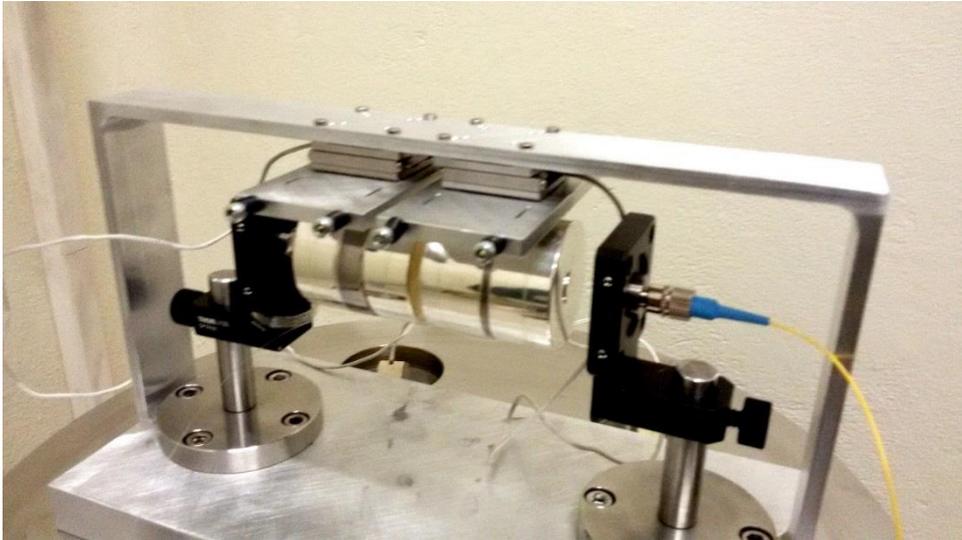
### Prima prova di laboratorio

#### 3.1 Introduzione

La prima prova è stata caratterizzata da una molteplicità di problemi, errori, ed incidenti, tuttavia è stata indispensabile per l'autore per accumulare l'esperienza necessaria per effettuare la seconda prova. Inoltre le poche misurazioni effettuate hanno permesso di comprendere il comportamento dei cilindri come pendoli.



*Figura 24 Setup della prima prova di laboratorio. A differenza della seconda prova, una bilancia con vetro antiscivolo è posta tra l'isolatore e la base della campana, il computer è ospitato sul tavolo e quest'ultimo non è sollevato da terra da semisfere di Sorbothane. A causa della rottura delle fibre ottiche da vuoto, il sistema del vuoto, anche se funzionante, non è stato mai usato nella prima prova.*



*Figura 25 Nella prima prova i cilindri erano placcati in argento e disponevano di uno specchio di argento puro saldato alla loro base. La placcatura del cilindro sinistro era stata parzialmente rimossa nel tentativo di equilibrare perfettamente le masse. Malgrado la fotografia, non sono state effettuate misurazioni con due cilindri nelle prime due prove.*

### **3.2 Metodi progettati ed obiettivi iniziali**

In una camera del vuoto isolata dalla vibrazioni esterne si sospendono con fili, sotto due piastre mobili, due cilindri di uguale massa e dimensioni, paramagnetici ed elettricamente neutri. Ponendo sottili specchi sulle basi opposte dei cilindri e facendo inizialmente combaciare le loro basi adiacenti, si desidera:

- 1) Testare le prestazioni del sensore di spostamento FPS3010 nel tracciamento simultaneo del moto unidimensionale di due corpi massivi, inizialmente a riposo e sottoposti all'azione delle forze gravitazionali.
- 2) Definire la migliore frequenza di campionamento per ottenere una completa descrizione cinematica del sistema dei due corpi limitando al contempo il più possibile la quantità di dati da elaborare.

- 3) Testare le prestazioni dei nanoposizionatori con encoder ottico ECS3030 /NUM /HT nel posizionamento automatico e ripetuto di due corpi da 1 Kg.
- 4) Testare la possibilità tecnica di riprodurre la naturale traiettoria radiale che due corpi ravvicinati ed inizialmente a riposo avrebbero nello spazio tramite l'utilizzo in tempo reale della posizione e velocità istantanee dei cilindri rilevate con l'FPS3010 per calcolare lo spostamento istantaneo necessario dei nanoposizionatori che movimentando le piastre di sospensione dei cilindri fanno in modo che i loro fili di sospensione rimangano sempre verticali, annullando il loro comportamento a pendolo. Tale procedura sarà definita "riproduzione interattiva del libero moto radiale di due corpi nello spazio".
- 5) Testare la possibilità tecnica di riprodurre la naturale traiettoria radiale che due corpi ravvicinati ed inizialmente a riposo avrebbero nello spazio tramite la movimentazione cadenzata delle piastre di sospensione dei cilindri, secondo un algoritmo contenente dati ottenuti da un preliminare studio accurato delle caratteristiche dei due pendoli, della loro oscillazione naturale e della loro interazione gravitazionale a varie distanze. Tale procedura sarà definita "riproduzione predittiva del libero moto radiale di due corpi nello spazio".
- 6) Testare la possibilità di usare la tecnica 4 o la tecnica 5 per realizzare un sistema automatico guidato da un algoritmo in grado di misurare periodicamente la forza gravitazionale tra le due masse campione, con l'obiettivo finale di progettare un sensore di G autonomo, trasportabile e facilmente riproducibile per monitorare la variazione del valore locale di G nel tempo, in diversi luoghi della Terra ed in diverse locazioni dell'orbita terrestre. Il sistema deve essere in grado di valutare i dati sperimentali e gli errori ambientali automaticamente, operando come un vero e proprio sensore.
- 7) In caso le prestazioni dello strumento FPS3030 misurate al punto 1 siano state soddisfacenti, esso viene selezionato per la progettazione della prova in microgravità, e per la prova preliminare di essa, altrimenti l'esperimento deve essere interamente ripetuto con un altro strumento.

### 3.3 Risultati ottenuti

Nell'unico giorno di misurazione sono state eseguite alcune prove in aria utilizzando il solo cilindro sinistro, per caratterizzarlo in quanto pendolo, misurarne il rumore a riposo, le frequenze di risonanza, la risposta agli stimoli impulsivi e alla traslazione con il nanoposizionatore.

La prima misurazione ha riguardato il cilindro a riposo a pressione atmosferica (ma riparato da eventuali correnti d'aria). Un limite di questa misurazione, eseguita a 1,5 kHz, è la sua durata di soli 86 secondi che purtroppo impedisce di osservare frequenze più basse di 12 mHz.

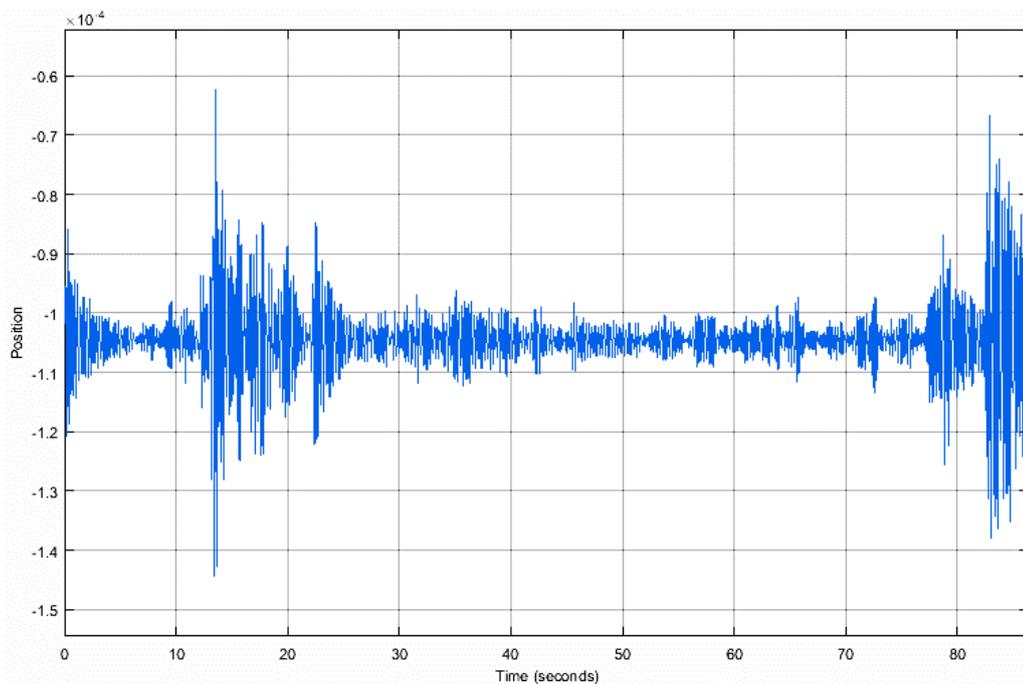


Figura 26 Posizione in metri del cilindro sinistro solo in aria a riposo.

Il cilindro a riposo mostra oscillazioni periodiche di ampiezza variabile tra 1 micron e 43 micron, la maggioranza di esse tuttavia ha ampiezza inferiore ai 9 micron. Non è chiara la causa delle oscillazioni di maggiore ampiezza e periodo di quasi 70 s (14 mHz).

Osservando lo spettro si nota che il rumore è presente a tutte le frequenze tuttavia si nota altrettanto chiaramente l'effetto dell'isolatore in quanto se

non fosse applicato il rumore a bassa frequenza sarebbe molto superiore, come possiamo osservare nella prima misurazione effettuata per la seconda prova (fig. 23).

Possiamo osservare che in entrambi gli spettri il rumore alle frequenze più alte è almeno in parte di origine elettronica, in quanto molto simile al rumore generato per esempio dai vibrometri laser.

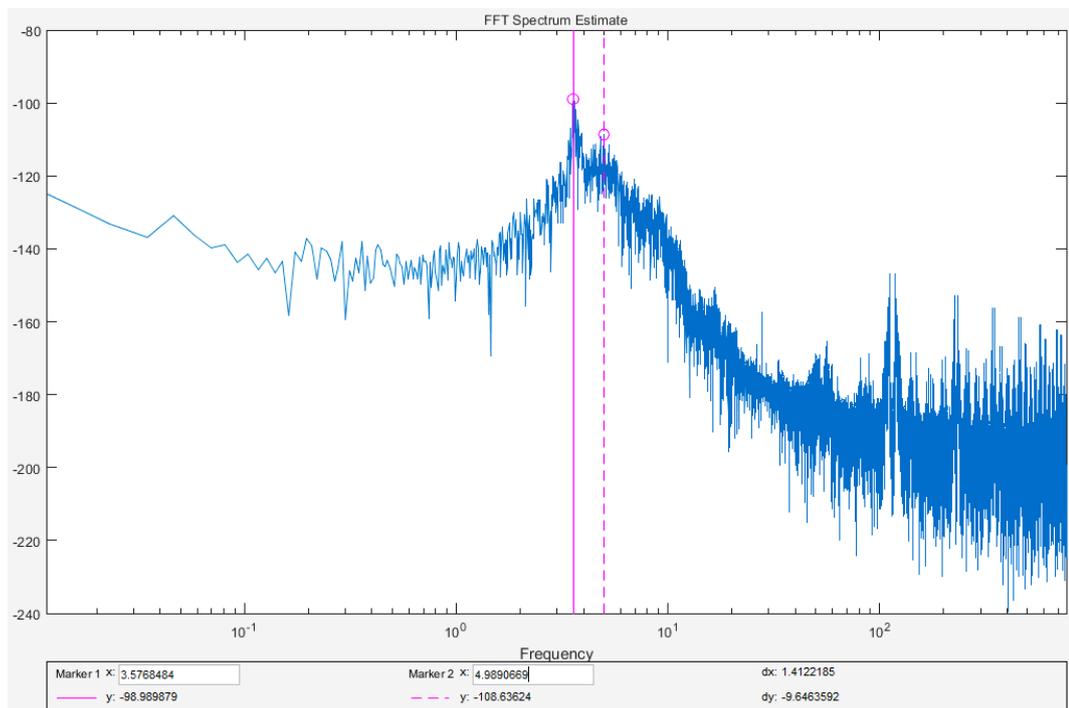
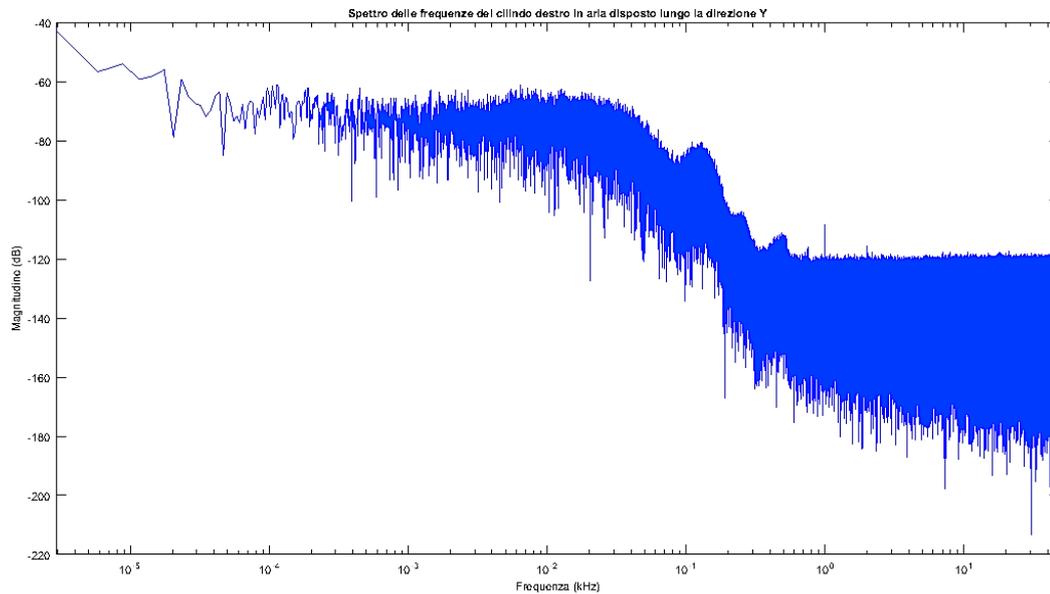


Figura 27 Spettro del cilindro sinistro a riposo in aria con isolatore (v. figura 22). Magnitudine in dB nell'asse verticale, frequenza in Hz nell'asse orizzontale.



*Figura 28 Spettro di rumore del cilindro destro a riposo in aria senza isolatore. Frequenza di campionamento 97,6 kHz. Purtroppo tale misurazione è avvenuta nella direzione perpendicolare a quella dei cilindri ma è utile per visualizzare il rumore presente sul tavolo senza nemmeno le semisfere sotto di esso.*

Ritornando allo spettro precedente, come illustrato, tramite l'applicazione Signal Analysis di Matlab 2015°, è possibile trovare manualmente le frequenze principali del pendolo.

Usando il metodo FFT sul totale dei campionamenti del segnale precedente, si può notare che il pendolo ha una serie di risonanze intorno ai 3,6 Hz ed una seconda risonanza vicinissima a 5,0 Hz.

Ingrandendo lo spettro nella regione della risonanza principale troviamo che lo spettro ha due massimi di ampiezza quasi uguale, a 3,577 Hz e 3,623 Hz, tuttavia il primo è leggermente prevalente.

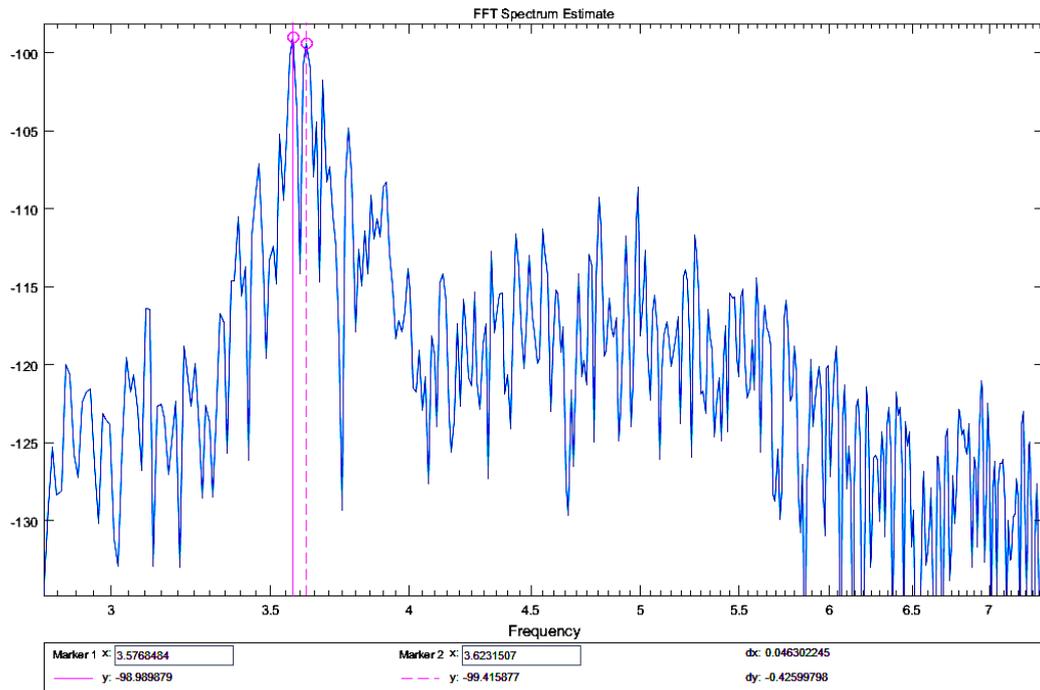


Figura 29 Ingrandimento dello spettro del cilindro sinistro in aria. Magnitudine in dB nell'asse verticale, frequenza in Hz nell'asse orizzontale.

Dopo quella misurazione sono state effettuate due prove della risposta del cilindro ad un stimolo meccanico di tipo impulsivo con il nanoposizionatore (fig. 26).

Sono state ottenute misurazioni molto pulite in quanto il livello di energia impartita al pendolo è stato molto superiore al livello del rumore, cosa che purtroppo non può avvenire con stimolazioni gravitazionali artificiali.

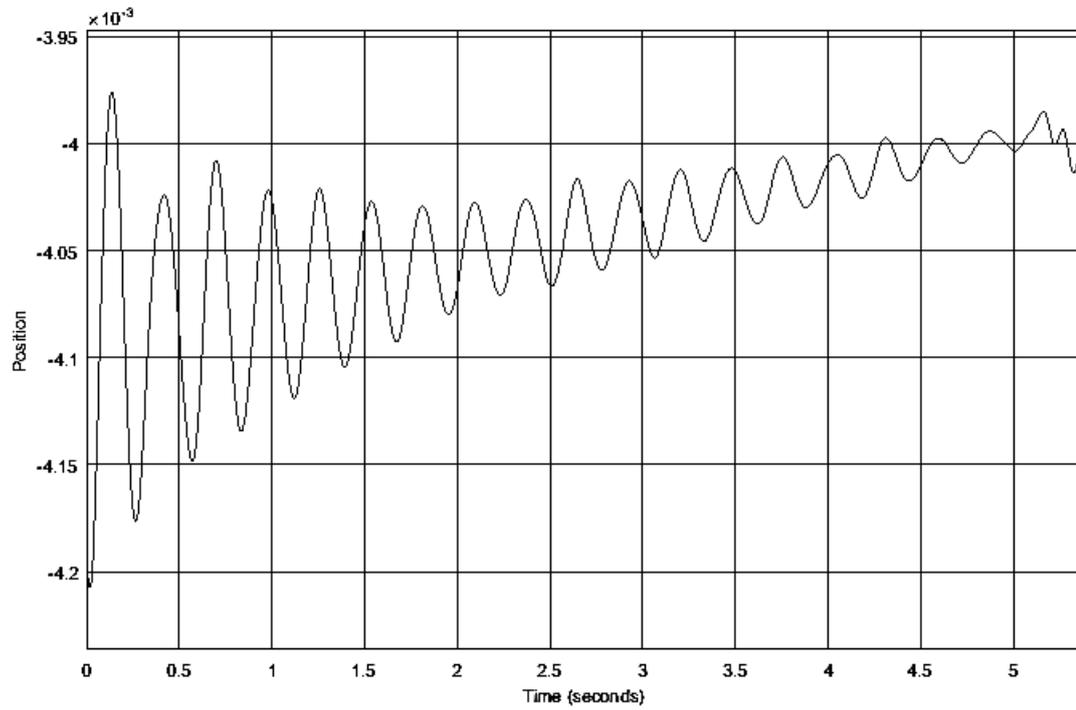


Figura 30 Posizione in metri del cilindro sinistro solo, in aria, dopo un impulso.

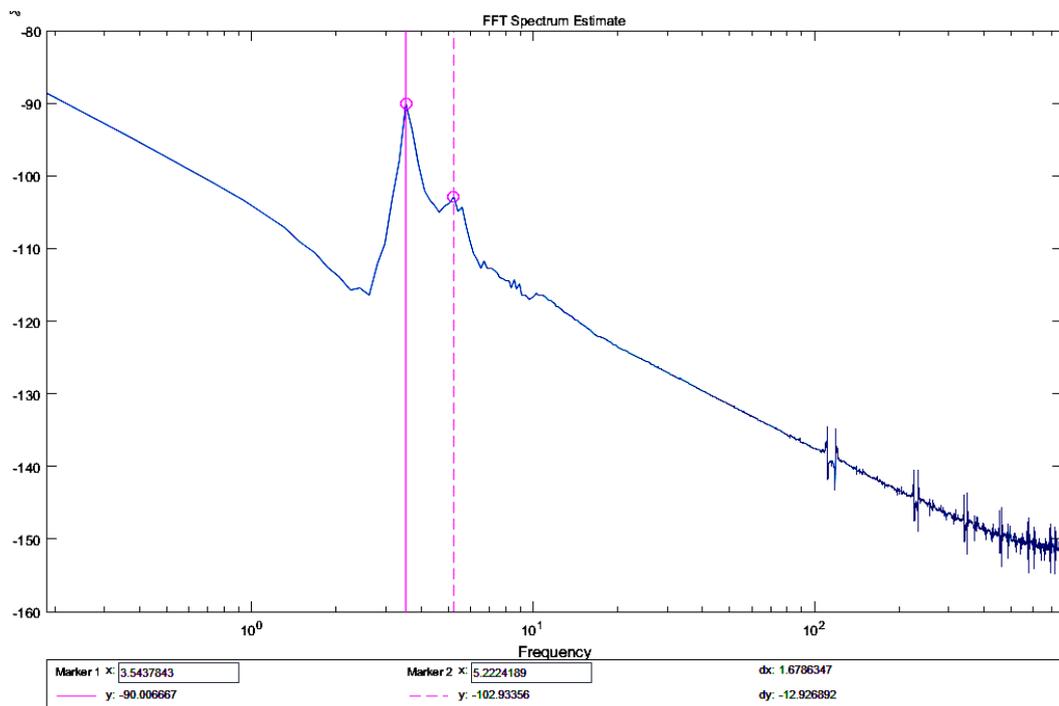


Figura 31 Spettro della misurazione precedente (figura 26). Magnitudine in dB.

Dopo l'impulso ad alta energia il cilindro si comporta come un pendolo di massa elevata e braccio corto sospeso ad una slitta frenata. La massa inerziale combinata del cilindro e della piastra di sospensione è infatti 36 volte la massa inerziale combinata della parte inferiore del posizionatore e della piastra, e ad ogni oscillazione il cilindro provoca un piccolo spostamento del posizionatore, meccanismo che comporta dispersione di energia a causa dell'attrito della slitta, dovuto alla costruzione del posizionatore stesso. Oltre a tale meccanismo, la resistenza dell'aria contribuisce allo smorzamento del cilindro.

Come tutti gli oscillatori armonici, il pendolo dovrebbe avere una frequenza di risonanza smorzata inferiore alla frequenza naturale. Lo spettro FFT conferma una frequenza leggermente inferiore, di 3,544 Hz. Inoltre il secondo dei picchi paralleli nello spettro a riposo, 3,623 Hz, è totalmente assente, mentre ed al posto del picco a 4,989 Hz è presente un picco a 5,222 Hz.

Utilizzando il grafico in figura 26, in particolare la prima e la terza oscillazione, sono stati manualmente misurati e calcolati alcuni parametri del cilindro come oscillatore.

Ampiezza prima oscillazione (micron)	100,374
Ampiezza terza oscillazione (micron)	63,256
Periodo tra le due oscillazioni (sec)	0,562
Decremento logaritmico	0,231
Fattore di smorzamento	0,037
Frequenza smorzata (Hz)	3,559
Frequenza naturale (Hz)	3,561
Fattore Q	13,6
Costante di decadimento	0,82
Costante di tempo	1,22
Costante elastica (N/m)	515,6

*Tabella 2 Caratteristiche del pendolo sinistro calcolate manualmente dal grafico di figura 26.*

Va ricordato che il sistema non era posto sotto la campana di vetro ma era riparato dalle correnti d'aria da una campana in acrilico che lasciava solo 3 mm alla base per il passaggio della fibra ottica. Inoltre l'isolatore delle vibrazioni era ben funzionante sull'asse verticale, e funzionava

parzialmente sull'asse orizzontale. Sul tavolo erano presenti soltanto le componenti elettroniche della Attocube ed il computer portatile.

Sono quindi state effettuate alcune prove di spostamento lento e continuo dei cilindri per vedere se vi era una trasmissione di vibrazioni dal piezoelettrico o altre eccitazioni.

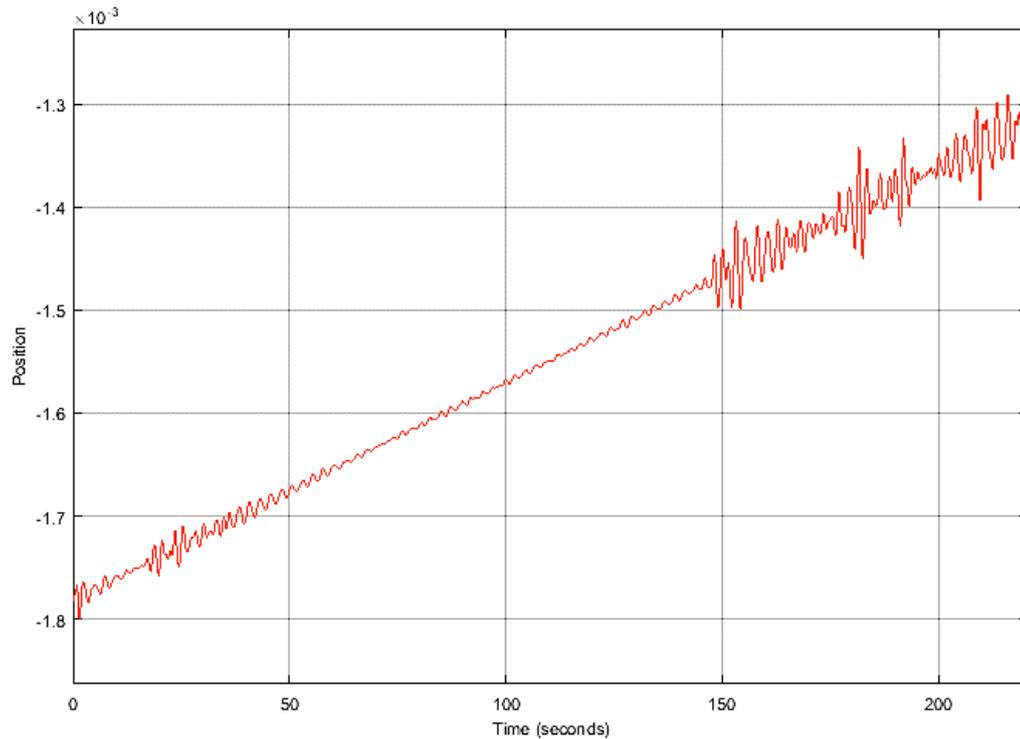


Figura 32 Posizioni in metri del cilindro sinistro durante la traslazione con il posizionario.

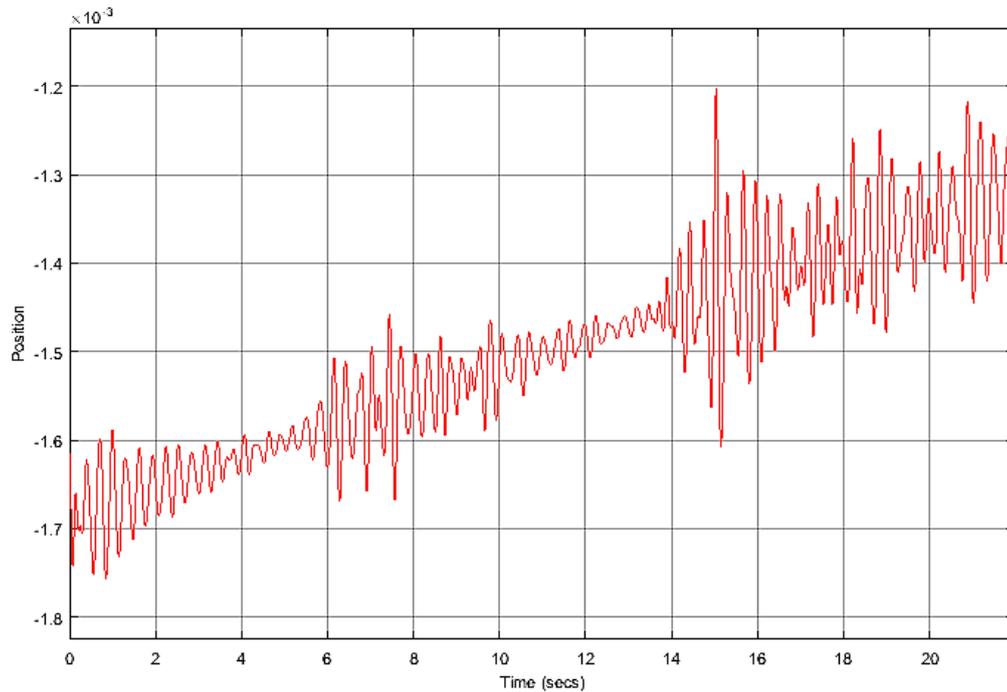


Figura 33 Posizioni in metri durante la traslazione del cilindro sinistro.

In questo caso si è trattato di uno spostamento di 500 micron in 27,6 secondi, con una velocità media di 18 micron al secondo. Come si può vedere anche in assenza di accelerazioni e decelerazioni i cilindri vengono eccitati, tuttavia non è chiaro se la causa delle oscillazioni di maggiore ampiezza sia il moto di traslazione od in altri fattori perturbativi esterni.

Una prova ulteriore (figura 29) non chiarisce la questione, quello che appare è però che lo stato di maggiore energia cinetica, durante il moto di traslazione, non impedisce il manifestarsi degli effetti perturbativi esterni presenti sul cilindro a riposo.

Tuttavia poiché le perturbazioni erano presenti anche nella misurazione iniziale, dove il cilindro era a riposo, è ragionevole pensare che la componente perturbativa esterna sia presente in tutte le misurazioni.

### 3.4 Problemi riscontrati ed errori compiuti

Sono stati compiuti molti errori e sono accaduti numerosissimi problemi durante la prima prova di laboratorio, avvenuta in novembre 2014, che hanno impedito di portare a compimento perfino il punto 1 degli obiettivi. I principali problemi ed errori sono stati:

- 1) L'errore principale è stato programmare il noleggio degli strumenti Attocube troppo in anticipo, quando gli altri apparati non erano ancora stati realizzati ma soltanto progettati e ordinati, e programmare una data troppo ravvicinata. Le motivazioni per queste scelte sono state la forte richiesta di noleggio degli strumenti, che allungava molto i tempi di attesa, e la volontà di avere i risultati elaborati a metà gennaio.
- 2) Il secondo errore è stato considerare inizialmente il sistema del vuoto come alto vuoto, basandosi solo sulle specifiche dichiarate dai produttori della pompa ad olio e della campana, che ha portato Attocube ad offrire per il noleggio delle sottilissime fibre ottiche per alto vuoto. Tali fibre ottiche, lunghe 5m ciascuna ed usate per coprire distanze di meno di 30 cm all'interno della campana, si sono rivelate di difficilissimo utilizzo, tendendo continuamente a creare complicati grovigli. Nell'ennesimo tentativo di sbrogliare tali grovigli e nodi si sono spezzate entrambe.
- 3) Il terzo errore è stato ignorare che i nanoposizionatori, dovendo reggere il carico sottostante, dovevano necessariamente essere installati capovolti. Questo errore, facilmente evitabile con maggiore comunicazione con la Attocube, è stato scoperto soltanto il primo giorno di noleggio grazie alla presenza del Dr. Andreas Straub della Attocube in laboratorio, ed ha comportato la necessità di progettare e realizzare delle nuove piastre di sospensione. Questo errore ha comportato la perdita di due delle tre settimane del primo noleggio, anche se le nuove piastre sono dotate di una tecnologia meccanica molto più sofisticata.
- 4) Inizialmente, l'esperimento era progettato in modo tale che l'isolatore delle vibrazioni Minus-K dovesse essere posizionato all'interno di una camera a medio vuoto, e fosse tarato per una

massa sovrastante tra i 5 ed i 6 Kg (tale stima comprendeva il telaio, ancora soltanto progettato, le piastre, non ancora progettate, i cilindri, già misurati e placcati, i posizionatori, nonché tutta l'ottica ed i suoi supporti, non ancora ordinati). Tuttavia procurarsi una camera del vuoto di dimensioni adeguate, in tempi rapidi ed a prezzi ragionevoli si è rivelato un'impresa molto impegnativa, e dopo vari contatti con aziende per l'acquisto di grandi camere del vuoto usate (da adattare una volta ricevute), o per la costruzione ex-novo di una camera del vuoto personalizzata, l'autore non riusciva a risolvere il problema dei tempi stretti, della necessità di almeno tre porte, e dei limiti di budget. A questo si aggiungevano le complicazioni burocratiche in quanto le camere del vuoto sono considerate beni sensibili dalla legge americana. A questo punto è stato necessario chiedere alla Minus-K di sospendere la costruzione dell'isolatore personalizzato. Il gentilissimo presidente della ditta ha suggerito di porre una camera del vuoto più piccola e reperibile al di sopra dell'isolatore, lasciandolo quindi all'esterno, e ha offerto di adattare a modico prezzo l'isolatore già costruito al nuovo carico. E' stato quindi deciso di affidare alla Applied Vacuum Engineering l'incarico di progettare e costruire urgentemente una campana del vuoto standard con tre porte K40 sulla base di acciaio. E' stato però commesso l'errore di considerare la massa della base della campana dichiarata nel catalogo, ignorando il fatto che questo modello personalizzato aveva tre porte invece di una e di maggiore diametro. A causa di questo errore l'isolatore è stato erroneamente adattato e calibrato dalla Minus-K per avere una frequenza di risonanza orizzontale di 0.4Hz per una massa sovrastante tra i 27Kg ed 30Kg (compresi 5Kg di zavorra) mentre sia a causa dell'utilizzo dell'Ergal per la realizzazione del telaio, sia a causa della più leggera base della campana del vuoto, ci si è trovati ad avere un massa complessiva inferiore. Una volta assemblato l'apparato ci si è subito resi conto che anche utilizzando la zavorra, ovvero il disco d'acciaio da 5Kg visibile nelle foto, non sarebbe stato possibile raggiungere la corretta frequenza orizzontale dell'isolatore, vanificando la sua funzione. Si è deciso quindi di appesantire la struttura aggiungendo il blocco sughero visibile nelle fotografie della seconda prova di laboratorio, posizionandolo sopra il foro centrale del cilindro protettivo in acrilico, e trasformando di fatto la struttura protettiva in un isolatore acustico. Poiché nemmeno quello è stato sufficiente a raggiungere la giusta frequenza orizzontale, si è deciso di

utilizzare delle masse campione utilizzate per la calibrazione della bilancia come ulteriore zavorra, anche perché l'area libera sulla superficie dell'isolatore era molto limitata e non era possibile aggiungere zavorra sulla base della campana, in quanto sarebbe stata troppo vicina ai cilindri. Il problema a questo punto è stato che l'isolatore richiede che la verticale del centro di massa dell'apparato passi dal centro geometrico dell'isolatore stesso, e la struttura, anche senza la zavorra, era già molto asimmetrica, in quanto i rubinetti del vuoto ed il manometro erano concentrati tutti sul lato anteriore della base della campana, mentre i pesanti cavi che congiungevano il controller dei nanoposizionatori alla base della campana ponevano il loro carico sulla destra. Per risolvere quest'ultimo problema è stata riposizionata, per quanto possibile, la base della campana sull'isolatore e sono state sperimentate diverse posizioni dei vari elementi della zavorra, senza tuttavia trovare una soluzione perfetta ma soltanto accettabile.

- 5) Avendo originariamente programmato di utilizzare una camera del vuoto di mezzo metro cubo di volume, erano state ordinate in luglio 2014 due pompe per il vuoto identiche da usare contemporaneamente. Si trattava di modelli di seconda mano usati da un laboratorio canadese, spediti via nave ed arrivati soltanto in settembre. Purtroppo uno dei due modelli è arrivato danneggiato, mentre l'altro modello funzionava esclusivamente a 110V/ 60Hz e avrebbe perso potenza alimentandolo a 110V/ 50Hz con un trasformatore. E' stato quindi necessario smontare le pompe e applicare il motore di una alla testa dell'altra. Tale operazione ha permesso anche di eseguire una profonda ed opportuna pulizia interna della testa della pompa. Completata questa procedura è stato necessario smontare il motore elettrico per sostituire un componente elettronico che creava corto circuito subito dopo l'accensione. Risolti questi problemi, con l'accelerometro Bosch BMA222E integrato in uno smartphone e l'applicazione Accelerometer Monitor per Android è stato misurato lo spettro di vibrazioni prodotte dalla pompa e trasmesse al suolo. Anche se il modello di pompa era stato selezionato per le sue caratteristiche dichiarate di ridottissima emissione di vibrazioni e rumore, il livello di vibrazioni misurato è stato giudicato eccessivo per l'esperimento, ed un sistema artigianale di disaccoppiamento della pompa dal suolo, tramite una combinazione di sospensione ed assorbimento,

è stato progettato dall'autore e costruito in due giorni di lavoro. Subito dopo la campana è stata collegata tramite un tubo flessibile ed un nuovo filtro dell'olio alla pompa, e sono state effettuate le prove del vuoto per misurare le prestazioni della pompa e la tenuta della campana. Le prestazioni del sistema del vuoto sono subito apparse molto buone, tanto che in 24 ore la lancetta del manometro non aveva uno spostamento misurabile, quindi è stato deciso di mantenere la pompa spenta durante le misurazioni.

- 6) Per motivi non chiariti non vi era particolare attrito tra i coni di gomma ai piedi delle colonne della base della campana e la superficie dell'isolatore: la pesante base della campana scivolava molto facilmente sull'isolatore e ciò costituiva un serio pericolo. La soluzione temporanea adottata nella prima prova a questo problema è stato lasciare in loco la bilancia digitale ultrapiatta usata per misurare la massa complessiva dell'apparato. L'attrito tra il cristallo antiscivolo della bilancia ed i piedi delle colonne della campana era infatti ottimo, come pure era ottimo l'attrito tra le gomme alla base della bilancia e la superficie dell'isolatore.
- 7) La realizzazione del software di controllo degli strumenti Attocube per realizzare la "riproduzione interattiva" o la "riproduzione predittiva" del libero moto radiale dei cilindri nello spazio è risultata decisamente ardua per due motivi:
  - a. La prima difficoltà era costituita dalla necessità di sviluppare tutto il software in LabView, un linguaggio proprietario prodotto dalla National Instruments e purtroppo completamente sconosciuto all'autore. Era tuttavia l'unico linguaggio per cui Attocube fornisse le librerie di interfacciamento hardware e l'unico linguaggio utilizzato dagli sviluppatori di Attocube per la realizzazione del software fornito in dotazione. Il limite in questo caso è stato essenzialmente umano: si è rivelato impossibile all'autore impadronirsi del linguaggio velocemente ed al livello necessario e contemporaneamente occuparsi di tutti i problemi tecnici dell'apparato.
  - b. La seconda e non meno importante difficoltà era la necessità di raccogliere preventivamente un grande numero di

osservazioni sperimentali per impostare i parametri degli algoritmi e realizzare un numero non inferiore di osservazioni per valutare la bontà degli algoritmi stessi. Anche se non ci fossero stati problemi con gli apparati sperimentali, difficilmente sarebbe stato possibile svolgere tutto il lavoro necessario nelle tre settimane (non estensibili) di durata del primo noleggio.

- 8) Appena arrivati dagli USA i cilindri di tungsteno presentavano una modesta ma visibile rugosità e numerosi tagli superficiali nelle basi, dovuti al processo di lavorazione ma non visibili nelle foto del produttore. La prima soluzione tentata è stata quella di provare a levigare le basi con una macchina a nastro abrasivo, per poi procedere ad una placcatura completa dei cilindri con argento puro. I tentativi di levigatura a nastro si sono dimostrati vani. L'autore ha voluto proseguire comunque con il processo di placcatura in bagno galvanico, chiedendo al placcatore di creare uno spessore relativamente alto per poter poi procedere ad una levigatura dello strato di argento. Il risultato di questa procedura non è stato quello sperato, in quanto la superficie delle basi era stata riprodotta fedelmente dallo strato di argento, compreso i piccoli solchi che non venivano rimossi nemmeno dalla levigazione dello strato in argento. Si decise quindi di realizzare due specchietti di argento puro, utilizzando argento fuso sottovuoto, tagliato e levigato meccanicamente poi levigato ad acqua. Gli specchi sono poi stati saldati al laser su una base di ciascun cilindro, al centro di essa. Lo strato di placcatura era quindi diventato inutile, e si decise di rimuoverlo parzialmente dal cilindro di massa leggermente maggiore per tentare di parificare le masse dei due cilindri. Anche questa decisione si è rivelata controproducente, in quanto oltre a non parificare perfettamente le masse (era stato asportato troppo argento), l'asimmetria che si era creata sulla sua superficie placcata rendeva più complesso determinare il centro di massa del cilindro. Consigliato dall'orafo Lombardini di rimuovere completamente la placcatura sui lati dei cilindri e lasciarla solo sulle basi per non intaccare gli specchi, l'autore decideva erroneamente di non lavorare ulteriormente i cilindri per la prima prova, per evitare eventuali ulteriori problemi.

- 9) Era stato concordato con l'Attocube l'arrivo dei nanoposizionatori alcuni giorni prima delle tre settimane di noleggio del sensore di spostamento interferometrico. Scopo di questa spedizione anticipata era fare dimestichezza con il loro utilizzo prima dell'uso nell'esperimento, e misurare i parametri degli algoritmi che avrebbero consentito il loro preciso controllo da parte del software per realizzare la "riproduzione interattiva" o la "riproduzione predittiva" del moto dei cilindri nello spazio. I posizionatori sono comandati comunicando al controller una posizione in micron relativa alla posizione zero dell'encoder ottico. Oltre alla nuova posizione, l'utente deve comunicare al controller l'ampiezza in volt la frequenza in Hz con cui il posizionatore verrà movimentato. Selezionare questi parametri è l'unico modo di controllare la velocità dei posizionatori e quindi i test dei primi due giorni sono stati concentrati nel cronometrare spostamenti di 1000 micron con varie ampiezze e frequenze del segnale. Durante questi primi test tuttavia, ad alcuni dei quali era presente anche il Dr. Andreas Straub di Attocube, è stato danneggiato elettricamente l'encoder di uno dei posizionatori, provocando la mancata lettura della posizione ed un forte surriscaldamento del posizionatore stesso. Tale incidente è stato provocato probabilmente da un erroneo utilizzo dell'interfaccia che sostituisce i feedthrough della campana del vuoto durante l'utilizzo in aria, interfaccia collegata per errore tra il controller ECC100 dei posizionatori ed il cavo controller-feedthrough, invece della sua posizione naturale tra quest'ultimo cavo ed il cavetto feedthrough-posizionatori. Il Dr. Straub, che doveva ritornare alla sede di Monaco di Baviera il giorno dopo, prese con sé il nanoposizionatore danneggiato e la ditta Attocube lo rispedì riparato dopo una settimana. Se in questo periodo l'esperimento non fosse stato interrotto dalla riprogettazione e realizzazione delle piastre di sospensione, sarebbe stato interrotto da quest'ultimo problema.
- 10) Durante la riparazione del posizionatore danneggiato, sono continuate le prove con l'altro posizionatore, ma sono state riscontrate delle difficoltà nella modellazione parametrica di esso:
- a. Il controller per quanto sofisticato non sempre riusciva a raggiungere in un solo movimento la posizione desiderata, ed a volte era necessaria una ripetizione del comando per

correggere una differenza di 10 o 20 nanometri tra la posizione richiesta e quella letta dall'encoder con 1 nanometro di risoluzione. Ripetendo il comando il posizionatore raggiungeva perfettamente la posizione desiderata, tuttavia la modellazione della velocità del posizionatore richiede che esso si muova con un solo movimento tra due punti, in modo tale che il tempo di transito sia dipendente solo dalla sinusoide del segnale di comando.

- b. Nelle limitate misurazioni effettuate non è stato possibile testare un elevato numero di combinazioni di ampiezze e frequenze, anche perché solo le velocità più basse sarebbero state utilizzate dal software da sviluppare, tuttavia non si è riusciti a trovare un'esatta dipendenza lineare tra i parametri della sinusoide e la velocità. Forse l'errore umano è stato prevalente nelle misurazioni, in quanto era necessario attivare e fermare manualmente il cronometro, tuttavia una ricerca in letteratura ha suggerito che l'ipotesi di una dipendenza non lineare sia realistica, e possa essere il motivo per cui il software prodotto dalla Attocube consente di specificare una posizione in micron ma non una velocità in micron al secondo. E' possibile ipotizzare che la velocità dipenda non-linearmente da almeno quattro parametri: la posizione di partenza, l'ampiezza e la frequenza del segnale del controller ed il carico connesso al posizionatore (massa inerziale). Purtroppo nella seconda prova di laboratorio non vi è stato il tempo di verificare questa ipotesi.
- c. Originariamente si desiderava poter controllare addirittura l'accelerazione dei posizionatori per farle avere un profilo gaussiano ed evitare le oscillazioni indotte ai cilindri da avvii e fermate troppo brusche. Ovviamente, non potendo controllare con precisione il profilo della velocità istantanea non è nemmeno possibile immaginare di controllare il profilo dell'accelerazione. L'autore ha tuttavia suggerito ad Attocube di aggiungere al software di controllo una modalità opzionale in cui il segnale non raggiunga immediatamente i parametri di frequenza selezionati, per evitare accelerazioni troppo brusche.

- d. I nanoposizionatori sono motori lineari a propulsione piezoelettrica. Il loro moto è controllato dall'espansione e contrazione di due ceramiche piezoelettriche al loro interno e per questo, il loro movimento, in apparenza continuo, è in realtà una successione di piccolissimi scatti. Durante la prima prova, sono state effettuate alcune misurazioni della trasmissione di questi scatti ai cilindri tramite misurazioni di spostamenti lenti e lunghi a velocità costante. Da tali misurazioni si intendeva anche determinare come i cilindri sospesi avrebbero risposto in quanto pendoli ad uno spostamento continuo del loro punto di sospensione. Si è notato che una minima trasmissione di vibrazioni esiste come pure un'eccitazione delle frequenze di risonanza dei pendoli. Inoltre, il moto traslatorio non cancella il rumore normalmente presente nel sistema.
- e. I nanoposizionatori sono composti da due piastre d'acciaio inox, una superiore ed una inferiore, che scorrono tra loro come una slitta su un binario. E' possibile provocarne lo spostamento anche applicando una leggera forza con le dita, in quanto anche se progettati per mantenere la posizione quando non sollecitati elettricamente, essi non dispongono di un forte meccanismo di blocco.

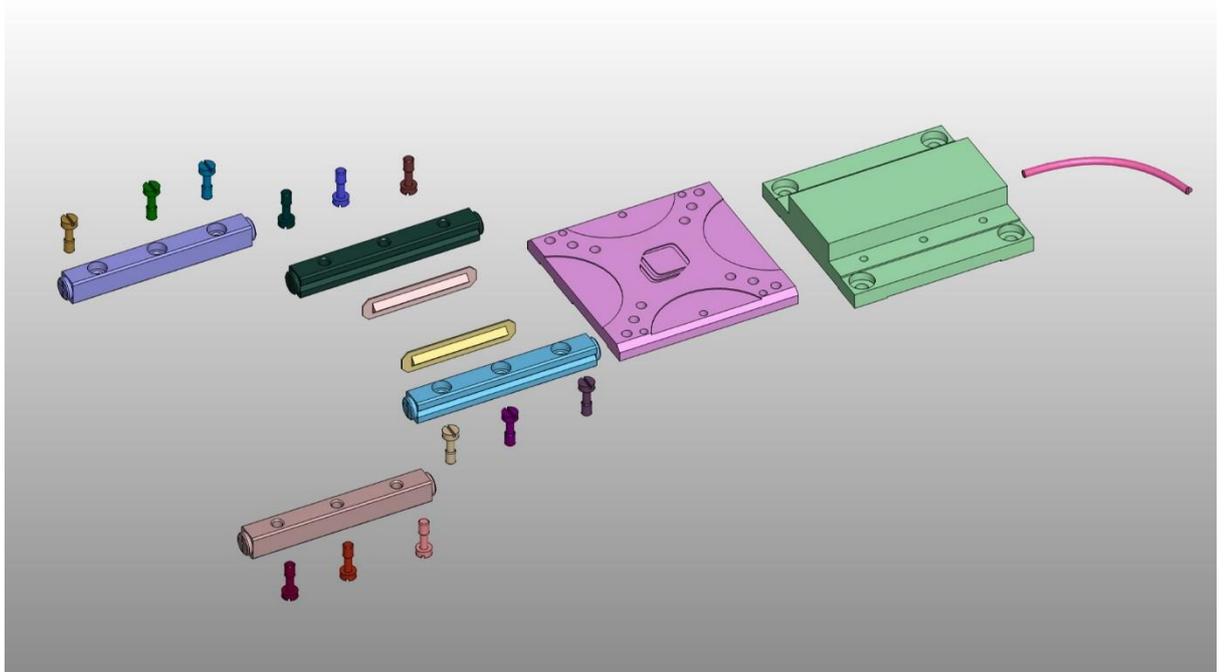


Figura 34 Componenti interne del nanoposizionatore piezoelettrico. Immagine elaborata da un disegno CAD di Attocube.

- 11) Nell'ultimo giorno di misurazione, e penultimo di noleggio, quando i problemi dell'apparato erano stati superati e si tentavano semplici misurazioni dei due cilindri in aria, usando solo la campana di acrilico per isolare i cilindri dagli spostamenti d'aria, una vite di regolazione delle piastre, con un difetto nella scanalatura interna, ha tagliato, durante una rotazione di aggiustamento, il robusto filo di sospensione in Dyneema del cilindro destro, provocando la caduta del cilindro e danneggiando parzialmente il suo specchio di argento. Poiché i fili di sospensione dei due cilindri dovevano essere di lunghezza uguale, in quanto i pendoli dovevano oscillare alla stessa frequenza, per riparare l'apparato nelle pochissime ore di utilizzo rimaste sarebbe stato necessario eseguire nuovamente la complessa operazione di misurazione, taglio, annodatura e calibrazione dei fili per ciascuno dei due cilindri, occupandosi anche di rimuovere i precedenti fili annodati alle sferette d'oro, essendo quest'ultime da riutilizzare per mancanza di sostituzioni. Alla fine venne presa la decisione di utilizzare il poco tempo rimasto per misurazioni del singolo cilindro sinistro, per valutare il livello

di rumore presente, e misurare le principali frequenze di oscillazione.

- 12) Il giorno in cui era obbligatorio spedire gli strumenti alla Attocube, fu deciso di ricreare la sospensione del cilindro destro, per tentare alcune misurazioni del cilindro destro nel sistema a due corpi, ma, forse a causa dell'angolo di riflessione troppo stretto rispetto al metodo di misurazione a due passaggi, ovvero con demodulazione del segnale in quadratura, oppure per altro errore umano, fu impossibile completare l'allineamento del laser, ed ottenere una misurazione. Fu possibile solo fotografare l'apparato con entrambi i cilindri appesi prima di imballare gli strumenti Attocube e spedirli.
- 13) A causa di un ritardo di spedizione e doganale, le semisfere isolanti yin Sorbothane da posizionare sotto il tavolo non erano ancora disponibili durante la prima prova.
- 14) Anche se il computer portatile presente sul tavolo per registrare i dati non veniva toccato dall'autore durante le registrazioni, è risultato evidente che anche un utilizzo molto limitato di esso al di fuori delle registrazioni poteva impartire vibrazioni del tutto evitabili ai cilindri.
- 15) Il modello di portamenti Thorlabs acquistato non disponeva delle viti della regolazione fine nei due assi, rendendo più complesso l'allineamento manuale dei laser, che il primo giorno della seconda prova ha richiesto l'aiuto del relatore.
- 16) Per le caratteristiche della bilancia, il peso di calibrazione avrebbe dovuto essere in classe F1 invece che F2.
- 17) Quando non in tensione il Dyneema pone molta resistenza al taglio, quindi per tagliare i fili di sospensione della lunghezza desiderata sono stati utilizzate forbici da saturazione.

## Capitolo 4

### Seconda prova di laboratorio

#### 4.1 Introduzione

A causa dei problemi riscontrati nel tentativo di usare dinamicamente i posizionatori e di automatizzare l'esperimento, era chiaro fin dall'esito della prima prova che gli obiettivi della seconda prova avrebbero dovuto essere molto più modesti. E' stato dunque programmato un nuovo noleggino di due settimane per il mese di febbraio 2015.

Sono state effettuate modifiche migliorative all'apparato sperimentale:

- a. La rimozione totale della placcatura in argento dalla superficie dei cilindri in tungsteno.
- b. La sostituzione degli specchi in argento puro con specchi d'oro puro levigati ad acqua.
- c. L'installazione delle semisfere isolanti in Sorbothane tra il pavimento del laboratorio ed il tavolo dedicato esclusivamente all'apparato sperimentale.
- d. L'aggiunta di un piccolo tavolo a piantana per non posare il computer portatile di registrazione dei dati sul tavolo dell'apparato.
- e. L'aggiunta di un materasso in gommapiuma su cui poggiare sia la base del tavolino porta-computer, sia i piedi dell'operatore, e l'aggiunta di un cuscino di uguale spessore sulla sedia dell'operatore, che deve restare immobile durante la misurazione.
- f. Le fibre ottiche da alto vuoto sono state sostituite con più robuste fibre ottiche da 3 mm di diametro con rivestimento in gomma, compatibili con il vuoto fino a  $10^{-4}$  mbar.
- g. Le fibre ottiche sono raccolte in appositi rocchetti all'interno della campana.

- h. I pesanti cavi di connessione tra il controller ECC100 ed i nanoposizionatori sono stati riposizionati in modo minimizzare il loro carico laterale sull'isolatore.
- i. Il semi-cilindro in acrilico anti-implosione, che venendo posto sopra la campana dopo aver manualmente controllato la posizione zero dei cilindri provocava vibrazioni degli stessi, limitando la precisione dello zero, è stato dotato di protezioni di gomma piuma adesive (para-spifferi da finestra) lungo il perimetro della base e sulla metà posteriore di tutta la sua superficie interna, limitando moltissimo l'effetto perturbativo della sua installazione.
- j. Il controller dei posizionatori e l'interferometro sono dotati di ventole e possono essere sorgenti di rumore ad alta frequenza nello spettro delle vibrazioni del tavolo e nello spettro acustico, per cui un foglio isolante in Sorbothane, con lavorazione a micro-semisfere, è stato posto sotto ciascuno di essi. Per evitare di interferire con i flussi d'aria di raffreddamento è stato però deciso di porre una lastra di vetro (lavorata a specchio) tra il foglio isolante e lo strumento.
- k. La bilancia digitale in vetro antiscivolo utilizzata nella prima prova per impedire lo scivolamento dei piedi alla base della campana è stata rimossa nella seconda prova e sostituita con tre quadretti di Sorbothane dello spessore di circa un centimetro, posti sotto i tre piedi della campana.

## 4.2 Obiettivi e procedura sperimentale seguita

Sono stati definiti per la seconda prova pochi modesti obiettivi:

- 1) Valutare l'interazione gravitazionale tra due pendoli neutri e di uguale massa, inizialmente a riposo.
- 2) Valutare le prestazioni del sensore FPS3030 nel misurare l'effetto di forze estremamente deboli su masse campione di 1Kg.

- 3) Misurare lo spettro del rumore presente nel sistema per valutare il vantaggio di una misurazione di due corpi in microgravità.
- 4) Utilizzare i nanoposizionatori ECS3030 esclusivamente per collocare i cilindri alle distanze tra le basi desiderate, con un errore massimo di 50 nanometri.
- 5) Trovare empiricamente la tecnica migliore per misurare lo zero iniziale, che non solo è la distanza oltre la quale i cilindri non possono essere avvicinati ulteriormente, ma anche la posizione in cui le basi dei cilindri sono maggiormente combacianti e sovrapposte, e l'asse centrale dei cilindri maggiormente allineato.
- 6) Misurare l'apporto specifico del sistema del vuoto alla riduzione del rumore complessivo del sistema fisico, per valutare l'opportunità di allestire o meno una camera del vuoto nell'esperimento in microgravità.
- 7) Valutare la facilità di auto-allineamento dello strumento con i nuovi specchi in oro puro applicati ai cilindri al posto dei precedenti in argento, per comprendere se un'eventuale placcatura in oro delle masse campione usate per l'esperimento in microgravità possa portare dei vantaggi anche dal punto di vista ottico, oltre che elettrostatico.

Per eseguire le misurazioni è stata sempre seguita la stessa procedura:

- 1) L'interferometro ed il controller dei posizionatori venivano attivati circa una mezz'ora prima dell'inizio delle misurazioni per consentire all'apparecchiature elettroniche di stabilizzare la temperatura interna.
- 2) Venivano pulite le lenti e le connessioni delle fibre ottiche.
- 3) Veniva accesa la pompa con il rubinetto chiuso per pulire il filtro dell'olio e rimuovere eventuale olio presente nei tubi.
- 4) Prima di ogni ciclo di misurazioni i cilindri venivano portati a zero, inizialmente manipolandoli delicatamente con le mani senza guanti.

- 5) Veniva effettuato il test del passaggio della luce (la luce di una torcia led bianca posta dietro i cilindri in corrispondenza della loro separazione non doveva essere direttamente visibile da un operatore posto di fronte ai cilindri e con lo sguardo dell'occhio aperto in direzione della sorgente di luce)
- 6) I cilindri venivano delicatamente posti in contatto con un conduttore connesso a terra ed alla base della campana per tentare di scaricare eventuali cariche trasmesse con la manipolazione senza guanti. (Questo modo di scaricare i cilindri era probabilmente poco efficace, quindi è stato un errore. Il modo giusto di scaricarli sarebbe probabilmente stato porli direttamente a contatto con una sfera conduttiva molto più grande di loro).
- 7) Venivano allineate manualmente le lenti dell'interferometro controllando la potenza del segnale di ritorno. Se necessario, si utilizzava prima il laser a luce visibile.
- 8) L'interferometro veniva resettato e dopo un auto-allineamento fine incominciava a mostrare il moto dei cilindri.
- 9) Con molta delicatezza veniva posata la campana di vetro e subito dopo la protezione anti-implosione.
- 10) Veniva creato il vuoto, sfiatando regolarmente la pompa, fino al raggiungimento del fondo scala del manometro.
- 11) Venivano chiusi i rubinetti del vuoto e poi spenta la pompa.
- 12) Veniva posizionato il blocco di sughero sopra la protezione anti-implosione, al centro di essa.
- 13) Veniva ricalibrato l'isolatore di vibrazioni.
- 14) I cilindri venivano lentamente movimentati con i posizionatori per la calibrazione dell'encoder ottico di quest'ultimi.

- 15) Veniva creato lo zero nuovamente tra i cilindri, ma in questo caso con i nanoposizionatori, portando i cilindri prima un cilindro nella posizione che l'encoder riconosceva come zero, poi avvicinando l'altro con movimenti sempre più piccoli e lenti, fino a che il moto di uno dei due cilindri non provoca un lieve spostamento dell'altro cilindro nella schermata che mostrava le letture in tempo reale dei canali dell'interferometro. A quel punto veniva effettuato uno spostamento in senso opposto della stessa entità, ad esempio 10 nanometri.
- 16) Per sicurezza veniva nuovamente effettuato il test della luce attraverso la campana.
- 17) Veniva dichiarato all'interferometro che le posizioni correnti erano gli zero da cui calcolare gli spostamenti relativi.
- 18) A questo punto uno dei due cilindri veniva spostato della distanza  $x$ , ad esempio 100 micron.
- 19) Spesso si attendeva un minuto o due per consentire una dissipazione della stimolazione. A volte, di proposito, ciò non è stato fatto.
- 20) Si impostava la frequenza di campionamento e si iniziava la registrazione, che veniva mantenuta nella RAM del computer fino al momento dello stop.
- 21) Durante la registrazione l'operatore cercava di rimanere immobile e con i piedi sul materasso di gomma piuma.
- 22) Si fermava la registrazione.
- 23) Si controllava la temperatura ambiente e le letture degli encoder dei posizionatori.
- 24) Si salvava il file con un nome contenente la separazione tra le basi, la temperatura dell'aria, le posizioni iniziali e finali dichiarate dall'encoder (a volte si leggevano spostamenti fino a 200 nanometri) ed eventuali note (ad esempio "cancellare ultimi 10 secondi").

- 25) Si portava lo stesso cilindro precedentemente movimentato verso un'altra posizione.

### 4.3 Risultati ottenuti

Sono state eseguite oltre 50 misurazioni, la maggior parte delle quali ha riportato un spostamento verso destra di entrambi i cilindri. Come descritto nel paragrafo relativo agli errori, la causa di questo spostamento non è conosciuta ma un'ipotesi è che si verificasse una leggerissima inclinazione progressiva della base della campana a causa dell'asimmetria del suo carico e del fatto che tra i suoi piedi e l'isolatore erano stati posti dei morbidi quadrati di Sorbothane.

Ogni misurazione è stata purtroppo affetta da una notevole quantità di rumore, dovuta tuttavia non allo strumento di misurazione od alle altri componenti del sistema ottico ma a movimenti spuri di varia natura e frequenza.

Come si può vedere dalle figure successive, visualizzando i dati grezzi senza operazioni di riduzione del rumore gli spostamenti dei centri di massa dei cilindri sono difficilmente inintelligibili.

Dopo molti tentativi errati da parte dell'autore, è finalmente stato trovato il metodo di pulitura più adeguato. La funzione `smoothing()` di Matlab 2015a utilizza come standard il metodo della media mobile, *sliding mean* in inglese, tipicamente applicato all'analisi dei dati di borsa di lungo periodo.

La funzione accetta come input opzionale le dimensioni dell'intervallo su cui deve essere effettuata la pulitura, e come è stato scoperto dopo altri errori, questo intervallo deve essere abbastanza grande da permettere di ridurre il rumore ma non talmente grande da nascondere informazioni essenziali per la comprensione del sistema fisico.

È stato scoperto che per il tipo e la qualità dei dati raccolti, il migliore procedimento di visualizzazione a scopo di valutazione consiste nella applicazione della procedura di *smoothing* due volte in successione, con un taglio dei primi e degli ultimi 5000 elementi della serie temporale dopo ogni elaborazione allo scopo di eliminare gli artefatti creati dalla procedura.

Si è visto conveniente utilizzare come intervallo per il primo *smoothing* la stessa frequenza di campionamento con cui la misurazione è stata effettuata. Come intervallo per il secondo *smoothing* è conveniente usare un multiplo della frequenza di campionamento. Per omogeneità dei risultati è stato deciso di usare uno *smoothing* di 7 volte la frequenza di campionamento.

Con questa semplice procedura sono stati creati manualmente (ovvero individualmente per ogni misurazione) dei grafici di ogni misurazione effettuata nelle prove di laboratorio.

I grafici effettuati in questo modo sono stati classificati in base al comportamento cinematico complessivo dei due cilindri durante la misurazione.

- 1) In 10 misurazioni i cilindri esibiscono un moto chiaramente attrattivo.
- 2) In nessuna misurazione i cilindri mostrano un moto di tipo repulsivo.
- 3) In 24 misurazioni i cilindri si muovono, con spostamenti lenti o veloci, di ridotta o notevole ampiezza, ma alla fine delle registrazioni si trovano approssimativamente nella stessa posizione iniziale. Sono stati classificati come ambigui, anche se in alcune di queste misurazioni ci sono intervalli in cui il moto è attrattivo.
- 4) In 29 misurazioni i cilindri compiono un chiaro moto entrambi nella stessa direzione, da sinistra verso destra.
- 5) In 3 misurazioni i cilindri procedono entrambi da destra verso sinistra.
- 6) In 6 misurazioni i cilindri sono stati volutamente portati a contatto tra loro, per studiare il loro comportamento a distanza virtualmente nulla. In 4 di queste misurazioni il sistema dei due cilindri si muove all'unisono verso destra. In 1 misurazione si muovono ambigualmente con leggera tendenza verso la sinistra. In un caso sembrano attrarsi fortemente, forse perché per errore erano a distanza ridottissima ma non a contatto.

- 7) Quasi tutte le misurazioni attrattive e quelle dirette verso destra descrivono uno spostamento approssimativamente lineare a velocità quasi costante nel tempo, tuttavia in alcuni casi di entrambi i gruppi la pendenza della retta descritta dallo spostamento del cilindro sinistro non è uguale a quella del cilindro destro.
- 8) Ci sono tuttavia esempi di spostamenti di tipo attrattivo non lineare, sia iperbolico che parabolico. Non si tratta tuttavia di misurazioni intere, ma di parti di esse. Tuttavia poiché le registrazioni hanno tutte avuto una durata compresa tra i 5 ed i 15 minuti, una parte di esse ha una durata valutabile in minuti. Alla frequenza più utilizzata nelle registrazioni, 1,5259 kHz, 2 minuti corrispondono a 183105 campionamenti, quindi si tratta probabilmente di dati significativi.

In molte delle misurazioni in cui i cilindri tendono entrambi a spostarsi verso destra si è visto che sottraendo la posizione istantanea del cilindro destro a quella corrispondente del cilindro sinistro, ed applicando due livelli di *smoothing* alla curva ottenuta, loro distanza di separazione diminuisce in modo evidente nel corso del tempo, quindi l'effetto di una forza attrattiva è chiaramente riconoscibile.

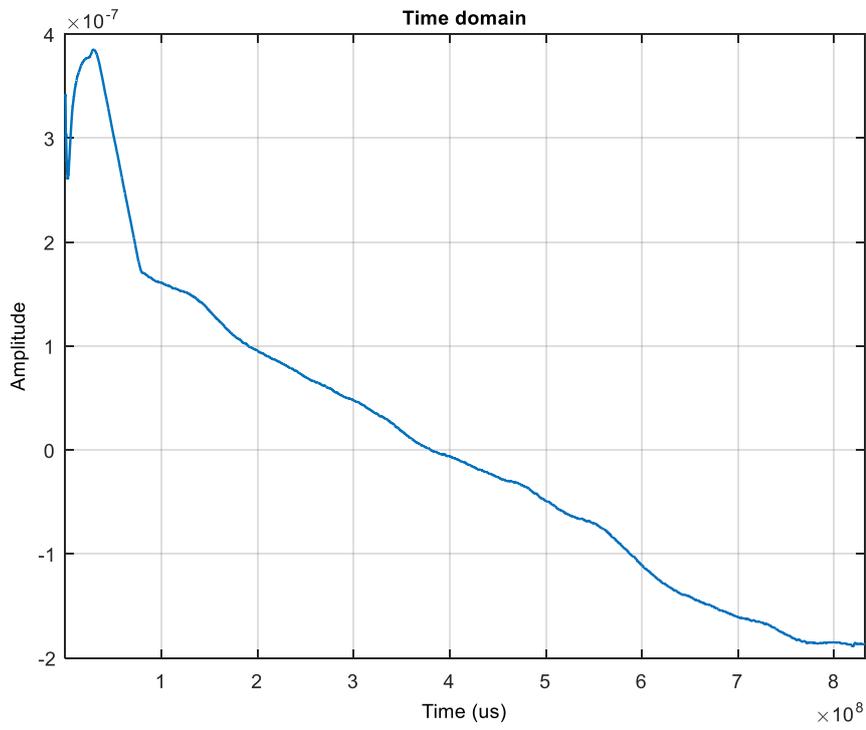


Figura 35 Distanza in m tra i cilindri a 50 micron di separazione iniziale.

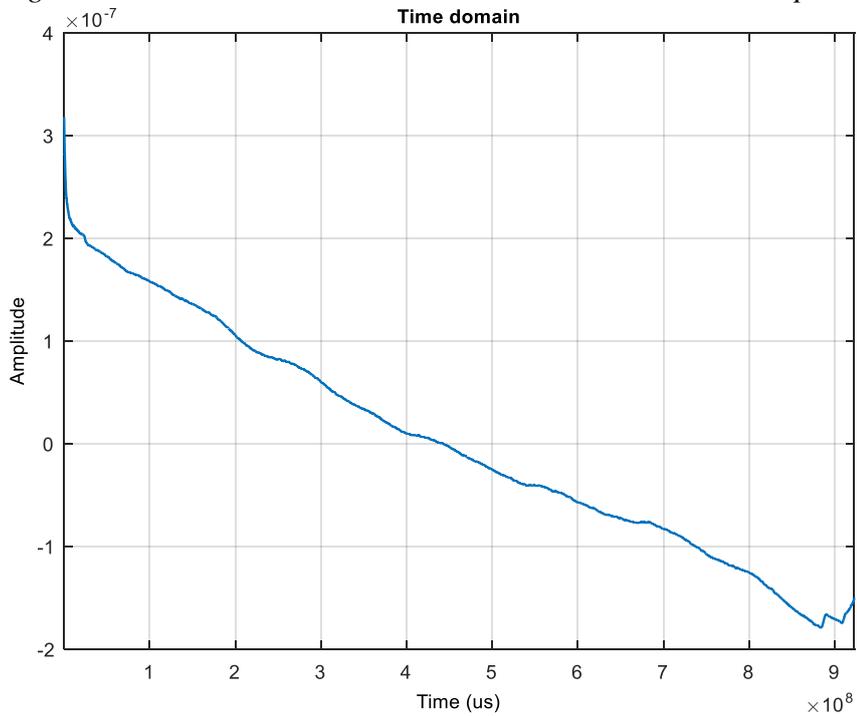


Figura 36 Distanza in m tra i cilindri a 100 micron di separazione iniziale.

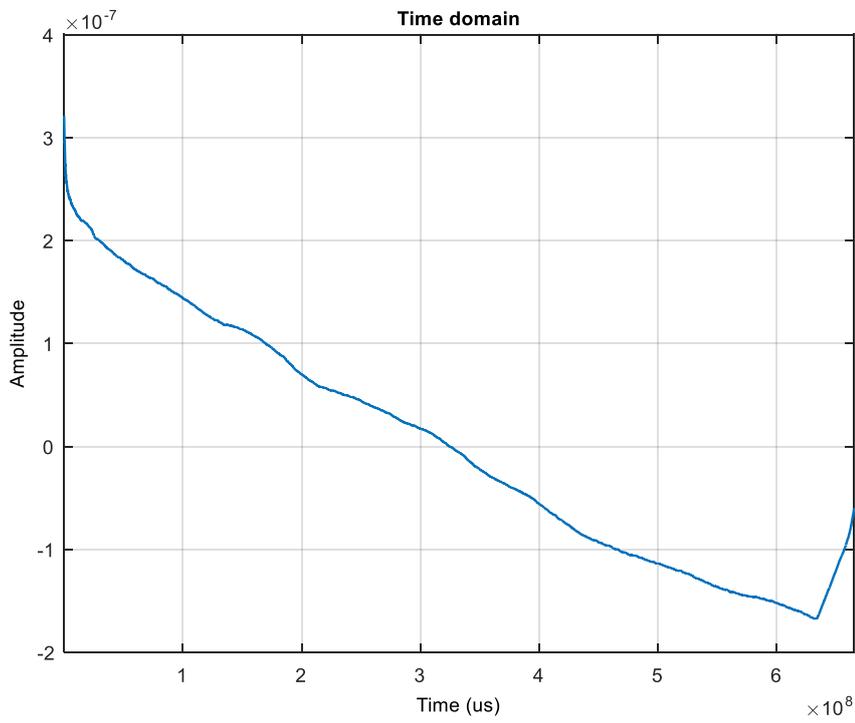


Figura 37 Distanza in m tra i cilindri a 500 micron di separazione iniziale.

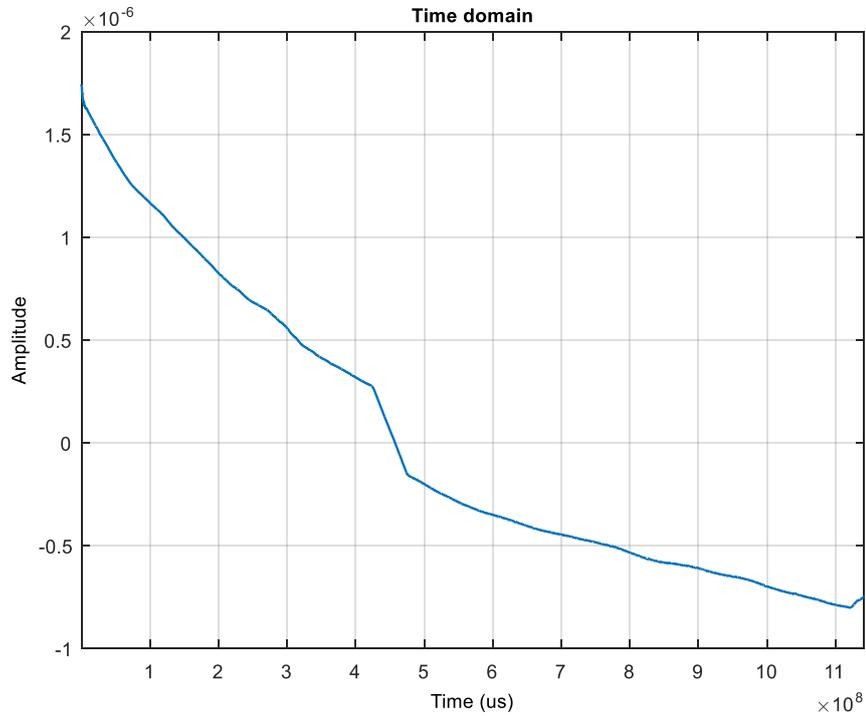


Figura 38 Distanza in m tra i cilindri a 1000 micron di separazione iniziale.

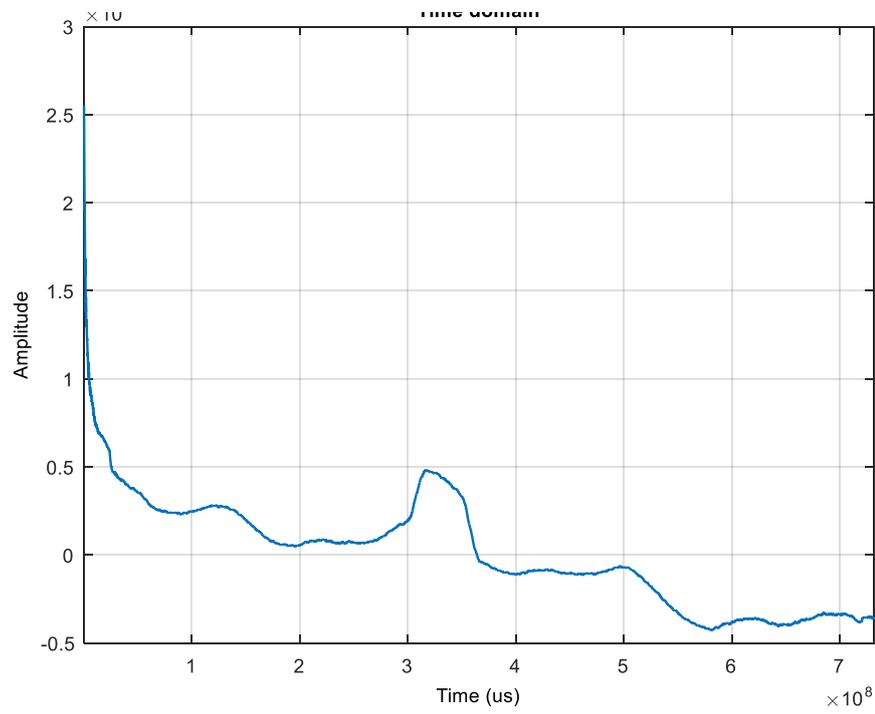


Figura 39 Distanza in m tra i cilindri a 2000 micron di distanza iniziale.

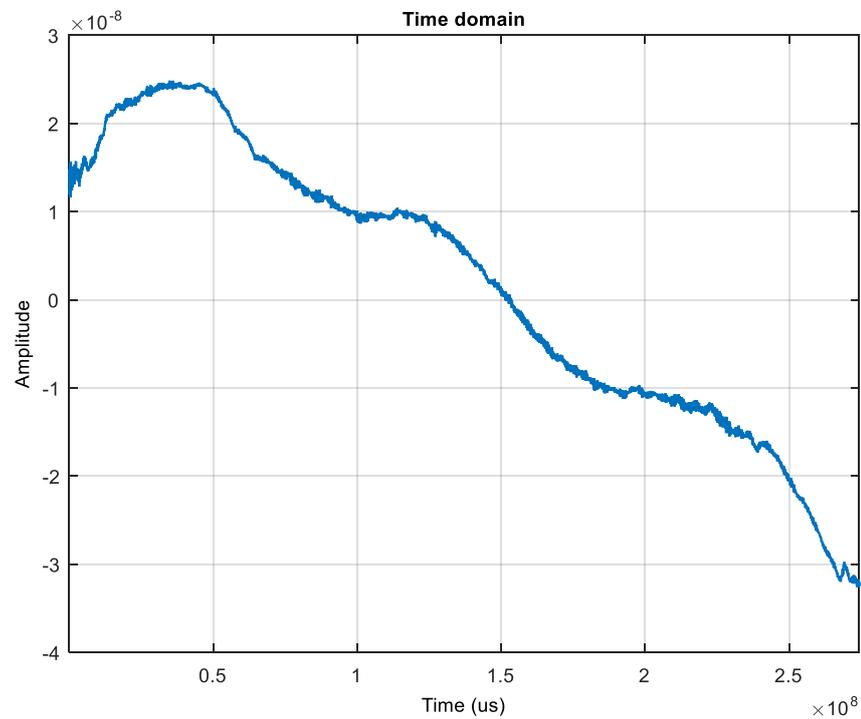


Figura 40 Distanza in m tra i cilindri a 5000 micron di distanza iniziale

Come specificato precedentemente, alcune misurazioni effettuate mostrano invece un moto direttamente attrattivo tra le masse, senza alcuno spostamento verso destra, quindi invece di calcolarne la distanza è sufficiente visualizzare le posizioni assolute dei cilindri, calcolate dallo strumento rispetto alla posizione zero, ovvero il momento in cui è stato resettato lo strumento.

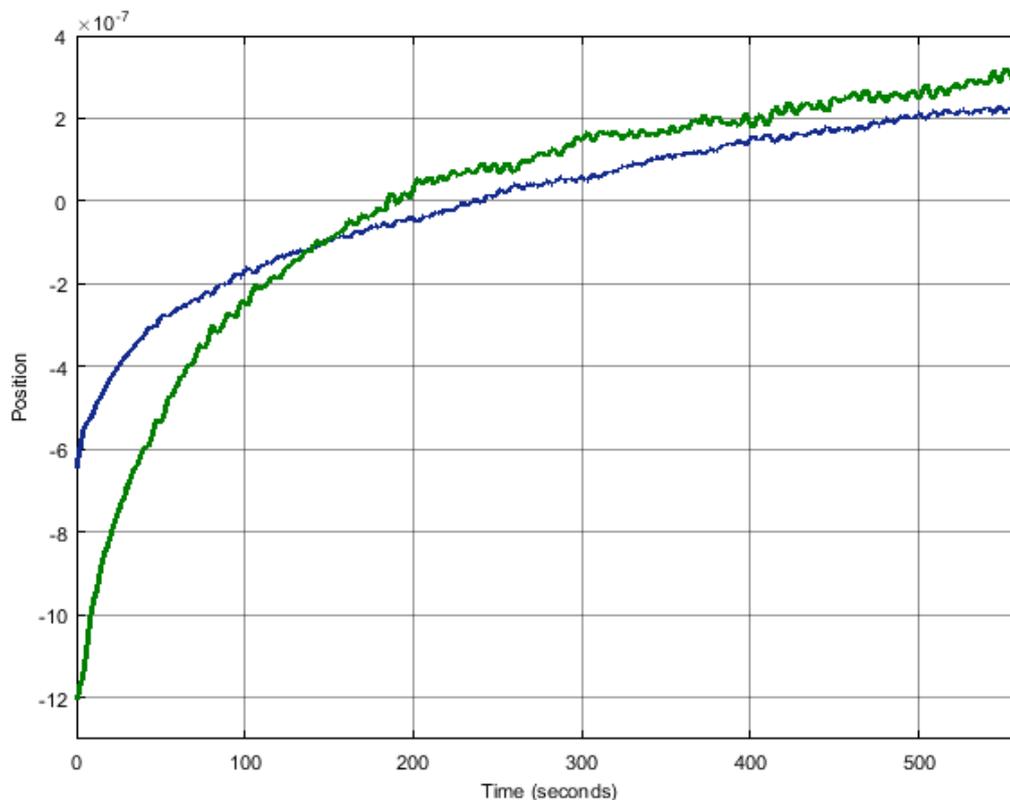


Figura 41 Posizioni in m dei cilindri a 300 micron di separazione iniziale.

Le due curve rappresentano la posizione rispetto al tempo dei due cilindri. Poiché le lenti puntano una contro l'altra, in caso di moto attrattivo lo spostamento finale deve essere positivo in entrambi gli assi.

La misurazione mostra chiaramente la variazione nel tempo dell'asse di oscillazione dei due pendoli. Come si può vedere, la velocità di avvicinamento diminuisce nel tempo in quanto il sistema tende a stabilizzarsi.

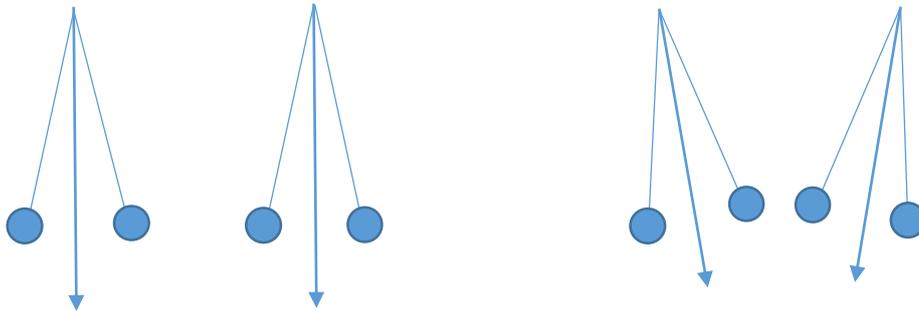


Figura 42 L'attrazione gravitazionale provoca una rotazione dell'asse di oscillazione dei pendoli. Questa rotazione avviene a velocità decrescente in quanto i pendolo si stabilizzano gradualmente in un nuovo stato di energia.

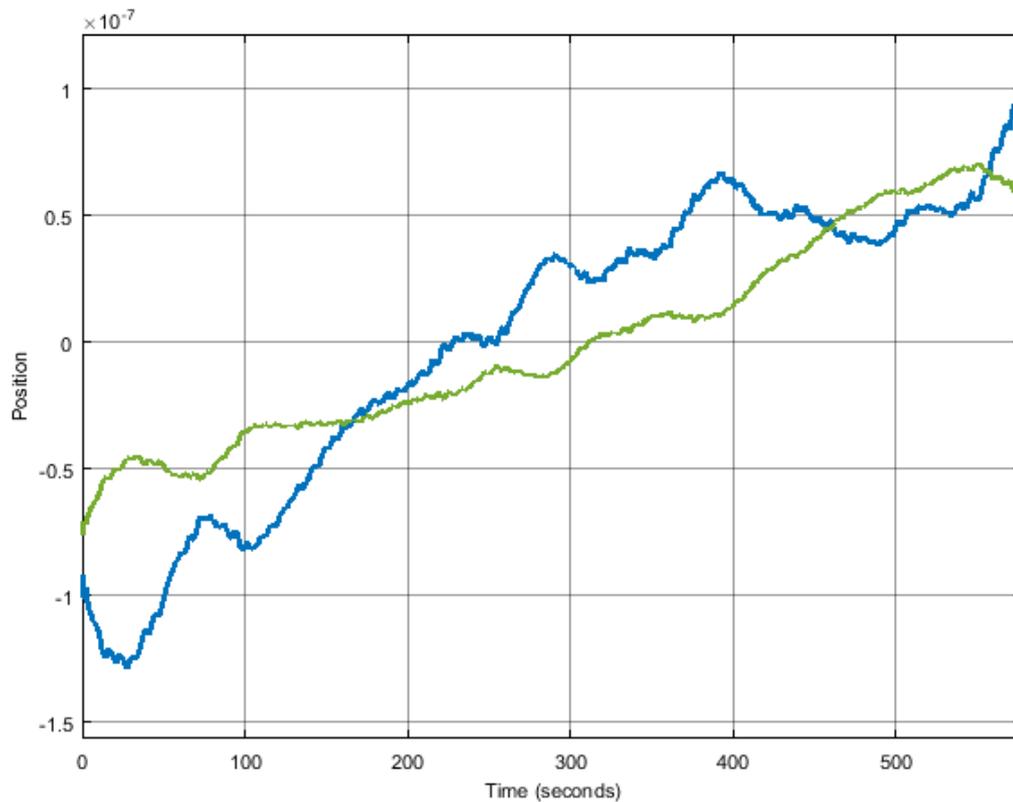


Figura 43 Posizioni dei cilindri a 1000 micron di separazione iniziale

In questa seconda misurazione con moto attrattivo, i cilindri al momento dell'inizio della misurazione si stavano già stabilizzando quindi si vede solo la fase lineare.

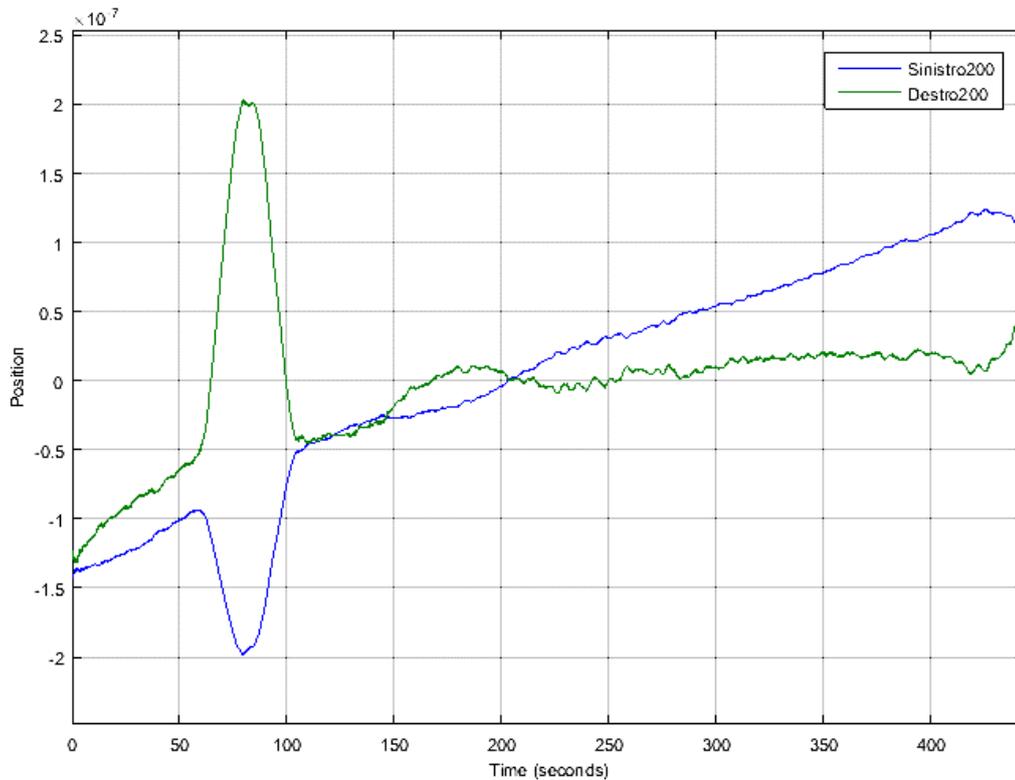


Figura 44 Posizioni dei cilindri a 200 micron di separazione iniziale

In quest'ultima misurazione vediamo uno spostamento nanometrico con il posizionatore. Il cilindro destro viene infatti spostato a 200 nanometri e quindi riportato alla posizione iniziale. Come possiamo vedere, il cilindro sinistro si muove spontaneamente in direzione contraria, senza essere movimentato dal motore, ma con un'ampiezza di circa la metà. Chiaramente vi è una trasmissione di vibrazioni attraverso il ponte utilizzato da entrambi i posizionatori. Questo è un altro dei motivi per cui la realizzazione della riproduzione del libero moto spaziale attraverso il controllo dei nanoposizionatori è quasi tecnicamente difficilissima.

#### 4.4 Problemi riscontrati ed errori compiuti

- 1) Essendo i cilindri due pendoli dipendenti ultimamente dallo stesso supporto, in molte misurazioni si nota una visibile propagazione delle vibrazioni da un cilindro all'altro, avvenuta verosimilmente tramite il ponte del telaio. E' probabilmente stato poco lungimirante avvitare in modo rigido i nanoposizionatori al telaio ed alle piastre di sospensione senza l'utilizzo di rondelle

antivibrazione M2 (acquistate ma non installate per mancanza di spazio) o meglio, di sottili guaine realizzate ad hoc in Sorbothane.

- 2) Essendo il telaio un costrutto monoblocco metallico estremamente rigido ed a bassa densità, esse viene facilmente eccitato acusticamente dal rumore prodotto dai posizionatori piezoelettrici, e la sua frequenza di risonanza fondamentale, di 323 Hz, misurata con un analizzatore di spettro acustico dopo avere stimolato il telaio nella direzione longitudinale (assiale dei cilindri), è stata riscontrata nello spettro di rumore di varie misurazioni.
- 3) L'apparato sperimentale è composto da una moltitudine di metalli diversi a contatto tra loro. Purtroppo non è stato possibile misurare il potenziale di Volta tra loro, in quanto non misurabile con un normale voltmetro.
- 4) Il costante collegamento con la terra della base della campana, e per conduzione, del telaio e delle colonne porta-lenti, ha sicuramente avuto un effetto positivo nel prevenire lo svilupparsi di campi elettrostatici, ma non è stato possibile misurare eventuali campi residui o transitori per mancanza della strumentazione adeguata.
- 5) Il campo magnetico in prossimità della base della campana, misurato con un magnetometro triassiale integrato, è risultato inferiore quasi della metà rispetto al campo magnetico medio misurato in varie parti nel laboratorio, tuttavia la misurazione sarebbe da ripetersi con un magnetometro professionale perfettamente calibrato, campionando ogni metro cubo del laboratorio. In ogni caso, considerando che il tungsteno dei cilindri è paramagnetico, e l'oro dei loro specchi è diamagnetico, è difficile attribuire l'effetto di lento e costante spostamento verso destra dei cilindri in molte misurazioni a un'interazione magnetica con la base della campana o con le colonnine dei porta-lenti. Va considerato inoltre che tali manufatti sono stati realizzati con leghe austenitiche di acciaio inox, come l'AISI 316. Anche se è vero che l'acciaio austenitico può diventare localmente ferromagnetico nei punti in cui ha subito lavorazioni a freddo come la fresatura, è difficile pensare che la asimmetria delle porte della campana, dove sono avvenute le lavorazioni, sia responsabile dell'effetto misurato.

- 6) Una spiegazione dell'effetto di spostamento verso destra in termini di semplice inclinazione della superficie della campana rispetto alla verticale non sembra del tutto convincente. Tutte le superficie erano state controllate durante la seconda prova con una bolla circolare fornita dalla Minus-K per la calibrazione dell'isolatore. L'inclinazione del tavolo, della superficie dell'isolatore, della superficie della base della campana, e della base del telaio apparivano del tutto soddisfacenti entro i limiti delle possibilità di leggere una bolla con un occhio umano, e forse il più significativo errore è stato non procurarsi una livella elettronica a 2 dimensioni con precisione di un centesimo di grado. Tuttavia anche ammettendo una leggera inclinazione sulla destra dovuta al carico dei cavi dei nanoposizionatori, evidentemente non completamente bilanciato dal posizionamento della zavorra sul lato sinistro dell'isolatore, come si può spiegare un movimento così lento? Un filo a piombo, che è anch'esso un pendolo, si posiziona immediatamente sulla verticale, non impiega più di 10-15 minuti, mentre i cilindri appaiono continuare lo spostamento verso destra anche per più misurazioni successive di 10 minuti l'una. Quest'ultimo ragionamento esclude tuttavia un'eventuale lento slittamento dei nanoposizionatori sotto l'azione del peso dei cilindri in un piano inclinato. I posizionatori sono stabili nella loro posizione, e apparentemente frenati, ma non realmente bloccati, quindi tale slittamento non può essere escluso a priori.
- 7) Si può ipotizzare anche un'inclinazione progressiva nel tempo, che effettivamente potrebbe spiegare i risultati, tuttavia è necessario porsi il problema della causa di questa lenta rotazione del piano del telaio nel tempo. La più semplice spiegazione di questo tipo può venire dalla natura del polimero Sorbothane, usato sia per isolare il tavolo dal pavimento che creare attrito tra i piedi della campana e la superficie dell'isolatore. Esso è in fase solida ma tende a comportarsi quasi come un liquido se sollecitato meccanicamente. In questo caso sono stati incautamente posti sotto la base della campana tre quadretti in Sorbothane classificato 50 come durezza nella scala 00. I quadretti erano stati ricavati tagliando in quattro parti uguali un quadro di Sorbothane delle dimensioni di 10,18 cm x 10,18 cm e spessore 6,35 cm classificato per l'isolamento di carichi tra i 907 Kg ed i 1361 Kg. Secondo il manuale della ditta, sovradimensionare, come in questo caso, lo strato isolante, provoca

un aumento della frequenza naturale del sistema ed un sistema di isolamento mal progettato può diventare controproducente.

- 8) Ponendo che i quadretti in Sorbothane siano davvero la causa del problema, è necessario chiedersi perché in una decina di misurazioni, svolte in giorni ed ore diverse, i cilindri mostrano un moto l'uno verso l'altro? Perché in altre misurazioni i cilindri mostrano di variare la loro posizione media in modo quasi caotico, per quanto sincronizzato tra loro? Perché in almeno due misurazioni il cilindri si spostano chiaramente verso sinistra?
- 9) Tuttavia se l'ipotesi dell'inclinazione progressiva non è corretta, come è possibile che nella maggior parte delle misurazioni a distanza virtualmente zero tra i cilindri, il sistema dei due cilindri accostati sembra spostarsi verso destra all'unisono?
- 10) Quali altre forze di tipo non elettromagnetico e non gravitazionale possono agire sul sistema? E' possibile un coinvolgimento di effetti inerziali? E' possibile un'influenza su di essi del moto continentale della zolla Euroasiatica, oppure il fatto che le velocità di spostamento si equivalgano in ordine di grandezza è solo una coincidenza?



*Figura 41 La campana del vuoto poggia sull'isolatore attraverso tre quadretti di Sorbothane, di colore nero e facilmente visibili nella foto. E' possibile che essi siano la causa del lento e progressivo spostamento verso destra.*

## **Conclusioni**

Malgrado il lungo elenco di disavventure accadute ed errori compiuti dall'autore, in base ai risultati è possibile affermare che, una volta adattata l'elettronica all'ambiente spaziale, il sensore FPS3010 della Attocube può essere utilizzato per misurare automaticamente il moto attrattivo di due corpi in una sonda dello spazio profondo.

Allo stesso modo si è riscontrata la notevole difficoltà di utilizzare i nanopositionatori ECS3030 e delle masse in sospensione per realizzare un apparato compatto e possibilmente portatile per la misurazione automatica di  $G$  sulla Terra in ordine a studiare le sue variazioni nel tempo. Una rete di misuratori automatici terrestri di  $G$  potrebbe comunque usare lo strumento FPS3010 applicato ad un differente apparato fisico, come una tradizionale bilancia a torsione.

Infine, la realizzazione di un sistema di riproduzione artificiale della microgravità, o levitazione unidimensionale tramite movimentazione dei pendoli, si è rivelato quasi impossibile a causa della natura imperfetta di qualunque pendolo fisico.

## Bibliografia

- (1) Brans, Carl H. "Mach's principle and the locally measured gravitational constant in general relativity." *Physical Review* 125.1 (1962): 388.
- (2) Ray, Saibal, Utpal Mukhopadhyay, and Partha Pratim Ghosh. "Large number hypothesis: A review." arXiv preprint arXiv:0705.1836 (2007).
- (3) García-Berro, Enrique, et al. "An upper limit to the secular variation of the gravitational constant from white dwarf stars." *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2011.05 (2011): 021.
- (4) Mould, Jeremy, and Syed A. Uddin. "Constraining a possible variation of  $G$  with Type Ia Supernovae." *Publications of the Astronomical Society of Australia* 31 (2014): e015.
- (5) Khurshudyan, Martiros. "Phenomenological models of universe with varying  $G$  and  $\Lambda$ ." *Central European Journal of Physics* 12.5 (2014): 348-366.
- (6) Bartlett, D. F. "Why is it so easy to underestimate systematic errors when measuring  $G$ ?" *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 372.2026 (2014): 20140021.
- (7) Anderson, John D., et al. "Measurements of Newton's gravitational constant and the length of day." *EPL (Europhysics Letters)* 110.1 (2015): 10002.
- (8) Rosi, G., et al. "Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms." *Nature* 510.7506 (2014): 518-521.
- (9) Prevedelli, M., et al. "Measuring the Newtonian constant of gravitation  $G$  with an atomic interferometer." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 372.2026 (2014): 20140030.

- (10) Schlamminger, S., J. H. Gundlach, and R. D. Newman. "Recent measurements of the gravitational constant as a function of time." arXiv preprint arXiv:1505.01774 (2015).
- (11) Iorio, Lorenzo. "Does the Newton's gravitational constant vary sinusoidally with time? An independent test with planetary orbital motions." arXiv preprint arXiv:1504.07233 (2015).
- (12) Müller, Jürgen, and Liliane Biskupek. "Variations of the gravitational constant from lunar laser ranging data." *Classical and Quantum Gravity* 24.17 (2007): 4533.
- (13) Müller, Jürgen, Liliane Biskupek, and Franz Hofmann. "Earth Orientation and Relativity Parameters Determined from LLR Data."
- (14) Biskupek, L. [2015]: Bestimmung der Erdorientierung mit Lunar Laser Ranging, Phd Thesis, Leibniz Universität, Hannover. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 742 (1996).
- (15) Gundlach, Jens H., and Stephen M. Merkowitz. "Measurement of Newton's constant using a torsion balance with angular acceleration feedback." *Physical Review Letters* 85.14 (2000): 2869.
- (16) Sheikh, Suneel I., et al. "Spacecraft Navigation and Timing Using X-ray Pulsars." *Navigation* 58.2 (2011): 165-186.
- (17) Wang, Yidi, et al. "Autonomous Navigation Method for Low-Thrust Interplanetary Vehicles." *Journal of Aerospace Engineering* (2015): 04015009.
- (18) Klaus Thurner et al., Fiber-based distance sensing interferometry, *Applied Optics* vol. 50 n. 10, April 2015

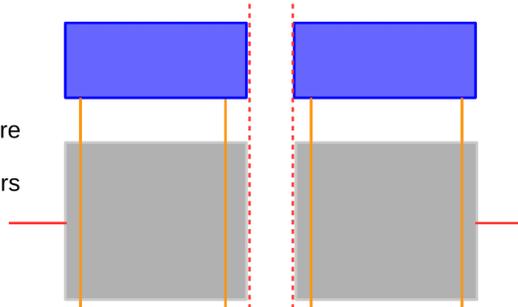
## Appendici

Documenti scritti dall'autore per conoscenza di Attocube sul software che avrebbe guidato la procedura automatica di simulazione della libera attrazione gravitazionale tra le due masse sospese nei pendoli, comprendente la calibrazione automatica e la raccolta di dati automatica.

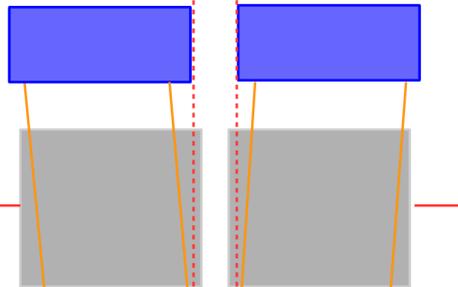
Simulating free gravitational attraction in space with piezoelectric linear motors and laser displacement measurement

Ivan Cagnani – Univ. of Bologna

At time  $t=0$  the two test masses are motionless and their suspension strings vertical. The interferometers start the measurement of their displacement.



At time  $t=1/8T$ , where  $T$  is the period of the pendulums, the two test masses have moved to half the max amplitude position. Measurement continues and nanopositioners start moving to avoid a swinging back movement after  $T=1/4$ .



At time  $t=1/4T$ , the two test masses have moved to the max amplitude position while strings are vertical again. Their motion continues because of inertia. Measurement continues. Nanopositioners have stopped their motion that will restart at  $t=3/8T$ . The cycle continues with the only difference that at any time multiple of  $1/4T$  the cylinders are not motionless like at  $t=0$ .

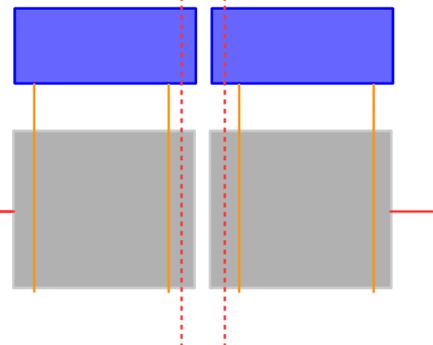


Figura 42 Schema del sistema di simulazione del libero moto attrattivo dei cilindri.

# Software for the GCOS experiment

By Ivan Cagnani

## Overview

The purpose of the GCOS experiment is testing the applicability of the FPS3010 to the automatic continuous measurement of the universal gravitational constant onboard a space probe.

In the space measurement two test masses are gently released with a 5mm gap between them and their motion, generated by mutual gravitational attraction, is measured with the FPS3010 until the test masses collide. The test masses are then automatically collected and repositioned to repeat the measurement.

Microgravity conditions are simulated on Earth by suspending the test masses and moving the attachment points of the suspension strings in such a way that the pendulum swinging effect cannot manifest itself in the gravitationally induced linear motion of masses.

The 4 strings holding each test mass are attached to a common plate. Each plate is attached to an ECS3030 /NUM /HV linear positioner. The two ECS3030 are attached to a common rigid frame, which suspends the positioners, the plates, the strings and the test masses and allows alignment of the FPS3010 lenses. Before each measurement or calibration, the test masses and their plates are manually set at 0.00mm of distance from each other. This will also be the zero position for the piezoelectric positioners.

The software for the lab test should have 3 functions: frequency calibration, amplitude calibration and G measurement. In all the functions two channels of the ECC100 motion controller and two channels of the FPS3010 interferometer are used. Channel 1 of both instruments is used for controlling and monitoring the motion of the test mass number 1, channel 2 is used for the other one. Sampling will always have frequency of 2.5 kHz and 64bit of resolution, maximum for an USB connection.

## Frequency calibration

The suspended test masses are in fact two pendulums. Their frequencies are set by the length of the strings and they must be precisely known for the pendulum effect compensation to be efficient. Frequency calibration consists in moving rapidly both test masses in opposite direction and stopping the motion abruptly to maximize the pendulum effect. Both interferometer channels are sampled and the oscillation frequencies are calculated by LabView frequency analysis routine.

In practice, test mass 1 is moved from position 0 to position 10000 micron, test mass 2 is moved from 0 to -10000 micron with parameters 33V 250Hz.

This calibration procedure is necessary both for adjusting the length of the strings hanging each test mass under the plates, so that both pendulums can have the same frequency (2.5Hz), and for the swinging compensation procedure used in the measurement of G.

## Amplitude calibration

Two test masses at rest in positions P1 and P2 start oscillating with an amplitude  $A$  depending on the magnitude of the gap between them.  $A$  depends also on other parameters like the local terrestrial acceleration  $g_T$ , the mass  $M_1$  and  $M_2$  of the test masses, and the geometrical shape of the masses, which affects gravitational attraction on short distance, anyway these parameters can be considered constant for the duration of the experiment, so that a non-linear relationship can be approximated between the gap  $GAP$  of facing sides of the test masses and the amplitude of their oscillations. To establish such a relationship it is necessary to very slowly displace both test masses from 0 position to a number of fixed position, stopping long enough at that position to allow the amplitude of oscillation to stabilize and eliminate other effects like the oscillation imparted by the movement of the ECS3030 themselves and of the plates connected under them.

A realistic number of points for the calibration procedure is 20 per each test mass, and they will be naturally symmetrical around the zero. The 2.5mm of initial distance from zero of both test masses in the  $G$  measurement experiment can be divided in 20 segments 0.125 mm each. A minimum of 5 minutes in each position is necessary for letting the effect of extraneous forces fade. To rule out conditioning from the direction of movement between the positions, it could be a good idea to run the calibration twice, from 0 to 2.5mm and from 2.5mm to 0. The calibration process requires recording both active channels of the FPS3010 during the latter 1 minute of the 5 minutes of each position. Test masses should be moved between calibration positions at the speed of 1 micron per second, so transition between each position will last 125s and total calibration time should be 17000s.

At the end of the calibration phase, a more detailed table of amplitude vs gap for each test mass should be created by interpolation of the measured data points. This high resolution table will be used by the swinging compensation procedure.

## Measurement of $G$

The procedure for the measurement of  $G$  is based on the swinging motion compensation procedure, which is very simple and depends on only two parameters, the frequency of oscillation of each test mass, and the oscillation amplitude at that position of the masses from zero. Both data are collected in the respective calibration phases.

The procedure is very simple, and works dividing the period of each pendulum in 8 parts starting from 0, where zero corresponds to the lowest point of its swinging motion.

During the first  $1/8$  of the period of oscillation the plate holding the strings should not move, the piezoelectric positioner will then stay still and only the FPS will sample data.

During the second  $2/8$  of the period of oscillation, the ECS3030 will move in the same direction of the moving test mass and it will cover a distance corresponding to the amplitude interpolated for that position. It will move until  $t=3/8$ , when the strings will be vertical.

At  $t=3/8$  the cycle repeats, with the ECS3030 immobile and the movement of the test mass sampled by the FPS.

At  $t=4/8$  the positioner will again move until  $t=5/8$  and covering a length equal to the interpolated amplitude from the table obtained from in the calibration phase.

This process will happen at the same time with the other test mass, with the only difference being the direction of movement.

Final calculation of  $G$  will be performed on Mathematica 10 using FPS displacement data and timestamp from the instrument, so there is no need to approximate that calculation during the data taking phase.

Procedura Matlab utilizzata per pulire i dati grezzi del moto misurato dei due cilindri nel caso di moto direttamente attrattivo.

```
%genera e salva il grafico dei dati grezzi
%questa operazione viene eseguita precedentemente per selezionare
le parti
%da tagliare ma viene riportata qui in quanto immediatamente
precedente.
%l=plot(m1000Lo);saveas(f1,'m1000L.png');
%f2=plot(m1000Ro);saveas(f2,'m1000R.png');

%taglia lo spostamento iniziale per omogeneizzare i dati
%m1000Lo(1:18330)=[];
%m1000Ro(1:18330)=[];
%m1000Lo(end-44415:end)=[]; %procedura non utilizzata per questi
dati grezzi
%m1000Ro(end-44415:end)=[]; %idem
%visualizza e salva i dati originali tagliati
%f3=plot(m1000Lo);saveas(f3,'m1000Lo.png');
%f4=plot(m1000Ro);saveas(f4,'m1000Ro.png');

%smoothing dei dati grezzi alla frequenza di campionamento;
%la procedura di smoothing utilizzata è quella di default di Matlab,
%ovvero la procedura di media mobile, "sliding mean" in inglese.
%dt è l'intervallo di campionamento, dt=0.00065536 secondi in
questo caso;
%h è la frequenza di campionamento;
h=1/dt;
m1000Lh=smooth(m1000Lo,h);
m1000Rh=smooth(m1000Ro,h);
%taglia i primi e gli ultimi 5000 punti per eliminare
%gli artefatti spesso creati dalla procedura di smoothing;
m1000Lh(end-57001:end)=[];
m1000Lh(1:2000)=[];
```

```
m1000Rh(end-57001:end)=[];
m1000Rh(1:2000)=[];
%genera e salva il grafico dei dati dopo la prima operazione di
smoothing;
f5=plot(m1000Lh);saveas(f5,'m1000Lh.png');
f6=plot(m1000Rh);saveas(f6,'m1000Rh.png');
%seconda operazione di smoothing, effettuata sui dati risultanti
dalla
%prima operazione di smoothing. Questa seconda fase di smoothing
è
%necessaria in tutte le misurazioni effettuate a causa
dell'ampiezza
%dell'oscillazione ad alta frequenza dei cilindri, che non viene
eliminata
%adeguatamente dalla prima operazione di smoothing. Si è trovato
%empiricamente che uno smoothing a due passaggi genera meno
alterazioni
%della componente a bassa frequenza del moto misurato dei cilindri
%rispetto ad uno smoothing più aggressivo applicato una volta sola.
%Si è anche constatato empiricamente che nel secondo passaggio di
smoothing,
%un intervallo di smoothing inferiore a 5 volte la frequenza di
campionamento
%è insufficiente a rimuovere adeguatamente la componente ad alta
frequenza
%dai dati mentre un intervallo di smoothing maggiore attutisce
troppo
%l'importante componente a media frequenza. Si è deciso quindi di
%utilizzare come intervallo di smoothing h5, 5 volte la frequenza
di
%campionamento dei dati, corrispondente a circa 762940
campionamenti.
h5=h*5;
m1000Lh5=smooth(m1000Lh,h5);
m1000Rh5=smooth(m1000Rh,h5);
%taglio degli artefatti
m1000Lh5(end-2000:end)=[];
m1000Lh5(1:2000)=[];
m1000Rh5(end-2000:end)=[];
m1000Rh5(1:2000)=[];
f7=plot(m1000Lh5);saveas(f7,'m1000Lh5.png');
f8=plot(m1000Rh5);saveas(f8,'m1000Rh5.png');
%normalization of 5f smoothed data
nm1000Lh5=m1000Lh5-mean(m1000Lh5);
nm1000Rh5=m1000Rh5-mean(m1000Rh5);
%plotting normalised data
f9=plot(nm1000Lh5,'DisplayName','Sinistro');hold
on;plot(nm1000Rh5,'DisplayName','Destro');hold off;
saveas(f9,'m1000final.png');
```