



**Università degli Studi di Padova**

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Messa a punto di un sistema meccanico per la calibrazione  
ottica dello spettrografo PHEBUS a bordo della missione  
spaziale Bepi-Colombo**

Candidato:  
**Oripoli Luca**

Relatore:  
**Prof.ssa M. G. Pelizzo**

Correlatore:  
**Dott.ssa P. Zuppella**



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1	La missione spaziale Bepi-Colombo . . . . .	5
1.2	PHEBUS . . . . .	8
1.3	Calibrazione e misura dell'Etendue Geometrico . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Tagadà non da vuoto</b>	<b>14</b>
2.1	Metodo di misura e calcolo dell'angolo di rotazione . . . . .	16
2.1.1	Rotazioni orarie . . . . .	17
2.1.2	Rotazioni antiorarie . . . . .	19
2.2	Misure e interpolazione dei dati . . . . .	21
2.2.1	Motore Z . . . . .	21
2.2.2	Motore X . . . . .	25
2.3	Errori di misura . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Tagadà da vuoto</b>	<b>31</b>
3.1	Tagadà . . . . .	31
3.2	Controller . . . . .	31
3.3	Posizione di HOME . . . . .	33
3.3.1	Asse x . . . . .	33
3.3.2	Asse z . . . . .	36
3.4	Misure . . . . .	38
3.4.1	Asse x . . . . .	38
3.4.2	Asse z . . . . .	40
	<b>Conclusioni</b>	<b>42</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>44</b>



# 1 Introduzione



Figura 1: Mercurio fotografato dalla sonda Mariner 10

## 1.1 La missione spaziale Bepi-Colombo

La missione spaziale Bepi-Colombo, in collaborazione tra l'ESA (European Space Agency) e JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency), mira allo studio e ad una più profonda conoscenza di Mercurio. Gli obiettivi principali della missione sono:

- l'origine e l'evoluzione di un pianeta molto vicino alla sua stella
- varie specie chimiche che compongono il nucleo, la crosta e la tenue atmosfera
- morfologia e tettonica della superficie del pianeta
- origine e dinamica dell'esosfera del pianeta
- origine e dinamica della magnetosfera del pianeta
- conoscenza e investigazione dei poli del pianeta
- fare un test sulla teoria della relatività generale di Einstein



Figura 2: Forma finale del veicolo spaziale

Il veicolo spaziale sarà lanciato nell'agosto 2015 con un razzo *Ariane 5* e arriverà a destinazione verso fine gennaio 2022.

Il veicolo è composto da più moduli, tra i quali i due più importanti che studieranno il pianeta: il MPO studierà la superficie e la composizione interna del pianeta, e il MMO studierà la magnetosfera di Mercurio, cioè la regione di spazio intorno al pianeta che è influenzata dal suo campo magnetico.

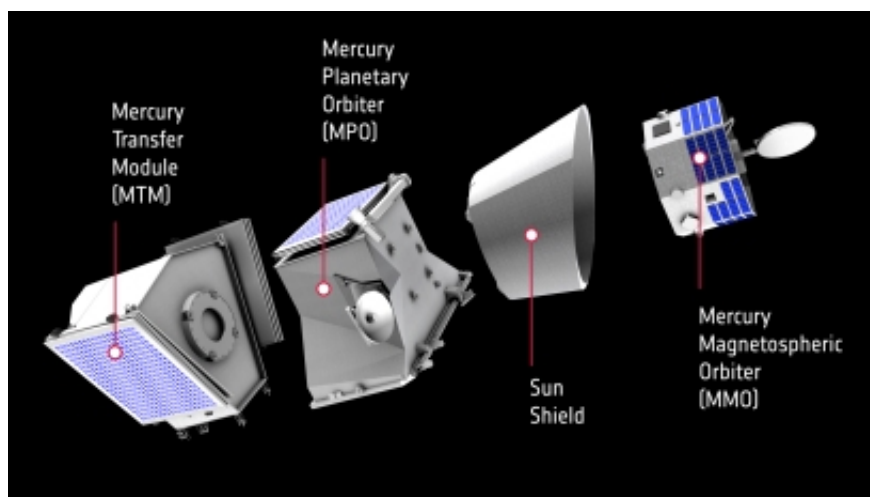


Figura 3: i moduli del MCS

Per il lancio e il viaggio verso Mercurio, il MPO e il MMO saranno parte del veicolo spaziale Mercury Composite Spacecraft (MCS). Il MCS comprende, oltre ai due moduli orbitanti, il Mercury Transfer Module (MTM), che fornisce propulsione elettrica a energia solare. Durante il viaggio interplanetario, l'MMO è dormiente, con l'eccezione di periodici checkout. La sonda MPO comanda la MMO e la MTM e comunica con la Terra. Giunti a destinazione le due sonde si posizioneranno attorno a Mercurio secondo un'orbita prestabilita.

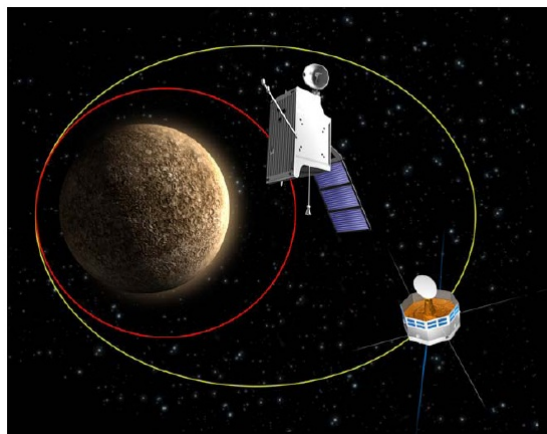


Figura 4: i due moduli in orbita attorno al pianeta

L'MPO (Mercury Planetary Orbiter) è un contributo dell'ESA alla missione. Esso trasporterà in totale undici strumenti sofisticati, che comprendono telecamere, spettrometri (IR, UV, raggi X, raggi  $\gamma$ , neutroni), un radiometro, un altimetro laser, un magnetometro, analizzatori di particelle, un transponder in banda Ka, e un accelerometro. Di questi, dieci saranno costruiti mediante il finanziamento nazionale da parte degli Stati membri dell'ESA e uno dalla Russia.

Uno degli spettrometri in questione di cui parleremo più approfonditamente è *PHEBUS*.

L'MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) è un contributo giapponese della JAXA. Esso dispone di strumenti per analizzare la magnetosfera di Mercurio, tra cui un magnetometro, un spettrometro di ioni, un analizzatore di energia degli elettroni, rilevatori di plasma freddo e caldo, un analizzatore d'onda al plasma, e un imager. Questi saranno costruiti grazie a finanziamenti nazionali, uno europeo e quattro del Giappone.

Entrambi i moduli lavoreranno in un ambiente particolarmente ostile dovuto alla vicinanza del Sole, con temperature superiori ai  $350^{\circ}\text{C}$  e forti radiazioni causate dal vento solare.

## 1.2 PHEBUS

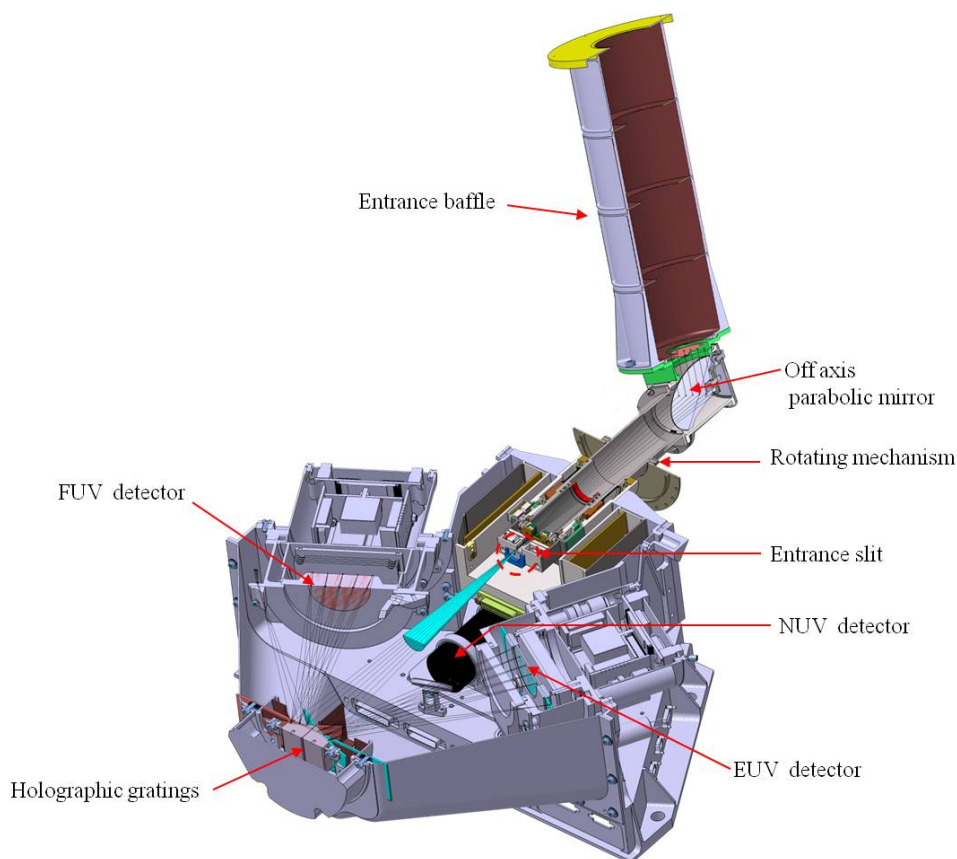


Figura 5: vista sezionata dello spettrometro

*Phebus* (Probing of Hermean Exosphere by Ultraviolet Spectroscopy) è uno spettrometro che lavora in due diversi intervalli spettrali UV: l'ultravioletto estremo (EUV), 55-155 nm, e il lontano ultravioletto (FUV), 145-315 nm. Esso è inoltre provvisto di un canale aggiunto che consente il rilevamento di due lunghezze d'onda specifiche del vicino ultravioletto (NUV) range: 422,8 nm e 404,2 nm, che sono linee di emissione rispettivamente di Ca e K.

PHEBUS è composto da due sottosistemi principali: uno raccoglie la luce e l'altro ne fa l'analisi spettrometrica. La luce viene raccolta dal *baffle* (deflettore) d'entrata che fa da pupilla d'ingresso ed evita l'entrata della luce parassita oltre un angolo ben definito di 8°. La luce viene fatta convergere da uno specchio parabolico sullo *slit* (fenditura) che è in comune tra i due canali (EUV e FUV) e raggiunge i reticoli olografici (uno per canale). Infine il rilevamento della radiazione viene effettuato tramite detector MCP (Micro-



Channel Plate) con RAE (Resistive Anode Encoder), in regime di conteggio di fotoni. Le linee spettrali nel NUV sono deflesse tramite specchi opportuni su due fotomoltiplicatori a tubo.

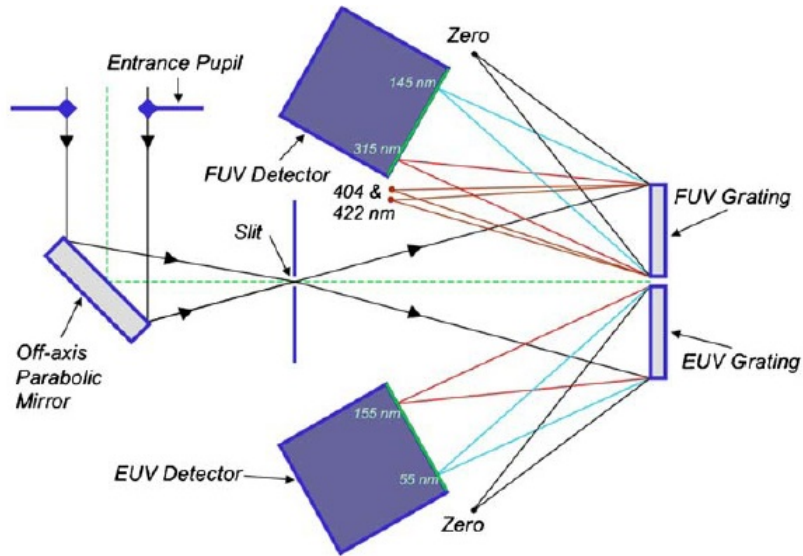


Figura 6: schema ottico di PHEBUS

Gli obiettivi scientifici di PHEBUS sono:

- Il rilevamento di nuove specie chimiche, in aggiunta a quelle già identificate (Na, K, Ca, O, He, H e Mg) con una risoluzione spettrale fino a 1 nm nel canale EUV e di 1,5 nm nel canale FUV.
- La misura di un esosfera media con più specie monitorate insieme alla diversa posizione del pianeta rispetto al sole.
- Misure di variazione locale spaziale e temporale dei contenuti dell'esosfera, grazie alla possibilità dello strumento di effettuare scansioni verticali.
- La possibilità di rilevare alcune specie ionizzate fornirà, in sinergia con le misure del MMO, molti dati sui processi di interazione fra esosfera, magnetosfera e vento solare.
- La presenza di ghiaccio d'acqua in alcuni crateri polari può essere rilevata grazie al monitoraggio della riga di emissione dell'idrogeno (121,6nm).

Il disegno e l'assemblaggio dello strumento è condotto dal team francese, mentre alla sua calibrazione partecipa anche un gruppo italiano. In particolare la calibrazione dei sottosistemi ottici quali i reticoli e gli specchi è svolta al laboratorio LUXOR (CNR-IFN U.O.S. Padova), in seguito l'intera calibrazione ottica dello strumento verrà eseguita sia a Padova e sia nel laboratorio LATMOS (CNES) a Parigi.

Si effettueranno due tipi di calibrazioni, quella *a terra* e quella *in volo* per verificare il corretto funzionamento dello strumento nel suo ambiente di lavoro nominale, cioè in volo. Quanto descritto in questo elaborato e soprattutto i sistemi rotativi descritti servono esclusivamente alla calibrazione a terra.

### 1.3 Calibrazione e misura dell'Etendue Geometrico

Possiamo dividere la calibrazione a terra a sua volta in due parti principali: le calibrazioni *spettrali* e *radiometriche*. La calibrazione spettrale consiste nel determinare la posizione delle righe e il loro profilo sul rivelatore. La calibrazione della risposta spettrale dello strumento ci consentirà di individuare la lunghezza d'onda corrispondente a ciascuna riga rilevata dai Micro Channel Plates (MCP) e dai fotomoltiplicatori di PHEBUS e di determinare la sua risoluzione. La calibrazione radiometrica prende in esame le efficienze dei vari sottosistemi in funzione della lunghezza d'onda e della polarizzazione delle sorgenti e caratterizza la risposta dello strumento.

La risposta radiometrica dipende sia dall'*efficienza* dello strumento che dall'*etendue geometrico*.

#### Efficienza

L'efficienza di PHEBUS è il segnale raccolto dal rivelatore e cioè i conteggi rilevati dal detector, rispetto al numero di fotoni raccolti, ad una determinata lunghezza d'onda ( $\lambda$ ), e corretto per la risposta dello strumento che oltre ad introdurre un'attenuazione può cambiare la polarizzazione dell'onda elettromagnetica entrante.

Una spiegazione teorica e sperimentale molto accurata sulla ricostruzione dell'efficienza totale di PHEBUS si può trovare in "CWP09: Radiometric Eff EUV-FUV Instrument, P. Zuppella, A.J. Corso, P. Nicolosi, M.G. Pelizzo, V. Polito" ([2]), dove si considera lo strumento con il formalismo delle matrici di Mueller e si dimostra come la totale efficienza di PHEBUS sia ben definita dalla conoscenza delle funzioni  $M_{0i} = f(\lambda, A)$  con  $i \in [0; 3]$  dipendenti dalla lunghezza d'onda e dall'angolo di scansione  $A$ .

Le misure di efficienza saranno effettuate in aria per la gamma FUV su un banco ottico nella clean room del LUXOR (Padova), mentre per la gamma EUV c'è bisogno di operare nel vuoto all'interno di una camera di  $1\text{m}^3$

dov'è creato il vuoto spinto fino a  $10^{-7}$  mbar (Figura 7).

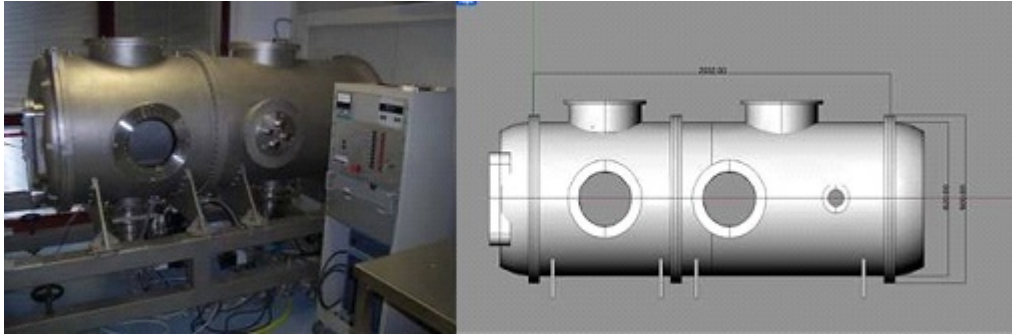


Figura 7: camera da vuoto

### Etendue geometrico

L'etendue geometrico, detto anche estensione ottica, è l'abilità di un sistema ottico di accettare la luce, ed è funzione dell'area  $S$  e dell'angolo solido  $\Omega$  nel quale si propaga.

$$G = S \cdot \Omega$$

L'etendue è una quantità che non decresce mai e al limite si conserva durante la propagazione, quindi con buona approssimazione possiamo ritenere definita la dimensione massima del fascio di luce d'ingresso dello strumento nel quale i raggi non sono vignettati.

È molto importante conoscere bene l'etendue perchè è una funzione che limita molto il throughput del sistema.

In generale, applicando la definizione l'etendue di un sistema ottico reale è  $G = S_{eff} \cdot \Omega$  dove  $S_{eff}$  è l'effettiva area che raccoglie i fotoni, che nel caso di PHEBUS è quella dello slit d'ingresso, quindi il calcolo che si dovrebbe fare è  $G = \iint dS_{eff} d\Omega$ .

Tuttavia questa formula può essere usata per una simulazione al calcolatore, ma non è operativa quando si devono fare delle misure reali su PHEBUS, quindi è necessario trovare una relazione più sperimentale.

L'idea è di illuminare PHEBUS con una sorgente abbastanza uniforme, così da ritenere costante la radianza che investe lo strumento, e contare poi i fotoni che raggiungono lo slit. Tutto questo va fatto variando l'angolo solido d'ingresso visto dallo strumento e fisicamente si può fare ruotando PHEBUS di due coordinate angolari  $(\alpha, \beta)$ , così che  $d\Omega = d\alpha d\beta$ . Questa misura al variare dell'angolo solido ci dovrebbe dare l'informazione di come la luce si sparge nello spazio, che è proprio il significato fisico dell'etendue.

Non bisogna dimenticare comunque che i fotoni rilevati non sono tutti quelli che veramente si dovrebbero contare perchè alcuni si perdono per assorbimento e scattering nei vari sottosistemi ottici, quindi si deve tenere in considerazione anche l'efficienza  $\eta$ .

Una formula che lega le grandezze sopra citate e ci permette di definire l'etendue geometrico efficace  $G_{eff}$  è data in "CWP04: Geometric G EUV-FUV OFF-EXT, P. Zuppella, A.J. Corso, P. Nicolosi, M.G. Pelizzo" ([1]) dove sono spiegate le basi teoriche, qui è solo citata:

$$G_{eff} = \frac{\iint R(\alpha, \beta) d\alpha d\beta}{\eta E_0}$$

dove:

$\iint R(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$  è il tasso di conteggi misurato in [conteggi·sr]

$\eta = \frac{Output(PHEBUS)}{Input(fotodiodocalibrato)}$  è l'efficienza misurata in [conteggi/fotoni]

$E_0$  è l'irraggiamento misurato in [fotoni/ $m^2$ ]

L'integrale continuo può essere valutato con una somma discreta di misurazioni di  $R(\alpha, \beta)$  nelle direzioni angolari ortogonali  $(\alpha_i, \beta_j)$  con  $\alpha_{min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{max}$  e  $\beta_{min} \leq \beta_j \leq \beta_{max}$ , con incrementi di  $\Delta\alpha$  e  $\Delta\beta$  abbastanza piccoli da consentire una buona mappatura dello slit d'ingresso

$$\iint R(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \approx \Delta\alpha \Delta\beta \sum R(\alpha_i, \beta_j)$$

Appare subito evidente l'importanza di poter ruotare PHEBUS di un passo piccolo e preciso nelle due direzioni angolari ortogonali, altrimenti le misure di  $R(\alpha, \beta)$  non saranno quelle vere angolarmente e non si riuscirà a trovare la vera risposta radiometrica di PHEBUS.

Per ruotare PHEBUS viene utilizzato un particolare sistema rotativo, sul quale poggerà lo spettrometro, che chiameremo d'ora in avanti *Tagadà*. In particolare vi sono due tagadà: uno che verrà utilizzato in aria sul banco ottico per le misure nel range FUV, l'altro servirà alla movimentazione di PHEBUS dentro la camera a vuoto, utilizzato per le misure EUV.

Le misure saranno fatte in aria per il range FUV ad una lunghezza d'onda di 254nm nella clean room del LUXOR, sul banco ottico. Mentre saranno fatte nella camera a vuoto per il range EUV.

Per allineare PHEBUS al sistema di illuminazione lo si ruota con il tagadà, il perfetto allineamento corrisponde al massimo segnale sul detector FUV(EUV).

Dopo aver allineato lo strumento si mette una maschera lungo il percorso della luce, che sagoma il fascio, come mostrato in Figura 8. Per misurare la

potenza del fascio si usa una lente e un detector calibrato; assumendo l'omogeneità del fascio e conoscendo la dimensione della maschera, è possibile misurare la radianza(irraggiamento) del fascio d'ingresso.

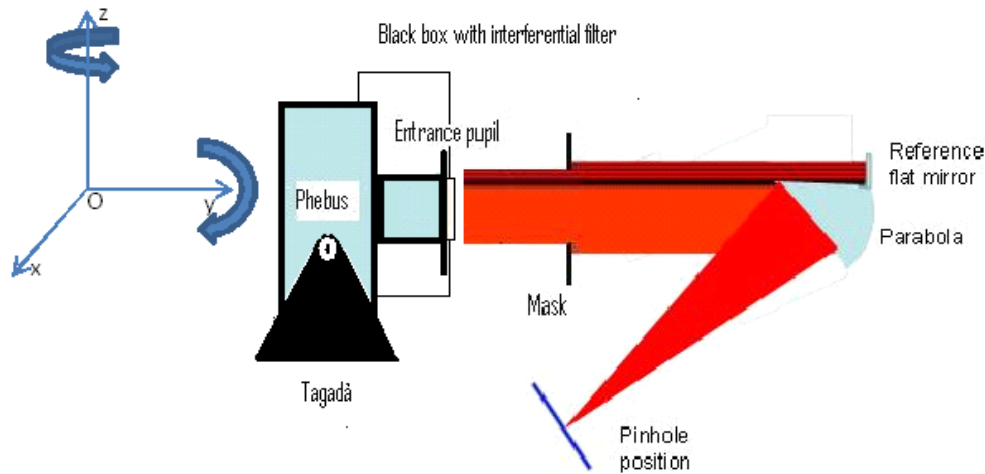


Figura 8: schema ottico di PHEBUS sul tagadà accoppiato col sistema di illuminazione FUV

### Obiettivi del lavoro

In questo elaborato vengono descritti i due tagadà, uno da vuoto usato nella camera a vuoto e uno usato in aria, e i metodi e strumenti utilizzati per la loro calibrazione, che consiste nel:

- dare una relazione, possibilmente lineare, tra l'angolo di rotazione effettivo del tagadà non da vuoto e il valore numerico accettato dal controllore
- dare una posizione di riferimento fissa nello spazio per il tagadà da vuoto e verificare la vera rotazione dello strumento rispetto all'angolo impostato dal controller

L'errore massimo di rotazione accettato per entrambi i tagadà è di  $0,05^\circ$ . Le misure vengono fatte sia senza carico che con un peso caricato di circa 20kg per controllare il corretto funzionamento sotto sforzo. In particolare il primo capitolo illustra il tagadà non da vuoto, cioè usato per le misure in aria, che è stato realizzato da ALCA TECHNOLOGY, Schio(VI). Nel secondo capitolo si tratta il tagadà da vuoto, che verrà utilizzato nella camera a vuoto.

## 2 Tagadà non da vuoto

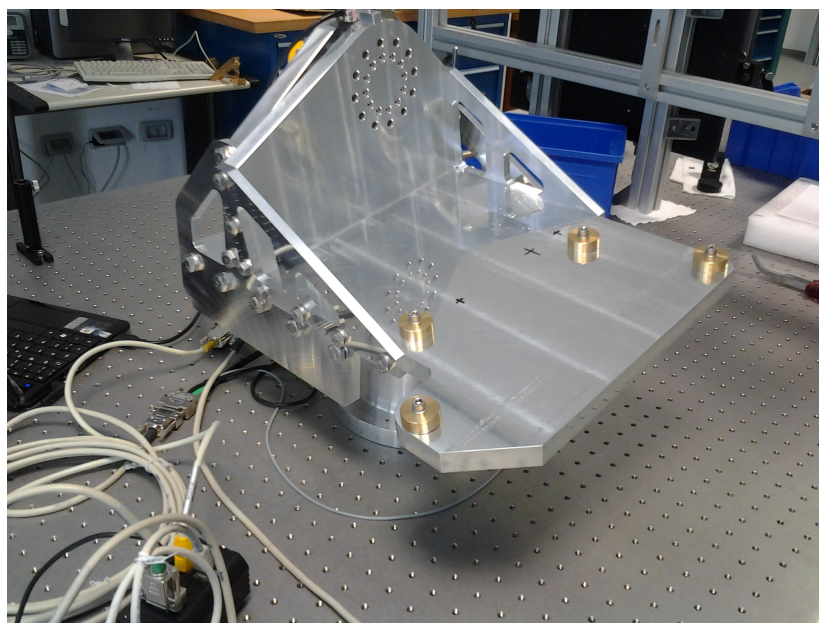


Figura 9: Tagadà

Il sistema rotativo, che chiamiamo *Tagadà*, può ruotare attorno a due assi:  $x$  e  $z$ ; grazie a due motori passo-passo, schematizzati in Figura 10 rispettivamente da un cerchio e da un cilindro, dov'è posizionato sopra il sistema di riferimento.

Il tagadà è controllato elettronicamente da un controller, il *POLLUX drive*, che si interfaccia con l'utente tramite il software *Venus-2*. Tramite un'interfaccia grafica decisamente user-friendly e istruzioni appropriate è possibile impostare molti parametri dei motori come la velocità di rotazione, l'accelerazione, e ovviamente la cosa più importante: l'angolo di rotazione.

La rotazione del tagadà è limitata in entrambe le direzioni, per assicurare che non vi sia un contatto tra parti meccaniche diverse, che porterebbe ad un danneggiamento del dispositivo. Il limite massimo è imposto da una coppia di finecorsa su entrambi gli assi, che spengono i motori quando attivati (i finecorsa si attivano alternativamente in base al senso della rotazione, oraria o antioraria).

Come si può notare dalla Figura 9, il piatto del tagadà non è perfettamente liscio, ma ha dei rilievi che permettono di incastrare PHEBUS quando sarà caricato.

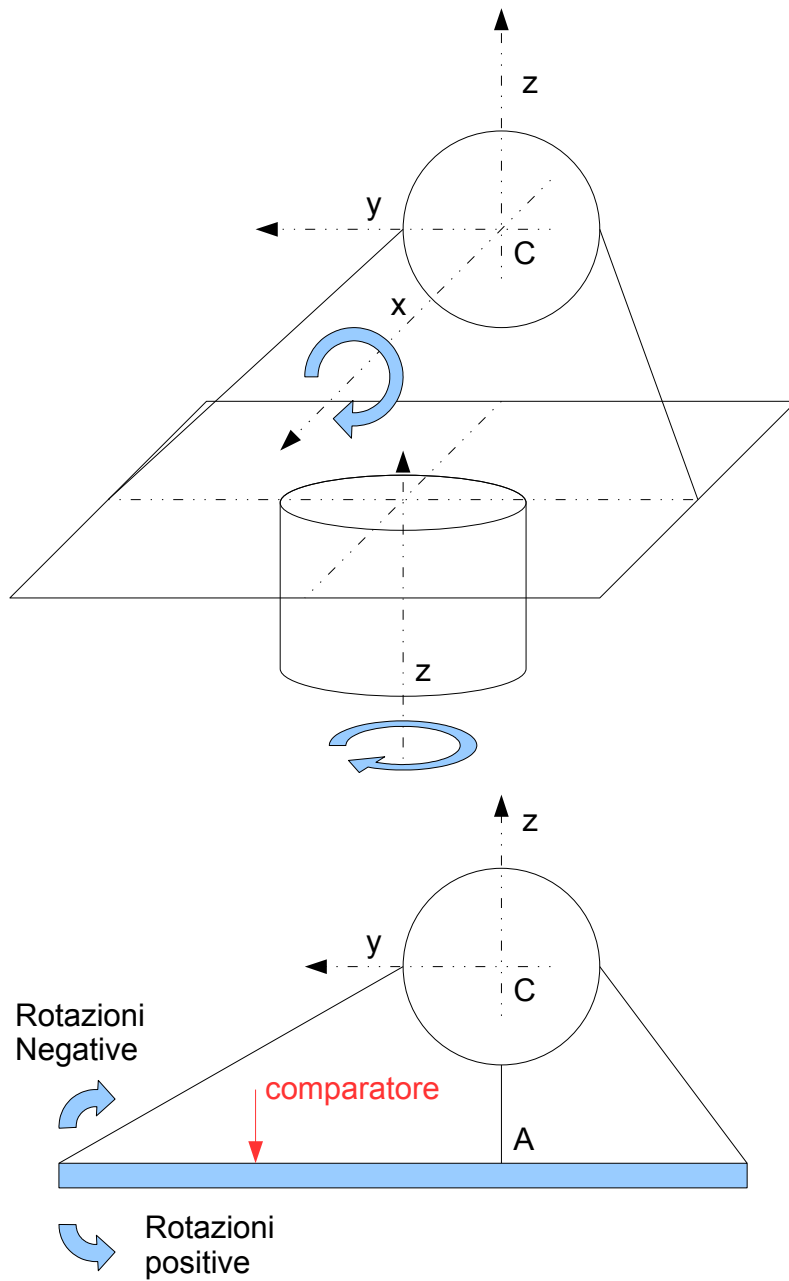


Figura 10: Rappresentazione del tagadà non da vuoto

Per le misure effettuate è stato utilizzato un *comparatore centesimale*, strumento meccanico che rileva il centesimo di millimetro (0,01mm). Il comparatore è uno strumento di misura utilizzato per misure di spostamento lineare, composto da un quadrante dove si legge la misura, e da un'asta scorrevole che si appoggia sull'oggetto che si vuole misurare. È tenuto fermo da un supporto magnetico che si attacca al banco su cui poggia.



Figura 11: comparatore centesimale

Le misure sono state fatte in modo relativo rispetto alla posizione *zero* o di *equilibrio* del sistema scelta. Per il motore che ruota attorno a  $z$  (motore Z) la posizione zero scelta è a ridosso del primo fincorsa. Per il motore che ruota attorno a  $x$  (motore X), invece, si è scelto di portarlo parallelo al banco ottico (messa in bolla).

### 2.1 Metodo di misura e calcolo dell'angolo di rotazione

Assumiamo innanzitutto che per il motore X, supposto inizialmente nella posizione zero (come in Figura 10), il verso di rotazione positivo sia quello antiorario, mentre il verso negativo quello orario.

Il comparatore è appoggiato sul piano del tagadà, ad una distanza  $D$  nota, dal punto A in Figura 10 (il punto A è la proiezione dell'asse del motore sul piatto del tagadà), e ad una distanza  $L$  nota, che è proprio la distanza del punto A dall'asse del motore. Le quote  $D$  e  $L$  si comprendono meglio osservando la Figura 12. Nelle figure il profilo in marrone è quello relativo al piatto nella posizione zero, mentre quello in grigio è la posizione del profilo dopo la rotazione.

Il sistema di riferimento per le misure è formato dai due assi in marrone con centro in A. La rotazione di un angolo  $\alpha$  del motore X attorno al proprio asse comporta una rototraslazione del sistema di riferimento che diventa quello formato dagli assi in grigio con intersezione in B.



Essendo il piatto del tagadà (in azzurro in Figura 10) non perfettamente centrato sull'asse di rotazione dei motori, si è scelto di fare le misure solo dalla parte sinistra del piatto, così da essere più distanti da A (una D maggiore) e così da poter rilevare più facilmente una rotazione piccola.

Questa scelta però complica le cose perchè risulta necessario distinguere le rotazioni positive (antiorarie) da quelle negative (orarie), a causa delle due situazioni fisiche diverse che si delineano (Figura 12 e Figura 14).

La distinzione tra rotazioni orarie e antiorarie è necessaria solo per il motore X, per il motore Z non serve questa distinzione perchè la rotazione che andremo a misurare parte dal primo finecorsa in avanti (non è possibile ruotare dietro il finecorsa) per cui la rotazione è assunta solo positiva.

Definiamo le grandezze in gioco:

- $d$ : è l'altezza misurata dal comparatore
- $D$ : è la distanza della testina del comparatore (in rosso) dal punto A
- $L$ : è il raggio del cerchio di rotazione su cui ruota il piatto del tagadà

### 2.1.1 Rotazioni orarie

Solo per il motore X che fa ruotare il piatto attorno all'asse  $x$ .

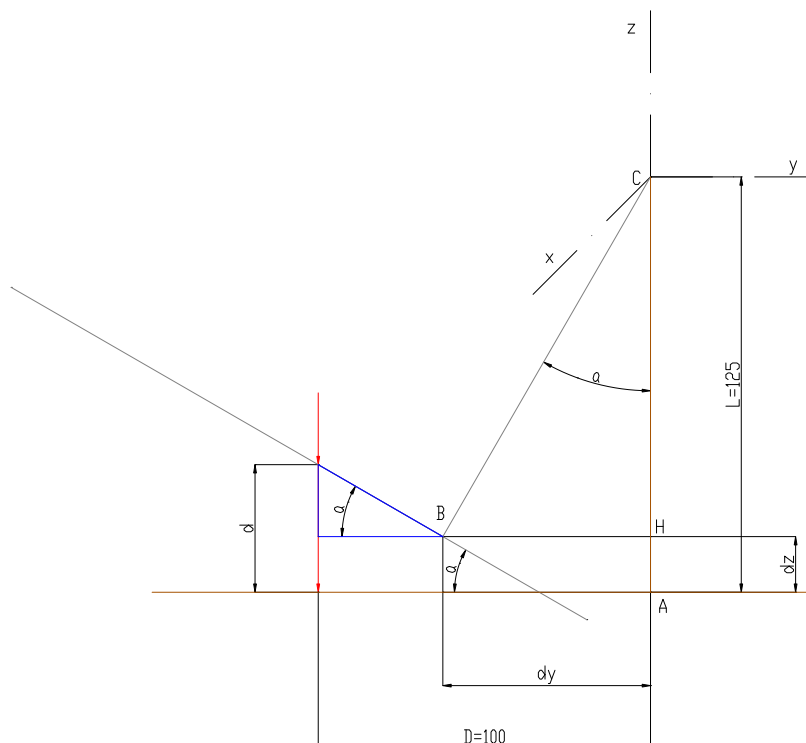


Figura 12: rotazione oraria del piatto

Per il calcolo dell'angolo di rotazione ci si concentra sul triangolo (in blu in Figura 12) che poggia in B e ha per cateti  $d-dz$  e  $D-dy$ . Considerando che la tangente di  $a$  è il rapporto tra i cateti e invertendo la formula:

$$a = \arctan \frac{d - dz}{D - dy}$$

Per quanto riguarda  $dz$  e  $dy$  ci concentriamo sul triangolo BHC. Un cateto di tale triangolo è

$$\overline{BH} = dy = L \sin a$$

mentre

$$dz = \overline{AH} = \overline{CA} - \overline{CH} = L - L \cos a = L(1 - \cos a)$$

Sostituendo poi  $dz$  e  $dy$  con le loro espressioni troviamo:

$$a = \arctan \frac{d - L(1 - \cos a)}{D - L \sin a} \quad (1)$$

che è un'equazione trascendente ma comunque calcolabile in modo approssimato.

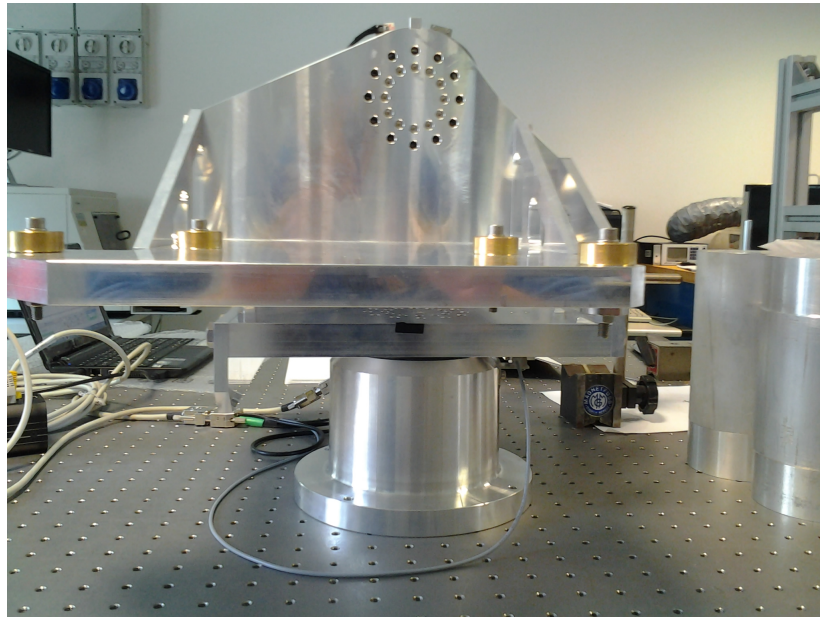


Figura 13: vista frontale del piatto del tagadà

## 2.1.2 Rotazioni antiorarie

Sia per il motore X che per il motore Z.

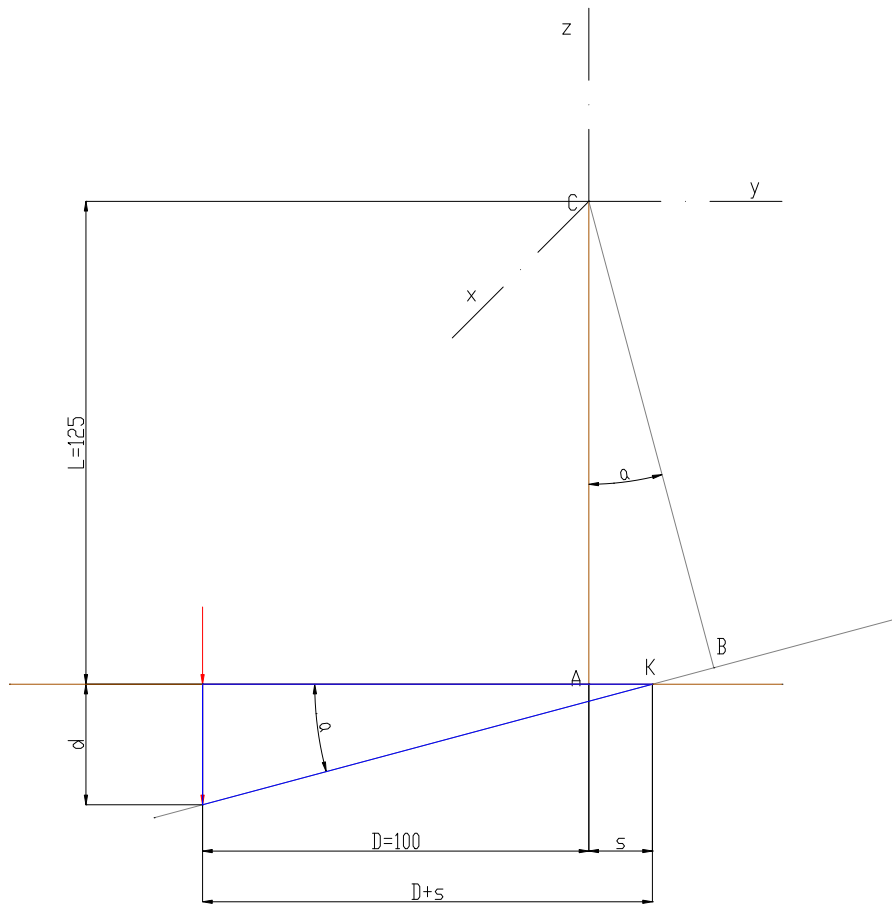
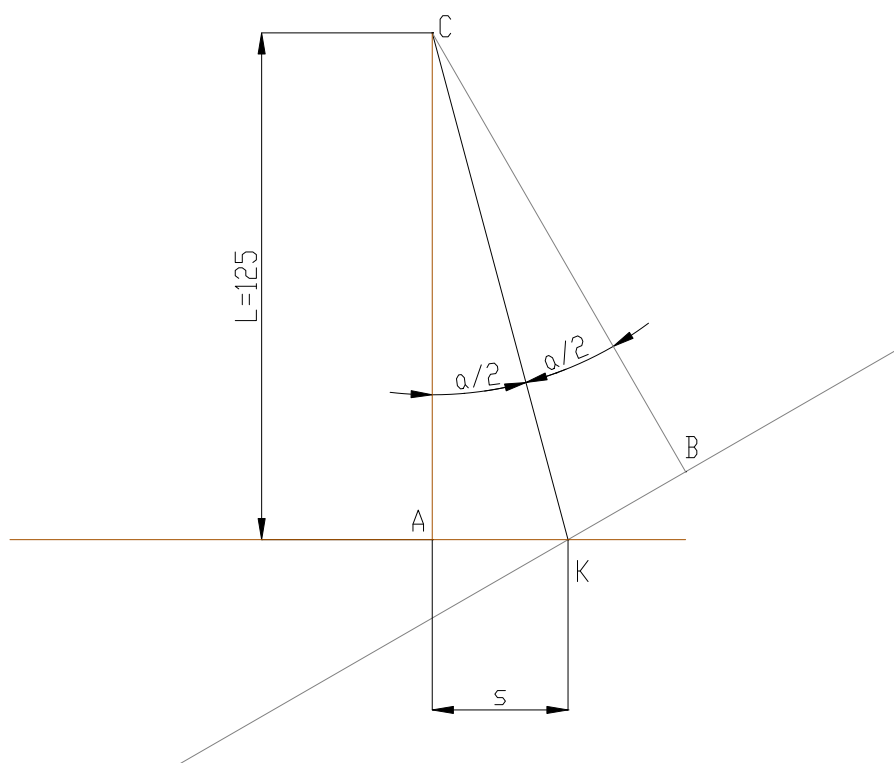


Figura 14: rotazione antioraria del piatto

Anche qui ci si concentra sul triangolo (in blu in Figura 14) che ha per cateti  $d$  e  $D+s$ , e si può scrivere:

$$a = \arctan \frac{d}{D+s}$$

Per trovare una relazione per  $s$  facciamo uno zoom della Figura 14.



Gli angoli  $\widehat{CAK}$  e  $\widehat{CBK}$  sono, ovviamente, retti.

Per trovare  $s$  basta concentrarsi sul triangolo CAK:

$$s = L \tan \frac{a}{2}$$

Quindi sostituendo  $s$  nella prima equazione giungiamo a

$$a = \arctan \frac{d}{D + L \tan \frac{a}{2}} \quad (2)$$

che è anch'essa un'equazione trascendente ma che si può calcolare in modo approssimato con il calcolatore.

Questa condizione per il calcolo dell'angolo di rotazione, come già detto, si usa anche per il motore Z e si può ben vedere dalla Figure 15.

Le formule (1) e (2) ci permettono di calcolare l'angolo con una certa approssimazione in quanto, sia sono formule trascendenti e quindi la risoluzione non può essere esatta e sia perchè le misurazioni fatte sono affette da errore di misura. Nel terzo paragrafo proveremo a stimare l'errore derivante dall'utilizzo di queste due formule.

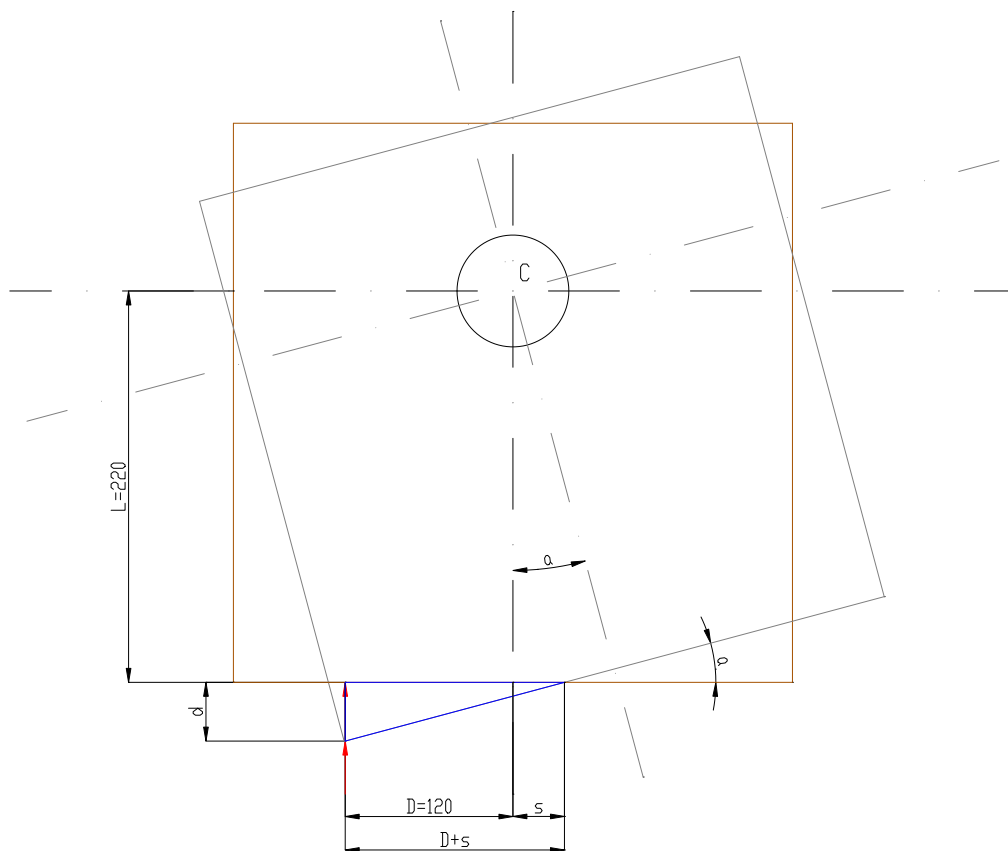


Figura 15: rotazione attorno l'asse z

## 2.2 Misure e interpolazione dei dati

Introduciamo ora in numero  $n$  che indica il movimento relativo ( $nr$ ) o assoluto ( $na$ ) del motore, che va impostato via software.

Il nostro obiettivo è proprio dare una relazione tra  $n$  e l'angolo di rotazione  $\alpha$ .

### 2.2.1 Motore Z

Per il motore Z come detto in precedenza si è scelto di considerare la posizione *zero* quando si è a ridosso del finecorsa E1. In questa posizione, infatti, il software è già impostato con  $n=0$  ( $n$  indice di rotazione del software). Alla rotazione massima, sul finecorsa E2,  $n=19,203$ . Per questa modalità l' $n$  relativo e assoluto coincidono.

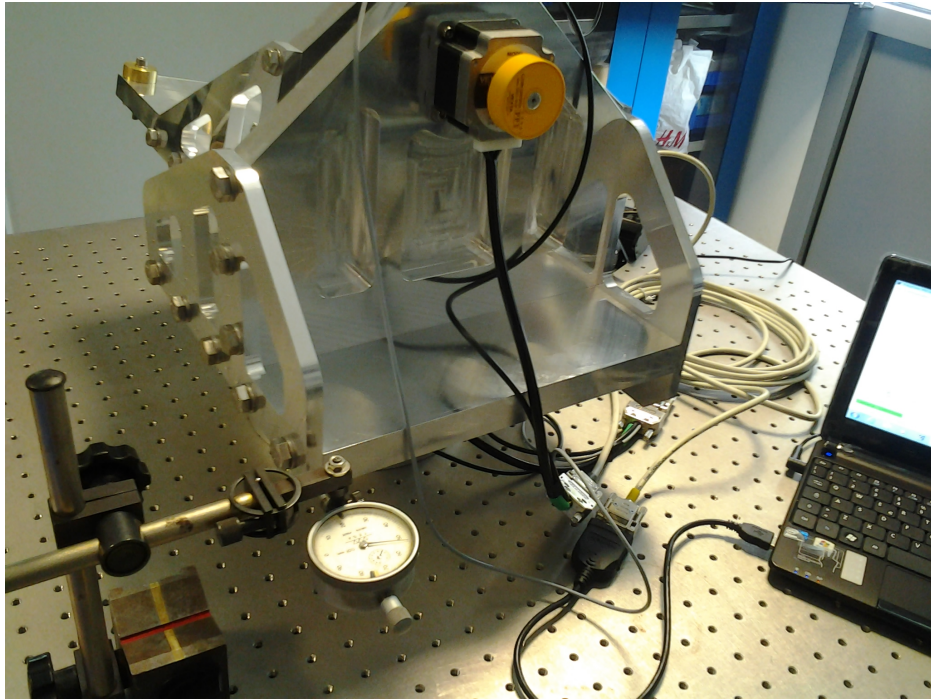


Figura 16: misurazione sull'asse z

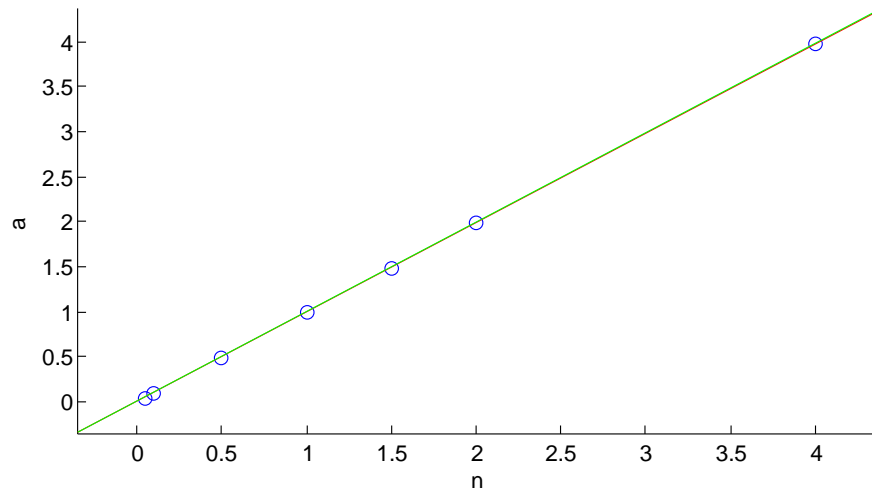
### Senza carico

Il comparatore è stato appoggiato al lato del piatto del tagadà ad una  $D=12\text{cm}$ , la  $L=22\text{cm}$ , come si vede in Figura 15.

$n$	$d(\text{mm})$	$a(^{\circ})$
4,00	8,89	3,98
2,00	4,31	1,99
1,50	3,21	1,49
1,00	2,12	1,00
0,50	1,05	0,50
0,10	0,21	0,10
0,05	0,10	0,05

Per il calcolo dell'angolo si è usata la formula (2) e, visto che l'angolo restituito è in radianti, va moltiplicato per  $\frac{180}{\pi}$  per portarlo in gradi.

Facciamo un fit lineare con Matlab sui valori della tabella per trovare la relazione angolo/ $n$ .



Least squares:

$$a = n$$

RMS error = 0.003

Figura 17: fit lineare dell'asse z

La retta di regressione calcolata è:

$$a = n$$

Come verifica proviamo a misurare la rotazione utilizzando  $n_c$  (calcolato) fornito da tale retta, dove  $a^*$  è l'angolo che vogliamo misurare. Il solito  $a$  è l'angolo calcolato sulla base di  $d$  misurato.

$a^*$ (°)	$n_c$	$d$ (mm)	$a$ (°)
4,00	4,02	8,93	4,00
2,00	2,01	4,32	2,00
1,50	1,51	3,22	1,50
1,00	1,00	2,12	1,00
0,50	0,50	1,05	0,50
0,10	0,10	0,21	0,10
0,05	0,05	0,10	0,05

Come si può vedere dai risultati ottenuti l'angolo  $a$  è praticamente come ci aspettavamo in un range del  $\pm 0,01^\circ$ .

Inoltre con un software di geometria (LibreCAD) è stata simulata la rotazione del piatto e rilevato quale dovrebbe essere la vera misura del comparatore, per esempio per l'angolo di  $4^\circ$ ,  $d$  dovrebbe essere 8,928mm contro gli 8,93mm misurati, il ch  conferma la bont  della misura fatta.

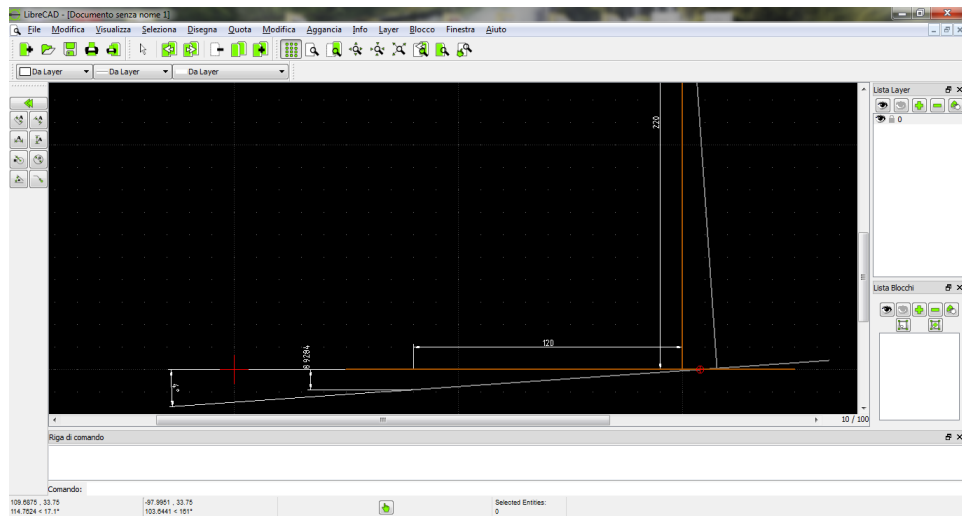


Figura 18: simulazione con LibreCAD

Con le ultime considerazioni fatte si può tranquillamente affermare che la retta di regressione ottenuta è una buona retta.

### Con carico

Sono stati messi sul piatto del tagadà quattro cilindri (in rosso in Figura 19), per un totale di 19kg, piazzati in modo che il peso sia distribuito uniformemente.

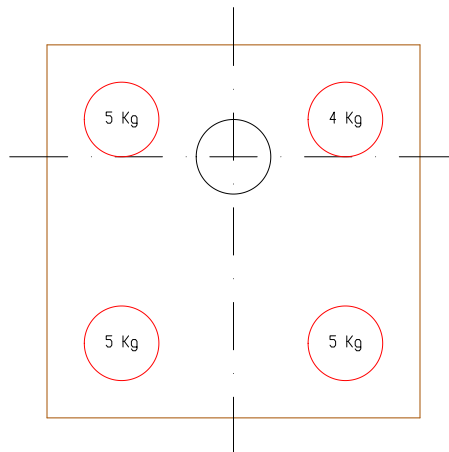


Figura 19: disposizione dei pesi sul piatto del tagadà

Dopo aver piazzato i pesi notiamo che il comparatore rileva una misura di circa 0,01mm, ovviamente dovuta al carico, e del tutto trascurabile. Ripete-



tiamo quindi le misure con  $n_c$  e il comparatore rileva *esattamente* le stesse misure che a vuoto.

Possiamo dire quindi che la risposta del motore con peso fino a 19kg è ancora lineare ed è la stessa che senza carico:  $a = n$

### 2.2.2 Motore X

#### A vuoto

Il riferimento per questo motore è quando il piatto è appoggiato al finecorsa E1. Per portarlo nella posizione zero ( quando è parallelo al banco ottico) è necessario mettere il piatto in bolla. Per farlo si è fatto scorrere il comparatore sopra il piatto e si è verificato che la differenza fra gli estremi del piatto è trascurabile ( $d \leq 0,02-0,03\text{mm}$ ), questo accade per un  $n \approx 9,10$ .

Quindi la posizione *zero* assunta è  $n=9,10$ .

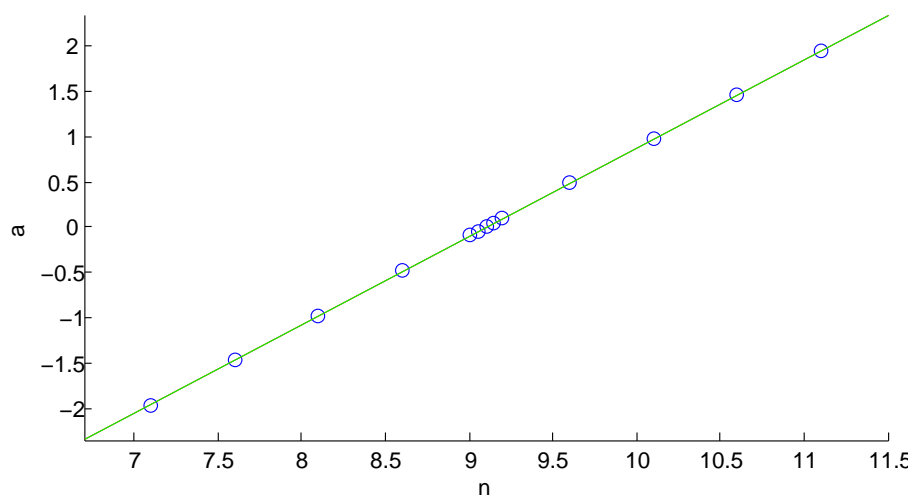
Attorno a questo valore si fa girare il piatto ruotando in senso orario ( $n$  relativo negativo) o ruotando in senso antiorario ( $n$  relativo positivo). Si riportano in Figura 20 i dati riferiti all' $n$  assoluto (partendo da E1). La relazione tra i due è  $nr = |na - 9,10|$ .

L'angolo  $a$  è stato calcolato con la formula (1) per rotazioni orarie (angolo negativo) e con la formula (2) per rotazioni antiorarie (angolo positivo).

Il comparatore si trova ad una  $D=10\text{cm}$  e  $L=12,5\text{cm}$ .

$na$	$nr$	$d(\text{mm})$	$a(^{\circ})$
7,10	2,00	3,35	-1,96
7,60	1,50	2,52	-1,47
8,10	1,00	1,68	-0,97
8,60	0,50	0,84	-0,48
9,00	0,10	0,16	-0,09
9,05	0,05	0,07	-0,04
9,10	0,00	0,00	0,00
9,15	0,05	0,07	0,04
9,20	0,10	0,16	0,09
9,60	0,50	0,85	0,48
10,10	1,00	1,73	0,98
10,60	1,50	2,60	1,47
11,10	2,00	3,49	1,96

Facciamo anche in questo caso il fit lineare dei dati rispetto a  $na$ :



Least squares:

$$a = -8.90 + 0.98*n$$

RMS error = 0.005

Figura 20: fit lineare per l'asse x

La retta di regressione trovata è:

$$a = 0.98n - 8.90$$

Per verificare se la retta da buoni risultati si rifanno nuovamente delle misure ad angoli prestabiliti ( $a^*$ ) con gli  $n$  calcolati forniti dalla retta.

$a^*(^\circ)$	$na$	$nr$	$d(\text{mm})$	$a(^\circ)$
-2,00	7,05	2,05	3,42	-2,00
-1,50	7,57	1,53	2,58	-1,50
-1,00	8,08	1,02	1,72	-1,00
-0,50	8,59	0,51	0,86	-0,50
-0,10	9,00	0,10	0,16	-0,09
-0,05	9,05	0,05	0,08	-0,05
0,00	9,10	0,00	0,00	0,00
0,05	9,15	0,05	0,08	0,05
0,10	9,20	0,10	0,16	0,09
0,50	9,61	0,51	0,87	0,50
1,00	10,12	1,02	1,77	1,00
1,50	10,63	1,53	2,66	1,50
2,00	11,14	2,04	3,57	2,00

Come si può ben vedere, anche in questo caso gli angoli calcolati sono uguali a quelli che si volevano entro un range di  $\pm 0,01^\circ$ .

Anche per questo motore si è simulata la rotazione con LibreCAD, si confronta in tabella la  $d_v$  vera con quella misurata:

$\alpha(^{\circ})$	$d_v(\text{mm})$	$d(\text{mm})$
-2,00	3,416	3,42
-1,50	2,576	2,58
-1,00	1,727	1,72
-0,50	0,868	0,86
-0,1	0,174	0,16
-0,05	0,087	0,08
0,05	0,087	0,08
0,10	0,175	0,16
0,50	0,877	0,87
1,00	1,766	1,77
1,50	2,661	2,66
2,00	3,568	3,57

Si può notare che sono quasi uguali, quindi le misure sono molto buone.

Perciò la retta di regressione trovata è una buona stima della relazione angolo- $n$ .

### Con carico

Quando si aggiungono al piatto del tagadà i quattro pesi come in Figura 19, c'è una rotazione piccola e positiva del piatto perchè il comparatore rileva una  $d \approx 0,33\text{mm}$ , infatti la forma fisica del piatto è sbilanciata verso sinistra e questo porta ad un momento maggiore da quella parte, quindi per effettuare le misure occorre una nuova messa in bolla. Facendo scorrere il comparatore sul bordo del piatto arriviamo alla messa in bolla con un  $n \approx 9,05$  per cui questa è adesso la posizione *zero*.

Ripetiamo le misurazioni:

$na$	$nr$	$d(\text{mm})$
7,00	2,05	3,42
7,52	1,53	2,58
8,03	1,02	1,72
8,54	0,51	0,86
8,95	0,10	0,16
9,00	0,05	0,08
9,05	0,00	0,00
9,10	0,05	0,08
9,15	0,10	0,16
9,56	0,51	0,87
10,07	1,02	1,77
10,58	1,53	2,66
11,09	2,04	3,57

Dalle misure di  $d$  fatte vediamo che ancora i risultati sono perfettamente in linea con quelli a vuoto, per cui il motore si comporta ancora in modo lineare e possiamo utilizzare la relazione angolo- $n$  che avevamo dato precedentemente.

### 2.3 Errori di misura

Facciamo prima di tutto un riepilogo sulle grandezze in gioco:

- $a$  : l'angolo misurato va dai  $0,05^\circ$  ai  $4^\circ$ , quindi relativamente piccolo
- $D, L$  : i parametri noti sono dell'ordine delle decine di cm
- $d$  : misura letta dal comparatore, è dai pochi mm al centesimo di mm

#### Errore per rotazioni antiorarie

Il metodo per rotazioni antiorarie si basa sull'equazione (2):

$$a = \arctan \frac{d}{D + L \tan \frac{a}{2}}$$

Considerando che l'angolo  $a$  è piccolo e ancora di più  $d$ , possiamo sviluppare in serie tale funzione e si ottiene:

$$a = f(d, D, L) = \frac{d}{D} - \frac{d^2 L}{2D^3} \quad (3)$$

L'errore assoluto si calcola come:

$$\Delta a = \left| \frac{\partial f}{\partial d} \right| \Delta d + \left| \frac{\partial f}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial f}{\partial L} \right| \Delta L \quad (4)$$

Calcoliamo le derivate e approssimiamo se è possibile (contando che  $d$  è piccolo):

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial f}{\partial d} \right| &= \frac{1}{D} - \frac{dL}{D^3} \approx \frac{1}{D} \\ \left| \frac{\partial f}{\partial D} \right| &= \left| -\frac{d}{D^2} + \frac{3d^2L}{2D^4} \right| \\ \left| \frac{\partial f}{\partial L} \right| &= \frac{d^2}{2D^3} \end{aligned}$$

quindi sostituendo nella (4):

$$\Delta a \approx \frac{1}{D} \Delta d + \left| \left( -\frac{d}{D^2} + \frac{3d^2L}{2D^4} \right) \right| \Delta D + \frac{d^2}{2D^3} \Delta L \quad (5)$$

L'errore relativo invece è semplicemente  $|\frac{\Delta a}{a}|$ .

Nel nostro caso  $\Delta d=0,00001$  è la precisione del comparatore,  $\Delta D = \Delta L = 0,001$ . Proviamo a fare qualche conto utilizzando la (5):

**motore Z** per la massima  $d$  misurata,  $d=8,93\text{mm}$  il  $\Delta a \approx 0,03^\circ$ , mentre per la minima  $d=0,10\text{mm}$  il  $\Delta a \approx 0,01^\circ$ , quindi possiamo scrivere rispettivamente:  $4,00^\circ \pm 0,03^\circ$  e  $0,05^\circ \pm 0,01^\circ$ .

**motore X** come prima troviamo l'errore assoluto alla massima e minima  $d$  misurata e risulta: con  $d=3,57\text{mm}$  ho l'angolo  $2,00^\circ \pm 0,02^\circ$  e con  $d=0,08\text{mm}$  ho l'angolo  $0,05^\circ \pm 0,01^\circ$ .

### Errore per rotazioni orarie

Il metodo per rotazioni orarie si basa sull'equazione (1):

$$a = \arctan \frac{d - L(1 - \cos a)}{D - L \sin a}$$

Un'equazione approssimata per piccoli angoli e piccole  $d$  misurate è:

$$a = f(d, D, L) = \frac{d}{D} + \frac{d^2L}{D^3} \quad (6)$$

L'errore assoluto associato a questa espressione è:

$$\Delta a \approx \frac{1}{D} \Delta d + \left( \frac{d}{D^2} + \frac{3d^2L}{D^4} \right) \Delta D + \frac{d^2}{D^3} \Delta L \quad (7)$$

La rotazione oraria è solamente per il motore X, l'errore per la  $d$  minima e massima misurata, risulta rispettivamente: per  $d=0,08\text{mm}$  l'errore è di  $0,01^\circ$  mentre per  $d=3,42\text{mm}$  ho un errore di  $0,03^\circ$ , quindi  $-2,00^\circ \pm 0,03^\circ$  e

$-0,05^\circ \pm 0,01^\circ$ .

Abbiamo verificato che l'errore massimo calcolato è minore dei  $0,05^\circ$  che ci eravamo prefissati, però in realtà l'errore commesso è anche minore perchè il confronto diretto tra la misura del comparatore e quella vera della simulazione lo dimostra. Perciò le relazioni che abbiamo dato tra l'angolo di rotazione e l'indice  $n$  sono molto accurate anche nella realtà, almeno con un carico fino a 20kg.

### 3 Tagadà da vuoto

#### 3.1 Tagadà

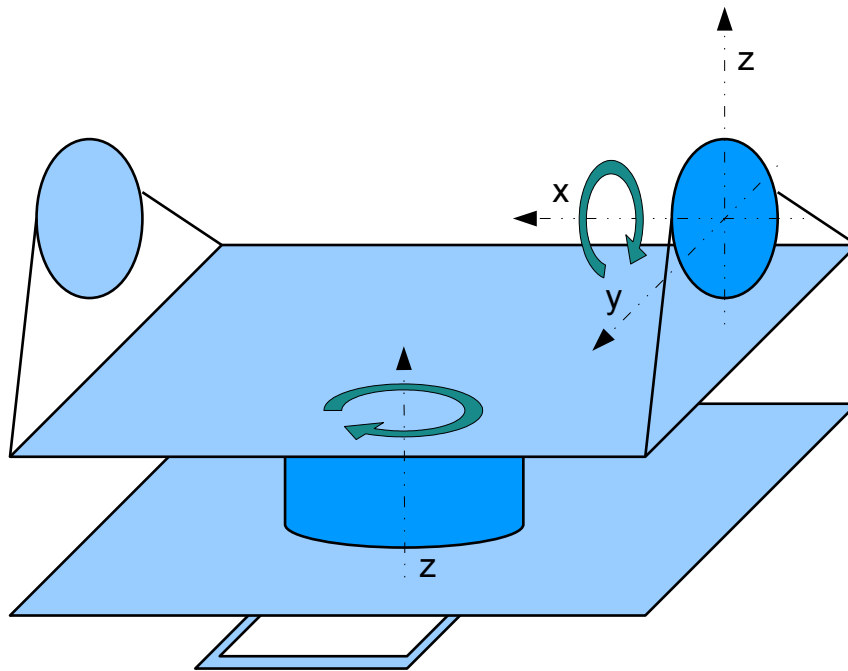


Figura 21: vista fronte tagadà

Il tagadà che sarà utilizzato nella camera da vuoto (in Figura 21), può ruotare attorno agli assi  $x$  e  $z$ .

Tale rotazione avviene grazie a due motori rotativi passo-passo di precisione della Newport, schematizzati in Figura 21 da un cilindro e da un cerchio in blu scuro. Come abbiamo detto i motori sono di precisione e hanno un incremento minimo di  $0,001^\circ$  con una accuratezza garantita di  $\pm 0,005^\circ$ . I motori possiedono un encoder (strumento elettronico che permette di rilevare l'angolo di rotazione) all'interno e uno switch ottico (interruttore) che determina la posizione di partenza (zero fisico).

Su entrambi gli assi non è possibile ruotare a  $360^\circ$  perchè alcune parti meccaniche si toccano, la massima escursione attorno all'asse  $x$  è di circa  $29^\circ$  mentre attorno all'asse  $z$  è di circa  $34^\circ$ .

#### 3.2 Controller

I motori, e quindi il tagadà, sono azionati dal controller MM4005 anch'esso della Newport (in Figura 22). Dal controller si possono impostare parametri



Figura 22: Newport MM4005

caratteristici dei motori e l'angolo di rotazione, cosa che ci semplifica di molto le cose, grazie agli encoder integrati nei motori. Tra i comandi principali ci sono (con motori accesi MOTOR ON):

**HOME:** può essere REAL o SIMULATED. Nella modalità REAL i motori si muovono fino a toccare lo switch integrato e si fermano, ciò permette di avere sempre una posizione di riferimento nello spazio. Nella modalità SIMULATED si azzerano semplicemente i contatori d'angolo, i motori quindi non si muovono.

**ZERO:** si azzerano semplicemente i contatori d'angolo (gli encoder) quindi gli assi di rotazione ora saranno tutti a  $0^\circ$ .

**MANUAL:** è possibile muovere manualmente gli assi selezionati. Per esempio per muovere l'asse 1 si tiene premuto il pulsante 1 o 3 a seconda del verso di rotazione desiderato, tenendo premuto assieme a 1/3 anche il tasto centrale 2 il motore si muoverà più velocemente.

**RELATIVE:** gli assi selezionati si muoveranno dell'angolo inserito rispetto alla posizione corrente..

**ABSOLUTE:** gli assi selezionati si muoveranno dell'angolo inserito rispetto alla posizione zero (home).

C'è inoltre una memoria EEPROM ed è quindi possibile creare e salvare programmi personalizzati.

Il controller è collegato ai motori attraverso dei cavi, nel nostro caso uno contrassegnato giallo e uno rosso, all'asse 2 (axis 2) va collegato il cavo rosso e all'asse 1 (axis 1) va collegato il cavo giallo. L'asse 1 identifica il motore che ruota attorno all'asse  $x$  (motore X) mentre l'asse 2 identifica il motore che ruota attorno all'asse  $z$  (motore Z).



### 3.3 Posizione di HOME

La posizione di *home* è la posizione alla quale il piatto del tagadà è perfettamente centrato alla base per quanto riguarda l'asse  $z$  e parallelo al banco (messa in bolla) per quanto riguarda l'asse  $x$ .

Per posizionare il tagadà come descritto, però, sorgono due problemi:

- Il primo è che i motori, come già detto, hanno degli switch che consentono di posizionare il motore in una posizione fissa di riferimento nello spazio, però per arrivare agli switch i motori dovrebbero compiere una rotazione maggiore di quella consentita fisicamente dal dispositivo.
- Il secondo è che gli encoder che rilevano l'angolo si azzerano ogni volta che si spegne e riaccende il controller e inoltre non è possibile memorizzare un angolo preciso nel controller.

Questi due problemi insieme rendono impossibile avere una posizione di riferimento nello spazio, una soluzione potrebbe essere installare dei sensori finecorsa come nell'altro tagadà ma non considereremo questa soluzione. L'unica posizione fissa nello spazio che può essere presa come riferimento è quando il piatto del tagadà tocca sul supporto, in entrambi gli assi, come mostrato in Figura 23 e Figura 25. Per evitare danni meccanici il comando *home* del controller è stato impostato su SIMULATED.

#### 3.3.1 Asse $x$

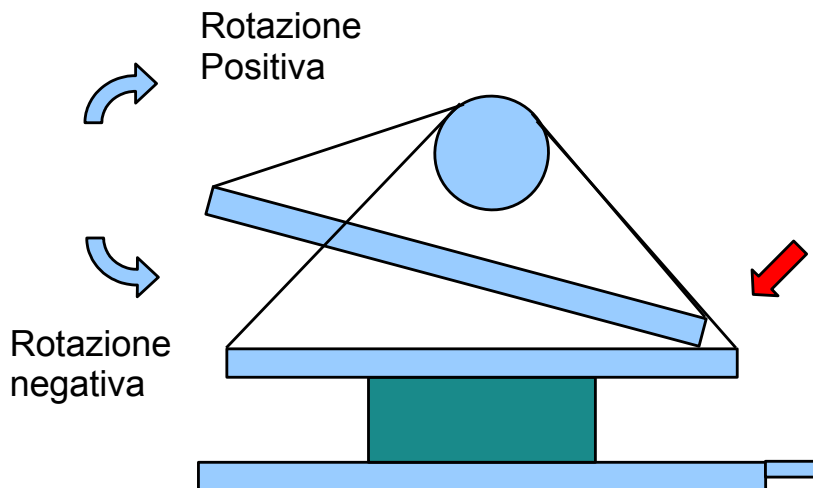


Figura 23: vista da sinistra - asse  $x$

La procedura per dare una posizione di HOME abbastanza precisa per questo asse è: prima mettere in bolla il piatto del tagadà e poi farlo ruotare nel verso positivo (premendo il pulsante 3) finchè non si tocca sul supporto, in questo modo vediamo di quanto abbiamo ruotato.

La messa in bolla del piatto del tagadà è stata fatta facendo scorrere il comparatore sopra il piatto da un lato all'altro (come mostra la Figura 24) e assicurandoci che la differenza di misura del comparatore sia piccola ( $\leq 0,03$  mm è stato verificato).

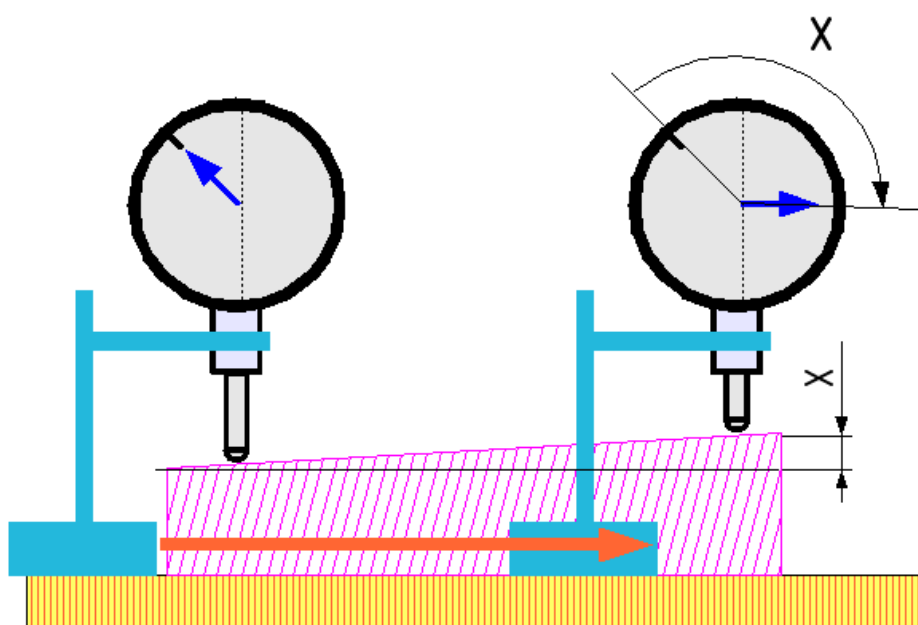


Figura 24: messa in bolla

Ora il piatto è in bolla (parallelo al banco) e cominciamo a farlo ruotare per portarlo a toccare sul supporto, come mostrato in Figura 23. Il fondo del piatto del tagadà ha una vite che sporge, quando facciamo toccare il piatto è questa vite che tocca per prima e di conseguenza bisogna fermare la rotazione quando la vite tocca il supporto (Figura 25), è importantissimo fermarsi appena il contatto è lieve per non rischiare di danneggiare il tagadà.

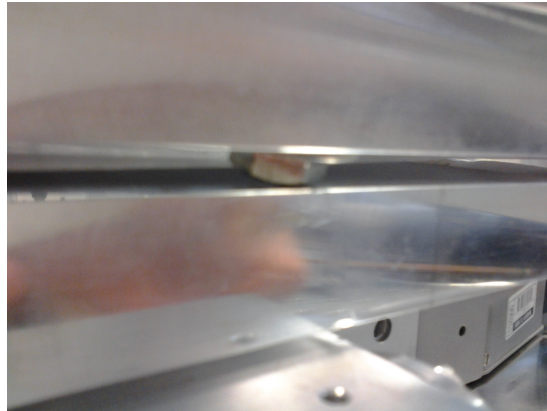


Figura 25: particolare del contatto tra vite e supporto

Per avere una miglior stima dell'angolo alla quale avviene il contatto si sono fatte cinque prove:

prova	$a(^{\circ})$
1	12,14
2	12,10
3	12,11
4	12,12
5	12,12

l'angolo medio  $a_m = 12,12^{\circ}$ , un errore umano viene sicuramente commesso e come caso peggiore possiamo considerare un errore di  $\pm 0,05^{\circ}$ .

Per l'asse  $x$  quindi per mettere in bolla il piatto bisogna ruotare in senso orario finchè la vite non tocca il supporto e poi ruotare di un angolo di  $-12,12^{\circ}$ . Infine si azzerava l'encoder con il comando *zero*.

## 3.3.2 Asse z

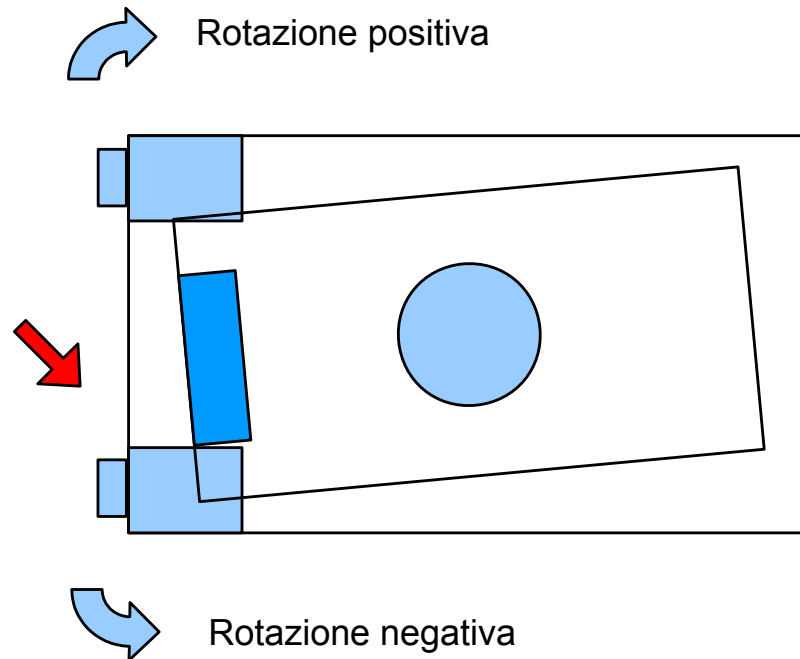


Figura 26: vista da sopra - assez

Per questo asse si tratta di allineare il piatto del tagadà con la base, per farlo procediamo sostanzialmente come per l'altro asse. Facciamo scorrere il comparatore sul piatto del tagadà (o sul supporto) tenendo la base magnetica del comparatore appoggiata alla base del tagadà (vedi Figura 27).

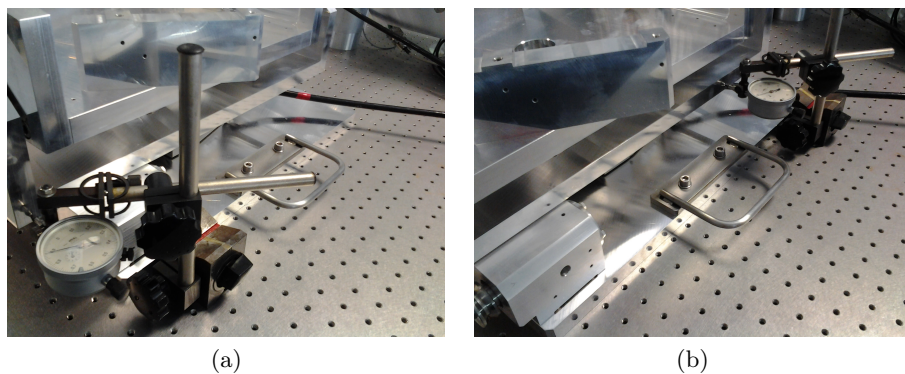


Figura 27

Quando misuriamo una differenza di posizione molto piccola ( $\leq 0,03\text{mm}$ ) allora possiamo ritenere piatto e base allineati.

Per dare un modo sistematico di allineamento però dobbiamo fornire un angolo, quindi ora cominciamo a far ruotare in senso antiorario il tagadà attorno all'asse  $z$  controllandolo a vista dal lato sinistro. Il supporto che sta ruotando ha delle barre metalliche che vanno a sbattere sul tank della ruota (come mostrato in Figura 26 e 28), principalmente la sbarra centrale delle tre tocca per prima e quando questo accade bisogna prontamente fermare la rotazione.

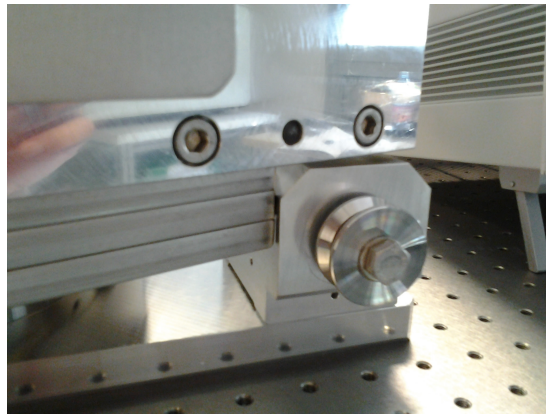


Figura 28: contatto tra la sbarra centrale e il tank della ruota

Sono state fatte cinque prove:

prova	$a(^{\circ})$
1	-16,99
2	-17,01
3	-17,00
4	-17,00
5	-17,00

L'angolo medio  $a_m = -17,00^{\circ}$ , considerando l'errore umano di allineamento, nel caso peggiore possiamo considerarlo circa  $\pm 0,05^{\circ}$ .

Quindi per mettere a zero l'asse  $z$  si fa ruotare fino al contatto e poi si torna indietro facendo ruotare in senso relativo di  $+17,00^{\circ}$ . Infine si azzerava l'encoder con il comando *zero*.

In alternativa basta portare entrambi gli assi a contatto come descritto in precedenza e poi si fa partire il programma 1 (*progr1*) che porta a zero entrambi gli assi. Anche qui infine si devono azzerare gli encoder degli assi con il comando *zero*.

### 3.4 Misure

Tutte le misure sono fatte con il tagadà nella posizione di HOME descritta nel secondo paragrafo.

Lo scopo delle misure, questa volta, è di verificare se l'angolo di rotazione sul display del controller coincide con quello vero.

#### 3.4.1 Asse x

Il comparatore è stato appoggiato sul piatto del tagadà ad una  $D=12\text{cm}$  e  $L=3,5\text{cm}$  ( $D$  e  $L$  hanno lo stesso significato delle misure per il tagadà non da vuoto), mentre  $d$  è la misura rilevata dal comparatore.

In riferimento alla Figura 22, che mostra il tagadà dal lato sinistro, il comparatore è stato posizionato dalla parte destra del piatto, per cui per le rotazioni positive (orarie) si utilizza la formula (2) della seconda configurazione:

$$a = \arctan \frac{d}{D + L \tan \frac{a}{2}}$$

mentre per le rotazioni negative (antiorarie) si usa la formula (1) della prima configurazione:

$$a = \arctan \frac{d - L(1 - \cos a)}{D - L \sin a}$$

Le misure fatte, in riferimento all'angolo impostato sul controller sono:

$a_{CONTROLLER} (^{\circ})$	$d(\text{mm})$	$a_{CALCOLATO} (^{\circ})$
-2,50	5,21	-2,50
-2,00	4,17	-2,00
-1,50	3,13	-1,50
-1,00	2,08	-1,00
-0,50	1,04	-0,50
0,00	0,00	0,00
+0,50	1,05	+0,50
+1,00	2,10	+1,00
+1,50	3,15	+1,50
+2,00	4,21	+2,00
+2,50	5,27	+2,50

e mostrano perfettamente come l'angolo che si imposta sul controller sia reale, in realtà è molto più accurato di quello che possiamo rilevare con il comparatore perchè gli encoder digitali sono molto precisi.

Adesso proviamo a rifare le misure caricando sul piatto del comparatore quattro pesi, uno da 4kg e gli altri tre da 5kg, disposti come in Figura 29,

così da rendere il peso distribuito più omogeneamente possibile sulla superficie (sul piatto del tagadà ci sono delle barre metalliche che non consentono la disposizione dei pesi a quadrato).

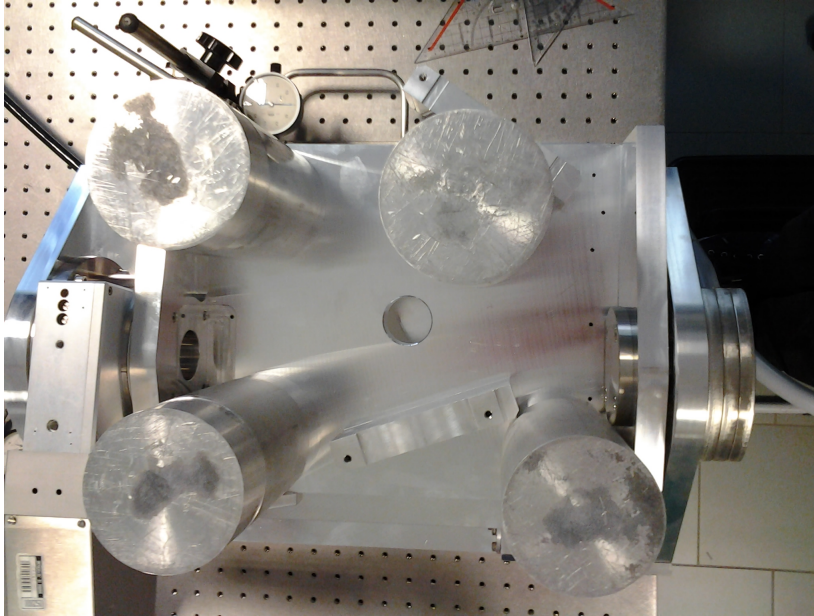


Figura 29: vista da sopra del tagadà con carico

Messi i pesi c'è una lieve rotazione oraria del piatto (perché il nuovo baricentro del sistema non è più sull'asse), infatti il comparatore rileva una  $d \approx 0,08\text{mm}$  che corrisponde ad una rotazione calcolata di  $+0,04^\circ$ . In effetti è esattamente vero perché riportando indietro il piatto, cioè ruotando di  $-0,04^\circ$  il comparatore segna zero e quindi il piatto è tornato in bolla.

Rifacendo le misure sugli stessi angoli troviamo che il comparatore rileva *esattamente* la stessa lunghezza, perciò anche con un peso di circa 20kg abbiamo verificato che la rotazione impostata è corretta, come volevamo.

### 3.4.2 Asse z

Per quanto riguarda l'asse  $z$  prima facciamo le misure senza carico e poi aggiungendo i pesi, come per l'altro asse.

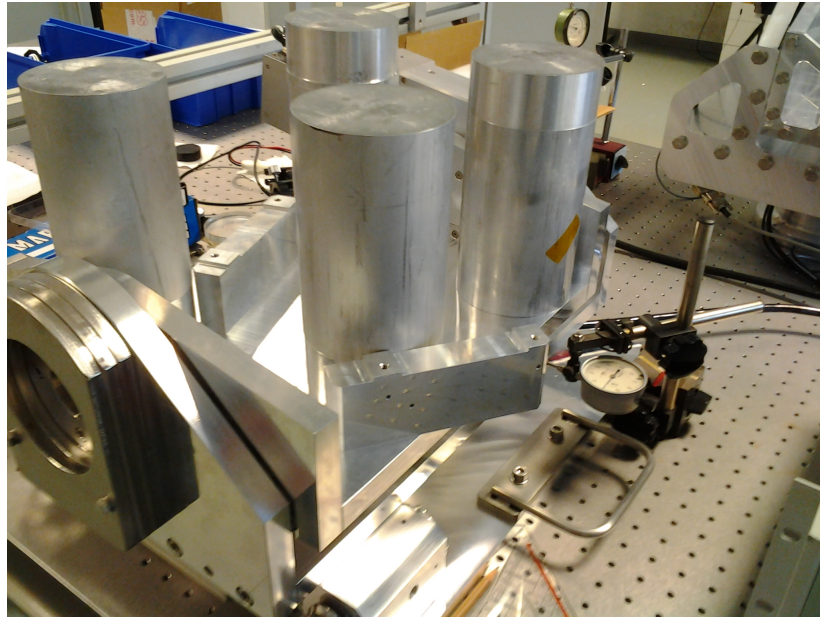


Figura 30: vista fronte tagadà

In riferimento alla Figura 26 e Figura 30, il comparatore è posizionato sul lato di fronte (quello della maniglia) ad una  $D=20\text{cm}$  e  $L=15,5\text{cm}$ .

Le rotazioni negative (antiorarie) seguono la prima configurazione e la relativa formula, mentre le rotazioni positive (orarie) seguono la seconda configurazione con relativa formula.

Le misurazioni senza carico sono:

$\alpha_{CONTROLLER}(\text{°})$	$d(\text{mm})$	$\alpha_{CALCOLATO}(\text{°})$
-2,00	6,87	-1,99
-1,00	3,46	-1,00
-0,50	1,74	-0,50
0,00	0,00	0,00
+0,50	1,74	+0,50
+1,00	3,50	+1,00
+2,00	7,05	+1,99

Anche qui si nota come l'angolo calcolato sia praticamente uguale a quello impostato entro una fascia di  $\pm 0,01\text{°}$ , anche se quello impostato è più



preciso.

Ora si ripetono le misure a carico (circa 20kg) distribuito come in Figura 29 e Figura 30. Il baricentro dei pesi ora è sì spostato rispetto che senza carico però non influisce sull'asse  $z$  verticale, infatti neanche il comparatore rileva nulla. Ripetiamo le misure e anche questa volta il comparatore rileva *esattamente* la stessa lunghezza, quindi ne deduciamo che fino ad un peso di circa 20 kg non ci sono variazioni apprezzabili nell'angolo impostato.

Per queste misurazioni non calcoleremo l'errore assoluto perchè non siamo interessati a dare una relazione precisa tra angolo vero di rotazione e controller, bensì è stata fatta solo una verifica dell'angolo impostato al controller, che è molto più preciso visto che ha una precisione nominale di  $\pm 0,005^\circ$ .

## Conclusioni

PHEBUS è uno spettrometro che lavora nel campo dell'ultravioletto (principalmente EUV e FUV) a bordo della missione spaziale Bepi-Colombo dell'ESA, missione che mira ad una conoscenza più profonda del pianeta Mercurio.

La sua risposta radiometrica dipende dalla sua efficienza e dall'etendue geometrico, per cui è necessario conoscere molto bene questi due parametri per conoscere la vera risposta tra l'ingresso e l'uscita dello strumento.

In particolare, l'etendue geometrico che in generale dipende dalla superficie e dall'angolo solido di propagazione, come si è spiegato nell'introduzione, per essere calcolato deve essere valutata una somma discreta di misurazioni del tasso di conteggio dei fotoni nelle due direzioni angolari ortogonali  $(\alpha, \beta)$ , oltre a conoscere la radianza del fascio entrante e l'efficienza dello strumento. Per calcolare l'etendue con buona approssimazione è necessario fare molte misurazioni nelle diverse direzioni angolari e quindi bisogna poter ruotare PHEBUS con un passo angolare piccolo ma soprattutto preciso, in modo da mappare nello spazio lo slit d'ingresso dello strumento.

Per ruotare lo strumento si utilizzano dei particolari sistemi rotativi chiamati Tagadà, in grado di ruotare attorno a due assi:  $x$  e  $z$ .

L'obiettivo di questo lavoro era la calibrazione dei tagadà, e nello specifico per il tagadà non da vuoto, era di:

- dare una relazione, possibilmente lineare, tra l'angolo di rotazione effettivo del tagadà e il valore numerico,  $n$ , accettato dal controllore;

mentre per il tagadà da vuoto era di:

- dare una posizione di riferimento fissa nello spazio e verificare che l'angolo impostato sul controller fosse il vero angolo di rotazione;

L'errore massimo di rotazione accettato per entrambi i tagadà era di  $0,05^\circ$ .

Le misure sono state fatte sia senza carico che con un peso caricato di circa 20kg per controllare il corretto funzionamento del tagadà sotto sforzo.

È stato utilizzato uno strumento meccanico, il comparatore centesimale, con precisione del centesimo di millimetro, per fare tutte le misurazioni necessarie.

Le conclusioni a cui siamo giunti sono le seguenti:

- Per il tagadà non da vuoto abbiamo dato una relazione lineare, per entrambi gli assi, tra l'angolo di rotazione e il parametro  $n$  del controller. Per l'asse  $z$ :

$$a = n$$

Per l'asse  $x$ :

$$a = 0.98n - 8.90$$

Tali relazioni sono state verificate con un carico di circa 20kg distribuiti in modo uniforme sul piatto, quindi possiamo aspettarci il corretto funzionamento del tagadà fino a questo carico.

La specifica da rispettare per l'errore massimo della rotazione era di  $0,05^\circ$ , e i calcoli dell'angolo misurato porgono un errore assoluto che al massimo arriva a circa  $0,03^\circ$ , quindi accettabile. Tuttavia la formula utilizzata per il calcolo dell'errore è una formula approssimata e questo può portare ad un calcolo che in realtà può essere ben minore, infatti tra il confronto delle misure con le simulazioni possiamo dire che l'errore commesso alla rotazione è dell'ordine di  $0,01-0,02^\circ$ , che quindi dimostra come sono precise le relazioni date.

- Per il tagadà da vuoto invece abbiamo mostrato come portare nella posizione di home il dispositivo (messa in bolla dello strumento), operazione abbastanza critica perchè non vi sono riferimenti utilizzabili a parte il limite imposto dal contatto meccanico tra le parti.

Per quanto riguarda la rotazione del tagadà qui era importante verificare se il controllore e gli encoder erano calibrati, che equivale a verificare che la rotazione sia quella vera. È bastata una verifica con meno misure perchè, come già detto, questo controller utilizza un riferimento impostabile in gradi o radianti con una precisione angolare nominale di  $\pm 0,005^\circ$ , che rispetta decisamente bene il vincolo dei  $0,05^\circ$ .

## Riferimenti bibliografici

- [1] P. Zuppella, A.J. Corso, P. Nicolosi, M.G. Pelizzo, 2011. *CWP04: Geometric G EUV-FUV OFF-EXT*.
- [2] P. Zuppella, A.J. Corso, P. Nicolosi, M.G. Pelizzo, V. Polito, 2011. *CWP09: Radiometric Eff EUV-FUV Instrument*.
- [3] Vanessa Polito, 2011. *Model and experimental measurements of PHEBUS instrument on board the BepiColombo mission*, Tesi di Laurea Magistrale.
- [4] Alberto Donazzan, 2011. *Descrizione e selezione di fotorivelatori per la calibrazione dello strumento PHEBUS a bordo della missione ESA BepiColombo*, Tesi di Laurea Triennale.
- [5] [http://www.newport.com/RV-Series-High-Performance-Precision-Rotation-Sta/546288/1033/info.aspx#tab\\_Specifications](http://www.newport.com/RV-Series-High-Performance-Precision-Rotation-Sta/546288/1033/info.aspx#tab_Specifications)
- [6] [www.artisan-g.com/info/newport\\_mm4005\\_manual.pdf](http://www.artisan-g.com/info/newport_mm4005_manual.pdf)
- [7] [http://www.micosusa.com/old/Con\\_5018.html](http://www.micosusa.com/old/Con_5018.html)
- [8] <http://www.alcatechnology.com>
- [9] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>