

Misura indiretta della velocità della luce

Laboratorio di Ottica, Elettronica e Fisica Moderna

C.d.L. in Fisica, a.a. 2023-2024

Università degli Studi di Milano

Lucrezia Bioni, Leonardo Cerasi, Giulia Federica Bianca Coppi

Matricole: 13655A, 11410A, 11823A

19 ottobre 2023

1 Introduzione

Lo scopo di questa esperienza è la misurazione della velocità della luce utilizzando il metodo di Foucault. Questa grandezza, infatti, svolge un ruolo cruciale come costante fisica universale e la sua determinazione è stata di fondamentale importanza per la definizione delle unità di misura nel Sistema Internazionale. Il valore che, attualmente, è universalmente accettato come misura più precisa della velocità della luce è $\bar{c} = 299792456.2 \text{ m/s}$.

1.1 Metodo

La determinazione della velocità della luce viene effettuata utilizzando il metodo di Foucault: viene diretto un fascio luminoso, proveniente da una sorgente, verso uno specchio rotante che ne causa la riflessione con uno spostamento angolare.

Il raggio di luce, dopo aver colpito lo specchio rotante, viene riflesso nella direzione opposta lungo la stessa traiettoria che aveva compiuto nel viaggio di andata. Poiché lo specchio è in rotazione, la posizione in cui il raggio colpisce lo specchio è in costante cambiamento: questo causa uno spostamento angolare tra il punto di arrivo del raggio riflesso e la posizione iniziale - misurata con specchio fermo.

Misurando con precisione la posizione iniziale δ_i dello spot luminoso - con specchio fermo - e la finale δ_f - con specchio in movimento - si riesce a dedurre lo spostamento angolare $\Delta\delta = \delta_f - \delta_i$: questo rende possibile determinare la velocità della luce:

$$c = 4f_2D^2 \frac{(\omega - \omega_0)}{(D + a - f_2)\Delta\delta} \quad (1.1.1)$$

dove c è la velocità della luce, f_2 è la lunghezza focale della seconda lente posta nell'apparato, D è la lunghezza del percorso compiuto dal fascio luminoso, ω_0 e ω sono rispettivamente la velocità angolare iniziale e finale dello specchio rotante, a è la distanza tra la seconda lente dell'apparato e lo specchio rotante e $\Delta\delta$ è lo spostamento dell'immagine nel punto di osservazione, quando la velocità angolare dello specchio rotante passa da ω_0 a ω . Per uno schema dell'apparato sperimentale si veda la Fig. 1.

2 Misure

Si è inizialmente misurata la distanza D tra lo specchio rotante e lo specchio concavo. La distanza D è stata misurata mediante un metro di risoluzione 0.01 m, la quale è stata attribuita come incertezza al valore della misura:

$$D = (13.28 \pm 0.01) \text{ m} \quad (2.2)$$

Si è poi misurata la distanza a tra la seconda lente dell'apparato e lo specchio rotante. La misura è stata effettuata attraverso un metro di risoluzione 0.001 m, che è stata attribuita come incertezza di a :

$$a = (0.474 \pm 0.001) \text{ m} \quad (2.3)$$

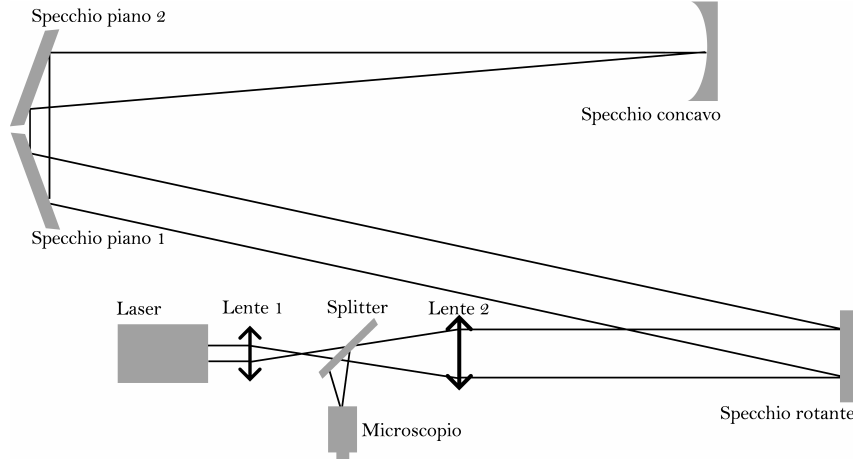


Fig. 1: Schema dell'apparato sperimentale.

Dopo aver avviato lo specchio rotante in senso orario a una frequenza di rotazione ν_0 nell'intervallo $[10, 20]$ Hz, si è misurata, mediante micrometro di risoluzione 0.00001m , la posizione dello spot luminoso δ_0 visibile attraverso un microscopio. Si è poi portato lo specchio in un intorno della frequenza massima di rotazione ν e si è misurata, sempre mediante micrometro, la nuova posizione dello spot luminoso δ . Tale set di misure è stato ripetuto per 30 volte. I dati rilevati sono riportati nella Tab. 3.

Si sono prese le medesime misure di posizione, a frequenza minima e a frequenza massima, facendo ruotare lo specchio in senso antiorario. I dati rilevati sono riportati nella Tab. 4.

Si sono poi effettuate misure di posizione dello spot luminoso portando lo specchio dalla frequenza massima di rotazione in senso orario ν_0 alla frequenza massima di rotazione in senso antiorario ν . I dati rilevati sono riportati nella Tab. 5.

Infine, si sono rilevate misure di posizione dello spot luminoso con lo specchio a frequenza minima di rotazione ($[10, 20]$ Hz) e a frequenze intermedie, sia in senso orario (i dati sono riportati nella Tab. 6) sia in senso antiorario (i dati sono riportati nella Tab. 7).

3 Analisi Dati

3.1 Elaborazione Dati

A partire dalle coppie di misurazioni della frequenza di rotazione dello specchio ν e della deviazione dello spot luminoso del laser δ per ciascuna configurazione, sono state calcolate la velocità angolare $\omega = 2\pi\nu$ e le rispettive variazioni $\Delta\omega$ e $\Delta\delta$ al variare della frequenza: i dati così elaborati sono riportati in Tabb. 8, 9, 10, 11, 12.

Una volta ottenuta ciascuna coppia $(\Delta\omega, \Delta\delta)$, sono stati ricavati i valori della velocità della luce c tramite l'equazione 1.1.1, i quali vengono presentati nelle Tabb. 8, 9, 10, 11, 12. Attraverso la meda aritmetica dei valori di c così ottenuti, si è estrapolato un valore della velocità della luce per ciascuna configurazione (si veda Tab. 1).

3.2 Stima degli errori

L'errore sulla stima del valore di c , $\sigma_{c,tot}$, è frutto di due componenti, una statistica $\sigma_{c,stat}$ e una sistematica $\sigma_{c,sist}$:

$$\sigma_{c,tot} = \sqrt{\sigma_{c,stat}^2 + \sigma_{c,sist}^2} \quad (3.2.4)$$

La componente statistica viene determinata attraverso la deviazione standard della media dei valori ottenuti per c per ogni set di misure di $\Delta\omega$ e $\Delta\delta$.

La componente sistematica viene determinata attraverso la propagazione degli errori sulle misure delle grandezze D e a nella formula per la determinazione della velocità della luce 1.1.1. In tale procedimento si considerano le grandezze ω e δ come prive di errore, poiché questo è già stato considerato nella componente

statistica dell'errore:

$$\sigma_{c,sist} = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2} \quad (3.2.5)$$

dove:

$$\frac{\partial c}{\partial D} = \frac{4\Delta\omega}{\Delta\delta} \frac{Df_2(2a + D - 2f_2)}{(a + D - f_2)^2} \quad (3.2.6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial a} = -\frac{4\Delta\omega}{\Delta\delta} \frac{D^2 f_2}{(a + D - f_2)^2} \quad (3.2.7)$$

Per ciascuna configurazione, si è valutata la componente sistematica dell'errore sul valor medio della velocità della luce: come valori di $\Delta\omega$ e $\Delta\delta$ sono stati utilizzati i corrispondenti valori medi per ciascun set di dati.

3.3 Confronto

Per confrontare i valori della velocità della luce ottenuti per ciascuna configurazione con il valore aspettato $\bar{c} = 299792456.2 \text{ m/s}$, si è utilizzato un test di Student a due code, con, a seconda della configurazione, gradi di libertà pari a 29 o 14, ottenuti dalla differenza tra il numero totale di misure effettuate (30 o 15) e il numero di variabili statistiche estratte da queste (1).

I valori di c elaborati per ciascuna configurazione con i rispettivi errori sono riportati nella seguente tabella:

Configurazione	$c [10^8 \text{ m/s}]$	$\sigma_{c,stat} [10^8 \text{ m/s}]$	$\sigma_{c,sist} [10^8 \text{ m/s}]$	$\sigma_{c,tot} [10^8 \text{ m/s}]$	Compatibilità
CW-min-max	3.044	0.025	0.002	0.025	6.90%
CCW-min-max	2.972	0.021	0.002	0.021	23.66%
CW-CCW	2.980	0.012	0.002	0.012	15.40%
CW-min-mid	2.983	0.029	0.002	0.029	60.90%
CCW-min-mid	2.978	0.022	0.002	0.022	37.16%

Tab. 1: Valori di c e relativi errori per ciascuna configurazione.

Dal test effettuato emerge che i valori di c superano tutti la soglia minima di compatibilità stabilita al 5%.

Sempre mediante test di Student si è eseguito un confronto tra le varie medie ottenute per ciascuna configurazione:

	CW-min-max	CCW-min-max	CW-CCW	CW-min-mid	CCW-min-mid
CW-min-max		$1.36 \cdot 10^{-15}\%$	$1.44 \cdot 10^{-16}\%$	$2.74 \cdot 10^{-7}\%$	$2.82 \cdot 10^{-9}\%$
CCW-min-max	$1.36 \cdot 10^{-15}\%$		8.36%	17.76%	45.60%
CW-CCW	$1.44 \cdot 10^{-16}\%$	8.36%		67.69%	59.51%
CW-min-mid	$2.74 \cdot 10^{-7}\%$	17.76%	67.69%		57.93%
CCW-min-mid	$2.82 \cdot 10^{-9}\%$	45.60%	59.51%	57.93%	

Tab. 2: Compatibilità reciproche tra valori di c .

Come si evince dalle Tabb. 1 e 2, il dataset “CW-min-max”, corrispondente alle misurazioni in Tabb. 3 e 8, risulta altamente incompatibile con i restanti dati, nonché quello con la minore compatibilità col valore aspettato: per questo, si è deciso di rigettarlo nell'analisi conclusiva.

4 Conclusione

Il valore finale della velocità della luce è stato calcolato attraverso la media ponderata dei valori ottenuti dai dataset non rigettati:

$$c = (2.979 \pm 0.090) \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (4.8)$$

Il valore aspettato $\bar{c} = 299792458.2 \text{ m/s}$ è situato entro 2.1σ dal valore calcolato, dunque il risultato dell'esperimento è in accordo col valore universalmente accettato della velocità della luce.

Il valore leggermente sottostimato così ottenuto potrebbe essere giustificato dal fatto che l'esperimento non è stato svolto nel vuoto, dunque l'indice di rifrazione effettivo, cioè quello dell'aria, potrebbe aver influito sulle misurazioni.

I valori di c meno compatibili con il valore atteso sono quelli ottenuti portando lo specchio a frequenza massima di rotazione: tale fenomeno potrebbe essere spiegato dal fatto che, in “modalità turbo”, il valore della frequenza letto variava senza stabilizzarsi in intervalli di ampiezza di $\sim 20 \text{ Hz}$; invece, a frequenze minime e intermedie, esso variava in intervalli comparabili alla sensibilità strumentale.

L'incompatibilità del dataset rigettato potrebbe essere dovuta al fatto che è stato il primo set di misure effettuato, dunque potrebbe aver inficiato l'imperizia iniziale degli sperimentatori.

Appendice

ν_0 [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ_0 [mm]	ν [Hz]	ω [rad/s]	δ [mm]
-11	-69.12	9.32	-1390	-8733.63	8.93
-10	-62.83	9.31	-1317	-8274.96	8.93
-10	-62.83	9.31	-1355	-8513.72	8.94
-11	-69.12	9.30	-1404	-8821.59	8.93
-15	-94.25	9.31	-1359	-8538.85	8.94
-15	-94.25	9.31	-1409	-8853.01	8.92
-17	-106.81	9.30	-1374	-8633.10	8.95
-16	-100.53	9.30	-1386	-8708.49	8.94
-18	-113.10	9.31	-1386	-8708.49	8.92
-18	-113.10	9.31	-1409	-8853.01	8.92
-18	-113.10	9.31	-1363	-8563.98	8.94
-18	-113.10	9.30	-1143	-7181.68	8.96
-18	-113.10	9.31	-1441	-9054.07	8.97
-18	-113.10	9.31	-1450	-9110.62	8.92
-18	-113.10	9.33	-1414	-8884.42	8.94
-18	-113.10	9.32	-1401	-8802.74	8.95
-18	-113.10	9.31	-1410	-8859.29	8.93
-18	-113.10	9.31	-1431	-8991.24	8.93
-18	-113.10	9.31	-1444	-9072.92	8.93
-18	-113.10	9.30	-1424	-8947.26	8.94
-18	-113.10	9.30	-1395	-8765.04	8.92
-13	-81.68	9.30	-1455	-9142.03	8.92
-17	-106.81	9.31	-1456	-9148.32	8.94
-18	-113.10	9.30	-1469	-9230.00	8.91
-18	-113.10	9.30	-1426	-8959.82	8.92
-18	-113.10	9.31	-1446	-9085.49	8.92
-18	-113.10	9.31	-1418	-8909.56	8.92
-18	-113.10	9.30	-1446	-9085.49	8.90
-18	-113.10	9.31	-1455	-9142.03	8.91
-18	-113.10	9.31	-1446	-9085.49	8.93

Tab. 3: Specchio in rotazione CW a frequenza iniziale minima ν_0 e frequenza finale massima ν : misure di posizione iniziale δ_0 e finale δ dello spot luminoso.

ν_0 [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ_0 [mm]	ν [Hz]	ω [rad/s]	δ [mm]
17	106.81	9.31	1400	8796.46	9.70
18	113.10	9.31	1421	8928.41	9.70
18	113.10	9.31	1422	8934.69	9.69
18	113.10	9.31	1393	8752.48	9.71
18	113.10	9.32	1399	8790.18	9.70
17	106.81	9.31	1396	8771.33	9.70
18	113.10	9.32	1414	8884.42	9.69
18	113.10	9.32	1391	8739.91	9.69
18	113.10	9.32	1376	8645.66	9.69
17	106.81	9.32	1404	8821.59	9.69
18	113.10	9.32	1434	9010.09	9.70
17	106.81	9.31	1334	8381.77	9.71
18	113.10	9.32	1342	8432.03	9.70
17	106.81	9.32	1363	8563.98	9.69
18	113.10	9.32	1317	8274.96	9.70
18	113.10	9.32	1351	8488.58	9.70
18	113.10	9.31	1316	8268.67	9.70
17	106.81	9.31	1330	8356.63	9.70
18	113.10	9.31	1380	8670.80	9.71
18	113.10	9.32	1444	9072.92	9.71
18	113.10	9.32	1435	9016.37	9.70
17	106.81	9.32	1359	8538.85	9.70
18	113.10	9.32	1378	8658.23	9.70
18	113.10	9.32	1412	8871.86	9.70
17	106.81	9.31	1378	8658.23	9.67
18	113.10	9.31	1424	8947.26	9.71
18	113.10	9.32	1438	9035.22	9.70
18	113.10	9.31	1421	8928.41	9.69
18	113.10	9.31	1423	8940.97	9.69
18	113.10	9.31	1421	8928.41	9.69

Tab. 4: Specchio in rotazione CCW a frequenza iniziale minima ν_0 e frequenza finale massima ν : misure di posizione iniziale δ_0 e finale δ dello spot luminoso.

ν_0 [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ_0 [mm]	ν [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ [mm]
-1395	-8765.04	8.93	1387	8714.78	9.69
-1400	-8796.46	8.92	1406	8834.16	9.69
-1300	-8168.14	8.93	1407	8840.44	9.70
-1413	-8878.14	8.91	1391	8739.91	9.70
-1360	-8545.13	8.92	1382	8683.36	9.69
-1346	-8457.17	8.92	1402	8809.03	9.70
-1358	-8532.57	8.91	1394	8758.76	9.69
-1393	-8752.48	8.91	1419	8915.84	9.70
-1390	-8733.63	8.92	1369	8601.68	9.69
-1416	-8897.00	8.91	1419	8915.84	9.70
-1394	-8758.76	8.93	1424	8947.26	9.69
-1366	-8582.83	8.91	1419	8915.84	9.69
-1417	-8903.27	8.91	1404	8821.59	9.70
-1322	-8306.37	8.92	1312	8243.54	9.66
-1378	-8658.23	8.93	1409	8853.01	9.69
-1300	-8168.14	8.92	1394	8758.76	9.68
-1378	-8658.23	8.92	1315	8262.39	9.66
-1372	-8620.53	8.92	1369	8601.68	9.66
-1385	-8702.21	8.93	1384	8695.93	9.70
-1362	-8557.70	8.93	1329	8350.35	9.63
-1309	-8224.69	8.93	1349	8476.02	9.69
-1365	-8576.55	8.92	1383	8689.65	9.69
-1389	-8727.34	8.92	1317	8274.96	9.65
-1342	-8432.03	8.92	1314	8256.11	9.66
-1398	-8783.89	8.92	1331	8362.92	9.66
-1364	-8570.26	8.92	1381	8677.08	9.69
-1374	-8633.10	8.92	1385	8702.21	9.70
-1372	-8620.53	8.93	1375	8639.38	9.67
-1375	-8639.38	8.91	1310	8230.97	9.67
-1347	-8463.45	8.93	1325	8325.22	9.68

Tab. 5: Specchio in rotazione CW a frequenza iniziale massima ν_0 e in rotazione CCW a frequenza finale massima ν : misure di posizione iniziale δ_0 e finale δ dello spot luminoso.

ν_0 [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ_0 [mm]	ν [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ [mm]
-14	-87.96	9.31	-684	-4297.70	9.11
-16	-100.53	9.29	-811	-5095.66	9.08
-20	-125.66	9.29	-739	-4643.27	9.08
-17	-106.81	9.29	-860	-5403.54	9.06
-19	-119.38	9.29	-867	-5447.52	9.05
-17	-106.81	9.29	-841	-5284.16	9.06
-16	-100.53	9.29	-865	-5434.96	9.05
-15	-94.25	9.29	-856	-5378.41	9.05
-19	-119.38	9.28	-839	-5271.59	9.06
-15	-94.25	9.28	-892	-5604.60	9.04
-13	-81.68	9.29	-840	-5277.88	9.06
-23	-144.51	9.29	-844	-5303.01	9.07
-13	-81.68	9.29	-874	-5491.50	9.06
-21	-131.95	9.30	-889	-5585.75	9.05
-16	-100.53	9.29	-885	-5560.62	9.06

Tab. 6: Specchio in rotazione CW, frequenza iniziale minima ν_0 e frequenza finale intermedia ν : misure di posizione iniziale δ_0 e finale δ dello spot luminoso.

ν_0 [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ_0 [mm]	ν [Hz]	ω_0 [rad/s]	δ [mm]
14	87.96	9.31	618	3883.01	9.47
17	106.81	9.31	683	4291.42	9.50
18	113.10	9.30	837	5259.03	9.53
13	81.68	9.31	848	5328.14	9.54
14	87.96	9.31	890	5592.03	9.55
20	125.66	9.32	870	5466.37	9.55
11	69.12	9.31	852	5353.27	9.54
18	113.10	9.30	880	5529.20	9.54
14	87.96	9.30	893	5610.88	9.54
14	87.96	9.31	619	3889.29	9.49
13	81.68	9.31	637	4002.39	9.48
15	94.25	9.31	601	3776.19	9.47
13	81.68	9.31	653	4102.92	9.49
15	94.25	9.31	606	3807.61	9.48
17	106.81	9.31	618	3883.01	9.48

Tab. 7: Specchio in rotazione CCW, frequenza iniziale minima e frequenza finale intermedia: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .

$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\delta$ [mm]	c [10^8 m/s]
-8664.51	-0.39	2.93
-8212.12	-0.38	2.85
-8450.88	-0.37	3.01
-8752.48	-0.37	3.11
-8444.60	-0.37	3.00
-8758.76	-0.39	2.96
-8526.28	-0.35	3.21
-8607.96	-0.36	3.15
-8595.40	-0.39	2.90
-8739.91	-0.39	2.95
-8450.88	-0.37	3.01
-7068.58	-0.34	2.74
-8940.97	-0.34	3.46
-8997.52	-0.39	3.04
-8771.33	-0.39	2.96
-8689.65	-0.37	3.09
-8746.19	-0.38	3.03
-8878.14	-0.38	3.08
-8959.82	-0.38	3.10
-8834.16	-0.36	3.23
-8651.95	-0.38	3.00
-9060.35	-0.38	3.14
-9041.50	-0.37	3.22
-9116.90	-0.39	3.08
-8846.72	-0.38	3.07
-8972.39	-0.39	3.03
-8796.46	-0.39	2.97
-8972.39	-0.40	2.95
-9028.94	-0.40	2.97
-8972.39	-0.38	3.11

Tab. 8: Specchio in rotazione CW, frequenza iniziale minima e frequenza finale massima: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .

$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\delta$ [mm]	c [10^8 m/s]
8689.65	0.39	2.93
8815.31	0.39	2.98
8821.59	0.38	3.06
8639.38	0.40	2.84
8677.08	0.38	3.01
8664.51	0.39	2.93
8771.33	0.37	3.12
8626.81	0.37	3.07
8532.57	0.37	3.04
8714.78	0.37	3.10
8896.99	0.38	3.08
8274.96	0.40	2.72
8318.94	0.38	2.88
8457.17	0.37	3.01
8161.86	0.38	2.83
8375.49	0.38	2.90
8155.57	0.39	2.75
8249.82	0.39	2.79
8557.70	0.40	2.82
8959.82	0.39	3.02
8903.27	0.38	3.08
8432.03	0.38	2.92
8545.13	0.38	2.96
8758.76	0.38	3.03
8551.42	0.36	3.13
8834.16	0.40	2.91
8922.12	0.38	3.09
8815.31	0.38	3.05
8827.88	0.38	3.06
8815.31	0.38	3.05

Tab. 9: Specchio in rotazione CCW, frequenza iniziale minima e frequenza finale massima: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .

$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\delta$ [mm]	c [10^8 m/s]
17479.82	0.76	3.03
17630.62	0.77	3.01
17008.58	0.77	2.91
17618.05	0.79	2.94
17228.49	0.77	2.95
17266.19	0.78	2.92
17291.33	0.78	2.92
17668.32	0.79	2.94
17335.31	0.77	2.96
17812.83	0.79	2.97
17706.02	0.76	3.07
17498.67	0.78	2.95
17724.87	0.79	2.95
16549.91	0.74	2.94
17511.24	0.76	3.03
16926.90	0.76	2.93
16920.62	0.74	3.01
17222.21	0.74	3.06
17398.14	0.77	2.97
16908.05	0.70	3.18
16700.71	0.76	2.89
17266.19	0.77	2.95
17002.30	0.73	3.07
16688.14	0.74	2.97
17146.81	0.74	3.05
17247.34	0.77	2.95
17335.31	0.78	2.93
17259.91	0.74	3.07
16870.35	0.76	2.92
16788.67	0.75	2.95

Tab. 10: Specchio in rotazione iniziale CW e rotazione finale CCW: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .

$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\delta$ [mm]	c [10^8 m/s]
-4209.73	-0.20	2.77
-4995.13	-0.21	3.13
-4517.61	-0.21	2.83
-5296.73	-0.23	3.03
-5328.14	-0.24	2.92
-5177.34	-0.23	2.96
-5334.42	-0.24	2.93
-5284.16	-0.24	2.90
-5152.21	-0.22	3.08
-5510.35	-0.24	3.02
-5196.19	-0.23	2.97
-5158.50	-0.22	3.09
-5409.82	-0.23	3.10
-5453.80	-0.25	2.87
-5460.09	-0.23	3.13

Tab. 11: Specchio in rotazione CW, frequenza iniziale minima e frequenza finale intermedia: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .

$\Delta\omega$ [rad/s]	$\Delta\delta$ [mm]	c [10^8 m/s]
3795.04	0.16	3.12
4184.60	0.19	2.90
5145.93	0.23	2.95
5246.46	0.23	3.00
5504.07	0.24	3.02
5340.71	0.23	3.06
5284.16	0.23	3.02
5416.11	0.24	2.97
5522.92	0.24	3.03
3801.33	0.18	2.78
3920.71	0.17	3.04
3681.95	0.16	3.03
4021.24	0.18	2.94
3713.36	0.17	2.88
3776.19	0.17	2.92

Tab. 12: Specchio in rotazione CCW, frequenza iniziale minima e frequenza finale intermedia: variazione di pulsazione $\Delta\omega$ e variazione di posizione $\Delta\delta$, e rispettiva misura indiretta della velocità della luce c .