

## Sommario

Questo documento contiene la procedura e l'analisi dati di un esperimento volto a misurare la velocità della luce. Tra i tanti metodi architettati per calcolare tale costante, in questo esperimento si è seguito il metodo di Foucault, che rende l'analisi dati relativamente semplice. L'approccio di questo documento al problema suddetto è rigorosamente scientifico e statistico.

## 1 Introduzione

Il fine di questo esperimento è quello di misurare una delle costanti dell'universo, la velocità della luce  $c$ . Il problema è stato storicamente affrontato in maniere diverse e, passando per una ridefinizione delle unità di misura, si è giunti al valore noto ed esatto di  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ . Questo valore subisce una correzione per via del mezzo in cui avviene l'esperimento: l'aria. Il metodo qui seguito è quello di Foucault, che permette di eseguire l'esperimento in spazi ridotti e richiede un'analisi dati relativamente semplice. Il principio di funzionamento è riassunto in maniera semplificata nell'immagine 1. Il principale strumento dell'esperimento è un piccolo specchio rotante, con alta velocità di rotazione (intorno ai 1000 rad/s). La sorgente di luce, un laser con lunghezza d'onda di approssimativamente 633 nm, incide sullo specchio rotante. Quando questo si trova ad un angolo preciso, la luce riflessa va ad incidere su uno specchio concavo e torna indietro. Nel tempo che la luce è andata e tornata sullo specchio rotante esso ha compiuto una rotazione di un angolo facilmente calcolabile (per i dettagli si veda la sezione sulla procedura), che ovviamente varierebbe se la luce avesse una velocità diversa. Osservando il punto di ritorno si può calcolare tale angolo e da esso si trova la velocità della luce. Quella appena esposta è una versione assai semplificata per capire il funzionamento dell'esperimento. In realtà, per ridurre le dimensioni dell'apparato sperimentale, il percorso che la luce compie avanti e indietro una volta riflessa dallo specchio rotante viene allungato tramite una riflessione su tre specchi concavi, come si può vedere nelle immagini delle sezioni successive e il raggio viene focalizzato attraverso due lenti opportunamente posizionate. La misura viene fatta grazie a uno specchio semiargentato che lascia passare la luce che poi andrà a incidere sullo specchio rotante ma che riflette quella che torna, che viene poi vista attraverso un oculare. Poiché è piuttosto ovvio che la luce viene deviata tanto più alta è la velocità di rotazione, la misura può essere fatta confrontando la posizione del raggio riflesso con basse velocità di rotazione (circa 100 rad/s) con quella del raggio ad alte velocità di rotazione (oltre 1000 rad/s).

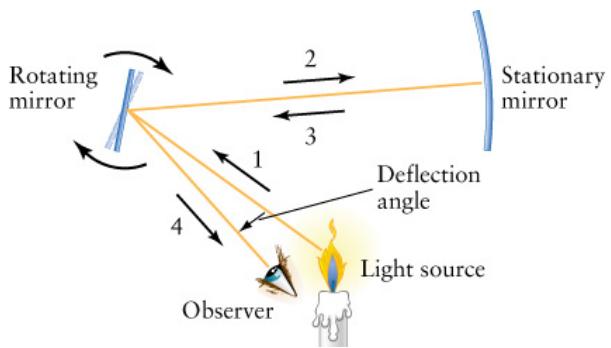


Figura 1: Schema semplificato dell'apparato

## 2 Strumentazione

Per estrarre sperimentalmente i termini necessari a calcolare la velocità della luce sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

**Laser** Una sorgente luminosa monocromatica di lunghezza d'onda 632.8 nm.

**Lenti** Due lenti  $L_1$   $L_2$  con focali rispettivamente di 48 mm e 252 mm.

**Squadra Forata** Una lastra bianca con un piccolo foro che consente il passaggio del fascio luminoso.

**Specchi** Tre specchi di cui due piani e uno concavo con raggio di curvatura analogo alla distanza che percorre la luce quando viene compiuto l'esperimento.

**Doppia Lamina Polaroid** Una doppia schermatura per diminuire l'intensità della luce durante la calibrazione dell'apparato sperimentale.

**Supporto** Un supporto magnetico su cui appoggiare gli strumenti in maniera tale che questi restino stabili nella posizione in cui sono messi. In questo senso questo supporto presentava una scala graduata con sensibilità del millimetro.

**Specchio Rotante** Uno specchio rotante collegato tramite cinghia a un motore che avvia la rotazione in senso orario o antiorario.

**Motore** Un sistema di avviamento della cinghia collegata allo specchio rotante. Lo strumento può essere utilizzato sia per generare una rotazione sia in senso orario che in senso antiorario, ed è dotato di un display dove leggere il numero di Hz a cui il sistema è fatto ruotare, così come di un pulsante che fa ruotare il sistema alla frequenza massima di 1500 Hz circa.

**Microscopio** Un microscopio attaccato a un nonio della sensibilità di 10  $\mu\text{m}$ .

**Splitter** Una lastra di vetro semiriflettente che devia parte del fascio luminoso verso il microscopio.

**Metro** Utilizzato per misura della distanza percorsa dalla luce durante una esecuzione dell'esperimento.

### 3 Procedura Sperimentale

La procedura sperimentale per effettuare delle misure di  $c$  può essere suddivisa in due parti principali: la calibrazione dell'apparato sperimentale e le procedure di misura vere e proprie.

#### 3.1 Messa a Punto e Calibrazione

La procedura di messa a punto dell'apparato sperimentale è stata eseguita secondo i passaggi che seguono:

**Misura delle Distanze** In primo luogo sono state misurate le distanze che separano gli specchi colpiti dal fascio luminoso. In questo modo noto il valore dell'indice di rifrazione dell'aria è possibile determinare il cammino ottico percorso dalla luce.

**Verifica dell'Incidenza della Luce** Tramite la squadra forata si è verificato che la luce andasse a colpire lo specchio rotante.

**Autocollimazione** Facendo ruotare lo specchio verificare che il fascio riflesso sia centrato con il foro di uscita del laser. Per questa operazione è stata rimossa la squadretta.

**Messa a Punto delle Lenti** La lente  $L_1$  è stata posizionata rispettivamente a 70 mm sul supporto servendosi della scala graduata e avendo cura di mantenere un orientamento corretto (a L rovesciata). La messa a punto viene completata orientando la lente  $L_1$  in maniera tale che il fascio originato dal laser sia centrato sul foro della squadretta. Successivamente la lente  $L_2$  è stata disposta a 378mm sulla scala. Queste posizioni sono necessarie per focalizzare il fascio in maniera corretta e ottenere contemporaneamente un *waist* più piccolo possibile. La figura 2 mostra la disposizione delle lenti e dello splitter sul supporto.

**Messa a Punto dello Splitter** Posizionare il supporto contenente lo splitter (senza microscopio attaccato) alla distanza di 180mm sulla scala graduata. Inclinare la lente dello splitter in maniera tale che il fascio di luce riflesso dallo specchio rotante sia orientato verso la zona in cui andrà messo l’oculare. Filtrare la luce con le lamine polaroid e posizionare l’oculare avendo cura di effettuare una corretta messa a fuoco.

**Messa a Punto degli Specchi** Orientare lo specchio rotante in maniera tale che la luce incidente venga riflessa contro il primo specchio piano. Tramite le viti micrometriche di questo specchio orientare il fascio contro il secondo specchio piano e di nuovo contro lo specchio concavo. Eseguire questa procedura anche per il fascio riflesso dallo specchio concavo, aggiustando opportunamente le viti micrometriche in maniera tale che i fasci di luce di “andata” e “ritorno” collimino con la maggior precisione possibile.

**Regolazione del Waist** Spostando la lente  $L_2$  lungo il supporto verificare che sull’oculare le dimensioni del *waist* prodotto dal fascio luminoso sono il più piccolo possibile.

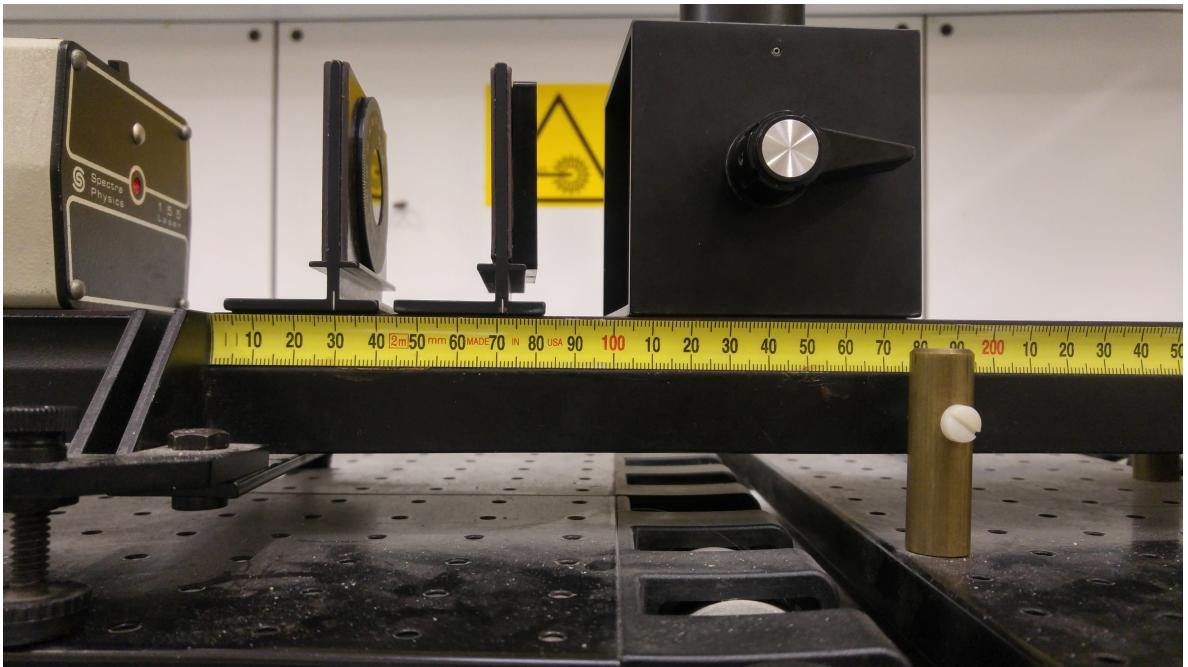


Figura 2: Disposizione dello splitter e delle lenti sulla scala graduata.

### 3.2 Procedure di Misura Sperimentale

La presa dati consiste nella raccolta di una serie di differenze di distanze relative alla posizione del *waist* sull’oculare – opportunamente dotato di un mirino a X per centrare il *waist* stesso, in quanto la posizione del punto rosso è dipendente dalla frequenza con cui lo specchio rotante viene fatto oscillare, come mostra l’equazione:

$$c = \frac{4f_2 D^2 (\omega - \omega_0)}{(D + a - f_2) \Delta \delta} \quad (1)$$

La procedura sperimentale di misura consiste in una ripetizione dei seguenti passi:

- Accendere il motore a una frequenza relativamente bassa (50 – 100 Hz) e centrare la posizione del *waist* muovendo la vite micrometrica.

- Registrare il valore della posizione individuato dal nonio collegato alla vite micrometrica.
- Aumentare la frequenza di rotazione del motore (da 900 – 1000 Hz) fino anche al massimo, e centrare la posizione del *waist* muovendo la vite micrometrica.
- Di nuovo registrare il valore della posizione tramite il nonio.

Questa ripetizione va eseguita per entrambi i sensi in cui il motore è in grado di imprimere rotazione alla cinghia (*clockwise* e *counterclockwise*). Inoltre è possibile eseguire delle misure anche tra massimo *clockwise* e massimo *counterclockwise* avendo cura di fermare il motore senza passare immediatamente da un senso di rotazione all’altro. La ripetizione di misure indipendenti tra loro consentirà poi di eseguire analisi statistica sui campioni di dati estratti.

In questa sede va fatto notare un problema riscontrato durante le operazioni di misura: non è stato possibile individuare se il problema fosse relativo al motore, o al display che segnalava la frequenza di rotazione, ma quello che si osservava era la poca stabilità nel numero di Hz segnalati. Come conseguenza di questo fatto è risultato difficile eseguire 20-30 misure per ogni set di dati (specie considerando che la massima frequenza del motorino aveva un’autonomia di un minuto circa e spesso il display non si era ancora stabilizzato). Abbiamo fatto in modo di effettuare il maggior numero di misure possibili compatibilmente con i tempi richiesti per effettuare una misura (spesso oltre un minuto per attendere che il display fosse stabile).

## 4 Analisi e presentazione dei dati

Veniamo ora all’analisi dei dati raccolti. Questa operazione si è svolta in quattro fasi:

1. Estrazione di  $c$  per ogni misura.
2. Verifica compatibilità dei dati per ogni set.
3. Stima di  $c$  per ogni set di dati.
4. Verifica compatibilità dei set e media.

Inoltre le prime due parti dell’analisi dei dati sono state ripetute tre volte, una per ogni set di dati.

### 4.1 Premesse generale dell’analisi dei dati

Nel corso dell’analisi dati ci sono state alcune linee guida seguite per cercare di ottenere il migliore risultato possibile con il minor numero di dati possibili. Poichè erano disponibili diversi dati con diversi errori (per motivi spiegati poi in seguito) questo fine si è ottenuto in primo luogo attraverso l’operazione di media pesata dei dati. Questa statistica è stata preferita alla semplice media in quanto privilegia misure con errore minore senza tuttavia scartare completamente misure con errori più grandi. Inoltre l’errore è stato diviso in due parti: *errore sistematico* ed *errore statistico* o *casuale*. Inoltre, tutte le costanti indicate sotto sono relative alla formula 1, che per semplicità di lettura è riportata qui sotto.

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

#### 4.1.1 Errore sistematico

Per *errore sistematico* si intende un errore nella misura di osservabili utilizzate per ricavare i dati in tutte le misure. In particolare nel ricavare le misure di  $c$  sono state usate ripetutamente le misure di,  $D$ , la distanza dello specchio rotante dallo specchio concavo,  $a$ , la distanza della lente 2 dallo specchio rotante e  $f_2$  la distanza focale dello specchio 2. Un errore di misura su una di queste osservabili avrebbe portato ad un errore sistematicamente ripetuto in tutti i calcoli. L'errore finale causato dalla misura di queste osservabili è stato stimato tramite la propagazione degli errori dalla formula 1 ottenendo quindi che:

$$\sigma_{c_{sist}} = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial D}\right)^2 \sigma_D^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial a}\right)^2 \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial f_2}\right)^2 \sigma_{f_2}^2} \quad (2)$$

dove, per derivazione:

$$\frac{\partial c}{\partial D} = \frac{4Df_2(2a + D - 2f_2)(\omega - \omega_0)}{(a + D - f_2)^2 \Delta \delta} \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial c}{\partial f_2} = \frac{4D^2(a + D)(\omega - \omega_0)}{(a + d - f_2)^2 \Delta \delta} \quad (5)$$

È stato quindi necessario avere una buona stima dell'errore di queste osservabili.

#### 4.1.2 Errore casuale

Gli errori sopra citati non coprono tutti quelli possibili nell'esperimento. In particolare non sono considerati gli errori su  $\Delta \delta$  né quelli su  $\omega$  e  $\omega_0$ . Non essendo questi stimabili in modo rigoroso ed essendo questi distribuiti normalmente, gli errori di questi osservabili sono stati raggruppati nella deviazione standard delle misure.

#### 4.2 Stima delle distanze

Il valore di  $D$  è stato, tra le distanze, il più complicato da misurare. Questa osservabile è stata calcolata a partire da altre tre osservabili che ai fini del testo chiameremo  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ . In particolare  $D_1$  è la distanza tra lo specchio rotante e il centro del primo specchio  $S_1$ ,  $D_2$  è la distanza tra il centro dello specchio  $S_1$  e il secondo specchio  $S_2$  e  $D_3$  è la distanza tra lo specchio  $S_2$  e lo specchio concavo. In questo modo si ha che:

Tabella 1: Misura di  $D$

	Misura (m)	Errore (m)	Err. rel.
$D_1$	6.32	0.04	0.006
$D_2$	0.66	0.02	0.033
$D_3$	6.54	0.04	0.006
$D$	13.52	0.35	0.026

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad \sigma_D = \sqrt{\sigma_{D_1}^2 + \sigma_{D_2}^2 + \sigma_{D_3}^2} \quad (6)$$

dove  $D$  e  $D_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  sono come prima e  $\sigma_D$  e  $\sigma_{D_i}$ ,  $i = 1, 2, 3$  sono gli errori delle relative misure. L'errore di queste distanze derivava da molti fattori, in particolar modo causati dallo strumento di misura. Come descritto nelle sezioni precedenti queste misure sono state effettuate con il metro a nastro, con sensibilità al centimetro. La principale fonte di errore derivava dal fatto che il metro, sospeso in aria, si fletteva sotto al proprio peso modificando il valore letto. Un'altra fonte di errore è stata la non perfetta centratura del metro, dovuta anche al fatto che non era possibile toccare le superfici degli specchi. Con queste considerazioni, si sono stimati, in base alla variabilità delle possibili misure sono riportati nella tabella 1.

Tabella 2: Misura di  $a$

	Misura (m)	Errore (m)	Err. rel.
$s_{f_2}$	0.252	0.001	0.004
$s_{spr}$	0.865	0.005	0.006
$a$	0.478	0.005	0.011

chetta bianca) lo specchio rotante no. Per questa ragione per lo specchio è stata aumentata l'incertezza di misura da 1 mm a 5 mm. Quindi  $a$  è stata calcolata attraverso la seguente relazione:

$$a = s_{spr} - s_{f_2} \quad \sigma_a = \sqrt{\sigma_{s_{spr}}^2 + \sigma_{s_{f_2}}^2} \quad (7)$$

dove  $s_{spr}$  è la posizione dello specchio rotante,  $s_{f_2}$  è la posizione della lente 2 e le altre costanti sono i relativi errori. I valori misurati e i rispettivi errori sono presenti in tabella 2.

Non c'è stata una vera e propria misura di  $f_2$  poiché questo valore era dato dal costruttore. Come errore è stato considerato un millesimo del valore. Quindi:

$$f_2 = 0.252 \text{ m} \quad \sigma_{f_2} = 0.252 \times 10^{-4} \text{ m}$$

### 4.3 Estrazione della velocità per ogni misura

Come anticipato nel corso dell'esperimento sono stati effettuati tre set di misura: uno facendo ruotare lo specchio in senso orario (set *clockwise*), uno in senso antiorario (set *counterclockwise*) e uno facendolo partire in senso antiorario e finendo in senso orario (set *counterclock-clock*). Per ogni misura si sono quindi campionati i valori di  $\nu$ ,  $\nu_0$  (che attraverso la relazione  $\omega = 2\pi\nu$  si sono convertiti rispettivamente in  $\omega$  e  $\omega_0$ ),  $\delta_1$ , e  $\delta_2$ . Il valore di  $\Delta\delta$  è stato calcolato come differenza di  $\delta_1$  e  $\delta_2$ . Il valore di  $c$  per ogni misura è stato calcolato tramite la formula 1 e i valori ricavati nella sezione 4.2. Sono di seguito riportate le misure campionate, con i relativi valori di  $c$  e gli errori sistematici.<sup>1</sup>

In confronto a  $D$ , la stima dell'errore di  $a$  è stata più semplice. Come descritto in precedenza, sia la lente che lo specchio rotante si trovavano su una guida sulla quale era incollato un metro. Mentre la lente aveva un chiaro riferimento per la posizione (una piccola tac-

---

<sup>1</sup>Per la tabella 5, è stata usata una convenzione per cui frequenze di rotazioni antiorarie sono state considerate negative.

Tabella 3: Set *clockwise*

Indice	$\nu_0$ (Hz)	$\nu$ (Hz)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_{sist}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	Err.	Rel.
1	82	934	9.94	10.17	$326.16 \times 10^6$	$8.50 \times 10^6$	0.039	
2	110	917	9.94	10.18	$311.98 \times 10^6$	$8.13 \times 10^6$	0.040	
3	108	959	9.95	10.18	$283.19 \times 10^6$	$7.38 \times 10^6$	0.042	
4	100	929	9.95	10.18	$311.62 \times 10^6$	$8.12 \times 10^6$	0.040	
5	118	1002	9.94	10.20	$303.56 \times 10^6$	$7.91 \times 10^6$	0.040	
6	115	1435	9.94	10.31	$286.35 \times 10^6$	$7.46 \times 10^6$	0.042	
7	100	977	9.94	10.20	$300.46 \times 10^6$	$7.83 \times 10^6$	0.041	
8	107	900	9.94	10.16	$284.08 \times 10^6$	$7.40 \times 10^6$	0.042	
9	109	950	9.94	10.19	$303.58 \times 10^6$	$7.91 \times 10^6$	0.040	
10	119	1442	9.95	10.33	$283.32 \times 10^6$	$7.38 \times 10^6$	0.042	
11	120	1440	9.94	10.33	$293.22 \times 10^6$	$7.64 \times 10^6$	0.041	
12	102	1420	9.94	10.30	$288.76 \times 10^6$	$7.53 \times 10^6$	0.042	
13	127	1435	9.95	10.31	$308.34 \times 10^6$	$8.04 \times 10^6$	0.040	
14	114	1436	9.94	10.31	$306.00 \times 10^6$	$7.98 \times 10^6$	0.040	
15	107	1422	9.95	10.32	$300.92 \times 10^6$	$7.84 \times 10^6$	0.041	
16	109	1443	9.95	10.33	$299.32 \times 10^6$	$7.80 \times 10^6$	0.041	
17	144	1422	9.96	10.32	$295.66 \times 10^6$	$7.71 \times 10^6$	0.041	
18	128	1433	9.94	10.32	$298.98 \times 10^6$	$7.79 \times 10^6$	0.041	
19	119	1440	9.95	10.33	$289.23 \times 10^6$	$7.54 \times 10^6$	0.042	

Tabella 4: Set *counterclockwise*

Indice	$\nu_0$ (Hz)	$\nu$ (Hz)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_{sist}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	Err.	Rel.
1	118	920	9.87	9.66	$321.64 \times 10^6$	$8.38 \times 10^6$	0.049	
2	114	908	9.88	9.65	$290.74 \times 10^6$	$7.58 \times 10^6$	0.053	
3	127	915	9.86	9.65	$316.03 \times 10^6$	$8.24 \times 10^6$	0.050	
4	115	908	9.88	9.65	$290.38 \times 10^6$	$7.57 \times 10^6$	0.053	
5	97	963	9.87	9.62	$291.74 \times 10^6$	$7.60 \times 10^6$	0.053	
6	79	1400	9.88	9.53	$317.87 \times 10^6$	$8.29 \times 10^6$	0.050	
7	115	1395	9.88	9.54	$317.07 \times 10^6$	$8.26 \times 10^6$	0.050	
8	113	1385	9.89	9.54	$306.08 \times 10^6$	$7.98 \times 10^6$	0.051	
9	79	1396	9.88	9.54	$326.23 \times 10^6$	$8.50 \times 10^6$	0.049	
10	93	1385	9.89	9.54	$310.89 \times 10^6$	$8.10 \times 10^6$	0.051	

Tabella 5: Set *counterclock-clockwise*

Indice	$\nu_0$ (Hz)	$\nu$ (Hz)	$\delta_1$ (mm)	$\delta_2$ (mm)	$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_{sist}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	Err.	Rel.
1	-1384	1384	10.32	9.53	$296.97 \times 10^6$	$7.74 \times 10^6$	0.029	
2	-1388	1382	10.31	9.54	$302.97 \times 10^6$	$7.90 \times 10^6$	0.029	
3	-1395	1373	10.32	9.53	$293.24 \times 10^6$	$7.64 \times 10^6$	0.029	
4	-1410	1395	10.33	9.53	$293.46 \times 10^6$	$7.65 \times 10^6$	0.029	
5	-1405	1397	10.32	9.53	$298.72 \times 10^6$	$7.79 \times 10^6$	0.029	
6	-1416	1396	10.32	9.52	$296.03 \times 10^6$	$7.72 \times 10^6$	0.029	
7	-1420	1394	10.32	9.53	$301.91 \times 10^6$	$7.87 \times 10^6$	0.029	
8	-1428	1399	10.34	9.54	$299.49 \times 10^6$	$7.81 \times 10^6$	0.029	
9	-1416	1398	10.35	9.55	$296.25 \times 10^6$	$7.72 \times 10^6$	0.029	
10	-1420	1395	10.32	9.53	$302.01 \times 10^6$	$7.87 \times 10^6$	0.029	

## 4.4 Verifica bontà dei dati acquisiti

A questo punto, prima di estrarre da ogni set la misura della velocità della luce è stato necessario verificare la compatibilità dei dati sotto alle ipotesi di errori effettuate e verificarne l'indipendenza. Tutti i controlli di indipendenza sono stati effettuati con un *confidence level* del 95% rispetto alla variabile standardizzata  $z$  di Gauss.

### 4.4.1 Verifica compatibilità

Per applicare correttamente l'operazione di media pesata è necessario verificare che i valori che si mediano siano compatibili, ossia derivino dalla stessa distribuzione. Come era facile aspettarsi, il controllo di compatibilità tra le misure dei set effettuato con solo l'errore sistematico (quello tabulato nelle tabelle 3, 4 e 5) ha mostrato una incompatibilità su quasi tutti i dati. Per controllare la compatibilità era necessario aggiungere all'errore anche la componente casuale. Si è scelto, come prima stima dell'errore casuale, la deviazione standard delle misure di  $c$  del set. I valori delle deviazioni standard sono riportati in tabella 6.

Tabella 6: Deviazioni standard dei set

	<i>Clockwise</i>	<i>Counterclockwise</i>	<i>Counterclock-clockwise</i>
Dev. Std. (m)	$9.40 \times 10^6$	$13.50 \times 10^6$	$3.50 \times 10^6$

Questa statistica è stata preferita rispetto alla deviazione standard della media in quanto ogni valore era preso da un campione solo di dati e non era frutto di alcuna medi: con questa operazione non si voleva verificare che i valori siano statisticamente uguali, ma che derivino da una stessa distribuzione. A causa della quantità di dati confrontati, e delle dimensioni occupate da una tabella che riporti tali valori, queste non saranno ricopiate. Con i dati sopra il lettore interessato può verificare che tutte le misure sono compatibili in questo modo. Sono però riportati nelle figure 3, 4 e 5 seguenti i valori misurati con gli errori ottenuti e, come confronto, la misura reale della velocità della luce.

Figura 3: *Clockwise* data set

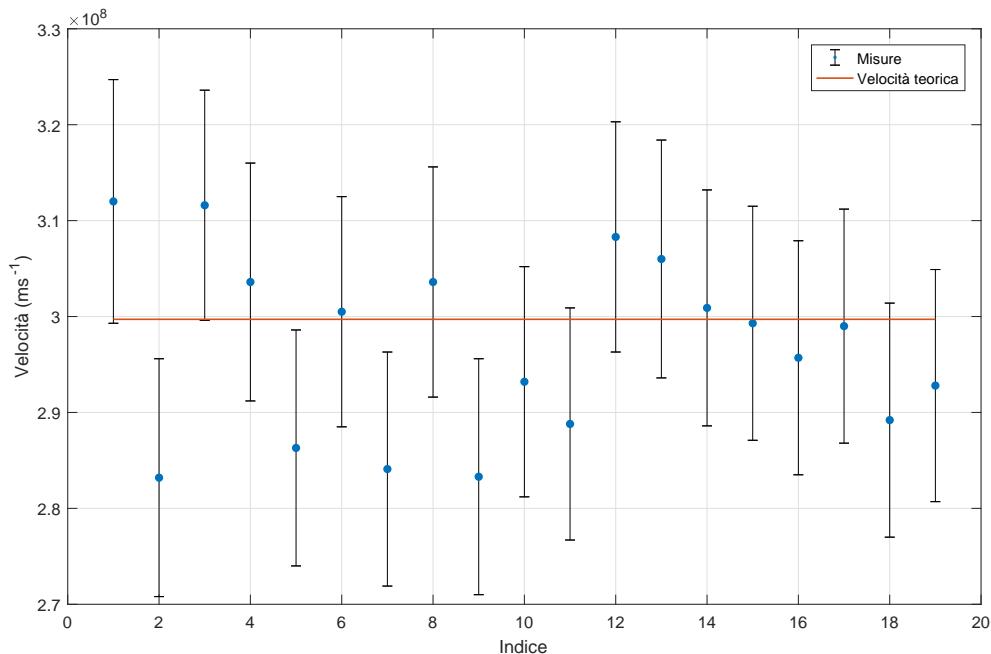


Figura 4: *Clockwise* data set

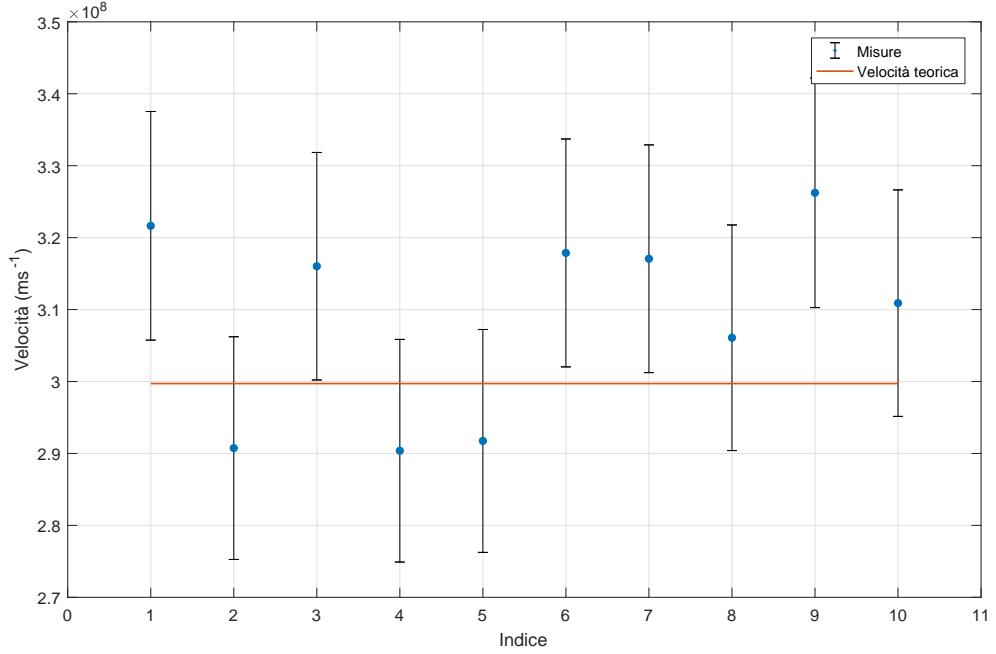
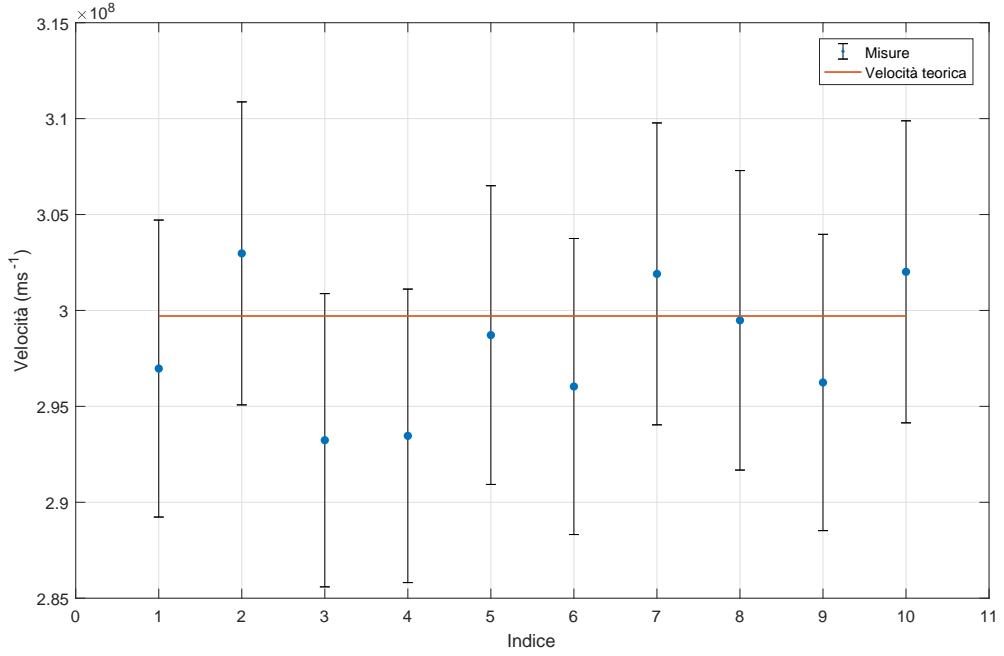


Figura 5: *Clockwise-clockwise* data set



#### 4.4.2 Verifica indipendenza

Per la verifica dell'indipendenza dei dati si è usato il valore teorico della velocità della luce. In particolare un set di dati indipendenti avrebbe prodotto una distribuzione normale di valori della velocità della luce misurati centrati nel valore teorico e con deviazione standard uguale all'errore totale stimato. Per provare questa ipotesi si è usato il test del  $\chi^2$ . Come errore è stato usato lo stesso errore descritto nella sezione 4.4.1. In tutti e tre i casi il test ha verificato l'ipotesi

di indipendenza. A seguito di queste due operazioni è dunque lecito eseguire l'operazione di media pesata.

#### 4.5 Stima della velocità della luce per ogni set

Come anticipato per la stima della velocità della luce è stata eseguita una media pesata. Come peso si è scelto di usare l'errore sistematico. Questa scelta è stata fatta in quanto l'errore casuale è uguale per tutte le misure e per tenere separati gli errori sistematici e quelli casuali. Inoltre era utile tenere separati gli errori sistematici da quelli casuali per osservare quale errore influisce di più sull'errore finale. L'errore totale per ogni valore ottenuto è stato trovato tramite la radice della somma in quadratura degli errori. I risultati di questa operazione sono riportati nella tabella 7.

Tabella 7: Misure di  $c$  per ogni set

Set	$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_{\text{sist}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_{\text{sist}} \text{ rel.}$	$\sigma_{\text{rand}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$c_{\text{rand}} \text{ rel.}$	$\sigma_c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_c \text{ rel.}$
1	$2.98 \times 10^8$	$0.02 \times 10^8$	0.006	$0.02 \times 10^8$	0.007	$0.03 \times 10^8$	0.009
2	$3.08 \times 10^8$	$0.03 \times 10^8$	0.008	$0.04 \times 10^8$	0.014	$0.07 \times 10^8$	0.022
3	$2.98 \times 10^8$	$0.02 \times 10^8$	0.008	$0.01 \times 10^8$	0.004	$0.03 \times 10^8$	0.009

È interessante notare come la presa dei dati abbia influito sull'errore. In particolare due cose hanno influito: la quantità di dati presi e il  $\Delta\omega$  considerato. A causa di un malfunzionamento del dispositivo di lettura delle frequenze infatti, abbiamo potuto prendere solo 10 misure per ognuno dei set 2 e 3, mentre per il primo 19. Inoltre il  $\Delta\omega$  per l'ultimo set era il maggiore come descritto in precedenza. Si può notare quindi che, il minor numero di misure ha causato un errore sistematico maggiore nei set 2 e 3 rispetto al primo. Questo perchè il processo di media pesata aiuta a ridurre l'errore tanti più sono le misure campionate.

Invece l'aver usato un  $\Delta\omega$  maggiore ha aiutato a diminuire notevolmente l'errore casuale nel terzo set. Quindi in futuro qualora si volesse diminuire l'errore sistematico è necessario compiere più misure, mentre qualora si volesse ridurre l'errore casuale è necessario campionare su  $\Delta\omega$  maggiori.

#### 4.6 Verifica compatibilità dei set e media

Ottenuti quindi i valori di  $c$  per ogni set come passaggio finale è stata fatta una media (ancora pesata ovviamente) per ottenere il valore finale di  $c$ . Come pesi per la media sono stati usati gli errori totali. Come prima anche per questa media è stato necessario verificare la compatibilità e l'indipendenza dei dati raccolti. Che i dati fossero indipendenti è ovvio, in quanto provenienti da set di misura diversi. Per la compatibilità è stato usato lo stesso procedimento di prima che ha ovviamente confermato la compatibilità. Nella figura 6 sono presenti i valori calcolati per ogni set con i relativi errori.

Come valore finale di  $c$  si è quindi ottenuto:

Tabella 8: Valore finale di  $c$

$c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	$\sigma_c$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	Err. rel.
$2.99 \times 10^8$	$0.02 \times 10^8$	0.006

Valore pienamente compatibile con il risultato atteso.

Figura 6: Velocità dei set

