

CORSO DI LABORATORIO II

TURNO 2A

GRUPPO 14

---

# Interferometro

---

*Autori:*

Anno Accademico 2021-2022

## Contents

<b>Elenco delle figure</b>	<b>ii</b>
<b>1 Parte prima: legge di interferenza</b>	<b>1</b>
1.1 Obiettivi . . . . .	1
1.2 Metodo . . . . .	1
1.3 Dati ed analisi . . . . .	1
1.4 Conclusioni . . . . .	2
<b>2 Parte seconda: calibrazione</b>	<b>3</b>
2.1 Obiettivi . . . . .	3
2.2 Metodo . . . . .	3
2.3 Dati ed analisi . . . . .	3
2.4 Conclusioni . . . . .	3
<b>3 Parte terza: calibrazione con configurazione Michelson</b>	<b>4</b>
3.1 Obiettivi . . . . .	4
3.2 Metodo . . . . .	4
3.3 Dati ed analisi . . . . .	4
3.4 Conclusioni . . . . .	5
<b>4 Parte quarta: indice di rifrazione dell'aria</b>	<b>6</b>
4.1 Obiettivi . . . . .	6
4.2 Metodo . . . . .	6
4.3 Dati ed analisi . . . . .	6
4.4 Conclusioni . . . . .	6
<b>5 Parte quinta: indice di rifrazione del vetro</b>	<b>8</b>
5.1 Obiettivi . . . . .	8
5.2 Metodo . . . . .	8
5.3 Dati ed analisi . . . . .	8
5.4 Conclusioni . . . . .	8
<b>6 Parte sesta: interferenza con un righello</b>	<b>9</b>
6.1 Obiettivi . . . . .	9
6.2 Metodo . . . . .	9
6.3 Dati ed analisi . . . . .	9
6.4 Conclusioni . . . . .	10

## List of Figures

1	Configurazione Fabry-Pérot . . . . .	1
2	Distanza specchi . . . . .	2
3	Configurazione Michelson . . . . .	4
4	Indice di rifrazione dell'aria . . . . .	7
5	Interferenza con un righello . . . . .	10

# 1 Parte prima: legge di interferenza

## 1.1 Obiettivi

Verificare la legge che descrive i massimi di interferenza con la configurazione di Fabry-Pérot.

## 1.2 Metodo

Si imposta il banco di lavoro dell'interferometro Pasco con la configurazione di Fabry-Pérot come mostrato in figura. Occorre assicurarsi che il laser sia allineato al banco e in modo tale che il fascio passi per il centro dello

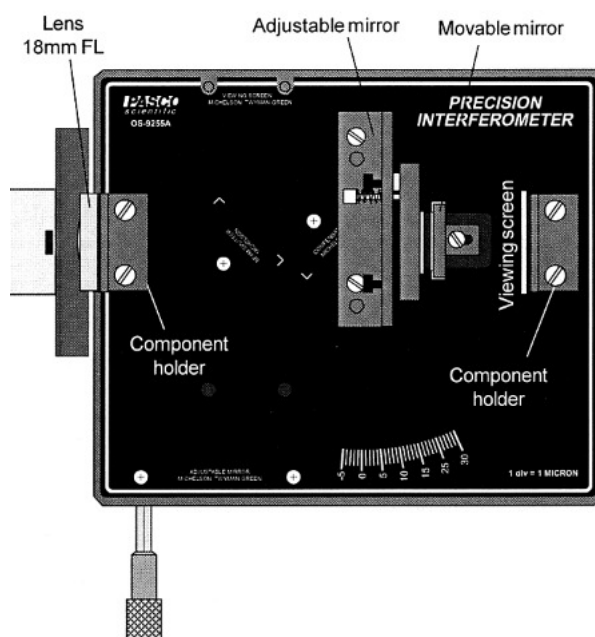


Figure 1: Configurazione Fabry-Pérot.

specchio e ritorni nel laser stesso. Dopo aver montato la lente da 18 mm, si pone il banco ad una distanza sufficiente per poter visualizzare al meglio i fronti su di una superficie perpendicolare al fascio del laser. La figura di interferenza è descritta dalla legge:

$$N\lambda = 2d \cos \theta + \delta_r \frac{\lambda}{2\pi}$$

dove  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  è la lunghezza d'onda del laser,  $d$  è la distanza tra i due specchi e  $\theta$  è l'angolo che individua i massimi di intensità luminosa. Per poter calcolare il coseno dell'angolo viene misurata la distanza  $L$  tra il punto di fuoco della lente e lo schermo su cui vengono visualizzati i fronti d'onda, e viene misurato il diametro di ogni fronte d'onda considerato.

## 1.3 Dati ed analisi

La distanza tra il fuoco della lente e lo schermo è  $L = (207.40 \pm 0.06) \text{ cm}$ . Le misure dei diametri sono:

$N$	Diametri	
	Interno	Esterno
D/cm		
5	$10.10 \pm 0.06$	
6	$9.20 \pm 0.06$	
7	$8.00 \pm 0.06$	$8.40 \pm 0.06$
8	$6.80 \pm 0.06$	$7.30 \pm 0.06$
9	$5.50 \pm 0.06$	$5.80 \pm 0.06$
10	$3.50 \pm 0.06$	$4.00 \pm 0.06$

Tramite la definizione informale di coseno

$$\cos \theta = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{D^2}{4}}}$$

si ricavano i valori associati a ciascun fronte:

$N$	$\cos \theta$
5	$0.999\,704 \pm 0.000\,003$
6	$0.999\,754 \pm 0.000\,003$
7	$0.999\,804\,7 \pm 0.000\,001\,9$
8	$0.999\,855\,6 \pm 0.000\,001\,6$
9	$0.999\,907\,2 \pm 0.000\,001\,3$
10	$0.999\,959\,1 \pm 0.000\,000\,9$

Dalla relazione descritta in precedenza si esplicita il coseno dell'angolo del fronte considerato:

$$\cos \theta = \frac{\lambda}{2d}N + A$$

Tramite tale relazione si interpolano i dati per ottenere  $d = (6.16 \pm 0.05) \text{ mm}$  e  $A = 0.999\,446 \pm 0.000\,004$  ( $\chi^2 = 0.5$ , DoF = 4,  $p$ -value = 97%).

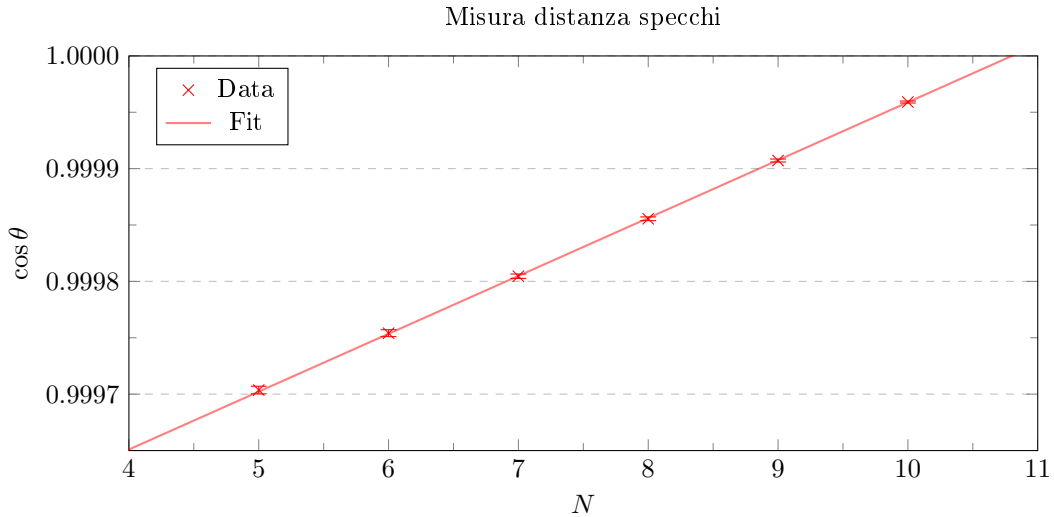


Figure 2: Grafico coseno angolo-numero frangia per la misura della distanza tra gli specchi in configurazione di Fabry-Pérot.

## 1.4 Conclusioni

La relazione utilizzata descrive con soddisfazione la figura di interferenza.

## 2 Parte seconda: calibrazione

### 2.1 Obiettivi

Calibrare il micrometro nella configurazione di Fabry-Pérot.

### 2.2 Metodo

Si mantiene la configurazione del banco di lavoro della sezione precedente. Si procede alla calibrazione del micrometro tramite la relazione

$$2 \Delta d \cos \theta = \Delta N \lambda$$

Si considera un fronte d'onda diverso dal primo e se ne misura il diametro ponendo un riferimento sullo schermo. Modificando la posizione dello specchio semi-riflettente, i fronti d'onda si spostano e si conta quanti ne passano per il riferimento. Quindi si misura ripetutamente quante frange si osservano passare a causa di uno spostamento  $\Delta d = 10 \mu\text{m}$  dichiarato dal micrometro e, tramite la formula precedente, si ottiene il valore di  $\Delta d$  reale.

### 2.3 Dati ed analisi

Le misure ripetute sono:

$N$	
30	31
28	31
31	30
27	29
28	30

La cui media è  $N = 29.5 \pm 0.5$ . La distanza del fuoco della lente dallo schermo è  $L = (207.40 \pm 0.06) \text{ cm}$ . Il diametro della frangia considerata vale  $D = (4.60 \pm 0.06) \text{ cm}$ .

Pertanto, tramite la definizione informale di coseno si ottiene

$$\cos \theta = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{D^2}{4}}} = 0.999\,938\,5 \pm 0.000\,001\,5$$

da cui segue

$$\Delta d = \frac{\Delta N \lambda}{2 \cos \theta} = (9.33 \pm 0.14) \mu\text{m}$$

### 2.4 Conclusioni

I fattori che concorrono a determinare la precisione di  $\Delta d$  sono:

- in maggior parte, l'incertezza di  $\Delta N$ ;
- in minor parte — nella pratica trascurabile —, l'incertezza di  $\cos \theta$ , cioè del diametro delle frange e della distanza lente-schermo;
- il gioco delle componenti meccaniche del banco di lavoro dovuto alle loro tolleranze.

### 3 Parte terza: calibrazione con configurazione Michelson

#### 3.1 Obiettivi

Calibrare il banco di lavoro con configurazione Michelson — configurazione mantenuta anche per le parti quarta e quinta — e paragonare la precisione delle misure ottenute nella configurazione di Fabry-Pérot.

#### 3.2 Metodo

Si sistema il banco di lavoro con la configurazione di Michelson.

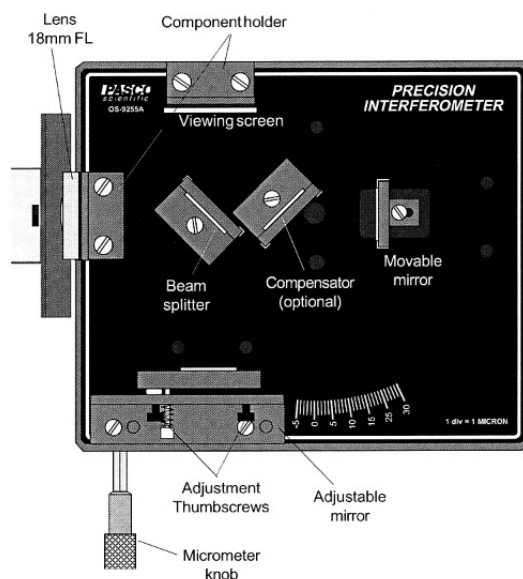


Figure 3: Configurazione Michelson.

Per la presa dei dati si ripete la procedura della configurazione di Fabry-Pérot. L'equazione con cui si verifica la precisione rimane:

$$\Delta d = \frac{\Delta N \lambda}{2 \cos \theta}$$

#### 3.3 Dati ed analisi

I dati raccolti sono:

$N$	
29	30
30	29
30	29
29	29
30	29

La cui media è  $N = 29.40 \pm 0.16$ . La distanza dallo schermo è  $L = (196.70 \pm 0.06)$  cm. Il diametro della frangia scelta risulta essere  $D = (5.00 \pm 0.06)$  cm.

Dunque si ha

$$\cos \theta = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{D^2}{4}}} = 0.9999192 \pm 0.0000013$$

da cui segue

$$\Delta d = \frac{\Delta N \lambda}{2 \cos \theta} = (9.30 \pm 0.05) \mu\text{m}$$

### 3.4 Conclusioni

La misura ottenuta di  $\Delta d$  è compatibile con una bontà del 42% a quella ottenuta nella configurazione Fabry-Pérot. Tale percentuale è calcolata come

$$\operatorname{erfc}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt, \quad x \equiv \frac{|\Delta d_{\text{FB}} - \Delta d_{\text{M}}|}{\sqrt{2(\sigma_{\text{FB}}^2 + \sigma_{\text{M}}^2)}}$$

Le due configurazioni hanno precisioni confrontabili. Si sottolinea quanto detto nelle conclusioni della parte precedente: l'incertezza sul numero di frange influenza considerevolmente la precisione di  $\Delta d$ .



## 4 Parte quarta: indice di rifrazione dell'aria

### 4.1 Obiettivi

Misura dell'indice di rifrazione dell'aria con la configurazione di Michelson.

### 4.2 Metodo

Si utilizza la cella a vuoto. Si rimuove una certa quantità di pressione e si contano quante frange d'onda passano per uno stesso punto quando viene lentamente ristabilita la pressione atmosferica. Si considerano differenti variazioni di pressione. Per ognuna di esse si ripetono più volte le misure.

Il numero di frange segue la relazione:

$$2dm(P_f - P_i) = \Delta N \lambda$$

Dove  $P_f \equiv P = 101\,325\text{ Pa}$  è la pressione atmosferica e, come suggerito, si considera  $d = 2.54\text{ cm}$  lo spessore della cella a vuoto. Per ottenere l'indice di rifrazione dell'aria si utilizza l'equazione

$$n = mP + 1$$

### 4.3 Dati ed analisi

Il numero di frange per ogni differenza di pressione è:

48 kPa	62 kPa	70 kPa
9	12	14
10	12	14
10	10	15
10	13	14
10	13	14
10	13	13
10	13	15
9	13	14
$9.75 \pm 0.16$	$12.4 \pm 0.4$	$14.1 \pm 0.2$

Dunque, si interpolano i seguenti dati

$\Delta P/\text{kPa}$	$\Delta N$
$48.0 \pm 1.2$	$9.75 \pm 0.16$
$62.0 \pm 1.2$	$12.4 \pm 0.4$
$70.0 \pm 1.2$	$14.1 \pm 0.2$

tramite l'equazione

$$\Delta N = \frac{2dm}{\lambda} \Delta P$$

Si ottiene un valore di  $m = (2.51 \pm 0.04) \times 10^{-6} \text{ kPa}^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.15$ , DoF = 2,  $p$ -value = 93%). Pertanto, la misura dell'indice di rifrazione dell'aria risulta essere

$$n = mP + 1 = 1.000\,255 \pm 0.000\,004$$

### 4.4 Conclusioni

La misura pare essere ragionevole e confrontabile con il valore di 1.000 263 riportato sulla scheda Pasco. I due valori non sono strettamente compatibili (4%): potrebbe essere il caso che i due esperimenti non siano stati svolti nelle medesime condizioni di temperatura, pressione ed umidità.

Da quanto ottenuto si può affermare che nella pratica pare giustificato approssimare l'indice di rifrazione dell'aria  $n$  all'unità.

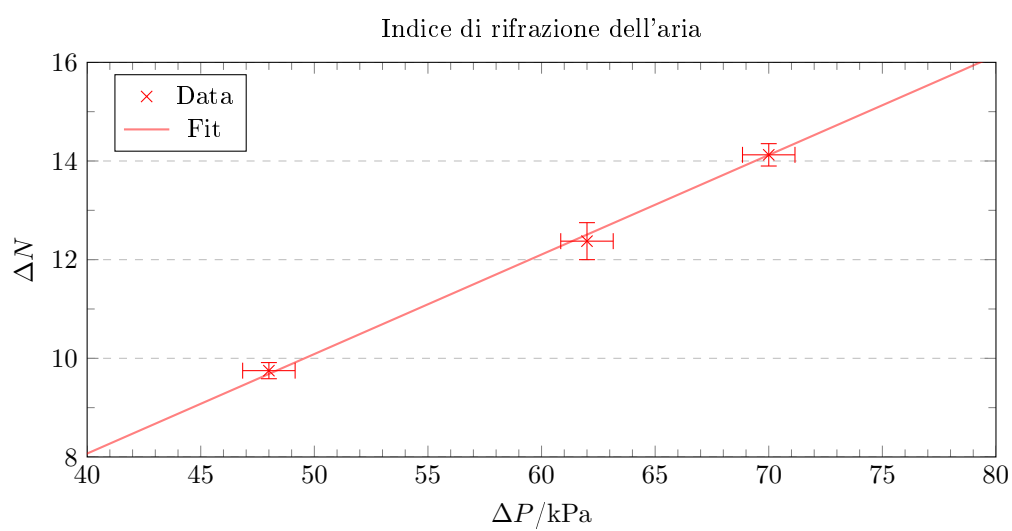


Figure 4: Grafico frange-variazione di pressione per la misura dell'indice di rifrazione dell'aria.

## 5 Parte quinta: indice di rifrazione del vetro

### 5.1 Obiettivi

Calcolare l'indice di rifrazione del vetro nella configurazione di Michelson.

### 5.2 Metodo

Si sostituisce la cella a vuoto con un vetro di spessore  $d = 6$  mm. Il vetro è poggiato su di un'asta con cui si può modificare l'angolo di incidenza del laser rispetto al vetro. Questo causa una variazione della posizione delle frange. Si verifica che l'angolo per il quale le frange invertono direzione sia  $\theta_i = (0.00 \pm 0.06)^\circ$ .

L'indice di rifrazione del vetro segue la relazione:

$$n_{\text{vetro}} = \frac{(2d - \Delta N \lambda)(1 - \cos \theta_f)}{2d(1 - \cos \theta_f) - \Delta N \lambda}$$

Si è scelto  $\theta_f = (10.00 \pm 0.06)^\circ$ . Si ripete più volte la misura del numero di frange.

### 5.3 Dati ed analisi

I dati raccolti sono:

$\Delta N$
109
107
110
113
108
$109.0 \pm 1.0$

Dall'equazione precedente si ricava il valore dell'indice di rifrazione del vetro  $n_{\text{vetro}} = 1.603 \pm 0.015$ .

### 5.4 Conclusioni

Il valore dell'indice di rifrazione del vetro risulta essere compatibile con quanto riportato in letteratura.

## 6 Parte sesta: interferenza con un righello

### 6.1 Obiettivi

Misura della lunghezza d'onda del laser He-Ne usando un righello come reticolo di riflessione.

### 6.2 Metodo

Si sporge un righello dal tavolo di lavoro. Si posiziona il laser di modo che il fascio di luce sia radente il righello ed una parte ne sia riflessa. Sullo schermo su cui giungono i raggi del laser si presentano diversi punti. I due più luminosi corrispondono al fronte d'onda di ordine 0 ed alla parte non riflessa del fascio.

Si misura la distanza  $L$  tra un estremo del righello e lo schermo. Inoltre, si misura la distanza  $H_N$  di ciascun punto da quello più basso, cioè quello corrispondente al raggio non riflesso del laser. In questo modo si può ricavare il coseno dell'angolo incidente ed il coseno di ciascun massimo luminoso. La relazione che lega il massimo  $N$  e l'angolo di incidenza  $\theta_{\text{inc}}$  del laser è

$$d(\cos \theta_{\text{inc}} - \cos \theta_N) = N\lambda$$

dove  $d = 1 \text{ mm}$  è il passo del righello.

### 6.3 Dati ed analisi

Le distanze dei punti rispetto il più basso sono:

$N$	$H_N/\text{cm}$
-3	$35.60 \pm 0.12$
-2	$40.00 \pm 0.12$
-1	$43.50 \pm 0.12$
0	$46.50 \pm 0.12$
1	$49.00 \pm 0.12$
2	$51.60 \pm 0.12$
3	$53.80 \pm 0.12$

La distanza tra il righello e lo schermo è  $L = (317.0 \pm 0.3) \text{ cm}$ . Il valore del coseno dell'angolo incidente è

$$\cos \theta_0 \equiv \cos \theta_{\text{inc}} = \frac{L}{\sqrt{L^2 + \frac{H_0^2}{4}}} = 0.997\,321 \pm 0.000\,014$$

Si ottiene il valore del coseno associato a ciascun massimo tramite

$$\cos \theta_N = \frac{L}{\sqrt{L^2 + (H_N - \frac{1}{2}H_0)^2}}$$

Da cui risultano:

$N$	$\cos \theta_N$
-3	$0.999\,242 \pm 0.000\,007$
-2	$0.998\,607 \pm 0.000\,010$
-1	$0.997\,966 \pm 0.000\,012$
0	$0.997\,321 \pm 0.000\,014$
1	$0.996\,717 \pm 0.000\,016$
2	$0.996\,025 \pm 0.000\,018$
3	$0.995\,39 \pm 0.000\,02$

Si interpolano questi dati secondo

$$\cos \theta_N = \cos \theta_{\text{inc}} - \frac{\lambda}{d}N$$

ottenendo una lunghezza d'onda del laser di  $\lambda = (641 \pm 2) \text{ nm}$  ( $\chi^2 = 6.4$ , DoF = 6,  $p$ -value = 38%).

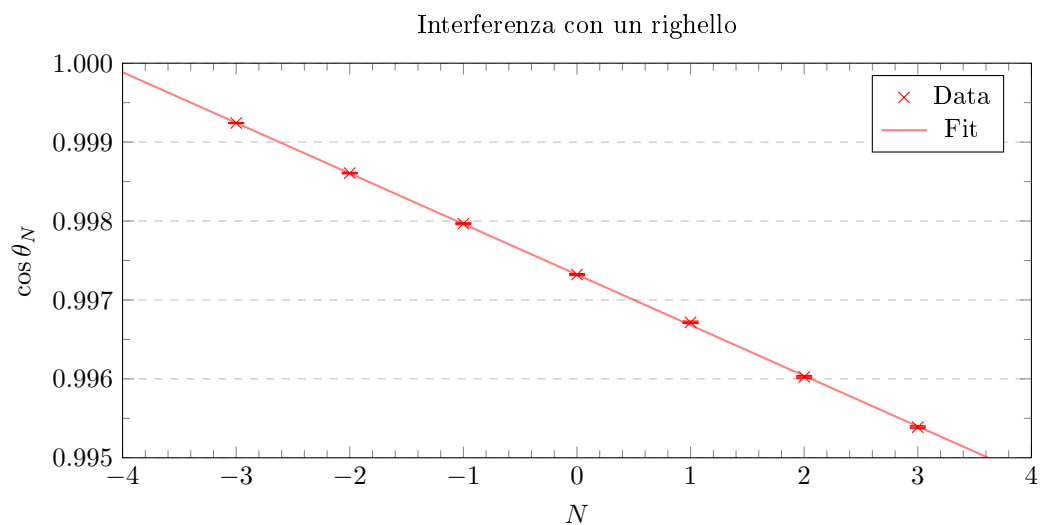


Figure 5: Grafico coseno picco-numero picco per le misure della figura di interferenza con un righello.

## 6.4 Conclusioni

La misura della lunghezza d'onda del laser He-Ne non risulta essere compatibile con il valore atteso di 632.8 nm. Questo potrebbe essere indice della presenza di un errore sistematico che non è stato individuato durante la presa dati.