

# Ottica 2

Gruppo AA

Luca Ciambriello, Gianfranco Cordella, Leonardo Bertini

14 Febbraio 2017

## 1 Scopo e strumentazione

Abbiamo impiegato due diversi dispositivi (un calibro utilizzato come reticolo di diffrazione ed un interferometro di Michelson) con l'obiettivo di misurare la lunghezza d'onda della luce emessa rispettivamente da un laser ad He-Ne e da una lampada al mercurio. Strumenti utilizzati sono dunque un laser ad He-Ne, un calibro ventesimale (quindi il passo è pari ad 1 mm), schermi su cui visualizzare le figure di diffrazione o di interferenza, un metro di risoluzione 1 mm e l'interferometro di Michelson, mostrato in figura (1). Al fine di contare con maggiore efficacia le frange di interferenza nella seconda parte dell'esperienza abbiamo talvolta utilizzato anche un dispositivo di registrazione che ci ha permesso poi di eseguire il conteggio, con più calma, su uno schermo.

### 1.1 Lunghezza d'onda di un laser He-Ne

Il fascio luminoso emesso dal laser viene riflesso da uno specchio. Abbiamo posto il laser su un tavolo in modo da avere un'emissione quasi ortogonale alla normale al tavolo stesso. Infatti solo così il passo reticolare visto dalla radiazione diviene confrontabile con la lunghezza d'onda (di circa 650 nm) ed è quindi visualizzabile la figura di diffrazione. Quest'ultima compare su uno schermo (costituito da un foglio) posto a circa 2.5 m dall'estremo del tavolo.

### 1.2 Interferometro di Michelson

L'interferometro è costituito da due bracci disposti a croce, ciascuno dei quali termina con degli specchi che riflettono la radiazione luminosa. Esistono due cammini ottici possibili; in uno di questi la luce procede fino allo specchio  $M_2$ , da cui viene riflessa per poi essere mandata dal beam splitter allo schermo. Nel secondo cammino ottico la luce è riflessa dal beam splitter su  $M_1$ , da cui torna all'osservatore. Lo specchio  $M_2$  può essere soltanto orientato manovrando due viti al fine di allineare l'interferometro. Lo specchio  $M_1$  può invece essere spostato agendo su un micrometro avente risoluzione di 10  $\mu\text{m}$ : in tal modo può essere variato il cammino ottico e le frange circolari della figura di diffrazione scorrono, dando luogo a interferenza.

## 2 Misura della lunghezza d'onda di un laser He-Ne

Abbiamo dapprima agito sulla posizione ed orientamento del calibro, in modo che la luce incidesse sulla parte graduata. Quindi abbiamo variato l'inclinazione del fascio agendo sulla vite posta sul retro dello specchio, in modo da avere una figura di diffrazione evidente, con almeno 15 ordini chiaramente visualizzabili ed in modo che lo spessore delle tracce fosse il minore possibile.

Abbiamo allora segnato con una matita tanto la posizione del livello quanto lo spessore della traccia luminosa, ripetendo il procedimento per ciascun livello (ne abbiamo contati in totale 21), compreso l'ordine 0 di riflessione. Abbiamo anche individuato la posizione della traccia, di forma circolare come l'apertura del laser, corrispondente alla parte di segnale non deviato. Con il metro si è così potuto

misurare la distanza tra il centro del cerchio e l'ordine 0, segnando a matita il punto medio tra queste due posizioni. Abbiamo allora misurato la distanza tra questo punto medio ed i due estremi della figura luminosa presente sul calibro, considerando poi media e semidisersione per ottenere la distanza tra il calibro e lo schermo pari a  $D = 206.0 \pm 1.5$  cm. Abbiamo valutato l'errore dato dalla semidisersione prevalente sugli errori dovuti al non perfetto allineamento.

## 2.1 Analisi dati

Utilizzando il metro si è potuto misurare la distanza tra il punto medio, utilizzato come riferimento, e ciascuno dei livelli precedentemente individuati. In tabella (1) sono riportati i dati, compreso un errore, e l'ordine di diffrazione  $m$ . L'errore è ottenuto dalla somma in quadratura dell'incertezza dovuta allo spessore di ciascuna tacca ed un errore di 5 mm corrispondente al raggio del cerchio (incertezza sulla posizione di riferimento), mentre l'errore di risoluzione del metro, minore di quelli sopra considerati, è stato trascurato.

$h[\text{cm}]$	$\Delta h[\text{cm}]$	$m$
6.4	0.5	0
9.7	0.5	1
12.1	0.5	2
14.1	0.5	3
15.9	0.5	4
17.5	0.5	5
19.0	0.5	6
20.4	0.5	7
21.7	0.5	8
22.9	0.5	9
24.0	0.5	10
25.1	0.5	11
26.2	0.5	12
27.2	0.5	13
28.2	0.5	14
29.1	0.5	15
30.1	0.5	16
31.0	0.5	17
31.9	0.5	18
32.8	0.5	19
33.5	0.5	20

Table 1:  $h$  e  $\Delta h$  sono rispettivamente misura ed errore dell'altezza dei vari ordini di diffrazione numerati con  $m$ .

Essendo l'angolo di diffrazione il complementare dell'angolo di cui è nota la tangente  $\tan\theta = h/D$ , si ha la relazione, essendo  $\theta_i$  l'angolo di incidenza rispetto alla normale,  $d$  il passo reticolare e  $\lambda$  la lunghezza d'onda:

$$\cos\theta = \sin\theta_i - m \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

Noto quindi  $\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\theta}}$ , abbiamo svolto un fit lineare del coseno in funzione dell'ordine di diffrazione, mantenendo come parametri  $a = -\frac{\lambda}{d}$  e  $b = \sin\theta_i$  e considerando come errore solo l'errore sul coseno, ottenuto dalla propagazione degli errori su  $h$  e su  $D$ . I risultati ottenuti sono i seguenti:

- $a = -0.000626 \pm 0.000008$
- $b = 0.99952 \pm 0.00006$ , quindi angolo di incidenza, come atteso, molto vicino a  $\pi/2$
- $cov = -0.62$  come valore di covarianza normalizzata

- $\chi^2 = 0.07$  con 19 gradi di libertà.

Il valore del  $\chi^2$  fa pensare ad una possibile sovrastima dell'errore; del resto in esso sono state inserite parti sistematiche, in particolare quelle dovute alla dimensione del segnale non riflesso nè rifratto. Noto  $d$ , si è ottenuta una lunghezza d'onda  $\lambda = 626 \pm 8$  nm, pienamente compatibile con il valore atteso di 632.8 nm. Riportiamo infine in figura (2) il grafico di  $\cos\theta(m)$ , dove è mostrato anche l'andamento dei residui.

### 3 Interferometro di Michelson

#### 3.1 Calibrazione

In primo luogo si è calibrato l'interferometro. E' stato utilizzato un laser con frequenza di emissione nominale di  $\lambda=632.8$  nm. E' stato posizionato lo specchio ruotabile in modo tale che i due fasci di luce si sovrapponevano e quindi in modo tale da osservare interferenza sullo schermo. Si osservava sullo schermo una struttura di interferenza formata da circonferenze concentriche.

Spostando, tramite il micrometro, l'altro specchio parallelamente a se stesso, è stato possibile variare la lunghezza di un braccio ed osservare le frange di interferenza spostarsi.

Fissato un punto dello schermo, è stato contato il numero di massimi (o minimi) di intensità che si susseguivano al variare della lunghezza del braccio. Sapendo quindi il numero di frange ( $m$ ) e il numero di tacche ( $n$ )(intervalli di risoluzione) del micrometro corrispondenti allo spostamento effettuato, è stata effettuata la calibrazione: dati in tabella (2). Se  $\Delta x$  è lo spostamento dello specchio si ha:

$$\Delta x = \frac{m\lambda}{2} \quad (2)$$

E quindi il fattore di calibrazione, definito come lo spostamento dello specchio corrispondente ad una tacca:

$$q = m\lambda/2n \quad (3)$$

Sono state effettuate diverse misure per la calibrazione. La prima è stata effettuata spostando lo specchio fin quando non si contassero 50 frange. In corrispondenza di un certo numero di frange però in generale il micrometro segna un valore compreso tra due tacche. Perciò, è assegnata come incertezza una tacca. Essendo il numero di tacche dell'ordine di 10, l'errore è in percentuale il 10%. Per le altre misure si è operato in altro modo: è stato spostato lo specchio finchè il micrometro segnasse un numero esatto di tacche (non si fermasse quindi tra due di esse), cosicchè l'errore sul micrometro fosse trascurabile( $\sim 0$ ). La parte significativa dell'incertezza in questo caso proviene dal numero di frange contate ed è dell'ordine dell'1 %.

Si ottengono diversi valori per il fattore di calibrazione. E' stata effettuata una media pesata dei

$N_{bande}$	$\Delta N_{bande}$	$X$ [ $\mu m$ ]	$\Delta X$ [ $\mu m$ ]
50	0	90	10
51	1	90	0
56	1	100	0
85	1	150	0
60	1	110	0

Table 2:  $N_{bande}$  è il numero di bande contate sullo schermo a muro con il relativo errore.  $X$  è invece il valore letto sul micrometro. Laddove l'errore è 0, significa che può essere trascurato rispetto agli altri.

valori e si è considerato il valore nominale per la lunghezza d'onda del laser  $\lambda=632.8$  nm, ottenendo:  $q=1.77 \pm 0.01 \mu m$

#### 3.2 Lunghezza d'onda mercurio

E' stata misurata una lunghezza d'onda di emissione del mercurio nel verde.

Nello stesso apparato sperimentale è stato sostituito la sorgente laser con la lampada a mercurio. Si

visualizzava una struttura di interferenza formata da circonferenze concentriche, simile a quella del laser: figura (3)

Analogamente alle misure di calibrazione, sono state effettuate due tipi di misure: le prime tre contando un numero prestabilito di frange e avendo un'elevata incertezza sul micrometro, le ultime due contando un numero esatto di tacche. I risultati sono riportati in tabella (3): Sapendo il numero di tacche  $N$  e

$N_{bande}$	$\Delta N_{bande}$	$X$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta X$ [ $\mu\text{m}$ ]
71	3	120	10
60	3	100	10
75	3	120	10
97	1	150	0
79	1	130	0

Table 3:  $N_{bande}$  è il numero di bande contate osservando direttamente il fascio luminoso.  $X$  è invece il valore letto sul micrometro. Laddove l'errore è 0, significa che può essere trascurato rispetto agli altri.

quello di frange  $M$  è stato possibile ricavare la lunghezza d'onda:

$$\lambda = \frac{2qN}{M} \quad (4)$$

Come nella sezione precedente si sono ottenuti più valori della lunghezza d'onda, effettuando una media pesata:  $\lambda_{mercurio} = 560 \pm 5 \text{ nm}$

A partire dagli stessi dati è stato effettuato il calcolo del fattore di calibrazione e della lunghezza d'onda del mercurio a partire dalla lunghezza d'onda del laser misurata nella prima parte di esperienza ( $\lambda = 626 \pm 8 \text{ nm}$ ) e si ottiene  $q = 1.75 \pm 0.02 \mu\text{m}$  e  $\lambda_{mercurio} = 554 \pm 6 \text{ nm}$ . Questa stima è da considerarsi solo indicativa, in quanto il laser di cui si è misurata la lunghezza d'onda, sebbene dello stesso tipo, non era lo stesso di quello usato nell'interferometro.

La prima misura dista 3 bande d'errore dal valore nominale di 546 nm, mentre la seconda stima dista 2 bande d'errore.

### 3.3 Luce bianca

E' stata posta in ingresso all'interferometro una lampada a luce bianca.

Inizialmente la lunghezza dei due bracci dell'interferometro era diversa e non si osservava alcuna interferenza. E' stata quindi rimossa la luce bianca e posta nuovamente la sorgente laser. E' stata cambiata di qualche millimetro la lunghezza del braccio variabile in modo tale che fosse circa uguale a quella dell'altro braccio, a meno di una distanza pari all'ordine di grandezza delle lunghezze d'onda in gioco, ovvero quelle del visibile  $\sim 600 \text{ nm}$ . E' stata variata l'orientazione dell'altro specchio in modo tale da allineare nuovamente i due fasci luminosi, ed è stato possibile verificarlo tramite la sorgente laser. Quindi è stata posta in ingresso la lampada bianca, ed agendo sul micrometro si è corretta la lunghezza del braccio dell'ordine dei centinaia di nanometri, fino ad osservare frange di interferenza (figura (4)). L'interferenza per la luce bianca si può verificare solo nel caso in cui le lunghezze dei due bracci  $L_1$  ed  $L_2$  sono uguali. Infatti per ogni frequenza deve essere soddisfatta la relazione  $abs L_1 - L_2 = m\lambda$  con  $m$  numero intero. Questo, nel caso di molte frequenze è soddisfatto solo se  $m=0$  e le lunghezze sono uguali.

## 4 conclusioni

E' stata misurata la lunghezza d'onda del laser all'1%. Il valore ottenuto è in accordo con il valore nominale conosciuto di 632.8 nm

Tramite interferometro di Michelson è stata misurata la lunghezza d'onda della banda verde di emissione del mercurio anche essa all'1%. Il valore ottenuto è in accordo entro tre bande d'errore con quello nominale

E' stata inoltre osservata la diffrazione di luce non monocromatica.

## 5 Grafici ed immagini

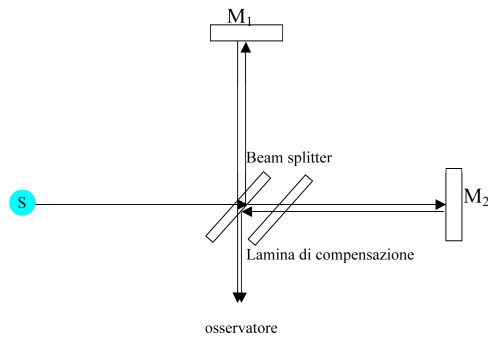


Figure 1: Interferometro di Michelson

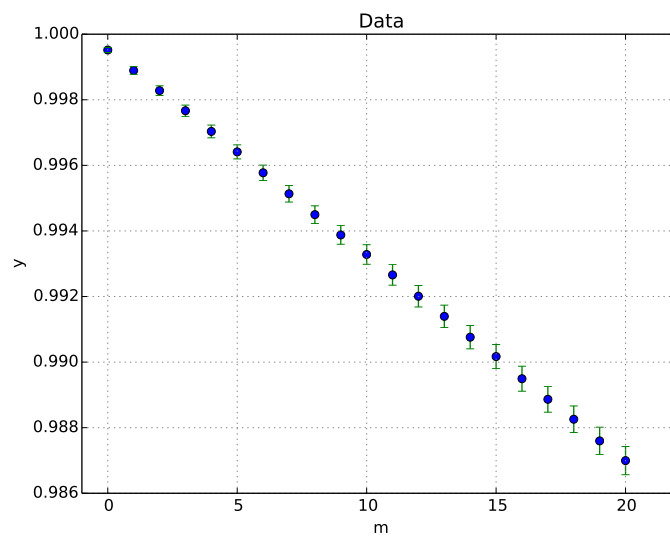


Figure 2: Grafico del coseno in funzione dell'ordine di diffrazione.

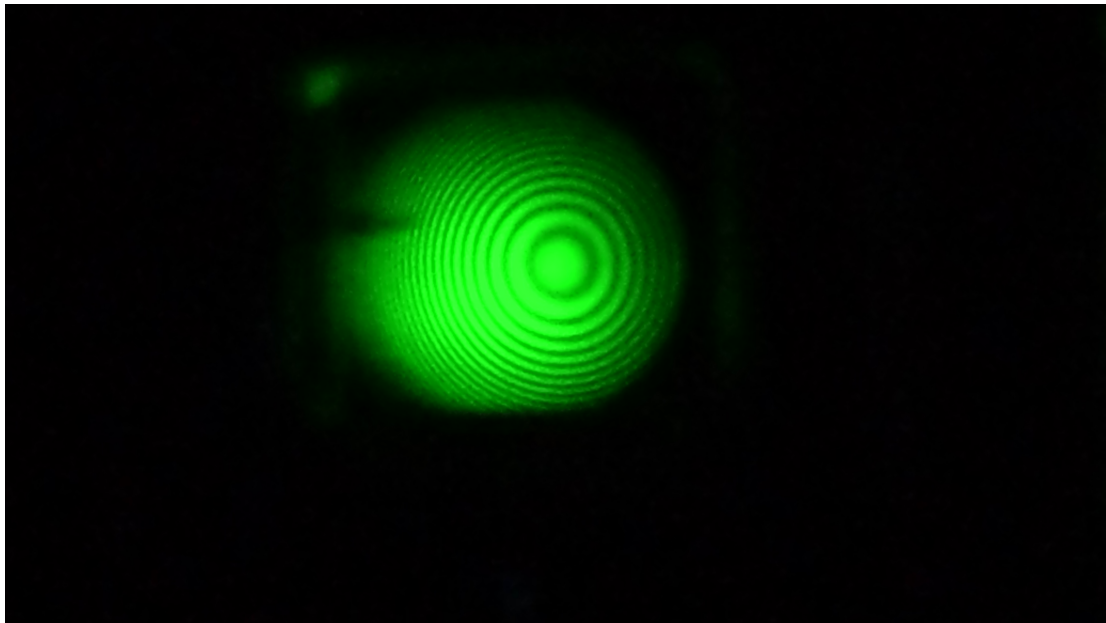


Figure 3: Frange determinate dalla luce verde emessa dal mercurio osservate all'uscita dell'interferometro

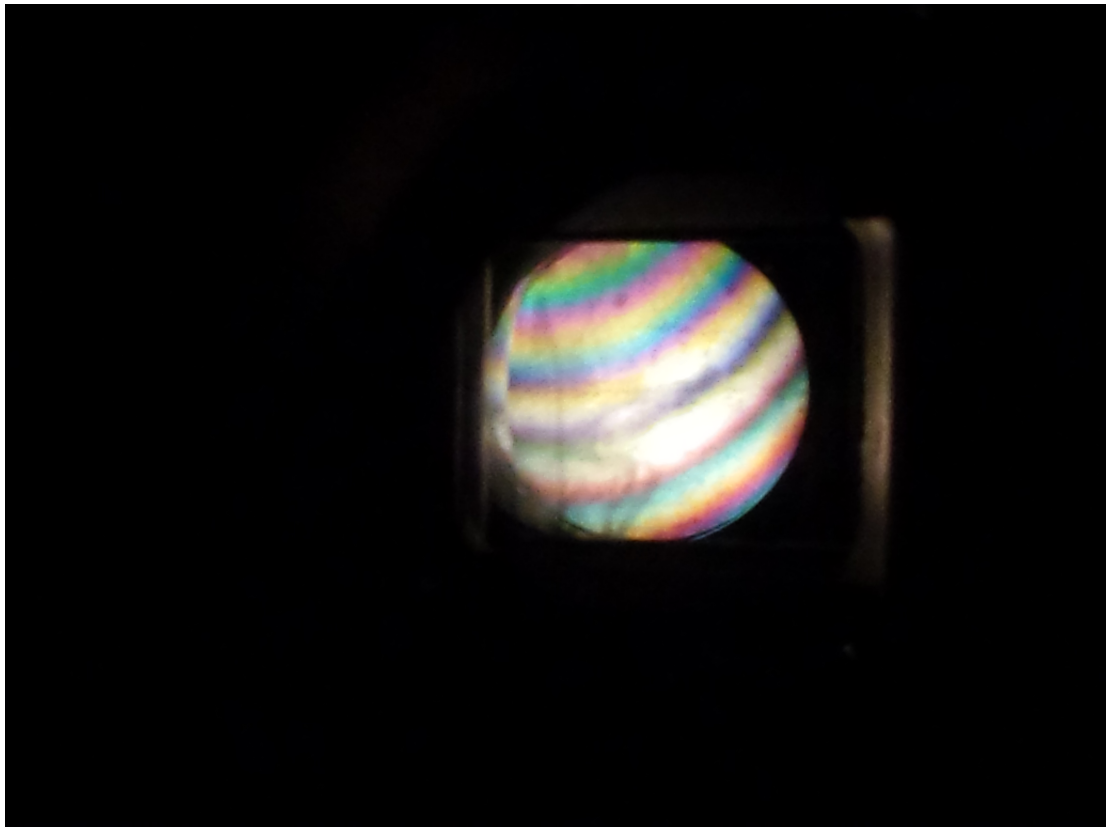


Figure 4: Frange determinate dalla luce bianca osservate all'uscita dell'interferometro