

Interferometro di Michelson

Marilena Teri, Valerio Toso & Ettore Zaffaroni (gruppo Lu4)

1 Introduzione

Un fascio di luce laser si propaga come un'onda sinusoidale ed ha una lunghezza di coerenza molto elevata, pertanto come avviene in generale per i fenomeni ondulatori se due onde vengono sovrapposte si creano fenomeni di interferenza. In particolare se due onde hanno la stessa ampiezza e lo stesso periodo ma sono in controfase si avrà interferenza distruttiva e l'intensità luminosa sarà nulla, viceversa se le due onde sono in fase tra loro l'interferenza sarà costruttiva e l'intensità luminosa che ne deriva sarà massima.

Se la luce che consideriamo non è monocromatica, come quella di un laser, ma è costituita da uno spettro continuo, come quello generato da una lampada alogena, la sua lunghezza di coerenza L_p sarà alquanto limitata poiché la fase dei diversi treni d'onda generati varia casualmente nel tempo; i fenomeni di interferenza saranno quindi visibili solo se la distanza tra le due sorgenti sarà inferiore alla lunghezza del treno d'onda: oltre questa distanza le onde non saranno più coerenti. La lunghezza dei treni d'onda risulta quindi essere proprio il doppio della distanza massima tra le sorgenti luminose tale per cui vi è un fenomeno di interferenza.

Se il fascio di luce considerato in quest'ultimo caso viene filtrato attraverso dei filtri colorati lo spettro della luce trasmessa sarà più ristretto e la lunghezza dei pacchetti d'onda sarà maggiore; infatti l'intervallo di frequenze luminose che compongono un fascio luminoso è tanto più grande quanto è più piccola la lunghezza del pacchetto d'onda:

$$\Delta\nu L_p \approx c$$

dove $\Delta\nu$ indica un intervallo di frequenze centrate sulla frequenza media ν_0 della radiazione, L_p è la lunghezza del pacchetto d'onda e c la velocità della luce.

Se come sorgente luminosa si utilizza una lampada al sodio il suo spettro luminoso è piccato su due linee di emissione molto vicine tra loro (589,0 nm e 589,6 nm). Usando questo tipo di lampada si osserva una figura di interferenza molto netta quando le frange luminose della prima riga si sovrappongono alle frange luminose della seconda riga. Viceversa si osserva illuminazione omogenea quando le frange luminose della prima riga

si sovrappongono alle frange oscure della seconda riga. Tale alternanza dipende dalla differenza di cammino ottico, incrementata della quantità:

$$2\Delta x = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

dove λ_1 e λ_2 rappresentano le lunghezze d'onda del doppietto del sodio.

Misurando la differenza di fase che produce m alternanze massima interferenza - massima interferenza (o luminosità uniforme - luminosità uniforme) e approssimando il prodotto λ_1 e λ_2 con la loro media geometrica, si può ricavare la separazione tra le due righe del doppietto:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{m\lambda^2}{2\Delta x}$$

2 Esperimento

Lo scopo dell'esperienza è utilizzare l'interferometro di Michelson per misurare le seguenti quantità:

- la lunghezza d'onda di un fascio di luce monocromatica generato da un laser;
- l'indice di rifrazione dell'aria a pressione atmosferica;
- la lunghezza dei pacchetti d'onda di una luce non monocromatica;
- la separazione tra le due righe del doppietto della luce gialla del sodio;

2.1 Descrizione dell'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale (Figura 1) consiste in una lastra semiriflettente piana che sdoppia un fascio di luce, incidente su di essa con una inclinazione di 45° , in due fasci distinti che divergono di 90° e vanno ad incidere su altri due specchietti (S_1 ed S_2) per venire così riflessi e mandati verso uno schermo creando figure di interferenza. Essendo la lastra semiriflettente argentata sulla superficie opposta alla direzione di provenienza del fascio di luce, il cammino ottico dei due fasci una volta sdoppiati risulterebbe differente, viene perciò introdotta una lastra correttiva lungo il cammino del secondo raggio. Per mezzo di una vite micrometrica si può variare la distanza di uno dei due specchietti dalla lastra semiriflettente in modo da modificare la fase tra i due fasci, inoltre viene utilizzata un dispositivo a leva che aumenta la precisione della vite micrometrica di un fattore 5. L'altro specchietto invece è inclinabile attraverso due viti per regolare l'ortogonalità tra i fasci luminosi.

Vengono utilizzate le seguenti fonti luminose:

- Un fascio di luce monocromatica rossa, generato da un laser di potenza 4mW;
- una lampada alogena che produce uno spettro luminoso continuo;
- una lampada al sodio la cui emissione è piccata sulle lunghezze d'onda di 589,0 nm e 589,6 nm.

Per quanto riguarda il fascio di luce laser viene introdotta una lente (nel nostro caso convergente con distanza focale pari a 50 mm) in modo da far divergere il raggio e ingrandire lo spot luminoso sullo schermo.

2.2 Misura della lunghezza d'onda della luce laser rossa

2.2.1 Messa a punto dell'apparato sperimentale

Togliendo la lente e accendendo il laser, abbiamo regolato le viti dello specchio S_1 in modo da sovrapporre lo spot dato dalla riflessione sullo specchio S_1 con quello dato da S_2 ; abbiamo poi rimesso la lente e regolato finemente le due viti in modo da vedere nitidamente le frange di interferenza e abbiamo visto che ruotando la vite micrometrica dello specchio S_2 le frange di interferenza scorrevano.

2.2.2 Procedura sperimentale

Abbiamo utilizzato come schermo un foglio di carta appeso a una parete e prima di iniziare le misure abbiamo tracciato a metà dell'immagine che si veniva a creare una riga scura con un pennarello, in modo da poterla utilizzare come punto di riferimento per contare le frange che passavano.

Dopo aver letto la posizione x_a che segnava il micrometro posto sulla vite dello specchio S_2 uno di noi girava la vite cercando di muoverla nel modo più lento e regolare possibile; il metodo più opportuno era tenere appoggiati i gomiti sul tavolo far scorrere alternativamente i polpastrelli dei due pollici. Gli altri due contavano le frange che passavano oltre la riga in silenzio, ciascuno per conto proprio, in modo da confrontare i numeri e assicurarsi di non aver compiuto grossi errori.

Quando erano passate 200 frange leggevamo la nuova posizione x_b segnata della vite micrometrica e valutavamo lo spostamento Δx dello specchio S_2 dovuto a quella rotazione (Tabella 1):

$$\Delta x = \frac{x_b - x_a}{5}$$

Abbiamo ripetuto questa operazione diverse volte invertendo i ruoli. Abbiamo girato la vite sempre in senso antiorario in modo che lo specchio S_2 si muovesse sempre in un verso in modo da eliminare eventuali giochi meccanici del sistema di movimento.

2.2.3 Elaborazione dei dati

Per ogni spostamento Δx misurato abbiamo calcolato la lunghezza d'onda λ :

$$\lambda = \frac{2n_a \Delta x}{N_1}$$

dove n_a è l'indice di rifrazione dell'aria e N_1 è il numero di frange che hanno attraversato la riga sullo schermo (nel nostro caso $N_1 = 200$). Inoltre $2n_a \Delta x$ rappresenta la variazione di cammino ottico del raggio luminoso. In questa fase dell'esperimento abbiamo assunto $n_a = 1$ in quanto l'indice di rifrazione dell'aria si discosta dall'unità per meno di $3 \cdot 10^{-4}$.

Abbiamo calcolato il valor medio e l'errore sul valor medio ottenendo il seguente risultato:

$$\lambda = 632 \pm 3 \text{ nm}$$

COMMENTO: Il valore che abbiamo ottenuto è compatibile con la lunghezza d'onda dichiarata sul laser (633 nm).

2.3 Misura dell'indice di rifrazione dell'aria

2.3.1 Messa a punto dell'apparato sperimentale

Per questa misura abbiamo inserito tra lo specchio S_2 e la lente semiriflettente una cameretta cilindrica di lunghezza $d = 5$ cm le cui basi sono realizzate con flange in vetro e nella quale può essere creato il vuoto mediante una pompa rotativa; in tale cameretta è anche possibile un rientro graduale dell'aria grazie ad una valvola a spillo. Durante questa operazione si osserva sullo schermo un succedersi di frange di interferenza dovuto ad un aumento progressivo del cammino ottico compiuto dal fascio di luce laser all'interno della cameretta (dato che l'indice di rifrazione dell'aria aumenta con la pressione).

2.3.2 Procedura sperimentale

Dopo aver creato il vuoto nella cameretta abbiamo aperto lentamente la valvola a spillo e abbiamo contato il numero di frange di interferenza che passavano nello stesso modo utilizzato per la misura della lunghezza d'onda. Abbiamo ripetuto questa misura diverse volte (Tabella 2).

2.3.3 Elaborazione dei dati

Per ogni valore di N_2 che abbiamo ottenuto, abbiamo calcolato l'indice di rifrazione dell'aria:

$$n_a = \frac{N_2 \lambda}{2d} + 1$$

dove λ è la lunghezza d'onda misurata nella parte precedente dell'esperimento. Abbiamo calcolato la media tra i valori di n_a ottenendo il seguente risultato:

$$n_a = 1,000264 \pm 3 \cdot 10^{-6}$$

COMMENTO: confrontando questo valore con quello tabulato per l'aria a 15 °C a pressione atmosferica e per $\lambda = 630$ nm ($n_a = 1,0002765$), notiamo che il nostro risultato minore: questo può essere dovuto al fatto che il laboratorio si trovava a temperatura più alta e quindi l'indice di rifrazione dell'aria era più basso.

2.4 Misura della lunghezza dei treni d'onda di una sorgente di luce non monocromatica

2.4.1 Messa a punto dell'apparato sperimentale

Prima di procedere al collegamento della lampada alogena abbiamo utilizzato la luce laser per ricercare la condizione di equidistanza degli specchi S_1 e S_2 : le frange di interferenza di una luce non coerente sono infatti visibili solo se la lunghezza del pacchetto d'onda non è superiore alla differenza di cammino ottico tra i due fasci luminosi. Per fare ciò abbiamo spostato avanti e indietro lo specchio mobile S_2 ruotando la vite micrometrica fino a vedere sullo schermo delle frange rettilinee generate da iperboloidi degeneri.

Abbiamo dunque collegato la lampada alogena e tramite una fibra ottica abbiamo proiettato la sua luce sulla lastra semitrasparente e ruotando lentamente la vite micrometrica abbiamo verificato che si generassero frange di interferenza sullo schermo nell'intorno del punto calcolato con la luce laser.

2.4.2 Procedura sperimentale

Partendo da un punto in cui le frange erano visibili, abbiamo ruotato la vite micrometrica fino a che queste non sono scomparse ovvero quando sullo schermo vi era una condizione di luminosità uniforme. Abbiamo preso nota della posizione di questo punto e ruotato nuovamente la vite micrometrica rendendo dapprima visibili le frange di interferenza ed arrivando quindi alla successiva condizione di luminosità uniforme dello spot sullo schermo. Lo spostamento misurato dalla vite micrometrica diviso per cinque corrisponde alla lunghezza del pacchetto d'onda (Tabella 3).

Successivamente abbiamo inserito tra la fibra ottica e la lastra semiriflettente dei filtri colorati, uno verde e uno viola, che lasciano passare solo determinate componenti dello spettro visibile. Eseguendo nuovamente le operazioni già descritte, con il filtro verde abbiamo potuto calcolare la lunghezza dei pacchetti d'onda di questo fascio luminoso (Tabella 4); con il filtro viola, invece, la luminosità sullo schermo era troppo bassa per riuscire a distinguere le frange di interferenza e non siamo quindi riusciti a prendere alcuna misura.

2.4.3 Elaborazione dei dati

In questo caso, dato che $L_p = \Delta x$, le uniche operazioni effettuate sono state quella di dividere il valore ottenuto sulla vite micrometrica per 5, calcolare la media e l'errore (quest'ultimo a partire dalla deviazione standard):

- luce bianca: $L_p = 10,8 \pm 0,5 \mu\text{m}$;
- luce verde: $L_p = 20,3 \pm 0,6 \mu\text{m}$;
- luce viola: N.D.

COMMENTO: I risultati ottenuti sono compatibili con quelli che ci si aspettava; in particolare si nota come diminuendo l'ampiezza dello spettro con un filtro, la lunghezza di coerenza aumenta.

2.5 Misura della separazione tra le righe del doppietto del sodio

Durante le misure effettuate con la lampada alogena abbiamo acceso la lampada al sodio, la quale necessita di diversi minuti d'attesa prima che raggiunga la massima potenza. Al posto della lampada alogena abbiamo dunque collegato alla fibra ottica la lampada al sodio e proiettato la sua luce sulla lastra semiriflettente; abbiamo quindi verificato che ruotando la vite micrometrica si osservassero alternanze tra zone in cui si ha interferenza netta a zone di luminosità uniforme.

2.5.1 Procedura sperimentale

Prima di tutto ci siamo portati in una zona di luminosità uniforme, abbiamo annotato il valore letto sulla vite micrometrica e ci siamo spostati fino ad un'altra zona di luminosità uniforme passando per una di massima interferenza, annotando il nuovo valore e calcolando la differenza (Tabella 5); in questo caso abbiamo ritenuto opportuno attribuire alla misura un'incertezza di 0,05 mm poiché la zona di luminosità uniforme era piuttosto estesa. Questa operazione è stata ripetuta più volte per migliorare la precisione del risultato.

Abbiamo effettuato le misure tra zone di luminosità uniforme invece che tra due massimi di interferenza perché per l'occhio umano è più semplice riconoscere le prime.

2.5.2 Elaborazione dei dati

Per calcolare $\Delta\lambda$ abbiamo applicato la formula:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \Delta\lambda = \frac{m\lambda^2}{2\Delta x}$$

dove λ_1 e λ_2 sono le due lunghezze d'onda delle righe di emissione del sodio, λ è la lunghezza d'onda media delle righe di emissione e Δx è lo spostamento dello specchio S_2 . Abbiamo quindi calcolato la media e l'errore sul valor medio:

$$\Delta\lambda = 0,61 \pm 0,01\text{nm}$$

COMMENTO: Il risultato ottenuto è compatibile con il valore teorico di $\Delta\lambda$, pari a 0,6 nm.

Tabella 1: luce laser

	N_1	$5\Delta x$ (mm)	$\sigma_{5\Delta x}$ (mm)	Δx (mm)	$\sigma_{\Delta x}$ (mm)	λ (nm)	σ_λ (nm)
1	200	0,33	0,01	0,066	0,002	660	7
2	200	0,31	0,01	0,062	0,002	620	6
3	200	0,32	0,01	0,064	0,002	640	6
4	200	0,31	0,01	0,062	0,002	620	6
5	200	0,31	0,01	0,062	0,002	620	6

$$\sigma_{\Delta x} = \frac{\sigma_{5\Delta x}}{5} \quad \sigma_\lambda = \frac{2n_a}{N_1} \sigma_{\Delta x}$$

Tabella 2: indice di rifrazione dell'aria

	N_2	σ_{N_2}	n_a	σ_{n_a}
1	42	1	1,000265	$6 \cdot 10^{-6}$
2	43	1	1,000272	$6 \cdot 10^{-6}$
3	41	1	1,000259	$6 \cdot 10^{-6}$
4	41	1	1,000259	$6 \cdot 10^{-6}$

$$\sigma_{n_a} = \frac{\sigma_{N_2}}{N_2} (n_a - 1)$$

Tabella 3: luce bianca

	$5\Delta x$ (mm)	$\sigma_{5\Delta x}$ (mm)	L_p (μm)	σ_{L_p} (μm)
1	0,05	0,01	10	2
2	0,06	0,01	12	2
3	0,05	0,01	10	2
4	0,05	0,01	10	2
5	0,06	0,01	12	2
6	0,05	0,01	10	2

Tabella 4: luce verde

	$5\Delta x$ (mm)	$\sigma_{5\Delta x}$ (mm)	L_p (μm)	σ_{L_p} (μm)
1	0,10	0,01	20	2
2	0,10	0,01	20	2
3	0,11	0,01	22	2
4	0,09	0,01	18	2
5	0,11	0,01	22	2
6	0,10	0,01	20	2

Tabella 5: luce al sodio

	$5\Delta x$ (mm)	$\sigma_{5\Delta x}$ (mm)	Δx (mm)	$\sigma_{\Delta x}$ (mm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$\sigma_{\Delta\lambda}$ (nm)
1	1,45	0,05	0,29	0,01	0,60	0,02
2	1,38	0,05	0,28	0,01	0,62	0,02
3	1,39	0,05	0,28	0,01	0,62	0,02
4	1,48	0,05	0,30	0,01	0,58	0,02

$$\sigma_{\Delta\lambda} = \frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x} \Delta\lambda$$