

INTERFEROMETRO

Laboratorio di Fisica II - CdL in Fisica dell'Università di Milano-Bicocca

March 11, 2025

Abstract

In questo esperimento si studia il fenomeno dell'interferenza creando una o più sorgenti virtuali coerenti tra loro mediante un laser e un sistema di specchi. I fasci luminosi emessi dalle sorgenti si ricombinano dopo aver percorso cammini ottici differenti dando così luogo a una figura di interferenza. Nella seconda parte dell'esperienza si osserva invece la figura di interferenza prodotta - per riflessione - da un reticolo.

1 Prima di arrivare in laboratorio

Si legga la scheda PASCO con la descrizione della strumentazione. Si faccia riferimento a un libro di Ottica/Elettromagnetismo per la discussione di interferenza e diffrazione.

Per tutte le misure con l'interferometro in cui dovete contare le frange che scorrono al variare del cammino ottico **avete la possibilità di utilizzare una fotoresistenza acquisita con un Raspberry Pi**. Trovate le istruzioni nelle slide e nel video caricate su e-learning, dovete guardarle prima di arrivare in laboratorio, dovete scrivervi il programmino per acquisire la fotoresistenza quindi richiede un po' di tempo e skill. Ricordatevi inoltre che è necessario che portiate in laboratorio un laptop con con adattatore per USB-A.

2 Scopo dell'esperienza

Nella prima parte dell'esperienza si verifica la calibrazione del micrometro utilizzando la configurazione di Fabry-Perot e il laser He-Ne (632.8 nm). Successivamente si procede a una serie di misure utilizzando la configurazione di Michelson. Le misure da realizzare sono:

1. verifica della legge che descrive i massimi di interferenza (configurazione Fabry-Perot)
2. calibrazione del micrometro (configurazione Fabry-Perot)
3. verifica della calibrazione in configurazione Michelson e confronto tra la precisione raggiunta nelle due misure (configurazione Michelson)
4. misura dell'indice di rifrazione dell'aria (configurazione Michelson)
5. misura dell'indice di rifrazione del vetro (configurazione Michelson)

6. misura della lunghezza d'onda del laser a stato solido (configurazione Michelson)
7. misura della lunghezza d'onda del laser He-Ne usando un righello come reticolo per riflessione.

3 Strumentazione e procedura sperimentale

Laser Il laser è una sorgente luminosa monocromatica, collimata (il fascio luminoso ha bassissima divergenza ed è assimilabile a una sorgente con fronte d'onda piano) e coerente (per un intervallo di tempo consistente, il tempo di coerenza, la luce emessa è in fase). In questa esperienza si utilizza un laser He-Ne e un laser a stato solido.

ATTENZIONE: sebbene i laser utilizzati siano di bassa intensità, la visione diretta del fascio laser non attenuato può provocare fastidio agli occhi. Si eviti di proiettare il fascio laser a livello occhi.

Compensatore Il compensatore è una lastrina di vetro fatta con lo stesso materiale e lo stesso spessore degli specchi semiriflettenti (semplicemente non presenta la metallizzazione che riflette). Serve per eguagliare i cammini ottici nella configurazione di Michelson, quando i cammini geometrici sono uguali. La condizione in cui i due bracci presentano lo stesso cammino ottico è caratterizzata dall'inversione della direzione di scorrimento delle frange.

Specchio mobile Lo spostamento dello specchio mobile è regolato da un micrometro (1 divisione = $1\ \mu m$). Il micrometro misura con maggiore accuratezza nelle posizioni centrali della scala, quindi è sconsigliato utilizzarlo agli estremi. Come molti dispositivi meccanici all'inizio della rotazione può girare 'a vuoto' cioè senza far muovere lo specchio. Per questo motivo le misure dovrebbero essere realizzate iniziando a contare le frange dopo aver fatto compiere un giro iniziale al micrometro, senza interrompere il movimento quando inizia il conteggio.

Reticolo In laboratorio sono presenti reticoli di differente passo (il passo è normalmente misurato come numero di fenditure per mm). Nel caso del reticolo realizzato su lastrina di vetro si ponga attenzione a posizionare la parte con le fenditure dal lato opposto al collimatore, in modo che il fascio luminoso incida perpendicolarmente alla lastrina di vetro e non ci sia quindi rifrazione.

Errori di misura come in ogni altra esperienza di laboratorio, per ciascuna grandezza misurata ci si domandi se sia possibile identificare il tipo di errore dominante. Quindi si verifichi se la misura è riproducibile e quale sia pertanto la procedura più adatta a minimizzare l'errore sperimentale.

3.1 Misura in configurazione di Fabry-Perot

Allineare il sistema ottico secondo la seguente procedura:

1. posizionare il banco dell'interferometro in modo da proiettare la figura di interferenza sul muro, ad almeno un metro di distanza (in questo modo

il conteggio delle frange risulta più agevole rispetto a quanto consigliato nella scheda PASCO).

2. montare lo specchio mobile e il porta lente nelle posizioni indicate sul banco stesso.
3. posizionare il laser sul suo banco ottico ed allinearli (utilizzando i piedini regolabili di entrambi i banchi ottici) in modo che il fascio luminoso passi per il centro del porta lente e incida perpendicolarmente allo specchio nel suo centro. L'allineamento è stato raggiunto quando il fascio riflesso torna all'interno del laser stesso.
4. montare lo specchio regolabile come indicato sulla base dell'interferometro. Lo specchio deve essere perfettamente parallelo allo specchio mobile. Questa condizione si raggiunge regolando le due viti che controllano l'inclinazione dello specchio. Quando lo specchio non è parallelo allo specchio mobile, sul muro si osservano più punti luminosi. Viceversa se i due specchi sono perfettamente paralleli si osserva un solo punto.
5. montare la lente da $18mm$ sull'apposito supporto tra laser e specchio regolabile. Questa lente fa divergere il fascio. La figura di interferenza diventa visibile sullo schermo nel momento in cui il fascio laser passa per il suo centro.

Nell'interferometro di Fabry-Perot la luce del laser viene riflessa avanti e indietro tra i due specchi (si parla di cavità di Fabry-Perot). Ad ogni riflessione emerge anche un po' di luce. I raggi che emergono dal lato opposto a quello del laser in una determinata direzione angolare θ , sono tra loro sfasati in virtù del numero di riflessioni compiute prima di emergere. Se si considerano un raggio che emerge senza mai essere riflesso e uno che emerge dopo aver subito una doppia riflessione, la differenza di cammino ottico D è pari a $D = (2 \cdot d \cdot \cos \theta)$, dove d è la distanza tra i due specchi e dove si è trascurato l'effetto della rifrazione nel vetro (incidenza quasi perpendicolare, $\theta \simeq 0$). La differenza di fase δ tra i due raggi deve tenere conto non solo del differente cammino ottico ma anche dello sfasamento δ_r indotto dalle riflessioni subite dal secondo raggio. Vale quindi:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} D + \delta_r \quad (1)$$

I due raggi interferiscono in modo costruttivo se si sommano in fase le loro ampiezze, quindi se $\delta = 2N\pi$. La figura di interferenza è perciò descritta dalla relazione:

$$\delta_r \cdot \frac{\lambda}{2\pi} + 2 \cdot d \cdot \cos \theta = N\lambda \quad (2)$$

dove N è un numero intero e λ è la lunghezza d'onda del laser¹. **Si noti che N ha il valore massimo in corrispondenza del cerchio di raggio minore e via via diminuisce.**

Verificare se la relazione 2 descrive in modo soddisfacente la figura di interferenza che si osserva sullo schermo. Misurare il diametro dei cerchi che

¹La λ che compare in questa relazione, essendo relativa a un percorso effettuato in aria, è la lunghezza d'onda in aria del laser He-Ne che è quindi data da $\lambda = \lambda_0/n$ essendo n l'indice di rifrazione dell'aria. Sapendo che $n_{aria} = \dots$ si verifichi che l'accuratezza della misura non cambia se si assume $n = 1$).

descrivono i massimi di interferenza e ricavare per ciascun massimo il valore di $\theta(N)$ (per farlo serve conoscere la distanza tra schermo e sorgente ... quale è il punto che va assunto come sorgente per la figura di interferenza?). Interpolare i dati avendo d come parametro libero.

Spostando lo specchio mobile di una quantità Δd si osservano scorrere le frange di interferenza. Lo spostamento modifica la differenza di cammino ottico tra i due raggi in modo tale che un massimo torna a cadere nella stessa posizione angolare quando Δd è pari a un numero intero di lunghezze d'onda. Quindi Δd è legato al numero di frange che scorrono, ΔN , dalla relazione:

$$2 \cdot \Delta d \cdot \cos \theta = \Delta N \cdot \lambda \quad (3)$$

L'interferometro consente quindi una misura di alta precisione dello spostamento Δd (questa precisione è di gran lunga superiore a quella realizzabile con sistemi 'meccanici' come un nonio).

Scegliere quindi uno spostamento Δd dello specchio, dell'ordine di una ventina di μm , questo è l'intervallo di lettura del nonio che si vuole calibrare. Misurare il numero di frange che scorrono sullo schermo e da ΔN risalire a Δd , ripetere la misura in modo da ridurre l'errore statistico (partendo sempre dalla stessa posizione dello specchio, e quindi dalla stessa lettura del nonio). Quali altri fattori concorrono a determinare la precisione con cui si può misurare Δd ?

3.2 Misura in configurazione di Michelson

Allineare il banco ottico secondo una procedura analoga a quella proposta per la configurazione di Fabry-Perot (cambia solo il modo in cui vanno disposti i componenti sul banco ottico). Non è necessario utilizzare il compensatore. Vale ancora la legge di Eq. 3 che lega lo spostamento dello specchio mobile allo scorrere delle frange di interferenza. Verificare in questa configurazione la misura dell'intervallo Δd precedentemente calibrato. I due metodi di misura consentono di raggiungere la stessa precisione?

3.2.1 Indice di rifrazione dell'aria

Montare il 'rotational pointer' con la cella a vuoto tra lo specchio semi-riflettente e lo specchio mobile, in modo che sia perfettamente perpendicolare al fascio laser. Sapendo che l'indice di rifrazione dell'aria ha un andamento lineare in funzione della pressione, $n = m \cdot P + 1$, è possibile misurare m osservando il numero di frange che scorre quando la pressione dell'aria dentro la cella cambia. Infatti, al cambiare della pressione, varia l'indice di rifrazione e pertanto il cammino ottico percorso dalla luce all'interno della cella. Se d è lo spessore della cella (il valore esatto è riportato nella scheda PASCO) e se la pressione passa da P_i a P_f , il cammino ottico passa da $D_i = d \cdot (m \cdot P_i + 1)$ a $D_f = d \cdot (m \cdot P_f + 1)$ con una variazione netta pari a $D_i - D_f = d \cdot m \cdot (P_i - P_f)$. Il numero di frange ΔN che si osserva scorrere è descritto dalla legge²:

$$2 \cdot d \cdot m \cdot (P_i - P_f) = \Delta N \cdot \lambda \quad (4)$$

da cui è possibile ricavare m .

²Come nel caso precedente è possibile assumere $\lambda = \lambda_0$

3.2.2 Misura dell'indice di rifrazione del vetro

Montare il 'rotational pointer' con la lastra di vetro (il valore esatto dello spessore d è riportato sulla scheda PASCO) tra lo specchio semi-riflettente e lo specchio mobile. Muovendo il 'rotational pointer' cercare il punto in cui le frange invertono la direzione. Questo è il punto che corrisponde al minimo cammino ottico, e quindi quello in cui la lastra di vetro è perpendicolare al fascio del laser. Misurare l'angolo θ_i corrispondente a questa posizione. Contare le frange che scorrono inclinando la lastra di vetro fino a raggiungere un angolo θ_f . Il cammino ottico passa da $D_i = D \cdot n_{aria} + d \cdot n_{vetro}$ a $D_f = D' \cdot n_{aria} + d' \cdot n_{vetro}$, dove D e D' sono le distanze percorse in aria e d e d' sono quelle percorsi in vetro. Quando il vetro è inclinato il raggio luminoso percorre meno cammino in aria e più nel vetro, ma la determinazione del cammino geometrico e quindi di quello ottico deve tenere conto non solo del differente spessore di vetro attraversato ma anche della rifrazione. Il numero di frange che scorre inclinando il vetro sarà dato dalla legge:

$$2 \cdot d \cdot (D_i - D_f) = \Delta N \cdot \lambda \quad (5)$$

Sostituendo l'espressione per la differenza di cammino ottico si può ricavare l'indice di rifrazione del vetro come:

$$n_{vetro} = \frac{(2d - \Delta N \lambda)(1 - \cos\theta)}{2d \cdot (1 - \cos\theta) - \Delta N \lambda} \quad (6)$$

3.2.3 Misura della lunghezza d'onda del laser a stato solido

Sostituire il laser a He-Ne con il puntatore laser verde. Misurare la lunghezza d'onda utilizzando la relazione 3.

3.3 Interferenza con un righello

In questa misura si verifica che i fenomeni di interferenza si possono osservare anche quando gli 'ostacoli' incontrati dalla luce hanno dimensioni ben maggiori della lunghezza d'onda. Si usa infatti un righello metallico per misurare la lunghezza d'onda del laser, assumendo nota la spaziatura tra le tacche del righello (viene anche falsificata un'affermazione abbastanza comune, secondo la quale i fenomeni di interferenza e diffrazione si osservano solo quando la radiazione incontra ostacoli di dimensioni dell'ordine di grandezza della lunghezza d'onda). Posizionare il righello orizzontalmente sul banco. In modo che parte del righello sia appoggiato e parte sia sospeso. Considerare che la distanza tra il righello e lo schermo, e.g. un muro, deve essere abbastanza grande (almeno 1 m).

Posizionare il laser a circa un metro dal righello e inclinarlo in modo tale che parte del fascio laser incida sul righello in maniera radente e venga quindi riflesso, e parte del fascio prosegua dritto. Sullo schermo si osservano diversi punti luminosi tra i quali si possono riconoscere due punti particolarmente luminosi che corrispondono al raggio indeviato P_t e al raggio riflesso specularmente P_0 . Quest'ultimo punto appare essere il massimo di ordine 0 di una figura di interferenza. L'angolo di incidenza del fascio θ_{inc} è ottenuto misurando la distanza tra P_t e P_0 , e la distanza tra lo schermo e la zona di righello illuminata dal laser. In modo analogo si determina l'angolo sotto cui è visto ogni massimo θ_N .

La relazione (ricavatela) che lega il numero d'ordine N del massimo all'angolo sotto cui viene visto il massimo stesso è:

$$d \cdot (\cos \theta_{inc} - \cos \theta_N) = N\lambda \quad (7)$$

dove d è il passo del righello (1 mm). Quale è la larghezza angolare del primo massimo di diffrazione con questo reticolo ? Cosa cambia rispetto al reticolo usato nello spettrometro ?

4 Misura e analisi dei dati. Stesura della relazione

Le misure devono essere fatte scegliendo una strategia che consenta di minimizzare le sorgenti di errore. E' pertanto importante individuare per ogni grandezza, che sia misurata direttamente o derivata, quali sono le principali fonti di errore e quale è il loro peso reciproco.

La procedura adottata, sia per effettuare le misure che per effettuare l'analisi dati, deve essere documentata nella relazione (o nel quaderno di laboratorio).

La relazione NON deve contenere un riassunto di questa scheda nè del manuale PASCO dello spettrometro. Si può fare tranquillamente riferimento a termini e figure presenti nel manuale.

5 BIBLIOGRAFIA

- Manuale PASCO disponibile sul sito.
- 'Fisica 2', Halliday, Resnik, Krane
- 'Light Principles and Measurements', G.S. Monk