

INTERFEROMETRO

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

March 5, 2024

1 Obiettivi

In questa esperienza si studia il fenomeno dell'interferenza mediante un laser, un sistema di specchi e un reticolo.

L'interferenza è un fenomeno per cui onde elettromagnetiche provenienti da più sorgenti si sommano in modo coerente. Osservando il profilo dell'onda risultate su una determinata superficie si possono osservare massimi (somme in fase) e minimi (somme in opposizione di fase). Il fenomeno si osserva solo per sorgenti con la stessa lunghezza d'onda e con una differenza di fase costante nel tempo¹. Per studiare l'interferenza verrà quindi montato un interferometro prima in configurazione di Fabry-Perot, poi in configurazione Michelson.

In dettaglio si prevede di:

1. verificare della legge che descrive i massimi di interferenza (configurazione Fabry-Perot)
2. calibrare il micrometro (configurazione Fabry-Perot)
3. verificare della calibrazione in configurazione Michelson e confrontare la precisione raggiunta nelle due misure (configurazione Michelson)
4. misurare dell'indice di rifrazione dell'aria e del vetro (configurazione Michelson)
5. misurare della lunghezza d'onda del laser a stato solido (configurazione Michelson)
6. misurare della lunghezza d'onda del laser He-Ne usando un righello come reticolo per riflessione.

NB 1: Si legga la scheda PASCO per la descrizione della strumentazione. Per gli esperimenti da svolgere si faccia invece riferimento a questa scheda.

NB 2: Come in ogni altra esperienza di laboratorio, per ciascuna grandezza che verrà misurata ci si domandi quale sia il tipo di errore dominante. Identificare correttamente le fonti di errore è importante tanto quanto minimizzarle.

¹questa è la coerenza

2 Strumentazione a disposizione

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 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) e un laser a stato solido.

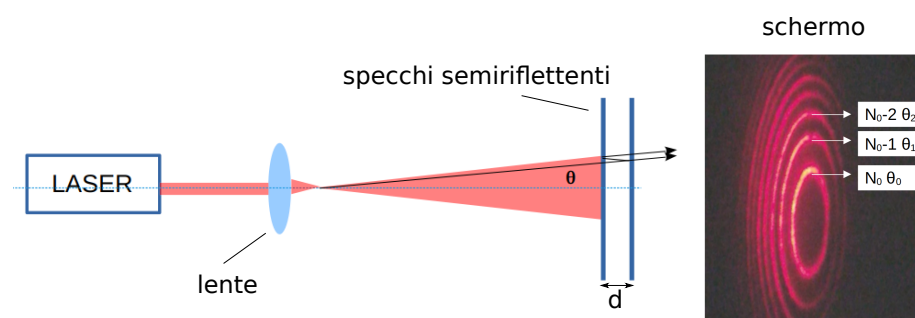
ATTENZIONE: sebbene i laser utilizzati siano di bassa intensità, la visione diretta del fascio laser non attenuato può provocare fastidio agli occhi. Si eviti di proiettare il fascio laser a livello occhi.

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 = $1 \mu\text{m}$). Il micrometro misura con maggiore accuratezza nelle posizioni centrali della scala, quindi è sconsigliato utilizzarlo ad inizio a fine corsa. 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.

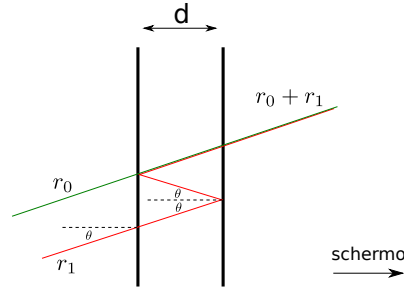
3 Interferometro in configurazione di Fabry-Perot



Nell'interferometro di Fabry-Perot il fascio collimato del laser viene reso leggermente divergente da una lente e fatto incidere su due specchi semiriflettenti. La

luce viene quindi riflessa avanti e indietro tra i due specchi (si parla di cavità di Fabry-Perot). Le riflessioni all'interno della cavità fanno sì che *per ogni raggio che incide* sulla cavità con un angolo θ si abbiano due o più raggi paralleli e sfasati che escono dal secondo specchio e raggiungono lo schermo.

Ogni raggio che esce dalla cavità con angolo θ_0 sarà quindi composto da almeno 2 raggi: il raggio incidente r_0 (non riflesso) e il raggio incidente r_1 , che per via delle riflessioni subite all'interno della cavità avrà una differenza di fase δ rispetto al raggio r_0 . ([1] Come mai consideriamo i raggi dopo la lente divergente circa paralleli?)



Se si considerano quindi 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 laser.

3.1 Preparazione

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.

NB: E' inutile stringere troppo le viti.

3.2 Misure in configurazione Fabry-Perot

- Verificare se la relazione 2 descrive in modo soddisfacente la figura di interferenza che si osserva sullo schermo. Misurare il diametro dei cerchi che descrivono i massimi di interferenza e ricavare per ciascun massimo il valore di $\theta(N)$ ([1] 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).

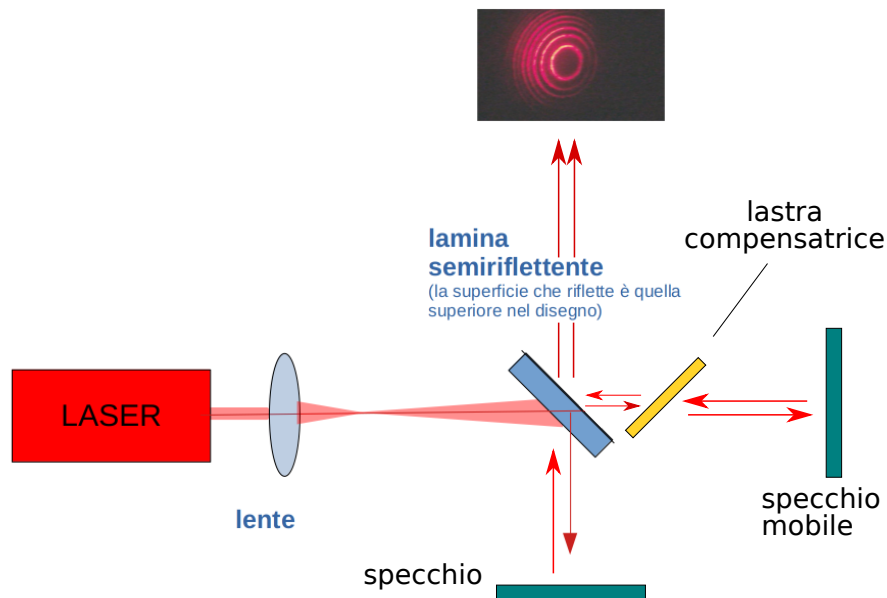
Scegliere quindi uno spostamento Δd dello specchio, dell'ordine di una ventina di μm , questo è l'intervallo di lettura del nonio che si vuole calibrare. Misurare il numero di frange che scorrono sullo schermo e da ΔN risalire a Δd , ripetere la misura in modo da ridurre l'errore statistico (partendo sempre dalla stessa posizione dello specchio, e quindi dalla stessa lettura del nonio). ([1] Quali altri fattori concorrono a determinare la precisione con cui si può misurare Δd ?)

NB: La 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 $n = 1$). ([1] Si

noti che N ha il valore massimo in corrispondenza del cerchio di raggio minore e via via diminuisce.)

4 Interferometro in configurazione di Michelson

Il fascio collimato del laser, reso leggermente divergente da una lente, viene adesso fatto incidere su una lamina semiriflettente disposta a 45 gradi.



Il fascio è così diviso in due parti che seguono percorsi differenti, tra loro perpendicolari: i due bracci dell'interferometro. Alla fine di ogni braccio uno specchio riflette indietro i due raggi che tornano alla lamina semiriflettente essendo indirizzati quindi verso uno schermo. Il cammino ottico (spazio \times indice di rifrazione) effettuato dai due fasci differisce per due effetti: a) la differente lunghezza dei bracci dello spettrometro b) la lunghezza differente del percorso effettuato all'interno della lamina semiriflettente (che ha indice di rifrazione differente da 1). Questa differenza può essere compensata inserendo sul percorso del fascio che attraversa una sola volta la lamina semiriflettente una lastra di vetro "compensatrice".

Il risultato è che i due fasci sviluppano una differenza di fase proporzionale alla differenza di cammino ottico. Quando vengono ricombinati danno luogo ad una figura di interferenza.

4.1 Preparazione e misure in configurazione Michelson

4.1.1 Confronto fra le due diverse configurazioni

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?)

4.1.2 Misura dell'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 .

4.1.3 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:

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

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

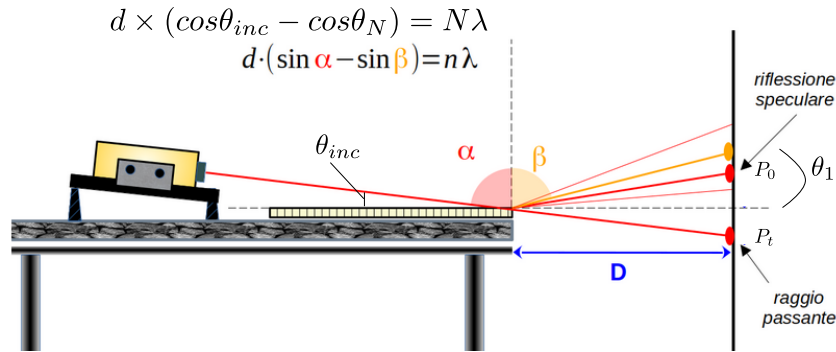
4.1.4 Misura della lunghezza d'onda del laser a stato solido

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

5 Interferenza con un reticolo

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. Verrà quindi 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.

5.1 Preparazione e misura della lunghezza d'onda del laser He-Ne



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?)

6 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 dell'interferometro. Si può fare tranquillamente riferimento a termini e figure presenti nel manuale.

Sul sito e-learning è fornito un template per le relazioni.

7 BIBLIOGRAFIA

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