

Esperienza Interferenza

Gruppo 19

Fabbri Marco, Miliani Tommaso, Mongatti Giulio, Tinacci Lorenzo

10 Dicembre 2025

1 Scopo dell'esperienza ed ipotesi

Lo scopo dell'esperienza è l'utilizzo di un interferometro di Michelson per effettuare:

- Misura della lunghezza d'onda ignota di un laser verde;
- Misura della lunghezza d'onda centrale λ_0 e della larghezza $\Delta\lambda_0$ dello spettro di emissione di un LED bianco;
- Misura della banda spettrale di trasmissione di un filtro verde Thorlabs centrato attorno λ_0 con larghezza $\Delta\lambda$.

E dunque verificare che l'intensità luminosa totale sul rilevatore, proveniente da due specchi a distanza diversa dal cubo polarizzatore, vari secondo le seguenti relazioni fondamentali al variare della distanza dei cammini ottici ΔL :

per onda monocromatica:

$$I(\Delta L) = I_0 \sin^2(k\Delta L) \quad (1)$$

e per radiazione con spettro gaussiano centrato in λ_0 e con larghezza $\Delta\lambda$ non monocromatica:

$$I(\Delta L) = \frac{I_0}{2} \left(1 - \exp \left(-\frac{(2\pi\Delta L)^2}{(\Delta\lambda)^2} \right) \cos \left(\frac{4\pi\Delta L}{\lambda_0} \right) \right) \quad (2)$$

2 Schema generale di misura

Tutte le misure sono effettuate mediante la misura del segnale di intensità in uscita dell'interferometro al variare della differenza di lunghezza dei cammini ottici, indicata con ΔL , dei due rami e mediante il confronto con il segnale ottenuto utilizzando un laser metrologico ad He–Ne ad elevata lunghezza di coerenza.

Laser verde

Si può ottenere la lunghezza d'onda del laser verde secondo la seguente relazione

$$\lambda_V = \lambda_R \cdot F \quad (3)$$

E, con il metodo delle derivate logaritmiche, il suo errore:

$$\Delta\lambda_V = \left(\left| \frac{\Delta F}{F} \right| \right) \lambda_V \quad (4)$$

Dove F è il fattore correttivo che si stima nel programma di analisi dati ottenuto sovrapponendo i profili dei massimi dei laser verde e rosso, in funzione della tensione delle singole misure effettuate in laboratorio. Facendone media e scarto massimo si ottiene il valore di F ed il suo relativo errore. L'errore sulla lunghezza d'onda del laser $\Delta\lambda_R$ è trascurabile.

Led bianco e led bianco con filtro

Si ricava la lunghezza d'onda attorno alla quale è centrata la distribuzione di luce gaussiana del led secondo la seguente relazione:

$$\lambda_0 = F' \lambda_R. \quad (5)$$

Dove F' (e il suo analogo F'') sono i fattori correttivi, rispettivamente, per il led bianco ed il led bianco con filtro verde. Per ricavare F' e F'' sono state eseguite media e scarto massimo di valori ottenuti dai grafici dei massimi acquisiti in laboratorio (6 per il LED bianco e 2 per il LED con il filtro). Alternativamente, nel caso si sia eseguita una sola presa dati per il LED bianco con e senza filtro verde, è possibile stimare un intervallo di F' e F'' nel quale i profili dei massimi siano paralleli all'ordine dei massimi del laser a He–Ne, in modo da determinare media e scarto massimo a partire dagli estremi di questo intervallo. Dunque, l'errore associato alla lunghezza d'onda dipende interamente dall'errore sul parametro F in quanto l'errore sulla lunghezza d'onda del laser He–Ne è conosciuto con infinita precisione.

$$\Delta\lambda_0 = \left| \frac{1}{F'} \right| \Delta F' \lambda_0 \quad (6)$$

Una volta ricavato il fattore F dal confronto si può determinare la lunghezza di coerenza secondo:

$$l_c = n \frac{\lambda_0}{4} \quad (7)$$

Per stimare il numero di massimi con relativo errore abbiamo, per ogni grafico dell'intensità, contato il numero di massimi n presenti sopra la linea di mezza altezza e fatto la media, mentre per l'errore abbiamo scelto il più grande tra: scarto massimo, il numero 1, il numero di picchi che non si riesce a determinare con esattezza. Per l'errore di l_c si utilizza dunque la propagazione degli errori con le derivate logaritmiche:

$$\Delta l_c = \left(\left| \frac{1}{\lambda_0} \right| \Delta\lambda_0 + \left| \frac{1}{n} \right| \Delta n \right) l_c \quad (8)$$

Si può dunque stimare la larghezza dello spettro di emissione $\Delta\lambda$, ed il suo relativo errore, secondo la seguente relazione:

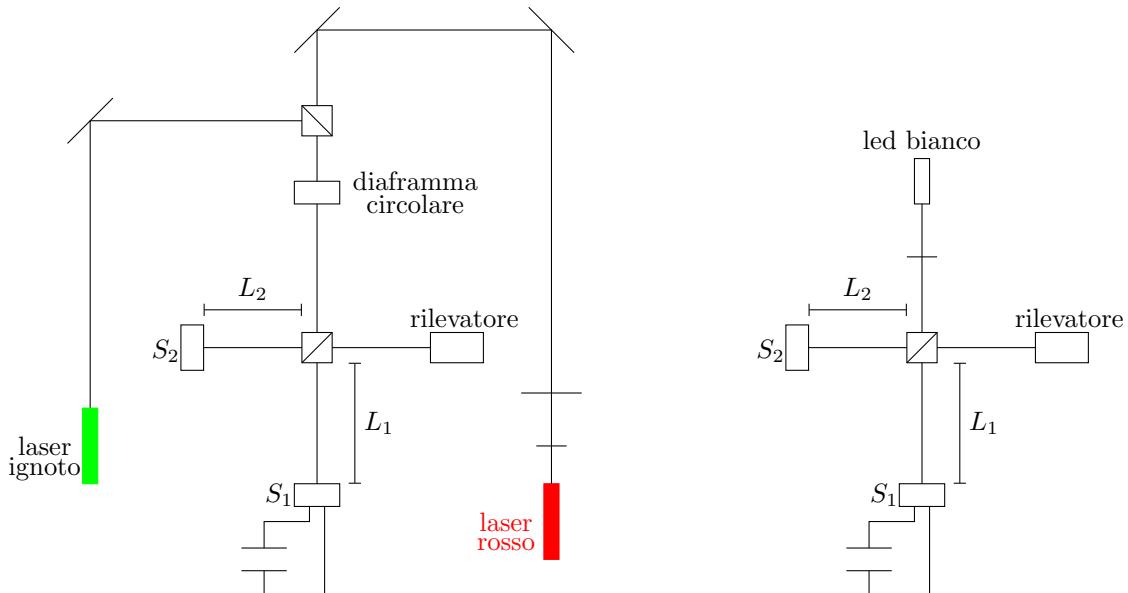
$$l_c = \frac{\lambda_0^2}{2\pi\Delta\lambda} \implies \Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2\pi l_c} \quad (9)$$

Ed il suo errore associato diventa:

$$\delta\Delta\lambda = \left(\left| \frac{2}{\lambda_0} \right| \Delta\lambda_0 + \left| \frac{1}{l_c} \right| \Delta l_c \right) \Delta\lambda \quad (10)$$

3 Apparato sperimentale

Di seguito si riportano le due configurazioni per l'apparato sperimentale per le due parti dell'esperienza:



L'apparato sperimentale consiste in un interferometro di Michelson assemblato su di un tavolo ottico con i seguenti componenti ottici:

- S_1 : specchio montato saldamente ad una ceramica piezoelettrica collegata ad un generatore di rampa lineare in tensione.

- S_2 : lo specchio fisso.
- Laser ad He–Ne di lunghezza d’onda nota: 632.816 nm.
- Rilevatore al silicio per la misura della intensità I in uscita dell’interferometro.
- Sistema di lenti che funge da telescopio per il laser rosso, ovvero da amplificatore della dimensione del fascio laser.
- Diaframma mobile volto a bloccare parte del fascio del laser rosso.
- Oscilloscopio digitale con relativo software d’acquisizione dati.
- Utilizzo di un programma di analisi e manipolazione dei dati scritto in Mathematica.

Inoltre, L_1 e L_2 sono le due distanze, rispettivamente, dalle specchio mobile sulla ceramica piezoelettrica e dalle specchio fisso dal cubo polarizzatore. L’interferometro è racchiuso tra pareti nere in cartone e viene ulteriormente coperto durante ogni misurazione. Per digitalizzare i segnali della tensione del generatore (V) e dell’intensità del laser (I), si utilizza l’oscilloscopio digitale facilitandone, inoltre, la raccolta e la conseguente analisi dei dati. Per la seconda parte dell’esperienza, si utilizzano inoltre:

- Un LED bianco;
- Un filtro Thorlabs da avvitare sul rilevatore, centrato attorno a $\lambda_0 = 532 \pm 2$ nm e con larghezza $\Delta\lambda = 5 \pm 1$ nm.

4 Presa dati

4.1 Laser di lunghezze d’onda diverse

Prima di effettuare la prima misura, bloccato il laser verde, si chiude il diaframma fino a minimizzarne l’apertura, per poi regolare l’altezza del rilevatore in modo che esso sia centrato dal fascio rosso. Successivamente si riapre il diaframma e si pone un foglio a coprire il rilevatore al fine di effettuare una seconda calibrazione: le manopole dello specchio vengono finemente regolate in maniera da eliminare la pulsazione di colore rosso visibile sul foglio, la quale deriva da direzioni non parallele dei fasci copropaganti. Si passa in seguito ad allineare il laser di lunghezza d’onda ignota usufruendo di uno specchio e di un cubo polarizzatore. Al fine di ottimizzare tale procedura, si blocca inizialmente il laser rosso e si regola lo specchio per centrare il diaframma con apertura minima. Si perfeziona, infine, l’allineamento del laser verde con quello rosso toccando finemente le manopole del cubo. Per effettuare le misurazioni, si copre l’interferometro con un coperchio nero in cartone. Dalla registrazione dei profili di intensità I , al variare della tensione V di ciascun laser, possiamo ricavare una misura del rapporto F tra le lunghezze d’onda delle due radiazioni. Si procede dunque alla misurazione: uno dei due fasci viene bloccato e si azionano il generatore e l’oscilloscopio digitale, che, in particolare, legge dai rilevatore valori d’intensità tra intervalli brevissimi, per poi salvarli. Il programma fornito dal costruttore dell’oscilloscopio permette di visualizzare la variazione d’intensità nel tempo entro i limiti massimi del programma, in prossimità di cui si decide di interrompere la registrazione dei dati. Regolando il guadagno di ingresso, si modifica, inoltre, il segnale in input nel programma per meglio visualizzare l’andamento dell’intensità nel tempo. Fermata la raccolta dati, tramite un programma di Mathematica, si crea un grafico dei massimi dell’intensità del fascio luminoso al variare del voltaggio. Il programma permette di visualizzare simultaneamente il profilo di intensità di entrambi i laser, e permette poi di roto-traslare il profilo di intensità del laser verde in modo che lo sperimentatore possa arbitrariamente sovrapporlo con quello del laser rosso, tale operazione di sovrapposizione permette di misurare il fattore correttivo F . Si ripetono 4 misure in totale, ove, a seguito di ognuna di esse, ciascun sperimentatore disallinea il laser verde ruotando le manopole dello specchio e del cubo, in maniera tale che il successivo sperimentatore possa portare l’apparato sperimentale nella configurazione che lui ritiene ottimale prima di procedere alla misura successiva. Da alcune prove precedenti la prima misura è oltretutto emersa l’importanza nel non creare eccessivo rumore durante tutta la procedura: smuovendo il banco ottico o colpendo oggetti nei suoi pressi, si vedeva chiaramente dal grafico la presenza di perturbazioni nell’andamento dell’intensità.

4.2 LED bianco e filtro verde

Conclusa la prima parte dell’esperienza, i laser vengono bloccati e viene posizionata un LED di fronte al cubo polarizzatore come riportato in figura. Per procedere alla seconda misura, si è cercato di far convergere il più possibile la luce in uscita dal LED sul rilevatore, per cui si è, di fronte, posizionata una lente convergente. Trovare l’asset migliore di posizionamento delle componenti ottiche è stata, in particolare, una procedura

che ha richiesto numerosi tentativi. Per orientarsi al meglio nel trovare la posizione migliore, si è posto un foglio davanti il rivelatore e si sono fatte varie prove spostando le due componenti ottiche ed azionando il generatore finché non si intravedeva la banda spettrale sul foglio, segno di interferenza sul rilevatore.

5 Dati

5.1 Laser verde

Dopo aver preso quattro set di dati per le oscillazioni del laser verde in funzione della tensione applicata alla ceramica piezoelettrica, si è ottenuto le seguenti misure per F :

	F	F_1	F_2	F_3	F_4
Misure	0.870	0.817	0.828	0.849	

Da cui si un valore per F di 0.84 ± 0.03 . Da questo valore, poiché il costruttore ci fornisce la lunghezza d'onda del laser rosso di $\lambda_R = 632.816$ nm, si ottiene il valore per la lunghezza d'onda del laser verde: $\lambda_V = 530 \pm 20$ nm secondo le relazioni specificate nello schema generale di misura.

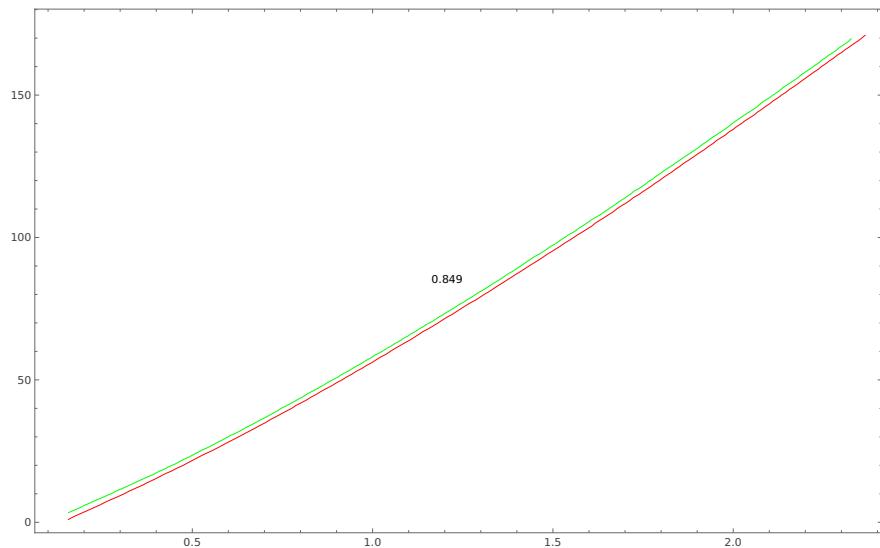
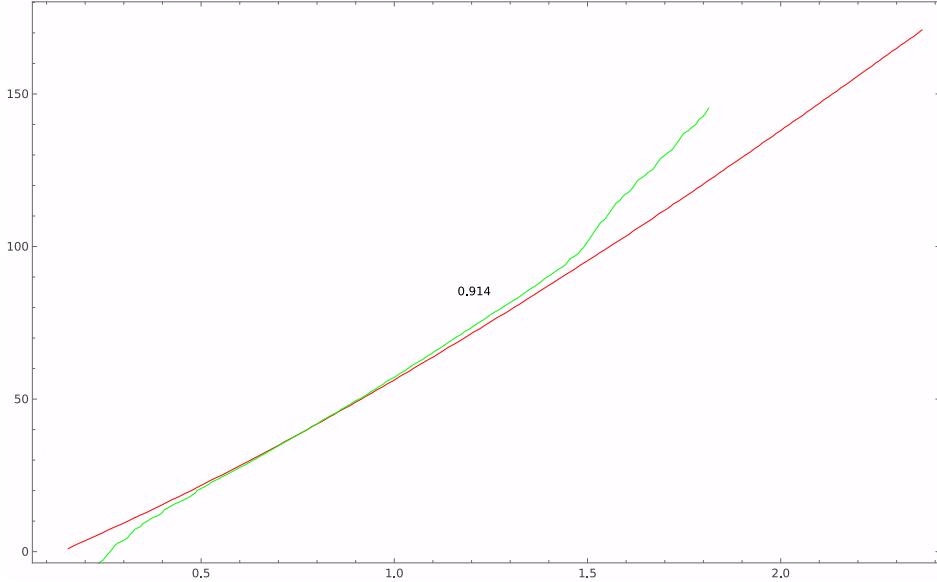


Figura 1: Esempio di allineamento delle curve dei massimi per una delle misure del laser verde

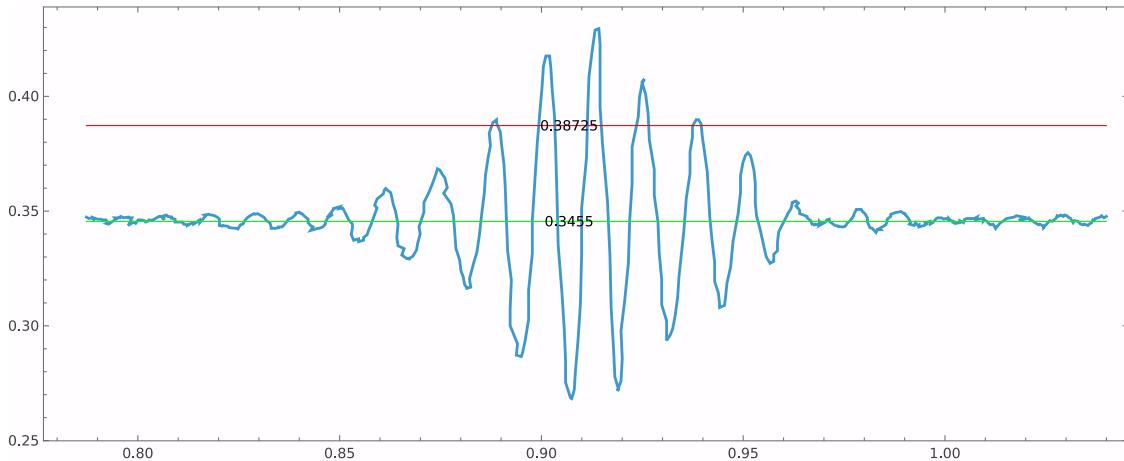
5.2 Interferenza luce bianca e luce bianca con filtro

Led bianco

Nel caso della luce LED, seguendo una procedura analoga, possiamo misurare la lunghezza d'onda centrale λ_0 del suo spettro di emissione usando la medesima relazione utilizzata per il laser verde. Con la relazione (9) è possibile stimare la lunghezza di coerenza attesa, la quale risulta essere di l_c atteso $\pm \Delta l_c$ atteso $= 9.0 \pm 1.9 \mu\text{m}$. Anche qui F' è il fattore correttivo utilizzato per comparare il led bianco con il laser rosso, come nel seguente grafico:



Si può poi misurare, grazie al programma di analisi dati scritto in Mathematica, la lunghezza di coerenza l_c . Una volta ottenuto il profilo di intensità del LED bianco in funzione della tensione, si conta il numero n di massimi che intercorrono tra il punto di massima intensità della funzione e quello che ha un picco a metà di essa rispetto al centro della curva nel seguente grafico:



Nella seguente tabella si riportano le misure ottenute per il led bianco

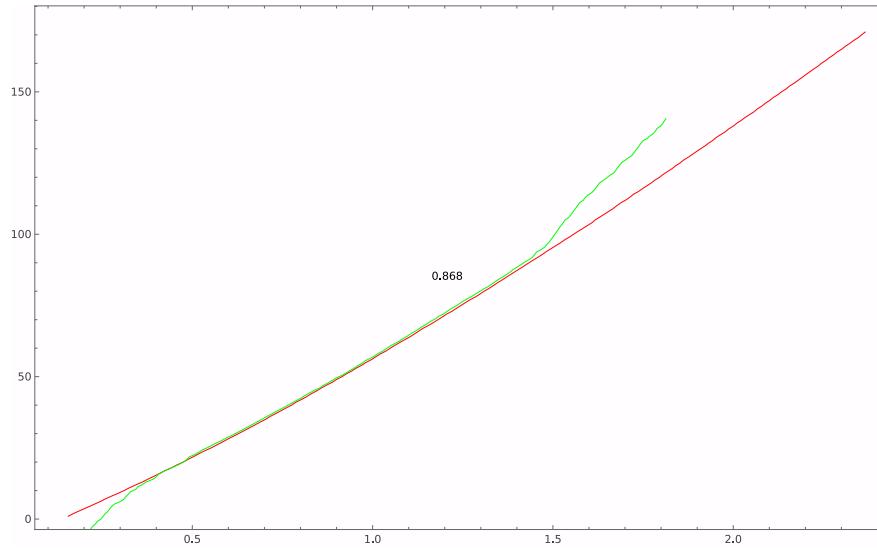
Intervallo tensione (V)	F'	Intensità a metà altezza (I)	N	ΔN
0.55 - 0.72	0.846	1.3565	4.0	1.0
0.80 - 0.95	0.746	1.2155	5.0	1.0
0.78 - 0.93	0.918	1.009	5.0	1.0
0.76 - 0.88	0.968	1.1345	4.0	1.0
0.90 - 1.01	0.818	0.3835	5.0	1.0
0.85 - 0.96	0.914	0.38725	5.0	1.0

Da cui si sono ricavate le seguenti stime, e gli errori, per ciascuna grandezza:

- $F' \pm \Delta F' = 0.87 \pm 0.12$;
- $n \pm \Delta n = 5 \pm 1$;
- $\lambda_0 \pm \Delta \lambda_0 = (550 \pm 80) \text{ nm}$;
- $l_c \pm \Delta l_c = (0.7 \pm 0.3) \mu\text{m}$;
- $\Delta \lambda \pm \delta \Delta \lambda = (70 \pm 40) \text{ nm}$.

Led bianco con filtro verde

Secondo gli stessi procedimenti, e l'utilizzo delle medesime relazioni, si è determinato F'' per la luce del led bianco che passa attraverso un filtro verde. Dal seguente grafico di confronto



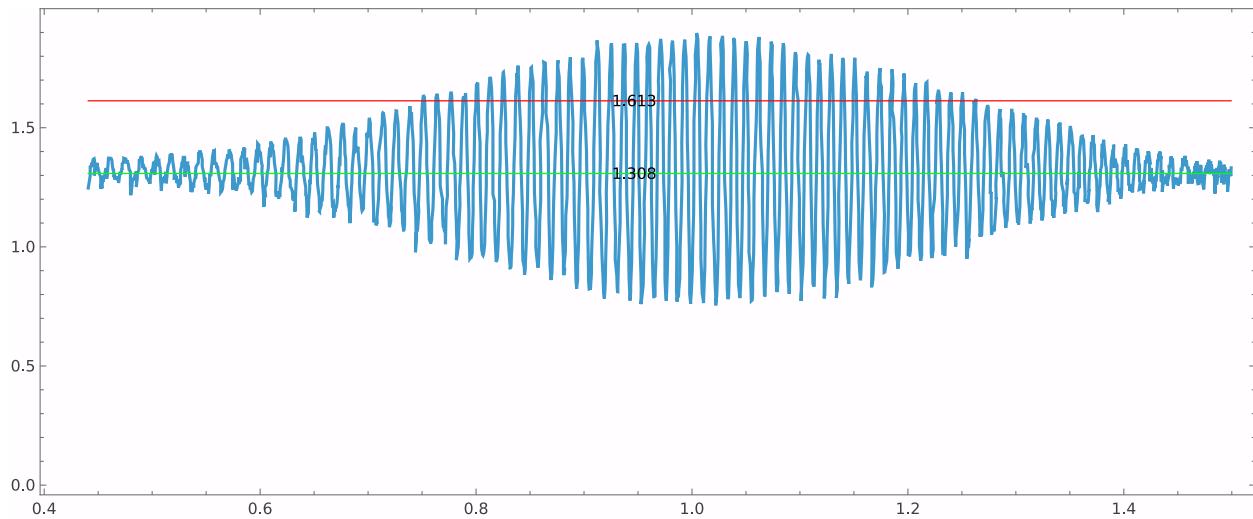
si sono ricavate le seguenti misure:

Intervallo tensione (V)	F'	Intensità a metà altezza (I)	N	ΔN
0.55 - 1.40	0.860	0.5126	45	2
0.54 - 1.40	0.868	1.613	45	2

E dunque si sono ricavate le stime e gli errori associati per ciascuna grandezza:

- $n \pm \Delta n = 45 \pm 2$;
- $F'' \pm \Delta F'' = 0.864 \pm 0.004$;
- $\lambda_0 \pm \Delta \lambda_0 = (547 \pm 3) \text{ nm}$;
- $l_c \pm \Delta l_c = (6.2 \pm 0.3) \mu\text{m}$;
- $\Delta \lambda \pm \delta \Delta \lambda = (7.7 \pm 0.5) \text{ nm}$.

Dove la lunghezza di coerenza è stata ricavata dal seguente grafico:



6 Commento qualitativo

Per quanto riguarda la prima parte dell'esperienza, la misura ottenuta per la stima della lunghezza d'onda ignota risulta consistente con la lunghezza d'onda associata al colore verde del laser (circa 532 nm). Nella seconda parte dell'esperienza, dopo aver stimato F , λ_0 , $\Delta\lambda$ e l_c del led bianco, si può notare come gli errori relativi alle misure ottenuti siano alquanto importanti. Si suppone che ciò sia dovuto ad un notevole errore relativo sulla misura dei massimi in funzione della tensione e a dei problemi che abbiamo riscontrato nell'allineamento del LED rispetto al fascio del laser He–Ne: nonostante le ripetute prove, lo spazio ridotto su cui si potevano posizionare il LED e la lente convergente non ci ha portato ad ottenere una pulsazione della banda spettrale centrata esattamente all'altezza del foro del rilevatore, la quale è verso il basso. Tuttavia, la stima di λ_0 rientra entro l'intervallo teoricamente atteso tra circa 550 e 600 nm. Nella parte finale dell'esperienza abbiamo ottenuto valori con errori minori, tuttavia n è il valore di λ_0 , né il valore di l_c e n è il valore di $\Delta\lambda$ risultano compatibili con i valori forniti dal costruttore. Sospettiamo che questo sia dovuto, nuovamente, alle difficoltà incontrate nell'allineamento del fascio collimato del led con il laser He–Ne. Nel nostro caso λ_0 risulta più alta del valore atteso invece, a causa di un non elevato numero di massimi, l_c è inferiore al valore fornito dal costruttore, infine λ_0 risulta essere maggiore di λ_0 atteso e $\Delta\lambda$ risulta minore del valore atteso.