

Laboratorio di ottica - Canale M-Z - Interferometro di Fabry-Perot

Lorenzo Perot 1908873 - Francesco Saverio Rotondi 1897677 - Mattia Ragaglia 1920104

23 Maggio 2022

1 Scopo dell'esperienza

L'esperienza svolta aveva lo scopo di analizzare l'interferometro di Fabry-Perot, con particolare attenzione al ruolo della Finesse di riflettività $\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R_{eq}}}{1-R_{eq}}$ dove $R_{eq} = \sqrt{R_1 R_2}$ mentre R_1 ed R_2 rappresentano la riflettività dei due specchi.

2 Apparato e misure preliminari

L'apparato sperimentale consiste in:

- Sorgente laser ad He-Ne ($\lambda_{true} \sim 633 \text{ nm}$)
- Specchi mobili e regolabili tramite viti di brandeggio, per cambiare la direzione del fascio, e un'iride per centrare il fascio del laser.
- Specchi dielettrici di riflettività $R=0.8, 0.85, 0.92, 0.95, 0.98$, e supporto per un Fabry-Perot dotato di vite micrometrica (sensibilità $10\mu\text{m}$)
- Cristallo piezoelettrico collegato ad un generatore di segnale, su cui è montato uno degli specchi semiriflettenti
- Fotodiodo ($V_{sat} \approx 12V$), regolabile attraverso una vite micrometrica (sensibilità $10\mu\text{m}$), posto su una slitta (range $\approx 15\text{mm}$)
- Filtro attenuatore posto all'uscita del laser
- Lente divergente
- Oscilloscopio
- Carta millimetrata, metro a nastro (sensibilità 1mm)

Il fascio del laser in uscita viene subito attenuato dal filtro in modo da non saturare il fotodiodo ($V_{sat} \approx 12V$). Il fascio attenuato quindi viene curvato utilizzando i due specchi appositi e indirizzato verso il fotodiodo. Sul cammino ottico del laser vengono quindi posti i 2 specchi semiriflettenti a formare l'interferometro Fabry-Perot. Uno dei due specchi semiriflettenti è montato su un cristallo piezoelettrico. La figura di interferenza causata dal Fabry-Perot si viene a formare quindi sul piano del fotodiodo e può essere quindi studiata utilizzando tale strumento, visualizzando sull'oscilloscopio il segnale ricevuto. Per prima cosa è stato verificato che tutti gli elementi dell'apparato si trovassero alla stessa altezza del raggio luminoso uscente dal laser ($h \approx 14.1\text{cm}$) e successivamente è stato centrato il fascio sul fotodiodo. Per questa esperienza è risultata fondamentale l'accuratezza dell'allineamento di tutti i componenti dell'apparato; si è infatti proceduto accertandosi che tale condizione fosse verificata ad ogni step, dal posizionamento dell'iride all'innesto dei 2 specchi semiriflettenti.

3 Misura della funzione di trasmissione di FP e studio della funzione di Airy

3.1 Analisi teorica e formule utilizzate

Al passaggio del laser nel Fabry-Perot si viene a creare un pattern dovuto all'interferenza dei fasci multipli. L'intensità trasmessa è descritta dalla formula:

$$I_T = I_0 \frac{T}{(1-R)^2} \frac{1}{1 + F \sin^2(\frac{\Delta}{2})}$$

Dove F è il coefficiente di Finesse e $\Delta = \delta + \delta_r$ è la fase totale tra due fasci consecutivi nell'interferenza, con una componente data dalla differenza di cammino ottico percorsa dai due fasci che interferiscono (δ) e una data dalla natura complessa del coefficiente di riflessione (δ_r). Il coefficiente di Finesse inoltre può essere definito come $F = \frac{4R}{(1-R)^2} = 4\frac{\mathcal{F}^2}{\pi^2}$, con \mathcal{F} detta *Reflecting Finesse*. Quindi si può ridefinire l'intensità trasmessa come:

$$I_T = a_0 \cdot \frac{1}{1 + 4(\frac{\mathcal{F}}{\pi})^2 \sin^2(\frac{\Delta}{2})} \quad (1)$$

dove il coefficiente a_0 (che indica l'intensità del massimo del pattern di interferenza) moltiplica la cosiddetta *Airy Function*. Si può facilmente dimostrare che $\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n d \cos(\theta) \approx \frac{4\pi}{\lambda_0} d$ (con $n \approx 1$ e $\cos(\theta) \approx 1$), dove d indica la distanza tra i due specchi del Fabry-Perot. Risulta evidente quindi che variando la distanza dei due specchi su scale molto piccole è possibile scorrere lungo la funzione di Airy e acquisire i valori di tensione grazie al fotodiodo, visualizzando il segnale sull'oscilloscopio. Per variare la distanza è stato utilizzato il cristallo piezoelettrico sul quale veniva applicata una tensione a dente di sega di ampiezza $20V$, che comportava oscillazioni dell'ordine del μm . La fase Δ è linearmente dipendente dalla tensione applicata al piezoelettrico e quindi si può sostituire $\Delta = b(V_{piezo} + V_0)$ nell'Equazione 1, dove V_0 è un offset che simboleggia lo sfasamento iniziale. Il coefficiente b può essere valutato come $b = \frac{2\pi}{V_{n+1} - V_n}$ dove per V_{n+1} e V_n sarebbero i valori V_{piezo} in corrispondenza di un massimo della funzione di Airy e del successivo.

3.2 Raccolta dei dati sperimentali

Per questa parte dell'esperienza sono stati utilizzati due specchi semiriflettenti con riflettività relativamente bassa ($R_1 = 0.80$ e $R_2 = 0.80$). La funzione di Airy (in funzione del tempo) è stata visualizzata sull'oscilloscopio e, sfruttando la maggiore sensibilità dello strumento rispetto all'occhio umano, è stato ottimizzato l'allineamento dei componenti in modo da far risultare i picchi della funzione più stretti e più alti possibili. I dati sono stati quindi scaricati direttamente dall'oscilloscopio¹. Inoltre

¹<https://drive.google.com/drive/folders/1Hv7doMmff0UKAxfSAEFFgci3lWAZD3jf?usp=sharing>

attraverso i cursori dell'oscilloscopio è stato misurato il valore in tensione del massimo della funzione di Airy, ossia l'altezza di uno dei picchi di intensità della figura di interferenza, ottenendo il valore $a_{exp} = (4.6 \pm 0.2)V$.

3.3 Analisi dati

Per prima cosa sono stati isolati i dati relativi ad una sola salita del potenziale V_{piezo} in modo da poter affermare che il tempo abbia anch'esso una proporzionalità diretta con V_{piezo} , e quindi con la fase Δ . Per quanto riguarda l'incertezza sui dati raccolti dall'oscilloscopio, questa è stata calcolata come il 3% della misura sommato in quadratura con il 10% del fondoscala. Quindi è stato effettuato un fit sui dati e sulla funzione:

$$I_T = a_0 \cdot \frac{1}{1 + 4\left(\frac{\mathcal{F}}{\pi}\right)^2 \sin^2\left((V + V_0) \frac{\pi}{V_{n+1} - V_n}\right)} \quad (2)$$

Nella funzione si è utilizzato il valore di a_{exp} e si è invece fittato sui parametri \mathcal{F} e V_0 , ottenendo i valori:

$$\begin{cases} \mathcal{F}^{(1)} = 11.1 \pm 0.8 \\ V_0^{(1)} = (1.37 \pm 0.03)V \end{cases} \quad (3)$$

I dati sperimentali e il fit sono riportati in **Figura 1**:

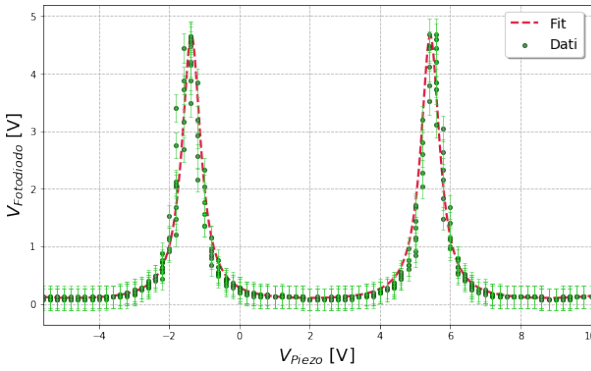


Figura 1: Fit dei dati sperimentali sui parametri V_0 e \mathcal{F}

Si può notare come il fit approssimi in maniera coerente l'andamento dei dati sperimentali. Ciononostante se si effettua un test del χ^2 si ottiene uno score di $\chi^2 = 585.7$ con $df = \nu - 2 = 498$, risultato che corrisponde ad un $p - value = 0.004$ che non rientra nel 99% di confidence level. In questo caso occorre però ricordare che il parametro a_{exp} è il risultato di una misurazione e perciò possiede una determinata incertezza e potrebbe non rappresentare in modo ottimale i dati sperimentali. Quindi si è provato ad eseguire nuovamente un fit sull'**Equazione 2** stavolta fittando sui parametri a_0 , \mathcal{F} e V_0 e il risultato è riportato in **Figura 2**.

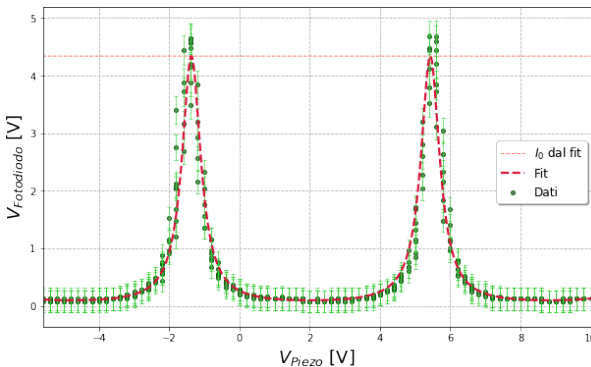


Figura 2: Fit dei dati sperimentali sui parametri a_0 , V_0 e \mathcal{F}

I risultati ottenuti sono:

$$\begin{cases} \mathcal{F}^{(2)} = 10.5 \pm 0.9 \\ V_0^{(2)} = (1.37 \pm 0.04)V \\ a_0^{(2)} = (4.3 \pm 0.1)V \end{cases} \quad (4)$$

Se si effettua quindi un test del χ^2 con i nuovi parametri si ottiene uno score di $\chi^2 = 554.25$ con $df = \nu - 3 = 497$ che corrisponde ad un $p - value = 0.038$; ciò indica come il modello descriva i dati sperimentali entro il 99% di confidence level. Si possono poi confrontare i parametri ottenuti dai 2 fit effettuando dei test di Gauss:

$$Z = \frac{|\mathcal{F}^{(1)} - \mathcal{F}^{(2)}|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} = 0.50$$

Si può notare come i due valori della *finesse* siano compatibili entro il 68% di confidence level, nonostante nel secondo caso il valore diminuisca in maniera sensibile. Lo stesso vale per le due misure della fase iniziale V_0 che risultano ampiamente compatibili entro le incertezze sperimentali. Anche il confronto tra a_{exp} e $a_0^{(2)}$ afferma la compatibilità delle 2 misure entro il 95% di confidence level, con un valore $Z=1.34$. A questo punto è possibile confrontare il valore di *reflecting finesse* ottenuto sperimentalmente con quello teorico ricavabile tramite la formula:

$$\mathcal{F}_{teo} = \pi \frac{\sqrt{R}}{(1 - R)} = 14.05 \quad (5)$$

Dove per la stima della riflettività si è utilizzata la formula $R = \sqrt{R_1 R_2} = 0.80$, dove R_1 e R_2 sono le riflettività dei 2 specchi semiriflettenti. Si può notare come tale valore sia più alto di entrambi i valori di \mathcal{F} ricavati sperimentalmente, e se si effettua un test di Gauss risulta distante $Z_1 = 3.69$ da $\mathcal{F}^{(1)}$ e $Z_2 = 3.94$ da $\mathcal{F}^{(2)}$, quindi non compatibile con nessuno dei due valori sperimentali entro il 99% di confidence level. Tale risultato può essere giustificato considerando che non si sta tenendo conto dell'incertezza sui parametri forniti dal costruttore per le riflettività dei 2 specchi semiriflettenti, e quindi dell'incertezza su \mathcal{F}_{teo} . Infatti, dopo un certo tempo dalla costruzione, i valori della riflettività degli specchi non sono più accuratamente descritti dalla stima del costruttore ma sono, con tutta probabilità, più piccoli in modulo. Ciò può essere dovuto a piccole lesioni o graffi sulla superficie, o anche da aloni che ne limitano la capacità di riflettere disperdendo una parte dell'intensità del fascio. Inserendo il valore \mathcal{F}_{teo} nell'**Equazione 2** (insieme con i due parametri fittati $a_0^{(2)}$ e $V_0^{(2)}$) si può confrontare la curva teorica con i dati sperimentali (**Figura 3**).

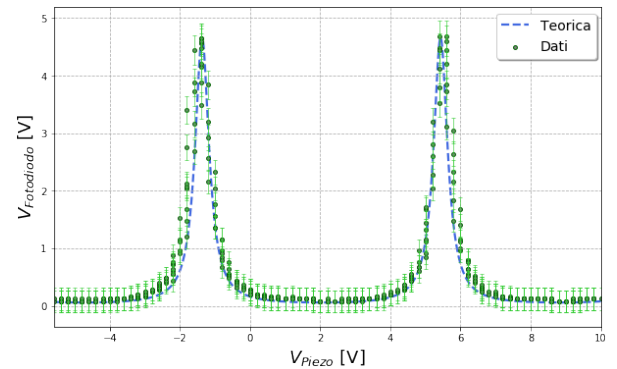


Figura 3: Fit dei dati sperimentali sui parametri a_0 , V_0 e \mathcal{F}

Se si effettua un test del χ^2 tra la curva teorica e i dati sperimentali si ottiene uno score $\chi^2 = 635$ con $df = \nu - 2 = 498$; ciò corrisponde ad un $p - value = 0.000029$ che ovviamente mostra come il modello non sia adeguato per descrivere i

dati sperimentali. Tale esito era inevitabile vista la distanza significativa tra il valore di \mathcal{F}_{teo} e i parametri di best fit. Dal valore sperimentale di \mathcal{F} è possibile infine ricavare una stima più veritiera della riflettività media ($R = \sqrt{R_1 R_2}$) degli specchi semiriflettenti che ci si aspetta essere minore rispetto a quella fornita dal costruttore. Ribaltando l'Equazione 5 si ottiene:

$$\begin{cases} R^{(1)} = 0.76 \pm 0.01 \\ R^{(2)} = 0.74 \pm 0.01 \end{cases} \quad (6)$$

Il valore della riflettività media dei due specchi semiriflettenti si abbassa come ci si attendeva.

4 Misura della Finesse per differenti combinazioni di specchi

4.1 Analisi teorica e formule utilizzate

La seconda parte dell'esperienza si è focalizzata sullo studio dell'andamento della *finesse* sperimentale \mathcal{F}_{exp} , e del contrast ratio, \mathcal{CR} , al variare della riflettività R . Anche in questo caso si studia il pattern di interferenza, osservando i picchi della funzione di Airy e ricavando il valore della *finesse* \mathcal{F} attraverso la legge:

$$\mathcal{F}_{exp} = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{V_{n+1} - V_n}{2\Delta V} \quad (7)$$

Dove con FSR si intende la *Free Spectral Range*, ovvero la distanza tra i due picchi successivi, e con FWHM si indica la larghezza a mezza altezza dei picchi della *Airy function*. Nel caso preso in esame tali valori possono essere calcolati come la differenza di tensione applicata sul piezoelettrico in corrispondenza dei due massimi e come la larghezza del picco rispettivamente. Per la *finesse* sperimentale vale la legge:

$$\frac{1}{\mathcal{F}_{exp}} = \frac{1}{\mathcal{F}_{refl}^2} + \frac{1}{\mathcal{F}_{plan}^2} + \frac{1}{\mathcal{F}_{aper}^2} = \frac{1}{\mathcal{F}_{refl}^2} + \frac{1}{\mathcal{F}_{off}^2} \quad (8)$$

Dove i contributi di planarità e di apertura costituiscono un offset nella misura della *reflecting finesse*, ma diventano dominanti nel caso l'allineamento della strumentazione sia errato o nel caso siano presenti altri elementi di disturbo nella misura. Per quanto riguarda il \mathcal{CR} (o *contrast ratio*) si sono utilizzate le seguenti relazioni:

$$\mathcal{CR}_{teo} = \frac{1 + R^2}{1 - R^2} \quad \mathcal{CR}_{exp} = \frac{V_{Max}}{V_{min}} \quad (9)$$

Con la $R = \sqrt{R_1 R_2}$ che indica la riflettività ottenuta dai valori riportati dal costruttore sugli specchi semiriflettenti.

Si ricorda inoltre la relazione fra la \mathcal{F} e R già esplicitata all'Equazione 5.

4.2 Raccolta dei dati sperimentali

Per questa seconda parte dell'esperienza sono stati utilizzati 5 specchi combinati in modo da ottenere 7 configurazioni differenti così da analizzare diversi valori della riflettività media R . Le riflettività dei singoli specchi utilizzati sono riportate nella sezione dedicata all'apparato sperimentale e ad ogni sostituzione di specchi era necessario allineare nuovamente l'apparato per ottenere misure adeguate. Tutti i dati sono riportati nella Tabella 1.

4.3 Analisi Dati

Per prima cosa è stata confrontata \mathcal{F}_{exp} con il valore teorico \mathcal{F}_{teo} ottenuto tramite l'Equazione 5, effettuando un fit lineare sull'Equazione 8 (vedi Figura 4), nella quale con $\frac{1}{\mathcal{F}_{off}^2}$ si tiene conto di tutti i contributi **non** derivanti dalla *reflecting finesse*.

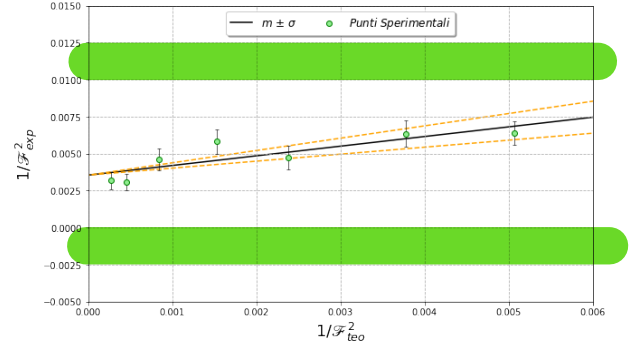


Figura 4: Fit della \mathcal{F}_{exp}

Si può notare come l'andamento risulti lineare in buona approssimazione. I valori ottenuti dalla regressione risultano quindi essere:

$$\begin{cases} m = 0.65 \pm 0.18 \\ q = 0.0035 \pm 0.0004 \end{cases}$$

dove il coefficiente angolare risulta compatibile con quello aspettato a livello teorico ($m_{teo}=1$) entro il 95% di confidence level se si effettua un test di Gauss ($Z = 1.94$), mentre l'intercetta rappresenta una stima dell'offset presente sulla finesse non ricavabile a livello teorico poichè influenzato da fattori non prevedibili (imperfezioni dello specchio, errori di allineamento, etc...). Successivamente si è studiato il comportamento della reflecting finesse in funzione della riflettanza R .

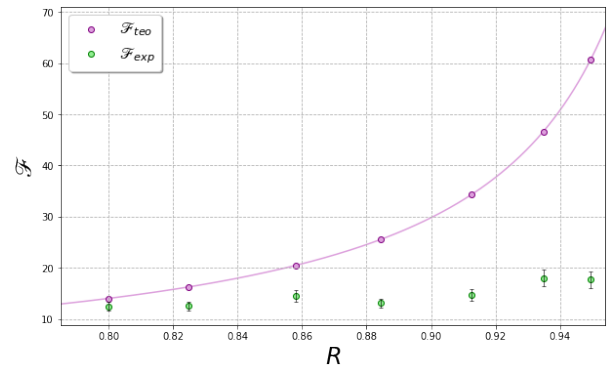


Figura 5: \mathcal{F} in funzione di R

Come risulta evidente dalla Figura 5, i valori della finesse sperimentale risultano compatibili con quello teorico solamente per il primo punto mentre per gli altri si ottiene un valore costantemente inferiore a quello aspettato. Nonostante presenti un andamento crescente, al netto di qualche fluttuazione, la funzione si distacca al crescere di R sempre più dalla sua previsione teorica. Questo a causa dell'aver trascurato i contributi diversi alla finesse oltre a quello dovuto alla riflessione. Un altro fattore importante di cui tenere conto sono sicuramente tutte le impurezze sulla superficie degli specchi che ne hanno alterato la riflettività, soprattutto per valori di R alti ($R \geq 0.90$). Infine si è cercato di confrontare il \mathcal{CR}_{exp} con la sua previsione teorica in funzione di R (Figura 6).

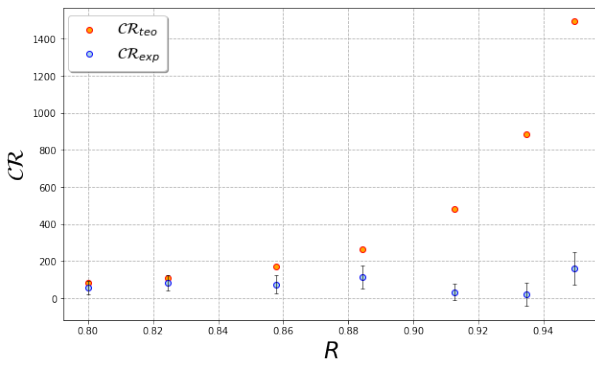


Figura 6: CR in funzione di R

Anche in questo caso i due andamenti risultano discordanti soprattutto per R grandi. Si può notare infatti come i primi due punti ($R = 0.80, 0.825$) seguano con discreta precisione l'andamento atteso. Il terzo e il quarto punto risultano calanti probabilmente a causa di errori di allineamento (che diventano fondamentali al crescere di R), ma rimangono comunque compatibili con l'andamento atteso entro 2σ . Gli ultimi 3 punti risultano invece completamente non compatibili con l'andamento atteso. Tale risultato potrebbe essere giustificato sia dalla riflettività crescente, come nel caso precedente, sia dalla sensibilità finita dell'oscilloscopio ($0.002V$) che fa sì che il reale valore di V_{min} non sia conoscibile se inferiore a tale limite, e quindi, poichè per calcolare CR si utilizza l' **Equazione 8**, ciò comporta che l'andamento dei dati sperimentali non cresca come ci si aspetterebbe. Ciò risulta ancora più evidente se si confrontano i valori di V_{min} ottenuti sperimentalmente con quelli ottenuti ribaltando l'**Equazione 8** V_{min}^{teo} (vedi **Tabella 1**).

5 Misura della lunghezza del Fabry-Perot

L'ultima parte dell'esperienza riguarda una stima della distanza tra i due specchi, d , basandosi sulla misurazione della spaziatura tra i picchi nella figura luminosa generata dall'interferometro. Per ottenerlo è stato allargato il fascio entrante con una lente divergente posta a $L = (73.0 \pm 0.3)cm$ da un foglio di carta millimetrata che funge da schermo; l'immagine a frange circolari concentriche ottenuta in questo modo è stata quindi proiettata sul foglio di carta millimetrata così da poter scattare delle foto da analizzare successivamente. Gli specchi dielettrici utilizzati avevano riflettività $R = 0.95, 0.92$.

Sono state eseguite un totale di 3 misurazioni a 3 distanze differenti tra gli specchi. Per ricavare una stima dello spostamento relativo tra le due superfici riflettenti si è anche segnato, per ogni configurazione, il valore mostrato dalla slitta micrometrica (dati in **Tabella 2**); dalle fotografie invece si sono potute estrapolare le distanze dei primi 2 massimi dal centro grazie allo sfondo millimetrato.

A partire da questi valori è possibile risalire all'ordine del Fabry-Perot N mediante la relazione:

$$\cos(\theta_{N+1}) - \cos(\theta_N) \approx \frac{1}{2}[(\theta_{N+1} - \theta_N)(\theta_{N+1} + \theta_N)] = \frac{1}{N}$$

la quale approssimazione vale nel caso in cui la distanza tra gli specchi sia molto minore di quella tra la lente diffrattiva e il foglio di carta millimetrata. Sempre in tale approssimazione è inoltre possibile considerare $\theta_N \approx \frac{x_N}{L}$, dove x_N è la distanza del picco dal centro della figura di interferenza. Il tutto si traduce quindi in:

$$\frac{1}{2} \frac{[(x_{N+1} - x_N)(x_{N+1} + x_N)]}{L} \approx \frac{1}{N} \quad (10)$$

Si sono quindi ricavati 3 valori diversi per N (uno per ogni misura), riportati in **Tabella 2**. Dall'ordine del Fabry-Perot è poi possibile derivare l'effettiva distanza tra gli specchi dielettrici utilizzando la formula:

$$d = \frac{N\lambda}{2} \quad (11)$$

Dove per λ , ossia la lunghezza d'onda del raggio incidente, si è considerato il valore teorico fornito dal costruttore ($\lambda = 633nm$). I valori di d corrispondenti a ciascuna misurazione sono riportati in **Tabella 2**. Se si indica con Δx_1 lo spostamento sulla slitta dello specchio tra la prima e la seconda misurazione, e con Δx_2 quello tra la seconda e la terza, si può verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti confrontando le variazioni spaziali date dalla slitta micrometrica con quelle derivate dalle fotografie. Quindi se dalla slitta si ha $\Delta x_1^{Slitta} = (6.00 \pm 0.02)mm$ e $\Delta x_2^{Slitta} = (3.00 \pm 0.02)mm$, nel caso derivato dalle foto risultano $\Delta x_1^{Foto} = (6.25 \pm 0.4)mm$ e $\Delta x_2^{Foto} = (2.68 \pm 0.6)mm$. Andando ad eseguire un test di Gauss si riscontra che:

$$Z_1 = 0.62$$

$$Z_2 = 0.53$$

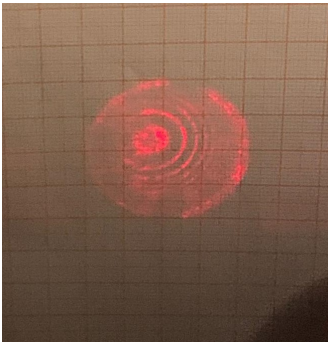
i risultati possono quindi essere considerati compatibili tra di loro e pertanto affidabili rispetto ai valori attesi. Le 3 figure di interferenza utilizzate per le misurazioni sono osservabili in (**Figura 7**).

6 Conclusioni

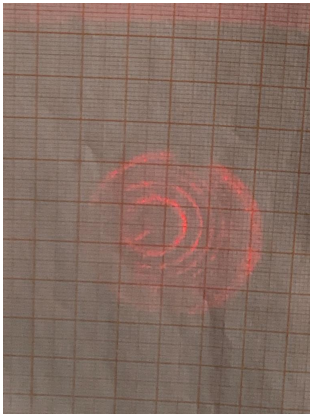
In conclusione si può affermare:

- È stata stimata la \mathcal{F} di un interferometro di Fabry-Perot formato da 2 specchi dielettrici da $R=0.8$ mediante un fit sull'**Equazione 2**. Sono stati ottenuti 2 risultati, uno eseguendo il fit solo su \mathcal{F} e la fase iniziale V_0 e l'altro tentando di stimare anche I_0 : $\mathcal{F}_1 = 11.1 \pm 0.8$ e $\mathcal{F}_2 = 10.5 \pm 0.9$ rispettivamente. Entrambi risultano però non compatibili entro il 99% di confidence level poichè le imperfezioni e i difetti degli specchi utilizzati fanno sì che la riflettività attuale sia sensibilmente inferiore a quella riportata dal costruttore.
- Sono state eseguite misurazioni della finesse a partire dall'**Equazione 7** per 7 coppie di specchi differenti. Nonostante il fit di **Figura 4** risulti compatibile entro il 95% di confidence level con i valori attesi, l'andamento di \mathcal{F} in funzione di R risulta lontano dalle predizioni teoriche, e lo stesso vale per CR . Anche in questo caso la causa può essere attribuita a difetti dello specchio ed errori nell'allineamento, che assumono un peso specifico importante soprattutto al crescere della riflettività R , come si nota dai grafici riportati.
- È stata misurata la lunghezza della cavità di un Fabry-Perot analizzando le figure di interferenza dopo che il raggio incidente è stato fatto passare per una lente divergente. Sono state prese le fotografie per 3 distanze differenti tra i 2 specchi (d) e dalla distanza dei massimi d'interferenza proiettati sulla carta millimetrata si è ricavata d . I risultati risultano ragionevoli e coerenti con quanto osservato in laboratorio.

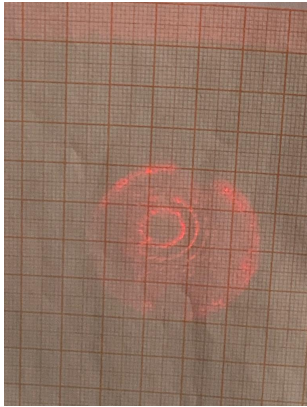
Figura 7: Fotografie delle tre figure di interferenza



(a) Slitta micrometrica: 6 mm



(b) Slitta micrometrica: 11 mm



(c) Slitta micrometrica: 14mm

$R_1 - R_2$	0.80 - 0.80	0.80 - 0.85	0.80 - 0.92	0.85 - 0.92	0.85 - 0.98	0.92 - 0.98	0.92 - 0.95
R	0.80	0.83	0.86	0.88	0.91	0.95	0.94
$V_{Max}[V]$	4.6 ± 0.2	3.4 ± 0.1	3.0 ± 0.1	2.3 ± 0.1	0.68 ± 0.03	0.82 ± 0.03	3.2 ± 0.1
$(V_{Max}/2)_1[V]$	2.28 ± 0.09	1.76 ± 0.07	1.56 ± 0.07	1.16 ± 0.06	0.36 ± 0.03	0.37 ± 0.02	1.48 ± 0.07
$(V_{Max}/2)_2[V]$	2.24 ± 0.08	1.60 ± 0.07	1.48 ± 0.07	1.08 ± 0.06	0.32 ± 0.03	0.47 ± 0.02	1.76 ± 0.07
$2\Delta t[ms]$	20 ± 2	18 ± 2	15 ± 2	18 ± 2	16 ± 2	14 ± 2	14 ± 2
FSR [ms]	250 ± 11	226 ± 10	218 ± 10	236 ± 11	$\pm 236 \pm 12$	248 ± 11	252 ± 11
\mathcal{F}_{Teo}	14.1	16.3	20.5	25.5	34.4	60.7	46.7
\mathcal{F}_{Exp}	13 ± 1	13 ± 2	15 ± 2	13 ± 2	15 ± 2	18 ± 3	18 ± 3
$V_{Min}^{Exp}[V]$	0.08 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.02 ± 0.02	0.04 ± 0.02	0.02 ± 0.02
\mathcal{CR}_{Teo}	81	108	171	265	480	883	1492
\mathcal{CR}_{Exp}	57 ± 38	85 ± 42	74 ± 49	116 ± 61	34 ± 43	21 ± 58	162 ± 88
$V_{Min}^{Teo}[V]$	0.056	0.031	0.017	0.009	0.002	0.001	0.002

Tabella 1: Dati della Sezione 4

(N.B. Le misure R , \mathcal{F}_{teo} , \mathcal{CR}_{teo} e V_{min}^{teo} non hanno incertezza poiché ottenuti esclusivamente dal parametro R_i che è fornito dal costruttore e quindi è assunto come certo)

Valore slitta micrometrica [mm]	$x\ 1^\circ$ [mm]	$x\ 2^\circ$ [mm]	N	d [mm]
5.00 ± 0.01	3 ± 2	6 ± 2	9868 ± 38	3.12 ± 0.1
11.00 ± 0.01	4 ± 2	5 ± 2	29605 ± 115	9.37 ± 0.4
14.00 ± 0.01	3 ± 2	4 ± 2	38064 ± 148	12.05 ± 0.5



Tabella 2: Dati della sezione 5