

Data Esperimento: 25/05/2015 (I parte)
26/05/2015 (II parte)

Gruppo N. 1

Nomi: Fariselli Simone, Mancastroppa Marco, Preto Lucrezia

Titolo Esperimento: "Interferometro di Michelson"

Obiettivo/i (cosa misurare e/o verificare):

- Tarare l'interferometro (determinare il rapporto moltiplicativo tra la vite micrometrica e lo spostamento dello specchio);
- Misurare la lunghezza d'onda di un laser verde;
- Misurare la lunghezza d'onda della radiazione di una lampada al Sodio.

Descrizione sintetica dell'Esperimento (leggi fisiche che descrivono l'esperimento, definizione delle grandezze e parametri dell'esperimento, strumentazione utilizzata e relativi errori strumentali):

Strumentazione utilizzata

- Laser rosso ($\lambda = 633 \text{ nm}$) e verde ($\lambda = 532 \text{ nm}$)
- Lampada al sodio
- Interferometro di Michelson
- Lenti (convergenti e divergenti)
- Diaframma regolabile
- Sistema di rivelazione (fotodiodo, interfaccia PASCO, schermo,...)
- Cavi coassiali
- Cavalieri

Procedimento

1. Valutazione della relazione esistente fra la manopola milli/micrometrica di controllo dello spostamento dello specchio mobile e l'entità effettiva della traslazione dello specchio mobile: Posizionare e accendere il laser con fascio rosso (prendere nota della lunghezza d'onda dal manuale) e verificare l'allineamento del sistema; capire i dettagli del percorso del fascio e delle varie riflessioni;
2. Posizionare lo schermo;
3. Portare i fasci riflessi dai due specchi in sovrapposizione e osservare le frange. Nota la lunghezza d'onda del laser, determinare il fattore di riduzione della scala della manopola di posizionamento dello specchio mobile, contando il numero di frange che passano in corrispondenza di un punto fisso sullo schermo, nel muovere la vite micrometrica;
4. Effettuare il conteggio delle frange utilizzando anche il fotodiodo PASCO;
5. Determinare la lunghezza d'onda del laser con emissione nel verde: operare come nei punti 1-4, sostituendo il laser rosso con il laser verde a λ incognita, e contare le frange che passano per un punto fisso dello schermo facendo traslare lo schermo mobile di una lunghezza nota (D , ricavato leggendo lo spostamento sulla vite milli/micrometrica e utilizzando il fattore di riduzione tra vite micrometrica e specchio mobile determinato nei punti 1-4);
6. Lampada al Sodio: allineare il sistema con il laser rosso, quindi inserire diaframma e lenti in modo da osservare distintamente le frange con la lampada al Sodio. Per fare ciò è necessario regolare in modo corretto la successione di lenti, cannocchiali, diaframmi,... e altri elementi utilizzati per limitare la luce diffusa;

7. Determinare la lunghezza d'onda della radiazione, nella medesima modalità utilizzata per il laser verde.

Relazioni teoriche utilizzate

| | | | |
|--|----------------------------|--------------------------------|--|
| <u>1. Variazione della differenza di cammino ottico al passaggio di N frange (n₀ indice di rifrazione e si assume l'incidenza normale cosθ=1)</u> | | $\Delta = 2 n_0 D = N \lambda$ | |
| <u>2. Massimi</u> | $2D \cos\theta = m\lambda$ | <u>3. Minimi</u> | $2D \cos\theta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ |

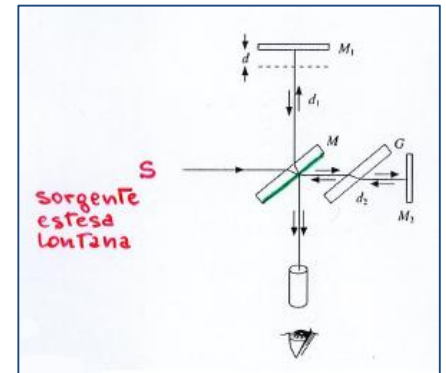
Relazioni note di analisi statistica, propagazione degli errori...

Analisi dati (sintesi dei dati acquisiti, eventualmente tramite tabelle e/o grafici significativi, derivazione dei parametri incogniti e valutazione quantitativa degli errori):

Allineamento dell'interferometro di Michelson e analisi delle figure di interferenza

L'esperienza di base sull'utilizzo dell'**interferometro di Michelson**. Per operare l'allineamento e gran parte delle operazioni successive, si fa uso di un **laser rosso** ($\lambda = 633 \text{ nm}$): ciò consente di **sfruttare le proprietà della radiazione laser**, principalmente si sfrutta la **monocromaticità** (λ **unica**) e la **coerenza** (si conserva nel tempo la correlazione fra le fasi di uno stesso fronte d'onda e la correlazione fra le fasi delle diverse porzioni di un fronte d'onda = **coerenza temporale e spaziale**).

L'interferometro di Michelson **agisce** principalmente creando uno **sfasamento tra raggi** che costituiscono un medesimo fascio: lo **sfasamento viene indotto tramite riflessioni** e facendo percorrere ai **raggi che compongono il fascio laser differenti percorsi**. Dunque il laser, risulta essere la **sorgente ideale per questa esperienza**, dato che **non presenta un'iniziale incoerenza**, ma lo **sfasamento** che produce la **figura di interferenza** sullo schermo è **dovuto ai diversi percorsi** dei raggi che compongono lo stesso fascio.



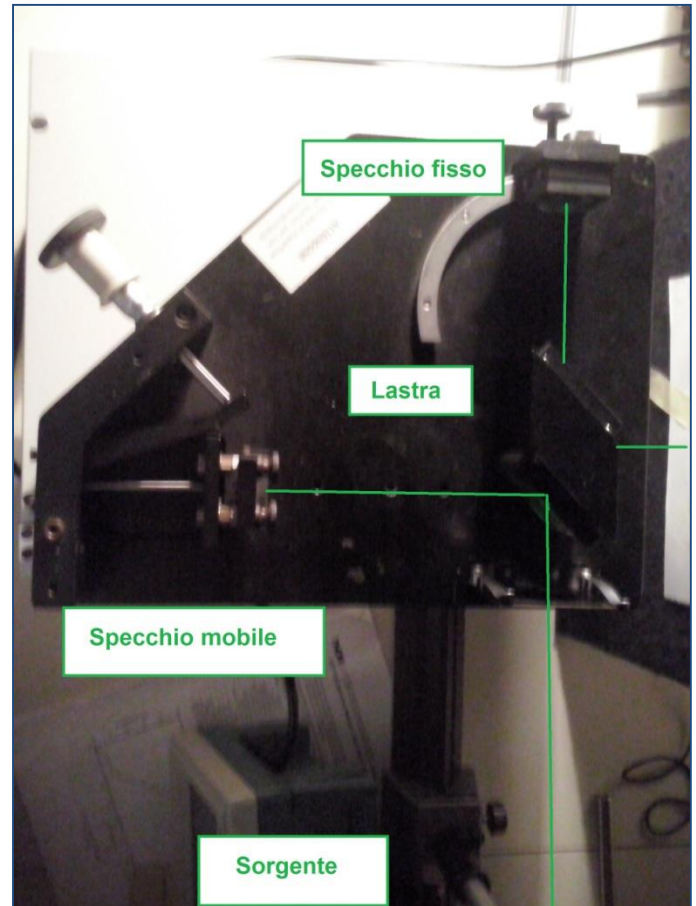
Inoltre la sorgente laser **non presenta uno spot perfettamente puntuale**, ovvero un unico raggio, ma è caratterizzato da un **“pennello di luce”**, ovvero da un **insieme di raggi paralleli**, che percorrendo l'interferometro **seguono cammini ottici leggermente diversi**, presentando, così, uno **sfasamento rispetto alla fase iniziale**, che per le proprietà del laser era **comune a tutti i raggi**. In tal modo il fascio fa interferenza con se stesso, ovvero con raggi del fascio stesso che hanno percorso differenti cammini ottici, ottenendo la classica figura a frange di interferenza.

Il fascio laser viene fatto passare attraverso una **lente divergente**, affinché sia **allargato**, rendendo più evidenti le **figure di interferenza** sullo schermo. Ciò è necessario per **rendere più semplici le operazioni di allineamento del sistema e più rapide le successive misure**, dato che si basavano sull'identificazione, lettura e conteggio delle frange di interferenza.

In seguito esso giunge ad **incidere la lastra centrale (correttamente orientata in modo da far incidere i raggi riflessi o rifratti nelle direzioni corrette), con una faccia semiriflettente**: parte del raggio viene riflesso nell'incidenza sulla prima faccia della lastra (radiazione non interessante per l'esperienza), la restante **prosegue nella lastra (raggio rifratto) e incide sulla superficie semiriflettente**. In tal modo si vengono a creare **i due fasci interessanti: il raggio 1 che viene riflesso dalla superficie e viene indirizzato verso lo specchio mobile il raggio 2, che prosegue oltre la superficie nella direzione dello specchio fisso**.

Il **raggio 1 riflesso prosegue incidendo sullo schermo mobile, viene riflesso** (e in parte rifratto, ma questa radiazione non interessa): se **l'incidenza è normale il raggio viene riflesso parallelo a se stesso, dunque torna indietro, incide nuovamente sulla lastra** centrale subendo fenomeni di riflessione e **rifrazione**. Il **raggio rifratto** è quello che è interessante per l'esperienza: esso **prosegue all'interno della lastra, subisce di nuovo una riflessione e rifrazione sull'altra faccia della lastra**. In seguito **prosegue fino ad incidere sullo schermo** (o sul fotodiodo posto come rilevatore).

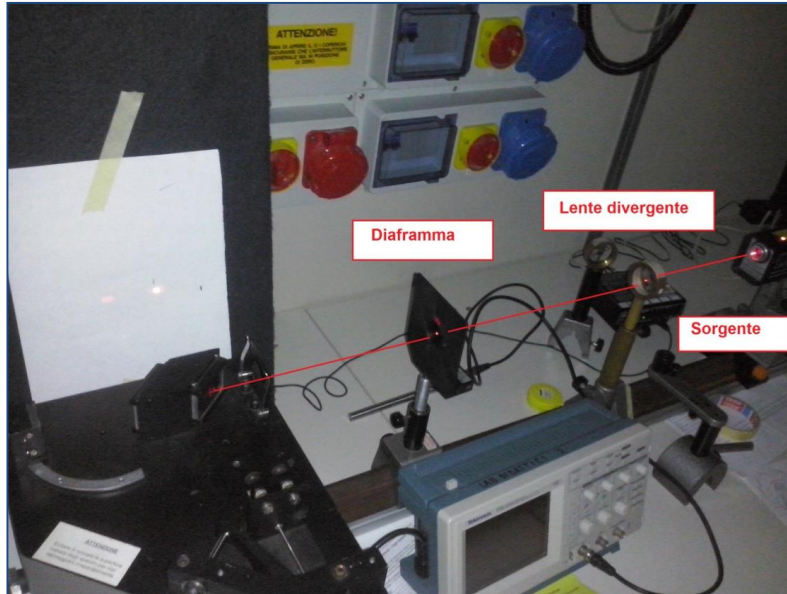
Il **raggio 2**, invece, **prosegue nella direzione dello schermo fisso**, incide su di esso e se l'incidenza è normale il raggio **viene riflesso parallelamente a se stesso**. Prosegue così nella **direzione della lastra centrale**, viene quindi **di nuovo riflesso** (e rifratto, ma tale radiazione poco importa per l'esperienza) e **indirizzato così sullo schermo**.



L'allineamento del sistema consiste nel regolare il sistema in modo che:

1. La lente divergente non deve il fascio dalla sua direzione e dalla sua altezza, ma allarghi solo lo spot: per verificare ciò si operano le successive **regolazioni e allineamenti** del sistema ponendo **già la lente sui binari**. In tal modo le **operazioni di allineamento** del sistema **prevedono da subito la presenza della lente** e di una **sua eventuale azione sulla direzione del fascio laser**;
2. La lente sia posta alla corretta altezza: affinché il fascio laser non debba essere inclinato per **poterla attraversare nel suo centro**. Si regola la lente in modo che venga colpita nel suo **centro dal fascio laser** e si orienta la sorgente in modo che il **fascio riflesso dalla lente “torni” nella sorgente, parallelo al fascio generato e coincidente con esso**;
3. Il fascio laser si propaghi sempre alla medesima altezza: per assicurarsi di ciò si pone la **sorgente sui binari** tramite un cavaliere e la **si regola** in modo che il **laser sia ben fisso all'altezza del centro degli specchi dell'interferometro**. Quindi si utilizza il **diaframma** per **verificare** che il **fascio laser sia alla corretta altezza**. Si pone il **diaframma alla giusta altezza**, in modo che il suo **centro sia allineato al centro degli specchi dell'interferometro e della lastra semiriflettente**. Quindi si aziona la sorgente e si verifica che **lo spot del laser sia ben centrato sul diaframma** e che, quando quest'ultimo è **quasi completamente chiuso, lo spot** corrisponda con la **circonferenza (puntuale) del diaframma** e che il **fascio** che passa oltre il diaframma incida gli **specchi dell'interferometro e la lastra nel loro centro**;
4. Il fascio luminoso colpisca gli specchi e la lastra semiriflettente in corrispondenza delle loro rispettive zone centrali: è possibile verificare ciò osservando **la figura di interferenza** sullo schermo (e la sua forma) oltre che osservando **direttamente gli specchi**. Il sistema è correttamente strutturato, se la **figura di interferenza** si propone come una **circonferenza completa** (con frange circolari o rettilinee), **non tagliata o deformata**. Allo stesso modo è necessario che gli **specchi siano illuminati completamente** e non in una loro porzione per poter osservare la figura di interferenza **come desiderato**;
5. L'angolo di incidenza dei fasci laser sugli specchi (mobile e fisso) sia normale, o almeno con un angolo di incidenza $\theta \sim 0^\circ$. E' possibile osservare delle **frange di interferenza** anche se l'incidenza **non è perfettamente normale** e gli **specchi non sono completamente ortogonali**. Per poterle osservare, però è necessario che **l'incidenza sia quasi normale**, ovvero sia tale da avere un'inclinazione ridotta degli specchi, in modo che θ di incidenza sia $\sim 0^\circ$. Si può operare per rendere **tale angolo quasi nullo** (o ancora meglio nullo) **tramite le manopole sullo specchio fisso**, che consentono di effettuare **movimenti basculanti** dello specchio.



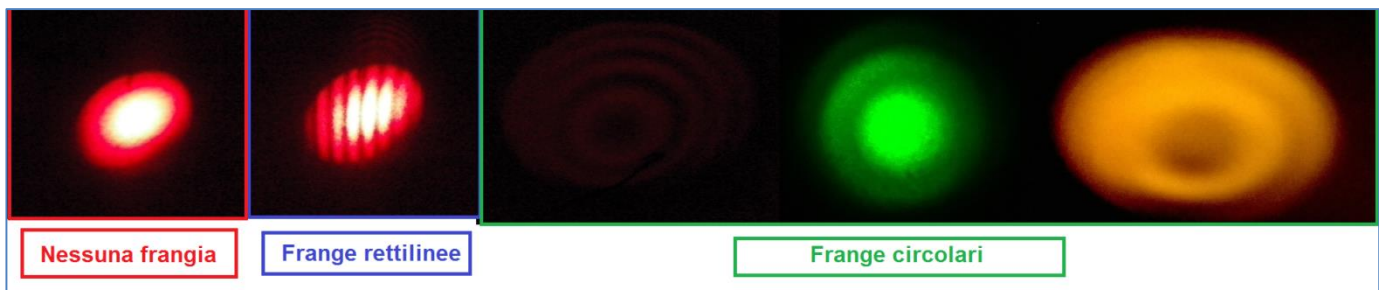


"Interferometro allineato"

In tal modo i raggi **si ricongiungono sullo schermo presentando uno sfasamento** (incoerenza temporale) e dando origine **ad una figura di interferenza**. La forma della figura di interferenza dipende da come è stato allineato il sistema e da come sono **orientati gli specchi**:

- Non si vedono le frange: implica che il sistema **non è correttamente allineato** o che i raggi provenienti dai due specchi non sono correttamente indirizzati sullo schermo a sovrapporsi. In tal caso è necessario regolare lo schermo fisso tramite le due manopole che consentono di effettuare movimenti basculanti;
- Si vedono frange rettilinee: implica che il sistema **sia correttamente allineato** e che gli specchi **non sono perfettamente ortogonali tra loro** (e paralleli o perpendicolari al fascio laser). Anche in questo caso è possibile operare per rendere gli schermi ortogonali intervenendo sulle manopole regolatrici dello schermo fisso;
- Si vede uno spot centrale e frange circolari concentriche: in tal caso il sistema è **allineato e gli specchi sono ben ortogonali**.

[La presenza di frange circolari oltre lo spot centrale è dovuta al fatto che il laser non ha uno spot perfettamente puntiforme: presenta un fascio di raggi che giungono sullo schermo con leggere differenze di cammino ottico, e mai un solo raggio. Tali raggi prossimi tra loro vanno a interferire sullo schermo, visto che nel muoversi all'interno dell'interferometro percorrono strade leggermente differenti.]



Le misure possono essere operate in **entrambe le configurazioni** che consentono di visualizzare le **frange (rettilinee o circolari)**, dato che in un caso l'**incidenza** del fascio laser è **normale** (circolare) mentre nell'altro caso si ha un **angolo di incidenza leggermente superiore a zero**. Infatti, per le successive misure è necessario poter **contare il numero di frange di interferenza** che passano per un **punto fisso** dello schermo quando viene cambiata la **posizione dello schermo mobile**, ovvero lo **sfasamento dei raggi** che interferiscono sullo schermo in termini di **numeri di lunghezze d'onda**. Entrambe le configurazioni consentono di fare ciò dato che nel caso di frange rettilinee si conta il numero di frange (scure o luminose) che passano per un punto scelto dello schermo (infatti esse **scorrono**), mentre nel caso di frange circolari è sufficiente contare il numero di massimi (o minimi) che "passano" per lo spot centrale, dato che la figura di interferenza **pulsa al variare della posizione dello schermo mobile** (ovvero al muovere la vite micrometrica).

Taratura dell'interferometro di Michelson

Preliminarmente è necessario operare la **taratura dell'interferometro**, ovvero determinare il **rapporto esistente** tra il valore segnato dalla **vite micrometrica** e l'**effettivo spostamento dello specchio mobile**. Infatti il braccio di movimentazione, che consente di spostare lo schermo mobile in posizioni differenti, ad una distanza D dalla posizione iniziale di riferimento, è collegato alla vite micrometrica che riporta un valore che non dà informazioni dirette su D e su come esso vari al variare del valore segnalato. Il sistema muove lo specchio in **modo indiretto**, ed è quindi necessario rilevare il **fattore di demoltiplica** tra D , distanza effettivamente coperta dal movimento dello specchio, e il valore segnalato dalla vite micrometrica d .

[Ciò risultava necessario per poter analizzare le successive misure e determinare la lunghezza d'onda del laser verde. Infatti, a partire dal valore segnato dalla vite micrometrica, tramite i risultati di questa parte preliminare era possibile determinare in modo diretto l'entità dello spostamento dello specchio mobile. Tale dato è essenziale per poter determinare la lunghezza d'onda del laser utilizzato, a partire dallo sfasamento introdotto tra i raggi osservati dal movimento dello specchio mobile.]

Per questa parte dell'esperienza si fa uso di un **laser rosso**, di cui è nota la lunghezza d'onda $\lambda = 633 \text{ nm}$.

Dopo aver regolato il sistema come descritto in precedenza si **possono operare le misure**.

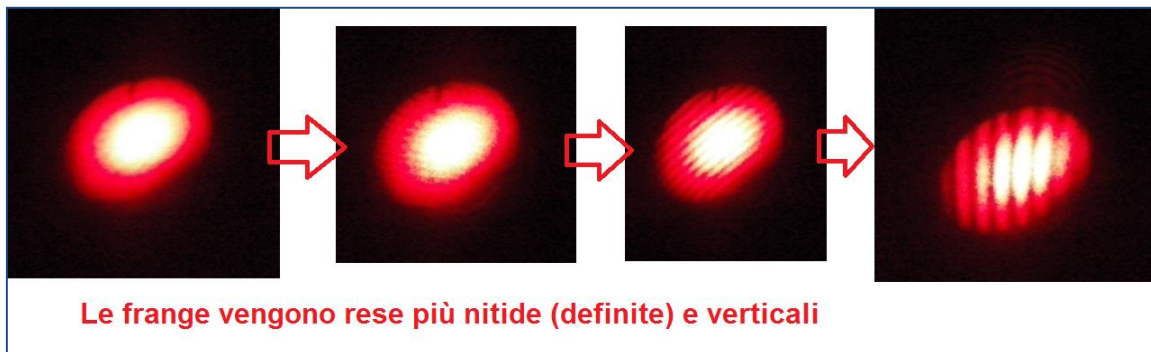
Le misure consistono nel determinare il **numero di frange** che passano **per un punto fissato** dello schermo (su cui si osserva la figura di interferenza) durante **una rotazione della vite micrometrica**. In particolare si fa ruotare la vite micrometrica, a partire dallo zero, di un **fattore noto** (ad esempio una tacca della vite micrometrica), durante la rotazione **si contano le frange che passano per il punto scelto**. Durante la conta si può fare riferimento in modo equivalente a **massimi** (frange scure) o **minimi** (frange chiare), purché si **mantenga coerenza nella singola misura e nella scelta del punto fissato**.



[Le misure sono state effettuate orientando lo specchio fisso, tramite le manopole, in modo che le frange create sullo schermo fossero:

- *ben definite e delineate;*
- *sufficientemente larghe, da consentire la loro identificazione immediata;*

- verticali (o orizzontali) in modo da tenere come riferimento una retta parallela ad esse, rispetto alla quale era semplice contare il numero di frange che la attraversavano, come conseguenza dello spostamento dello specchio mobile.



Queste accuratezze sono state effettuate nel tentativo di rendere meno difficile la lettura del numero di frange che hanno attraversato la direzione considerata come riferimento. In particolare per rendere ulteriormente più semplice l'operazione, si è posto un foglio di carta bianca sullo schermo e su di esso è stata tracciata la direzione di riferimento (tramite un pennarello) in modo da rilevare in modo più chiaro le figure di interferenza e in modo da non perdere il riferimento durante il conteggio.]

Le **modalità** con cui si poteva operare per il **conteggio delle frange passate erano duplici**:

1. **Conteggio diretto**: si azzerava la vite micrometrica e si selezionava una tacca su di essa. Quindi, identificato il riferimento sullo schermo (punto fisso), si opera ruotando lentamente la vite fino al **raggiungimento della tacca prefissata** e si **conta il numero di frange che passano** per la direzione di riferimento, identificata in precedenza sullo schermo;
2. **Conteggio indiretto (mediante software PASCO)**: si collega il fotodiodo PASCO al PC mediante l'interfaccia, si azzerava la vite micrometrica e anche in questo caso si selezionava un valore su di essa come obiettivo finale della sua rotazione. Quindi si pone il fotodiodo in corrispondenza del centro della figura di interferenza osservata sullo schermo, in modo che **rilevi la variazione di intensità al muoversi delle frange**. Ruotando la vite, infatti, le frange **rettilinee si muovono** (o **quelle circolari pulsano**) e in tal modo **l'intensità della radiazione** incidente sul fotodiodo risulta essere caratterizzata da un **alternarsi di massimi e di minimi** (corrispondenti ai massimi e ai minimi di interferenza). Ciò corrisponde ad una curva della tensione (= intensità rilevata) in funzione del tempo composta da un susseguirsi **di massimi e minimi**. Si potrebbe così determinare **il numero di frange passate semplicemente contando il numero di massimi (o minimi) rilevati**.

Il **secondo metodo**, sicuramente, **sarebbe il più preciso** in quanto consentirebbe di:

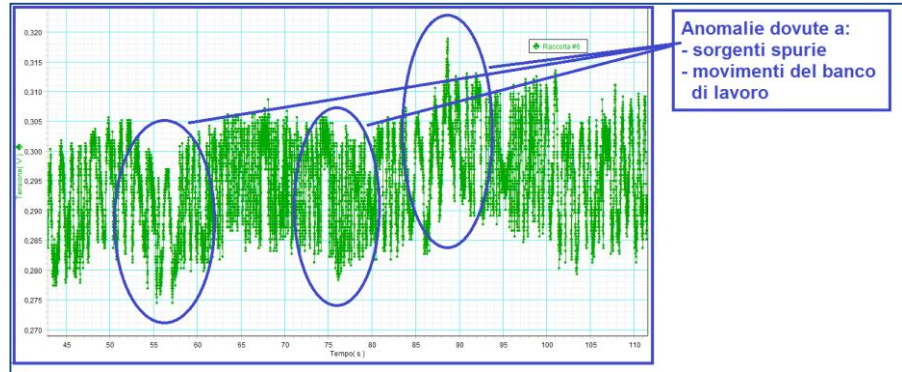
- evitare **errori** dovuti a **distrazione**;
- evitare **errori** dovuti alla **necessità di prestare attenzione contemporaneamente al numero di frange passate e al valore segnalato dalla vite micrometrica**;
- evitare **situazioni in cui ad un valore sulla vite micrometrica non corrisponda un numero esatto di frange passate per il punto fisso dello schermo**. Infatti non è detto che uno spostamento preciso sulla vite micrometrica abbia un **corrispondente perfetto nel numero N di frange passate**;

- ...

Il metodo che fa uso del fotodiodo **PASCO** presenta, però, **notevoli svantaggi**:

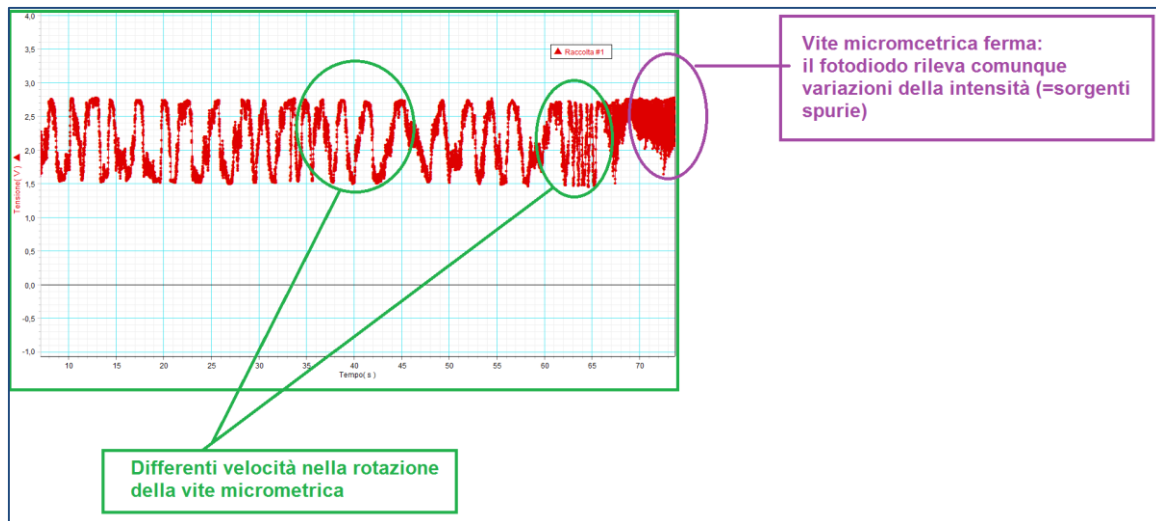
- Il sistema è **estremamente sensibile** a **movimenti del banco di lavoro** e del **pavimento**: ciò implicava che l'appoggiarsi al banco o il passare di una persona nelle vicinanze potesse **provocare un'oscillazione delle frange e un loro spostamento non dovuto allo spostamento dello specchio mobile**. Il software **PASCO** prosegue nella raccolta dati, ottenendo come risultato delle **anomalie nel grafico e perdita di alcune frange** (che andavano a porsi nelle zone anomale del grafico), provocando un **conteggio errato dei dati**. Al contrario se il

conteggio viene effettuato **“a occhio”** non vi è questo rischio nel caso in cui si osservasse un **movimento delle frange di interferenza anomalo** (ovvero tale da non poter essere attribuito alla rotazione della vite micrometrica e da produrre un addensamento di frange, che non consente più di identificarle univocamente). Infatti

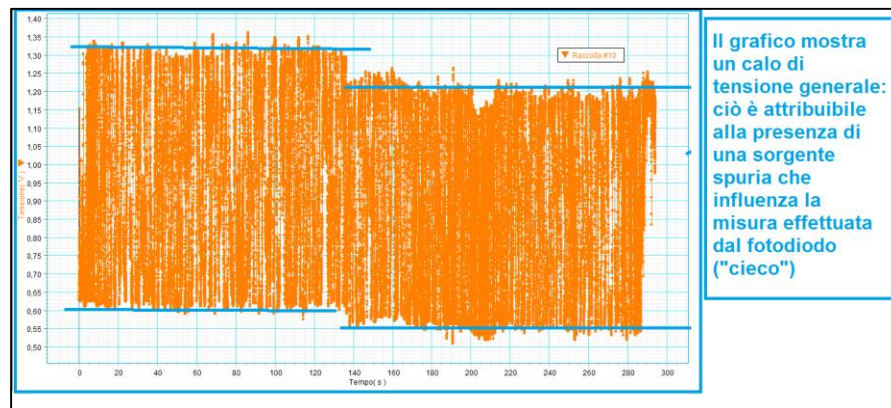


l'osservatore può bloccarsi nel conteggio e nella rotazione della vite, attendendo che **il sistema si stabilizzi** e che **si rendano più delineate e separate le frange** sullo schermo;

- **Saturazione del segnale per i laser** (verde e rosso), obbligava ad impostare il **guadagno del fotodiodo a valori bassi**;
- **Intensità troppo debole** (lampada al Sodio), che **obbliga a regolare il fattore moltiplicativo dell'interfaccia PASCO e il guadagno del fotodiodo a valori elevati**, ma si presentano comunque anomalie nel grafico dovute alla **bassa intensità** della radiazione rilevata;
- Il grafico atteso **sarebbe sinusoidale**, per cui sarebbe molto facile determinare il numero di massimi (o minimi). Il grafico ottenuto, invece, **non lo è** a causa dei **movimenti del banco di lavoro**, che influenzano in modo immediato le rilevazioni del fotodiodo, e a causa della **rotazione della vite non uniforme (velocità non costante)**. L'andamento osservato, infatti, presenta **forti irregolarità**, dovute appunto alla **non uniformità della rotazione** e quindi dello **spostamento dello specchio mobile**;



- Il numero di frange passate è **molto elevato**, anche per un valore ridotto sulla vite micrometrica. Diventerebbe quindi **difficile e lungo contar le frange passate sul grafico**, al contrario, operando **“a occhio”** sarebbe possibile effettuare dei **conteggi “a staffetta”**. Ovvero si potrebbero contare **le frange passate in modo continuo**: si ruota la vite micrometrica fino alla prima tacca sul nonio quindi si registra il numero N di frange passate; si prosegue ruotando la vite fino alla seconda tacca e si registra il numero di frange passate, iniziando a contare dal valore di N rilevato per la tacca precedente. Così si opera **per un buon numero di valori sulla scala micrometrica ottenendo il corrispondente numero di frange in modo rapido**;
- **Influenza di sorgenti spurie**, dato che il fotodiode è **“cieco”**. Esso, come si è verificato nell’esperienza “Spettrofotometro a reticolo”, rileva in **modo indifferenziato** un qualsiasi fotone che si ponga nel range del visibile o dell’infrarosso e **non è in grado di limitare la propria rilevazione ad una sola sorgente o ad una sola lunghezza d’onda**. In tal modo sorgenti esterne e spurie influenzerebbero in modo molto evidente le misure effettuate tramite il fotodiode PASCO.



Si è così deciso di **operare tramite il conteggio semplice “a occhio” e “a staffetta” delle frange passate**, visti i vantaggi e gli svantaggi delle due modalità.

[Nel caso in cui ad una tacca della vite micrometrica non corrispondesse un valore intero di frange passate (ad esempio si stanno contando i massimi che passano per il punto fissato, e si osserva che una tacca sulla vite corrisponde alla condizione in cui il riferimento si pone su un minimo), si sono

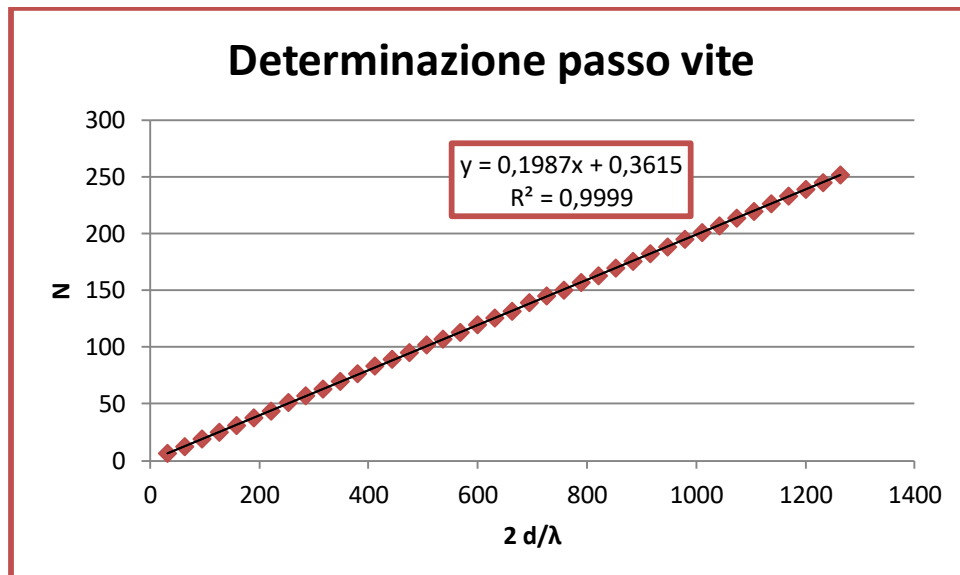
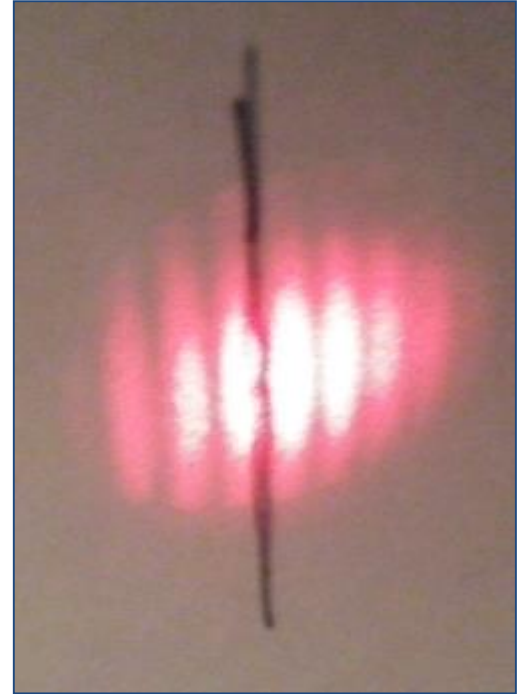
effettuate ulteriori rotazioni ponendosi nel caso in cui la tacca rilevata avesse un corrispondente nel numero N delle frange passate che fosse un intero.]

Operando in questo modo si è ottenuto un **set di dati costituito dalle coppie di valori letti** sulla vite micrometrica (d) e il corrispondente numero di frange (N) passate per il punto di riferimento.

A partire dalla relazione $1, 2 n_0 D = N\lambda$ (ponendo $n_0 = 1$ (indice di rifrazione dell'aria), N il numero di frange rilevate, λ la lunghezza d'onda nota del laser rosso utilizzato) è possibile ottenere l'entità dello spostamento (D) dello specchio mobile; quindi è possibile ricavare da ciò il **fattore moltiplicativo** tra il valore sulla vite micrometrica e il **corrispondente spostamento dello specchio mobile**.

D , lo spostamento dello specchio, si esprime come kd (con k il fattore moltiplicativo e d il valore letto sulla vite micrometrica – si assume che **la relazione tra il valore letto sulla vite (d) e l'effettivo spostamento dello specchio (D) sia lineare e di tipo moltiplicativo**, visto che il sistema funziona **con un braccio che fa da leva**).

In tal modo è possibile osservare una **relazione lineare** tra il valore letto sulla vite d e il prodotto $N\lambda$: a partire dai dati sperimentali si opera una regressione lineare ponendo $x = 2d/\lambda$ e $y = N$, in tal modo ci si aspetta un relazione nella forma $y = Bx + A$ con $A = 0$ e $B = k =$ **fattore moltiplicativo vite-specchio**.



Dal grafico si osserva che **i dati sperimentali** sostengono in modo **ottimale la relazione lineare**, infatti i dati risultano essere **approssimativamente tutti allineati** e l'**indice di correlazione lineare** $R = 0.99997$, quindi è **indicatore** di una **correlazione lineare altamente significativa** [Tabelle Taylor].

Da ciò è possibile affermare che **effettivamente la relazione che lega D** (= spostamento dello specchio) a **d** (= valore letto sulla vite micrometrica), **sia nella forma $D = kd$** . In particolare dalla regressione si ha che

$$\underline{A = 0.36 \pm 0.17}$$

$$\underline{B = 0.1987 \pm 0.0002}$$

Tali valori **sono consistenti con la teoria dato che il termine noto A dovrebbe essere nullo** e il valore **sperimentale è abbastanza ridotto e consistente con lo zero**. Inoltre dalla regressione si ottiene che

$$\underline{D = k d = 0.1987 d}$$

Con **k = fattore moltiplicativo tra vite e spostamento dello specchio, pari a 0.1987 ± 0.0002** .

Si è quindi determinato il **fattore moltiplicativo tra la vite micrometrica**, collegata al braccio di movimentazione, e lo **spostamento dello specchio mobile**, essenziale per le successive misure delle lunghezze d'onda incognite di radiazioni particolari, tramite **l'uso dell'interferometro di Michelson**.

Lunghezza d'onda del laser verde

Per determinare **la lunghezza d'onda del laser verde** si sostituisce il laser verde, di lunghezza d'onda incognita ($\lambda_{teorica} = 532 \text{ nm}$) al laser rosso, come sorgente dell'interferometro. Quindi **si posiziona la sorgente in modo che sia mantenuto l'allineamento effettuato con l'altro laser** e le misure **vengono effettuate in maniera del tutto analoga** a quanto spiegato per la determinazione del fattore moltiplicativo k tra D e d .

I dati sperimentali così raccolti **corrispondono alle coppie di valori**

(d, N) ovvero al numero di frange passate per il riferimento sullo schermo, corrispondenti ad una rotazione della vite micrometrica che segnala come valore d .

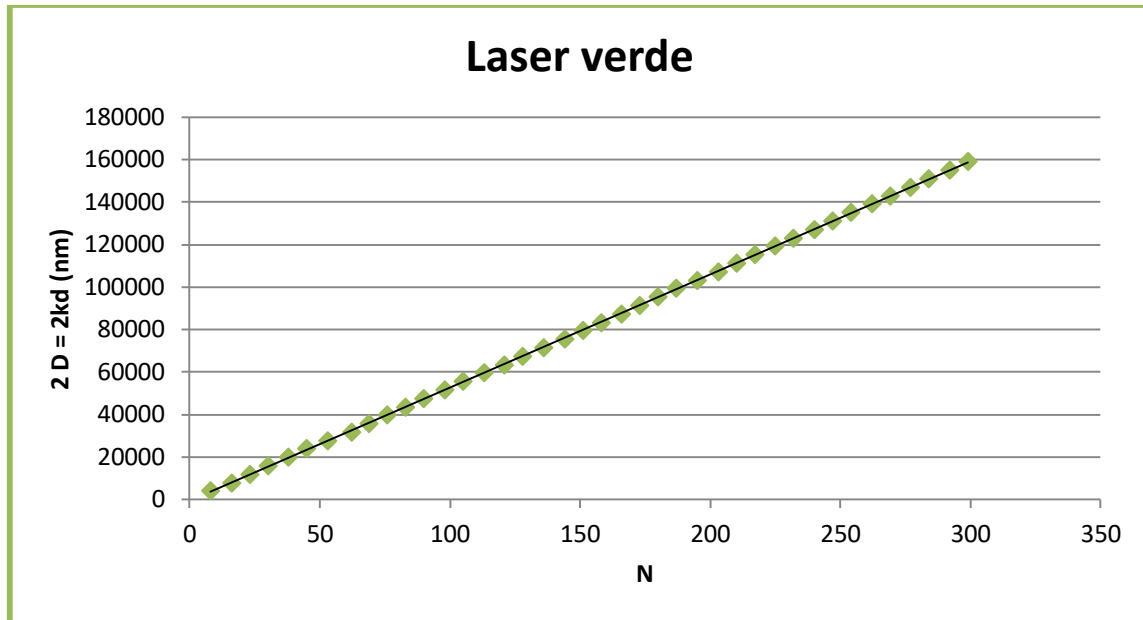
L'analisi di tali dati risulta **differente** in questo caso **essendo incognita la λ della sorgente**.

Sempre a partire dalla relazione **$2 n_0 D = N \lambda$** , con N il numero di frange contate, $n_0 = 1$ (indice di rifrazione dell'aria), D lo spostamento dello specchio mobile (pari a $kd = 0.1987 d$, con d il valore letto sulla vite micrometrica), **è possibile ricavare la λ della radiazione emessa dalla sorgente, ovvero del laser verde**.

È possibile effettuare **una regressione** sui dati **sperimentali** raccolti, infatti ci si aspetta una relazione lineare tra **$x = N$** e **$y = 2D = 2 k d$** . La relazione attesa sarà nella forma **$y = A + Bx$** , con **$B = \text{coefficiente angolare} = \lambda_{verde}$** .

Si ottengono così i seguenti dati.





Dal grafico si osserva che **i dati sperimentali sostengono in modo ottimo la relazione lineare**, infatti i dati si **dispongono su una retta** e l'**indice di correlazione lineare** è $R = 0.99998$, quindi è indicatore di una **correlazione lineare altamente significativa** [Tabelle Taylor].

È quindi possibile **ricavare, dal coefficiente angolare della retta di regressione, la lunghezza d'onda del laser verde**, per poi **effettuare una verifica di tale valore sperimentale con il valore teorico** atteso (stampato sul laser, 532 nm).

$$\underline{B = \lambda_{\text{verde-sperimentale}} = 532.9 \pm 0.5 \text{ nm}}$$

$$t = \frac{|\lambda_{\text{verde-sperimentale}} - \lambda_{\text{verde-teorico}}|}{\sigma} = \frac{|532.9 - 532|}{0.5} = 1.8$$

Probabilità (al di fuori di $t\sigma$) = 1-Probabilità (entro $t\sigma$) = 100% - 92.81% = 7.19%
 ("Discrepanza ragionevole" - Determinato tramite le tabelle del Taylor)

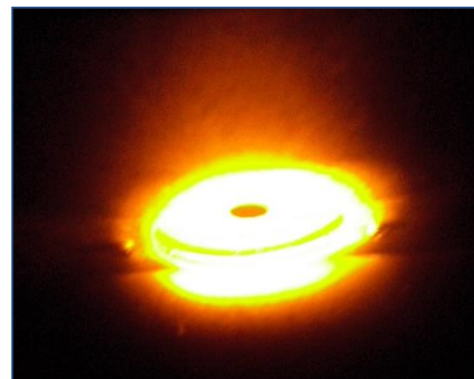
Il parametro t e la **relativa probabilità** sono indicatori di **un'ottima consistenza** tra il valore **sperimentale e teorico della lunghezza d'onda del laser verde**. Ciò ci consente di affermare di aver **operato correttamente** nella raccolta dati e nella loro analisi.

Lunghezza d'onda della radiazione della lampada al Sodio

È possibile operare **come descritto nel caso del laser verde** per determinare la lunghezza d'onda della radiazione prodotta da una **lampada a scarica al Sodio**.

L'interferometro di Michelson, che fa uso di una sorgente di questo tipo, presenta alcune **criticità aggiuntive**. Tali problematiche derivano dal fatto che la sorgente utilizzata non è né monocromatica né coerente: essa infatti è una **lampada a scarica**, che presenta **differenti righe spettrali** di lunghezza d'onda diverse, le quali si sommano **componendo la radiazione complessiva policromatica**. Inoltre la **sorgente** utilizzata è **estesa**, ciò implica la presenza nella radiazione emessa di un' **incoerenza spaziale**.

La lampada al Sodio, generando radiazione incoerente spazialmente, fa in modo che i raggi, passando nell'interferometro, incidano sullo schermo sovrapponendosi in **modo scorrelato**, non vedendo **nessun tipo di figura di interferenza**. E' necessario quindi porsi nelle migliori condizioni (**tramite l'uso di lenti,...**) per vedere l'interferenza dei due fasci.



"Diaframma illuminato dalla lampada al Sodio"

Come si era affermato in precedenza, **tali elementi disturbanti per l'esperienza erano completamente assenti nel laser**, che in presentava **proprietà di monocromaticità e coerenza (spaziale e temporale)**. Diventa dunque necessario **allineare preliminarmente** il sistema come descritto in precedenza tramite il laser e operare tramite gli strumenti ottici forniti per poter visualizzare correttamente sullo schermo le frange di interferenza della lampada al sodio.

Si effettua l'allineamento dell'interferometro tramite il laser, regolando il sistema in modo da osservare le frange di interferenza sullo schermo. Quindi **si pone al posto del laser la lampada, in modo che il foro luminoso si ponga in corrispondenza della posizione della sorgente laser**, e si **toglie la lente divergente dal binario**. Infatti lasciando tale lente non si vedrebbe la figura di interferenza sullo schermo (lo schermo **non è più illuminato**).

Una volta **accesa la lampada al Sodio**, attendendo che si scaldi, è necessario **porre una lente convergente** sui binari in modo che **la radiazione emessa dalla lampada**, che incide su di essa, sia **fatta convergere in un fascio di dimensioni ridotte**. Tale lente viene posta il più vicino possibile all'interferometro di Michelson, ovvero alla lastra centrale semiriflettente, in modo che la radiazione incida la lastra, con una dimensione non troppo piccola e nemmeno eccessivamente grande, per poter osservare nitidamente le figure di interferenza.

In questa configurazione è già possibile osservare delle **lievi frange di interferenza sullo schermo** (regolando opportunamente lo schermo mobile e quello fisso). È **complesso**, però, **determinare in modo corretto il loro numero** (conteggio delle frange passate) dato che **non sono ben delineate e visibili**. Infatti la radiazione diffusa dalla lampada, ovvero il fatto che la sorgente è estesa e il fascio luminoso non è concentrato, **produce disturbi sullo schermo, non consentendo di identificare in modo distinto le frange**.

Dunque si è posto il **diaframma** sui binari in una posizione tale da **schermare l'interferometro** dalla **radiazione diffusa ed emessa** dalla sorgente estesa. In questo modo, riducendo anche la dimensioni del foro del diaframma, **si è in grado di limitare e definire il fascio luminoso incidente**



sulla lente convergente e isolare lo schermo dalla luce diffusa della lampada che non è interessante (in quanto non passa nell'interferometro) per l'esperienza.

Fondamentale in tali operazioni è stato anche **isolare il sistema**, oltre che dalla radiazione diffusa dalla sorgente al sodio, **da sorgenti esterne** (luci degli altri banchi ottici,...). Per vedere in modo **migliore le frange**, inoltre, si è strutturato il sistema in modo che **il fascio indirizzato a partire dalla radiazione prodotta dalla lampada al Sodio, fosse il più intenso possibile** (compatibilmente con l'allineamento e l'isolamento da sorgenti secondarie). Infatti, subendo all'interno dell'interferometro, continue riflessioni e rifrazioni, perde parte della sua intensità giungendo sullo schermo con intensità inferiore. **Massimizzando l'intensità del fascio all'ingresso dell'interferometro si è in grado di rendere più intense le frange osservate sullo schermo, ovvero più nitide e delineate.**



[Era possibile osservare la presenza delle frange di interferenza sullo schermo, anche senza porre la lente convergente o il diaframma, se l'interferometro era correttamente configurato e impostato (posizione e inclinazione degli specchi,...). L'utilizzo di tali strumenti serve a rendere più evidente la presenza delle frange per effettuare le successive misure.]

Una volta operato in questo modo **la raccolta dei dati è del tutto analoga a quella operata nel caso del laser verde e del laser rosso**: si raccolgono coppie di valori (d, N) = (valore sulla vite micrometrica, numero di frange passate per un punto fissato dello schermo) e a partire dalla relazione $2 n_0 D = N \lambda$, con N il numero di frange contate, $n_0 = 1$ (indice di rifrazione dell'aria), D lo spostamento dello specchio mobile (pari a $kd = 0.1987 d$, con d il valore letto sulla vite micrometrica), è possibile ricavare la **λ della radiazione emessa** dalla sorgente, ovvero della **radiazione della lampada al Sodio**.

La radiazione emessa dalla lampada al Sodio è **policromatica**, dato che la **lampada utilizzata** presenta diverse **righe spettrali di frequenza differente**. Ciò implica che la **radiazione complessiva** avrà **lunghezza circa pari a quella in cui emette massimamente la lampada** (ovvero in cui la lampada presenta il massimo di emissione, in termini di intensità): se la radiazione emette **tutte le componenti cromatiche con la medesima intensità** la radiazione emessa sarà **bianca**, al contrario se **una delle componenti prevale sulle altre per intensità**, allora la **radiazione assumerà**

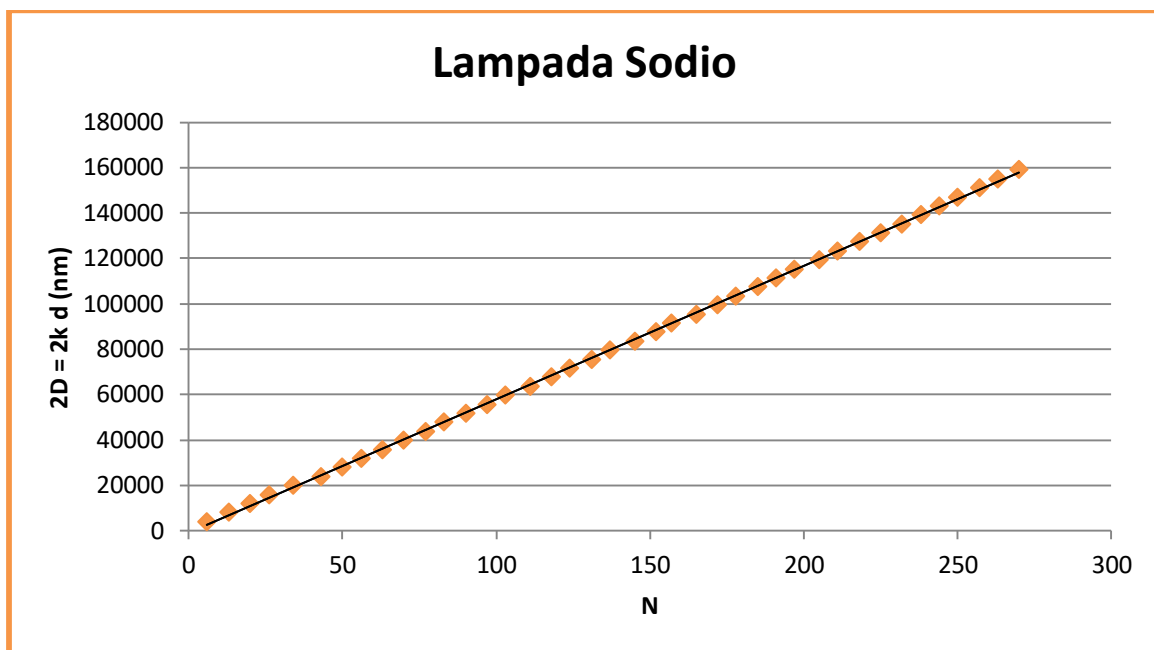
il colore caratteristico di tale λ (opportunamente mediato a causa della presenza delle altre componenti cromatiche). Dal colore della radiazione, che si presenta **gialla**, è possibile affermare che **il massimo di emissione della radiazione emessa, nel visibile, si ponga in corrispondenza della lunghezza d'onda approssimativamente sui 589 nm**. È possibile verificare la correttezza di tale affermazione rilevando sulle tabelle teoriche delle righe spettrali del Sodio, che le righe con maggiore intensità si pongono in corrispondenza delle lunghezze d'onda proprie del colore giallo (doppietto,...).

Dunque ci si aspetta che la lunghezza d'onda rilevata sperimentalmente si ponga in un intorno di **$\lambda = 589 \text{ nm}$, o comunque nel range del giallo**.

In questo caso però **non è possibile verificare la consistenza della lunghezza d'onda rilevata sperimentalmente con una λ teorica, dato che si è identificato unicamente un range di valori possibili, previsti teoricamente, e non un valore certo** (infatti il massimo di emissione sarà nel giallo, ma la λ della radiazione dipende anche dalle altre componenti e dalla loro intensità).

È possibile, quindi, effettuare **una regressione sui dati sperimentali raccolti**, infatti ci si aspetta una relazione lineare tra $x = N$ e $y = 2D = 2k d$. La relazione attesa sarà nella **forma $y = A + Bx$** , con **$B = \text{coefficiente angolare} = \lambda$** lampada Sodio.

Operando in tal modo si ottengono i seguenti dati.



Graficamente si osserva che **i dati sperimentali presentano un andamento lineare**; inoltre anche **l'indice di correlazione lineare $R = 0.99988$** è indicatore di una **correlazione lineare altamente significativa** [Tabelle Taylor]. Ciò è in accordo con le **previsioni teoriche** per cui la relazione tra le due grandezze (N e $2k d$) doveva **essere lineare**.

È quindi possibile ricavare, **dal coefficiente angolare della retta di regressione**, la lunghezza d'onda della radiazione emessa dalla lampada al Sodio.

$$B = \lambda_{\text{Sodio - sperimentale}} = 588 \pm 1.4 \text{ nm}$$

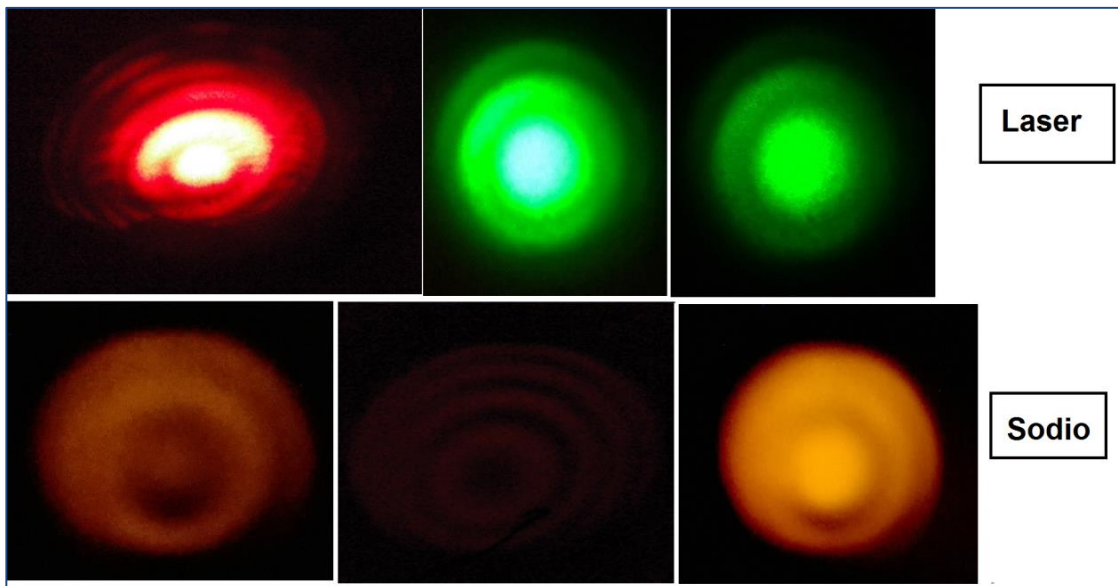
Tale valore rientra nel range delle lunghezze d'onda del giallo ed è quindi in accordo con le previsioni teoriche per cui la lunghezza d'onda della radiazione emessa dalla lampada al Sodio fosse nel range del giallo, in un intorno di $\lambda = 589 \text{ nm}$.

[Anche per il Sodio si è tentato di raccogliere dati relativi al passaggio delle frange mediante il fotodiode PASCO. Si osserva che in questo caso si hanno ulteriori criticità dovute al fatto che l'intensità delle figure di interferenza è estremamente bassa e dunque si osservano anomalie dovute a ciò nel grafico della tensione rilevata dal fotodiode in funzione del tempo.]

Spot e frange di interferenza circolari

Gran parte delle operazioni precedentemente descritte e delle misure, sono state effettuate osservando frange rettilinee. Infatti era più semplice determinare la configurazione dell'interferometro tale per cui le frange risultavano rettilinee, piuttosto che la configurazione in cui gli specchi del sistema fossero ben perpendicolari, a comporre delle frange circolari. Ciò non determinava errori nella determinazione di N (numero di frange), anzi rendeva più semplice il conteggio "a occhio" di tale valore: le frange rettilinee "scorrono" sullo schermo, mentre quelle circolari risultano pulsare, rendendo meno netta e definita la separazione tra una frangia e la successiva e quindi meno semplice da identificare l'istante in cui avviene il passaggio, per un punto fissato, della frangia scura (o chiara).

Si è comunque operato, modificando i parametri del sistema (facendo effettuare allo schermo fisso movimenti basculanti tramite le apposite manopole, inserendo lenti convergenti,...) nel tentativo di individuare anche le frange circolari.



Una volta identificate le frange circolari si è tentato di raccogliere i dati relativi all'intensità della radiazione sullo schermo (ovvero delle frange di interferenza sullo schermo) tramite fotodiode. Anche in questo caso si rilevano i problemi descritti in precedenza e dunque si è preferito non rilevare il numero di frange passate tramite questo metodo (fotodiode) in nessuna delle diverse configurazioni (frange rettilinee o frange circolari).

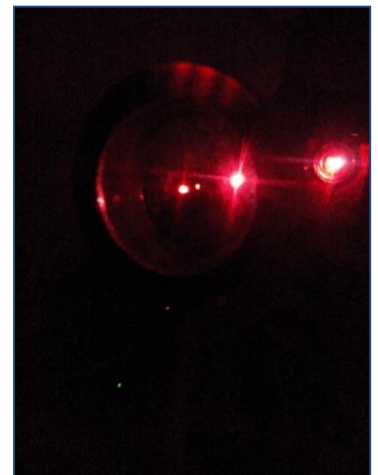
Risultati finali e discussione (commenti su plausibilità dei risultati ed eventuali confronti con dati già conosciuti):

Discussione errori casuali

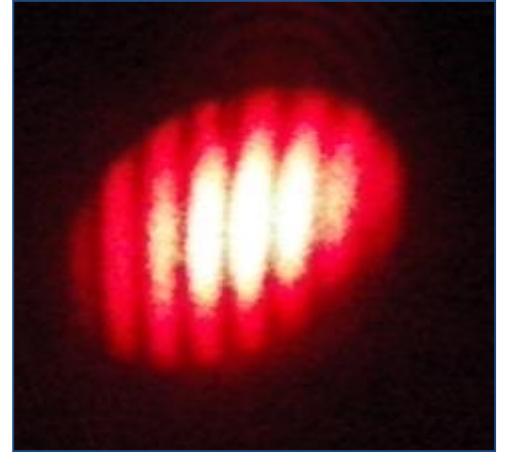
1. **Indice di rifrazione dell'aria non uniforme durante l'esperienza** (dato che poteva variare la temperatura nel laboratorio) e **non uniforme nelle zone attraversate dalla radiazione studiata. Inoltre si è assunto $n_0 = n_{aria} = 1$** , in realtà tale valore **non è perfettamente 1** e dipende dalla temperatura e dalla pressione. Questo errore influenza le misure, dato che si fa uso della relazione $2 n_0 D = N\lambda$, che dipende dall'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga la radiazione. In base alle zone dove si propaga la radiazione e dalle condizioni generali del laboratorio n avrà valori leggermente differenti: ciò influenza le esperienze in modo casuale dato che non è controllabile in modo diretto il valore dell'indice di rifrazione nelle zone ove passa il fascio luminoso studiato.

Discussione errori sistematici

1. **Movimenti del banco di lavoro o del pavimento**, che provocano istantanee e considerevoli variazioni dell'immagine di interferenza sullo schermo. Ciò è diretta conseguenza dell'elevata sensibilità del sistema: un leggero movimento degli specchi e della lastra semiriflettente provoca la modifica immediata della figura di interferenza. Per evitare questo errore si sarebbe potuto porre l'interferometro su un banco isolato dal pavimento operando le misure in condizioni migliori. Non è stato possibile effettuare le raccolte dati in tali modalità quindi si è deciso di prestare attenzione a non urtare il banco di lavoro durante le misure e si interrompevano le misure tutte le volte che si osservava una rapida oscillazione delle frange e una modifica della figura di interferenza imputabile a movimenti del pavimento o del banco di lavoro;
2. **Svantaggi del fotodiode PASCO**, già delineati in precedenza: si è evitato di operare sottoposti agli errori derivanti dall'utilizzo del fotodiode PASCO, effettuando misure "a occhio" con conteggio diretto delle frange passate. Per ovviare a questo problema e poter utilizzare il fotodiode PASCO per il conteggio delle frange, si sarebbe potuto costruire un sistema in grado di effettuare la movimentazione dello specchio mobile in modo automatizzato. In tal modo si ovvierebbe a tutte le problematiche legate alla rotazione manuale della vite micrometrica. Le altre problematiche (isolamento, movimento del banco di lavoro,...) invece sono risolubili in metodi già delineati in precedenza (opportuni sistemi di isolamento del fotodiode da sorgenti esterne, posizionare il sistema su un banco isolato dal pavimento,...);
3. **Errato allineamento del sistema**, non consentirebbe di rilevare le frange della figura di interferenza. Si è evitato questo errore effettuando delle operazioni preliminari di allineamento, come descritto in precedenza, mediante il laser;



4. **Frange non ben definite e delineate**, che renderebbero difficoltose le operazioni di conteggio delle frange passate. Ciò sarebbe determinato dall'influenza sorgenti esterne (lampade del banco di lavoro, luce naturale attraverso la porta,...) e dall'intensità della radiazione insufficiente (dovuta alla presenza del diaframma e delle continue riflessioni dei raggi, soprattutto per la lampada al Sodio che presenta intensità inferiore rispetto al laser).



Si è evitato questo errore isolando il sistema (e in particolare lo schermo) da sorgenti esterne, chiudendo il diaframma solo parzialmente per verificare l'allineamento, ma lasciando passare lo spot completo, operando in modo da massimizzare l'intensità della radiazione incidente sullo schermo. Altre operazioni sono state quelle di regolare lo schermo fisso in modo tale da rendere le frange (rettilinee) orizzontali o verticali, per semplificare le successive misure;

5. **Non corrispondenza tra frange e vite micrometrica**: ovvero ad un numero intero di frange passate per il riferimento (ovvero sfasamento dei raggi pari ad un multiplo intero della lunghezza d'onda) potrebbe corrispondere un valore sulla vite micrometrica non segnalato mediante tacche, ovvero la posizione della vite sarebbe media tra due tacche. Dunque si è deciso di operare ruotando la vite micrometrica fino ad una tacca desiderata contando il numero di frange (e non il viceversa, ovvero fissare un numero di frange e leggere il valore sulla vite), in tal modo si aggirava il problema della corrispondenza tacca-numero di frange. Operando in questo modo si poteva verificare che ad una tacca sulla vite corrispondeva sempre un numero di frange passate intero (N): ciò è anche conseguenza del fatto che operando "ad occhio" non si era in grado di contare il numero di passaggi in modo perfetto dato che le frange presentavano uno spessore e in genere ci si riferiva al loro segmento medio, anche se l'occhio faticava ad interpretarlo. Quindi poteva essere anche un $N \pm dN$, comunque l'errore era nettamente inferiore rispetto all'operare nel metodo opposto;



6. **Utilizzare la livella per allineare il laser**: tale operazione è errata, dato non si sa se il bulbo all'interno del parallelepipedo nero sia correttamente orientato (parallelo al resto della struttura del laser) o inclinato, generando un fascio laser inclinato rispetto alle superfici della "scatola nera". Al posto di allineare il laser tramite la bolla si opera tramite il diaframma e la verifica del fatto che l'altezza del fascio sia costante (anche con l'inserimento della lente divergente);
7. **Incidenza del fascio non perfettamente normale agli specchi**: è possibile che l'incidenza del fascio non sia normale, nel caso in cui l'angolo di incidenza sia piccolo è possibile osservare comunque le frange in modo corretto (rettilinee) e sono trascurabili eventuali correzioni legate alla incidenza non normale ($\cos\theta$ con θ angolo di incidenza). Nel caso in cui l'incidenza avvenga ad un angolo θ , non piccolo, allora è necessario prevedere la presenza di un termine correttivo $\cos\theta$ moltiplicativo.

Conclusioni

Osservando i **dati sperimentali e la loro analisi** è possibile affermare che si è **operato correttamente** e che i **risultati ottenuti sono in linea con le previsioni teoriche**. Ciò è evidente in diversi elementi delineati in precedenza: **nei valori degli indici di correlazione lineare**, che sono indicatori di correlazioni lineari **altamente significative** e quindi verificano la **correttezza delle relazioni teoriche**, nel valore del **parametro t**, che verifica **la consistenza della lunghezza d'onda sperimentale e teorica del laser verde**, **nei grafici rappresentati**, nel valore della lunghezza d'onda della radiazione al Sodio, che si pone nel range previsto teoricamente,...

Inoltre il fatto che si siano viste sia le **frange circolari** che **quelle rettilinee**, consente di verificare la **correttezza delle operazioni di allineamento effettuate preliminarmente**.

Si può quindi **affermare di aver effettuato le corrette operazioni di allineamento e configurazione del sistema, necessarie per le successive misure**. I risultati ottenuti a partire dalle misure effettuate sono **consistenti con le previsioni teoriche**, dunque i dati sperimentali **sostengono in modo ottimale la teoria**.