

INTERFERENZA DA LAMINA SOTTILE

Jacopo Pedroni
Elisa Milani

TEORIA

Interferenza:

Questa esperienza si basa sul fenomeno dell'interferenza da lamine sottili a facce piane. L'interferenza è un fenomeno che avviene tra due o più onde coerenti e aventi la stessa frequenza. Prese due onde piane monocromatiche polarizzate linearmente lungo la stessa direzione, ovvero del tipo $\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \sin(kx_1 - \omega t + \phi_1)$ e $\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \sin(kx_2 - \omega t + \phi_2)$ e aventi la stessa ampiezza E_0 , frequenza ω e vettore d'onda k , la sovrapposizione delle due da un'onda risultante con intensità data dalla relazione:

$$I = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

dove $\delta = k(x_2 - x_1) + \phi_2 - \phi_1$.

Per due onde in fase, o come nel caso che andremo a studiare noi, due onde coerenti aventi la stessa sorgente, l'intensità in un dato punto sarà determinata solo dalla differenza di cammino ottico tra le due onde iniziali.

Quando $\delta = 0 \pm 2\pi k$ con $k \in \mathbb{N}$ si avrà interferenza costruttiva, ovvero $I = 4I_0 = I_{max}$.

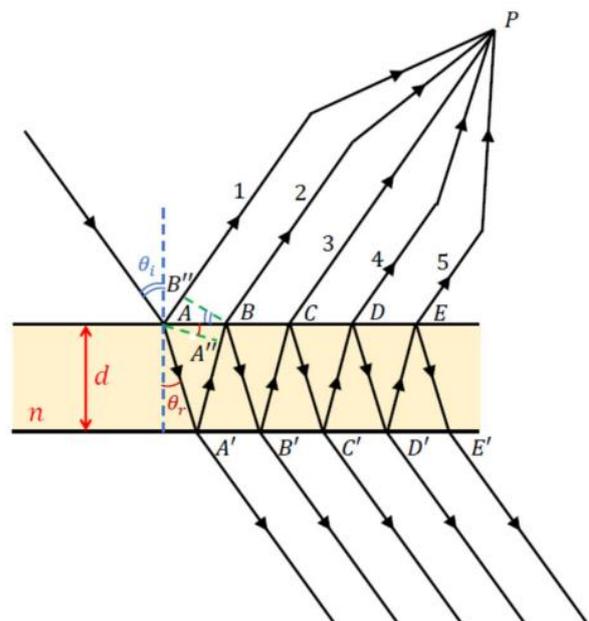
Quando $\delta = \pi \pm 2\pi k$ con $k \in \mathbb{N}$ si avrà interferenza distruttiva, ovvero $I = 0$.

Interferenza da lamina sottile:

Per osservare il fenomeno dell'interferenza da lamina sottile prendiamo una lamina di spessore d (confrontabile con λ) come in figura sotto, fatta di un materiale con indice di rifrazione $n > 1$. Se una radiazione luminosa di lunghezza d'onda λ incide con angolo θ_i sulla lamina in un punto A essa sarà in parte rifratta con angolo θ_r e in parte riflessa con angolo θ_i all'interno della lamina. Se le due facce della lamina sono parallele come in figura, il raggio rifratto viene riflesso in A' e rifratto di nuovo in B , uscendo dalla lamina parallelo al primo raggio riflesso in A e così via per una serie di raggi tutti paralleli ed uscenti dalla lamina in punti $C, D, E \dots$ equidistanti tra di loro. Il raggio riflesso in A viene in particolare sfasato di π poiché riflesso su un mezzo ad indice di rifrazione maggiore di quello in cui giace. Questi raggi paralleli possono interferire tra di loro e si può dimostrare che si presentano minimi e massimi di interferenza, rispettivamente, per le condizioni:

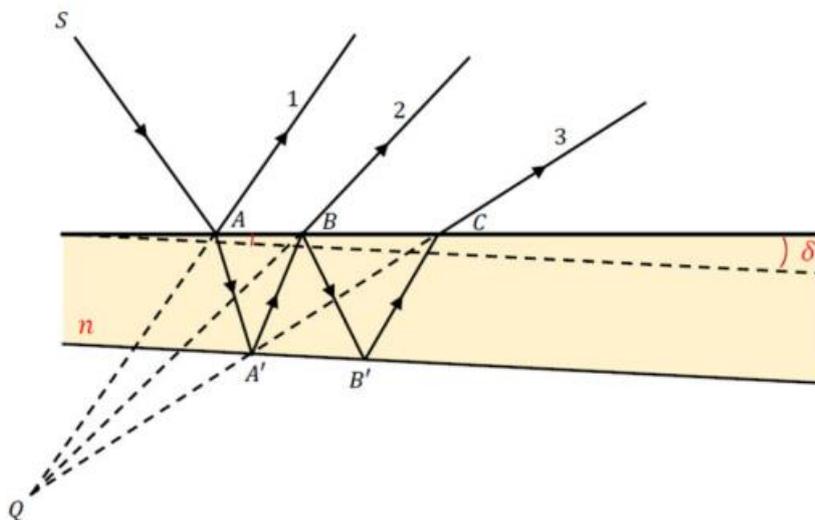
$$2nd\cos(\theta_r) = m\lambda$$

$$2nd\cos(\theta_r) = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$



Da queste relazioni e dalla dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente si può dedurre che una radiazione luminosa bianca verrà scomposta nelle varie componenti cromatiche e per un dato spessore d della lamina si avrà interferenza costruttiva per alcune lunghezze d'onda del visibile e distruttiva per altre facendo apparire la lamina di un particolare colore. Questo fenomeno prende il nome di iridescenza.

Se invece la lamina sottile ha due facce non perfettamente parallele come nella figura sotto, anche i raggi uscenti non saranno perfettamente paralleli ma sembreranno provenire da un punto esterno alla lamina. Questo farà sì che una radiazione luminosa a spettro bianco venga scomposta come nel caso precedente ma per un osservatore appariranno varie frange di colore date da interferenza e dispersione, non uniformi tra di loro. Queste frange di colore appariranno più sottili e ravvicinate dove lo spessore della lamina varia molto e più larghe ed uniformi dove lo spessore della lamina varia poco. Dove lo spessore della lamina varia linearmente le frange appaiono tutte della stessa larghezza, equidistanti ed uniformi.



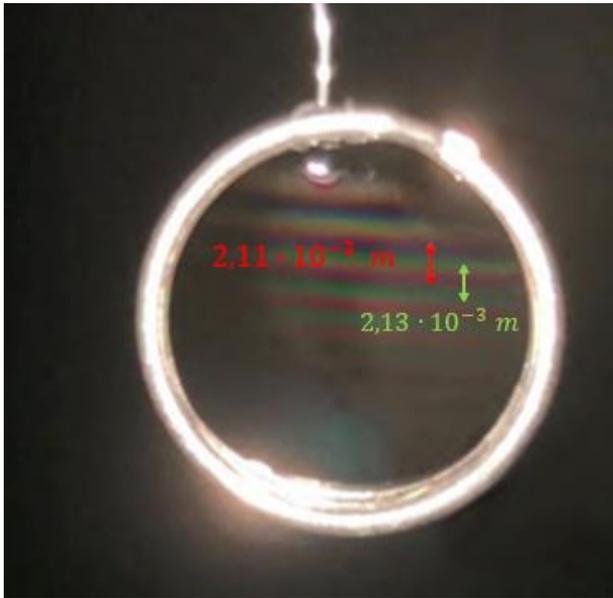
PROCEDIMENTO

Strumenti: acqua, sapone liquido, anelli di diversa misura, filo di ferro, torcia del telefono.

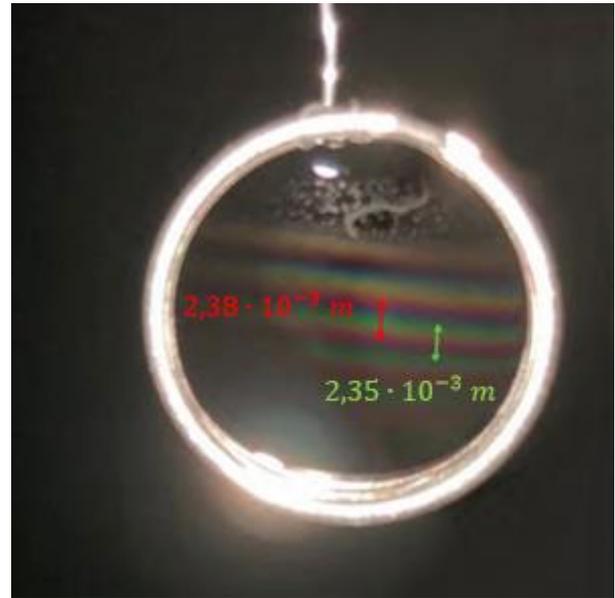
Innanzitutto abbiamo posizionato il telefono in un portamatite rettangolare in modo che fosse perpendicolare al tavolo e quindi che il flash illuminasse lo schermo perpendicolarmente. Successivamente abbiamo fatto in modo che l'anello fosse perpendicolare al fascio di luce e in verticale rispetto al tavolo aiutandoci con del filo di ferro.

Prima di iniziare a visualizzare il fenomeno bisogna prestare attenzione ad alcuni dettagli. Se, come nel nostro caso, la sorgente di luce bianca è un telefono bisogna fare in modo che la cover non interferisca con l'esperimento. Una cover colorata infatti non permette di visualizzare tutto lo spettro dei colori, ma genera solo frange chiare e scure, per questo motivo abbiamo usato una cover bianca. Infine per visualizzare il fenomeno in riflessione conviene utilizzare uno schermo nero in modo da visualizzare bene tutti i colori e lavorare al buio.

A questo punto abbiamo iniziato con un anello di diametro $D_1 = (2,2 \pm 0,1) \text{ cm}$. Lo abbiamo immerso in un recipiente riempito con acqua e sapone e, dopo qualche secondo, abbiamo notato la comparsa di frange orizzontali colorate:



Prima comparsa delle frange



Appena prima dello scoppio della lamina

A causa della gravità l'acqua saponata tenderà, col tempo, a depositarsi verso il basso dell'anello. Questo causa quindi una variazione di spessore nella lamina. La variazione di spessore non sarebbe percettibile ad occhio nudo, se non fosse per le bande colorate. Infatti, come visto prima, il diverso spessore è responsabile del diverso colore osservato. In particolare, sappiamo dalla teoria che, per raggi ad incidenza quasi normale ($\cos(\theta_r) \cong 1$), i raggi di luce riflessi fanno interferenza, distruttiva quando $d = m \frac{\lambda}{2n}$ e costruttiva quando $d = (2m + 1) \frac{\lambda}{4n}$. Essendo d un parametro dipendente dalla lunghezza d'onda, ogni colore avrà valori diversi di spessore per cui avrà interferenza costruttiva, e quindi valori diversi di d per cui quel particolare colore sarà visibile.

Notiamo inoltre che col passare del tempo le frange non solo aumentano di spessore ma quelle successive dello stesso colore si allontanano. Questo è dovuto al fatto che col tempo lo spessore della lamina diventa più uniforme, infatti più le frange sono sottili e ravvicinate più c'è variazione di spessore. Questo fenomeno si vede abbastanza bene nelle due immagini di prima.

Per misurare la distanza tra le frange abbiamo usato Tracker, impostando come parametro di calibrazione il diametro dell'anello.

Grazie a queste misure possiamo determinare, approssimativamente, lo spessore che corrisponde a determinate bande colorate. Ad esempio noi abbiamo misurato lo spessore relativo al secondo e al terzo massimo di interferenza del colore rosso. Il secondo massimo è la seconda frangia rossa che vediamo nella figura sopra. Il colore rosso ha una λ compresa tra i 625 e i 740 nm: consideriamo come lunghezza d'onda un valore medio, cioè $\lambda_{rosso} = (682,5 \pm 57,5) \text{ nm}$, con un errore dato da $\frac{\lambda_{max} - \lambda}{2}$. Lo spessore relativo al secondo massimo è dunque, con $m = 1$ e $n = 1,33$, è dunque:

$$d_1 = \frac{3\lambda}{4n} = (384,9 \pm 32,6) \text{ nm}$$

Per il massimo successivo invece lo spessore sarà $d_2 = (2m + 1) \frac{\lambda}{4n} = \frac{5\lambda}{4n} = (641,4 \pm 54,3) \text{ nm}$. La variazione di spessore tra il secondo e il terzo massimo del rosso è dunque

$$\Delta d = d_2 - d_1 = (256,3 \pm 86,9) \text{ nm}$$

C'è un altro aspetto da chiarire che si nota bene nella seconda delle due foto sopra: la zona apparentemente nera (in realtà è trasparente) che si forma nella parte alta della bolla. In particolare questa si forma dopo un tempo sufficientemente lungo da permettere a quasi tutta l'acqua saponata di depositarsi verso il basso. Quella che osserviamo infatti è una zona in cui la bolla di acqua saponata è troppo sottile per permettere riflessione, poiché come spiegato prima, la prima onda riflessa sulla superficie viene sfasata di π rispetto all'onda incidente; quindi, se lo spessore della lamina sottile è sufficientemente basso, tra il primo e il secondo raggio riflesso ci sarà una differenza di cammino ottico praticamente nulla ed uno sfasamento di mezzo periodo, facendo interferire i due in maniera distruttiva.

Grazie ai dati che abbiamo possiamo quindi stimare lo spessore minimo per cui si ha interferenza costruttiva. Ci basta infatti considerare il colore con la lunghezza d'onda minore nello spettro del visibile (viola) che quindi corrisponde allo spessore minimo per avere interferenza costruttiva nel visibile. Usando come $\lambda = 380\text{nm}$, che è il valore della lunghezza d'onda del viola, determiniamo lo spessore minimo per avere interferenza costruttiva:

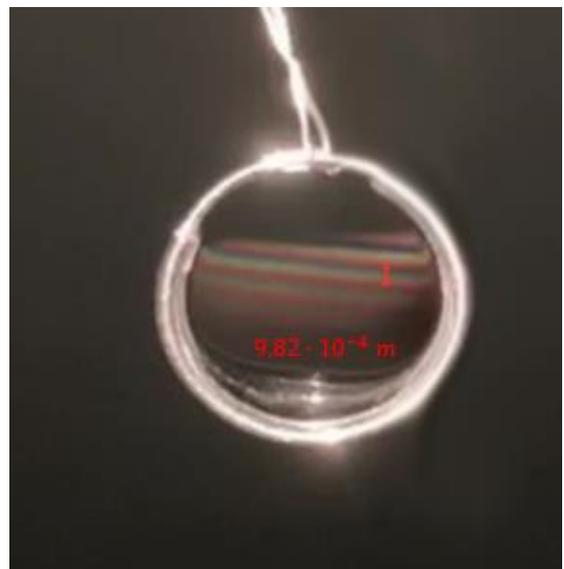
$$d_{min} = \frac{\lambda}{4n} = (71,4 \pm 0,6) \text{ nm}$$

Questa zona avrà uno spessore molto minore della minima lunghezza d'onda del visibile ($\lambda = 380\text{nm}$), tanto da poter essere considerato trascurabile in confronto ad essa.

Abbiamo infine ripetuto l'esperimento con anelli di grandezza diversa. In particolare:



$D = 2,0 \text{ cm}$



$D = 1,2 \text{ cm}$

Nella prima foto notiamo che nonostante la foto sia stata scattata all'inizio del fenomeno, le frange sono più distanti tra di loro rispetto al primo anello, di diametro maggiore.

Nella seconda foto invece vediamo il fenomeno dopo qualche secondo e notiamo che le frange sono molto sottili e molto più ravvicinate rispetto al primo e al secondo anello.

CONCLUSIONI

Nonostante i mezzi piuttosto rudimentali che abbiamo utilizzato siamo riusciti ad osservare un fenomeno senza particolari anomalie e a spiegare quasi tutto quello che siamo stati in grado di osservare attraverso la teoria.

Possibili fonti di errori sono sicuramente state: l'ipotesi che $n = 1,33$ per l'acqua che abbiamo utilizzato nonostante contenesse sapone ad una concentrazione ignota e la non perfetta perpendicolarità della radiazione incidente, che non ci hanno permesso di avere una stima precisa del valore di $d = \frac{(2m+1)\lambda}{4\cos(\theta_r)n}$; l'utilizzo di un software come Tracker, di cui non conosciamo la reale precisione nell'effettuare misure, e tutte le varie modifiche che le immagini possono aver subito a causa di compressioni file e conversioni di formato che ci sono state nel loro trasferimento da telefono a computer.

Inoltre, abbiamo riscontrato e in qualche modo superato alcune difficoltà per poter ottenere delle immagini il più possibile chiare e nitide del fenomeno, come ad esempio:

- la riflessione della luce sull'anello stesso, problema che seppur non eliminabile abbiamo, almeno in parte, aggirato regolando manualmente fuoco e luminosità della fotocamera;
- la riflessione della luce sullo sfondo, problema che abbiamo risolto semplicemente utilizzando un cartoncino nero come sfondo così da assorbire più luce possibile;
- la luce riflessa su bolla e anello che a sua volta veniva riflessa sul telefono utilizzato come fotocamera "portando con sé" il colore del telefono ed interferendo con la misura, problema risolto semplicemente utilizzando una cover bianca per il telefono.

Per quanto riguarda i diversi comportamenti osservati utilizzando anelli diversi non abbiamo una vera e propria spiegazione di quanto osservato ma pensiamo che alcuni fattori influenti possano essere spessore, larghezza e materiale dell'anello utilizzato.

ERRORI

Gli unici errori valutati sono stati quelli sulla quantità $d_m = (2m + 1)\frac{\lambda}{4n}$ e li abbiamo calcolati come:

$$\delta d_m = (2m + 1) \sqrt{\left(\frac{1}{4n}\right)^2 \delta \lambda^2 + \left(\frac{\lambda}{4n^2}\right)^2 \delta n^2}$$