

# Òptica

## Pràctica 5. Interferòmetre de Michelson

Marc Ballester Ribó - Grup D2

6 de gener de 2021

### Resum

L'objectiu d'aquesta pràctica és l'estudi, qualitatiu i quantitatiu, de l'ús i comportament d'un interferòmetre de Michelson, un dels sistemes clàssics d'obtenció d'interferències per divisió de feix. L'instrument consta, essencialment, d'una làmina separadora  $L$  que reflecteix i transmet a parts iguals la llum que hi incideix, enviant-la a dos miralls perpendiculars entre si,  $E_1$  i  $E_2$ , per a que finalment retorni a  $L$  i una part es reflecteixi o transmeti a l'observador. Estudiant la variació del patró interferencial observat segons la diferència de longitud dels braços de l'interferòmetre, s'ha obtingut la longitud d'ona d'un làser díode vermell i una font de llum de sodi, obtenint també la separació de la longitud d'ona del doblet de sodi. Tots els valors obtinguts experimentalment han resultat compatibles amb els esperats. Finalment, s'ha analitzat el comportament del sistema quan se l'il·lumina amb llum blanca en condició d'equidistància, obtenint també un patró interferencial destacable.

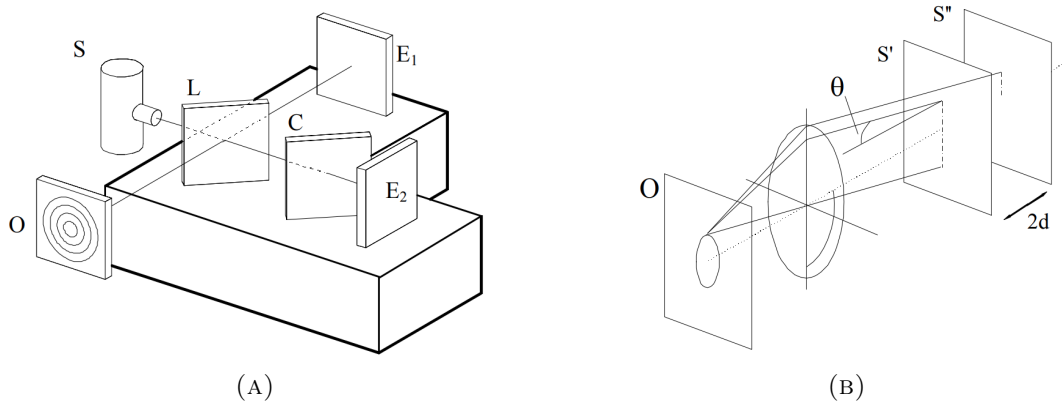


FIGURA 1: (A) Diagrama de l'interferòmetre de Michelson i (B) esquema equivalent de la formació d'anells d'interferència.

## 1 Patró interferomètric

El primer pas que s'ha realitzat és la calibració i posada a punt de l'interferòmetre, tot regulant finament l'orientació del mirall  $E_2$  per tal d'aconseguir-ne la perpendicularitat perfecta amb  $E_1$ . En aquestes condicions, amb el sistema òptic centrat, es poden observar anells d'interferència centrats.

Ara, es proposa estudiar qualitativament el comportament interferomètric del sistema quan es modifica la longitud d'un dels braços, mitjançant la regulació micromètrica de la posició del mirall  $E_1$ . S'observa que, en un desplaçament continu, apareixen o desapareixen anells d'interferència en funció de com es varia la longitud del braç.

Sigui  $d$  la diferència de longitud dels dos braços, que s'expressa

$$d = LE_2 - LE_1 \quad (1)$$

on  $LE_i$  és la distància entre la làmina separadora  $L$  i el mirall  $E_i$ . Siguin  $S'$  i  $S''$  les imatges de la font en els miralls  $E_1$  i  $E_2$ , respectivament. La diferència de camí òptic, observada en  $O$ , entre dos rajos provinents de  $S'$  i  $S''$  amb un angle  $\theta$ , ve donada per

$$\Delta = 2d \cos \theta \quad (2)$$

d'on es dedueix que

- s'observaran màxims quan  $2d \cos \theta = k\lambda$ , i
- s'observaran mínims quan  $2d \cos \theta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ,

on  $k \in \mathbb{N}$  i  $\lambda$  és la longitud d'ona dels rajos.

Per un anell<sup>1</sup> fixat, el producte  $k\lambda$  és constant, d'on, tenint en compte la relació entre el camí òptic i la longitud d'ona en un màxim, si la distància  $d$  augmenta, el terme  $\cos \theta$  ha de disminuir. Tenint en compte que per  $\theta \in [0, \pi/2]$ , la funció  $\cos \theta$  és decreixent, es dedueix que en aquestes condicions  $\theta$  augmenta. És per això que, quan s'allunya el mirall  $E_1$ , s'observa l'aparició d'anells d'interferència pel centre de la imatge.

De manera simètrica, es pot explicar la desaparició d'anells pel centre quan es disminueix la distància  $d$ .

## 2 Longituds d'ona

En aquest apartat es calculen les longituds d'ona de les diferents fonts de l'interferòmetre a partir de les mesures realitzades en el patró interferomètric i en el propi sistema òptic.

Considerant el punt d'incidència normal, es té  $\theta = 0^\circ \Rightarrow \cos \theta = 1$ , i per diferències  $d_1$  i  $d_2$  de longitud dels braços, es té

$$\left. \begin{array}{l} 2d_1 = k_1\lambda \\ 2d_2 = k_2\lambda \end{array} \right\} \Rightarrow 2(d_1 - d_2) = (k_1 - k_2)\lambda = n\lambda \quad (3)$$

on  $n \in \mathbb{Z}$  és el nombre de màxims que apareixen o desapareixen pel centre de la imatge, essent  $n > 0$  si n'apareixen i  $n < 0$  si en desapareixen.

Vist que el cargol micromètric que regula el desplaçament del mirall  $E_1$  té una reducció mecànica 1 : 5, es té que  $d_1 - d_2 = (D_1 - D_2)/5$ , on  $D_i$  són els valors mesurats en l'escala del micròmetre. Finalment, de (3) es desprèn que

$$\lambda = \frac{2}{5n} (D_1 - D_2) \quad (4)$$

### 2.1 Làser díode

Incorporant com a font del sistema òptic un làser díode expandit amb una lent, s'ha obtingut que, entre  $D_1 = (4.320 \pm 0.005) \text{ mm}$  i  $D_2 = (4.230 \pm 0.005) \text{ mm}$  apareixen  $n = 55 \pm 2$  anells d'interferència<sup>2</sup>. L'error en les distàncies s'ha pres com la meitat de la resolució de l'escala del micròmetre.

Aplicant (4) i propagant les incerteses corresponents, s'obté que  $\lambda_{\text{làser}} = (650 \pm 60) \text{ nm}$ , valor que és compatible amb el d'un làser díode de color vermell.

<sup>1</sup>D'ara en endavant, el terme *anell* fa referència a una zona d'interferència constructiva.

<sup>2</sup>En la secció 3 es discuteix tot allò relatiu a la incertesa que presenten les mesures experimentals.

## 2.2 Làmpada de sodi i mesura del doblet del sodi

En aquest cas s'ha il·luminat el sistema mitjançant una làmpada de sodi, que emet en dues longituds d'ona molt properes  $\lambda_{\text{Na}}$  i  $\lambda'_{\text{Na}}$ , anomenades *doble del sodi*.

Per a mesurar la longitud d'ona de la font a partir del patró interferomètric, s'ha considerat que  $\lambda_{\text{Na}} \approx \lambda'_{\text{Na}}$  i s'ha procedit de manera anàloga a la secció anterior, realitzant dues mesures en regions de separació del mirall diferents per a més precisió.

- **Mesura 1.** S'ha obtingut que entre  $D_1 = (6.720 \pm 0.005)$  mm i  $D_2 = (6.800 \pm 0.005)$  mm desapareixien  $n = -54 \pm 2$  anells, per tant, aplicant (4) s'obté que  $\lambda_{\text{Na},1} = (590 \pm 60)$  nm.
- **Mesura 2.** S'ha obtingut que entre  $D_1 = (8.020 \pm 0.005)$  mm i  $D_2 = (7.940 \pm 0.005)$  mm apareixien  $n = 58 \pm 2$  anells, per tant, aplicant (4) s'obté que  $\lambda_{\text{Na},2} = (550 \pm 50)$  nm.

Així doncs, la longitud d'ona de la font de sodi s'ha estimat com la mitjana de les dues mesures realitzades, calculada segons (A.1), obtenint que  $\lambda_{\text{Na,av}} = (570 \pm 40)$  nm, valor que és compatible amb les longituds d'ona del doblet de sodi<sup>3</sup>  $\lambda_{\text{Na}} = 589.0$  nm i  $\lambda'_{\text{Na}} = 589.6$  nm dins del marge d'incertesa corresponent.

Mitjançant l'interferòmetre, també es pot mesurar la separació en  $\lambda$  del doblet del sodi, aprofitant el fet que les dues longituds d'ona dominants del sodi són molt properes i donen lloc a pulsacions en el contrast de la imatge. Considerant  $\lambda_{\text{Na}} < \lambda'_{\text{Na}}$ , es té que per a dues posicions de mínim de contrast consecutives,  $d_1$  i  $d_2$

$$\left. \begin{aligned} 2d_1 &= k_1 \lambda_{\text{Na}} = k'_1 \lambda'_{\text{Na}} \\ 2d_2 &= k_2 \lambda_{\text{Na}} = k'_2 \lambda'_{\text{Na}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta \lambda_{\text{Na}} := \lambda_{\text{Na}} - \lambda'_{\text{Na}} = \frac{\lambda_{\text{Na}} \lambda'_{\text{Na}}}{2(d_1 - d_2)} \approx \frac{5\lambda_{\text{Na,av}}^2}{2(D_1 - D_2)} \quad (5)$$

on s'ha aproximat el producte de les longituds d'ona pel quadrat de la longitud d'ona mitjana obtinguda anteriorment.

S'han realitzat dues mesures per a major precisió.

- **Mesura 1.** S'ha obtingut que en  $D_1 = (7.895 \pm 0.005)$  mm i  $D_2 = (6.025 \pm 0.005)$  mm hi ha mínims de contrast consecutius, d'on, aplicant (5) es té  $\Delta \lambda_{\text{Na},1} = (0.43 \pm 0.06)$  nm.
- **Mesura 2.** S'ha obtingut que en  $D_2 = (6.025 \pm 0.005)$  mm i  $D_3 = (4.630 \pm 0.005)$  mm hi ha mínims de contrast consecutius, d'on, aplicant (5) es té  $\Delta \lambda_{\text{Na},2} = (0.58 \pm 0.08)$  nm.

Finalment, la separació del doblet del sodi s'ha estimat com la mitjana entre els dos valors obtinguts, calculada segons (A.1), obtenint que  $\Delta \lambda_{\text{Na,av}} = (0.51 \pm 0.05)$  nm, que és compatible amb l'obtinguda amb els valors de la bibliografia  $\Delta \lambda_{\text{Na}} = 0.6$  nm, ja que

$$0.09 \text{ nm} = |\Delta \lambda_{\text{Na,av}} - \Delta \lambda_{\text{Na}}| \leq 2 \delta (\Delta \lambda_{\text{Na,av}}) = 0.10 \text{ nm}$$

## 3 Anàlisi de les fonts d'error experimental

En aquesta secció es discuteixen els aspectes referents a les diverses fonts d'error presents en l'experiment realitzat.

Primer de tot, cal considerar l'error intrínsec a la calibració i centrat del sistema òptic; es tracta d'una font d'error sistemàtic present durant tot el procediment experimental, que si més no, no es pot quantificar, però sí que cal tenir en compte a l'hora d'analitzar els resultats obtinguts.

Més enllà d'això, es té que les mesures de distància  $D_i$  en l'escala del micròmetre presenten un error sistemàtic associat a la resolució de l'instrument, que s'ha estimat com la meitat de la

<sup>3</sup>FONT: NIST. *Persistent Lines of Neutral Sodium (Na I)*. National Institute of Standards and Technology - NIST. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/sodiumtable3.htm>.

distància entre les marques més petites de l'escala graduada de l'instrument, vist que en molts casos els punts experimentals cauen entre dues marques consecutives. La incertesa és, doncs,  $\delta D_i = 0.005 \text{ mm} = 5 \cdot 10^3 \text{ nm}$ .

Finalment, el nombre d'anells d'interferència que apareixen o desapareixen pel centre de la pantalla d'observació quan es modifica la distància relativa dels braços de l'interferòmetre també presenta una incertesa experimental associada al fet que, una variació molt petita de  $d$  sovint provoca un canvi sobtat en  $n$ , la qual cosa és una font d'errors de comptatge. Així doncs, s'ha estimat que  $\delta n = 2$  anells.

Si s'aplica l'algorisme de propagació d'incerteses no correlacionades a l'equació (4), s'obté que

$$\delta \lambda = \frac{2}{5|n|} \sqrt{\left[(D_1 - D_2) \frac{\delta n}{n}\right]^2 + (\delta D_1)^2 + (\delta D_2)^2} \quad (6)$$

Fixat  $\delta D_i = 5 \cdot 10^3 \text{ nm}$  es té que

$$\delta \lambda = \frac{2}{5|n|} \sqrt{\left[(D_1 - D_2) \frac{\delta n}{n}\right]^2 + 5 \cdot 10^7 \text{ nm}^2}, \quad [\delta \lambda] = \text{nm}$$

d'on, vist que  $\left[(D_1 - D_2) \frac{\delta n}{n}\right]^2 \ll 5 \cdot 10^7 \text{ nm}^2$ , l'error introduït si hi ha un error de comptatge en els anells d'interferència és poc significatiu si es té en compte l'error en la mesura del micròmetre.

Els valors numèrics dels errors en la longitud d'ona i els aspectes relatius a la compatibilitat dels resultats experimentals amb els valors experimentals ja s'han detallat a la secció 2.

D'altra banda, propagant incerteses en l'equació (5), s'obté que l'error en la separació del doblet del sodi ve donat per

$$\delta(\Delta \lambda_{\text{Na,av}}) = \frac{5\lambda_{\text{Na,av}}}{D_1 - D_2} \sqrt{(\delta \lambda_{\text{Na,av}})^2 + \left[\frac{\lambda_{\text{Na,av}}^2}{2(D_1 - D_2)} \delta(D_1 - D_2)\right]^2} \quad (7)$$

amb la qual cosa, atès que l'error en el comptatge d'anells no afecta significativament a l'error en la longitud d'ona,  $\delta(\Delta \lambda_{\text{Na,av}})$  tampoc es veu substancialment afectat.

Igualment, el valor numèric del càlcul corresponent ja s'ha exposat a la secció 2.

## 4 Punt d'equidistància

Es diu que l'interferòmetre està en el *punt d'equidistància* quan la diferència entre la longitud dels braços  $d$  és nul·la. En aquesta situació, segons (2) la diferència de camí òptic entre els rajos que interaccionen és nul·la per qualsevol angle  $\theta$ , i per tant, s'espera que en la pantalla d'observació el patró interferencial sigui completament destructiu, atès que el feix provinent del mirall  $E_2$  pateix un desfasament de  $\pi$  en la reflexió.

Tot il·luminant el sistema amb una llum de mercuri i una font de llum blanca, s'ha regulat la posició del mirall  $E_1$  fins observar anells cada cop més separats i deformats. Finalment, s'arriba a la situació en què s'observen franjes de colors amb saturació màxima al voltant d'una franja completament fosca. Es pot afirmar que el sistema està en el punt d'equidistància.

El fet que s'observi un patró d'interferència es deu al fet que els miralls de l'interferòmetre no són perfectament plans, la qual cosa provoca que la diferència de camí òptic entre les ones que interfereixen no sigui constant en tot el camp visual.

Encara més, si s'apaga la llum de mercuri, se segueixen observant franjes de colors molt saturats degudes a la interferència de la llum blanca, però una petita variació en  $d$  les fa desaparèixer ràpidament. Això es deu al fet que els camps que interfereixen són coherents entre sí, al provenir de la mateixa font, però al tractar-se de llum no monocromàtica, la seva longitud de coherència és molt baixa, amb la qual cosa només és possible observar interferències de llum blanca en una regió molt propera al punt d'equidistància.



FIGURA 2: Interferències de llum blanca en el punt d'equidistància.

## A Fórmules estadístiques

### A.1 Paràmetres centrals i de dispersió

Donada una mostra de  $N$  elements  $\{x_1, \dots, x_N\}$ , definim els següents paràmetres estadístics.

- Mitjana aritmètica

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{A.1})$$

- Desviació estàndard<sup>4</sup>

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2} \quad (\text{A.2})$$

- Error estàndard

$$\delta x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.3})$$

### A.2 Estimacions lineals

Per al càlcul de les estimacions lineals s'usa la funció `ESTIMACION.LINEAL` del full de càlcul `Microsoft Excel`, que proporciona el pendent i l'ordenada a l'origen de la recta de regressió amb les seves corresponents incerteses, així com el coeficient de correlació  $R^2$  i l'error estàndard de la regressió.

### A.3 Test $\chi^2$

Donat un ajust lineal  $y = Ax + B$ , amb incertesa en la variable dependent  $\delta y$  i error estàndard de la regressió  $\delta y_{\text{reg}}$ , es defineix el *coeficient*  $\chi^2$  com

$$\chi^2 = \nu \left( \frac{\delta y_{\text{reg}}}{\delta y} \right) \quad (\text{A.4})$$

on  $\nu$  es el nombre de graus de llibertat de l'ajust. Amb això, podem definir el *coeficient reduït*  $\chi_\nu^2$  com

$$\chi_\nu^2 = \frac{\delta y_{\text{reg}}}{\delta y} \quad (\text{A.5})$$

El valor d'aquest paràmetre ens indica la bondat de l'ajust realitzat. Tenim que

- (a) si  $\delta y_{\text{reg}} \ll \delta y$  o  $\chi_\nu^2 \ll 1$ , l'ajust és acceptable i probablement s'hagi sobreestimat  $\delta y$ ;
- (b) si  $\delta y_{\text{reg}} \lesssim \delta y$  o  $\chi_\nu^2 \lesssim 1$ , l'ajust és acceptable; i
- (c) si  $\delta y_{\text{reg}} \gg \delta y$  o  $\chi_\nu^2 \gg 1$  l'ajust no és acceptable.

---

<sup>4</sup>S'ha fet servir la correcció de Bessel  $\sqrt{N/(N-1)}$  de la desviació estàndard poblacional.