

Interferòmetre de Michelson

Jan Tena, Ben Thomas

22 de gener de 2026

Resum

La pràctica consisteix a utilitzar l'interferòmetre de Michelson per observar fenòmens d'interferència de llum, un efecte produït quan feixos de llum es divideixen i es tornen a unir després de recórrer diferents camins òptics. Es tracta d'alinear amb precisió els miralls de l'interferòmetre i generar patrons d'interferència (anells) visibles. Busquem obtenir els valors de les longituds d'ona de la llum emesa, observar l'efecte de les petites diferències entre elles en el patró d'interferència, i comprendre com es produeix la interferència destructiva en el punt d'equidistància. Els resultats són compatibles amb els valors teòrics dins dels marges d'incertesa establerts amb força exactitud, de manera que podem afirmar que es compleix la teoria.

1 Introducció

L'interferòmetre de Michelson és un instrument òptic dissenyat per crear patrons d'interferència mitjançant la divisió d'un feix de llum. Funciona utilitzant una làmina semitransparent que divideix el feix en dues parts: cada part es dirigeix cap a dos miralls (M1 i M2) situats perpendicularment. Aquests feixos recorren diferents distàncies i després es tornen a combinar, generant un patró d'interferència (anells o franges) quan es projecten cap a un observador o un detector.

Les interferències són el resultat de la diferència en el camí òptic entre dues ones. Quan aquesta diferència és un múltiple sencer d'una longitud d'ona λ , les dues ones interfereixen constructivament, produint un màxim de lluminositat. En canvi, quan la diferència és un múltiple senar de $\frac{\lambda}{2}$, les ones interfereixen destructivament, creant zones fosques.

Tanmateix, aquestes zones no són línies rectes a causa de la simetria del pla. En girar el pla d'incidència al voltant del vector normal, es manté la forma circular de les interferències, donant lloc a anells concèntrics coneguts com *Fresnel Zone Plates*. Això també es pot justificar considerant que la distància òptica és constant per a formes circulars, ja que, per definició, una circumferència manté una distància fixa respecte al seu centre. Matemàticament ($k \in \mathbb{N}$):

$$\text{Màxims: } 2d \cos \theta = k\lambda$$

$$\text{Mínims: } 2d \cos \theta = (2k - 1)\frac{\lambda}{2}$$

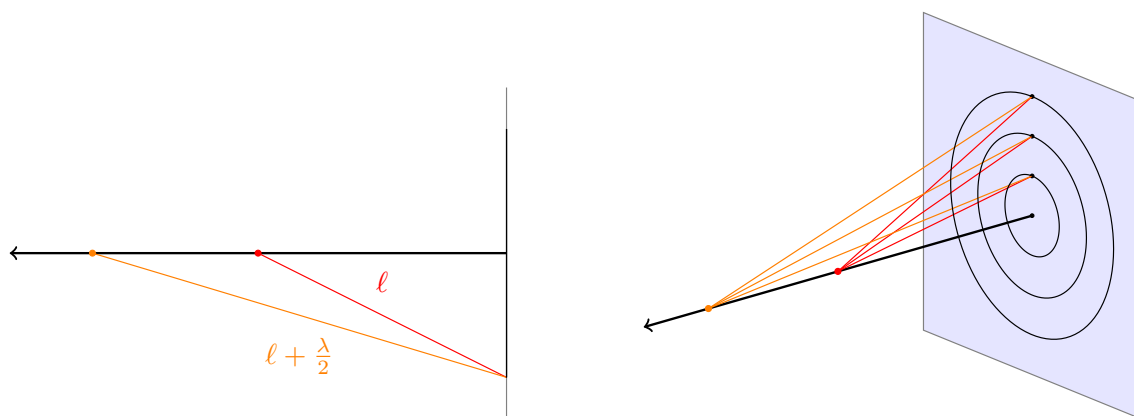


Figura 1: Esquema de la *Fresnel Zone Plate*

1.1 Fenomen de Formació i Desaparició d'Anells en el Punt d'Equidistància

Quan la distància d varia, les ones es desfassen respecte a la seva posició original, alterant la ubicació dels anells d'interferència. En particular, es pot arribar a una posició P en què hi haurà interferència destructiva al centre dels anells visibles. Si aquesta posició es pertorba lleugerament incrementant d , el radi de l'anell també incrementarà ja que no poden interferir al centre però han d'interferir a l'exterior, donant lloc a l'aparició d'anells pel centre. En disminuir d des de P , passarà l'acció contrària. Matemàticament, d i θ estan lligats, si es considera un anell en particular:

$$2d \cos \theta = ct \Rightarrow (d \uparrow \iff \cos \theta \downarrow \iff \theta \uparrow)$$

$$2d \cos \theta = ct \Rightarrow (d \downarrow \iff \cos \theta \uparrow \iff \theta \downarrow)$$

2 Mesures experimentals

Per a realitzar la mesura de les longituds d'ona del làser díode i de la llum de sodi, hem seguit un procediment basat en el patró d'interferència produït per l'interferòmetre de Michelson. Aquest patró es modifica en moure un dels miralls, provocant l'aparició o desaparició d'anells, que ens permeten calcular la longitud d'ona de la llum utilitzada.

2.1 Mesura de la longitud d'ona del làser díode i de la llum de sodi (λ)

Hem registrat la posició inicial (D_1) i final (D_2) del cargol micromètric que ajusta el mirall mòbil M_2 . Aquest moviment provoca l'aparició d'un cert nombre (n) de màxims (o mínims) en el patró d'interferència. Sabent que en l'interferòmetre el desplaçament efectiu del mirall d és una cinquena part del desplaçament del micròmetre, podem expressar la longitud d'ona de la llum com:

$$\lambda = \frac{2}{5} \frac{D_1 - D_2}{n}$$

Aquesta fórmula es basa en la diferència de camins òptics entre els feixos que es reflecteixen en els miralls M_1 i M_2 .

2.2 Mesura de la diferència de longituds d'ona del doblet del sodi ($\Delta\lambda$)

Quan s'utilitza llum de sodi, es percep una variació cíclica en el contrast dels anells d'interferència, ja que el sodi emet dues longituds d'ona properes (589.0 i 589.6 nm). Per calcular la separació entre aquestes dues longituds d'ona, hem identificat dues posicions consecutives D_1 i D_2 en què el contrast és mínim. La separació en longituds d'ona ($\Delta\lambda$) es calcula amb:

$$\lambda - \lambda' = \frac{5}{2} \frac{\lambda\lambda'}{(D_1 - D_2)}$$

En aquesta fórmula, λ i λ' són les longituds d'ona del doblet de sodi, que s'aproximen al seu valor mitjà. Aquesta diferència ens permet veure els efectes d'interferència deguts a les petites variacions en les longituds d'ona dins del doblet de sodi.

2.3 Incerteses i errors

Hem calculat les incerteses de les longituds d'ona aplicant la llei de propagació d'incerteses. Aquesta llei ens permet estimar com les petites variacions en les mesures de les posicions D_1 i D_2 , així com en el nombre d'anells comptats n , afecten el valor final de la longitud d'ona λ . Per al cas del doblet de sodi, hem seguit el mateix mètode, considerant també la variabilitat en els valors de λ i λ' de les dues línies d'emissió. Les fonts d'incertesa (deixant de costat la calibració del propi interferòmetre) són la mesura del micròmetre δD , el descomptatge en el número d'anells δn i, en el cas de la mesura de $\Delta\lambda$, la subjectivitat de zona de mínim contrast. Com que aquest últim esdevé realment un error δD , serà inclòs en aquest. Per facilitar la notació, anomenem $D_2 - D_1 = \Delta D = A$. La incertesa δA :

$$\delta A = |\delta D_2| + |\delta D_1| = 2\delta D$$

De manera que la incertesa tant en les longituds d'ona per a la llum de sodi i el làser esdevenen:

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{2A}{5n}\right]\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial A} \left[\frac{2A}{5n}\right]\right)^2} = \frac{2}{5} \sqrt{\left(\frac{\delta A}{n}\right)^2 + \left(\frac{A\delta n}{n^2}\right)^2} = \frac{2}{5} \sqrt{\left(\frac{2\delta D}{n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D\delta n}{n^2}\right)^2}$$

Per a saber quina és la incertesa comesa únicament per haver descomptat un anell, considerem el cas $\delta D = 0$, de manera que:

$$\delta\lambda_{\delta D=0} = \frac{2}{5} \left| (D_2 - D_1) \frac{\delta n}{n^2} \right| = \frac{2}{5} \left| \lambda \frac{\delta n}{n} \right| \Rightarrow \delta(\lambda_{\delta D=0})_{\text{sodi}} = \delta(\lambda_{\delta D=0})_{\text{làser}} = 3 \text{ nm}$$

Considerem també el cas $\delta n = 0$:

$$\delta\lambda_{\delta n=0} = \frac{4}{5} \left| \frac{\delta D}{n} \right| \Rightarrow \delta(\lambda_{\delta n=0})_{\text{sodi}} = \delta(\lambda_{\delta n=0})_{\text{làser}} = 40 \text{ nm}$$

S'observa que el que determina la incertesa total és majoritàriament la incertesa del micròmetre. Es podria donar el cas $\delta n = 10$ i encara l'efecte de descomptar anells seria més baix que el del micròmetre. La incertesa en la mesura del doblet de sodi quedarà:

$$\begin{aligned} \delta\Delta\lambda &= \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial A} \left[\frac{2\lambda_s^2}{5A}\right]\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \lambda_s} \left[\frac{2\lambda_s^2}{5A}\right]\right)^2} = \frac{2}{5} \sqrt{\left(\frac{2\lambda_s\delta\lambda_s}{A}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_s^2\delta A}{A^2}\right)^2} \\ &= \frac{4}{5} \sqrt{\left(\frac{\lambda_s\delta\lambda_s}{D_2 - D_1}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_s^2\delta D}{(D_2 - D_1)^2}\right)^2} \\ &= 0.1 \text{ nm} \end{aligned}$$

Taula 1: Aquesta taula presenta les dades obtingudes durant la mesura experimental de les longituds d'ona per la llum de sodi i el làser díode utilitzant l'interferòmetre de Michelson. Per a cada font de llum, es mostren les posicions inicial (D_1) i final (D_2) del micròmetre (amb una incertesa de $\pm 0.005 \text{ mm}$), el nombre d'anells comptats (n), i el valor experimental de la longitud d'ona (λ), incloent-hi la seva incertesa. La diferència de longituds d'ona $\Delta\lambda$ per al doblet del sodi es calcula a partir de les posicions D_1 i D_2 corresponents, reflectint l'aproximació dels valors teòrics obtinguts experimentalment.

	$D_1 (\pm 0.005 \text{ mm})$	$D_2 (\pm 0.005 \text{ mm})$	$n (-)$	$\lambda (\text{nm})$
Llum de sodi experimental	10.000	9.850	100	600 ± 40
Làser díode experimental	10.000	9.840	100	640 ± 40
$\Delta\lambda$ del làser díode	9.370	7.32	x	0.6 ± 0.1

3 Comparació dels resultats experimentals amb els valors teòrics

Comparant els resultats experimentals amb els valors teòrics, observem que les mesures de la longitud d'ona per la llum de sodi i el làser díode són consistents amb els valors esperats, tot i que hi ha algunes diferències atribuïbles a factors experimentals que, tenint en compte els errors associats, es mantenen dins del rang de compatibilitat.

1. Llum de sodi: Teòricament, la longitud d'ona de la llum de sodi es troba al voltant de 589.0 nm i 589.6 nm per les dues línies del doblet. El nostre valor experimental és de 600 nm amb una incertesa de ± 40 nm. Aquesta diferència pot ser atribuïda a petites imprecisions en les mesures del micròmetre o a l'efecte de les interferències entre les dues longituds d'ona properes del doblet del sodi. Tot i la petita desviació, podem veure que aquesta no és major a més d'una $\delta\lambda$.

2. Làser díode: La longitud d'ona teòrica per a làsers díodes comuns oscil·la entre els 630 – 650 nm. El nostre valor experimental de 640 ± 40 nm es troba en mig d'aquest rang, indicant que les nostres

mesures s'apropen al valor teòric esperat per a aquest tipus de làser. La precisió es manté dins de l'interval establert, validant el mètode de mesura utilitzat.

3. Diferència de longitud d'ona ($\Delta\lambda$) del doblet de sodi: La diferència experimental obtinguda és de 0.6 ± 0.1 nm, que és exactament igual al valor teòric de 0.6 nm entre les línies del doblet. Aquesta coincidència indica una precisió adequada en la determinació del doblet, gràcies a la capacitat de l'interferòmetre de Michelson de detectar petites diferències en longitud d'ona.

En general, els resultats experimentals són consistents amb els valors teòrics dins dels marges d'incertesa calculats, validant tant la metodologia emprada com l'ús de l'interferòmetre per a aquestes mesures de precisió.

4 Observació i anàlisi de les interferències en el punt d'equidistància

En el punt d'equidistància, s'observa que els anells d'interferència desapareixen o es redueixen notablement en intensitat al centre, ja que els camins òptics dels dos feixos de llum són iguals. Teòricament, en aquest punt, es produiria una interferència destructiva completa si les superfícies òptiques fossin perfectes, causant que es vegi tot fosc. Això es deu al fet que el feix reflectit per un dels miralls pateix un desfasament de mitja longitud d'ona, cosa que inverteix el signe del camp elèctric i anul·la la interferència amb el feix de l'altre braç.

Amb llum blanca, també es produeixen interferències, però aquestes només es mantenen clarament visibles en posicions molt properes al punt d'equidistància. Això es deu a la natura policromàtica de la llum blanca, formada per múltiples longituds d'ona. Cada longitud d'ona crea un patró d'interferència lleugerament diferent, generant una sèrie d'anells acolorits que es desfan ràpidament fora del punt d'equidistància a causa de les variacions en les longituds d'ona.