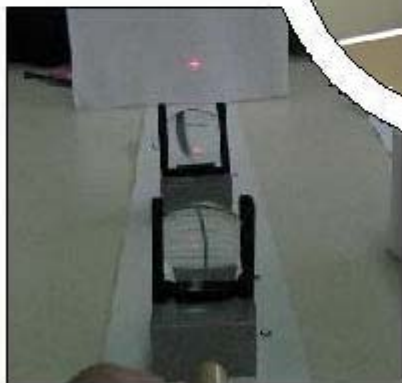
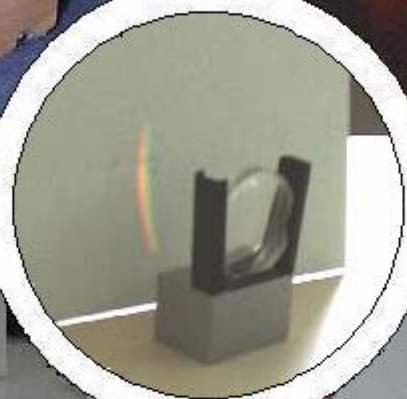


QUATRE EXPERIMENTS DIDÀCTICS DE FÍSICA AMB LÀSER PER A 2n DE BATXILLERAT



Alumna: Tatiana Pérez Soriano
Tutor: Marcel Jorba Jorba
IES Pere Vives Vich (IGUALADA)

RESUM

En aquest treball proposem quatre experiments didàctics de física amb làser pensats per a estudiants de batxillerat. Experimentarem sobre la divergència del raig làser, el comportament d'aquest a través de lents, la difracció i la posició de la llum que emet en l'espectre visible. A través d'aquestes pràctiques estudiarem també diversos temes de física, com el principi de Huygens, la llei de Snell, el principi de Fermat, les propietats de les lents, etc.

ABSTRACT

In this work we make a proposal of four educational experiments on Physics with laser, intended for high school students. We are experimenting on laser beam divergence, its behaviour through lenses, diffraction, and position of the emitted light in the visual spectrum. Through these tests we are studying several subjects related to Physics, like Huygens principle, Snell's law, Fermat's principle, the properties of lenses, etc.

RESUMEN

En este trabajo proponemos cuatro experimentos didácticos de física con láser pensados para estudiantes de bachillerato. Experimentaremos con la divergencia del rayo laser, el comportamiento de éste a través de lentes, la difracción y la posición de la luz que emite en el espectro visible. A través de estas prácticas estudiaremos también diversos temas de física, como el principio de Huygens, la ley de Snell, el principio de Fermat, las propiedades de las lentes, etc.

SUMARI

AGRAÏMENTS	3
PRESENTACIÓ	4
1.- INTRODUCCIÓ	5
<u>PRIMERA PART: TEORIA.</u>	
2.- LES ONES	6
2.1.- TIPUS D'ONES.....	6
2.2.- PROPIETATS DE LES ONES HARMÒNIQUES.....	6
2.2.1.- Amplitud.....	7
2.2.1.1.- Intensitat d'ona.....	7
2.2.2.- Freqüència (i Període).....	7
2.2.3.- Longitud d'ona.....	8
2.2.4.- Velocitat de propagació.....	8
3.- ESPECTRES	8
4.- LLUM LÀSER	11
4.1.- PROPIETATS DE LA LLUM LÀSER.....	11
4.1.1.- Llum que manté la intensitat.....	11
4.1.2.- Llum coherent.....	12
4.1.3.- Llum monocromàtica.....	13
4.2.- PRODUCCIÓ DE LLUM LÀSER.TIPUS DE LÀSERS.....	13
4.3.- CARACTERISTIQUES DEL LÀSER QUE HEM USAT EN ELS EXPERIMENTS.....	14
4.3.1.- El díode làser.....	15
4.3.2.- El circuit de control.....	16
<u>SEGONA PART: ELS 4 EXPERIMENTS</u>	
5.- INSTRUMENTAL QUE UTILITZAREM EN LES PRÀCTIQUES	18
6.- EXPERIMENT 1: DIVERGENCIA DE LA LLUM LÀSER	21
6.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.....	21
6.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.....	21
6.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.....	22
6.4.- CONCLUSIONS.....	24
6.5.- LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.....	24
7.- EXPERIMENT 2: MODIFICACIÓ DE L'AMPLADA D'UN RAIG LÀSER	25
7.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.....	25
7.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.....	26
7.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.....	27
7.4.- CONCLUSIONS.....	29
7.5.- LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.....	29
8.- EXPERIMENT 3: MESURA DE LA FREQUÈNCIA I LA LONGITUD D'ONA D'UN RAIG LÀSER A PARTIR DE LA DIFRACCIÓ	30
8.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.....	30
8.1.1.- El principi de Huygens.....	30
8.1.2.- La difracció.....	31
8.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.....	35
8.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.....	37
8.4.- CONCLUSIONS.....	40
8.5.- LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.....	40
9.- EXPERIMENT 4: UBICACIÓ DE LA LLUM LÀSER DINS L'ESPECTRE VISIBLE	41
9.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.....	41
9.1.1.- La refracció, el principi de Fermat i la llei de Snell.....	41
9.1.2.- La dispersió i l'equació de Cauchy.....	43
9.1.3.- Utilització de prismes triangulars.....	44
9.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.....	46
9.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.....	46
9.4.- CONCLUSIONS.....	48
9.5.- LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.....	48
CONCLUSIONS	49
BIBLIOGRAFIA I WEBLIOGRAFIA	50

AGRAÏMENTS

Aquest treball no hauria estat possible sense l'ajut del meu tutor de recerca, el meu professor de tecnologia Marcel Jorba, que m'ha orientat pacientment i m'ha animat en tot moment a tirar endavant. Gràcies per compartir aquesta tasca amb profunditat i dedicació.

També vull agrair la col·laboració del meu professor de física i química, el Dr. Ernest Fabregat pel seu assessorament sobre les propietats de les lents i per aclarir al meu tutor tots els dubtes de física que se li van presentar.

Dono també les gràcies al meu professor de física Vicente Bitrián per orientar-me al principi i per haver tingut la generositat de cedir la tutoria del treball al meu tutor definitiu.

També agraeixo a l'IES Pere Vives Vich que m'hagi deixat tot el material i les instal·lacions que he necessitat, i a l'empresa Infogest, que em va regalar materials per als meus experiments.

Demano disculpes per tota la gent que m'oblido en aquests agraiements. Gràcies a tots de tot cor.

PRESENTACIÓ

Inicialment, aquest treball es va pensar com una sèrie d'experiments d'òptica amb làser. Per un costat, perquè l'òptica és un camp que desconec però que sempre m'ha fascinat i volia aprendre'n alguna cosa, i, per l'altre, perquè també m'interessen les noves tecnologies, moltes de les quals estan basades en la llum làser (CDs, DVDs, fibra òptica, etc.). La idea inicial era adquirir un díode làser i muntar el seu circuit d'alimentació. A partir d'aquí, decidir quins experiments es portarien a terme i realitzar-los. Quan ens vam adonar que aquest sistema resultava inviable, vam preferir comprar un punter làser "de fira" i fer els experiments amb el díode ja muntat.

Els objectius que em vaig marcar eren clars: dissenyar una sèrie d'experiments de física per a 2n de batxillerat utilitzant una tecnologia que fins ara, rara vegada s'utilitza als laboratoris dels IES: el làser.

Cada experiment té una explicació teòrica, sense la qual, l'experiment no té massa sentit. Apart d'això, m'ha calgut, d'entrada, explicar algunes de les propietats de les ones i en particular de les ones electromagnètiques i la llum, i, en concret, de la llum làser.

El resultat, tal com veurem a les conclusions, ha estat molt positiu. Presentem quatre experiments que es poden portar a terme perfectament en qualsevol laboratori de física d'un institut amb molt pocs mitjans. Tots van acompanyats de la seva explicació teòrica i dels càlculs corresponents. Aquests quatre experiments són:

- Càlcul de la divergència del raig làser.
- "Eixamplament" d'un raig làser amb lents convergents.
- Càlcul de la freqüència de la llum làser a partir de la difracció.
- Ubicació de la llum làser en l'espectre de llum visible.

Un dels aspectes interessants a remarcar és que aquest treball ha estat portat durant tres mesos per via telemàtica, ja que el meu tutor es trobava fent una investigació a Alemanya. Ens hem comunicat més d'un cop per setmana per SMS i per e-mail, i hem pogut comprovar que el sistema és gairebé tan eficient com el presencial.

1.- INTRODUCCIÓ.

El treball es pot dividir en dues parts ben diferenciades: Una primera part teòrica i una segona part, bàsicament experimental, on es troba el disseny de les quatre pràctiques.

En la primera part es treballen els conceptes que s'han considerat imprescindibles per entendre la naturalesa de la llum, i, per tant, és la base teòrica per entendre els quatre experiments de la segona part.

També hi ha una secció dedicada a la llum làser i a la seva producció, ja que és aquesta la que usem en tots els experiments.

La segona part, l'experimental, està dividida en cinc capítols. En el primer es descriu l'instrumental utilitzat, i en cada un dels altres quatre es desenvolupa un experiment i la seva base teòrica:

- Capítol 6: Divergència de la llum làser (un raig làser no és perfecte)
- Capítol 7: Eixamplament d'un raig làser sense que perdi les seves propietats (característiques de les lents convergents).
- Capítol 8: Difracció. El principi de Huygens. Mesura de la freqüència i la longitud d'ona del raig làser.
- Capítol 9: Ubicació de la llum làser dins l'espectre visible. El principi de Fermat. La llei de Snell. L'equació de Cauchy. Comprovació que un làser emet llum monocromàtica.

Cada experiment està estructurat en cinc apartats, que són:

- Una introducció teòrica.
- El procediment operatiu.
- La realització pràctica de l'experiment.
- Les conclusions.
- Una llista del material més rellevant utilitzat.

Finalment, s'ha extret les conclusions generals del treball i s'ha llistat tota la bibliografia i webgrafia consultada.

PRIMERA PART: TEORIA

2.- LES ONES.

Una ona és una pertorbació que transporta energia sense transportar matèria. En podem veure un exemple a la següent il·lustració:

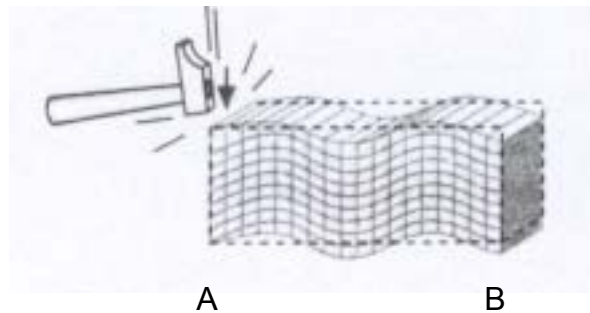


Figura 2.1.

Si piquem amb el martell al punt A, es transmet energia al punt B per la vibració del bloc de fusta, però les partícules de fusta (la matèria) no viatja.

Quan una ona és una vibració que es va repetint (o sigui, periòdica), aleshores parlem de ona harmònica.

2.1.-TIPUS D'ONES

L'ona que acabem de posar com a exemple és una ona **mecànica**, ja que necessita un medi material per propagar-se. També podem produir una ona mecànica tirant una pedra dins un estany: es crearan ones concèntriques cap a l'exterior del punt on ha caigut la pedra. El so, per exemple, també és una ona mecànica, ja que necessita aire (o altres materials) per propagar-se.

Existeixen altres tipus d'ones, com les **electromagnètiques**, entre les quals es troba la llum. Aquest tipus d'ona no necessita cap medi material, i, per tant, es propaga pel buit. Així, per exemple, ens arriba a la Terra la llum del Sol.

2.2.-PROPIETATS DE LES ONES HARMÒNIQUES.

Aquestes ones tenen, entre d'altres, quatre propietats que les diferencien les unes de les altres.

2.2.1. Amplitud.

Pot dir-se que és l'altura de l'ona. És la màxima distància a la que pot arribar un punt al pas de l'ona respecte a la posició d'equilibri (Figura 2.2.)

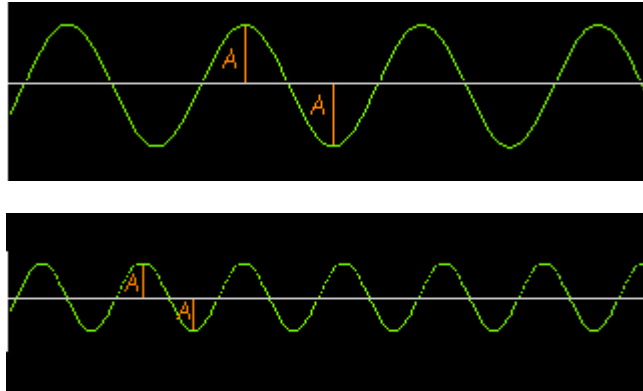


Figura 2.2

En aquests gràfics podem observar dues ones de diferents amplituds.

2.2.1.1.-Intensitat d'ona.

L'energia que travessa una superfície perpendicular a l'ona en una unitat de temps s'anomena intensitat d'ona i es directament proporcional al quadrat de l'amplitud de la pertorbació.

2.2.2.-Freqüència (i Període).

La freqüència és el numero d'ones que passa per un punt en la unitat de temps. Generalment es mesura en Hertz (Hz) essent aquest l'equivalent a una vibració per segon, per aquest motiu també podem usar el s^{-1} .

Per conèixer la freqüència (ν) d'una ona, la dividirem en parts que van des de una cresta fins a la següent de manera que el numero de crestes que passa per un punt en cada segon es la freqüència.

El període (T) és el temps que transcorre entre el pas d'una cresta i la següent i és la inversa de la freqüència:

$$T = \frac{1}{\nu}$$

Com que és una unitat de temps, en el Sistema Internacional, es mesura en segons (s).

2.2.3.- Longitud d'ona.

La longitud d'ona (λ) és la distància entre dues crestes consecutives. Com en totes les distàncies usarem les unitats del sistema internacional i la mesurarem en metres, però, donada la varietat de longituds, usarem els seus múltiples o submúltiples.

2.2.4.-Velocitat de propagació.

La velocitat amb la que es propaga una ona depèn de la naturalesa de la pertorbació i del medi per on es propaga i es calcula utilitzant la següent fórmula:

$$v = \lambda / T = \lambda \cdot \nu$$

On: v = velocitat de propagació
 λ = longitud d'ona
 T = període
 ν = freqüència (inversa del període)

Aquesta fórmula és anàloga a la fórmula de la velocitat:

$$v = x / t$$

On: v = velocitat
 x = espai
 t = temps

Ja que la longitud d'ona és l'espai entre dues crestes i el període és el temps que transcorre entre el pas d'una cresta i la següent pel mateix punt.

3.- ESPECTRES.

Quan una llum no monocromàtica canvia de medi es produeix un efecte anomenat **dispersió**, que consisteix en la separació de les diferents longituds d'ona que formen el raig incident. La llum blanca conté totes les longituds d'ona de l'espectre visible, amb la qual cosa, gràcies a aquest fenomen, podem veure tots els colors possibles.

La llum blanca es descompon en un espectre continu, que conté el conjunt de colors que corresponen a la gamma de longituds d'ona que la componen:



Figura 2.1.

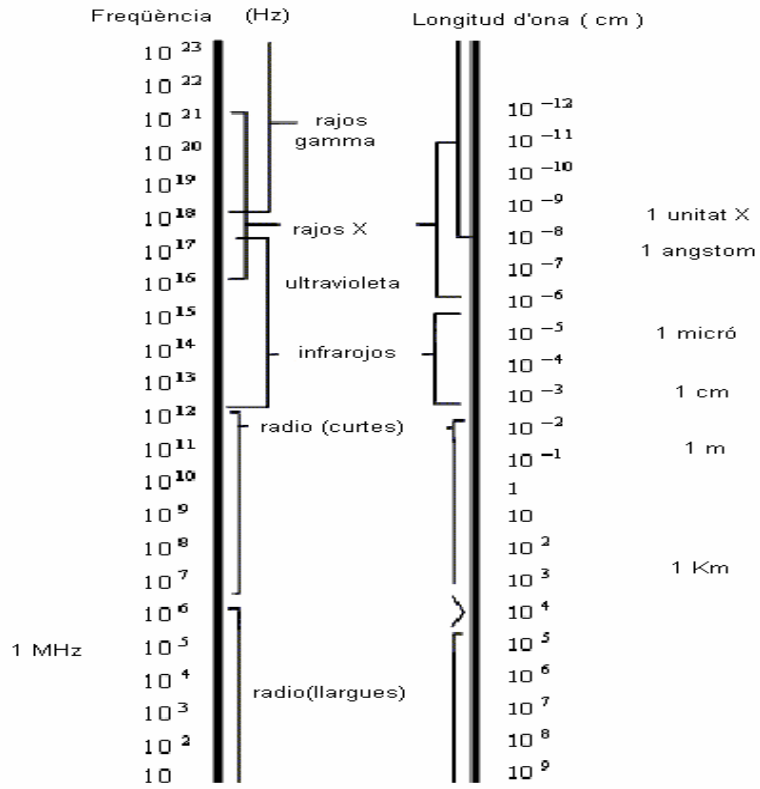
Això es pot fer amb tots els fenòmens que es poden considerar ones electromagnètiques, ordenades per freqüència (ν) creixent o per longitud d'ona (λ) decreixent, ja que aquestes junt amb la velocitat de propagació (c) estan relacionades ($c = \lambda \cdot \nu$). Per tant com més gran sigui la freqüència més petita serà la longitud d'ona, i a l'inrevés.

Cal aclarir que **c** és la velocitat de la llum en el buit, que és de 299.792,458 km/s. La velocitat de propagació de les ones electromagnètiques (vegeu apartat 2.2.4.) és **c**. Aquesta velocitat, segons la teoria de la relativitat d'Einstein, és considerada com el límit de les velocitats

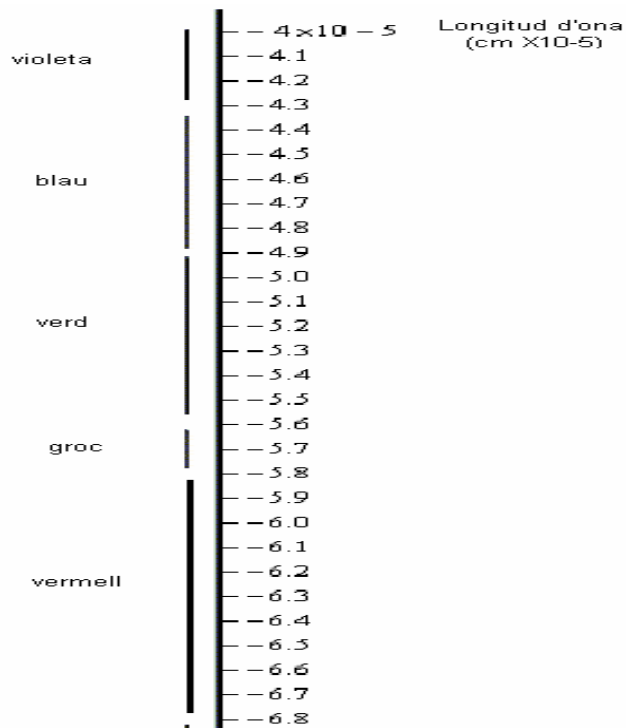
Els fenòmens que es descriuen amb el model d'ona electromagnètica són els següents:

- **Ones de radio:** Són ones de freqüència petita i per tant de gran longitud d'ona, les ones de radio AM tenen freqüències compreses entre 550 i 1600 kHz
- **Ones de radio FM i de televisió:** Es produeixen de manera semblant a les anteriors i tenen freqüències compreses entre 88 i 108 MHz
- **Microones:** Les seves freqüències van entre 10^{10} i 10^{12} Hz. Són freqüències properes a les de ressonància natural de les molècules d'aigua que hi ha en sòlids i líquids, per aquest motiu són absorbides fàcilment per les molècules d'aigua dels aliments que s'escalfen al forn de microones.
- **Radiació infraroja:** És produïda per la vibració de les molècules dels cossos a temperatures elevades. Les seves freqüències pertanyen a l'interval que va des de 10^{12} i 10^{14} Hz.
- **Llum visible:** Són les úniques ones electromagnètiques visibles per els humans. Van des de 700nm de longitud d'ona en el buit per a la llum vermella, fins als 400 nm per a la llum violeta.
- **Raigs ultravioleta:** Són de freqüència superior a la llum visible, es produeixen en descarregues elèctriques en alguns gasos.
- **Raigs X:** Tenen freqüències de l'ordre de 10^{17} a 10^{20} Hz. Són produïdes per l'acceleració de frenada d'un feix d'electrons en incidir sobre una placa metàl·lica.
- **Raigs γ (gamma):** Són de freqüència superior als raig X i es generen per oscil·lacions de les càrregues elèctriques que formen part del nucli atòmic.

Espectre de les ones electromagnètiques:



Espectre de la llum visible (subconjunt –tram- de l'espectre electromagnetic):



4.- LLUM LÀSER.

Els làsers són instruments que emeten llum amb unes característiques molt especials i molt diferents de les procedents d'altres fonts. El que la fa diferent és pot deduir de l'acrònim que forma el seu nom.

L	ight	A	mplificador de la
A	mplification	L	lum per
S	timulated	E	missió
E	misió of	E	stimulada de la
R	adiation	R	adiació

Un làser és una font de radiació electromagnètica (visible o no) que subministra ones d'igual freqüència, de la mateixa fase i idèntica direcció de propagació. Quan una radiació compleix aquestes característiques s'anomena **coherent**.

4.1.-PROPIETATS DE LA LLUM LASER.

Les propietats que fan especial la llum làser són bàsicament tres: manté la intensitat d'ona (tot i que a la pràctica pateix una petita divergència), és coherent (les ones que el constitueixen estan en fase) i és monocromàtica (d'un sol color i, per tant d'una sola freqüència).

4.1.1.-Llum que manté la intensitat.

La intensitat d'una radiació és una magnitud que mesura la potència per unitat de superfície (vegeu apartat 2.2.1.1.). Podem tenir una idea de la intensitat de la llum visible per la seva brillantor. Els làsers emeten, generalment, llum de major intensitat que altres focus lluminosos, però, el més important, mantenen pràcticament constant la intensitat, és a dir, la llum làser es dispersa escassament, ja que té una divergència molt petita. En canvi les llums normals, com ara la llum blanca, es dispersen gradualment a mesura que s'allunyen del focus lluminós perdent així intensitat. Aquest fenomen és degut a que aquest tipus de focus lluminosos no-làser emeten en totes direccions. Podem considerar que el llum emès per una bombeta és una ona **tridimensional**, en canvi, la llum emesa per un focus làser és una ona **unidimensional**. Vegem què passa amb un focus de llum blanca:



Figura 4.1.

En canvi, amb un focus de llum làser la llum, pràcticament, no es dispersa:

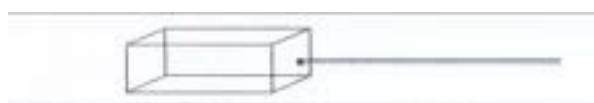


Figura 4.2.

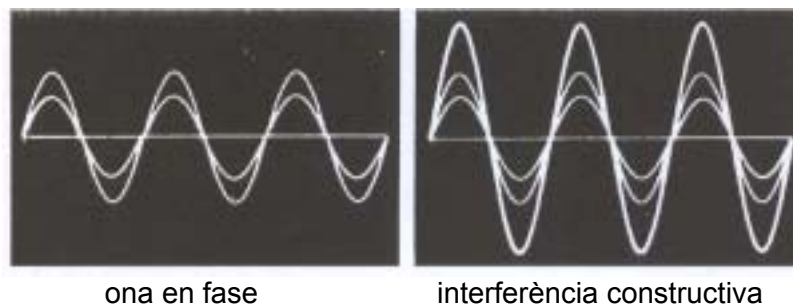
4.1.2.-Llum coherent.

Totes les ones lluminoses produïdes amb un làser es propaguen acoblant-se les unes amb les altres de forma ordenada. Per el contrari la llum procedent d'una bombeta, o de qualsevol altre focus de llum, genera ones lluminoses que comencen en diferents fases i es desplacen en direccions diverses, per la qual cosa no és llum coherent.

La coherència reforça les ones, ja que quan en un mateix espai coincideixen dues o més ones, interaccionen les unes amb les altres donant lloc a fenòmens d'interferència.

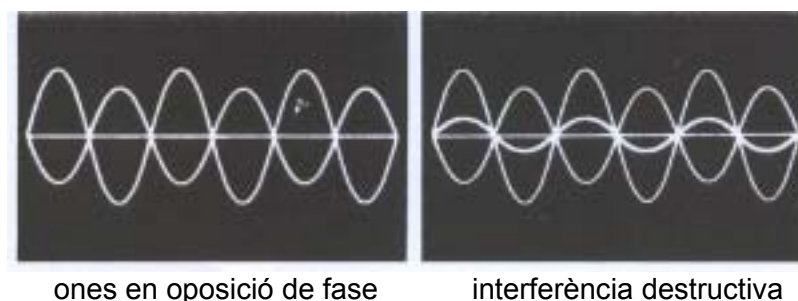
La interferència és constructiva quan les ones estan en fase, és a dir coincideixen exactament els màxims, els mínims i els punts d'inflexió. En aquest cas les ones es reforcen augmentant la seva amplitud.

Si les seves fases no coincideixen es produeix una interferència destructiva, que pot arribar a destruir per complet la pertorbació quan les ones estan en oposició de fase (desfasades 180°):



L'ona resultant es reforça: Si interfereixen dues ones que estan en fase, és a dir, els seus màxims i els seus mínims coincideixen, l'ona resultant de la interferència és de major amplitud.

Figura 4.3



L'ona resultant es debilita: Si interfereixen dues ones en oposició de fase, és a dir, el màxim d'una coincideix amb el mínim de l'altre l'ona resultant es debilita, arriben fins i tot a anul·lar-se si les ones que interfereixen són d'igual freqüència i amplitud.

Figura 4.4.

D'aquí la importància de la coherència, és a dir, de l'acoblament en fase de les ones, perquè es va produint així un reforçament energètic d'unes amb les altres.

Si les ones són de la mateixa amplitud, l'ona resultant de la interferència constructiva té una amplitud doble. Per el contrari, si la interferència és destructiva, l'amplitud resultant és nul·la, produint-se així una autèntica paradoxa, ja que llum+llum produeix obscuritat.

4.1.3.-Llum monocromàtica.

La llum làser és monocromàtica, és a dir, d'un sol color (d'una sola freqüència), mentre que les llums emeses per altres focus lluminosos no ho són. Si la llum blanca passa a través d'un prisma, es comprova que es **dispersa**, és a dir, es descompon en els seus colors (freqüències) constituents, per la qual cosa podem afirmar, que es tracta d'una llum policromàtica. Si féssim el mateix amb llum vermella, emesa per un focus que no fos làser, comprovaríem que es descompon en una gamma de tons vermells que van des de el vermell fosc fins el vermell clar, i per això tampoc es tracta d'una llum monocromàtica. Si l'experiència es realitza, amb llum roja emesa per un làser, es pot comprovar que no es dispersa al passar a través del prisma, perquè aquesta és una llum simple, monocromàtica, és a dir, d'un sol color.

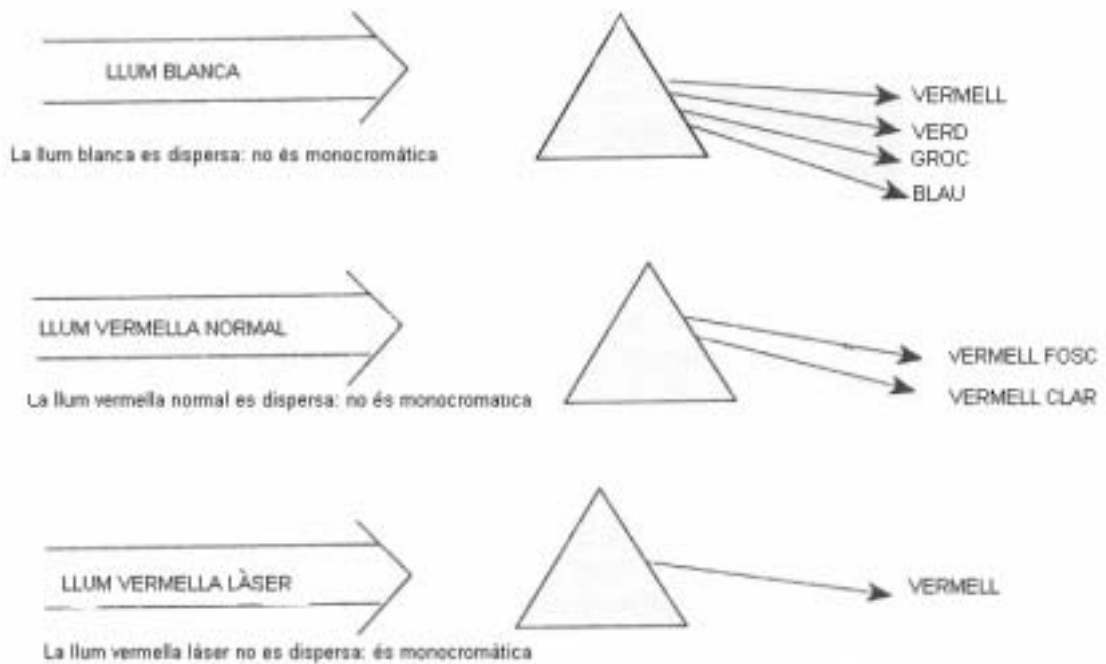


Figura 4.5.

4.2.-LA PRODUCCIÓ DE LLUM LÀSER. TIPUS DE LASERS.

Existeixen una gran varietat d'aparells que emeten llum làser. No entrarem en detall sobre tots els tipus ni sobre els seus principis de funcionament, ja que la complexitat del tema sortiria de l'abast d'aquest treball.

Els més utilitzats en laboratori per a experiments òptics de petita potència (com els nostres) són els dos següents:

- Laser d'Heli-Neo (He-Ne làser) -> de gas
- El díode làser -> d'estat sòlid

Per una qüestió purament econòmica, hem optat per utilitzar el segon per al nostre treball.

4.3.-CARACTERISTIQUES DEL LASER USAT EN ELS EXPERIMENTS.

Aquest és un díode de material semiconductor d'estat sòlid (generalment silici) disposat de manera que pot emetre un raig de llum làser de secció rectangular mitjançant un complex sistema de bombeig d'electrons.

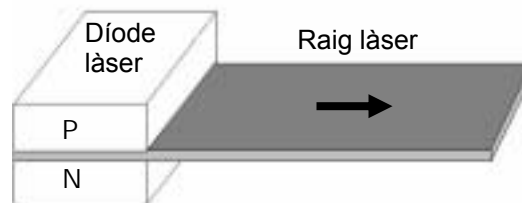


Figura 4.6.

Hem adquirit un punter làser en una parada de fira, el qual conté un díode làser que servirà perfectament per als nostres propòsits:



Figura 4.7.

A l'etiqueta del punter làser ens indica les següents característiques:

- Potència: 1 mW
- Longitud d'ona (λ): de 630 a 670 nm (que correspon al color vermell)

Això, apart de les recomanacions de seguretat, com no enfocar als ulls de cap persona, ja que podria produir lesions irreversibles.

ATENCIÓ: Tot i que aquest tipus de dispositiu es pot adquirir fàcilment a les parades de fira (tal com hem fet nosaltres), la seva venda està prohibida a l'Estat Espanyol per raons de seguretat, ja que els nen petits podrien enfocar-lo als ulls (no així a d'altres estats de la Unió Europea, com Alemanya). Recomanem, per tant, que, en cas de necessitar un làser similar per fer els nostres experiments, s'adquireixi un punter làser, que es pot trobar a qualsevol botiga de material d'oficina, i s'observin estrictament les normes de seguretat que indiqui el fabricant.

4.3.1.- El díode làser.

Un díode làser presenta el següent aspecte:



Figura 4.8.

El seu esquema intern i de funcionament és el següent:

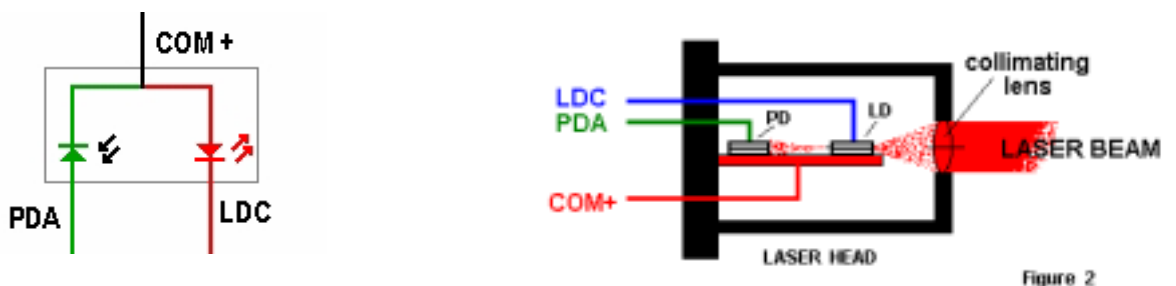


Figura 4.9.

On **COM+** és el terminal comú (el fil negre de la figura 4.8), **LDC**, el díode emissor de llum làser (fil vermell) i **PDA**, un fotodiode (com més llum rep, més condueix) que serveix per captar la llum del díode emissor (fil verd), i així poder-ne controlar la seva potència de sortida per un procés extern de realimentació o *feed-back* (correcció de l'alimentació en funció de la sortida obtinguda). El díode emissor necessita molta precisió en la intensitat que hi passi: massa poca intensitat no produirà llum, i massa intensitat, el destruirà.

És per això que no es pot alimentar un làser simplement amb una font d'alimentació (per aquest sistema, nosaltres en vam cremar dos), sinó que es necessita un circuit molt ben dissenyat, que respon a l'esquema de blocs següent:

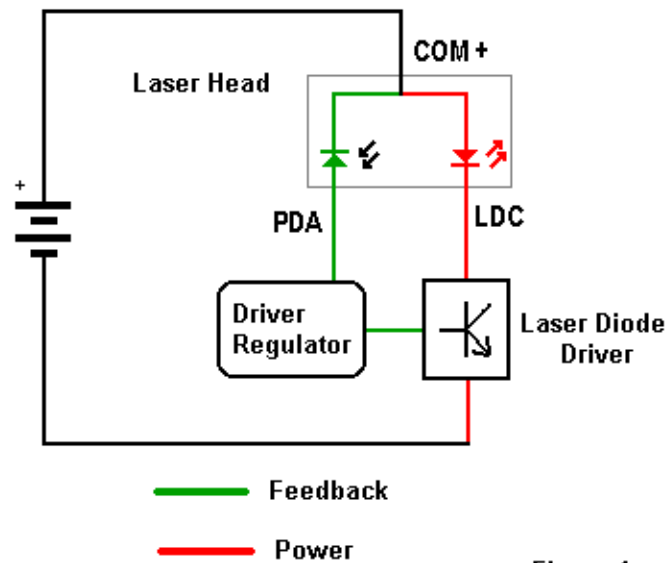


Figure 1

Figura 4.10.

4.3.2.- El circuit de control.

L'esquema electrònic complet que correspon al diagrama de la figura 4.10. és el següent:

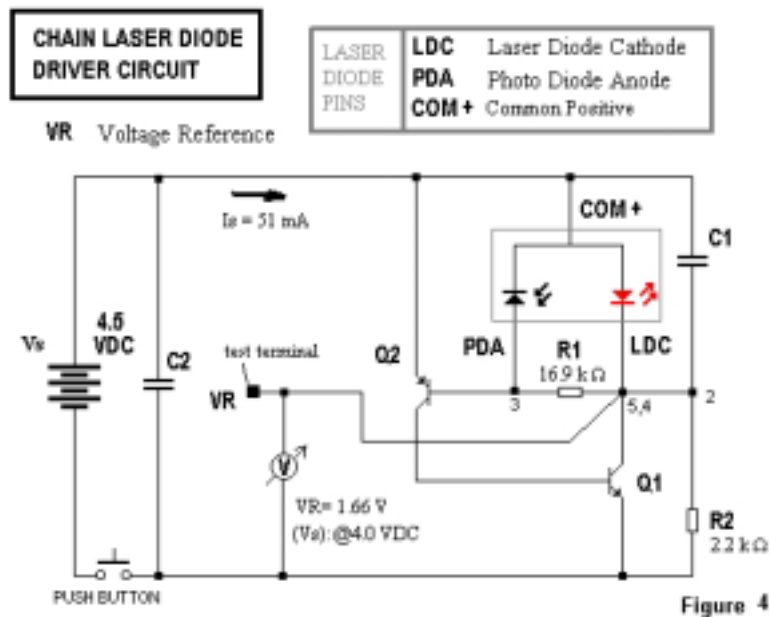


Figure 4

Figura 4.11.

Aquest circuit es troba muntat sobre una petita placa de circuit imprès SMD (de muntatge superficial), que presenta el següent aspecte:



Figura 4.12.

La disposició dels components de la figura 4.11. sobre aquesta placa és aquesta:

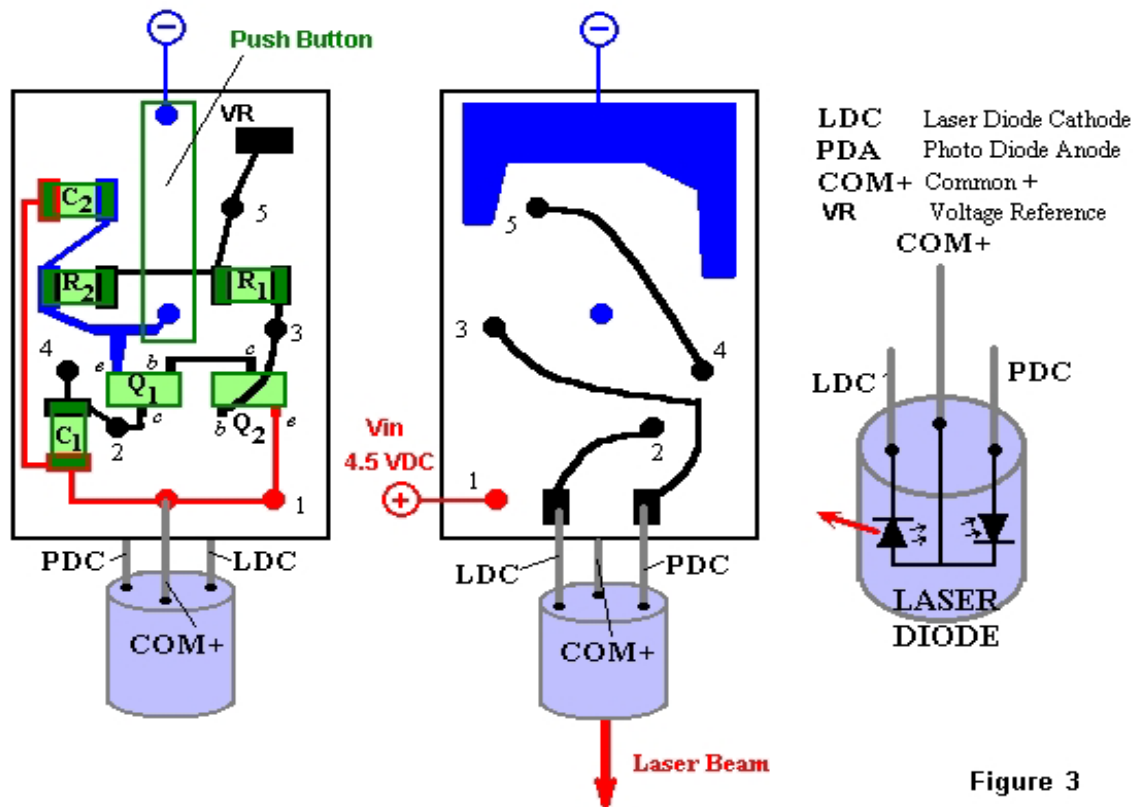


Figure 3

Figura 4.13.

SEGONA PART: EXPERIMENTS

5.- INSTRUMENTAL QUE UTILITZAREM EN LES PRÀCTIQUES.

Per portar a terme els experiments, hem necessitat un seguit d'instruments. L'element més importat és el punter làser. A l'hora de provar-lo vam adonar-nos que necessitàvem un suport fix per tal d'obtenir precisió en les mesures. Vam optar per un disseny molt senzill amb una peça de fusta que vam perforar per el centre amb l'ajut del trepant de columna, amb una broca de diàmetre igual al del punter. Un cop perforada, vam serrar la peça horitzontalment pel mig del forat. Finalment vam fer unes ranures fines a la base del suport per poder passar-hi una goma elàstica que ens subjectés el punter. (Figura 5.1)



Figura 5.1.

Alguns dels materials que hem utilitzat els hem aconseguit d'un equip vells d'òptica, que fa anys havia arribat a l'institut i estava en desús. Concretament hem utilitzat dues lents convergents bicòncaves: una de 10 diòptries i una altra de 20 (que es poden aconseguir fàcilment a qualsevol botiga d'òptica).

Per subjectar les lents, aquest equip d'òptica té uns suports metàl·lics i unes muntures que es col·loquen sobre els primers i que serveixen tant per a lents com per a diafragmes. De tota manera, aquests suports es poden construir de la mateixa manera que hem hagut de fer nosaltres mateixos el suport especial per a un diafragma (vegeu figura 5.5.). Per tant, en realitat no haurien estat necessaris. Aquests elements els hem utilitzat en l'experiment 2 (eixamplament del raig làser) i també per corregir la projecció de l'espectre visible (experiment 4).



Figura 5.2: Lent



Figura 5.3: Suport i muntura

Per tal d'observar la difracció (experiment 3) ens han calgut dos diafragmes: un amb una ranura i un altre amb forats circulars. El primer l'hem obtingut també de l'equip d'òptica, però l'haguéssim pogut fer perfectament amb una cartolina (Figura 5.4.), i el segon l'hem hagut de confeccionar foradant una planxa fina de metall (que també hagués pogut ser de plàstic) amb un trepant de precisió, dels que s'utilitzen per trepar forats per a circuits impresos.



Figura 5.4.: diafragma amb ranura

Per al primer diafragma (de ranura), hem utilitzat els mateixos suports i muntures que per a les lents (figura 5.3.), però per al segon ens va fer falta un suport més complex: Necessitàvem poder moure el diafragma en horitzontal i en vertical per tal d'ajustar el forat al mig del raig làser. De fet, per tal d'obtenir la millor nitidesa possible en la projecció de la difracció vam fer una sèrie de forats que anaven de 0,2 a 1,2mm, usant el trepant de precisió abans descrit, per anar provant des de quin orifici obteníem més qualitat en la projecció sobre la pantalla de paper mil·limetrat.

El suport de fusta que vam construir, tot i que és senzill, és mòbil tant en horitzontal com en vertical. Això ens permet moure el diafragma foradat fins a la posició desitjada. Aquest suport consta d'una base amb un carril, sobre el qual hi ha muntat un marc mòbil aguantat per barres roscades i femelles (Figura 5.5.).



Figura 5.5.

En l'últim experiment, per aconseguir la dispersió del raig hem fet incidir aquest en un prisma de Crown (Figura 5.6.). Aquest prisma també formava part de l'equip d'òptica

vell que hem esmentat. De fet, es poden utilitzar altres tipus de prisma (Flint, etc.). Per canalitzar la llum blanca vam usar, a l'igual que en la pràctica 3, un diafragma amb ranura. També va caldre una de les lents convergents de l'experiment 2 per "concentrar" el raig sobre el punt d'incidència del prisma, i, finalment, una lent divergent per tal d'"ampliar" la projecció sobre la pantalla de paper mil·limetrat, ja que, inicialment, era molt estreta.



Figura 5.6.: Prisma triangular

6.- EXPERIMENT 1: DIVERGÈNCIA DE LA LLUM LASER.

6.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.

Tal com hem vist en el capítol 4.1.1., una de les característiques de la llum làser és que no es dispersa degut al fet que el feix és coherent (o sigui, totes les ones estan en fase). De tota manera, també hem comentat que, a la pràctica, sí que es produeix una lleugera divergència. O sigui, que el feix de llum, presenta un petit angle d'obertura. En aquest experiment mesurarem quin és aquest angle de divergència (Figura 6.1.).

Com que el raig produït per un díode làser és rectangular, ens caldrà mesurar dues dispersions, l'horitzontal i la vertical, i després, comparar la diferència entre les dues.

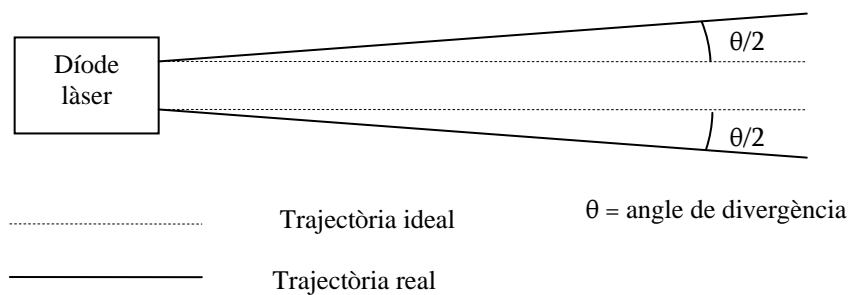


Figura 6.1.

6.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.

Per mesurar els angles de divergència (tant horitzontal com vertical), projectarem el raig sobre un paper mil·limetrat a mode de pantalla. Aquesta pantalla estarà disposada perpendicularment al raig, a dues distàncies diferents i així podrem veure que el raig es projecta més gran com més lluny es troba la pantalla del focus. A partir de la diferència de grandàries de les projeccions, podrem calcular els dos angles de divergència (horitzontal i vertical), tal com mostrem a la Figura 6.2.

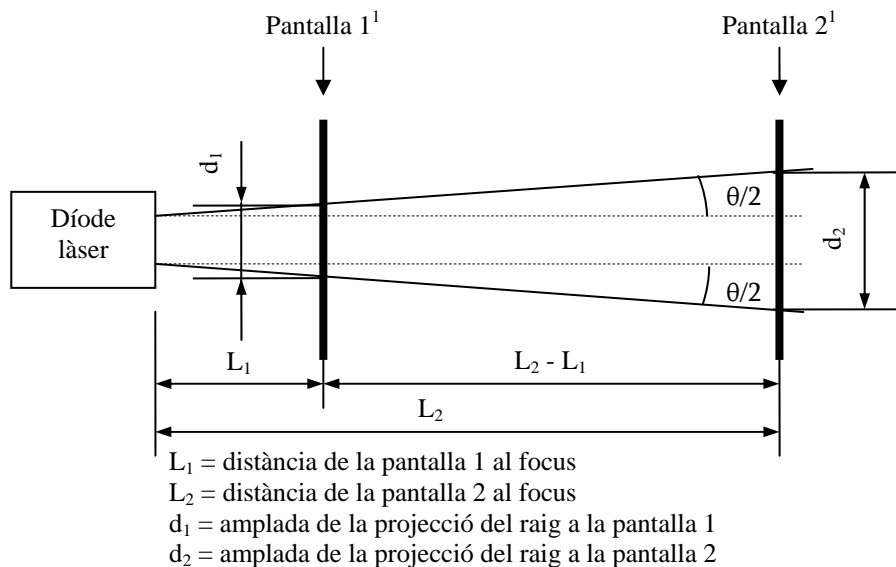


Figura 6.2.

Observem que:

$$\operatorname{tg}(\theta/2) = \frac{(d_2 - d_1)/2}{L_2 - L_1} \quad [1]$$

Per tant:

$$\theta/2 = \operatorname{arctg} \left[\frac{(d_2 - d_1)/2}{L_2 - L_1} \right] \quad [2]$$

O sigui, que la mesura de l'angle de divergència del raig, θ , ens ve donada per l'expressió final:

$$\theta = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{(d_2 - d_1)/2}{L_2 - L_1} \right] \quad [3]$$

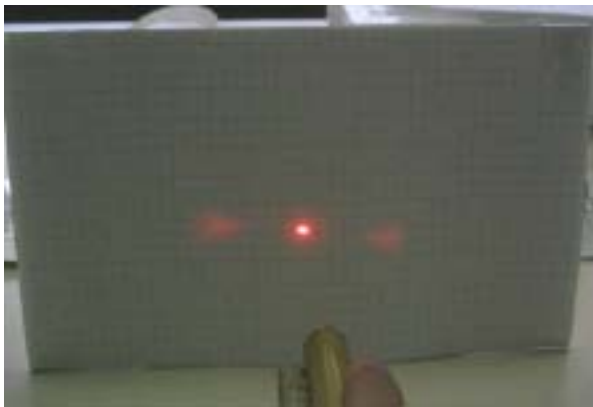
Naturalment, això caldrà aplicar-ho tant en horitzontal com en vertical.

6.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.

La preparació és la més senzilla dels quatre experiments, ja que només ens cal el punter làser amb el seu suport, un full de paper mil·limetrat, una pantalla vertical petita (L_1 =distància curta), una paret (L_2 =distància llarga), tot disposat segons la Figura 6.2 (vegeu llista de material al final).

Hem seguit l'ordre de realització següent:

- Escollir L_1 i L_2 ($L_1=50\text{cm}=0,2\text{m}$ i $L_2=6,5\text{m}$). El criteri ha estat més aviat arbitrari, ja que depenem de les dimensions de l'habitació.
- Col·locar la pantalla petita amb el paper mil·limetrat a la distància L_1 , projectar-hi el raig làser i resseguir la projecció amb llapis.
- Enganxar el paper mil·limetrat a la paret i col·locar el làser a la distància L_2 . Projectar el làser sobre el paper i resseguir aquesta projecció amb llapis.



Pas 1: Projecció a L_1



Pas 2: Projecció a L_2

Figura 6.3.

Els resultats, presentats de forma gràfica, han estat els següents (les fotografies són les reals que hem obtingut):

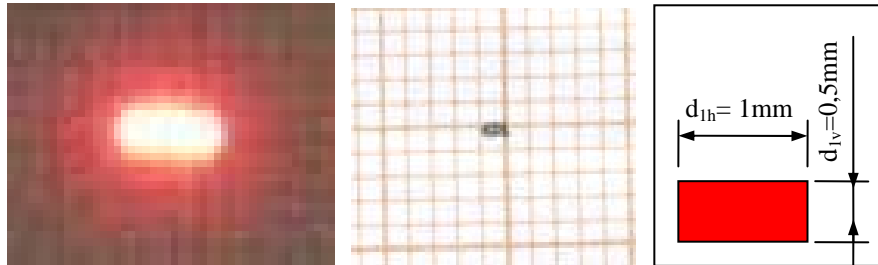


Figura 6.4.: Projecció a $L_1=0,2m$

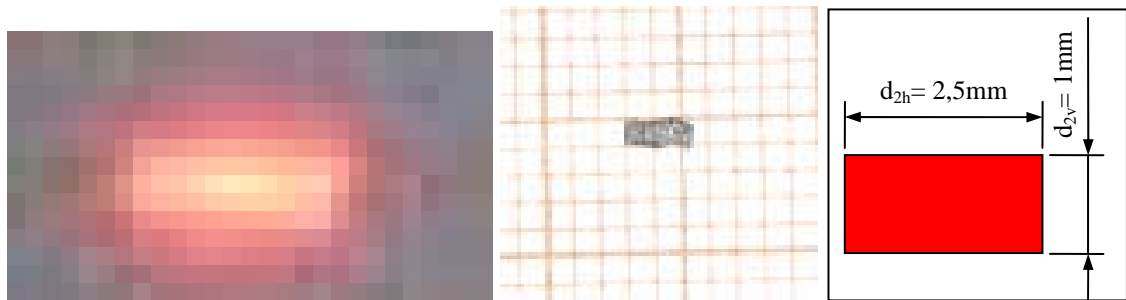


Figura 6.5.: Projecció a $L_2=6,5m$

A partir d'aquests resultats, ja podem calcular els angles de divergència tant horitzontal com vertical, a partir de l'equació [3].

- **Càlcul de la divergència horitzontal:**

Dades:

$d_{1h} = 1mm = 0,001m$
 $d_{2h} = 2,5mm = 0,0025m$
 $L_1 = 50cm = 0,5m$
 $L_2 = 6,5m$

Càlcul:

$$\theta_h = 2 \cdot \arctg \left[\frac{(0,0025m - 0,001m) / 2}{6,5m - 0,5m} \right] = 0,0143239^\circ$$

Per tant, el resultat és: **$\theta_h=0^\circ 0' 51,57''$**

• **Càlcul de la divergència vertical:**

Dades:

$$d_{1v} = 0,5\text{mm} = 0,0005\text{m}$$

$$d_{2v} = 1\text{mm} = 0,001\text{m}$$

$$L_1 = 50\text{cm} = 0,5\text{m}$$

$$L_2 = 6,5\text{m}$$

Càlcul:

$$\theta_v = 2 \cdot \arctg \left[\frac{(0,001 - 0,0005\text{m}) / 2}{6,5\text{m} - 0,5\text{m}} \right] = 0,0047746^\circ$$

Per tant, el resultat és: **$\theta_v = 0^\circ 0' 17,19''$**

Adonem-nos que la divergència horitzontal és molt superior a la vertical. Anem a veure la relació que guarden entre elles:

$$\frac{\theta_h}{\theta_v} = \frac{51,57''}{17,19''} = 3$$

Això vol dir que la divergència horitzontal és **tres vegades** més gran que la vertical.

6.4.- CONCLUSIONS.

Tal com hem pogut comprovar, la llum làser, tot i que no és ideal, presenta una divergència molt petita (inferior a un minut de grau), de tota manera és important observar que el mètode de generació de la llum làser que hem utilitzat (un díode làser) és molt més precís en vertical que en horitzontal, concretament, tres vegades més precís. Altres sistemes que generen raigs làser de secció rodona presentarien una divergència uniforme en totes les direccions.

6.5.- LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.

- Un díode làser amb suport
- Una pantalla vertical petita
- Una pantalla vertical gran (una paret)
- Un full de paper mil·limetrat
- Una cinta mètrica

7.- EXPERIMENT 2: MODIFICACIÓ DE L'AMPLADA D'UN RAIG LASER.

7.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.

En l'experiment 1 hem pogut veure que un raig làser presenta una divergència tan petita que, en moltes ocasions, la podem considerar nul·la. Tot i això, un feix de llum làser té una amplada determinada, que és fàcil de mesurar projectant-lo sobre un paper mil·limetrat. En aquest experiment veurem com podem modificar aquesta amplada utilitzant un parell de lents convergents diferents.

Per fer això ens caldrà, primerament, estudiar algunes nocions sobre les lents, particularment, les convergents.

Les lents són medis transparents limitats per dues superfícies, en les quals almenys una de les dues és corba. Aquestes permeten fer convergir (lent convergent) o divergir (lent divergent) un raig de llum. Vegem l'aspecte que presenten els diferents tipus de lents convergents:

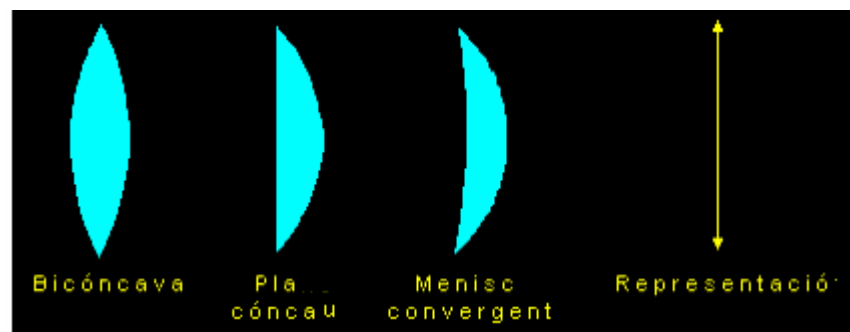


Figura 7.1.

Tal com podem veure a la figura 7.1., les lents convergents són més gruixudes pel centre que per els costats, això fa que "concentrin" (facin convergir) en un punt els raigs de llum que les travessen. Aquest punt s'anomena focus (F) i la separació entre aquest i la lent es coneix com a distància focal (f). Per al nostre experiment utilitzarem dues lents bicòncaves, que són les més comunes. Vegem-ne un parell d'exemples:

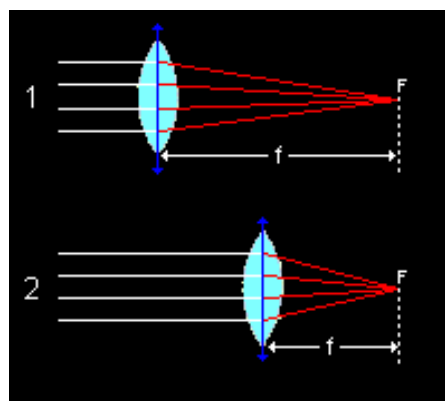


Figura 7.2.

Si ens fixem en la figura 7.2., veiem que les dues lents tenen distàncies focals diferents, concretament, en la segona lent, és més curta que en la primera. En aquest cas direm que la segona lent és més “potent”. Com més curta és la distància focal, més potent és una lent.

La paraula “potència”, tal com la utilitzem aquí, només s’admet oficialment en el camp de l’òptica, ja que, sinó, es podria confondre amb el significat físic de la paraula (potència, en Watts). Seria més correcte parlar de “divergència”, però aquesta paraula és poc utilitzada en àmbits especialitzats. Així, doncs, la potència d’una lent és la inversa de la seva distància focal i la seva unitat, en el Sistema Internacional, és la diòptria:

$$\text{potència} = \frac{1}{\text{distància_focal}(f)} \quad [\text{diòptria}] = \frac{1}{[\text{metre}]} \Rightarrow \text{diòptria} = m^{-1}$$

Aquesta propietat de les lents convergents de “concentrar” els raigs de llum, la utilitzarem per a canviar les dimensions del raig làser.

7.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.

Per portar a terme aquest experiment, farem passar el raig làser entre dues lents convergents de diferent potència, que modificaran les seves dimensions (vegeu figura 7.3.).

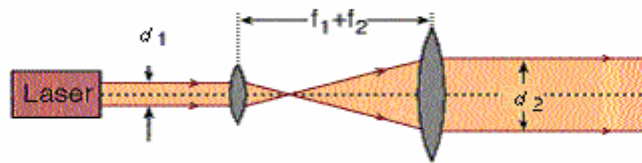


Figura 7.3.

A partir del gràfic anterior, analitzem la trajectòria que segueixen els extrems del raig:

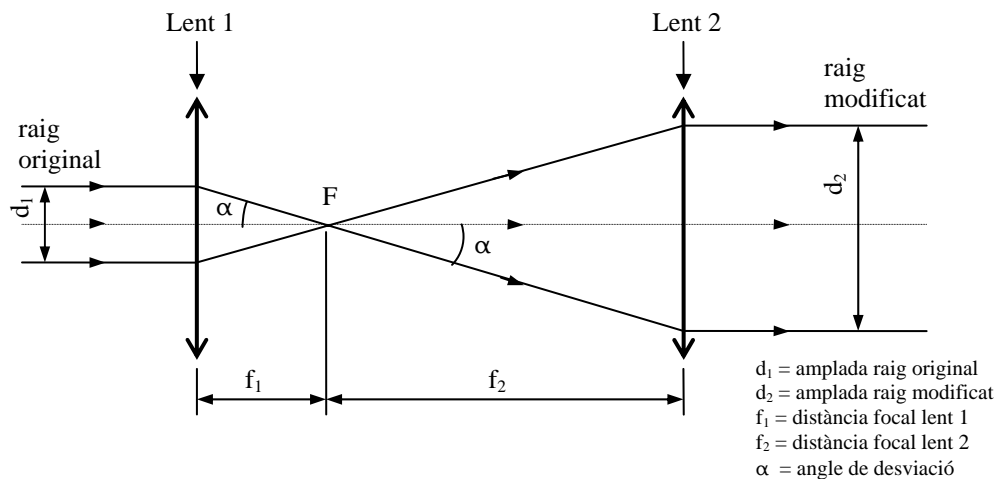


Figura 7.4.

Observant el dibuix veiem que:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{d_1/2}{f_1} \quad [1] \quad \text{i també, que:} \quad \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{d_2/2}{f_2} \quad [2]$$

Amb la qual cosa:

$$\frac{d_1/2}{f_1} = \frac{d_2/2}{f_2} \quad [3]$$

i, per tant:

$$\boxed{d_2 = \frac{f_2}{f_1} d_1} \quad [4]$$

Amb això, el nostre experiment consistirà a situar les lents a la distància correcta (f_1+f_2) i, fent incidir el raig làser sobre la primera lent, mesurarem les dues amplades d_1 i d_2 . Això ho farem projectant el raig sobre una petita pantalla perpendicular al raig, amb paper mil·limetrat, que situarem primer entre la font de llum i la primera lent (d_1) i, després, darrere la segona lent (d_2). Acte seguit, farem la comprovació numèrica dels resultats, segons l'equació [4], en relació a la potència de les dues lents.

7.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.

La preparació consistirà a disposar les dues lents a la distància esmentada i situar el punter làser sobre el seu suport de forma que el raig incideixi aproximadament al mig de la primera lent, tot col·locat segons s'indica en la figura 7.5.. Ens caldrà tenir preparada, també, la pantalla amb paper mil·limetrat per fer les projeccions (vegeu llista de material al final).

Les lents de què disposàvem tenen les següents característiques:

Lent 1: potència = 20 diòptries; distància focal $f_1= 0,05\text{m} = 5 \text{ cm}$

Lent 2: potència = 10 diòptries; distància focal $f_2= 0,1\text{m} = 10 \text{ cm}$

L'ordre de realització ha estat el següent:

- Situar les lents a la distància adequada ($f_1+f_2=5\text{cm}+10\text{cm}=15\text{cm}$).
- Col·locar el díode làser en el seu suport, de manera que incideixi aproximadament sobre el centre de la primera lent.
- Situar la pantalla entre el díode làser i la primera lent, i resseguir amb llapis la seva projecció sobre el paper mil·limetrat.
- Situar la pantalla després de la segona lent, i resseguir amb llapis aquesta segona projecció sobre el paper mil·limetrat.



Figura 7.5.: Preparació i realització de l'experiment

Els resultats de les mesures realitzades han estat els següents:

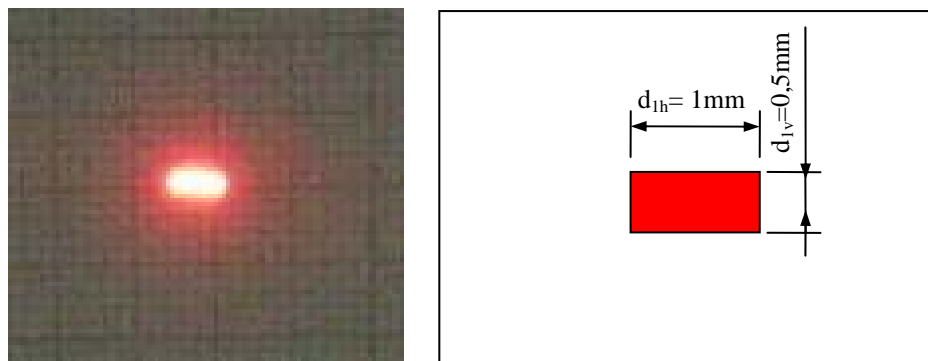


Figura 7.6.: Projectió del raig original

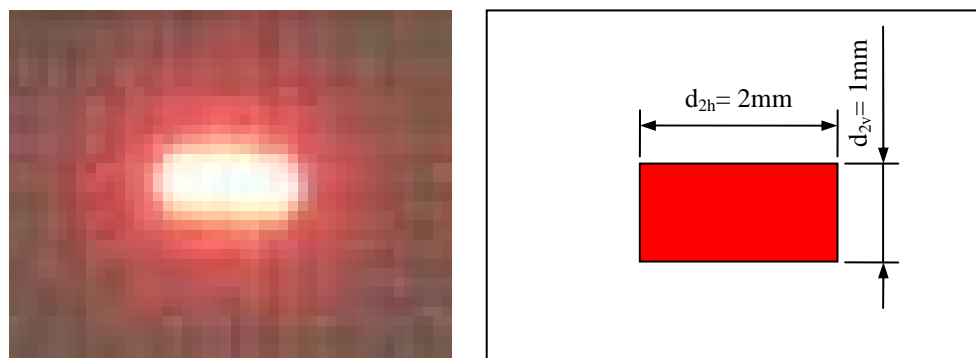


Figura 7.7.: Projectió del raig modificat

La primera qüestió a remarcar en aquest segon experiment és que, tal com era d'esperar, el rectangle corresponent a la projecció del raig no ha sofert cap deformació significativa, al contrari del que succeïa en l'experiment 1:

$$\frac{d_{2h}}{d_{1h}} = \frac{2mm}{1mm} = 2 \qquad \frac{d_{2v}}{d_{1v}} = \frac{1mm}{0,5mm} = 2$$

Amb la qual cosa, la proporció horitzontal/vertical és la mateixa:

$$\frac{d_{2h}}{d_{1h}} = \frac{d_{2v}}{d_{1v}}$$

Càlculs:

Segons les dades de les lents, i a partir de la mesura de la primera projecció (la del raig original), podem calcular quines dimensions hauria de tenir, en teoria, el raig modificat:

Dades:

Projecció 1: $d_{1h} = 1mm$; $d_{1v} = 0,5mm$

Lents: $f_1 = 5cm$; $f_2 = 10cm$

Càlcul:

Les dimensions del raig modificat, segons l'equació [4] haurien de ser:

$$d_{2h} = \frac{f_2}{f_1} d_{1h} = \frac{10cm}{5cm} \cdot 1mm = 2mm \qquad d_{2v} = \frac{f_2}{f_1} d_{1v} = \frac{10cm}{5cm} \cdot 0,5mm = 1mm$$

Observant les mesures del raig modificat (figura 7.7), veiem que aquestes corresponen **exactament** a les que ens ha predit el càlcul teòric, o sigui:

$$\mathbf{d_{2h} = 2mm} \qquad \mathbf{i} \qquad \mathbf{d_{1v} = 1mm}$$

7.4.- CONCLUSIONS.

Hem pogut comprovar que, utilitzant adequadament les propietats de les lents, podem modificar el gruix d'un raig làser sense alterar les seves propietats: el raig segueix amb una divergència gairebé inapreciable després de passar per les dues lents. La coincidència "exacta" dels resultats amb el càlcul teòric es deu, probablement a la manca de precisió de les nostres mesures (hem utilitzat un paper mil·limetrat), ja que, si haguéssim utilitzat eines més precises, de ben segur que hauríem pogut apreciar petites desviacions entre la teoria i la pràctica.

7.5.-LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.

- Un díode làser amb suport
- Una pantalla vertical petita
- Un full de paper mil·limetrat
- Una regla de cartró
- Dues lents convergents de 20 i 10 diòptries respectivament

8.- EXPERIMENT 3: CÀLCUL DE LA LONGITUD D'ONA A PARTIR DEL FENÒMEN DE LA DIFRACCIÓ DE LA LLUM. EL PRINCIPI DE HUYGENS.

8.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.

En aquest experiment aprofitarem el fenomen de la difracció de la llum per mesurar la longitud d'ona (λ , a partir d'aquesta, la freqüència) de la llum emesa pel nostre làser. Per explicar aquest fenomen ens basarem en el principi de Huygens, que s'estudia en el programa de l'assignatura de Física de segon de batxillerat.

8.1.1.- El Principi de Huygens.

El principi de Huygens afirma que, donat un front d'ona, "cada punt del front es comporta com un emissor puntual d'ones en totes les direccions". Això només és vàlid en la direcció de propagació del front, per tant, entendrem que el focus només emet "endavant" i no "endarrere". Gràficament es pot representar d'aquesta manera:



Figura 8.1.

En aquest exemple gràfic hem considerat un front d'ona rectilini. De fet, si agafem una porció suficientment petita de qualsevol front d'ona (un diferencial), sempre el podem considerar rectilini. Per aclarir el concepte de "front d'ona", observem la següent fotografia:

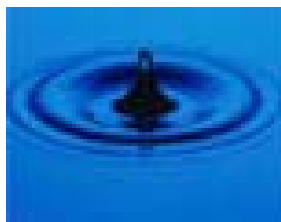


Figura 8.2.

En aquest cas, es tracta d'una ona mecànica i no electromagnètica com la de la llum làser, però ens serveix com a exemple. Quan cau la gota es genera una ona concèntrica. Observem les crestes de les ones: aquestes es desplacen allunyant-se del centre. Podem considerar que una cresta que es desplaça és un front d'ona que avança, el qual correspondria a una de les línies de la figura 8.1. Recordem també que

això no comporta el desplaçament de massa, ja que l'aigua només oscil·la amunt i avall, però no es trasllada, tal com hem explicat al principi del capítol 2.

Segons el principi de Huygens, si una ona es troba amb un obstacle amb un orifici de la grandària d'un punt, només aquest punt actuarà com a font emissor de l'ona, amb la qual cosa, el front d'ona després de l'orifici, serà circular, ja que només és emès des d'un sol punt i en totes direccions:

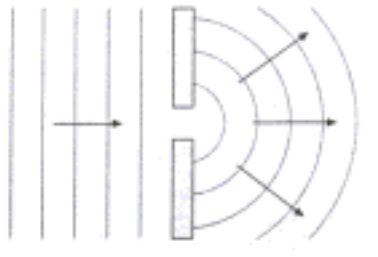


Figura 8.3.

El problema que se'ns planteja ara és: quina amplària ha de tenir l'orifici per poder ser considerat com un "punt"? La resposta no és senzilla, però el que és cert és que, com més gran és l'orifici, menys accentuat és el fenomen. A la pràctica, podem considerar que l'orifici ha de ser d'una amplària d'un ordre de magnitud no massa superior a la longitud d'ona. Tot i això, matemàticament, podem dividir l'amplària de l'orifici (el punt) en tants punts (més petits) com vulguem. Podem fer-nos una idea del que passa amb més detall observant la figura 8.4.:

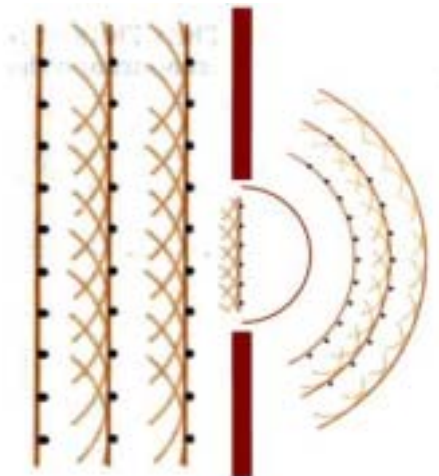


Figura 8.4.

8.1.2.- La difracció.

Considerant la figura anterior, i tenint en compte que cada punt emet en totes direccions, podem observar que, si parlem d'una ona de llum, el que vegem des de "l'altre costat del forat" dependrà del lloc des d'on ho mirem. En l'exemple gràfic ho mirarem des de dos punts de vista diferents:

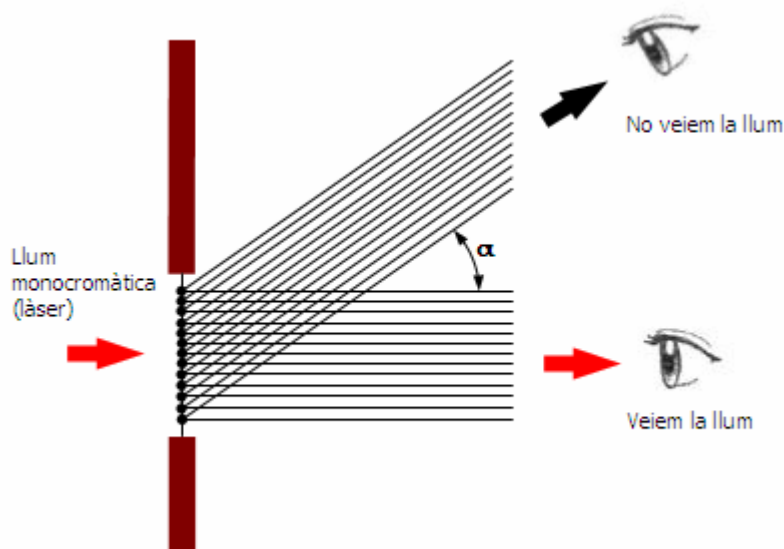


Figura 8.5.

ATENCIÓ: El dibuix només és una representació. Sota cap concepte es pot apuntar directament amb un làser a l'ull d'una persona.

Veiem que l'observador que rep el raig perpendicular al forat, pot veure perfectament la llum, però el que el rep en biaix a un determinat angle α , no la pot veure. Aquest fenomen s'anomena **difracció** i es produeix perquè, en el primer cas, les ones de cada punt es sumen, en canvi, en el segon, s'anul·len les ones a les altres i, per tant, el resultat és "absència" de llum (fosc). En aquest cas, es tracta d'una interferència destructiva com la que hem descrit en l'apartat 4.1.2. (figura 4.4).

Per explicar-ho a nivell teòric ens basarem en l'explicació que en dona Paul A. Tipler en el seu llibre "Física"¹: Suposem que dividim l'obertura en 100 intervals iguals. Podem considerar que al mig de cada interval hi ha un punt emissor (segons Huygens). Si el punt de vista de l'observador és perpendicular al raig, les ones dels 100 punts es sumaran, ja que es troben en fase:

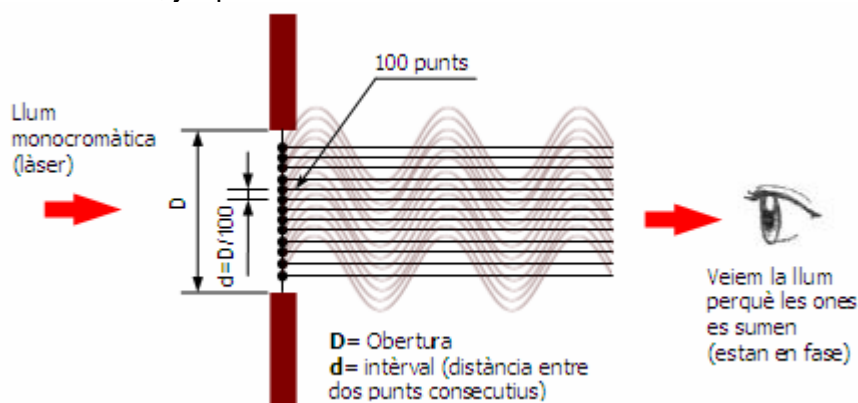


Figura 8.6

¹ Tipler, Paul A. - Física - Ed. Reverté - Barcelona, 1978 (Vegeu bibliografia)

En canvi, si el punt de vista de l'observador es troba a cert angle α de l'anterior, les ones es "resten", ja que es troben en contrafase (desfasades 180°):

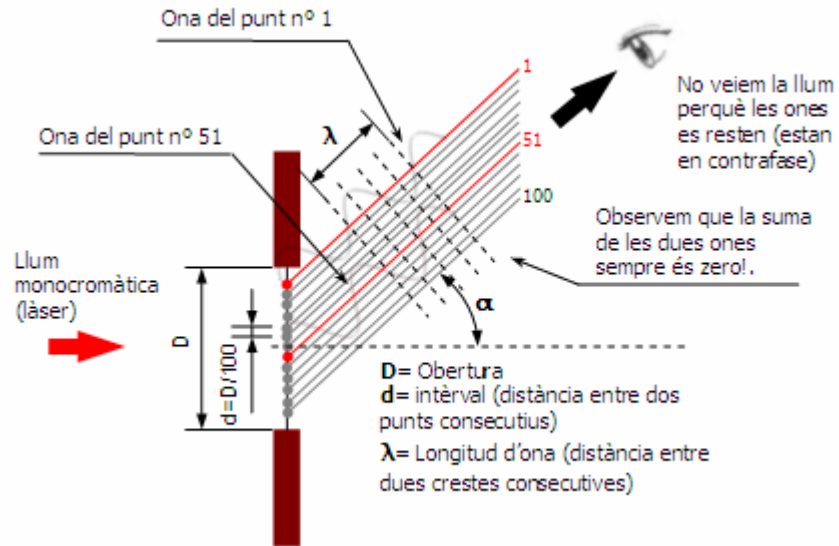


Figura 8.7

Fixem-nos que l'ona del punt núm. 1, s'anul·la amb la del punt núm. 51, la del punt núm. 2, amb la del punt núm. 52, i així successivament, dos a dos, fins arribar al parell de punts (50, 100). Això explica perquè, des de l'angle α , no veiem la llum.

Calculem ara, quin ha de ser aquest angle α :

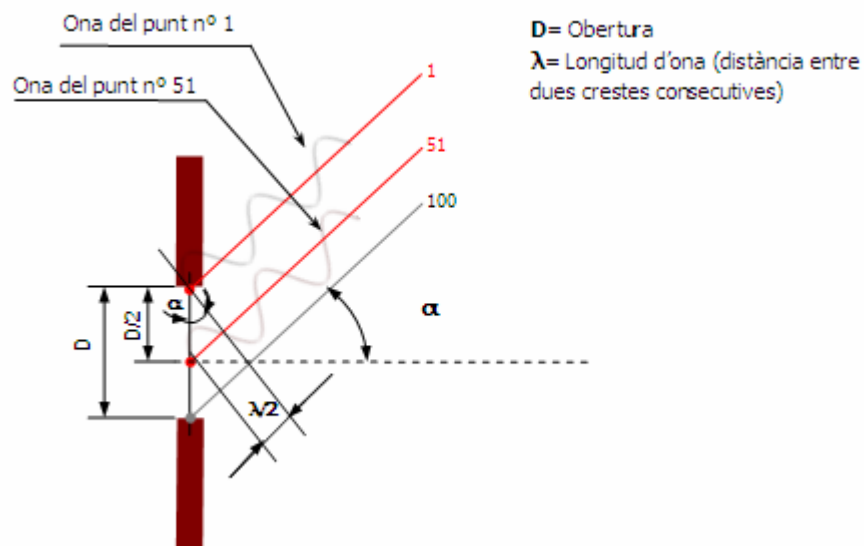


Figura 8.8.

Segons veiem a partir de la figura 8.8.:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda/2}{D/2} = \frac{\lambda}{D} \quad [X.1]$$

Per tant, coneixent l'angle i l'amplada de l'obertura, podem calcular la longitud d'ona de la llum làser:

$$\lambda = D \cdot \sin \alpha \quad [X.2]$$

I, a partir d'aquesta, la seva freqüència, ja que la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques és la velocitat de la llum c , tal com hem explicat al capítol 3.

$$v = \frac{x}{t} \Rightarrow c = \frac{\lambda}{T} \quad ; \quad T = \frac{1}{\nu} \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Per tant:

$$\nu = \frac{c}{D \cdot \sin \alpha} \quad [X.3]$$

Cal aclarir que aquest fenomen no passa només a l'angle α , sinó que es va repetint cada cop que les ones es troben en contrafase:

- α : El desfasatge de les ones és de 180°
- α' : El desfasatge de les ones és de $180^\circ + 360^\circ$
- α'' : El desfasatge de les ones és de $180^\circ + 2 \cdot 360^\circ$
- α''' : El desfasatge de les ones és de $180^\circ + 3 \cdot 360^\circ$

i així successivament.

Projectant la sortida de l'orifici en una pantalla, ho veuríem de la següent manera:

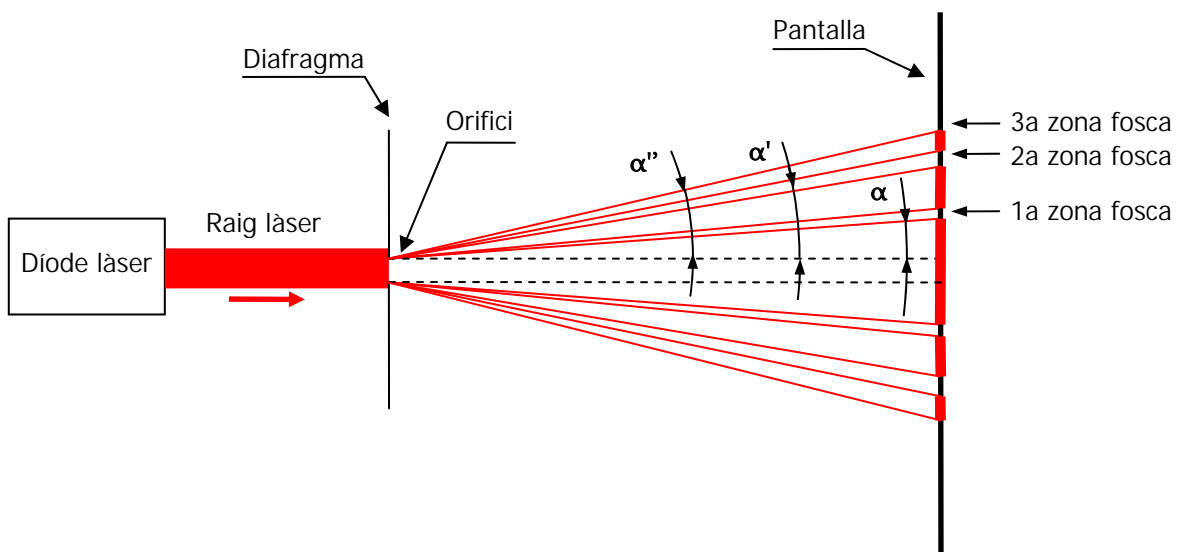


Figura 8.9.

Remarcarem que les equacions [X.2] i [X.3] només valen per a orificis rectangulars (escletxes), on cada punt “número 1” es pot anul·lar amb el seu parell, el punt “número 51”. En orificis circulars això no passa i hem de corregir les dues equacions per aquestes altres:

$$\lambda = \frac{D \cdot \sin \alpha}{1,22} \quad [X.4] \quad \text{i} \quad \nu = \frac{1,22 \cdot c}{D \cdot \sin \alpha} \quad [X.5]$$

Observem que només varien pel factor 1,22, però la demostració no la farem perquè és massa complicada per a aquest treball.

En resum, les projeccions sobre la pantalla que veurem en els dos casos (difracció per escletxa i difracció per orifici circular) seran així:

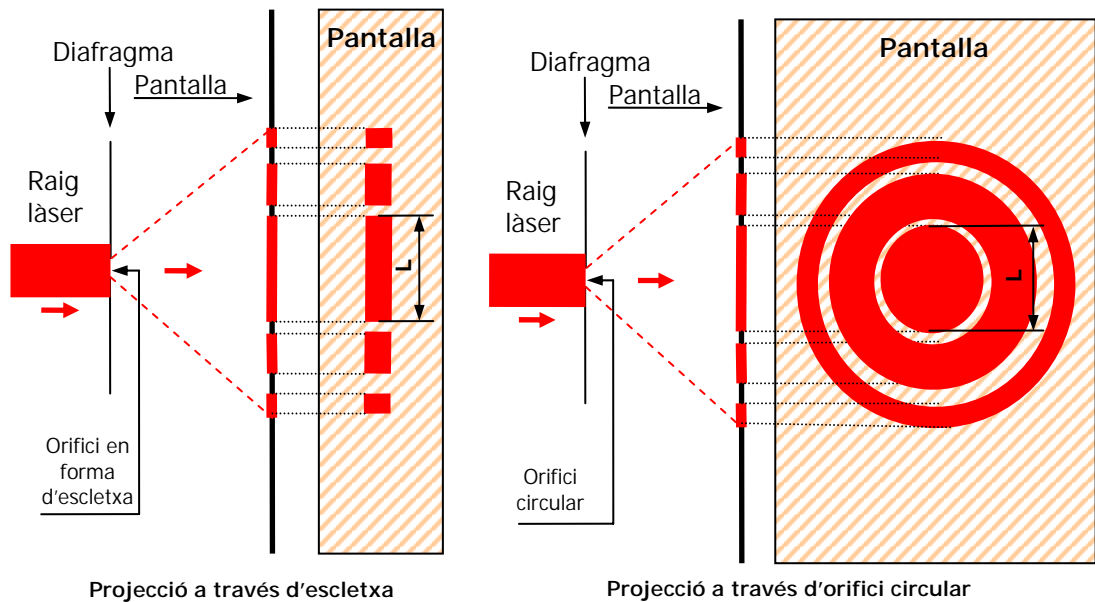


Figura 8.10.

Vegem, en la figura 8.10., la importància de la llargada (o diàmetre, en el segon cas) L , que ens servirà per calcular la longitud d'ona λ i la freqüència ν de la llum làser a partir de les equacions [X.2], [X.3], [X.4] i [X.5].

8.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.

Primerament ens caldrà tenir dos diaframes (vegeu llista de material a l'apartat 8.5.), un amb una escletxa d'amplada D_e i un altre amb un (o diversos) forat circular de diàmetre D_c .

Farem dos experiments, pràcticament iguals, però un amb el primer diafragma i l'altre, amb el segon. En tots dos casos situarem el làser perpendicular al diafragma, fent incidir el raig sobre l'obertura.

Col·locarem la pantalla amb paper mil·limetrat a una distància llarga x del diafragma (la llargada d'una habitació) i d'aquesta manera podrem veure clarament la projecció "difractada" del raig sobre el paper.

A continuació, resseguirem amb llapis les zones il·luminades de la projecció i així tindrem la mesura de l'amplada L , que acabem d'explicar en l'apartat anterior.

La col·locació dels elements serà així:

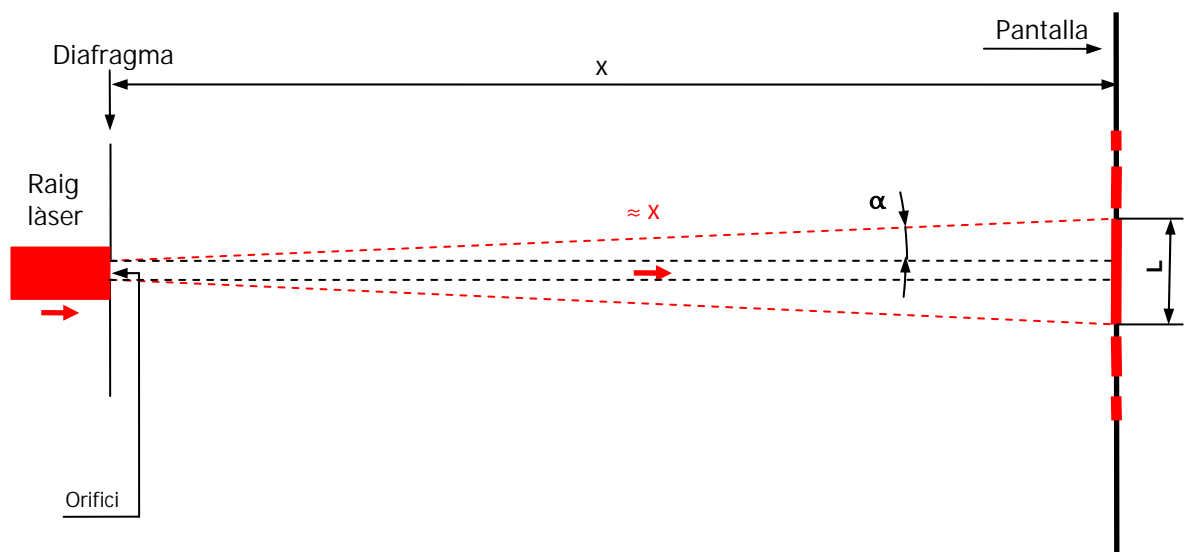


Figura 8.11

Com que la distància x és prou llarga, podem considerar que la llargada de la línia vermella és $\approx x$, i si negligim l'amplada de l'esclatxa, també podem considerar que l'angle α comença al punt $L/2$. Fent aquestes aproximacions:

$$\frac{L/2}{x} = \sin \alpha \quad [\text{X.6}]$$

Aplicant-ho a les quatre equacions [X.2], [X.3], [X.4] i [X.5] podem calcular la freqüència i la longitud d'ona així:

$$\lambda = \frac{D \cdot L}{2 \cdot x} \quad [\text{X.7}] \quad \nu = \frac{2 \cdot x \cdot c}{D \cdot L} \quad [\text{X.8}]$$

(Per a difracció a través d'esclatxa)

i, també:

$$\lambda = \frac{D \cdot L}{2,44 \cdot x} \quad [X.9] \quad \nu = \frac{2,44 \cdot x \cdot c}{D \cdot L} \quad [X.10]$$

(Per a difracció a través d'orifici circular)

Aquestes quatre equacions seran les que ens permetran fer el càlcul en el nostre experiment. En teoria, els valors haurien de ser idèntics tant en el cas de l'esclatxa com en el cas de l'orifici circular.

8.3.- REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT.

La preparació és simple, ens caldrà col·locar el punter làser en el seu suport, muntar el diafragma amb esclatxa i el diafragma amb l'orifici en els seus suports corresponents i un full de paper mil·limetrat enganxat a la paret, tot disposat tal i com ens mostra la Figura 8.11.

Per a la realització d'aquest experiment vam construir un suport mòbil de fusta per a subjectar el diafragma, de manera que ens permetés alinear qualsevol dels forats del diafragma a la sortida del raig làser. (Figura 8.12). El diafragma amb una esclatxa l'hem agafat de l'equip vell d'òptica de l'institut (vegeu capítol 5), però en el cas del forat no en trobem cap de suficientment petit, així que utilitzant diferents mides de broques i amb l'ajut d'un trepant de columna i un altre de precisió hem foradat una làmina metàl·lica. (Figura 8.13).



Figura 8.12.



Figura 8.13.

Hem seguit l'ordre de realització següent:

- Escollir la distancia x ($x=6,5\text{m}$). El criteri seguit a estat arbitrari, ja que ens hem cenyit a les dimensions de l'habitació.
- Col·locar el full de paper mil·limetrat a la paret.
- Projectar el làser a la paret tot fent-lo passar primerament per l'obertura del diafragma amb esclatxa i en un segon lloc pel que tenia un orifici.(Figura 8.14.)

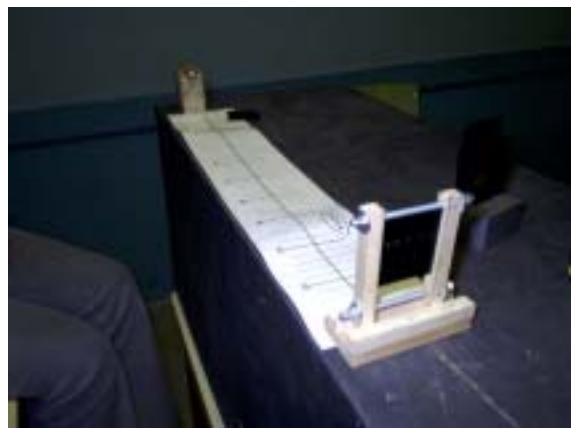


Figura 8.14.

Els resultats presentats de forma gràfica han estat els següents:

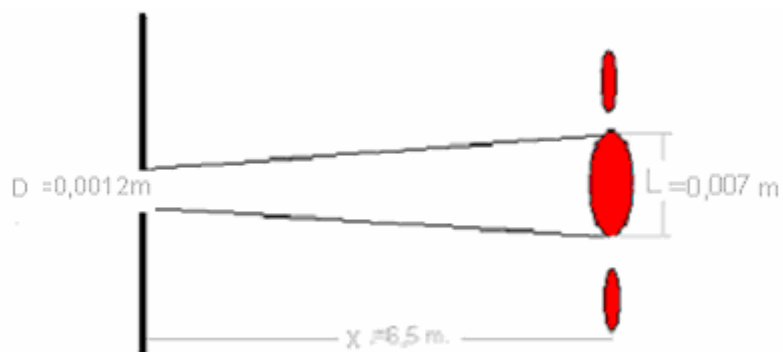


Figura 8.15.:Projecció a través del diafragma amb esclatxa

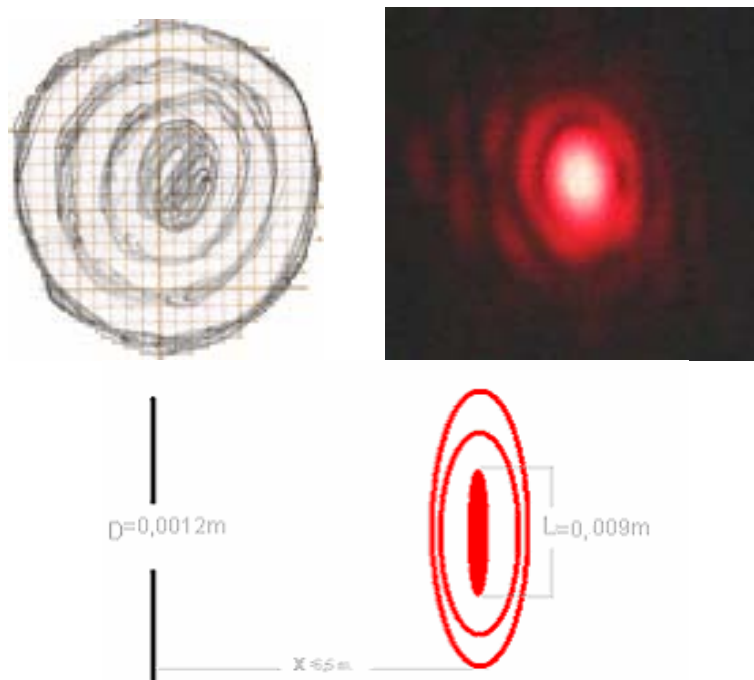


Figura 8.16.: Projectió a través del diafragma foradat

Tal com hem especificat en l'apartat 8.2. i amb les mesures pertinents realitzades podem procedir al càlcul de la freqüència i la longitud d'ona .

- **Càlculs:**

Segons les dades de la primera projecció (la que es fa passar el raig per el diafragma amb **escletxa**) podem procedir al càlcul de la longitud d'ona

Dades:

D=0,0012m.

L=0,007m.

X=6,5m.

Càlcul:

$$\lambda = \frac{D \cdot L}{2 \cdot x} = \frac{0,0012 \cdot 0,007}{2 \cdot 6,5} = 6,4 \cdot 10^{-7} = 640 \text{ nm}$$

Procedim a calcular la freqüència

Dades:

D=0,0012m.

L=0,007m.

X=6,5m

c=299.792.458 m/s

Càlcul:

$$\nu = \frac{2 \cdot x \cdot c}{D \cdot L} = \frac{2 \cdot 6,5 \cdot 299.792.458}{0,0012 \cdot 0,007} = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Calcularem ara la longitud d'ona per a la segona projecció (orifici circular):

Dades:

$$D=0,0012\text{m}$$

$$L=0,009\text{m}$$

$$X=6,5\text{m}$$

Càlcul:

$$\lambda = \frac{D \cdot L}{2 \cdot x} = \frac{0,0012 \cdot 0,009}{2,44 \cdot 6,5} = 6,8 \cdot 10^{-7} = 680\text{nm}$$

Calculem la freqüència:

Dades:

$$D=0,0012\text{m}$$

$$L=0,009\text{m}$$

$$X=6,5\text{m}$$

$$c=299.792.458 \text{ m/s}$$

Càlcul:

$$\nu = \frac{2 \cdot x \cdot c}{D \cdot L} = \frac{2,44 \cdot 6,5 \cdot 299792458}{0,0012 \cdot 0,009} = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

8.4.-CONCLUSIONS.

Com hem pogut comprovar, a partir de l'aplicació d'una de les propietats del làser hem pogut calcular dues de les seves característiques. Com és pot observar en els resultats, la longitud d'ona quan hem fet passar la llum làser per dintre l'esclatxa ha resultat ser bastant exacte, doncs és 640 nm i el resultat havia d'estar comprès entre 630 i 670 nm (especificacions del díode làser; vegeu apartat 4.3.). En el segon cas, en el qual l'hem fet pesar pel forat, el resultat ha estat una mica massa elevat (680nm). Això pot ser degut al fet que el diafragma amb esclatxa formava part del material òptic de laboratori, i segurament és de molta més precisió que el forat, que l'hem realitzat nosaltres mateixos amb les broques, i per tant té més inexactitud. El mateix ens passa en el cas de la freqüència, en el primer cas de la ranura, el resultat és més precís, pels mateixos motius esmentats.

8.5.-LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT.

- Díode làser amb suport
- Diafragma amb forat rodó i diafragma amb esclatxa, amb el seu suport
- Full de paper mil·limetrat

9.- EXPERIMENT 4: UBICACIÓ DE LA LLUM DEL LASER EN L'ESPECTRE DE LA LLUM VISIBLE. LA REFRACCIÓ: EL PRINCIPÍ DE FERMAT, LA LLEI DE SNELL I L'EQUACIÓ DE CAUCHY.

9.1.- INTRODUCCIÓ TEÒRICA.

En aquest experiment veurem aproximadament quina posició ocupa la freqüència de la llum del nostre làser en l'espectre de la llum visible. Per fer això, primerament descompondrem la llum blanca amb un prisma triangular i projectarem el seu espectre en una pantalla i, després, farem el mateix amb la llum làser. Així comprovarem que aquesta, no solament és monocromàtica (no presenta pràcticament dispersió), sinó que també es projecta en el lloc de l'espectre corresponent al seu color.

9.1.1.- La refracció, el principi de Fermat i la llei de Snell.

El fenomen clau en el nostre experiment és la refracció, que permet descompondre la llum blanca en tots els colors del seu espectre. La refracció consisteix en el fet que quan una ona (en el nostre cas lluminosa) passa d'un medi a un altre canvia de direcció, sempre que les dues velocitats de propagació entre els dos medis siguin diferents.

Suposem que un raig de llum va del punt A al punt B canviant de medi:

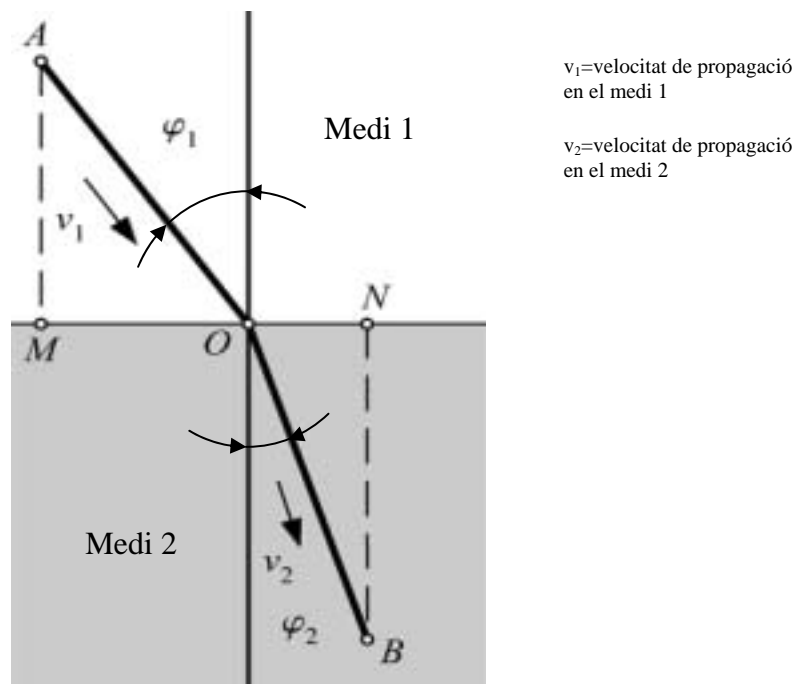


Figura 9.1.

Si $v_2 < v_1$, aleshores $\varphi_2 < \varphi_1$ (φ és l'angle que forma el raig amb la recta normal a la superfície on es produeix el canvi de medi)

Això es pot explicar a partir del principi de Huygens (vegeu Capítol 8.1.1.), però com que ja l'hem vist en l'experiment 3, ho explicarem a partir del principi de Fermat, que,

tot i ser molt senzill, no s'estudia a 2n de batxillerat. Aquest principi diu que "la trajectòria del punt A al punt B és la que correspon al temps mínim".

Això significa que el raig no seguirà el recorregut més curt en l'espai (una recta d'A a B) sinó que invertirà el mínim temps possible en anar d'A a B.

Ja hem vist al capítol 2.2.4. que la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques (com la llum) és $c=299.792,5$ km/s. L'**índex de refracció** d'un material (transparent) és $n_a=c/v_a$ on v_a és la velocitat de propagació en el material **a**. Tal com podem veure, es tracta d'un número adimensional. Diferents materials tenen diferents índexs de refracció, tal com podem veure en la taula següent:

MEDI	Índex de Refracció (n)
Buit	1
Aigua	1,33
Politetrafluoroetilè(TFE)	1,35
Alcohol etílic	1,36
Fluorita(CaF_2)	1,43
Acetal de cel·lulosa	1,46-1,50
Vidre	1,46-1,50
Acrílic	1,49
Polietilè	1,51-1,54
Asilon	4,52-1,53
Poli-clorur de vinil(PVC)	1,52-1,55
Sal gema($NaCl$)	1,54
Quarç(SiO_2)	1,54
Policarbonat	1,59
Poliestire(PS)	1,59
Sulfur de carboni	1,63
Polisulfona	1,63
Espat d'Islandia($CaCO_3$)	1,66
Diamant	2,42
Vidre de Crown	1,51
Vidre de Flint	1,60

Figura 9.2.

Si minimitzem la funció de la trajectòria d'A a B respecte al temps, trobarem la relació entre els angles φ_1 i φ_2 . No farem aquí la demostració, però aclarirem que està a l'abast de qualsevol alumne de segon de batxillerat, ja que es tracta d'un problema matemàtic de màxims i mínims. Aquesta fórmula es coneix com la **Llei de Snell**, però va ser formulada d'aquesta manera per Descartes, a partir dels manuscrits de Snell:

$$n_1 \cdot \sin \varphi_1 = n_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad [X.1]$$

Això explica que si $n_1 < n_2$, $\sin \varphi_1 > \sin \varphi_2$, i, per tant, $\varphi_1 > \varphi_2$ (vegeu figura 9.1.).

Sovint s'utilitza l'índex de refracció relatiu, que correspon al canvi d'un medi a un altre:

$$n_{1,2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} \quad [X.2]$$

9.1.2.- La dispersió i l'equació de Cauchy.

La taula de la figura 9.2 només és una aproximació. En realitat, la velocitat de propagació de la llum (i, per tant, l'índex de refracció) en un medi no és un número fix, sinó que presenta petites variacions que depenen de la longitud de l'ona electromagnètica λ (excepte en el buit, que és c per a totes les longituds d'ona). Això vol dir que l'índex de refracció de cada material serà una mica diferent per a diferents longituds d'ona. Concretament, disminuirà a mesura que augmenti la longitud d'ona (o sigui, a mesura que disminueixi la freqüència).

En el següent gràfic veiem aquesta variació en materials que s'acostumen a utilitzar en òptica:



Figura 9.3

Aquestes corbes de variació segueixen, aproximadament, l'equació experimental de Cauchy:

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 \quad [X.3]$$

On $n(\lambda)$ és l'índex de refracció en funció de la longitud d'ona λ , i A i B són constants pròpies del material utilitzat.

Aquest fenomen, anomenat **dispersió**, ens permet descompondre la llum blanca en tots els colors que la componen:

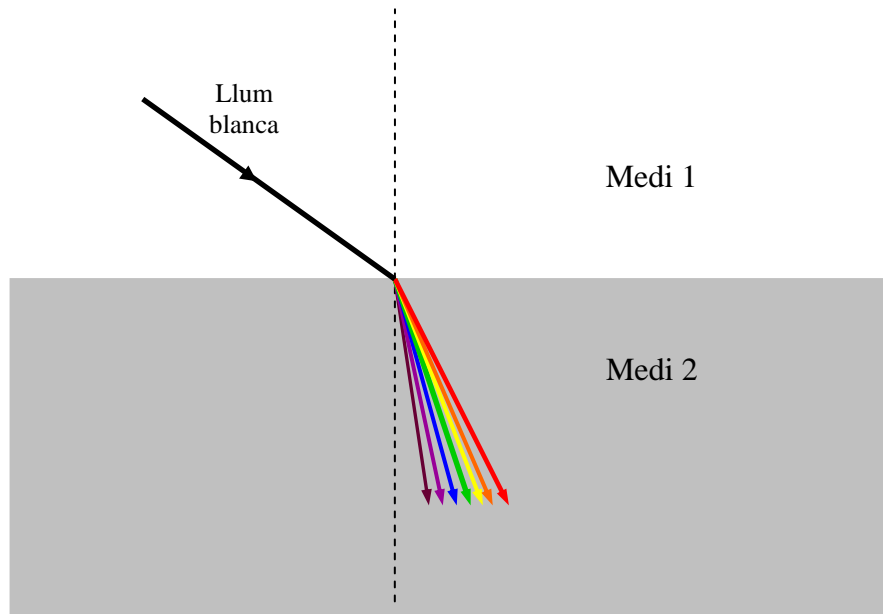


Figura 9.4.

Com que la llum blanca conté totes les longituds d'ona de la llum visible, cada una d'aquestes presenta un índex de refracció n diferent, segons l'equació de Cauchy [X.3] representada a les corbes de la figura 9.3. i depenent del medi 2.

Si apliquem les diferències d' n a la Llei de Snell [X.1] cada longitud d'ona (color) es desviarà un angle φ diferent. Com més curta sigui λ , més es desviarà.

9.1.3.- Utilització de prismes triangulars.

Utilitzant un prisma triangular de vidre podem accentuar ("amplificar") el fenomen de la dispersió aprofitant que hi ha dos canvis de medi:

- Quan la llum entra al prisma: de l'aire al vidre.
- Quan la llum surt del prisma: del vidre a l'aire.

Degut a la geometria del prisma (les cares d'entrada i de sortida no són paral·leles) aconseguirem dispersar més la llum blanca, tal com podem veure en aquest dibuix:

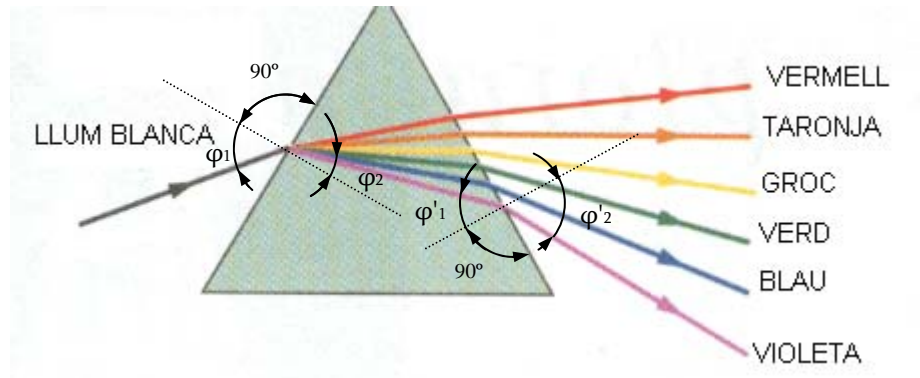


Figura 9.5.

La velocitat de la llum en el vidre és més petita que en l'aire, per tant, el seu índex de refracció és més gran. Si apliquem la llei de Snell [X.1], veiem que $\varphi_1 > \varphi_2$ i que $\varphi'_1 < \varphi'_2$ (hem agafat com exemple només el raig violeta), d'aquesta manera aconseguim més dispersió que en un sol canvi de medi i això ens permet veure millor el fenomen.

Això que hem explicat es pot veure en aquesta fotografia real:

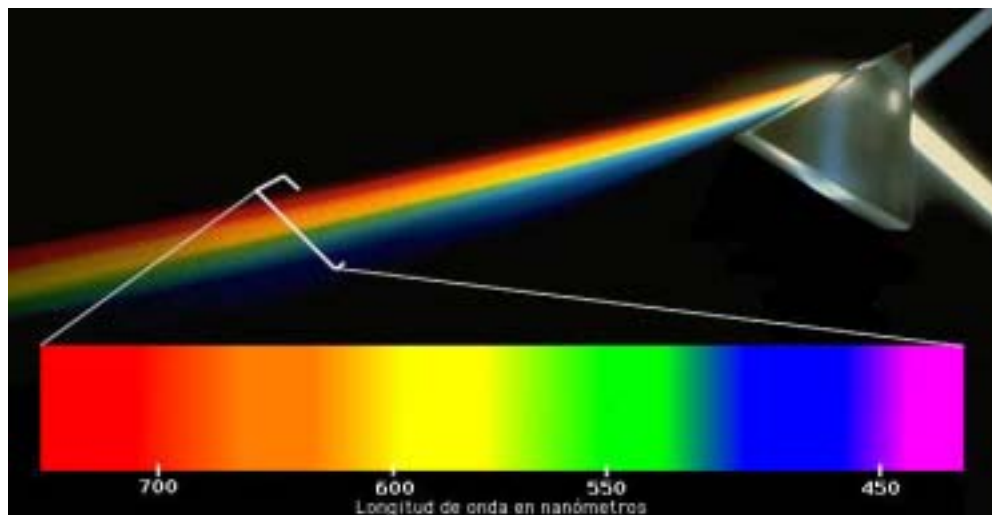


Figura 9.6.

Si, en canvi, fem incidir sobre el prisma un raig de llum monocromàtica (una sola longitud d'ona), com el del nostre làser, la llum no es dispersarà sinó que seguirà la trajectòria pròpia del seu color (en el nostre cas, el vermell).

9.2.- PROCEDIMENT OPERATIU.

Per portar a terme aquest experiment farem passar la llum blanca per un diafragma, perquè ens permeti una major precisió en la posterior incidència en un prisma de Crown, que provocarà la dispersió d'aquesta (Figura 9.7.):

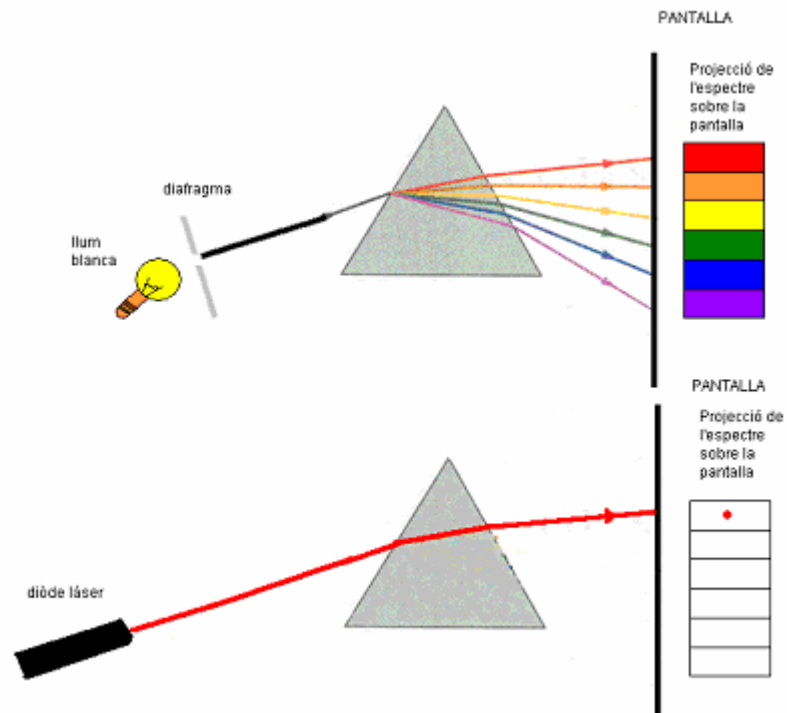


Figura 9.7.

Posteriorment substituïrem el focus de llum blanca per el punter làser, situant aquest en l'espectre lluminós. A partir d'aquest esquema, intentarem calcular la freqüència del raig làser, per fer-ho usarem la llei de Snell, explicada anteriorment.

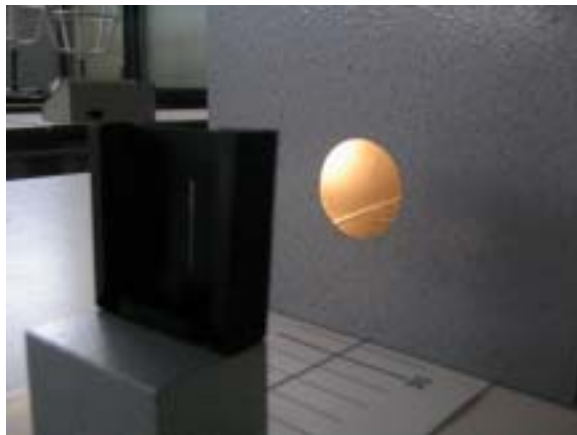
9.3.-REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT

La preparació consisteix en disposar el prisma a la distància desitjada, de manera que tant el làser com la llum blanca incideixin perpendicularment en ell, en el cas del làser és fàcil apuntar, però la llum blanca se'ns dispersa, per aquest motiu, tal com hem explicat, usarem un diafragma amb ranura col·locat en el seu suport. Més enllà del prisma col·locarem una pantalla plana de manera que se'ns hi projecti l'espectre.

L'ordre de realització ha estat el següent:

- a) Situar la sortida de la llum blanca (una bombeta) en el seu suport
- b) Col·locar el diafragma, muntat en el seu suport, a la sortida del focus lluminós.(Figura 9.8)
- c) Col·loquem el prisma de Crown perpendicular a la sortida del focus lluminós
- d) Situem la pantalla a una distància adequada per projectar l'espectre
- e) Resseguim amb llapis l'espectre obtingut (Figura 9.9.)
- f) Substituïm el focus de llum blanca pel diòde làser
- g) Marcar amb llapis el punt d'incidència del raig làser en l'espectre obtingut anteriorment (Figura 9.10.).

Durant la realització de l'experiment hem pogut comprovar que la projecció de l'espectre era molt petita i ens hem ajudat d'una lent convergent i d'una altra de divergent (lents correctores) per tal d'augmentar les seves dimensions i millorar-ne la visibilitat (Figura 9.11.)



Utilitzem un diafragma per "canalitzar" la llum blanca

Figura 9.8.

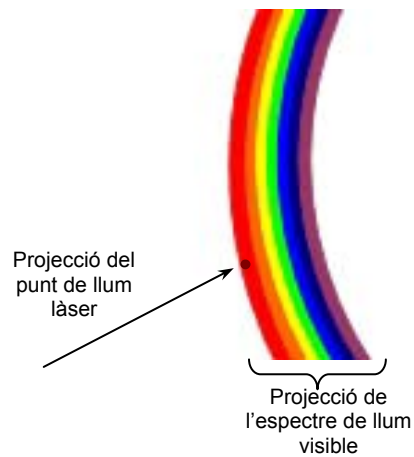


El muntatge complet amb el prisma i les lents correctores

Figura 9.9



Projecció de l'espectre lluminós i del raig làser sobre la pantalla blanca
Figura 9.10



Representació gràfica del resultat obtingut
Figura 9.11.

9.4.-CONCLUSIONS

Tal com hem pogut comprovar, al fer incidir el raig lluminós en un medi diferent del qual viatjava, aquest raig es descompon amb les diferents freqüències del que està format, donant lloc al fenomen de la dispersió. En el cas de la llum blanca, l'espectre que ens mostra és el de l'arc de Sant Martí. Un cop l'hem vist descomposta hem usat el punter làser, col·locant-lo en la mateixa posició, i hem pogut comprovar com aquest està format d'una sola freqüència ja que al canviar-lo de medi no s'ha dispersat i que la seva freqüència coincideix amb la dels tons vermells, ja que ha incidit en el lloc corresponent al color vermell de l'espectre lluminós.

9.5.-LLISTA DE MATERIAL UTILITZAT

- bombeta amb suport
- díode làser amb suport
- diafragma amb suport
- prisma de Crown
- pantalla
- paper mil·limetrat

CONCLUSIONS

Tal com m'havia proposat a l'inici del treball, he aconseguit dissenyar 4 experiments d'òptica amb làser, que es poden portar a terme en qualsevol institut a 2n de batxillerat.

He pogut comprovar les diferents teories i principis que he exposat a les introduccions teòriques de cada pràctica, tot i les desviacions (lògiques) derivades de la poca precisió dels nostres instruments. I, en la meua opinió, la realització dels experiments ha estat de molta ajuda per entendre la teoria.

La realització del treball no solament m'ha servit per adquirir coneixements de les característiques de la llum i en concret el raig làser. Sinó que també he pogut comprovar principis que només havia vist de forma teòrica a la classe de física i, fins i tot, aprendre'n algun de nou.

La utilització de material òptic especialitzat, com lents, diafragmes, prismes, etc., m'ha permès familiaritzar-me amb un camp que m'era, fins ara, totalment desconegut, i pel qual sentia gran curiositat.

Finalment m'agradaria dir que espero que alguns instituts puguin aprofitar el meu treball i portar a terme algun dels experiments que he dissenyat, ja que penso que poden ser d'ajuda als estudiants de segon de batxillerat que es troben en la mateixa situació que jo. Crec que veure les coses a la pràctica és molt útil per adonar-se que la física no només són fórmules, sinó que aquestes tenen una aplicació real.

BIBLIOGRAFIA

- Tipler, Paul A. .- *Física* .- Ed. Reverté .- Barcelona, 1978
- Caturla, Enric i Vidal, Francesc.- *Física 2*. –Ed. Castellnou.-Barcelona,,2000
- H.Mauldin, John. -*Luz, láser y óptica*. –Ed. McGraw-Hill.-Barcelona, 2001
- Gibilisco, Stan .-*Ilusiones ópticas*. – Ed. Editorial McGraw-Hill.-Barcelona, 2000
- Casalderrey, Manuel Luis .-*Láser*.- Ed. Celeste .-Barcelona, 1998
- M.Carroll, John. -*Fundamentos y aplicaciones del láser*. - Ed. Boixareu.- Barcelona, 1995
- F.Jaque Rechea i J.Garcia Solé .-*La luz: el ayer, el hoy y el mañana*. - Ed. Alianza Universidad- Barcelona, 1993
- AA.VV.-*Gran enciclopedia Catalana*.- Ed. Enciclopedia Catalana.- Barcelona, 1994
- Equipo modelo.- *Experiencias de óptica*.- Ed. Enosa. Madrid,1988

WEBLIOGRAFIA

- F. J. Rodriguez.- *Optoelectrónica*.-1998.-<<http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/Componentes/OPTOELECTRONICA.html>>
- Diodes*-1999.-<http://www.geocities.com/lemagicien_2000/elecpage/chlaser/chlaser.html>
- Organització educaplus.-2000.-*La luz*.-<<http://www.educaplus.org/luz/>>
- Optima Precision Inc.- *Aplicacion notes dels diodes*.-<<http://www.optima-optics.com/notes.htm>>
- Ugarte.- *Trabajos sobre la luz*-<<http://www.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/trabajos/urgarte/3.htm>>
- Biopac systems.-*Aplicacion notes*.-2003.-<<http://www.biopac.com/AppNotes/app170LDF100/LDFmodul.htm>>
- Museo de la luz.-*Información sobre la luz*.-1999.-<<http://www.luz.unam.mx/>>
- Laboratorio de luz.-*Proyectos*.-<http://www.upv.es/laboluz/base_fr.htm>
- Física*.-<[http://web.phys.ksu.edu/vqm/laser web/](http://web.phys.ksu.edu/vqm/laser%20web/)>
- Servisystem.-*Reproductor de CD*.-<<http://www.servisystem.com.ar/tutorial/audio/cd/laser.html>>