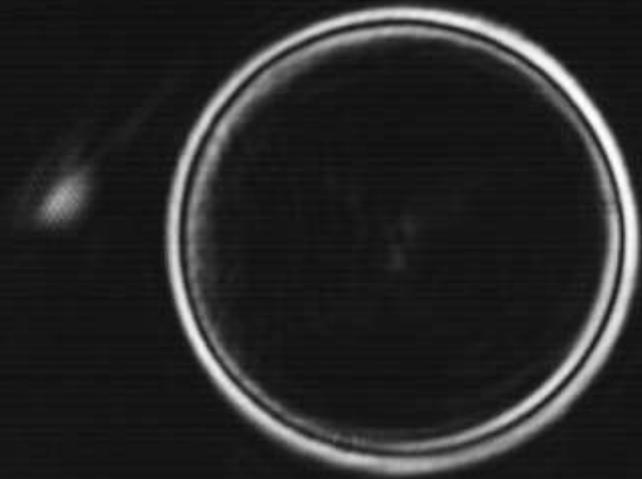


# A PARTIR DE LA LLUM, LA REFRACCIÓ CÒNICA



**Autora:** Xènia Castellà Camps

**Curs:** 2n Batxillerat A

**Tutora del treball :** Dolors Pujol Camps

**Data de lliurament :** 04/10/2016

# ÍNDEX

	Pàg.
INTRODUCCIÓ.....	4
1. MOVIMENT ONDULATORI I CONCEPTES.....	6
1.1 Classificació de les ones.....	6
1.1.1 Segons el medi on es propaguen .....	6
1.1.2 Segons la direcció de vibració.....	7
1.1.3 Segons si són viatgeres o estacionàries.....	7
1.1.4 Segons les dimensions de propagació.....	8
1.1.5 Segons si són periòdiques o no.....	9
1.2 Característiques de les ones.....	10
2. HISTÒRIA DE LA LLUM.....	11
3. ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC.....	16
3.1 Classificació de les radiacions EM.....	17
3.1.1 Pràctica 1: veure l'infraroig a ull nu.....	18
3.2 Espectroscopi.....	19
4. LA LLUM LÀSER.....	20
4.1 Làsers de les pràctiques.....	20
5. NATURALES DE LA LLUM.....	21
5.1 Reflexió.....	21
5.1.1 Lleis de la reflexió.....	21
5.1.2 Pràctica 2: observació de la reflexió.....	22
5.1.3 Tipus de reflexió.....	23
5.1.4 Òptica geomètrica: miralls.....	23
5.1.4.1 Pla.....	24
5.1.4.2 Esfèric.....	24
5.1.4.3 Càlcul aproximat de la posició de la imatge i de la seva mida...26	
5.2 Refracció.....	27
5.2.1 Lleis de la refracció.....	27

5.2.2	Pràctica 3: calcular la velocitat de la llum en un medi a través de l'índex de refracció.....	28
5.2.3	Angle límit.....	29
5.2.4	Reflexió total.....	29
5.2.4.1	Pràctica 4: Reflexió total.....	30
5.2.5	Òptica geomètrica: lents.....	30
5.2.5.1	Convergent o biconvexa.....	30
5.2.5.2	Divergent o bicòncava.....	32
5.2.5.3	Càlcul aproximat de la posició de la imatge i de la seva mida....	32
5.3	Difracció.....	33
5.3.1	Principi de Huygens.....	33
5.4	Interferència.....	34
5.4.1	Principi de superposició.....	34
5.4.2	Interferència quan les ones estan en fase.....	35
5.5	Efecte fotoelèctric.....	35
6.	POLARITZACIÓ.....	36
6.1	Polarització lineal (PL).....	36
6.2	Polarització circular (PC).....	37
6.3	Polarització el·líptica (PE).....	37
6.4	Polaritzador.....	37
6.5	Col·locació de diferents polaritzadors.....	38
6.5.1	Pràctica 5: Llei de Malus.....	38
7.	REFRACCIÓ DOBLE O BIREFRINGÈNCIA.....	41
8.	REFRACCIÓ CÒNICA (RC).....	41
8.1	Cristall biaxial.....	42
8.2	Observació de la RC en el laboratori.....	42
8.2.1	Pràctica 6: observació del feix ordinari i extraordinari en la direcció d'un eix òptic.....	43
8.2.2	Pràctica 7: observació dels dos punts amb polarització ortogonal.....	44
8.3	Polarització dels anells.....	45
8.3.1	Pràctica 8: polarització lineal en el cristall biaxial a $0^\circ$ .....	46
8.3.2	Pràctica 9: polarització lineal en el cristall biaxial a $90^\circ$ .....	47

8.4 RC en cascada .....	47
8.4.1 Pràctica 10: dos cristalls biaxials, mateixa longitud i mateixa orientació....	47
8.4.2 Pràctica 11: dos cristalls biaxials, mateixa longitud i orientació oposada....	48
8.4.3 Pràctica 12: dos cristalls biaxials, mateixa longitud i orientació del segon a 90º .....	48
8.5 Aplicacions de la RC.....	49
CONCLUSIONS.....	52
BIBLIOGRAFIA.....	54
ANNEXOS.....	62
Annex A. Diferents tipus d'infraroig, llum visible, ultraviolat i raigs X.....	62
Annex B. Classificació dels làsers segons la normativa UNE EN 60825-1/A2:2002.....	64
Annex C. Mesures de protecció.....	65
Annex D. La reflexió de la llum.....	66
Annex E. La refracció de la llum.....	67
Annex F. La reflexió total.....	68
Annex G. Demostració de la fórmula de l'amplitud resultant.....	69
GLOSSARI.....	71

## INTRODUCCIÓ

Superar la velocitat de la llum en el buit és impossible. Aquesta frase és la que em va guiar per iniciar el meu treball de recerca. Al principi vaig començar a buscar informació sobre com s'havia calculat la velocitat de la llum al llarg de la història. Així que em vaig proposar calcular-la. Per fer-ho, em vaig plantejar crear un mètode. Es basava en la creació d'una circumferència, que l'interior estava recobert per una superfície reflectora i hi tenia una obertura molt petita per introduir-hi llum. Aquesta llum làser no havia de passar pel centre així aniria rebotant d'un costat a l'altre fins arribar a un altre cop a l'obertura del làser. D'aquesta manera aconseguiria que la llum recorregués forces metres fins que tornés a passar per l'obertura. Però en aquest mètode em faltava algun aparell per calcular el temps amb molta precisió i crear una circumferència de diàmetre gran. D'aquesta manera podria haver aconseguit calcular el temps fent que la llum recorregués els màxims metres possibles. Malgrat tot, si no hagués sigut per aquesta primera tria, molt possiblement no hagués fet el tema de la refracció cònica.

El motiu de la reorientació del meu treball de recerca va ser que se'm va presentar la possibilitat d'entrar al Programa Argó. Dins del programa em van oferir la possibilitat d'escollir un tema relacionat amb la llum i que a més, de seguida em va atraure molt: Enginyeria de la llum a través del fenomen de la refracció cònica. Aquesta estada em va permetre poder entendre la refracció cònica i altres conceptes, que estan inclosos al treball. Després de la meua experiència a la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), vaig decidir que aquest tema havia de ser el meu treball.

Els objectius que m'he proposat han sigut varis:

- Entendre clarament la doble naturalesa de la llum i els seus fenòmens.
- Iniciar-me en un tema que no hi he tingut gaire contacte com és el de l'òptica i la fotònica, ja que aquest tema té aspectes que s'aprofundeixen durant el segon de batxillerat.
- Realitzar alguna experiència per comprovar alguns fenòmens de la llum.
- Entendre què és un cristall biaxial i quines propietats té que el diferencien dels altres.

- Saber com funciona un polaritzador.
- Conèixer experimentalment perquè succeeix el fenomen de la refracció cònica.
- Conèixer les aplicacions que té la refracció cònica.

Per generar la meua hipòtesi sobre la refracció cònica de la llum vaig suposar, com el nom indica, que produïa la figura d'un con. També pensava que moltes de les aplicacions de la llum ja estaven descobertes i que quedava molt poc per mostrar.

L'estructura de l'escrit intercala la part teòrica i la pràctica. He cregut convenient fer-ho així perquè d'aquesta manera la teoria es complementa amb la pràctica, i viceversa. Al final incloc un glossari per a aquelles paraules que estan marcades amb un asterisc. Pel que fa al desenvolupament del treball, per poder arribar a l'explicació de la refracció cònica, he hagut de començar estudiant el moviment ondulatori, les característiques de les ones, l'espectre electromagnètic, la història de la llum i els seus fenòmens. Si no ho hagués fet així, no m'hauria estat possible entendre els experiments de la UAB. En el muntatge de les pràctiques s'utilitzen lents. Per això, hi he inclòs un apartat d'òptica geomètrica. L'apartat del làser també hi havia de ser perquè l'he utilitzat per fer les pràctiques. La majoria de les pràctiques estan fetes al laboratori d'òptica de la Universitat Autònoma de Barcelona gràcies al Programa Argó. Les pràctiques que no fan referència ni a la polarització ni a la refracció cònica, les he fet jo mateixa amb el material d'òptica que m'ha proporcionat el meu institut.

# 1. MOVIMENT ONDULATORI I CONCEPTES

El moviment ondulatori es transmet mitjançant ones de propagació. Una **ona** és una pertorbació que es transmet amb una velocitat finita des del punt que s'origina fins a un altre de l'espai.

El **moviment ondulatori** és l'acció per la qual una ona es propaga oscil·lant en un medi o en el buit i varia la seva amplitud depenent de l'espai i del temps. No existeix intercanvi de matèria però sí d'energia i moment lineal. El focus emissor d'ones és el conjunt de partícules del medi material on s'origina la pertorbació. L'equació que descriu aquest tipus de moviment és la següent: (Veure annex G, p 68)

$$y = 2A \cos \left[ \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \right] \cdot \sin \left( \omega t - k \frac{x_1 + x_2}{2} \right)$$

## 1.1 Classificació de les ones

### 1.1.1 Segons el medi on es propaguen

- Ones mecàniques

Són les que es transmeten en un medi material. En són exemples el so, les ones d'una corda i les ones de l'aigua.

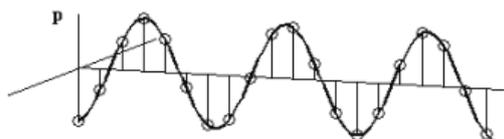


Fig 1. Ona mecànica.



Fig 2. Propagació de l'ona a l'aigua.

- Ones electromagnètiques

Són les ones que es poden transmetre en un medi material i també en el buit. Es propaguen fent oscil·lar el camp magnètic i l'elèctric. Tot l'espectre electromagnètic és d'aquest tipus.

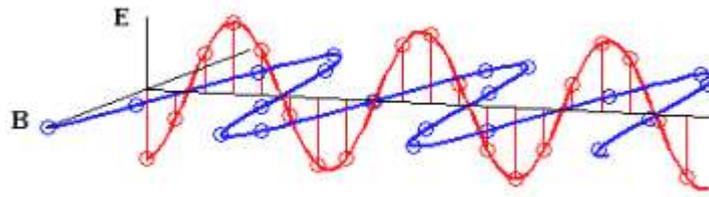


Fig 3. Ona electromagnètica.

### 1.1.2 Segons la direcció de vibració

- Ones transversals

La direcció de propagació d'aquest tipus d'ones és perpendicular al seu desplaçament en el medi. Aquest tipus d'ones només es desplacen en sòlids i a la superfície dels líquids gràcies a la tensió superficial\*. En són exemples la llum i les ones del mar.

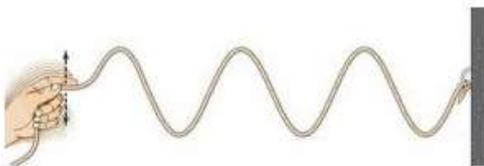


Fig 4. Ona transversal.



Fig 5. Propagació de les ones perpendicular al desplaçament en el medi.

- Ones longitudinals

Es propaguen en la direcció paral·lela al seu desplaçament. Es poden propagar en qualsevol medi però a diferent velocitat. El so i la compressió d'una molla en són dos exemples.

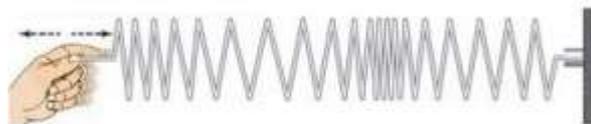


Fig 6. Ona longitudinal.

### 1.1.3 Segons si són viatgeres o estacionàries

- Ones viatgeres

Les ones es desplacen en un únic sentit. Són exemples d'ones viatgeres les perturbacions d'una corda i les ones del mar.

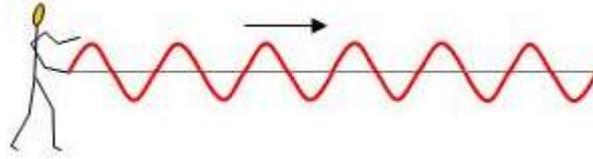


Fig 7. Ona viatgera.

- Ones estacionàries

Són conseqüència de la interferència constructiva de dues ones que es propaguen en sentit contrari i que tenen la mateixa amplitud, velocitat i longitud d'ona. Es produeixen en un medi limitat i certs punts es mantenen immòbils. Dos exemples d'aquest tipus són l'oscil·lació d'una corda fixada pels extrems que vibra d'esquerra a dreta i a la inversa i els instruments de corda.

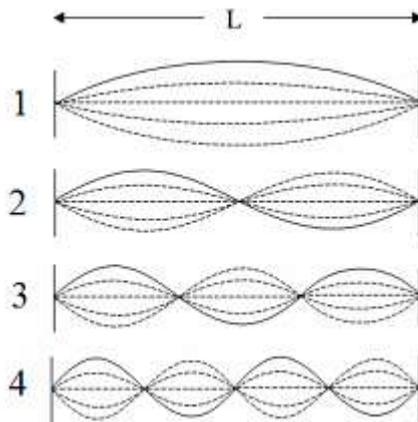


Fig 8. Exemple d'ona estacionària.

**1.1.4 Segons les dimensions de propagació**

- Ones unidimensionals

Es propaguen en una direcció o raig. Les ones formades pel moviment d'una corda i la compressió d'una molla són dos exemples d'aquest tipus.

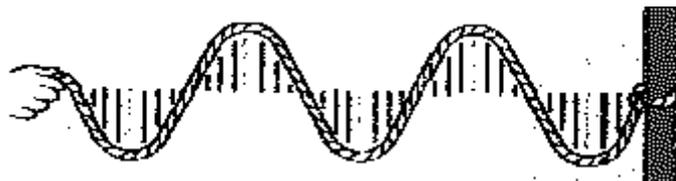


Fig 9. Ona unidimensional.

- Ones bidimensionals

Es propaguen en dues direccions (en el pla). Les ones generades a la superfície de l'aigua i l'oneig de banderes en són dos exemples.

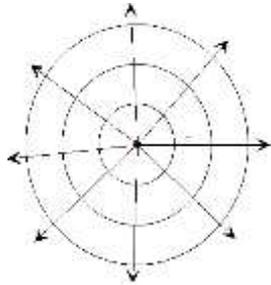


Fig 10. Ona bidimensional. Fig 11. Oneig de bandera.

- Ones tridimensionals

Es propaguen en les tres direccions de l'espai. En són exemples el so, la Wi-Fi i la llum.

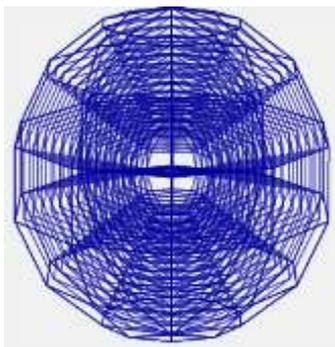


Fig 12. Ona tridimensional.

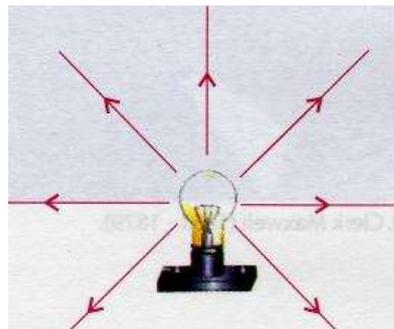


Fig 13. Propagació de la llum en les tres dimensions.

### 1.1.5 Segons si són periòdiques o no

- Ones periòdiques

La seva propagació es basa en la repetició del mateix cicle. La llum és un exemple d'ona periòdica.

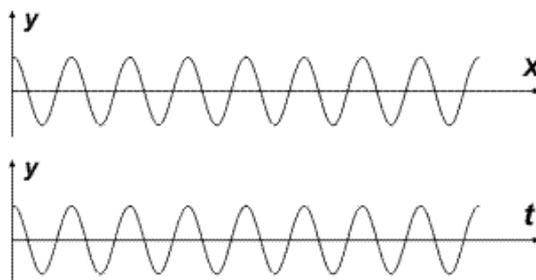


Fig 14. Ona periòdica.

- Ones no periòdiques

Es propaguen sense mantenir constant la forma de l'ona. Alguns exemples que les representen són una pilota rebotant al terra que a mesura que passa el temps perd alçada, un sisme o l'electrocardiograma.

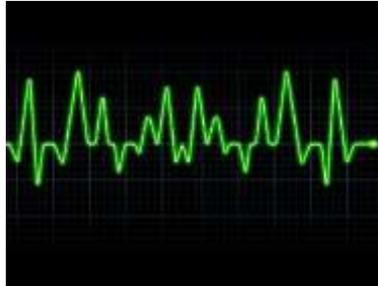


Fig 15. Electrocardiograma.

## 1.2 Característiques de les ones

- **Longitud d'ona** ( $\lambda$ ): distància entre dos punts en el mateix estat de vibració. La unitat en el Sistema Internacional és el metre (m).
- **Freqüència** (f): número d'oscil·lacions en 1 segon. La unitat en el Sistema Internacional és el Hertz (Hz) que és igual a la inversa d'un segon ( $s^{-1}$ ).
- **Període** (T): temps que tarda a fer una oscil·lació completa. La unitat en el Sistema Internacional és el segon (s).
- **Cresta**: punt més alt de l'ona, el màxim.
- **Vall**: punt més baix de l'ona, el mínim.
- **Velocitat de propagació** ( $v$ ): rapidesa en què es desplaça l'ona. La unitat en el Sistema Internacional és el metre partit per segon (m/s).

L'ona té doble periodicitat perquè el període és el temps i la longitud d'ona és l'espai. Es relacionen amb la fórmula:  $v = \frac{\lambda}{T}$  o bé,  $v = \lambda \cdot f$ .

- **Amplitud** (A): valor màxim que pot assolir l'ona respecte la posició d'equilibri. La unitat en el Sistema Internacional és el metre (m).
- **Node**: punt de l'ona on té amplitud zero.

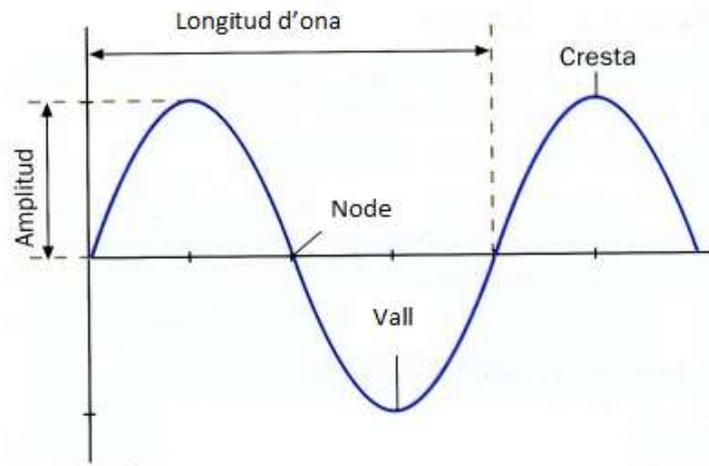


Fig 16. Característiques de les ones.

## 2. HISTÒRIA DE LA LLUM

Un dels primers que es va qüestionar què és la llum va ser un filòsof i polític grec, Empèdocles (492a.C.-432a.C.). La seva idea de la realitat estava formada per quatre elements: aire, aigua, terra i foc. Per això, el filòsof pensava que l'ull estava format pels quatre elements. El foc era el que emetia llum de l'ull cap a l'exterior, tot i que també es generava en el Sol, la Lluna, les làmpades, etc. La llum emesa pel foc viatjava cap als objectes en línia recta a una velocitat finita. Un cop els objectes rebien aquesta llum, n'emetien de pròpia. Si aquesta llum arribava als rajos produïts per l'ull, es creava la visió. El procés era d'emissió-recepció.

Demòcrit (460a.C.-370a.C.) fou un filòsof presocràtic grec que juntament amb Plató (427a.C.-347a.C.) van formular la teoria granular de la llum. Es basava en efluvis\* que eren percebuts com a flux continu per l'ull. Segons Demòcrit, les partícules eren buides i tenien diferents formes i orientacions. Els colors eren causats per les relacions entre les partícules. Per Plató, les partícules eren tetraedres amb massa i els colors es formaven perquè tenien diferents dimensions i viatjaven a una velocitat distinta.

Aristòtil (384 a.C.-322a.C.) va ser un filòsof, lògic i científic grec que no va estar d'acord amb Empèdocles. Pensava que la llum era quelcom que estava a l'espai, o existia o no, no podia estar en algunes regions i a les altres no. Era instantània, era impossible de mesurar el temps que tardava a omplir d'il·luminació l'espai. Per exemple quan sortia el Sol, el temps que tardava a il·luminar d'est a oest era immesurable perquè la llum estava per tot arreu. Contradient a Empèdocles, el mètode per explicar la visió era el

d'absorció. El medi rebia un impuls dels focs externs i feia que es produís la llum. Era una acció instantània. Aquesta llum també estaria a tot arreu, inclòs a l'interior de l'ull. D'aquesta manera teníem visió.

Euclides (325 a.C.-265a.C.) fou un matemàtic i geòmetra grec. Va trobar un problema a la hipòtesi d'Empèdocles. Pensava que hi havia d'haver un desfasament entre obrir els ulls i veure l'objecte. No obstant, aquest fet no passava. Així que va exposar dos possibles errors d'Empèdocles: la llum era instantània o la visió no es produïa per l'excitació de l'objecte quan rebia la llum procedent de l'ull. Tot i que estava d'acord que els focs de l'ull i de l'objecte es relacionaven. Per tant, pensava que els ulls emetien raigs lluminosos en línia recta formant cons d'obertura discontinua i així introduí els conceptes de perspectives i agudes visual\*.

Claudi Ptolemeu (100d.C.-160d.C.) fou un astrònom, geògraf, astròleg, químic i matemàtic greco-egipci. Deia que els cons formats pels raigs lluminosos rectilinis procedents de l'ull eren d'obertura contínua. Així l'observador podia conèixer la distància de l'objecte respecte ell.



Fig 17. Con d'obertura discontinua.



Fig 18. Con d'obertura contínua.

Va fer un estudi de la refracció atmosfèrica i va concloure que la posició de les estrelles que vèiem des de la Terra era falsa. També va expressar, que el recorregut que utilitzava la llum era el que invertia menys temps a recórrer la distància determinada.

Ibn Al-Hàytham (965-1040) fou un matemàtic, físic i astrònom àrab. La seva idea es basava que els raigs anaven de l'objecte fins a l'ull. Ho va comprovar amb l'ajuda d'una càmera fosca\*. Aquest experiment va ajudar a l'estudi de la descripció del funcionament de l'ull. Va intentar explicar els miratges i va introduir el concepte d'aberració esfèrica\*. Es va interessar en la creació d'imatges i va estudiar els miralls esfèrics i parabòlics i les lents. Tanmateix, va experimentar que en la refracció, l'angle d'incidència i el de refracció no són proporcionals.

Al-Farisi (1260-1320) va ser matemàtic i físic persa. Va ajudar als seus estudis l'obra d'Al-Hàytham. Va trobar-hi errors i va presentar altres teories. Tot i que Al-Hàytham es va interessar pel fenomen de l'arc de Sant Martí, Al-Farisi va ser el primer en explicar-ho matemàticament. Es basava en la refracció de la llum en les gotes d'aigua. A partir d'això, va fer una hipòtesi relacionada amb la velocitat de la llum i va introduir el concepte d'índex de refracció.

Willebrord Snel van Royen (1580-1626) va ser un astrònom i científic holandès. Va descobrir la relació matemàtica d'un raig de llum quan passa d'un medi a un altre. És l'anomenada llei de la refracció d'Snell. A partir d'aquesta es podia calcular l'angle de desviació del raig quan travessava medis de diferent índex de refracció.

René Descartes (1596-1650) fou un filòsof, matemàtic i físic francès. Va explicar el fenomen de l'arc de Sant Martí amb l'ajuda de les lleis de la reflexió i de la refracció.

Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) fou un matemàtic i físic italià. Va ser el primer en esmentar la difracció quan va observar un feix de llum que travessava un petit forat. L'ombra que feia era progressiva, fet inexplicable si el feix es propagava en línia recta.

Robert Hooke (1635-1703), científic britànic, va esmentar el caràcter ondulatori. Les vibracions són molt ràpides i es propaguen perpendicularment a la direcció de propagació.

Erasmus Bartholin (1625-1698) fou metge, físic i matemàtic danès. Al 1669, va esmentar la doble refracció mentre ho observava en un cristall de calcita.

Christiaan Huygens (1629-1695), matemàtic, físic i astrònom holandès, va elaborar la teoria ondulatoria de la llum el 1687. Enunciava que l'energia era repartida pel front d'ona, que cada punt del front era un nou focus d'ones i la velocitat de la llum era més ràpida en els medis menys densos. Va explicar la reflexió, la refracció i la doble refracció. Va descobrir la polarització de la llum gràcies a l'observació de Bartholin.

Isaac Newton (1642-1727) fou físic i matemàtic anglès. Va descompondre la llum blanca en un prisma. D'aquesta manera, va obtenir els diferents colors de l'espectre visible. Es podia explicar perquè cada color tenia una velocitat diferent i feia que es

separés dels altres. Va formular una teoria corpuscular de la llum, la teoria d'emissió. Expressava que la llum era una emissió de partícules que es desplaçaven com una corrent. A més, eren les responsables que hi veiéssim, quan entren a l'ull. Va esmentar que la llum es propagava en línia recta a causa de l'alta velocitat i que no tenia fricció. Va defensar aquesta teoria intentant explicar la seva propagació mitjançant els fenòmens de la reflexió i refracció. Creia que la llum es reflectia gràcies a la poca massa respecte l'element que xocava i que el xoc era elàstic\*. Afirmava que la llum es refractava perquè la direcció de propagació canviava, s'acostava a la normal i la velocitat en medis més densos era més alta. Gràcies a aquestes dues explicacions va interpretar l'arc de Sant Martí. Manifestava que cada color estava format per diferents tipus de partícules i aquestes eren atretes amb més o menys intensitat pel medi. Aquesta idea va durar 100 anys.

Thomas Young (1773-1829), físic, fisiòleg i egiptòleg britànic, va demostrar la teoria ondulatoria de Huygens el 1801. Va experimentar el fenomen de la interferència i va observar que en les interferències era possible que s'anul·lés la llum. Era un fet impossible si la llum s'havia de manifestar com a partícula. Va ampliar la teoria ondulatoria mesurant les longituds d'ona de cada color de l'espectre visible. Tanmateix, va elaborar l'experiment de la doble escletxa per demostrar la naturalesa de la llum com a ona. Consistia en fer passar un feix de llum per una escletxa molt petita. Aquest feix arribava fins a una pantalla on hi havia dues escletxes petites amb les mateixes dimensions, molt petites i a prop entre elles. La llum que travessava per les dues escletxes arribava fins a una altra pantalla i es veia el fenomen de la interferència. Hi havia llocs que s'observava molta intensitat de llum i que disminuïa pels costats o s'anul·lava.

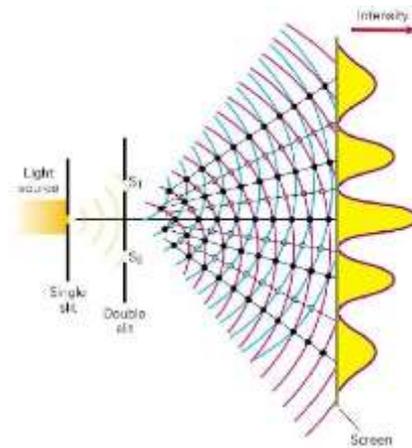


Fig 19. Doble esclatxa, experiment de Young.

Augustin Jean Fresnel (1788-1827) fou un físic francès que va experimentar la llum com a ona. La seva teoria va ser creada gràcies a Huygens i Young, principalment. Va explicar la polarització de la llum, la doble refracció i la difracció. Va formular unes equacions per relacionar la intensitat del feix de llum amb la intensitat reflectida i refractada. Va ser un dels grans desenvolupadors de la teoria ondulatoria i va consolidar les lleis de propagació de la llum en els cristalls. Degut a això, va contribuir molt amb la refracció cònica.

William Hamilton (1805-1865) va ser un matemàtic, físic i astrònom irlandès. Va deduir la refracció cònica a partir de la seva elaboració d'una teoria matemàtica. Determinava el comportament del sistema òptic associant una funció. Per tant, la refracció cònica és un fenomen que s'ha descobert teòricament abans d'experimentar-lo. Va ser un altre fenomen que va donar suport a la teoria ondulatoria de la llum.

Finalment, James Clerk Maxwell (1831-1879), el 1873, va enunciar que la llum estava formada per un camp elèctric i magnètic perpendiculars que oscil·laven i viatjaven a la velocitat de la llum. No necessitava cap medi per propagar-se.

No obstant, no va ser fins el 1887, quan Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) va demostrar la teoria de Maxwell experimentalment i va afirmar que la llum era una ona electromagnètica d'entre altres. A més, va observar l'efecte fotoelèctric. Va il·luminar els elèctrodes\* ( càtode ) amb llum ultraviolada i va observar que l'amperímetre indicava el pas de corrent. Segons Hertz, les ones electromagnètiques cedien energia als electrons i aquests completaven el circuit.

No es va poder explicar l'efecte fotoelèctric amb més detall fins el 1905, quan Albert Einstein (1879-1955), físic alemany, va introduir el concepte del quàntum de llum, basat en què la llum estava formada per un conjunt de partícules. El quàntum el va anomenar fotó. El fotó era indivisible, tenia un nivell alt d'energia però podia variar segons la seva freqüència, viatjava a la velocitat de la llum i no tenia massa.

$$E = h \cdot f$$

$E$  és energia,  $h$  és la constant de Planck ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ) i  $f$  és freqüència.

Louis-Victor de Broglie (1892-1987), físic francès, el 1924, va proposar que la matèria té dualitat ona-corpúscle. En la mecànica quàntica, la matèria es pot comportar com a ona o com a partícula segons l'experiment que es faci. La longitud d'ona associada a una partícula ve donada per la següent fórmula:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Finalment, avui en dia la llum es considera que té doble naturalesa perquè hi ha fenòmens on es manifesta com a ona i en altres, com a partícula.

En el següent codi QR, es pot veure un vídeo sobre la història de la llum des de les primeres idees fins a Newton:



### 3. ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC

L'espectre electromagnètic (EM) engloba tots els tipus de radiació electromagnètica. La radiació és l'energia que s'emet en forma d'**ona** (la llum) o **partícula** (el fotó). Les radiacions EM que formen l'espectre EM són les ones de ràdio, microones, infraroig, visible, ultraviolat, raigs X i raigs gamma, que estan classificades segons la seva longitud d'ona, freqüència i energia.

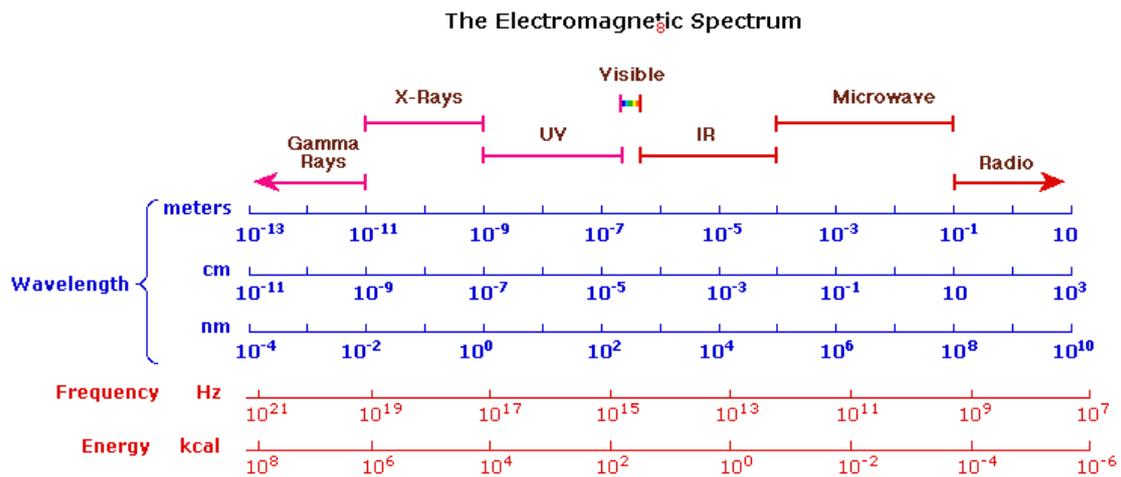


Fig. 20: Espectre electromagnètic

### 3.1 Classificació de les radiacions EM

- Ones de ràdio

És el tipus amb més baixa freqüència i amb major longitud d'ona de  $10^4$  m fins a 1 m. La freqüència oscil·la entre 10 kHz i 300 GHz.

S'utilitzen per la transferència de dades a través de la televisió, els mòbils, les ressonàncies magnètiques, les xarxes sense fil i radioaficionats, soldadures, esterilització d'aliments i la modulació\*: de freqüència\* i d'amplitud\*.

Poden transmetre informació variant la combinació de l'amplitud, la freqüència i la fase de l'ona. La radiació EM pot impactar sobre un conductor i enganxar-se amb ell per tal de recórrer tot el seu trajecte i així induint un corrent elèctric que permet excitar els electrons del material de conducció. Això és aplicat a les antenes.



Fig 21. Modulador de freqüència.

- Microones

Tenen una longitud d'ona entre 1 m i  $10^{-3}$ m. La freqüència va de 300 MHz a 300 GHz.

Les seves aplicacions són: estudiar l'univers, comunicació amb els satèl·lits de l'òrbita de la Terra, tripulació d'avions, llançaments de míssils, telemetria, diatèrmia, forns i escalfadors o investigacions meteorològiques.

- Infraroig

Té una longitud d'ona de  $10^{-3}$  m a  $10^{-7}$  m. La freqüència és de 300 GHz a 400 THz. Normalment no arriba a la superfície de la Terra. Si incideix a sobre una superfície, pot provocar vibracions a les molècules del cos perquè és una radiació tèrmica.

L'infraroig es pot dividir en tres: llunyà, mitjà i proper. Té moltes utilitats per la indústria, medicina, astronomia, etc. (veure annex A, p 61)

### 3.1.1 Pràctica 1: veure l'infraroig a ull nu

Tot i que l'ull humà només veu l'espectre visible, amb la utilització del telèfon mòbil i el comandament a distància es pot aconseguir. Aquest és l'objectiu de la pràctica.

El comandament a distància emet radiació infraroja que a través d'una càmera es pot observar. Les càmeres poden captar aquesta radiació perquè són fabricades amb l'objectiu de poder fer fotografies amb poca llum. Per tant, són sensible a la llum visible i a la part de l'infraroig que és propera a la llum visible.

En la pràctica s'utilitza un comandament a distància d'una televisió i un telèfon mòbil.

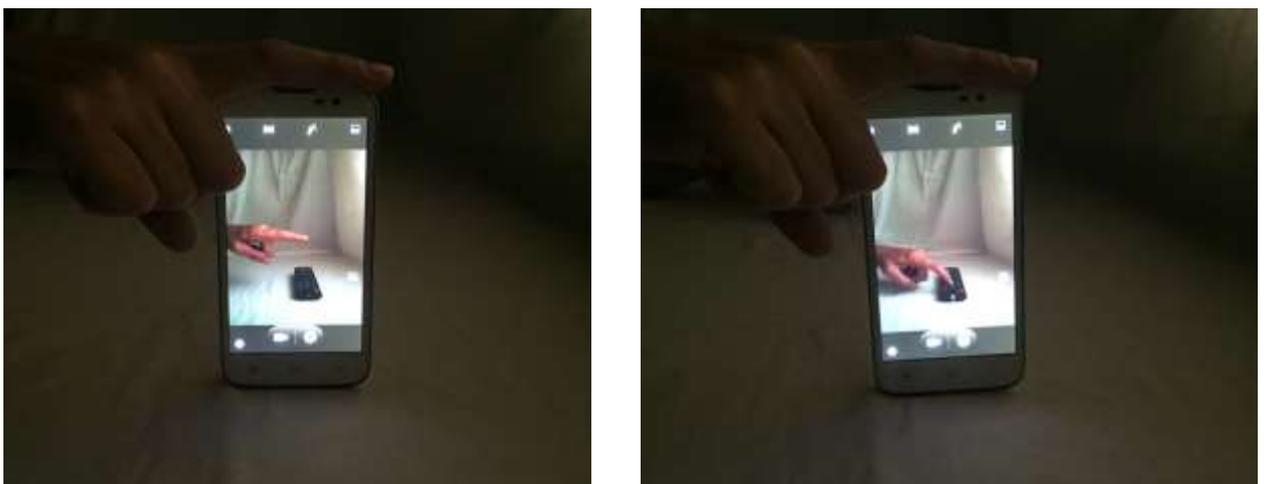


Fig 22. Observació de l'infraroig

A la primera imatge s'observa el comandament a distància sense funcionament vist a través del mòbil que s'utilitza per fer l'experiment. A la següent foto, s'activa el comandament i es captura el moment. El que es pot observar és una llum blava que surt del comandament. Aquesta llum és la infraroja que fa activar l'aparell receptor que està codificat amb el comandament a distància.

- Visible

La longitud d'ona comprèn de  $3,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  a  $7,8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ . És la part més petita de l'espectre electromagnètic però és la part més important per la visió humana. Està formada per sis colors: vermell, taronja, groc, verd, blau i violeta. La suma d'aquest rang de colors és la llum blanca. Cada color té associat una freqüència diferent o longitud d'ona. (veure annex A, p 61)

- Ultraviolat

La longitud d'ona és de  $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$  a  $10^{-8} \text{ m}$ . És molt energètic i pot trencar enllaços químics. Tot i que l'atmosfera de la Terra bloqueja molts rajos ultraviolats (UV) generats pel Sol, l'exposició de la pell a aquesta radiació pot ser dolenta per la salut. Pot causar càncer danyant les molècules d'ADN de les cèl·lules. S'hi distingeixen tres tipus: UV-A, UV-B i UV-C. (veure annex A, p 61)

- Raigs X

La longitud d'ona és de  $10^{-8} \text{ m}$  a  $10^{-11} \text{ m}$ . Les seves aplicacions bàsiques són la visió a través d'objectes, a la física d'alta energia i a l'astronomia. Són perillosos pels éssers vius. Hi ha de dos tipus: rajos X durs i rajos X suaus. (veure annex A, p 61)

- Raigs gamma

És el tipus que té més energia i menor longitud d'ona, de  $10^{-11} \text{ m}$  a  $10^{-15} \text{ m}$ . Són utilitzats en astronomia per estudiar les regions amb alta energia, destruir cèl·lules cancerígenes o formació de radioisòtops\*.

### 3.2 Espectroscopi

L'espectre és la descomposició de qualsevol radiació electromagnètica en les radiacions de diferent longitud d'ona. L'espectroscopi és l'aparell que fa possible aquesta descomposició.



Fig 23. Espectroscopi.

## 4 LA LLUM LÀSER

El làser és un aparell que genera i amplifica un feix de llum en l'espectre visible, ultraviolat o infraroig. El feix és monocromàtic\*, coherent\* (propietat que fa que aquesta llum sigui polaritzada) i direccional\*. Els diferents tipus de làsers es distingeixen per la longitud d'ona (que pot ser de 200 nm a 1 nm), la duració (de forma contínua fins a 0,25 segons o amb pulsacions de duració variable) i la potència o energia (en els feixos de llum continus la potència oscil·la entre microwatts a quilowatts i en els de pulsacions l'energia oscil·la entre 0,1 J a 0,1 mJ). (Veure annex B, p 63 i C, p 64)

### 4.1 Làsers utilitzats a les pràctiques

A les pràctiques de la polarització i de la refracció cònica faig servir dos làsers. Un làser és de classe 4. Aquesta classe de làser és la més perillosa. Comporta risc tant per l'ull com per la pell. La freqüència és menor de 2 MHz i la longitud d'ona és de 1000 nm a 1200 nm. L'altre làser és de la classe 2. És perillós si es mira el feix bastant de temps. La potència màxima que pot assolir és de 1mW i la longitud d'ona és de 600 a 700 nm, radiació visible.



Fig 24. Característiques dels dos làsers.

## 5 NATURALESA DE LA LLUM

Hi ha diversos fenòmens on la llum es comporta com a ona. Són la reflexió, refracció, difracció i interferència. N'hi ha d'altres on es comporta com a partícula, que són l'efecte fotoelèctric, radiació de cos negre i espectres atòmics. Els dos últims no hi entro en detalls perquè no es corresponen amb el meu treball.

### 5.1 Reflexió

És una propietat ondulatoria de la llum que ocorre quan un raig incideix sobre una superfície de separació de dos medis. La superfície no absorbeix totes les longituds d'ona i una part de la llum és reflectida.

En la reflexió es té en compte: el raig incident, el raig reflectit, l'angle d'incidència, l'angle reflectit i la normal, que és una línia imaginària i perpendicular a la superfície de reflexió en el punt d'incidència del raig.

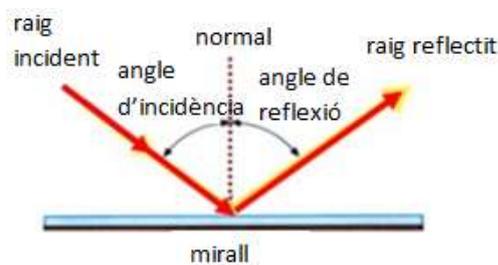


Fig 25. Reflexió

#### 5.1.1 Lleis de la reflexió

- Primera llei de reflexió

El raig incident, el raig reflectit i la normal estan en un mateix pla.

- Segona llei de reflexió

Esmenta que els angles d'incidència i de reflexió són iguals respecte la normal. Aquesta afirmació ve donada pel principi de Fermat. Aquest principi tracta que la trajectòria de la llum és la més ràpida per anar entre dos punts.

$$\alpha_i = \alpha_r$$

On  $\alpha_i$  és l'angle d'incidència i  $\alpha_r$  és l'angle reflectit.

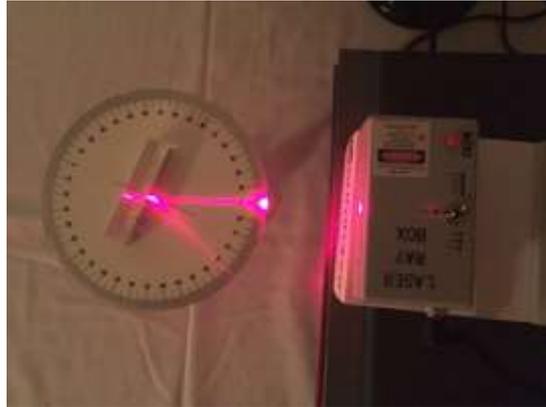


Fig 25. Comprovació de la 2a llei de la reflexió.

### 5.1.2 Pràctica 2: observació de la reflexió

Veure annex D, p 65 per veure l'objectiu, material i procediment.

En aquest codi QR hi ha un vídeo de l'experiència que vaig fer.



Obtinc com a resultat que si el raig incident és de  $30^\circ$ , el raig reflectit també és de  $30^\circ$ . Per tant, es comprova la segona llei de la reflexió.

### 5.1.3 Tipus de reflexió

#### - Difusa

Té lloc quan la superfície d'incidència dels rajos de llum és irregular. Encara que els raigs incidents siguin paral·lels, els raigs reflectits no ho seran perquè la normal de cada un ha de ser perpendicular a la superfície que incideix el raig. Forma una imatge difusa.

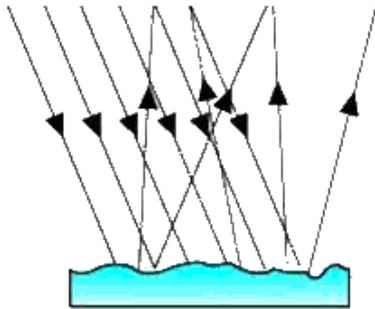


Fig 27. Reflexió difusa.



Fig 28. Paisatge amb aigües mogudes.

#### - Especular

La superfície de separació dels dos medis és regular. Si els raigs incidents són paral·lels, els reflectits també ho seran perquè la superfície d'incidència de cada raig és igual. Per tant, forma una imatge a la mateixa distància que està l'objecte respecte la superfície, com un mirall.

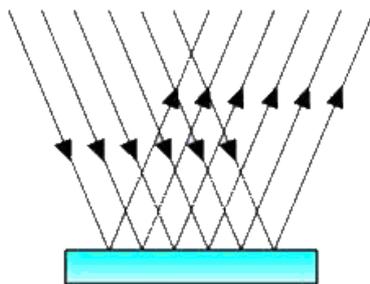


Fig 29. Reflexió especular.



Fig 30. Paisatge amb aigües tranquil·les.

### 5.1.4 Òptica geomètrica: miralls

Els miralls tenen una superfície llisa i molt **reflectora** que, per reflexió dels rajos de llum, dona imatges clares dels objectes.

Hi ha miralls plans, esfèrics i parabòlics però només comentaré els dos primers casos.

En la formació d'imatges tant dels miralls com de les lents (explicació en el 5.2.5) es tindrà en compte que els raigs vénen de l'esquerra del mirall o de la lent. Tots els raigs que surten de l'objecte s'agafaran des de la seva màxima alçada i els raigs que intersequin donaran la imatge del punt més alt de l'objecte.

Una imatge pot ser real o virtual, dreta o invertida i més o menys petita o igual que l'objecte.

#### 5.1.4.1 Mirall pla

Un mirall pla té la superfície polida per crear la reflexió especular. La creació d'imatges es pot explicar gràcies a que els raigs es propaguen en línia recta i a la llei de la reflexió. Fem la representació de dos raigs que el seu recorregut és des de l'objecte, reboten al mirall amb un cert angle i surten amb el mateix angle que l'incident. Es fan les prolongacions<sup>1</sup> cap a la dreta i allà on s'intersequen és el punt més alt de la imatge. Obtenim una imatge **dreta, virtual** i de la **mateixa mida**.

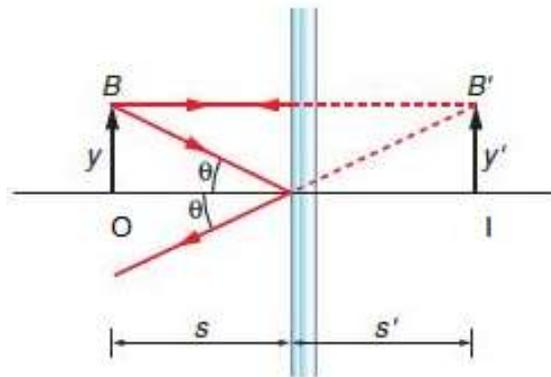


Fig 31. Imatge en un mirall pla.

#### 5.1.4.2 Mirall esfèric

Un mirall esfèric es caracteritza pel radi de curvatura, té un focus, punt situat a la meitat del radi, i es diferencia entre mirall còncav i mirall convex. Està format per un eix òptic, on s'hi troba el vèrtex del mirall, el focus i el centre de l'esfera. Per fer-ne la

---

<sup>1</sup>La imatge és virtual si es creuen les prolongacions dels rajos reflectits. És real si es creuen els rajos reflectits.

imatge es necessiten com a mínim dos raigs però se'n poden fer tres. Els tres raigs són el raig paral·lel, raig focal i raig radial.

- El raig paral·lel és paral·lel a l'eix òptic i el seu raig reflectit passa pel focus.
- El raig focal passa pel focus i el seu raig reflectit és paral·lel a l'eix òptic.
- El raig radial passa pel centre i el seu raig reflectit torna amb la mateixa direcció.
- Esfèric còncav

Està format per la part interna d'una circumferència i convergeix tots els raigs en el punt focal. El focus està a l'esquerra del mirall. Hi ha quatre casos de formació d'imatges depenent de la distància de l'objecte al mirall:

- L'objecte està més lluny que el radi

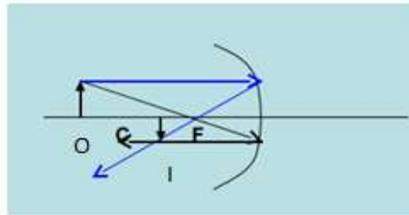


Fig 32. Imatge quan l'objecte és més lluny que el centre.

La imatge és **invertida, real i més petita que l'objecte.**

- L'objecte està entre el centre(C) i el focus(F)

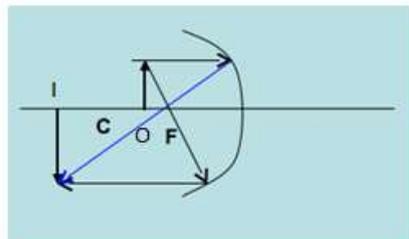


Fig 33. Imatge quan l'objecte està entre el C i el F.

La imatge és **invertida, real i més gran que l'objecte.**

- L'objecte està situat al centre

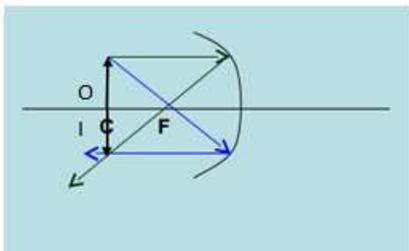


Fig 34. Imatge quan l'objecte és al C.

La imatge és **invertida, real i de la mateixa mida que l'objecte.**

- L'objecte està entre el focus i el vèrtex

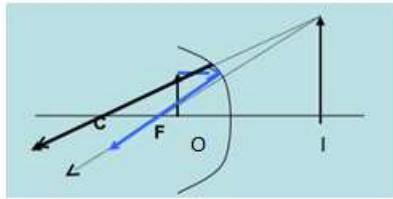


Fig 35. Imatge quan l'objecte és entre el F i el vèrtex.

La imatge és **dreta, virtual i més gran que l'objecte**.

- Esfèric convex

En aquest tipus de mirall, la imatge que es forma és sempre del mateix tipus, sigui quina sigui la posició inicial de l'objecte. La imatge és sempre **dreta, virtual i més petita que l'objecte**. El focus es troba a la dreta del mirall. La distància focal ( $f$ ) sempre és negativa, a diferència del concav que sempre és positiva.

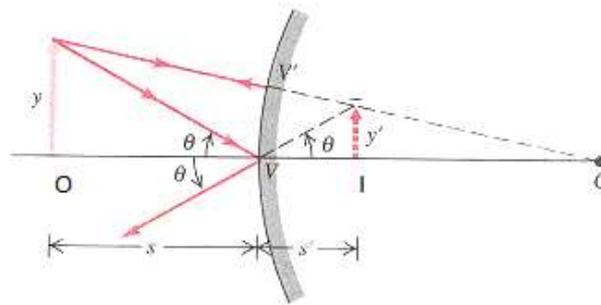


Fig 36. Imatge del mirall esfèric convex.

#### 5.1.4.3 Càlcul aproximat de la posició de la imatge i de la seva mida

$$f = \frac{r}{2}$$

On  $f$  és la distància focal, distància entre el focus i el vèrtex, i  $r$  és el radi, distància del vèrtex al centre.

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

On  $s$  és la distància entre el vèrtex i l'objecte,  $s'$  és la distància entre el vèrtex i la imatge.

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

On  $m$  és la proporció de l'augment,  $y$  és l'altura de l'objecte i  $y'$  és l'altura de la imatge.

La  $s$  sempre és positiva, la  $s'$  si és positiva vol dir que la imatge es forma a l'esquerra del mirall i si és negativa està a la dreta, la  $y$  si és positiva vol dir que la imatge és dreta i si és negativa és invertida.

## 5.2 Refracció

És una propietat ondulatoria de la llum que té lloc quan un raig de llum viatja per un medi transparent i incideix en un segon medi també transparent. Part del raig es reflecteix i l'altra part entra al segon medi i es desvia respecte el raig incident.

En la refracció es té en compte: el raig incident, el raig refractat, l'angle d'incidència, l'angle de refracció, la normal i l'índex de refracció. L'índex de refracció ( $n$ ) és el quocient entre la velocitat de la llum en el buit ( $c$ ), que és amb valor aproximat de  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , i la velocitat del medi ( $v$ ) de la que es vol saber l'índex de refracció. És inversament proporcional amb la velocitat.

Els medis més **refringents** són aquells en que la velocitat és menor i l'índex de refracció és major.

$$n = \frac{c}{v}$$

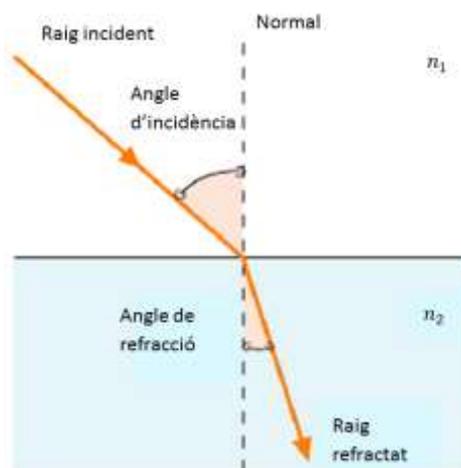


Fig 37. Refracció.

### 5.2.1 Lleis de la refracció

- Primera llei de la refracció

El raig incident, el raig refractat i la normal estan en un mateix pla.

- Segona llei de la refracció o d'Snell

La llei d'Snell exposa matemàticament la relació entre els angles d'incidència i de refracció amb l'índex de refracció de cada medi.

$$\sin\alpha_i \cdot v_2 = \sin\alpha_r \cdot v_1$$

On  $\alpha_i$  és l'angle d'incidència,  $\alpha_r$ , és l'angle de refracció,  $v_1$  és la velocitat en el primer medi i  $v_2$  és la velocitat en el segon medi.

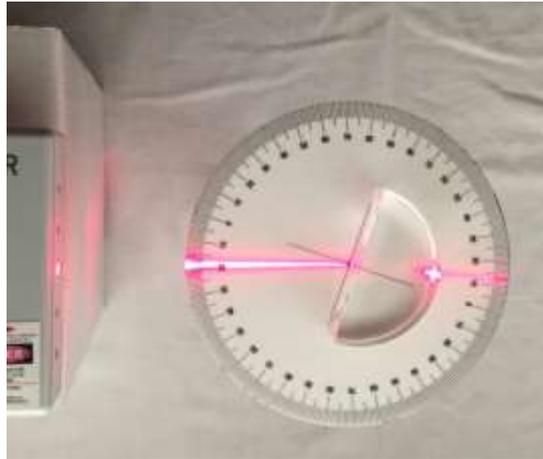


Fig 38. Comprovació de la 2a llei de la refracció.

### 5.2.2 Pràctica 3: calcular la velocitat de la llum en un medi mitjançant l'índex de refracció

Veure annex E, p 66 per veure l'objectiu, el material i el procediment.

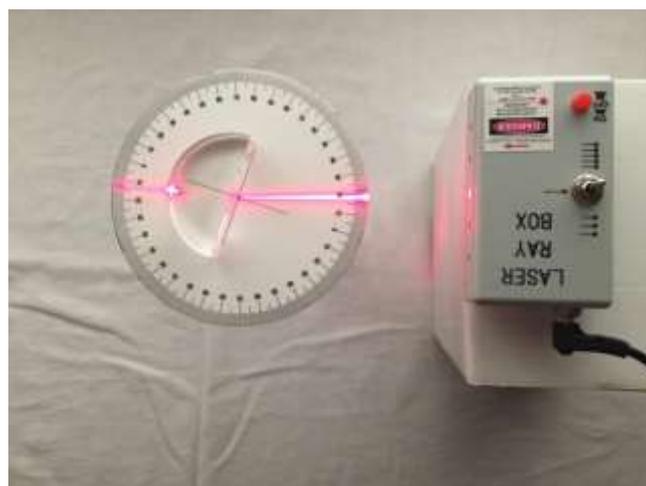


Fig 39. Pràctica 3.

S'obté que l'angle d'incidència és de  $20^\circ$  i l'angle refractat és de  $13^\circ$ . Així que amb un regle es calcula la longitud de  $0^\circ$  (situació de la normal) a  $20^\circ$ . Es fa el mateix per

l'angle refractat. Així que la distància en centímetres de 0°(A) a 20°(B) és de 1,7 cm i la de 0°(C) a 13°(D) és de 1,1 cm. Aquests valors posats a la fórmula següent:

$$n = \frac{AB}{CD} = \frac{1,7}{1,1} = 1,55$$

Ara que es sap l'índex de refracció ( $n$ ), es pot aplicar la fórmula per obtenir la velocitat en el medi:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,55} = 1,94 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

### 5.2.3 Angle límit

És un cas que només té lloc quan la llum passa d'un medi a un altre i el primer medi té l'índex de refracció més gran que el segon. El raig refractat s'allunya de la normal. L'angle límit és l'angle màxim d'incidència que permet obtenir un raig refractat. Per tant, en aquest cas, l'angle de refracció val 90° i és paral·lel a la superfície de separació dels dos medis.

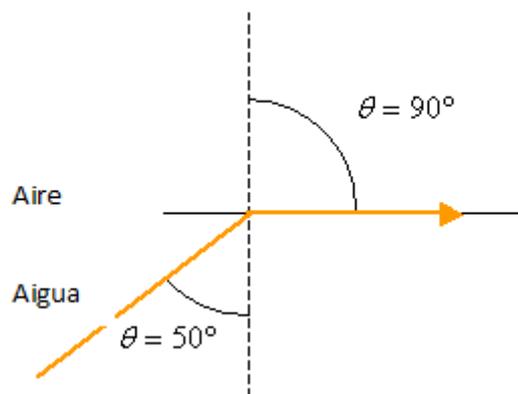


Fig 40. Angle límit.

### 5.2.4 Reflexió total

Si l'angle d'incidència és més gran que l'angle límit s'obté reflexió total. Així que apareix el fenomen de la reflexió.

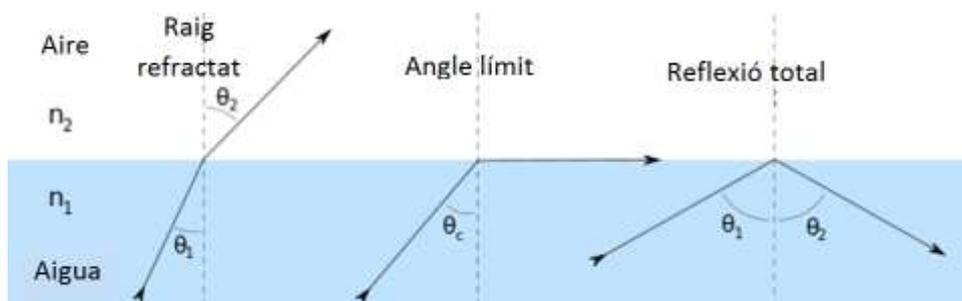


Fig 41. Reflexió total.

#### 5.2.4.1 Pràctica 4: Reflexió total

Per veure l'objectiu, el material i el procediment veure annex F, p 67.

En el següent codi QR hi ha un vídeo on s'observa la reflexió total:



Es comprova la reflexió total i també s'observa l'angle límit. En el cas que he fet, l'angle límit és de 43°. En aquest moment l'angle refractat es superposa a la perpendicular de la normal. Per angles d'incidència més grans del de 43°, hi ha reflexió total.

#### 5.2.5 Òptica geomètrica: lents

Una lent és un cristall o substància transparent constituïda per dues superfícies refringents\* per poder desviar la direcció dels rajos de llum. La distància focal ( $f$ ) és la distància entre el vèrtex i el focus imatge ( $F'$ ). La potència ( $P$ ) està relacionada amb la  $f$  i expressa la capacitat d'una lent per fer convergir o divergir un raig. La seva unitat és en diòptries (D) si la  $f$  és en metres.

$$P = \frac{1}{f}$$

Hi ha dos tipus de lents : convergents (biconvexes) i divergents (bicòncaves).

##### 5.2.5.1 Convergent o biconvexa

Els rajos que incideixen a la lent es refracten i convergeixen en un punt, que és el  $F'$ . Té dos focus, el focus objecte ( $F$ ) es situa a l'esquerra i el focus imatge ( $F'$ ) a la dreta.

- El raig paral·lel és paral·lel a l'eix òptic i el raig refractat passa pel focus imatge ( $F'$ ).
- El raig central no es desvia i passa pel vèrtex.
- El raig focal passa pel focus ( $F$ ) i el seu raig refractat és paral·lel a l'eix òptic.

Hi ha cinc possibles creacions d'imatge:

- L'objecte està més lluny que el centre de curvatura

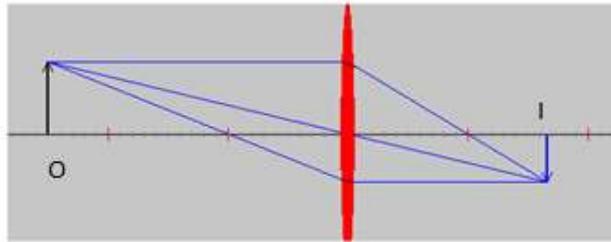


Fig 42. Imatge quan l'objecte està més lluny que el centre.

La imatge que es crea és **real, invertida i més petita que l'objecte.**

- L'objecte situat al centre de curvatura.

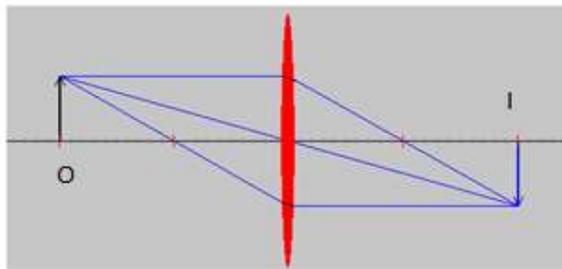


Fig 43. Imatge quan l'objecte està al centre.

La imatge que es crea és **real, invertida i de la mateixa mida que l'objecte.**

- L'objecte està entre el centre i el focus.

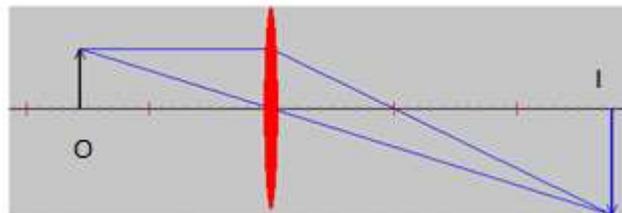


Fig 44. Imatge quan l'objecte està entre el centre i el focus.

La imatge formada és **real, invertida i més gran que l'objecte.**

- L'objecte està en el focus

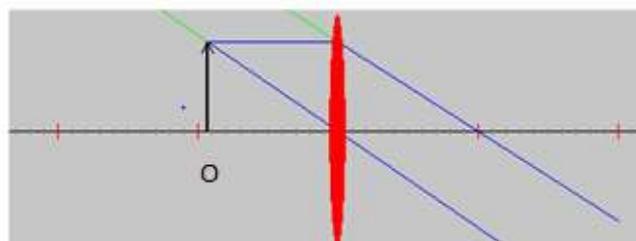


Fig 45. Imatge quan l'objecte està al focus.

La imatge **no** es forma.

- L'objecte està entre el focus i el vèrtex.

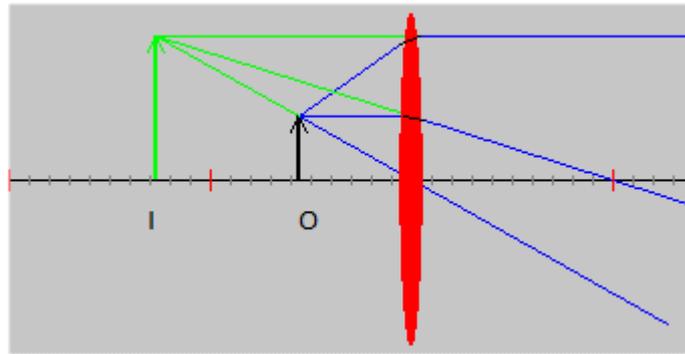


Fig 46. Imatge quan l'objecte està entre el F i el vèrtex.

La imatge creada és **virtual, dreta i més gran que l'objecte**.

### 5.2.5.2 Divergent o bicòncava

Els raigs que incideixen a la lent es refracten divergint.

En la formació de la imatge es tenen en compte tres raigs:

- El raig paral·lel a l'eix òptic, es refracta divergint i es prolonga perquè passi pel F'.
- El raig central no es desvia i passa pel vèrtex.
- El raig focal es prolonga des de la lent fins al F, situat a la part dreta, i a partir de la lent segueix paral·lel a l'eix òptic.

Només forma un tipus d'imatge que és **virtual, dreta i més petita que l'objecte**.

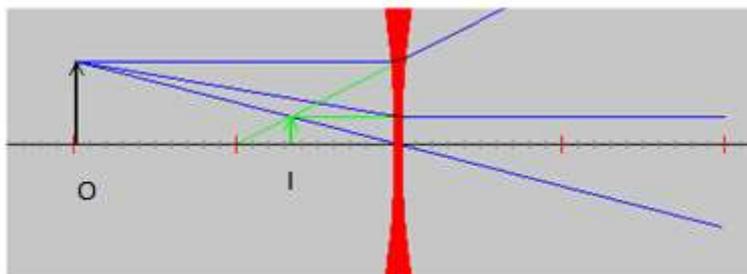


Fig 47. Imatge en una lent divergent.

### 5.2.5.3 Càlcul aproximat de la posició de la imatge i de la seva mida

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

La  $s$  és sempre positiva, la  $s'$  és positiva quan la imatge és real i es forma a la dreta de la lent i negativa quan la imatge és virtual i es forma a l'esquerra. La  $y$  és sempre

positiva i la  $y'$  si és positiva significa que la imatge és dreta i si és negativa la imatge està invertida.

### 5.3 Difracció

La difracció és un fenomen ondulatori de la llum. S'observa en el moment que una ona es propaga i troba un obstacle o ha de travessar una reixeta amb unes dimensions semblants a la seva longitud d'ona. Es distorsiona per poder continuar el seu moviment. Aquest fenomen no és perceptible a simple vista perquè l'obstacle ha de ser de 400 nm a 700 nm. Hi ha dos tipus de difracció: de camp llunyà o Fraunhofer, l'obstacle està lluny de la pantalla en què s'hi projecta el fenomen, i de camp proper o Fresnel, l'obstacle i la pantalla en què s'observa el fenomen estan força a prop. L'ona si passa a través d'una reixeta, just en el lloc de la reixeta, es formarà un nou focus d'ones secundàries i així seguirà avançant. Un altre cas d'objecte diferent és un objecte esfèric petit. Es formen nous focus d'ones al voltant de l'obstacle quan l'ona hi arriba. A partir d'aquests nous focus, es formen ones secundàries que es segueixen propagant.

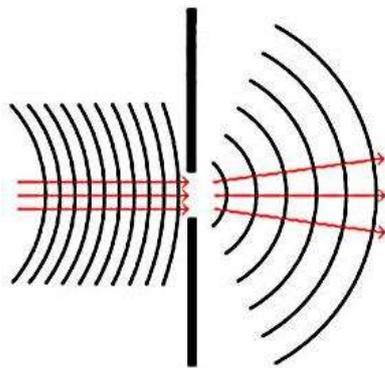


Fig 48. Difracció per reixeta.

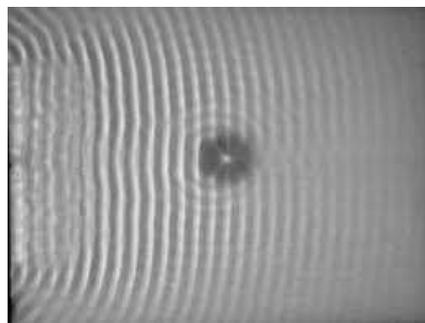


Fig 49. Difracció per un obstacle circular i petit.

#### 5.3.1 Principi de Huygens

La distorsió que pateix l'ona s'entén més bé explicant el principi de Huygens. Christiaan Huygens va elaborar un mètode per explicar la propagació de les ones. Aquest principi enuncia que els punts del front d'ona\* comencen a vibrar i es transformen en focus d'ones secundàries. Les línies perpendiculars al front d'ona de cada punt indiquen la direcció de propagació de l'ona. Es transmeten en el mateix sentit de propagació de l'ona, a una distància d'una longitud d'ona i amb la mateixa velocitat de fase. En un

temps determinat, que és el del període, formen un nou front d'ona creat a partir de la tangent de cada ona secundària. El nou front d'ona és el que s'observa i serà igual a tots els punts si succeeix en un medi homogeni. En el cas que el medi sigui heterogeni, cada ona secundària tindrà una velocitat de propagació diferent. Cada ona recorrerà distàncies dissemblants i formarà un front d'ona diferent a l'anterior. El procés es repeteix per tal d'aconseguir la propagació de la perturbació.

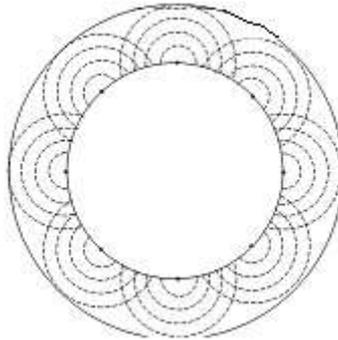


Fig 50. Principi de Huygens.

## 5.4 Interferència

És un fenomen ondulatori que té lloc quan dues o més ones de la mateixa o semblant longitud d'ona s'intersequen quan es propaguen en el mateix espai. L'energia i el moment lineal de cada ona no són alterats ni abans ni després de la interferència.

### 5.4.1 Principi de superposició

És el mètode per descriure matemàticament la interferència. Per saber l'ona resultant, es suma el desplaçament de cada ona respecte l'estat d'equilibri del mateix instant. Es resumeix amb la següent fórmula:

$$y(x, t) = y_1(x_1, t) + y_2(x_2, t) + \dots + y_n(x_n, t)$$

$x_1, x_2$  i  $x_n$  és la distància del focus emissor fins al punt on es vol analitzar la interferència.

L'amplitud resultant ve donada per: (veure annex G, p 68)

$$A_r = 2A \cdot \cos \left[ \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \right]$$

### 5.4.2 Interferència quan les ones estan en fase

- Interferència constructiva

Ocorre quan l'amplitud de l'ona resultant és la suma de les amplituds de cada ona i és màxima. Segueix la següent equació: (Veure annex G, p 68).

$$x_2 - x_1 = n \cdot \lambda$$

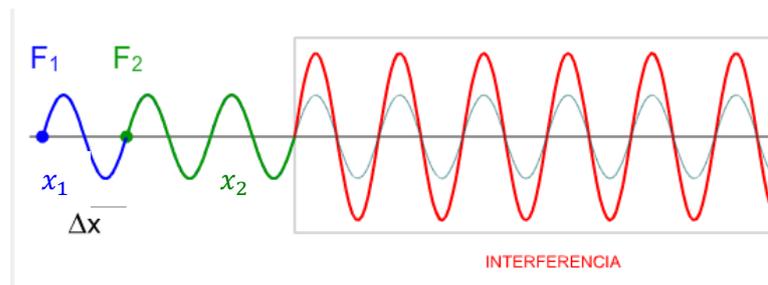


Fig 51. Interferència constructiva.

- Interferència destructiva

Succeeix quan s'assoleix amplitud 0, nul·la, causada per la suma de les amplituds de cada ona. La següent fórmula ho resumeix: (Veure annex G, p 68)

$$x_2 - x_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

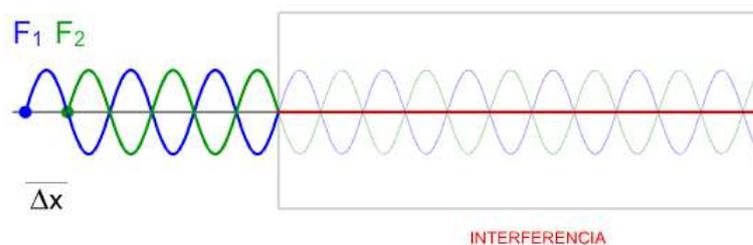


Fig 52. Interferència destructiva.

## 5.5 Efecte fotoelèctric

Aquest fenomen s'ha d'explicar entenent la llum com a partícula. Sinó, la teoria ondulatòria no pot explicar com augmenta la intensitat de la radiació sense augmentar l'energia dels electrons. El fenomen consisteix en il·luminar un metall. Un metall està format per electrons que es mouen a l'interior d'una xarxa cristal·lina però que no se'n poden anar d'aquesta xarxa. En il·luminar el metall, s'envia llum, que és radiació

electromagnètica que transporta energia. Aquesta energia és absorbida pels electrons situats a la superfície del metall i els fa despendre. Tot i que es desprenen electrons, no augmenta l'energia. Einstein ho va explicar amb el concepte de fotó i amb la següent fórmula:

$$E = h \cdot f$$

Els electrons només absorbeixen un fotó. Així que si s'augmenta la freqüència de la llum, es poden despendre més electrons però l'energia no augmenta perquè tots els electrons han absorbit un fotó, la mateixa quantitat.

## 6 POLARITZACIÓ

És un fenomen que es produeix a les ones transversals perquè la direcció de la vibració de les partícules és perpendicular a la direcció de la propagació de l'ona. També és possible a les ones electromagnètiques ja que tenen dos camps que vibren en direcció perpendicular a la propagació de l'ona. La llum es propaga amb tots els plans. Així que la polarització és el fenomen que provoca que la llum viatgi en un únic pla. Aquesta llum s'anomena **llum polaritzada**. Hi ha tres tipus de polarització.

### 6.1 Polarització lineal (PL)

Les ones del camp elèctric i el magnètic estan en fase. Assoleix intensitat màxima i també mínima, nul·la. Passa per totes les intensitats. Si s'observa frontalment, només oscil·la en un sol eix.

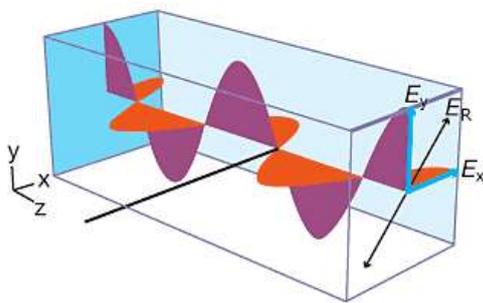


Fig 53. Polarització lineal.

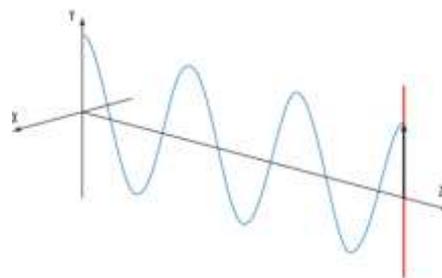


Fig 54. Propagació de la polarització lineal.

## 6.2 Polarització circular (PC)

Respecte el camp elèctric, el camp magnètic va desfasat la meitat de la longitud d'ona. Les seves amplituds han de ser iguals. El moviment que descriu és circular. La intensitat sempre és la meitat de la màxima. La PC s'anomena així perquè l'ull humà és poc veloç i no pot veure que a cada temps hi ha punts sense llum.

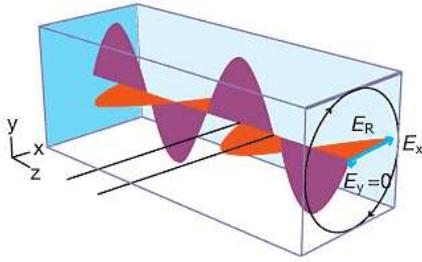


Fig 55. Polarització circular.

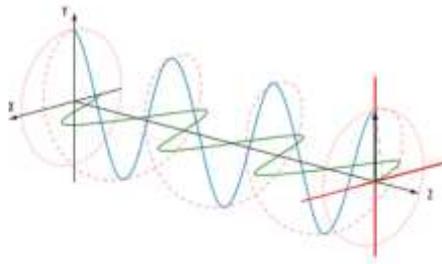


Fig 56. Propagació de la polarització circular.

## 6.3 Polarització el·líptica (PE)

El camp magnètic va desfasat respecte el camp elèctric i tenen amplituds diferents. Es desplaça formant una el·lipse. La intensitat donada varia però mai és màxima ni mínima, així que el mòdul del vector no és constant.

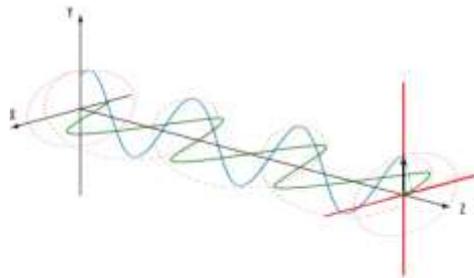


Fig 57. Polarització el·líptica.

## 6.4 Polaritzador

És un dispositiu que altera la polarització de la llum. Absorbeix els raigs de llum necessaris per obtenir la polarització necessària. És format per unes cadenes moleculars i només deixa passar la llum que oscil·la en un sol pla. De tal manera que a la sortida només hi hagi un únic pla d'oscil·lació.

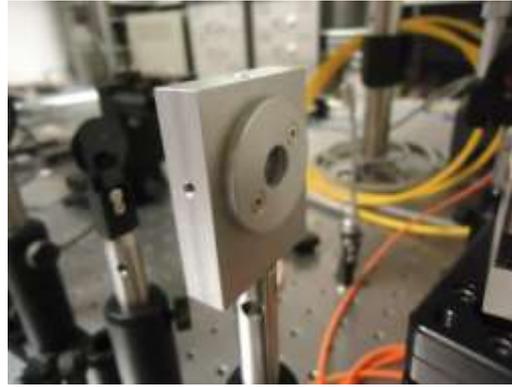


Fig 58. Polaritzador lineal. Fig 59. Polaritzador circular.

## 6.5 Col·locació de diferents polaritzadors

És igual quants polaritzadors es posin i si són de diferents tipus perquè la polarització final sempre serà la polarització de l'últim polaritzador. Seguidament explico un cas particular: la utilització de dos polaritzadors lineals.

Si es fa passar un feix de llum per un polaritzador lineal, la intensitat del feix no varia si es gira la seva inclinació. Llavors, si es col·loca un segon polaritzador i es fa girar el seu eix de transmissió la intensitat varia. De manera que pot anar de màxima intensitat a nul·la. La intensitat donada en cada angle es pot calcular mitjançant l'expressió matemàtica de la Llei de Malus.

### 6.5.1 Pràctica 5: Llei de Malus

L'objectiu d'aquesta pràctica és esbrinar la llei de Malus. Aquesta llei fa referència a la intensitat d'un raig de llum que està polaritzat linealment.

En la realització d'aquesta pràctica, es fa servir un làser, dos polaritzadors lineals, una pantalla que absorbeix força llum del làser i una càmera per captar les imatges.

Es col·loca cada material un seguit de l'altre. És igual l'ordre mentre es sàpiga quin és el polaritzador 1 i el polaritzador 2.

Al primer polaritzador no se li modifica l'eix de transmissió. L'únic que es mou és el segon polaritzador, cada  $22,5^\circ$ . Per començar l'experiència, s'envia llum i s'agafa com a primera dada el moment que la intensitat de la llum és nul·la. A partir d'això, es busca el període en el qual la intensitat torna a ser nul·la i s'anoten els graus del polaritzador quan hi ha els màxims, indicant-los amb un 1, i els mínims, indicant-los com a 0.

EIX DE TRANSMISSIÓ DEL 2n POLARITZADOR(graus)	INTENSITAT	Número de la imatge
170	0	1
192,5		2
215		3
237,5		4
260	1	5
282,5		6
305		7
327,5		8
350	0	9
12.5		10
35		11
57		12
80	1	13
102,5		14
125		15
147,5		16
170	0	17

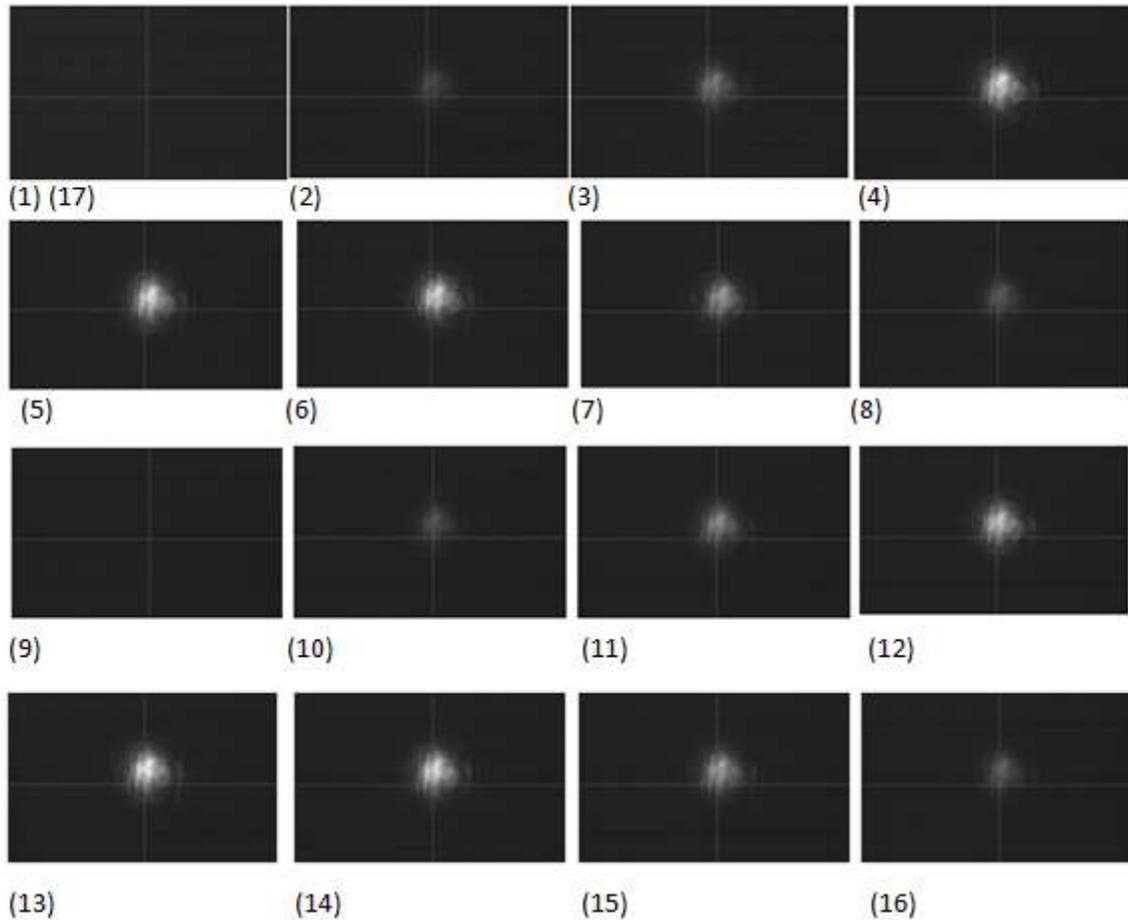


Fig 60. Pràctica 5

A partir de les dades obtingudes, s'afirma que si es parteix d'intensitat 0 (mínima) i es rota  $90^\circ$ , la intensitat és l'oposada a la situació inicial, 1 (màxima). Cada  $180^\circ$  s'obté el mateix valor, si es parteix d'intensitat 0 i es rota  $180^\circ$  es torna a tenir la mateixa situació. A partir d'aquesta experiència es formula l'expressió matemàtica per saber la intensitat final:

$$I(\phi_2 - \phi_1) = I_0 \cos^2(\phi_2 - \phi_1)$$

$I_0$  és la màxima intensitat transmesa quan la diferència dels angles del segon polaritzador ( $\phi_2$ ) i del primer polaritzador ( $\phi_1$ ) és 0.

Per tant, és el producte escalar dels dos vectors dels dos polaritzadors. Un exemple és que si l'angle entre el segon polaritzador i el primer és de  $90^\circ$ , no hi passa llum. Si es posa aquests resultats en l'equació del producte escalar, s'obté 0, que representa intensitat nul·la.

$$\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

## 7 REFRACCIÓ DOBLE O BIREFRINGÈNCIA

És un fenomen que es pot observar en un **cristall uniaxial** amb un **únic eix òptic\***. Quan entra la llum dins del cristall, es separa en dos feixos que segueixen índexs de refracció diferents. És com si estiguessin en dos medis diferents. El feix que segueix l'índex de refracció constant s'anomena ordinari. El feix extraordinari es refracta i forma una imatge que varia segons l'angle d'incidència. La polarització dels dos raigs és orthogonal un respecte de l'altre. No obstant, si el feix incident s'alinea amb l'eix òptic, els dos feixos es sobreposen i no es veu la doble refracció.



Fig 61. Birefringència amb un cristall d'espat d'Islàndia.

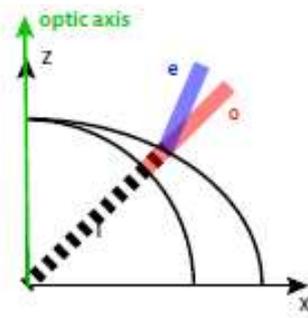


Fig 62. Feix de llum en un cristall uniaxial.

## 8 REFRACCIÓ CÒNICA (RC)

És un fenomen que es produeix quan un feix de llum travessa un **cristall biaxial** alineat a un eix òptic. Els vectors del desplaçament i del camp elèctric no tenen la mateixa direcció. Es relacionen depenent de les característiques del medi. Mitjançant matrius, s'obtenen dues equacions el·lipsoïdals. Al lloc on s'intersequen les dues el·lipses es creen infinits raigs que formen la superfície d'un con. A dins del cristall, el feix incident forma la superfície del con. A la sortida, es formen infinits feixos que representen la superfície d'un cilindre, que té el màxim diàmetre obtingut pel con a dins del cristall. El radi de l'anell ve donat per la longitud del cristall i l'angle entre el feix ordinari i extraordinari.

En una pantalla situada aproximadament a 1,5 m del cristall s'observen dos anells. Aquests dos anells són separats per un anell amb intensitat nul·la que és degut a la interferència. Així que quan parli del que s'observa, ho esmentaré com a un anell. La intensitat de l'anell és igual a tots els punts perquè s'envia polarització circular.

## 8.1 Cristall biaxial

És un cristall anisotròpic, el comportament de la llum depèn de la direcció de propagació, i té **dos eixos òptics**. Quan el feix incideix en un cristall biaxial normalment es produeix refracció doble. Només en el cas que el feix estigui alineat a la direcció d'un eix òptic, el feix es separa formant la superfície d'un con i es forma la RC.

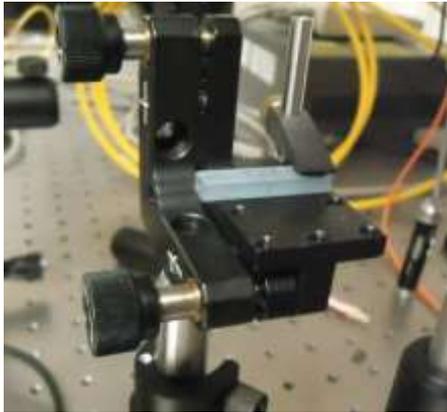


Fig 63. Cristall biaxial.

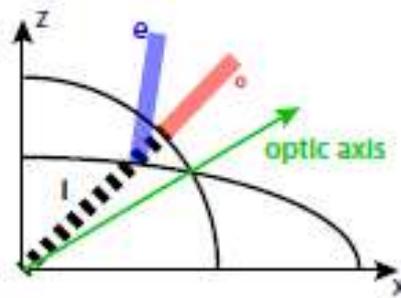


Fig 64. Feix de llum en un cristall biaxial.

## 8.2 Observació de la RC en el laboratori<sup>2</sup>

El material necessari per fer el muntatge per les pràctiques de la RC és: un làser de classe 4 i un altre de classe 2, un polaritzador circular, una lent convergent, un cristall biaxial wolfram de potassi i gadolini<sup>3</sup>, una lent divergent i un polaritzador lineal.

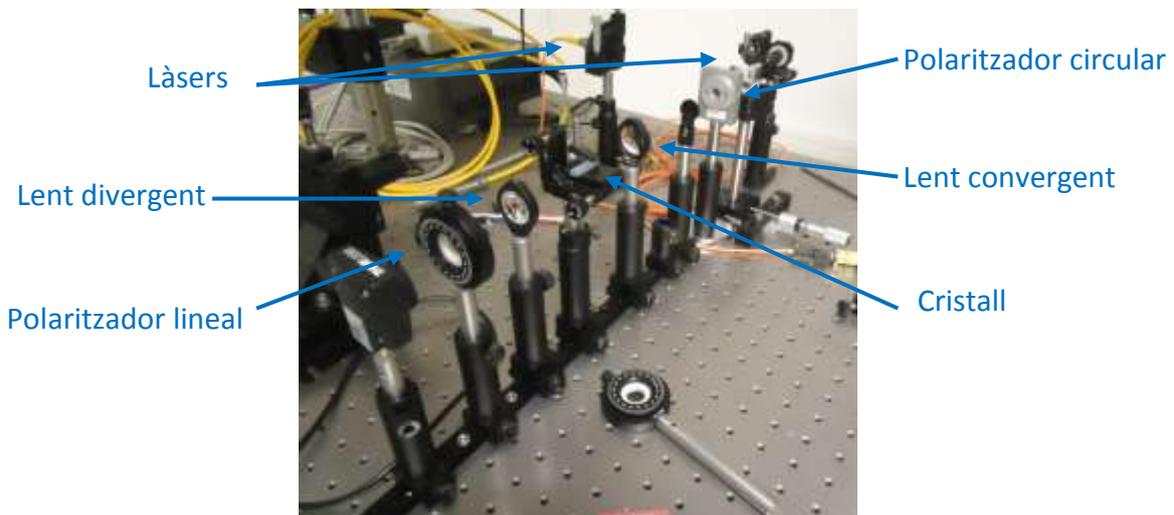


Fig 65. Muntatge per fer una fotografia.

<sup>2</sup>Aquest apartat serveix per explicar el procediment i el material necessari en les parts pràctiques de la RC. Algunes pràctiques tenen variants que ja s'expliquen en cada cas.

<sup>3</sup>  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$

Les dues llums làsers es posen ortogonals. La llum passa per un polaritzador circular. Després, per una lent convergent que focalitza el feix per passar per dins del cristall. A la sortida, hi ha una lent divergent perquè els raigs vagin a l'infinit i, finalment, es posa un polaritzador lineal.

Si el fenomen es vol veure a ull nu, es posa una pantalla blanca a 1,5 metres des del polaritzador lineal. Si es vol fer fotos al fenomen, caldrà posar una càmera després del polaritzador lineal. També s'ha d'incloure, al mig del muntatge, una pantalla que redueixi la intensitat de la llum.

El fenomen que es pot veure o fotografiar és la formació d'un anell amb intensitat i al mig, hi ha un anell amb intensitat nul·la degut al fenomen de la interferència.



Fig 66. Anells de la RC.

Cal tenir en compte que per aconseguir veure el fenomen, s'ha d'alinejar el feix de llum amb l'eix òptic. Per això, s'utilitza un cristall biaxial en forma de prisma on l'eix òptic es troba en la direcció de la longitud més llarga del cristall. Tot i això, normalment l'alineació de l'eix òptic amb la llum làser no s'aconsegueix. No obstant, el suport que sosté el cristall biaxial pot modificar tant l'orientació com la inclinació. Si no està ben alineat, s'observen dos punts degut a la refracció doble. Això es deu a la direcció de la seva propagació que no és paral·lela als eixos òptics.

En el següent vídeo, us presento una seqüència fotogràfica per observar com canvia la imatge de l'anell, en un experiment amb dues lents. Només quan la càmera està col·locada en el pla focal imatge, observem la formació de l'anell de manera nítida, precisa.



### 8.2.1 Pràctica 6: observació del feix ordinari i extraordinari en la direcció d'un eix òptic

L'objectiu és observar en el moment de la transició de refracció doble a RC el feix ordinari que es queda quiet i l'extraordinari que es mou. En aquest cas s'ha de treure el polaritzador lineal. Per analitzar-ho, el feix del làser no ha d'estar del tot alineat en la direcció d'un eix òptic. D'aquesta manera s'aprecien els anells i els dos punts de la refracció doble. En la pràctica es rota el cristall cada  $45^\circ$ . Obtenim:

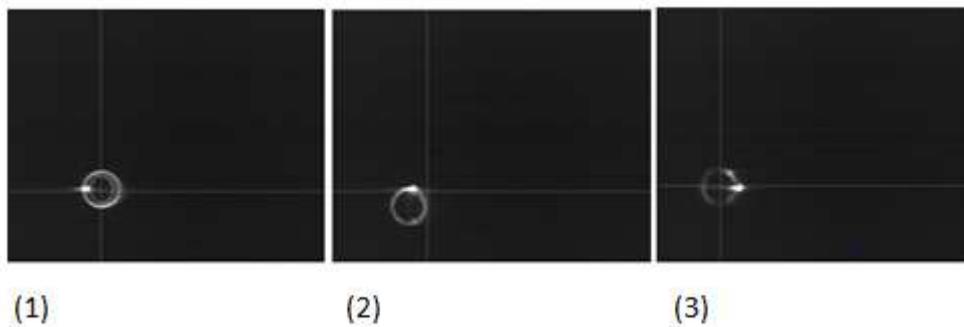


Fig 67. Pràctica 6.

A la imatge 1, el cristall és col·locat a  $0^\circ$ . La imatge 2 el cristall és rotat  $-90^\circ$ . La imatge 3 el cristall es rota  $-180^\circ$ . Observant les fotografies, es pot deduir que el feix ordinari sempre es manté a la mateixa posició i és el feix extraordinari el que rota els mateixos graus que rota el cristall. Cal tenir en compte que les dues línies perpendiculars de les imatges no indiquen el mateix punt en els tres casos. Com a referència que el feix ordinari es manté al mateix lloc es fa servir que està a la mateixa distància dels marges de les imatges en els tres casos.

### 8.2.2 Pràctica 7: observació dels dos punts amb polarització ortogonal

En aquesta pràctica, el feix de llum passa pel cristall biaxial però no és paral·lel a un eix òptic. A la pantalla d'observació hi ha representats dos punts. El punt de l'esquerra l'anomeno A i el de la dreta B. L'objectiu és observar la polarització dels punts a partir d'un polaritzador lineal. Així que s'observarà la intensitat dels punts fent girar els graus del polaritzador cada  $45^\circ$ . Agafem com a primera dada el moment en què un punt té intensitat màxima i l'altre és nul.

Recollida de dades<sup>4</sup>:

INTENSITAT		Graus polaritzador
Punt A	Punt B	
1	0	310
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	355
0	1	40
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	85

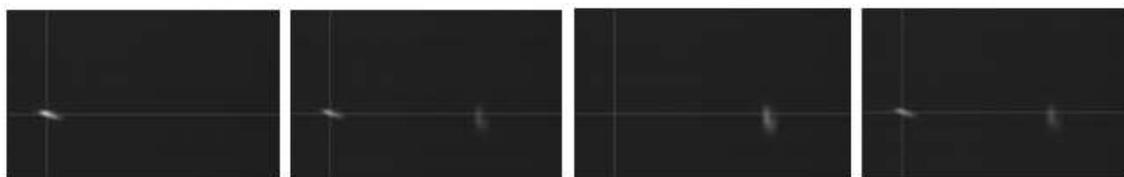


Fig 68. Pràctica 7.

Un cop obtingudes les dades es pot comprovar que la polarització de dos punts diametralment oposats és ortogonal perquè quan un punt té intensitat màxima l'altre en té mínima. Si es parteix que el polaritzador està a  $310^\circ$  i es gira  $90^\circ$ , es veu que la màxima intensitat i la mínima dels dos punts s'intercanvien. També s'interpreta que si el polaritzador gira  $360^\circ$  és com si no s'hagi girat ja que la polarització és igual. Si el polaritzador està a  $40$  graus i el punt B és el moment en que té més intensitat, això vol dir que la seva polarització és de  $40^\circ$ . Per tant, com que el punt A té polarització ortogonal, és polaritzat a  $130^\circ$ .

### 8.3 Polarització dels anells

Cada punt de l'anell està format pels diferents feixos que formen la superfície del con. Estan polaritzats linealment i la direcció de la polarització és diferent respecte els altres punts. Dos punts diametralment oposats tenen polaritzacions ortogonals. Això s'aprecia quan es posa un polaritzador lineal entre el feix i la pantalla on s'observa el fenomen. Es veu que un punt de l'anell queda sense intensitat, el punt diametralment

<sup>4</sup>S'indica amb un 1 quan la intensitat és màxima i amb un 0 quan és mínima, nul·la.

oposat és el que té més intensitat i a mesura que s'acosta al punt amb intensitat nul·la, la intensitat disminueix. Si es posa per cas que el punt amb intensitat nul·la és a dalt, ara sabem que aquest punt té polarització ortogonal a la del polaritzador. Cal afegir que si el cristall biaxial rota, la polarització rota els mateixos graus que el cristall.

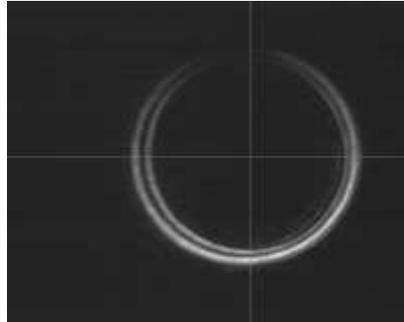


Fig 69. Polaritzador a 0°.

### 8.3.1 Pràctica 8: polarització lineal en el cristall biaxial a 0°

L'objectiu d'aquesta pràctica és veure la polarització de l'anell mitjançant el polaritzador lineal. Es comença a anotar les dades quan el punt amb intensitat nul·la és a sota. L'eix de transmissió del polaritzador es gira cada 45°.

EIX DE TRANSMISSIÓ (graus)	LLOC D'INTENSITAT NUL·LA
270	BAIX
315	DRETA
360	DALT
45	ESQUERRA
90	BAIX



Fig 70. Pràctica 8.

Fer aquesta pràctica ajuda a determinar la polarització de cada punt. En aquest cas que he fet, es sap la polarització dels punts de dalt, baix, esquerra i dreta. Així que la polarització de l'anell a sota és de 0°, a la dreta de 45°, a dalt de 90° i la de l'esquerra de 135°.

### 8.3.2 Pràctica 9: polarització lineal en el cristall biaxial a 90°

L'objectiu és observar la polarització de l'anell amb els mateixos angles que s'ha fet servir anteriorment i tenint el cristall rotat 90° respecte la pràctica anterior.

EIX DE TRANSMISSIÓ (graus)	LLOC D'INTENSITAT NUL·LA
270	DRETA
315	DALT
360	ESQUERRA
45	BAIX
90	DRETA



Fig 71. Pràctica 9.

S'observa que al rotar el cristall 90°, els llocs d'intensitat nul·la també roten 90° en el mateix sentit, respecte la pràctica anterior. Tenint en compte que els llocs amb intensitat nul·la tenen polarització ortogonal a l'angle de l'eix de transmissió, s'estableix que la polarització de l'anell és de 0° a baix, 45° a la dreta, 90° a dalt i 135° a l'esquerra.

## 8.4 RC en cascada

És un aspecte del fenomen de la RC que s'està començant a desenvolupar. Consisteix en la utilització de més d'un cristall biaxial. Seguidament s'expliquen diferents casos amb pràctica inclosa.

### 8.4.1 Pràctica 10: Dos cristalls biaxials, mateixa longitud i mateixa orientació

L'objectiu és observar què passa quan s'afegeix un cristall biaxial de les mateixes condicions que el primer. En afegir aquest cristall es produeix el mateix fenomen com si només hi hagués un cristall però el doble de llarg. Per això, el diàmetre de l'anell és més gran perquè el feix ha recorregut més distància i el con s'ha fet més gran.

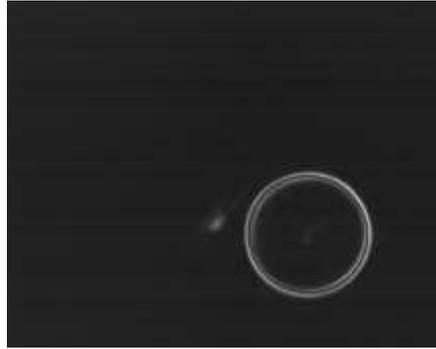


Fig 72. Pràctica 10.

Cada cristall per separat genera un anell. En aquest cas els anells que creen són iguals. Com que tots dos cristalls tenen la mateixa orientació, es sumen i generen un anell més gran.

#### **8.4.2 Pràctica 11: Dos cristalls biaxials, mateixa longitud i orientació oposada**

L'objectiu és col·locar un altre cristall amb la mateixa longitud però d'orientació oposada respecte el primer cristall.

En aquest cas, el fenomen es contraresta. Surten dos feixos del primer cristall que en arribar al segon, es tornen a ajuntar perquè es genera el con al revés. A la sortida dels dos cristalls és com si no n'hi hagués ja que el que es veu és el feix de llum.



Fig 73. Pràctica 1.

En casos individuals, el primer cristall genera un anell i el segon cristall en genera un altre igual. No obstant, quan els dos cristalls es posen alineats però amb orientació oposada es resten. El que en resulta és el feix del principi.

#### **8.4.3 Pràctica 12: Dos cristalls biaxials, mateixa longitud i orientació del segon a 90°**

L'objectiu és col·locar un altre cristall amb la mateixa longitud que el primer però a 90° respecte aquest. És una situació intermèdia dels dos casos anteriors. Tot i que la intensitat canvia de manera gradual.

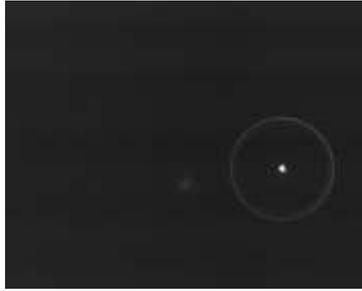


Fig 74. Pràctica 12.

En aquest cas, el primer cristall té l'orientació inicial, com la de l'apartat 8.4.1, i el segon  $90^\circ$  girat respecte el primer. Aquesta situació és igual com tenir dos cristalls amb la mateixa orientació i dos cristalls amb orientació oposada. Són els dos casos explicats anteriorment. Doncs, els fenòmens resultants d'aquests dos casos es sumen i el resultat és el de la imatge.

### 8.5 Aplicacions de la RC

La refracció cònica és un fenomen que ha caigut en oblit durant anys. Actualment s'està investigant les seves possibles aplicacions. Així que s'estan generant idees per tal que la comunitat de científics hi trobi aplicacions factibles. Una aplicació que recentment s'ha estudiat, durant el 2015, és la relacionada amb el camp de la comunicació òptica. Una altra aplicació és la d'un nou polarímetre.

La **comunicació òptica** és la utilització de la llum com a medi de transmissió de la comunicació. En aquest cas s'utilitza la refracció cònica en cascada. Serveix per incrementar la capacitat del canal\* sense que hi hagi interferència en una longitud de 4 metres. No es produeix interferència gràcies a la col·locació de dos cristalls biaxials,  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ , de la mateixa longitud i col·locats amb orientació oposada. S'envia un feix amb forma radial. A la sortida del primer cristall, s'obtenen infinits raigs que tots estan polaritzats linealment. S'hi posa una plantilla que selecciona els canals. Això fa que es creï un anell amb  $x$  número de ratlles. Cada ratlla correspon a un canal. Llavors passa pel segon cristall i es redueix com el feix inicial. Arriba a un receptor que té incorporat un cristall biaxial de les mateixes condicions que el primer. Per tant, el feix es multiplica (ara tenim l'anell amb  $x$  separacions). Cada ratlla porta una informació diferent pel receptor.

Fins ara, han pogut arribar fins a 12 ratlles sense que no hi hagi interferència. Si feien més separacions, aquestes estaven més juntes i es produïa interferència.



Fig 75. Feix en la comunicació òptica.

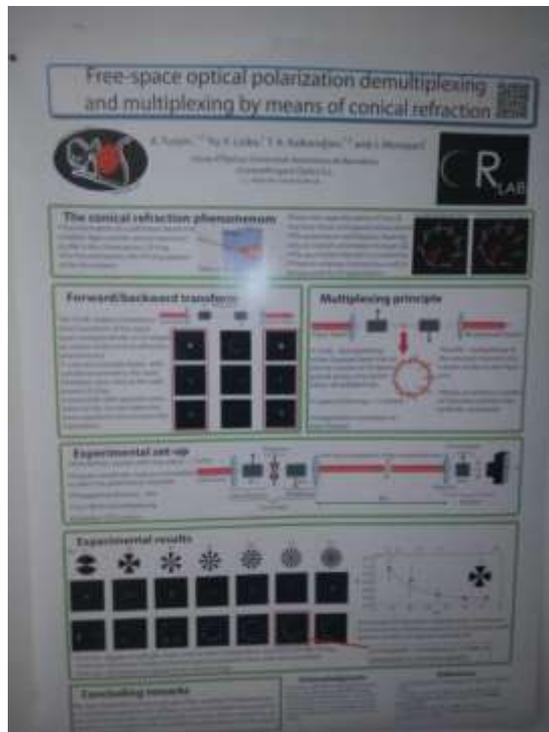


Fig 76. Comunicació òptica.

El **polarímetre** és un instrument òptic que determina la polarització de la llum i caracteritza els elements polaritzats a partir de mesures de la intensitat. Tenen moltes aplicacions a la indústria, la medicina i l'astronomia, entre altres.<sup>5</sup>

<sup>5</sup>FERNÁNDEZ, Estefania; PEINADO, Alba; LIZANO, Àngel. *Nuevo polarímetro basado en la refracción cónica*. 2016. <https://intranet.uab.es/web?cid=1096481466568&pagename=UABDivulga%2FPage%2FTemplatePageDetallArticleInvestigar&param1=1345682586406>: UniversitatAutònoma de Barcelona.

L'aparell relaciona la polarització del feix de llum després de passar pel cristall biaxial amb la distribució de la intensitat de llum a l'anell. Es fa servir el cas quan s'envia polarització lineal on la distribució de l'anell és gradual. El polarímetre està format per dos cristalls biaxials. Entre els dos cristalls, s'introdueix un divisor d'amplitud que separa el feix de llum en dos raigs. En un dels raigs es posa una pantalla retardadora d'un quart d'ona per saber les propietats el·líptiques.

Aquest polarímetre dóna molta informació i fa les mesures quasi bé a l'instant.

## CONCLUSIONS

Després del període de recerca d'informació i de dur a terme les pràctiques, he pogut extreure'n algunes conclusions.

Totes les aplicacions que es poden fer amb la llum no estan, ni molt menys, descobertes. Amb la refracció cònica, es pot veure que encara estem a l'inici d'un llarg nombre de futures aplicacions. Així que la llum encara té molta matèria per investigar que ens pot sorprendre.

Tenint en compte la hipòtesi inicial, la meua idea que es formaria un con no anava tant errònia. No obstant, he d'emfatitzar que el con es crea a dins del cristall degut a la desviació de dos raigs, que a la sortida, surten en paral·lel. Per això, a una certa distància s'observa un anell. Els dos raigs es desvien només d'entrar a dins del cristall biaxial. Un segueix un índex de refracció diferent a l'altre, per tant aquest és el motiu que es formi un con. A la sortida del cristall, l'índex de refracció torna a ser igual per tots els raigs i per això continuen paral·lels.

Gràcies a la pràctica de l'apartat de la polarització, he vist que, com bé diu la teoria, dos polaritzadors amb orientació ortogonal no deixen passar llum. Això mateix, també s'observa a l'anell de la RC quan s'envia llum polaritzada linealment. Dos punts diametralment oposats tenen polarització ortogonal perquè si l'eix de transmissió del polaritzador gira  $90^\circ$ , un punt màxim passa a ser nul i el nul passa a ser màxim. Per tant, segueix el mètode que es representa de manera més senzilla a la pràctica de la polarització: partint del punt amb intensitat màxima, si el polaritzador gira  $90^\circ$ , aquest punt s'anul·la.

Gràcies a l'observació de la distribució de la intensitat a l'anell, he pogut deduir que si es rota el cristall, la polarització també rota els mateixos graus i sentit que el cristall. Això vol dir, que el cristall també té una orientació determinada i que s'ha de tenir en compte en qualsevol utilització que es faci del cristall.

He deduït amb la pràctica de l'observació del feix ordinari i l'extraordinari que, respecte una posició fixa, l'ordinari es manté en el mateix lloc quan es rota el cristall. Per tant, l'altre feix és el que es mou respecte la posició fixa.

Respecte la refracció cònica en cascada, es pot concloure que en afegir un cristall més poden haver-hi diferents resultats. Un d'ells és l'efecte sumatori i consisteix en afegir

cristalls amb la mateixa orientació. Es crea un anell més gran perquè els dos cristalls estan col·locats de tal manera que a la sortida s'hi formi un con. Hi ha l'efecte contrari, quan al posar dos cristalls de la mateixa longitud però amb orientació oposada. El resultat és com si no s'hagi posat cap cristall. Els dos cristalls tenen les mateixes condicions així que creen el mateix con. No obstant, el segon cristall està col·locat invers respecte l'orientació del primer. Així que crea el con al revés i fa que el feix a la sortida sigui igual que el feix incident. L'altre cas estudiat és la situació intermèdia entre els dos casos explicats anteriorment. D'aquesta manera es conclou, que l'anell format ha de ser la combinació dels anells de cada cas anterior.

Si es compara l'anell que s'obté amb un únic cristall amb l'anell de dos cristalls amb la mateixa longitud i orientació, la diferència dels anells és que en el segon cas l'anell format és més gran. La distribució de la intensitat en els anells serà la mateixa, sempre i quan, estiguin orientats de la mateixa manera. En aquest cas, es diu que es sumen.

Per fer aquest treball, he tingut algunes dificultats. Una d'elles és que el tema d'òptica que s'inclou en aquest treball s'estudia a segon de batxillerat. No obstant, aquesta dificultat l'he intentat superar i per fer-ho, el programa Argó m'ho ha facilitat més. Així que aquesta experiència m'ha servit per obtenir més coneixements en aquest camp i posar-m'ho una mica més fàcil a l'hora d'explicar els conceptes en el treball. Un altre aspecte que m'ha ajudat ha sigut amb l'obtenció d'informació sobre la RC, ja que n'hi ha poca per ser un fenomen relativament nou. Gràcies a la universitat, he pogut dur a terme les pràctiques en les que es necessita material específic i el cost d'aquest és força elevat. Per exemple, el preu del cristall biaxial ronda pels 1000€. Per tant, no m'ho podia permetre.

En finalitzar el treball, a més d'entendre la refracció cònica i la polarització, he pogut complir els objectius que m'havia marcat, com el de comprendre la doble naturalesa de la llum, entendre les seves propietats, comprendre alguns dels seus fenòmens i observar els més característics, com és la reflexió i la refracció. A més, m'he documentat sobre les respostes a l'explicació de la llum que s'han donat al llarg de la història.

## BIBLIOGRAFIA

- Informació:

AMIL MANJÓN, Celia; BAZ SANZ, Laura; MADALINA IANOS, Roxana; PINTADO GÓMEZ, Cristina.

EXPERIMENTO DE YOUNG. Universidad Complutense de Madrid.

<https://www.ucm.es/data/cont/docs/136-2015-01-27-EXPERIMENTO%20DE%20YOUNG.pdf>.

30/8/2016

AMRANI, D; PARADIS, P. *Malus's law of light polarization using a Computer-Based Laboratory.*

12 de març del 2009. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3689839>. 8/9/2016

BELTRÁN, Virgilio. *Para atrapar un fotón.*

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec\\_15.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec_15.htm).

14/8/2016

Continguts d'òptica. Universitat Politècnica de Catalunya.

<http://mie.esab.upc.es/df/optica/index.htm>. 4/9/2016

*Difracción a través de una rendija.* Universidad Complutense Madrid.

[https://www.ucm.es/data/cont/docs/76-2013-07-11-30\\_Diffraction\\_with\\_a\\_laser.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/76-2013-07-11-30_Diffraction_with_a_laser.pdf).

21/8/2016

DOME, E. *Radiofrecuencias y microondas.* CONICET MENDOZA.

<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/RadioyMicro.htm>. 1/8/2016

Enciclopèdia catalana. <http://www.enciclopedia.cat/>. 26/9/2016

ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA. HTML. Universitat d'Alacalà.

<http://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x-de-monocristal-y-espectroscopias-vibracional-y-optica/espectroscopia-infrarroja.html>. 8/8/2016

FERNÁNDEZ, Estefania; PEINADO, Alba; LIZANO, Àngel. *Nuevo polarímetro basado en la refracción cónica.* 2016.

<https://intranet.uab.es/web?cid=1096481466568&pagename=UABDivulga%2FPage%2FTemplatePageDetalleInvestigar&param1=1345682586406>. Universitat Autònoma de Barcelona.

1/10/2016

FRANCO GARCIA, Àngel. *El espectro electromagnético*. HTML. Desembre 2010. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/espectro/espectro.htm>. 8/8/2016

FRANCO GARCÍA, Àngel. *Movimiento ondulatorio*. HTML. [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/\\_ondas/ondas.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_ondas/ondas.html). 7/7/2016

GARCÍA SALINAS, M<sup>a</sup> José. *DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE MATERIALES TRANSPARENTES*. Universidad de Almería. <http://www.ual.es/~mjgarcia/practica9.pdf>. 24/8/2016

GÓMEZ ESTEBAN, Pedro. *La naturaleza de la luz*. <http://eltamiz.com/2013/06/19/la-naturaleza-de-la-luz-i/>. 3/08/2016

*HyperPhysics*. HTML. Nave Georgia State University. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>. 21/7/2016

LA LUZ. HTML. <http://biologiacampmorvedre.blogspot.com.es/2016/01/la-luz.html>. 24/8/2016

Llabrés, Alba. (2011). *Experiments històrics en refracció cònica*. Treball de grau, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.

LÓPEZ SÁNCHEZ, José María; MORENO GÓMEZ, Esteban; GÓMEZ DÍAZ, María José. *La naturaleza de la luz*. 2006. Museo Virtual de la ciencia del CSIC. <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz23.htm>. 5/02/2016

Mercadé, Joan; Serra, Salvador; Armengol Montserrat. *FÍSICA BATXILLERAT 2*. Madrid: McGraw-Hill, 2009.

Mercadé, Joan; Serra, Salvador; Armengol Montserrat. *FÍSICA BATXILLERAT 1*. Madrid: McGraw-Hill, 2012.

MORENO ROMERO, Felipe. *Movimiento ondulatorio*. 9 de novembre del 2010. <http://www.escrioscientificos.es/apunfisi/uni02-c.htm>. 21/9/2016

MORENO ROMERO, Felipe. *Estudio de algunas propiedades de la ondas*. 3 de desembre del 2010. <http://www.escrioscientificos.es/apunfisi/uni03-c.htm>. 23/9/2016

“ÓPTICA GEOMÉTRICA”. M.A.D.

O’CONNOR; ROBERTSON. *Kamal al-Din Abu’l Hasan Muhammad Al-Farisi*. HTML. Novembre 1999. School of Mathematics and Statics University of St Andrews, Scotland. <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/history/Biographies/Al-Farisi.html>. 13/08/2016

OMELAS LIZCANO, Juan Carlos. *La naturaleza de la luz, las leyes de la óptica geométrica y la óptica física*. HTML. 2004. Universidad Autónoma de San Luís Potosí. <http://galia.fc.uaslp.mx/~medellin/Acetf2/optica/contenido/texto/naturaleza.html>. 25/8/2016

PÉREZ, Guillermo. Espectro electromagnético. [http://www.espectrometria.com/espectro\\_electromagntico](http://www.espectrometria.com/espectro_electromagntico). 30/7/2016

¿Qué tipos de láseres hay? Centro de láseres pulsados. <http://www.clpu.es/divulgacion/bits/que-tipos-de-laseres-hay>. 29/7/2016

Turpin, Alex; V. Loiko, Yury; K. Kalkandjiev, Todor; Mompert, Jordi. "Conical refraction: fundamentals and applications". 27 juny 2016.

Turpin, Alejandro. (2015). Conical Refraction: Fundamentals and Applications Tesi doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.

UNED Documents. "La luz a través de la historia I. De los griegos a Newton". Publicació en línia. YouTube. Youtube, LLC., 10 juny 2013. Web. 26 agost 2016.

VILLASUSO GATO, José. *Ondas o movimiento ondulatorio*. [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/Ondasbachillerato/Ondas\\_bach\\_indice.htm](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/Ondasbachillerato/Ondas_bach_indice.htm). 22/7/2016

What wavelength goes with a color? HTML. National Aeronautics And Space Administration. [http://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths\\_for\\_Colors.html](http://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html). 29/7/2016

## - Fotografies:

Fig 1. Ona mecànica. Extret de: <https://edbar01.files.wordpress.com/2014/04/transversales.gif>

Fig 2. Propagació de l'ona a l'aigua. Extret de: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1J5ZD129B-1X7R524-V0T/aigua.jpg>

Fig 3. Ona electromagnètica. Extret de: <https://edbar01.files.wordpress.com/2014/04/transversales.gif>

Fig 4. Ona transversal. Extret de: [http://1.bp.blogspot.com/-TU6qHBKiEGQ/TcM6Tsjl36I/AAAAAAAAABE/nm9\\_XKlgDD0/s1600/ondas-trans-y-longi.png](http://1.bp.blogspot.com/-TU6qHBKiEGQ/TcM6Tsjl36I/AAAAAAAAABE/nm9_XKlgDD0/s1600/ondas-trans-y-longi.png)

Fig 5. Propagació de les ones perpendicular al desplaçament en el medi. Extret de: [https://c.fastcompany.net/multisite\\_files/fastcompany/imagecache/inline-large/inline/2013/09/3017485-inline-750-waves.jpg](https://c.fastcompany.net/multisite_files/fastcompany/imagecache/inline-large/inline/2013/09/3017485-inline-750-waves.jpg)

Fig 6. Onda longitudinal. Extret de: [http://1.bp.blogspot.com/-TU6qHBKiEGQ/TcM6TsjI36I/AAAAAAAAABE/nm9\\_XKIgDD0/s1600/ondas-trans-y-longi.png](http://1.bp.blogspot.com/-TU6qHBKiEGQ/TcM6TsjI36I/AAAAAAAAABE/nm9_XKIgDD0/s1600/ondas-trans-y-longi.png)

Fig 7. Onda viatgera. Extret de: [http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0001/Image/Fisica\\_mdulo1\\_estudiantes/i%2005.JPG](http://www.educarchile.cl/UserFiles/P0001/Image/Fisica_mdulo1_estudiantes/i%2005.JPG)

Fig 8. Exemple d'ona estacionària. Extret de: <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/estacionaria1.png>

Fig 9. Onda unidimensional. Extret de: [http://masfisica.ucoz.com/ONDA\\_cuerda.gif](http://masfisica.ucoz.com/ONDA_cuerda.gif)

Fig 10. Onda bidimensional. Extret de: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/barra/Frente.gif>

Fig 11. Oneig de bandera. Extret de: <https://i.ytimg.com/vi/PIDCwLXxLHs/maxresdefault.jpg>

Fig 12. Onda tridimensional. Extret de: <http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena11/escenas/tridimensional.html>

Fig 13. Propagació de la llum en les tres dimensions. Extret de: [http://masfisica.ucoz.com/LAMPARA\\_RAYOS.jpg](http://masfisica.ucoz.com/LAMPARA_RAYOS.jpg)

Fig 14. Onda periòdica. Extret de: [http://2.bp.blogspot.com/-wD3UZQAJHkU/TcM92LMoIFI/AAAAAAAAABQ/Q-FEal\\_W9cE/s1600/Ap\\_ond\\_02\\_1.gif](http://2.bp.blogspot.com/-wD3UZQAJHkU/TcM92LMoIFI/AAAAAAAAABQ/Q-FEal_W9cE/s1600/Ap_ond_02_1.gif)

Fig 15. Electrocardiograma. Extret de: [http://www.electrocardiograma.org/images/tecnico\\_en\\_electrocardiograma.jpg](http://www.electrocardiograma.org/images/tecnico_en_electrocardiograma.jpg)

Fig 16. Característiques de les ones. Extret de: <http://cmapspublic2.ihmc.us/rid=1G5YPY325-1WFJF-CHW/onda001.jpg>

Fig 17. Con d'obertura discontinua. Extret de: <https://www.youtube.com/watch?v=rgh6azo9KeI>

Fig 18. Con d'obertura contínua. Extret de: <https://www.youtube.com/watch?v=rgh6azo9KeI>

Fig 19. Doble esclatxa, experiment de Young. Extret de: <http://image.slidesharecdn.com/interferencia-091126134814-phpapp02/95/interferencia-8-728.jpg?cb=1259243317>

Fig 20. Espectre electromagnètic. Extret de: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/Images/emspec.gif>

Fig 21. Modulador de freqüència. Extret de: <https://tecnocomunicaciones.wikispaces.com/file/view/RADIO.png/99341981/RADIO.png>

Fig 22. Observació de l'infraroig. Font pròpia.

Fig 23. Espectroscopi. Extret de: <http://www.kruess.com/images/spectroscope-1701.png>

Fig 24. Característiques dels dos làsers. Extret de: Font pròpia.

Fig 25. Reflexió. Extret de: <http://onpedia.files.wordpress.com/2011/09/ondareflexion.jpg>

Fig 26. Comprovació de la 2a llei de la reflexió. Font pròpia.

Fig 27. Reflexió difusa. Extret de: [http://www.educa.madrid.org/web/ies.alonsoquijano.alcala/carpeta5/carpetas/quienes/departamentos/ccnn/CCNN-1-2-ESO/2eso/2ESO-12-13/Bloque-III/T-4-Luz-Sonido/imagenes/Luz/024-re\\_esc\\_difusa-1.gif](http://www.educa.madrid.org/web/ies.alonsoquijano.alcala/carpeta5/carpetas/quienes/departamentos/ccnn/CCNN-1-2-ESO/2eso/2ESO-12-13/Bloque-III/T-4-Luz-Sonido/imagenes/Luz/024-re_esc_difusa-1.gif)

Fig 28. Paisatge amb aigües mogudes. Font pròpia.

Fig 29. Reflexió especular. Extret de: [http://www.educa.madrid.org/web/ies.alonsoquijano.alcala/carpeta5/carpetas/quienes/departamentos/ccnn/CCNN-1-2-ESO/2eso/2ESO-12-13/Bloque-III/T-4-Luz-Sonido/imagenes/Luz/024-re\\_esc\\_difusa-1.gif](http://www.educa.madrid.org/web/ies.alonsoquijano.alcala/carpeta5/carpetas/quienes/departamentos/ccnn/CCNN-1-2-ESO/2eso/2ESO-12-13/Bloque-III/T-4-Luz-Sonido/imagenes/Luz/024-re_esc_difusa-1.gif)

Fig 30. Paisatge amb aigües tranquil·les. Font pròpia.

Fig 31. Imatge en un mirall pla. Extret de: <https://vecinadelpicasso.files.wordpress.com/2014/06/espejo-plano.jpg>

Fig 32. Imatge quan l'objecte és més lluny que el centre. Extret de: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41008970/helvia/sitio/upload/opticafisicaygeometricafinal.pdf>

Fig 33. Imatge quan l'objecte està entre el C i el F. Extret de: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41008970/helvia/sitio/upload/opticafisicaygeometricafinal.pdf>

Fig 34. Imatge quan l'objecte és al C. Extret de: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41008970/helvia/sitio/upload/opticafisicaygeometricafinal.pdf>

Fig 35. Imatge quan l'objecte és entre el F i el vèrtex. Extret de: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/41008970/helvia/sitio/upload/opticafisicaygeometricafinal.pdf>

Fig 36. Imatge del mirall esfèric convex. Extret de: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/24/fig35-15b.gif>

Fig 37. Refracció. Extret de: <http://deconceptos.com/wp-content/uploads/2010/02/concepto-de-refraccion.png>

Fig 38. Comprovació de la 2a llei de la refracció. Font pròpia.

Fig 39. Pràctica 3. Font pròpia.

Fig 40. Angle límit. Extret de: [https://rodas5.us.es/file/a9937f57-052f-e524-38f0-bd882b1c3068/3/3es\\_el\\_agua\\_un\\_espejo\\_wb\\_SCORM.zip/images/pic010.png](https://rodas5.us.es/file/a9937f57-052f-e524-38f0-bd882b1c3068/3/3es_el_agua_un_espejo_wb_SCORM.zip/images/pic010.png)

Fig 41. Reflexió total. Extret de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4f/Refracci%C3%B3n\\_y\\_reflexi%C3%B3n.svg/600px-Refracci%C3%B3n\\_y\\_reflexi%C3%B3n.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/4f/Refracci%C3%B3n_y_reflexi%C3%B3n.svg/600px-Refracci%C3%B3n_y_reflexi%C3%B3n.svg.png)

Fig 42. Imatge quan l'objecte està més lluny que el centre. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_LM2F.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_LM2F.gif)

Fig 43. Imatge quan l'objecte està al centre. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_L2F.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_L2F.gif)

Fig 44. Imatge quan l'objecte està entre el centre i el focus. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_LCF2F.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_LCF2F.gif)

Fig 45. Imatge quan l'objecte està al focus. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_LCF.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_LCF.gif)

Fig 46. Imatge quan l'objecte està entre el F i el vèrtex. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_LCmF.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_LCmF.gif)

Fig 47. Imatge en una lent divergent. Extret de: [http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l\\_LD.gif](http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/OptGeometrica/lentes/imagenes/l_LD.gif)

Fig 48. Difracció per reixeta. Extret de: <http://1.bp.blogspot.com/-QyEwjMN6rH8/URFIQ2gRivI/AAAAAAAAACVg/eckvNMZh4rY/s320/Dibujo.JPG>

Fig 49. Difracció per un obstacle circular i petit. Extret de: <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQaWDhtCk0RDix5RwaTFehClw17LeftrvTL9E2Ug4HDe675DTN7>

Fig 50. Principi de Huygens. Extret de: <https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&src=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj5wflYlRnOAhVEtxoKHYSdB2gQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fintercentres.edu.gva.es%2Fiesleonardodavinci%2FFisica%2Fondas%2Fondas06.htm&bvm=bv.129422649,d.d24&psig=AFQjCNHM5S3sBgyksjvE-wljTBZxHofRw&ust=1470998558254950>

Fig 51. Interferència constructiva. Extret de: <http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/ondas/interferencias.html>

Fig 52. Interferència destructiva. Extret de: <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/assignaturas/fisica/ondas/interferencias.html>

Fig 53. Polarització lineal. Extret de: [http://luz.izt.uam.mx/wiki/images/c/cb/005\\_lineal.jpg](http://luz.izt.uam.mx/wiki/images/c/cb/005_lineal.jpg)

Fig 54. Propagació de la polarització lineal. Extret de: <http://www.infobservador.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/linearv2.gif>

Fig 55. Polarització circular. Extret de: [http://luz.izt.uam.mx/wiki/images/3/3c/005\\_circular.jpg](http://luz.izt.uam.mx/wiki/images/3/3c/005_circular.jpg)

Fig 56. Propagació de la polarització circular. Extret de: <http://www.infobservador.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/circularv51.gif>

Fig 57. Polarització el·líptica. Extret de: <http://www.infobservador.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/10/elliptical.gif>

Fig 58. Polaritzador lineal. Font pròpia.

Fig 59. Polaritzador circular. Font pròpia.

Fig 60. Pràctica 5. Font pròpia.

Fig 61. Birefringència amb un cristall d'espàt d'Islàndia. Extret de: <http://www.encyclopedia.cat/sites/default/files/media/FOTO/FG005847.JPG>.

Fig 62. Feix de llum en un cristall uniaxial. Extret de: PhD Turpin.

Fig 63. Cristall biaxial. Font pròpia.

Fig 64. Feix de llum en un cristall biaxial. Extret de: PhD Turpin.

Fig 65. Muntatge per fer una fotografia. Font pròpia.

Fig 66. Anells de la RC. Font pròpia.

Fig 67. Pràctica 6. Font pròpia.

Fig 68. Pràctica 7. Font pròpia.

Fig 69. Polaritzador a  $0^\circ$ . Font pròpia.

Fig 70. Pràctica 8. Font pròpia.

Fig 71. Pràctica 9. Font pròpia.

Fig 72. Pràctica 10. Font pròpia.

Fig 73. Pràctica 11. Font pròpia.

Fig 74. Pràctica 12. Font pròpia.

Fig 75. Feix en la comunicació òptica. Extret de: PhD Turpin.

Fig 76. Comunicació òptica. Font pròpia.

Fig 77. Cada color respecte la longitud d'ona. Extret de: [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/experiencias/espectro/espectro\\_6.jpg](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/experiencias/espectro/espectro_6.jpg).

Fig 78. Doble difracció de Young. Extret de: <http://image.slidesharecdn.com/ondascompleto-160120185220/95/ondas-37-638.jpg?cb=1453315979>.

## ANNEXES

### Annex A. Diferents tipus d'infraroig, llum visible, ultraviolat i raigs X

- Infraroig
  - Infraroig llunyà

La longitud d'ona comprèn entre  $10^{-3}$  m a  $10^{-5}$  m i també es pot anomenar microona. És energia essencial de calor per la salut, reproducció i desenvolupament de tots els éssers vius. Proporciona calor fins als teixits i articulacions més profundes, de manera ràpida i uniforme.
  - Infraroig mitjà

La longitud d'ona és de  $2.5 \cdot 10^{-6}$  m a  $10^{-6}$  m. Els radiadors de cos negre\* poden irradiar infraroig mitjà. La majoria d'energia que emeten els planetes del Sistema Solar i els asteroides és d'aquest tipus. L'infraroig mitjà serveix per trobar aquells asteroides que no es veuen.
  - Infraroig proper

Té una longitud d'ona de  $2.5 \cdot 10^{-6}$  m a  $7.5 \cdot 10^{-7}$  m. És semblant a la radiació de la llum visible. És usat en la fibra òptica.
- Llum visible
  - Llum vermella

Té una longitud d'ona de 622 nm a 780 nm. Apareix a la sortida i a la posta del Sol. La llum ha de recórrer un espai més gruixut i totes les longituds d'ona curtes es difonen, canvien la seva direcció contínuament i no es poden apreciar gaire. La llum vermella es difon menys que les altres i no es desvia tant, per això es pot observar al començament i final del dia.
  - Llum taronja

La seva longitud d'ona és aproximadament de 597 nm a 622 nm. És utilitzat a les llums taronges del carrer, que són làmpades de sodi a baixa pressió.
  - Llum groga

La longitud d'ona de la llum groga és aproximadament de 577 nm a 597 nm.

- Llum verda

Aproximadament la longitud d'ona és de 492nm a 577 nm. La trobem representada a les fulles o a l'herba. Aquestes absorbeixen tots els colors de la llum visible menys el verd que s'hi reflexa.

- Llum blava

La longitud d'ona és aproximadament de 455 nm a 492 nm i és curta respecte les que formen l'espectre visible. Respecte això, les molècules del blau estan més disperses per l'atmosfera i són les que es difonen més per l'aire. És el causant que el cel sigui blau la major part del dia.

- Llum violeta

Té una longitud d'ona aproximadament de 390 nm a 455 nm. Les seves partícules estan força dispersades a l'atmosfera.

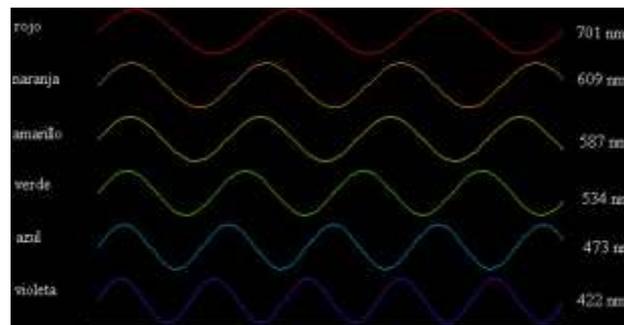


Fig 77. Cada color respecte la longitud d'ona.

- Ultraviolat

- UV-A

La longitud d'ona d'aquest tipus és de  $3,2 \cdot 10^{-7}$  m a  $4 \cdot 10^{-7}$  m. És el tipus que s'associa al bronzejat.

- UV-B

La longitud d'ona és de  $2,9 \cdot 10^{-7}$  m a  $3,2 \cdot 10^{-7}$  m. Es caracteritza per la funció de l'envelliment de la pell. També activa el funcionament de la vitamina D que ajuda a l'absorció de calci i de fòsfor a l'intestí i la mineralització òssia\*.

- UV-C

La longitud d'ona de l'UV-C té com a més petita  $2 \cdot 10^{-7}$  m a  $2,9 \cdot 10^{-7}$  m. Pel fet que és el tipus amb la longitud d'ona menor, té més freqüència i per tant, és més energètica. És bactericida, el seu ús ajuda al tractament d'úlceres cròniques. Les làmpades portàtils de UV-C redueixen l'efecte cancerigen dels UV-A i UV-B.

- Raigs X
  - Rajos X durs  
Són els que tenen la longitud d'ona més curta i són més energètics.
  - Rajos X Suaus  
Tenen la longitud d'ona més gran i la freqüència més petita.

## **Annex B. Classificació dels làsers segons la normativa UNE EN 60825-1/A2: 2002**

- Classe 1  
Aquest tipus són segurs en qualsevol utilització, fins i tot amb la seva utilització d'instruments òptics de visió directa.
- Classe 1M  
Són segurs ja que no emeten radiacions perilloses però no es poden observar a través d'instruments òptics.
- Classe 2  
La seva potència és baixa i emet radiació visible. Pot causar danys a la retina si es mira el feix durant un temps continu però es pot evitar gràcies el funcionament de les parpelles.
- Classe 2M  
És igual a la classe 2 però amb la diferència que és perillós si s'observa amb aparells òptics.
- Classe 3R  
Emet radiació entre 302,5 nm i 106 nm, produeix danys immediats quan es mira directament, tot i que és menor que el de la classe 3B. També necessita menys condicions de fabricació i mesures de control per la seva utilització que la classe 3B.
- Classe 3B  
La visió directe del feix és perillosa. No obstant, la observació del feix en reflexions difuses és segura la majoria de vegades.

- Classe 4

És el que té major risc tant per l'ull com per la pell, encara que s'observi el feix directe com en reflexions difuses. Això causa que la seva utilització requereixi d'una seguretat i precaució alta respecte les altres classes de làsers. Fins i tot poden causar incendis.

## **Annex C. Mesures de protecció**

- Als laboratoris i tallers:

A les classes 2 i 2M, el feix no s'ha de dirigir directament a les persones i l'ús d'instruments òptics a la classe 2M pot ser perillós.

A les classes 3R i 3B, el làser només pot ser utilitzat en espais controlats. S'ha d'evitar reflexions intencionades. El feix del làser no pot anar a l'infinit i un cop s'acaba no pot fer reflexions. Els ulls han d'estar protegits quan pugui interceptar el feix de llum tant de manera directa com reflectida. S'ha de senyalitzar els accessos dels llocs on s'usa aquests tipus de làsers. Abans de començar qualsevol tasca s'ha de comprovar si els sistemes d'encès i apagat lluminosos i sonors dels làsers funcionen. També s'ha d'utilitzar l'obturador (tapa per tancar o obrir el làser) quan no es fa servir. Utilització d'atenuadors quan no es vol fer servir tota la potència. És recomanat l'ús d'ulleres adequades a la longitud d'ona emesa.

A la classe 4, s'aconsella utilitzar les mesures de les classes 3R i 3B però amb més exigència. Això significa que s'ha de limitar el feix de llum. Les persones han d'utilitzar protectors oculars i roba apropiada. Ha d'haver-hi una bona il·luminació ambiental quan s'utilitzi el protector ocular làser. Finalment s'ha de prendre mesures necessàries per no causar incendis. Per tant, no pot haver productes inflamables.

## 7) LA REFLEXIÓN DE LA LUZ

Cada vez que un haz de luz incide en una superficie especular, se produce el fenómeno de la reflexión, que está regulado por las leyes siguientes:

1° *El rayo incidente, el rayo reflejado y la perpendicular  $n$  a la superficie de reflexión en el punto de incidencia se encuentran en el mismo plano.*

2° *El ángulo de reflexión  $r$  tiene la misma medida que el ángulo de incidencia  $i$ .*

Recordemos que por rayos se entienden las direcciones a lo largo de las cuales se propagan el haz de luz incidente y el reflejado. Se pueden comprobar estas dos leyes con el experimento siguiente.

### EXPERIMENTO N. 6

Material necesario: 1 proyector; 1 transformador; 1 soporte para proyector; 1 diafragma; 1 base; 1 goniómetro; 1 espejo plano.

Después de montar en el proyector el diafragma, regular su posición de forma que se obtenga un fino haz de luz vertical (Fig. 1). Luego, colocar el goniómetro y encima de él el espejo pequeño plano en posición perpendicular al eje que pasa por el cero de la escala (Fig. 2).

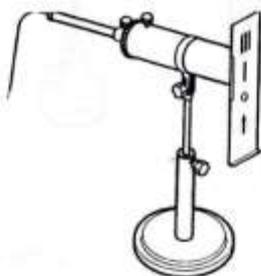


Fig. 1



Fig. 2

Finalmente, completar el dispositivo ilustrado en la figura 3, de tal forma que el haz de luz que sale del diafragma roce el goniómetro dejando una marca luminosa e incida en el espejo en el punto central del goniómetro. De esta forma se podrá comprobar que, para cualquier inclinación del espejo, el ángulo de reflexión  $r$  es siempre igual al de incidencia  $i$  (Fig. 4).

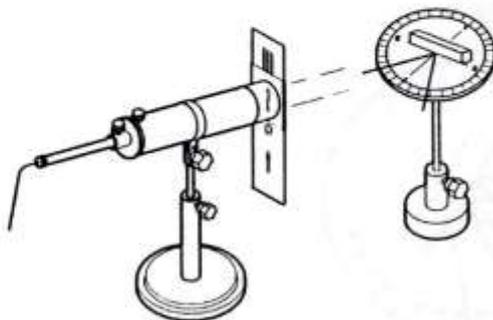


Fig. 3

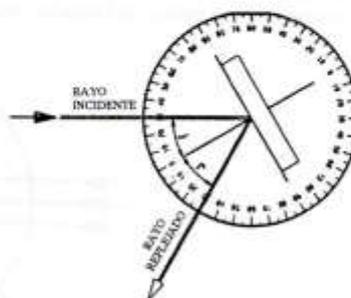


Fig. 4

9) LA REFRACCIÓN DE LA LUZ

La velocidad de propagación  $c$  de la luz es máxima (unos 300.000 km/s) cuando ésta se propaga en el vacío. En el resto de cuerpos transparentes la velocidad de propagación  $v$  es siempre inferior. Todos los cuerpos transparentes se caracterizan por un número  $n$  que recibe el nombre de *índice de refracción absoluto*, que permite valorar la velocidad con la que la luz se propaga a través de cada uno de ellos. Exactamente:

$$v = \frac{c}{n}$$

Cuando un haz de luz pasa del vacío (o del aire) a una sustancia transparente donde su velocidad es inferior, sufre una desviación y este fenómeno se llama *refracción de la luz*.

Con el experimento siguiente se podrá medir el índice de refracción del plexiglás.

EXPERIMENTO N. 8

Material necesario: 1 proyector; 1 transformador; 1 soporte para proyector; 1 diafragma; 1 base; 1 goniómetro; 1 semicilindro de plexiglás.

Regular la posición del diafragma para que se obtenga un fino haz de luz vertical. Colocar luego sobre el goniómetro el semicilindro de plexiglás perpendicularmente al eje que pasa por el cero de la escala. Completar el dispositivo de la figura 1, de tal forma que el rayo de luz incidente forme un ángulo  $i$  con la perpendicular al semicilindro en el punto de incidencia.

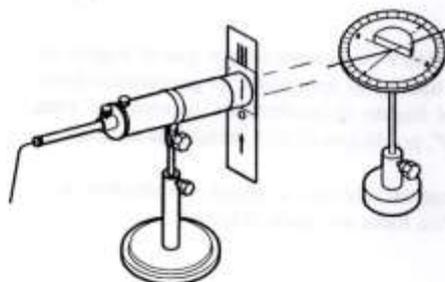


Fig. 1

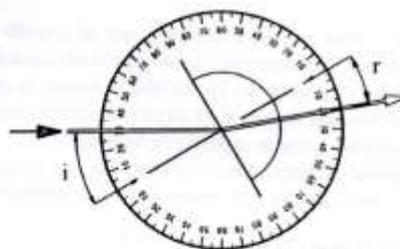


Fig. 2

De esta forma, podrás observar que el ángulo  $r$  entre el rayo refractado y la perpendicular tiene una medida que es siempre inferior a la de  $i$  (Fig. 2).

Si se reproduce en una hoja de papel la geometría de este fenómeno, al medir la longitud de los dos segmentos  $AB$  y  $CD$ , indicados en la figura 3, se demuestra que:

$$n = \frac{AB}{CD}$$

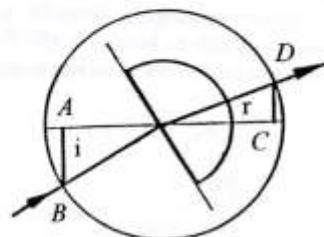


Fig. 3

- ¿Cuál es la velocidad de propagación de la luz en el plexiglás?

## 10) LA REFLEXIÓN TOTAL

Con el experimento anterior se ha podido comprobar que, al pasar del aire a una sustancia transparente, el haz de luz refractado se acerca a la perpendicular. Con el experimento siguiente se podrá observar que en el paso inverso el haz de luz refractado se aleja de la perpendicular y que, en condiciones especiales, el rayo incidente se refleja.

### EXPERIMENTO N. 9

Material necesario: 1 proyector; 1 transformador; 1 soporte para proyector; 1 diafragma; 1 base; 1 goniómetro; 1 semicilindro de plexiglás.

Regúlese la posición del diafragma de forma que se obtenga un fino haz de luz vertical y colóquese sobre el goniómetro el semicilindro de plexiglás en posición perpendicular al eje que pasa por el cero de la escala, de forma que dirija al rayo incidente su cara esférica (Fig. 1).

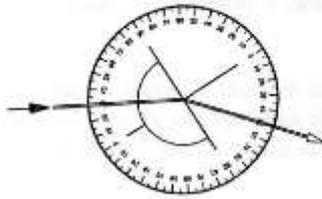


Fig. 1

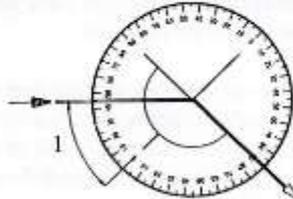


Fig. 2

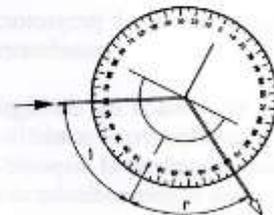


Fig. 3

De esta forma se podrá observar que el ángulo de refracción  $r$  es siempre mayor que el ángulo de incidencia  $i$ . Manteniendo la misma configuración, si se hace girar lentamente el goniómetro junto con el semicilindro, de forma que aumente la medida del ángulo de incidencia  $i$ , se verá que, para un determinado ángulo  $i$ , el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ , por lo que el rayo refractado es tangente a la cara plana, como muestra la figura 2.

El ángulo  $i$  se llama *ángulo límite*, ya que si se hace aumentar aún más el ángulo de incidencia, el rayo se refleja en la cara plana del semicilindro como si ésta fuera un espejo (Fig. 3).

## Annex G. Demostració de la fórmula de l'amplitud resultant

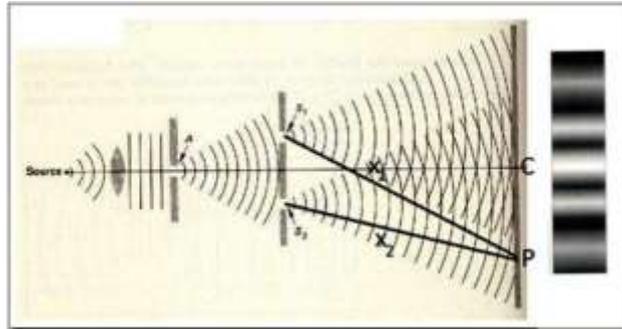


Fig 78. Doble difracció de Young.

L'experiment de la figura anterior és la doble difracció de Young. El punt P és el lloc on es vol observar la interferència. S'emeten dues ones de cada focus ( $S_1$  i  $S_2$ ) i tenen les equacions:

$$y_1(x_1, t) = A \sin(\omega t - kx_1)$$

$$y_2(x_2, t) = A \sin(\omega t - kx_2)$$

Es suposa que les dues ones són de la mateixa amplitud, mateixa freqüència angular ( $\omega$ ), mateix nombre d'ona\* ( $k$ ), així que tenen la mateixa longitud d'ona, i que a l'instant  $t=0$  la seva fase és 0.

$$y = y_1(x_1, t) + y_2(x_2, t) = A[\sin(\omega t - kx_1) + \sin(\omega t - kx_2)]$$

Recordant que  $\sin a + \sin b = 2 \sin \frac{a+b}{2} \cdot \cos \frac{a-b}{2}$ ,

$$y = 2A \sin \frac{(\omega t - kx_1) + (\omega t - kx_2)}{2} \cdot \cos \frac{(\omega t - kx_1) - (\omega t - kx_2)}{2}$$

$$y = 2A \sin \frac{2\omega t - k(x_1 + x_2)}{2} \cdot \cos \left[ \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \right]$$

S'obté la fórmula del moviment ondulatori:

$$y = 2A \cos \left[ \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \right] \cdot \sin \left( \omega t - k \frac{x_1 + x_2}{2} \right)$$

$$y = A_r \cdot \sin \left( \omega t - k \frac{x_1 + x_2}{2} \right)$$

Així que l'amplitud resultant és:

$$A_r = 2A \cos \left[ \frac{k(x_2 - x_1)}{2} \right]$$

També es pot escriure, si es recorda que  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$A_r = 2A \cos \pi \left[ \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \right]$$

Demostració de la fórmula de la interferència constructiva

$$A_r = 2A$$

L'amplitud màxima és igual a 1. Per tant:

$$\cos \pi \left( \frac{x_2 - x_1}{\lambda} \right) = \pm 1$$

$$\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = n\pi$$

$$x_2 - x_1 = n\lambda$$

On  $n$  pot prendre els valors de 0,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 4$ ...

Demostració de la fórmula de la interferència destructiva

$$A_r = 0$$

$$\cos \pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = 0$$

$$\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$x_2 - x_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

## **GLOSSARI**

**Aberració esfèrica:** deformació d'imatges formades per lents que no segueixen una estructura estrictament esfèrica.

**Agudesia visual:** mesura la capacitat del sistema visual per veure detalls i objectes.

**Anisòtropa:** substància que fa que com a mínim una de les propietats físiques variï segons la direcció.

**Càmera fosca:** instrument òptic que representa una imatge plana d'un objecte exterior en una zona interior de la càmera.

**Capacitat del canal:** quantitat màxima d'informació que es pot transportar en un canal de comunicacions.

**Coherent:** radiació d'amplitud molt estreta.

**Cos negre:** la superfície del cos absorbeix tota l'energia rebuda de l'exterior i emet l'energia incident de l'interior.

**Direccional:** emetre radiacions cap a una direcció determinada.

**Efluvi:** raigs de partícules que viatgen a velocitat finita.

**Eix òptic:** direcció de monorefringència en un cristall birefringent.

**Elèctrode:** conductor utilitzat per fer entrar o sortir corrent elèctric d'un medi.

**Front d'ona:** superfície formada per tots els punts on hi arriba l'ona al mateix moment i es troben al mateix estat de vibració.

**Lògic:** persona que estudia sistemàticament les relacions entre enunciats.

**Mineralització òssia:** acumular minerals pels ossos.

**Modulació:** modificar algunes característiques d'una ona portadora per transmetre d'un emissor a un receptor la informació continguda en l'ona moduladora

Modulació d'amplitud: modulació que actua sobre l'amplitud de l'ona portadora variant-la per transmetre la informació, però no canvia la freqüència.

Modulació de freqüència: modulació que actua sobre la freqüència de l'ona portadora variant-la per transmetre la informació, però no varia l'amplitud.

Monocromàtic: una única longitud d'ona.

Número d'ona: és una magnitud de freqüència que indica el nombre de vegades que es repeteix l'ona en una unitat de distància.

Òptica geomètrica: part de la física que estudia la trajectòria dels raigs de llum quan entren en contacte amb un medi reflector o refractor.

Radioaficionat: és un servei de la Unió Internacional de Telecomunicacions que té com a objectiu la auto-instrucció amb caràcter personal i sense ànim de lucre.

Radioisòtop: isòtop radioactiu.

Refringent: que té el poder de refractar.

Tensió superficial: és la formació d'una pel·lícula per les forces intermoleculares a la superfície d'un líquid.

Xoc elàstic: interacció entre dos cossos materials que conserven la quantitat de moviment i l'energia cinètica.