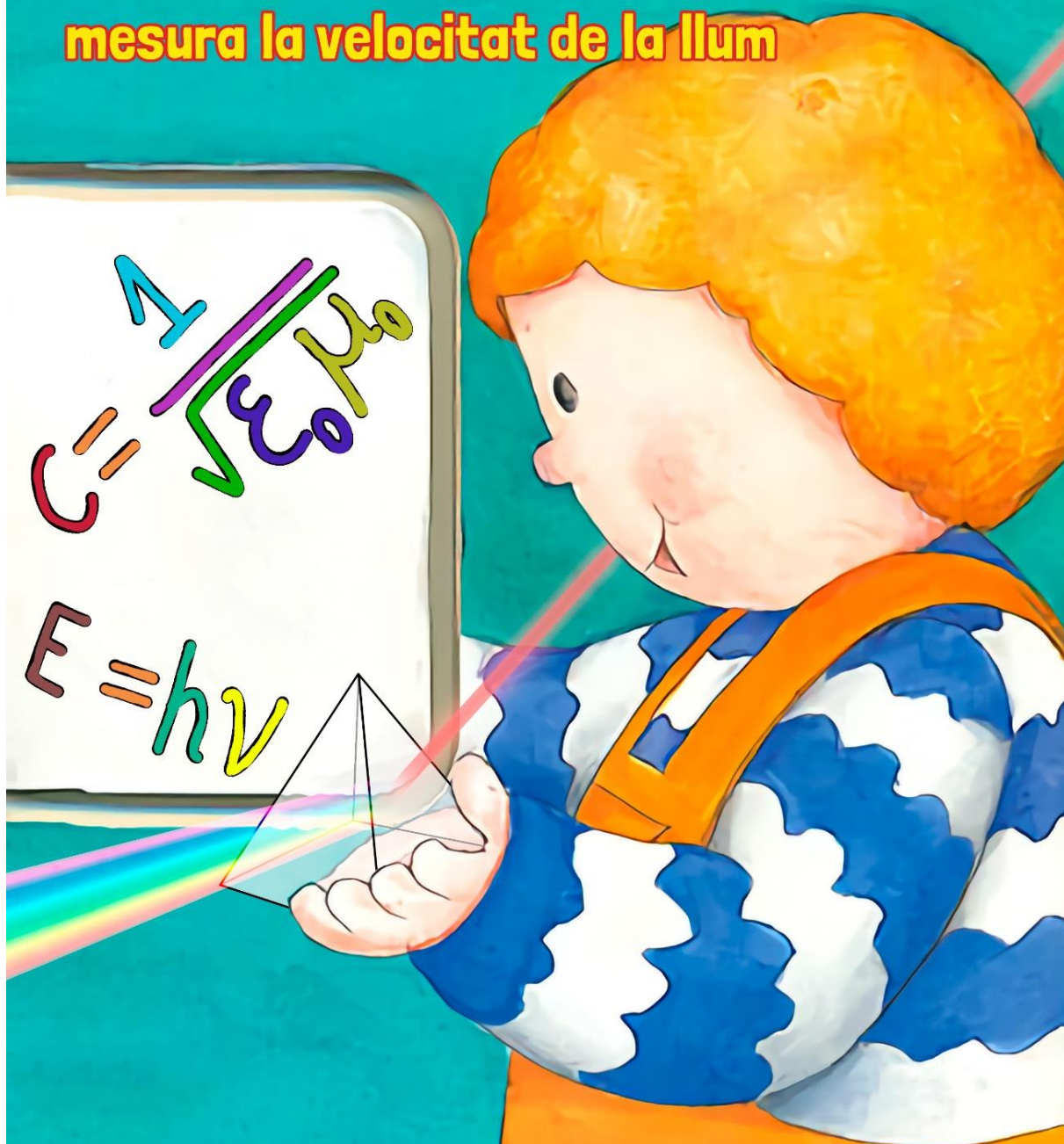


En TEO

mesura la velocitat de la llum



*Un recorregut pel món de les ones electromagnètiques
i la seva velocitat*

Al principi, Déu va crear el cel i la terra.

La terra era caòtica i desolada, les tenebres cobrien la superfície de l'oceà i l'Esperit de Déu planava sobre les aigües.

Déu digué:

- Que existeixi la llum.

I la llum va existir.

Déu veié que la llum era bona, i separà la llum de les tenebres.

(Gènesi, 1:1-4)

Índex

1.	<u>Introducció: <i>fiat Lux</i></u>	2
	1.1. Objectius del treball	3
2.	<u>Partícules, ones i moviment harmònic</u>	4
	2.1. Les partícules	4
	2.2. Les ones	4
3.	<u>Cronologia de l'estudi de la llum</u>	11
	3.1. Edat antiga: primeres observacions de la llum	12
	3.2. Edat mitjana: les contribucions de la civilització islàmica a l'òptica	16
	3.3. Edat moderna: revolució Científica	18
	3.4. Edat contemporània: es resol el debat	30
	3.5. Segle xx: neix la quàntica	40
	3.6. La visió actual de la llum	42
4.	<u>Part pràctica</u>	48
	4.1. Hipòtesis	48
	4.2. Trobant c	48
	4.3. Experiment 1: Foucault	50
	4.4. Experiment 2: L'oscil·loscopi	54
	4.5. Experiment 3: El microones	56
	4.6. Experiment 4: La Lluna	59
	4.7. Conclusions	61
5.	<u>Conclusió: <i>sic luceat lux</i></u>	66
6.	<u>Annex</u>	67
	6.1. Índex onomàstic	67
	6.2. Metodologia emprada per determinar el marge d'error	79
	6.3. Galeria d'imatges	80
7.	<u>Bibliografia i Webgrafia</u>	82

1. Introducció: *fiat lux*

Podríem començar aquesta introducció dient que des de l'inici teníem molt clar sobre què faríem el nostre Treball de Recerca, però en realitat hem hagut de descartar desenes de temes fins a arribar a aquest. Podríem dir també que des de petits hem tingut una obsessió per mesurar la velocitat de la llum que no ens deixava dormir, però no seria veritat. Per fer-ho més interessant, podríem dir que ens va agafar la inspiració d'aquest tema un dia que estàvem mirant la llum, però realment la llum està present en tot allò que veiem. Finalment, se'ns va acudir dedicar les nostres tardes de recerca a aquest fenomen ondulatori tan curiós i aparentment inexplicable anomenat llum per poder resoldre els misteris que amaga darrere. Preguntes com “quin és el valor exacte de la seva velocitat?”, “com es calcula?” o “espera, què és realment la llum?” es desenvolupen en aquest treball teòric que, acompanyat de pràctiques experimentals, esperem que ajudin a comprendre millor tot allò que ens envolta.



Figura 1.1. El Sol, la font de llum essencial



Figura 1.2. *En Teo va a l'escola*, llibre de la col·lecció de contes infantils de Violeta Denou

Aquest document és com un llibre d'en Teo, personatge de contes infantils i protagonista de grans històries com *En Teo va al zoo*, *En Teo i el seu aniversari* o *En Teo a la granja*. Així com la capacitat intel·lectual d'en Teo va avançant amb cada fenomen que descobreix, aquest treball és una proposta per aprendre una miqueta més amb cada nou paràgraf. Veiem oportú remarcar que, abans de començar amb aquest projecte, en Teo érem nosaltres, quatre estudiants de 1r de batxillerat, que no teníem ni la més mínima idea sobre el funcionament i la naturalesa de la llum. Un Teo innocent, ingenu, que tot just coneixia quatre coses sobre aquest tema. Però, tot i això, un Teo atrevit, curiós, disposat a aprendre. I de recerca en recerca vam deixar enrere el terme *projecte* per començar a anomenar *treball* aquest document de divulgació científica que ara teniu a les vostres mans.

Així doncs, si vosaltres, lectors, també esteu disposats a anar-vos-en aquesta nit al llit amb una mica més de substància grisa espumada, us convidem a acompanyar-nos en aquest vertiginós viatge per travessar els límits del temps i la velocitat, de mà de la llum, tan present en les nostres vides.

Com a suport per enriquir el treball, hem afegit representacions en format GIF d'alguns dels apartats que considerem útils per acabar d'aclarir alguns conceptes. Aquestes imatges en moviment les trobareu al llarg del treball en forma de codis QR i es poden escanejar fàcilment amb la càmera d'un telèfon mòbil.

1.1. Objectius del treball

- Conèixer la naturalesa de la llum.

Pretenem fer un estudi sobre què és realment la llum i sobre les seves interaccions amb els diferents medis als quals està exposada. També treballarem els fenòmens físics que afecten la llum i efectes de la llum sobre el món físic.

- Estudiar les ones electromagnètiques i l'espectre de la llum visible.

En aquest treball resumirem les propietats de les ones i els seus tipus, centrant-nos sobretot en la radiació electromagnètica. A més, estudiarem la llum visible i les ones electromagnètiques de manera teòrica.

- Realitzar un estudi cronològic sobre els descobriments que han anat donant forma a la concepció de la llum.

Basant-nos en les diferents fonts d'informació que han alimentat el nostre projecte, en el cos d'aquest treball proposem un viatge temporal a través de tots els estudis que s'han dut a terme respecte de la llum i la seva velocitat. D'Aristòtil a Einstein, passant per Galileu i Newton, la nostra visió temporal del camp de l'òptica abasta milers d'anys. A causa de l'escassetat d'articles científics que disposin aquesta informació de manera ordenada cronològicament, ens hem proposat crear un gran atlas de la recerca sobre la ciència de la llum, amb la informació més completa possible i un llenguatge entenedor per a tothom. Aquesta part del treball està dirigida a tota aquella gent que vulgui seguir l'evolució dels coneixements sobre la llum per part dels humans, dividida en les seves èpoques més importants i amb un índex a l'annex per exposar una petita biografia de cada científic (marcat en negreta) que hi aparegui.

- Identificar i exposar els mètodes utilitzats al llarg de la història per mesurar la velocitat de la llum.

Seguint un ordre cronològic, exposarem diferents mètodes que s'han dut a terme per mesurar la velocitat de la llum fins a arribar a la xifra que avui entenem per c^1 . De forma dinàmica i entenedora, explicarem diversos experiments que han dut a terme científics al llarg de la història per donar un valor a la velocitat que adopta la llum en un espai buit.

- Investigar el concepte actual de la velocitat de la llum.

A causa del canvi en la percepció de la ciència que es produeix al llarg del segle xx, sintetitzarem força informació sobre el sorgiment de la física quàntica i mirarem d'explicar els conceptes més bàsics i els que guarden més relació amb el tema central del nostre treball.

- Mesurar la velocitat de la llum utilitzant alguns dels experiments més rellevants fets durant la història i d'altres més actuals.

Tractarem, per últim, de descriure i realitzar alguns dels experiments que s'han fet al llarg de la història per mesurar la velocitat de la llum, i altres que puguem dur a terme amb els recursos dels quals disposem. Compararem els resultats i els respectius marges d'error per, finalment, relacionar-ho amb les limitacions que es tenien a cada època i les nostres pròpies.

¹ c : constant que fa referència al valor de la velocitat de la llum en el buit.

2. Partícules, ones i moviment harmònic

Abans d'entrar en el cos d'aquest treball, hem de saber que no ens podem llançar en una piscina sense haver tastat l'aigua prèviament. És per això que hem escrit aquest apartat, per familiaritzar el lector amb el curiós i admirable món de les partícules i les ones, de manera que els conceptes relacionats amb la llum que apareixeran posteriorment siguin molt més fàcils de comprendre.

2.1. Les partícules

Per començar, hem d'entendre què és una partícula exactament. La definició més general que es pot trobar en els llibres de text de física sobre una partícula és "una unitat extremadament petita de matèria a la qual li són atribuïdes qualitats com volum i densitat".

El que considerem partícula varia segons el context. En química es defineix un àtom com a partícula per estudiar, per exemple, el comportament d'un gas en un recipient tancat. D'altra banda, en astrofísica també es pot considerar una estrella de milers de quilòmetres de radi com una partícula per tal de determinar la moció que seguirà a l'espai.

Dintre del context d'aquest treball, prendrem la definició de partícula més comuna en la física i la que s'ha considerat durant la història per intentar explicar la llum, la d'un punt (microscòpic i sense forma).

La característica més important d'aquest model és que, en ser un punt, totes les forces se li apliquen de la mateixa manera (sempre en el centre) i tenen el mateix efecte, ja que no poden crear moment angular. La simplicitat d'aquest hipotètic cos el fa ideal per estudiar la dinàmica de qualsevol objecte, encara que els resultats no siguin completament acurats quan es fan experiments en la realitat.

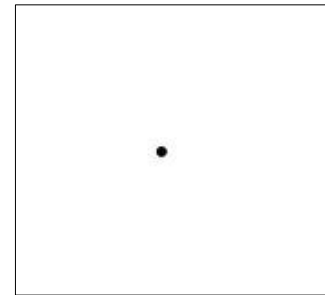


Figura 2.1. Partícula (perquè sigui visible a ull nu, en aquest dibuix se li ha donat una superfície i una forma rodona).

2.2. Les ones

Abans de definir el que és una ona, cal entendre que el seu comportament forma part del que es coneix com a moviment ondulatori. De totes les que hi ha, nosaltres ens centrarem en les ones harmòniques², les quals segueixen un moviment harmònic.

El moviment harmònic simple

El moviment harmònic simple és un moviment periòdic unidimensional de vaivé. És el resultat de projectar un moviment circular uniforme sobre un eix que passa pel centre de la circumferència i que està contingut en el pla que la defineix³. Per entendre això millor, proposem l'exemple més senzill d'aquest tipus de moviment: un objecte sostingut per una molla.

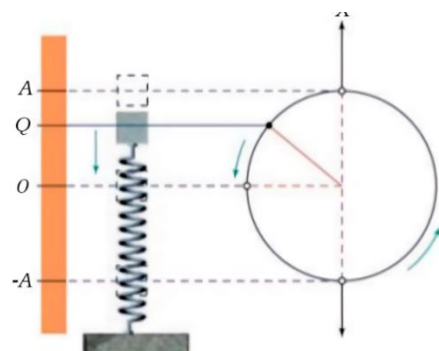


Figura 2.2. Representació gràfica de la relació entre el moviment d'un cos subjectat per una molla i el moviment circular uniforme.

² **Ona harmònica:** ona descrita per una funció sinus o cosinus.

³ Definició extreta del llibre de física de 2n de batxillerat, editorial McGrawHill.

En la figura 2.2 es pot observar que, quan l'objecte es troba en el punt més alt (A), és a dir, quan la molla té la seva màxima llargària, en la circumferència també es troba en el seu pic, mentre que quan la molla és més curta ($-A$), la posició en la circumferència és la més baixa. La distància entre qualsevol d'aquests dos punts i el centre de la circumferència (equivalent al radi de la circumferència) és el que s'anomena amplitud.

Quan es relaciona la posició de la molla amb el temps, en resulta la següent funció:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \delta)$$

- x : elongació o allargament de la molla
- t : temps
- A : amplitud o elongació màxima
- ω : pulsació
- δ : angle inicial

Així, derivant aquesta equació respecte del temps, podem obtenir també les equacions de la velocitat i l'acceleració en funció del temps. Aquestes equacions prenen la següent forma en un període del moviment (figura 2.3):

$$x(t) = A \sin(\omega t + \delta)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \delta)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t + \delta)$$

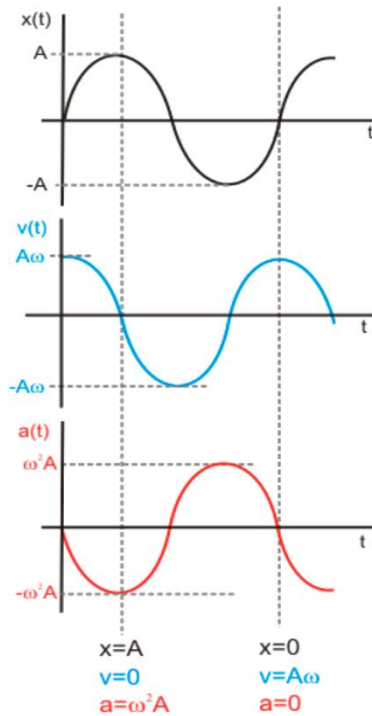


Figura 2.3. Gràfiques de la posició, la velocitat i l'acceleració d'una ona respecte del temps.

Definició d'una ona harmònica

Una ona és una pertorbació d'un camp que viatja per un medi d'un lloc a un altre, propagant-se des de cada punt fins a punts veïns. Una ona no està formada per matèria; està formada per energia que pren la forma de moviment del medi de propagació. En un medi físic, les partícules adjacents transfereixen tota la seva energia o una part de l'energia donada per l'ona. Perquè una ona es propagui per un medi físic, aquest ha de ser elàstic (parcial o totalment), ja que l'ona necessita deformar-lo per transmetre's. Per recuperar-se, la secció deformada del medi transmet l'energia a les partícules contigües.

Per una ona harmònica i bidimensional, aquesta és la fórmula que relaciona l'oscil·lació vertical amb el desplaçament horitzontal i el temps:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

y : posició vertical
 x : posició horitzontal
 t : temps
 A : amplitud
 ω : freqüència angular
 K : nombre d'ona

En aquesta fórmula, el signe negatiu s'utilitza quan l'ona es propaga allunyant-se del focus i positiu quan ho fa apropant-se.

A més a més, pren la següent forma gràficament (figura 2.4):

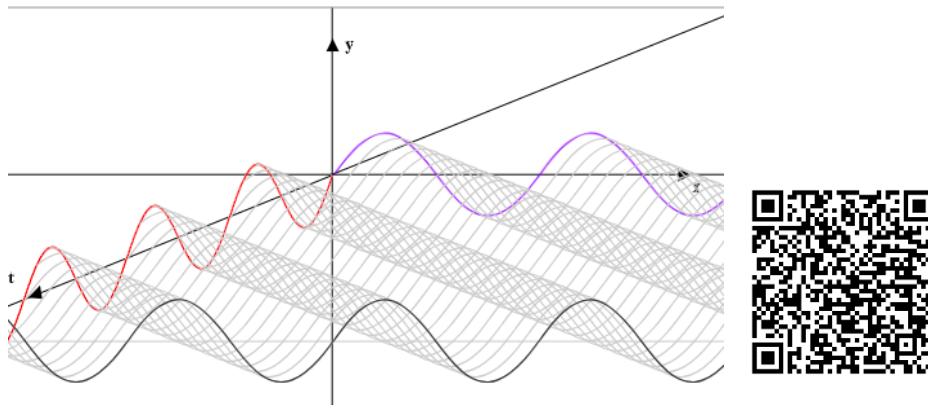


Figura 2.4. Representació de la posició vertical i horitzontal respecte del temps d'una ona bidimensional.

Propietats variables de les ones

Un cop definit el moviment harmònic simple, ja es pot entendre com aquest s'aplica al comportament de les ones i les seves propietats.

Amplitud (A):

L'amplitud d'ona és el desplaçament màxim que pot adquirir un punt de l'ona respecte de la posició d'equilibri, és a dir, la distància que hi ha entre el seu punt més alt (màxim) i el seu punt mitjà.

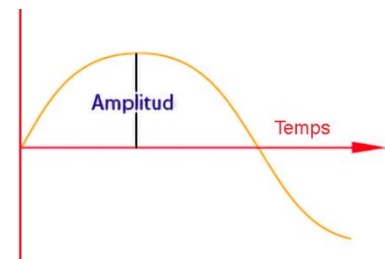


Figura 2.5. Representació gràfica de l'amplitud d'una ona.

Longitud d'ona (λ):

La longitud d'ona és la distància d'un cicle, és a dir, la mesura horitzontal entre dos màxims consecutius de la mateixa ona o la distància entre dos punts que estan en fase. També és aplicable als mínims i als punts intermedis.

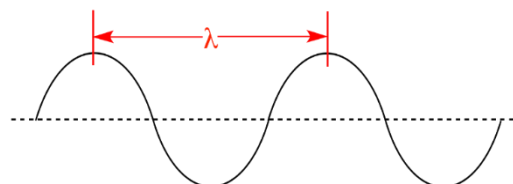
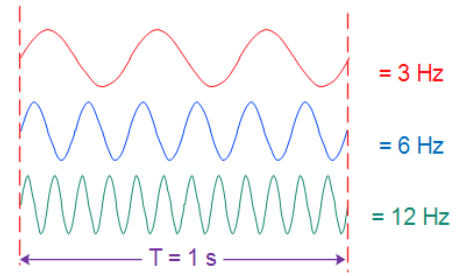


Figura 2.6. Representació gràfica de la longitud d'ona.

Freqüència (f):

La freqüència és el nombre de cicles que fa una ona en un segon. La unitat del SI per la freqüència és el Hertz (Hz), que equival a s^{-1} .



ona respecte del temps en diferents freqüències.

Període (T):

El període és el temps que triga una ona a desplaçar-se la distància equivalent a la seva longitud d'ona.

Totes aquestes propietats estan relacionades amb la següent fórmula, on v és la velocitat de fase:

$$\lambda = \frac{v}{f} = v \cdot T$$

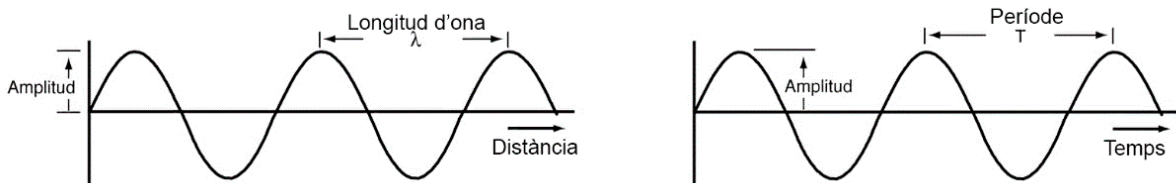


Figura 2.8. Esquema que mostra la posició vertical en una ona respecte de la distància i el temps.

Freqüència angular (ω):

La freqüència angular es correspon amb la velocitat angular del moviment circular. La gràfica de la posició d'aquest moviment coincideix amb la de l'ona, i es determina amb la fórmula:

$$\omega = 2\pi f$$

Velocitat de fase (v):

La velocitat de fase d'una ona és la velocitat amb què es transmet l'ona des del seu focus fins a un punt determinat del medi. La velocitat de fase es determina segons aquesta equació:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Nombre d'ona (k)

La relació entre la velocitat de fase i l'oscil·lació de l'ona s'anomena nombre d'ona (k), i és característic de cada ona:

$$k = \frac{\omega}{v}$$

Tipus d'ones

Segons el medi on es propaguen

- **Ones mecàniques:** són les que necessiten un medi elàstic (sigui sòlid, líquid o gasós) per propagar-se i no presenten cap desplaçament de matèria, només d'energia. Així, cada molècula del medi transmet la seva vibració a les molècules més properes, provocant un moviment en cadena. Un clar exemple és l'acció de sacsejar una corda, on es pot distingir la forma de les ones al llarg d'aquesta. Hi ha tres tipus d'ones mecàniques:
 - Les ones elàstiques: són pertorbacions degudes a la tensió que produeix l'energia quan recorre un medi elàstic, com les ones sísmiques dels terratrèmols.
 - Les ones sonores: són pertorbacions degudes a la transmissió d'energia sonora mitjançant ones longitudinals, i es transmeten en forma d'ones esfèriques periòdiques. Quan arriben a l'oïda humana, les anomenem so. Mecànicament es consideren ones elàstiques.
 - Les ones de gravetat (no confondre amb ones gravitacionals): són pertorbacions que es mouen per medis fluids sotmesos a la força de la gravetat. Quan la gravetat deforma un fluid i aquest deixa d'estar en el seu estat d'equilibri inicial, com a resposta el fluid forma ones d'energia que el fan retornar al seu estat d'equilibri. Les ones que es generen en un llac en tirar-hi una pedra, per exemple, són degudes a aquest tipus d'ones.
- **Ones electromagnètiques:** són la combinació d'ones elèctriques i ones magnètiques oscil·lants, de manera que transporten energia en un camp tridimensional i a la velocitat de la llum (299 792 458 m/s en el buit). La radiació electromagnètica no necessita cap medi per propagar-se, pot viatjar a través del buit. La llum és l'exemple més representatiu d'aquest tipus d'ones i serà l'objecte d'estudi d'aquest treball.
- **Ones gravitacionals:** són les deformacions en la curvatura de l'espai-temps que es propaguen a la velocitat de la llum i que són produïdes per l'acceleració d'objectes massius. Aquestes ones són emeses quan diversos cossos graviten entre si.

Segons la seva direcció

- **Ones unidimensionals:** són ones que es transmeten sobre medis d'una sola dimensió, com poden ser les molles.
- **Ones bidimensionals:** són ones que es propaguen sobre superfícies o medis plans, en qualsevol de les seves direccions, com les onades que forma una pedra quan és llençada a l'aigua.
- **Ones tridimensionals:** són ones que viatgen en espais o medis de tres dimensions. També s'anomenen esfèriques perquè els seus fronts d'ona (punts del medi on arriba una ona en un determinat instant) són esferes concèntriques amb origen comú i que s'expandeixen en totes direccions. Les ones sonores i les electromagnètiques són exemples d'ones tridimensionals.

Segons el moviment de les seves partícules

- Ones longitudinals: són les ones que es desplacen en la mateixa direcció en què ho fan les partícules del medi, independentment del sentit; com la propagació d'una ona de pressió causada per un pistó dins d'un èmbol.
- Ones transversals: són les ones que es caracteritzen perquè les partícules del medi es mouen perpendicularment a la direcció de l'ona. L'exemple d'un fuet agitat mostra aquest moviment oscil·lant.

Segons la seva periodicitat

- Ones periòdiques o harmòniques: l'origen de l'ona emet energia a intervals regulars. Les funcions sinusoidals representen els cicles repetitius d'aquest tipus d'ones.
- Ones no periòdiques: contràriament a les anteriors, aquestes ones no formen cicles regulars i, per tant, no tenen període. Una pilota botant contra el terra en seria un exemple, ja que la mida del bot seria cada cop menor degut a factors com la fricció amb el terra, la gravetat i els materials que hi intervenen.

Alguns fenòmens ondulatoris

Reflexió

És el canvi de direcció que efectua una ona quan entra en contacte amb una superfície que limita dos medis diferents (superfície reflectora). Com es pot observar en la figura 2.9, l'angle d'incidència i l'angle de reflexió són idèntics respecte de l'eix normal.

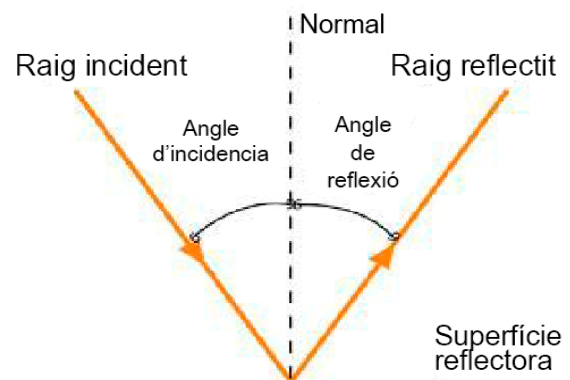


Figura 2.9. Esquema de la reflexió d'un raig sobre una superfície reflectora.

Refracció

És el canvi en la direcció i la velocitat d'una ona quan aquesta passa d'un medi a un altre amb un índex de refracció diferent.

S'anomena angle límit aquell amb què s'aconsegueix una refracció total, és a dir, quan el raig refractat passa a ser reflectit perquè surt del medi de refracció, és a dir, té lloc quan l'angle és de 90° .

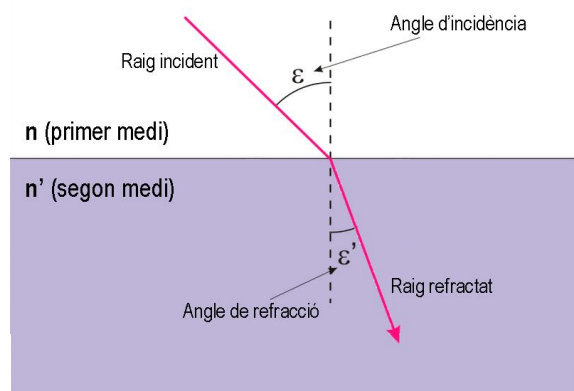


Figura 2.10. Esquema de la refracció d'un raig que passa d'un medi amb índex de refracció n a n' .

Difracció

És el fenomen que succeeix quan una ona incideix en un obstacle i canvia la seva trajectòria en actuar el punt d'incidència de l'obstacle com a nova font de l'ona.

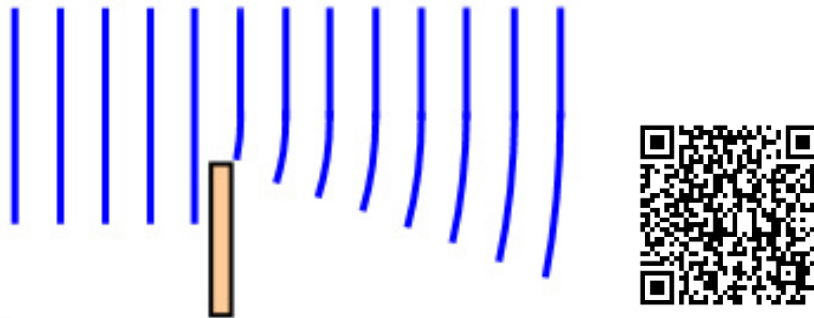


Figura 2.11. Esquema de la difracció de les ones quan xoquen amb obstacles en el medi.

Superposició i interferència

És el que s'esdevé quan diverses ones que viatgen pel mateix medi interfereixen entre elles. L'ona resultant és l'addició de les participants: cada punt en l'eix y de l'ona resultant és la suma aritmètica dels punts en l'eix x de les ones incidents.

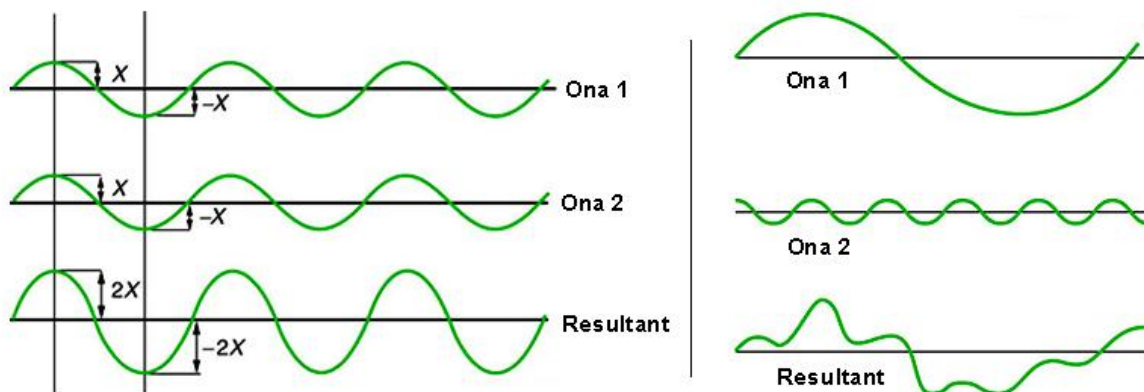


Figura 2.12. Esquemes de la interferència entre dues ones i la seva resultant.



3. Cronologia de l'estudi de la llum

Fa més de dos milions d'anys que l'ésser humà va obrir els ulls. Tot el que va veure, enlluernat, va ser gràcies a la llum, i la va adorar com a font de la vida. Des d'aquells primers temps, la llum ha acompanyat la nostra existència i la de tot el nostre Univers, i l'aparent incapacitat dels nostres cervells de concebre'n una explicació ha estat motiu per a moltes cultures antigues d'entendre el Sol com un déu totpoderós, font de vida i energia necessària per al funcionament del món. Fins al descobriment del foc, la llum solar era l'única font coneguda per il·luminar la vida dels humans, l'única referència temporal que definia el seu ritme de vida al llarg del dia i les estacions. La seva importància abasta tants àmbits que la majoria dels sistemes religiosos identifiquen la llum amb Déu o amb l'ànima. De fet, dintre de moltes llegendes i relats fantàstics hi ha sempre un raig de llum o un esdeveniment marcat per un ens lluminós i, fins i tot a moltes cultures, la mort és representada per un camí al final del qual hi ha una llum que marca la vida després de la mort.

En l'antiguitat, l'ésser humà percebia la llum com un fenomen sobrenatural i fins i tot sagrat, i no com quelcom físic que pogués ser explicat per lleis científiques. Sigui per la seva naturalesa encisadora o per la forta dependència que la nostra delicada existència mostra envers ella, les ments més brillants de la nostra història han dedicat anys a l'estudi d'aquesta meravella que ens envolta, així com de les seves propietats.

Avui en dia tenim una gran quantitat d'informació gràcies als nombrosos errors comesos per científics al llarg de la història que, finalment, ens han portat a l'encert. Ara sabem que allò que anomenem "llum" és un feix de fotons amb un comportament ondulatori i que adopta innumbrables propietats, però, per arribar a aquesta certesa, van haver de passar milers d'anys.

Des d'inversemblants rajos disparats pels nostres ulls fins a incerteses subatòmiques dignes de la més futurista pel·lícula de ciència-ficció, tal és el recorregut que farem al llarg d'aquesta part del treball que presentem. Així doncs, us convidem a seguir, pas per pas, alguns avenços i descobriments que van tenir lloc al llarg de la història i que van servir de base per al que avui entenem com a llum.



Figura 3.1. Aten, déu del Sol, i Ra, déu del Sol, el cel i l'origen de la vida, segons la mitologia egípcia.

3.1. Edat antiga: primeres observacions de la llum

Per entendre tot el que sabem actualment sobre la llum, ens hem de remuntar als inicis de la ciència, quan abans d'anomenar-se així es coneixia com a filosofia. En aquells temps, eren els filòsofs els que s'encarregaven de donar resposta als fenòmens de la natura que la gent creia inexplicables, basant-se en la raó i l'observació. Tanmateix, a falta del mètode científic per confirmar o refutar les seves afirmacions, donaven lloc a teories que avui dia considerem obsoletes.

La filosofia de la visió

Les primeres observacions en el camp de l'òptica de les que tenim constància daten de l'antiga Grècia, d'aquella rica civilització que va establir els fonaments en molts dels camps de la ciència i la cultura actual. Va ser a mitjans del segle V abans de Crist quan un filòsof anomenat **Empèdocles d'Akragas** va proposar que l'ull era una creació de la deessa Afrodita. Ella havia dotat els humans d'aquest òrgan perquè poguéssim percebre la bellesa del món que ens envolta.

Però, com va poder crear l'ull humà? Segons Empèdocles, la deessa va unir els quatre elements fonamentals de la natura (aigua, terra, aire i foc) per tal de formar-lo, i va fer que, a més a més, irradiés foc. Segons la seva teoria, aquest foc incideix en tots els objectes que veiem, donant lloc al sentit de la vista. Aquesta idea va ser molt acceptada durant la seva època. De fet, va ser tan important que, durant els posteriors segles, es va sostenir que la visió estava basada en raigs emesos per l'ull, fins que va ser demostrat el contrari.



Figura 3.2. Foc, aigua, aire i terra, els quatre elements segons Empèdocles.



Figura 3.3. En l'Edat Antiga es pensava que la visió estava basada en raigs emesos per l'ull.

Un segle més tard, el reconegut filòsof **Aristòtil** va proposar la primera explicació del fenomen de l'arc de Sant Martí de la que tenim constància. En l'obra *Meteorològics* exposa la seva concepció d'una "esfera meteorològica" on s'esdevenen fenòmens com l'arc de Sant Martí, causat per la posició geomètrica de tres elements (figura 3.4): la font de llum (S), l'observador (O) i els núvols (C).

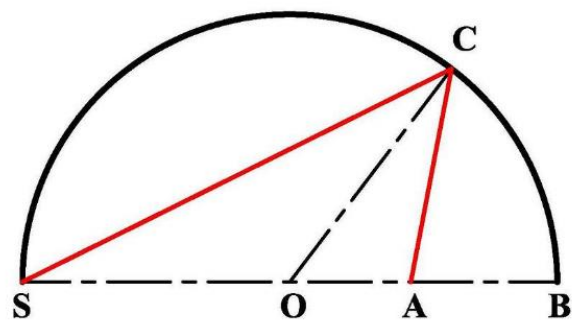


Figura 3.4. La línia vermella representa la llum del Sol reflectida en els núvols, de manera que es produeix el fenomen de l'arc de Sant Martí.



Figura 3.5. Fotografia d'un arc de Sant Martí primari i un de secundari.

Avui dia sabem que no és així, i una de les raons que fan impossible aquesta teoria és la falta d'una explicació per l'arc de Sant Martí secundari, el qual apareix de vegades, segons la llum que hi hagi. No obstant això, aquest va ser un inici prou encertat i interessant per impulsar els posteriors científics a investigar l'origen d'aquest fenomen.

Per Aristòtil, la llum era una espècie de pertorbació de l'aire, una presència que inundava l'espai i que, quan arribava als nostres ulls, transmetia la informació a través dels vasos sanguinis fins al cor, el qual desxifrava els senyals i distingia els diferents colors. En la seva obra

Problemes exposa els diferents resultats que va obtenir realitzant un experiment per observar el comportament de la llum. Aquest experiment consisteix a fer un forat en una cambra totalment fosca per on passa un raig de llum. Dient-lo a terme, Aristòtil concloué que, independentment de la forma del forat de la paret, la projecció dins de la cambra sempre és circular. A més, va descobrir que, com més allunyava el forat de la imatge projectada, més gran era aquesta. Més tard, va experimentar amb imatges projectades a través d'aquest forat i va descobrir que s'invertien. Això s'esdevé a causa del fenomen de difracció i la naturalesa de propagació rectilínia de la llum.

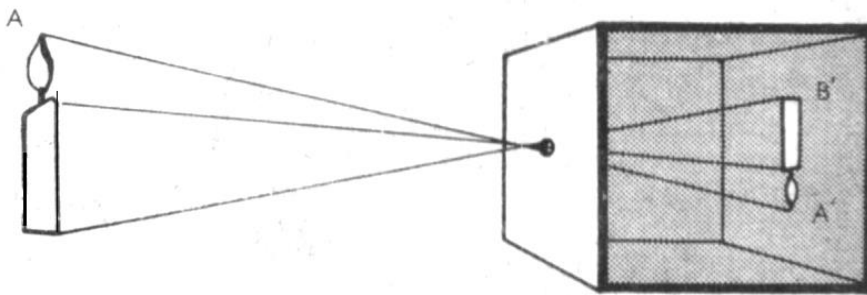


Figura 3.6. Representació esquemàtica de la cambra fosca d'Aristòtil.



A Aristòtil també se li atribueixen les primeres contribucions a l'estudi dels defectes de la visió deguts al cristal·lí, com són la miopia i la hipermetropia.

Geometria i llum

Dos-cents anys després que haguessin sigut formulades les primeres teories sobre la llum i la visió, va aparèixer un home anomenat **Euclides d'Alexandria**, el qual va recollir els seus estudis en el llibre *Òptica*. Euclides va ser el primer a introduir les matemàtiques a l'estudi de la visió i la perspectiva que, fins llavors, havia sigut estudiada des d'un punt de vista filosòfic. En *Òptica*, Euclides proposa que l'ull emet "raigs visuals". Això ens recorda la teoria d'Empèdocles, però Euclides la va refer amb els seus coneixements geomètrics i, mitjançant un sistema de línies rectes, va crear una sèrie de postulats sobre la perspectiva.

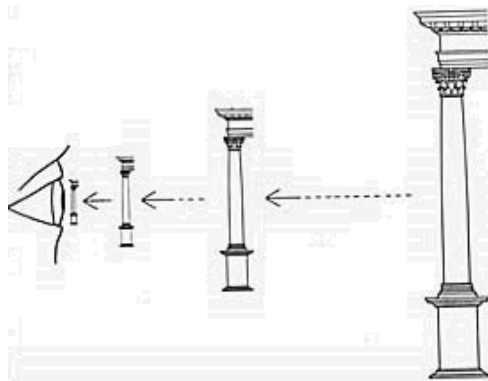


Figura 3.7. Òptica segons Euclides. El cos observat manté les seves proporcions, però arriba als nostres ulls amb una mida reduïda en funció de la distància a la que es troba.

Postulats d'Euclides

- Els raigs que sorgeixen de l'ull divergeixen infinitament, és a dir, se separen entre ells i mai no se superposen.
- Una figura continguda en un conjunt de "raigs visuals" és un con, on l'ull és el vèrtex i la base és la superfície de l'objecte en qüestió.
- El que és vist és perquè hi incideixen els raigs visuals i el que no és vist és perquè no hi incideixen.
- La grandària aparent d'un objecte depèn de manera directament proporcional a l'angle amb el qual és observat.
- La percepció de l'alçada d'un subjecte té relació amb l'alçada de l'angle amb què és observat.
- La percepció de la posició horitzontal d'un objecte té relació amb la posició horitzontal de l'angle amb què és observat.
- Els objectes vistos amb major nombre d'angles es veuen amb major claredat.

Euclides també va estudiar el fenomen de la reflexió de la llum amb l'ús de les matemàtiques, tal com veiem en el seu llibre *Catòptrica*. Va aplicar la posteriorment anomenada "geometria euclidiana", que prèviament havia definit en el seu llibre *Elements*, per explicar el comportament dels "raigs visuals" quan incideixen en objectes reflectants o miralls.

Euclides va observar que hi ha determinats cossos que no tenen una imatge pròpia, sinó que mostren la imatge d'allò que es troba davant seu (com un mirall, per exemple). No obstant això, aquesta imatge no és aleatòria, i es veu afectada pels mateixos postulats que va definir en *Òptica*. Va determinar que el que succeïa era que els raigs emesos pels ulls reboten en aquestes superfícies i incideixen en els cossos que es troben en el seu nou camí. Amb l'ajuda de la geometria, va determinar la direcció dels raigs que surten reflectits dels miralls i el seu efecte en la perspectiva.

Segons Euclides (figura 3.9), quan un ull (B) emet un raig (BK) i aquest incideix en un mirall pla (AG) amb un determinat angle (Z), el raig reflectit (DK) formarà el mateix angle d'incidència amb el mirall (E) en direcció cap a un nou punt (D).

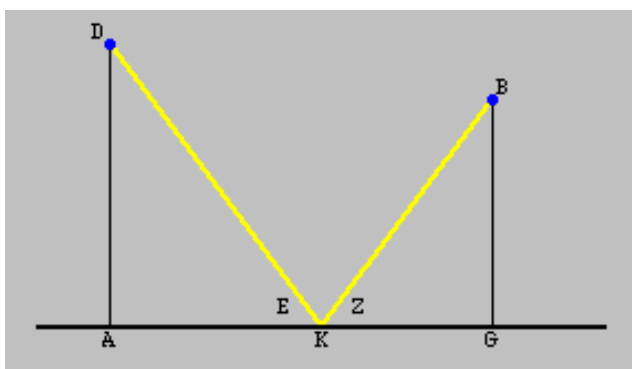


Figura 3.9. Representació esquemàtica del fenomen de reflexió segons Euclides.



Figura 3.8. Llum incidint en un mirall.



Tot i que Euclides va estudiar la llum com si es tractés d'uns raigs originats per l'ull, això no va afectar la validesa del seu treball sobre els fenòmens de reflexió i refracció.

Més tard, apareix **Heró d'Alexandria**, qui deriva la fórmula de reflexió, definint així el principi del camí més curt. Segons Heró, per anar d'un punt a un altre, la llum sempre segueix el camí més curt en distància. La teoria d'Heró de la menor distància és substituïda més de 1500 anys després per Pierre de Fermat, amb la teoria que la llum segueix el camí que necessita menys temps per recórrer.

Una altra figura important d'aquesta època és **Claudi Ptolemeu**. Ptolemeu escriu *Òptica*, llibre en el qual discuteix la teoria de la visió, reflexió, refracció i diverses il·lusions òptiques. Igual que Euclides, proposa que els ulls emeten raigs visuals cap als objectes per tal de tenir una visió d'aquests. No obstant això, diu que, en comptes de rajos rectes, els ulls emeten un raig de forma cònica contínuament. També fa diversos experiments sobre refracció i conclou que, quan la llum es propaga d'un medi a un altre, l'angle de refracció és constant i depèn de les propietats d'aquests medis.

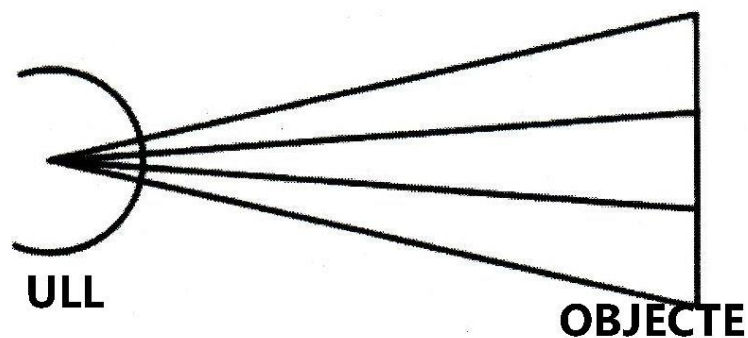


Figura 3.10. Teoria de la visió de Ptolemeu.

D'altres pensadors com **Plató**, **Pitàgores de Samos** o **Luci Anneu Sèneca** van fer petites aportacions esporàdiques a l'estudi de la llum, les quals van establir una base fonamental per a l'evolució de l'òptica al llarg de la història. Per exemple, el filòsof i matemàtic **Demòcrit d'Abdera** va ser el primer a proposar una teoria corpuscular una mica rudimentària, juntament amb la primera teoria de l'àtom i la composició de la matèria.

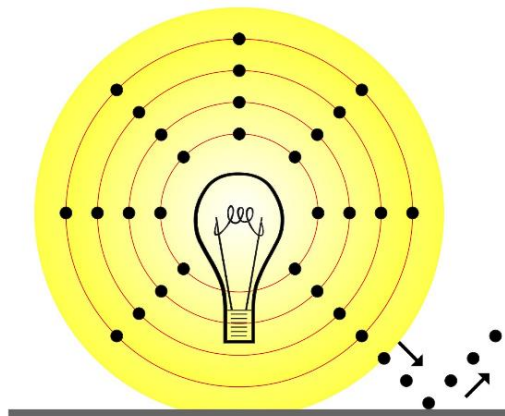


Figura 3.11. La teoria corpuscular sosté que la llum està formada per petites partícules anomenades corpuscles.

3.2. Edat mitjana: les contribucions de la civilització islàmica a l'òptica

Durant l'edat mitjana, la civilització islàmica es trobava en un moment de gran esplendor. L'expansió territorial i la creació d'un imperi fort i unit van permetre un important desenvolupament del coneixement i la cultura. Això va portar als primers científics de la història a fer ús del mètode experimental en àmbits com l'òptica.

El matemàtic i físic **Alhazen** és considerat un dels pioners del mètode científic actual, ja que es basava en l'experimentació, en comptes de simplement creure el que deien els altres. També fou el primer a rebutjar la teoria de la visió del moment. A diferència d'Euclides i la resta de científics anteriors, Alhazen creia que els éssers humans tenim l'habilitat de veure objectes gràcies a rajos de llum rectilinis que provenen dels mateixos objectes, els quals actuen com a fonts secundàries de llum, i no dels nostres ulls. Afirmava que el sentit de la vista es deu a les línies rectes que viatgen des de l'objecte que estem mirant fins als nostres ulls.



Figura 3.12. Detall d'una miniatura del segle XVI que mostra astrònoms àrabs de l'Observatori de Galata.

Postulats d'Alhazen

- Si la llum prové dels nostres ulls, hauríem de ser capaços de veure-hi en un lloc fosc.
- No podem mirar directament cap a fonts de llum com el Sol.
- Si entra llum en una sala fosca a través d'un forat, només podem veure la secció il·luminada.
- Quan mirem cap al cel, podem veure les estrelles immediatament. Si la llum sortís dels nostres ulls, hauríem d'esperar que aquesta arribés fins als estels.

Altrament, va fer diverses proves amb la cambra fosca (aquella que Aristòtil havia utilitzat per al seu experiment), i explica que l'ull funciona de manera similar a aquesta, com es pot observar en les figures 3.13 i 3.14. Alhazen va fer grans estudis sobre l'anatomia ocular.

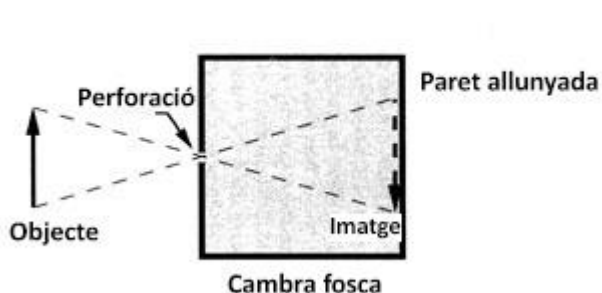


Figura 3.13. Representació gràfica de la cambra fosca d'Alhazen.

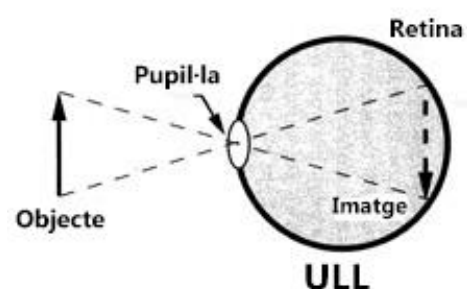


Figura 3.14. Òptica segons Alhazen: els objectes emeten llum que arriba als nostres ulls de manera que els puguem veure.



Alhazen no inventa el telescopi, però explica com les lents poden magnificar una imatge. Conclou que aquesta magnificació es dona en la mateixa superfície de la lent i no gràcies a quelcom de dintre d'aquestes lents.

A Alhazen se li atribueix també un nou estudi sobre l'arc de Sant Martí, publicat a l'article *Maqala fi al-Hala wa qaws qazah*. En aquest dona una explicació geomètrica semblant a la d'Aristòtil, incloent-hi el fet que la llum es reflecteix en uns núvols que són còncaus i amb una superfície reflectant. Aquesta explicació la van reprendre anys més tard els seus successors **Averrois**, **Al-Qarafi**, **Nasir al-Din al-Tusi** i **Qutb-ad-Din Xirazi** en les seves investigacions.

A partir de la teoria d'Alhazen, un científic siri, **Taqi al-Din Muhammad ibn Ma'ruf ash-Shami al-Asadi**, dona finalment l'explicació correcta sobre la visió: la llum és reflectida d'una font de llum en un objecte i cap a l'ull.

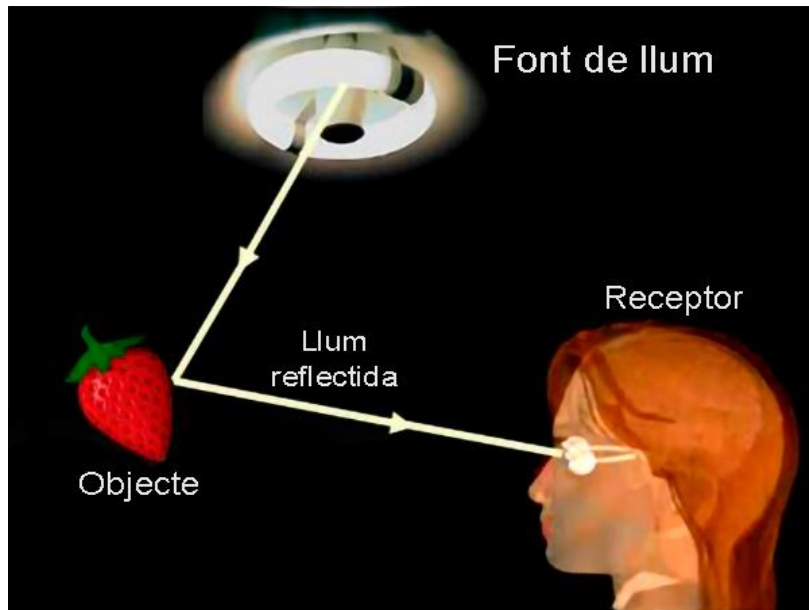


Figura 3.15. La visió segons Taqi al-Din .

Com a llegat d'Alhazen apareix **Kamal Al-Din Al-Farisi**, un dels seus alumnes, el qual va escriure llibres com *Tanqih al-Manazir*, on comentava l'obra i els descobriments del seu mestre. Al-Farisi estudia el focus dels diferents tipus de lents (punt on convergeixen els feixos de llum), així com les desviacions dels rajos de llum en canviar de medi (estableix la base pel principi de refracció de Snell, reconegut mundialment un mil·lenni més tard).

3.3. Edat moderna: revolució científica

Des de les aportacions d'Alhazen i els seus seguidors, va haver-hi un llarg període d'escàs progrés pel que fa a la investigació de la llum i la ciència en general. Això canvia amb l'arribada de **Nicolau Copèrnic**, qui, en 1543, publica la primera teoria heliocèntrica⁴ en el seu llibre *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Aquesta aportació va suposar l'inici d'una etapa que posteriorment es coneixeria com a revolució científica, un període de gran prosperitat en l'àmbit del coneixement humà.

Apropant-nos a l'espai

Un dels primers científics que trobem en aquesta revolució és **Galileu Galilei**. Basant-se en el primer disseny del telescopi de **Hans Lippershey**, en construeix una versió millorada l'any 1609, esdevenint així el primer ésser humà en observar l'espai amb una claredat inaccessible fins al moment. Tot i el primitiu disseny d'aquest telescopi, Galileu va ser capaç d'observar els cràters de la Lluna i els satèl·lits de Júpiter fins a 20 augments. Va ser durant aquestes observacions de l'espai quan va recollir suficients proves per a poder donar suport a la teoria heliocèntrica, que havia sorgit el segle anterior. A causa d'això, va haver de fer front a la Santa Inquisició i va mantenir una llarga disputa amb l'Església, que sostenia la teoria geocèntrica⁵.

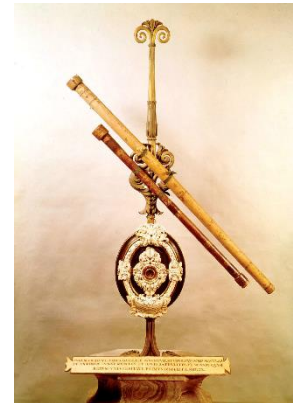


Figura 3.16. El telescopi de Galileu.

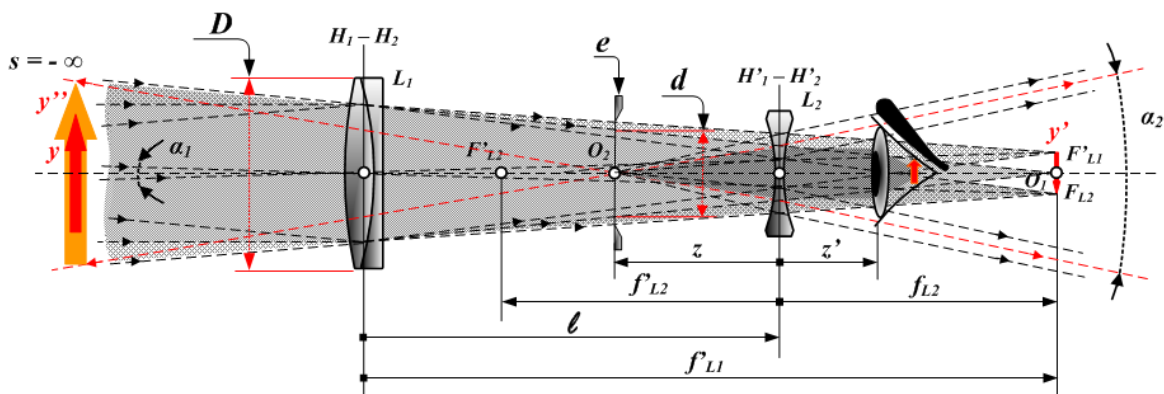


Figura 3.17. Esquema dels angles i les distàncies relatives en el telescopi de Galileu.

Més enllà de l'astronomia, la investigació de Galileu va abastar camps com el del moviment ondulatori (al que més tard s'associaria la llum) i l'estudi dels pèndols. Els seus dissenys d'un primer pulsòmetre relacionen la longitud del pèndol amb la periodicitat d'un moviment harmònic.



Figura 3.18. El pèndol de Galileu.

⁴ **Teoria heliocèntrica:** proposada per primer cop per Nicolau Copèrnic en 1543, és un model astronòmic segons el qual el Sol està situat en el centre de l'univers i els astres orbiten al seu voltant.

⁵ **Teoria geocèntrica:** model cosmològic que situa la Terra en el centre de l'univers, proposat per Ptolomeu. Fou el primer model astronòmic, sostingut durant milers d'anys fins a l'aparició del molt més acurat model heliocèntric.

Només dos anys després de l'aparició del primer telescopi, **Johannes Kepler**, en 1611, inventa l'anomenat telescopi refractant, una millora del disseny de Galileu, en què la utilització de lents convergents⁶ permet una ampliació del camp de visió i una imatge més detallada, tot i que aquesta es troba invertida. Aquest nou disseny es basava en els seus estudis sobre els fenòmens de refracció que succeeixen a l'atmosfera durant els eclipsis i durant la sortida i la posta de Sol recollits en el seu llibre *Astronomiae Pars Optica*, escrit l'any 1604.

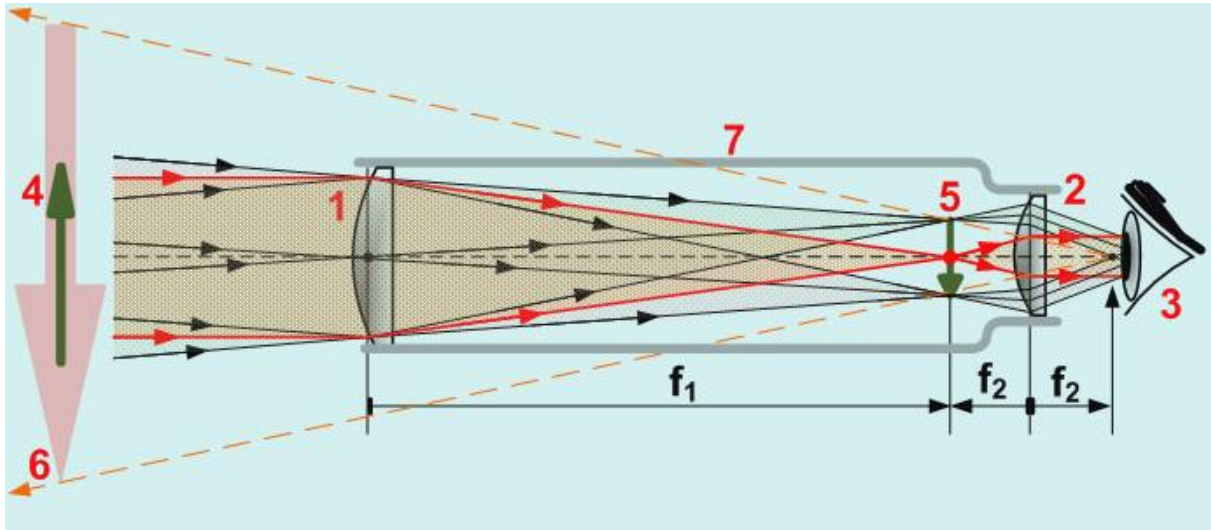


Figura 3.19. Esquema del telescopi refractant de Kepler.

A més a més, Kepler va dedicar gran part de la seva vida a l'estudi de l'anatomia, amb especial interès en l'ull humà. Va fer descobriments essencials com el fet que les imatges es projecten invertides a la retina, raonant que el cervell les capgirava gràcies a l'activitat de l'ànima. També va donar una explicació lògica a l'ús de lents correctores i ulleres, ja que la gent les utilitzava sense saber per què funcionaven.

Anys més tard, apareix **Isaac Newton** amb un innovador disseny de telescopi. Tots els telescopis fins llavors eren refractants. Aquests, a causa de les propietats en què es basen per funcionar, tenen diverses imperfeccions que provoquen el que s'anomena aberració cromàtica⁷. És per això que Newton decideix fabricar un nou tipus de telescopi utilitzant un mirall reflectant, disseny del qual en deriven els telescopis actuals. En aquest telescopi, la llum és reflectida per un mirall còncau (primari) en un mirall pla (secundari) que reflecteix la llum cap a l'ull de l'observador.

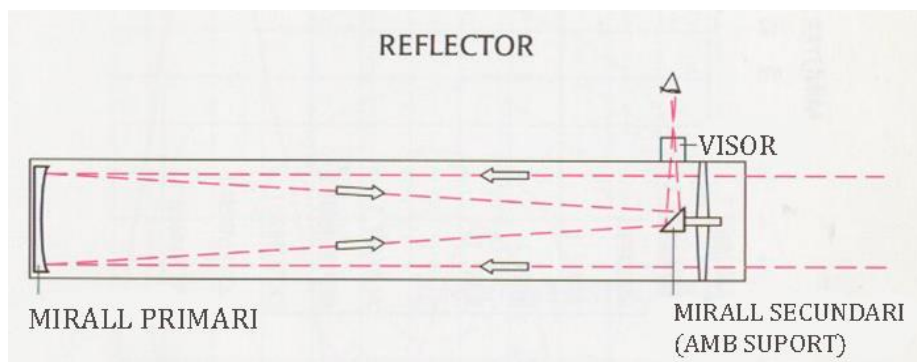


Figura 3.20. Esquema del telescopi reflectant de Newton.

⁶ **Lents convergents:** tipus de lents més amples en el centre que els extrems. La forma convexa serveix per concentrar tots els rajos de llum que arriben a la lent en un mateix punt anomenat focus.

⁷ **Aberració cromàtica:** fenomen causat per un defecte o deformació en una lent o sistema de lents. Té lloc quan totes les ones amb diferent longitud d'un raig no són enfocades en un mateix punt (focus), produint una distorsió cromàtica en la imatge.

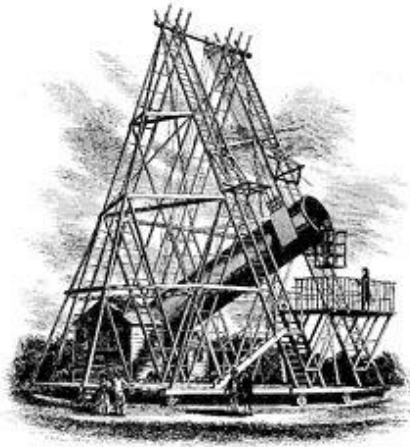


Figura 3.21. Telescopi de William Herschel.

El telescopi de Newton és utilitzat durant molt temps, fins que **William Herschel**, en 1773, en millora el disseny. En el nou telescopi, Herschel va eliminar el mirall diagonal utilitzat per veure-hi des d'un costat de l'aparell. A més a més, els va fer a una escala més gran, la qual cosa el va portar a la construcció de nous miralls més grans i simètrics. Fer aquests miralls va comportar molta feina per al científic germano-britànic, ja que els volia de mides que no eren habituals i, a més, requerien un alt grau de polidesa perquè la imatge estigués enfocada.



De tots els telescopis que va fabricar Herschel, va vendre alguns exemplars a reis, ja que eren contemplats com articles de luxe.

La llum viatja a una velocitat finita

En 1638, Galileu ja havia intentat mesurar la velocitat de la llum per primer cop en la història registrada. Si bé anteriorment se sostenia que la llum es propagava instantàniament, Galileu estava convençut que no, i va dur a terme un experiment per demostrar-ho. Amb ajuda del seu assistent, va disposar dues làmpades cobertes amb una tela a diferents turons.

Seguint l'esquema de la figura 3.22, primer l'observador *A* destapa la seva làmpada, i quan l'observador *B* rep aquesta llum, en destapava la seva. Així, quan *A* rep la llum de *B*, pot concloure que la llum ha recorregut dos cops la distància entre els dos turons en un temps determinat.



Figura 3.22. Esquema de l'experiment de Galileu per determinar la velocitat de la llum.

D'aquesta manera, Galileu va afirmar que la llum viatjava a certa velocitat (que més tard va definir com "unes 10 vegades major que la del so"), ja que, si la seva propagació hagués estat instantània, no hi hauria hagut espai de temps entre que *A* descobrís la làmpada i rebés la llum de *B*. Cal mencionar que la imprecisió d'aquesta experiència el fa poc fiable, i destacar que la seva importància no rau en la demostració que la velocitat de la llum és finita, sinó en el seu paper com a desencadenant dels futurs experiments per determinar-la.

No és fins a l'any 1676 que la velocitat de la llum adopta un valor per primer cop gràcies a **Ole Christensen Rømer**, qui li dona el valor de 225 000 km/s amb un 25% d'error respecte de la velocitat real. Rømer es dedicava a observar Io (una lluna de Júpiter), i va adonar-se que les seves aparicions no quadraven amb les seves prediccions, de manera que hi hauria d'haver una inconsistència en l'òrbita d'Io. Va estudiar l'aparició d'aquesta lluna durant tot l'any i va veure que, depenent de la distància entre Júpiter i la Terra (la qual canvia constantment degut a les òrbites obliqües dels planetes), Io apareix abans o després del temps previst. Va teoritzar que això podia esdevenir-se a causa del retard provocat pel temps que triga la llum d'Io en arribar a la Terra.

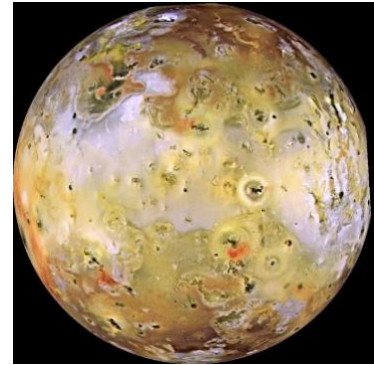


Figura 3.23. La lluna de Júpiter Io.

La hipòtesi de Rømer és la següent, seguint la figura 3.24:

Quan la Terra es troba al punt A, es pot veure l'aparició del satèl·lit sortint de l'òrbita de Júpiter al punt C. Sabem que el període orbital d'Io és de 42,5 hores. Si observem el mateix des del punt B i suposem que la propagació de la llum no és instantània, hi ha d'haver un retard respecte de l'hora exacta a la qual veiem aparèixer Io de l'ombra des del punt A. Si calculem la diferència en segons i coneixem la distància entre A i B, podem mesurar la velocitat de la llum.

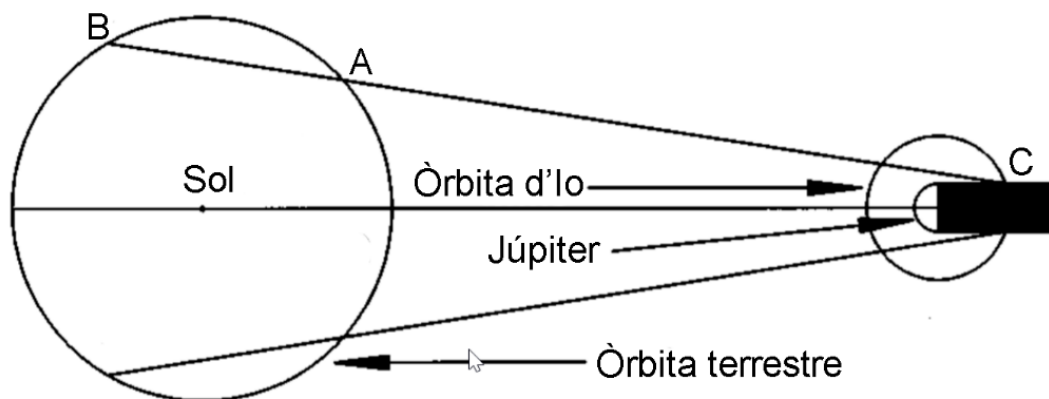


Figura 3.24. Representació esquemàtica de les observacions de Rømer.



Figura 3.25. Júpiter i el seu satèl·lit Io.

Tanmateix, hem de deixar clar que això és una descripció simplificada de la teoria de Rømer, ja que no té en compte el moviment de Júpiter ni el canvi d'orientació en l'ombra projectada. Malgrat això, la diferència provocada es pot negligir i es pot dur a terme l'experiment sense necessitat d'aquests càlculs que aporten una major precisió i exactitud.



Rømer també va inventar una nova escala de temperatura (actualment en desús) on el zero és el punt de congelació de la salmorra.

El segle següent apareix l'astrònom anglès **James Bradley**, descobridor (l'any 1725) de l'aberració de la llum estel·lar; la diferència entre la posició que observem d'una estrella des de la Terra respecte de la seva posició real. Aquest efecte s'esdevé a causa de la diferència entre la velocitat de l'observador (moviment orbital de la Terra) i la velocitat finita de la llum.

Si observem les estrelles amb un telescopi, aquest ha d'estar lleugerament inclinat. Si coneixem la inclinació del telescopi respecte de l'eix horitzontal (l'angle θ en la figura 3.26), podem conèixer la relació entre la velocitat de la Terra i la de la llum. Amb aquesta informació, Bradley va concloure que la llum tarda 16 minuts i 26 segons en travessar l'òrbita terrestre. Amb tot això, va donar un valor de 283 000 km/s a la velocitat de la llum, un valor més encertat que el que havia proposat Rømer anteriorment.

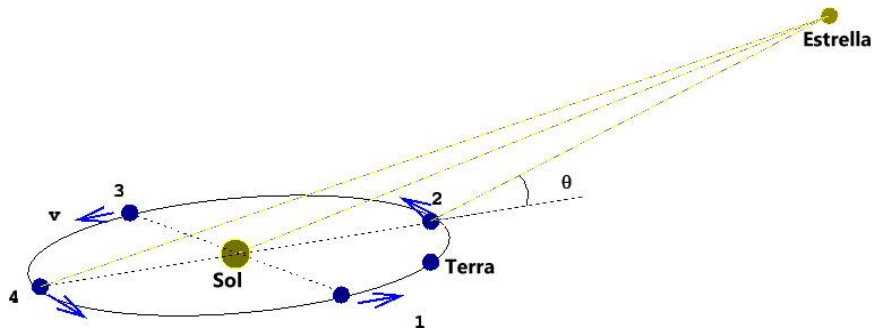


Figura 3.26. Esquema de l'aberració estel·lar.

El misteri de la refracció

Willebrord Snell van Royen, o simplement Snell, va ser el descobridor de la llei que porta el seu nom i que serveix per relacionar l'angle d'incidència i de refracció d'un raig de llum quan canvia de medi. Aquesta teoria la va publicar en 1621, 16 anys abans que **René Descartes** publicés aquesta mateixa llei en *Diòptrica*, a la qual, segons Huygens, havia arribat de forma independent i Snell s'havia avançat en la publicació.

La llei de Snell (figura 3.27) es basa en la fórmula:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

θ_1 : angle entre el raig incident i l'eix normal.

θ_2 : angle entre el raig refractat i l'eix normal.

n : índex de refracció de cada medi, determinat amb la següent expressió:

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

c : la velocitat de la llum en el buit.

v : la velocitat de la llum a través d'aquest medi.

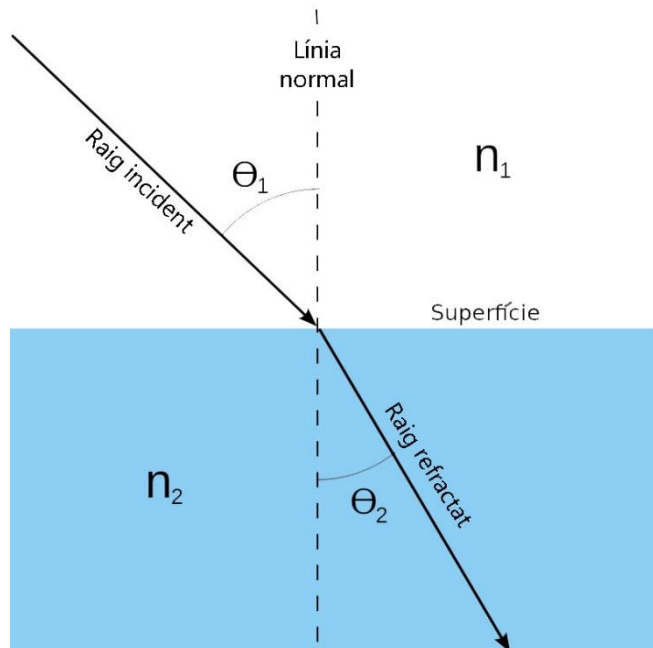


Figura 3.27. Representació esquemàtica del fenomen de refracció.

Aquesta llei ens ajuda a calcular la desviació d'un feix de llum en passar d'un medi a un altre amb diferent índex de refracció.



Figura 3.28. Llum passant de l'aire a un medi aquàtic.

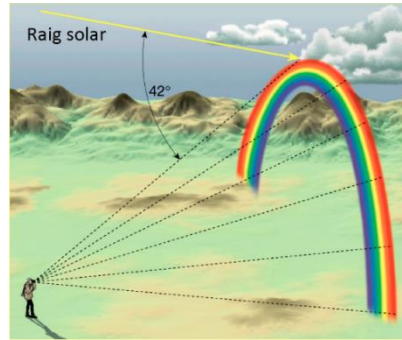


Figura 3.29. Esquema d'un arc de Sant Martí i el seu angle de refracció.

Descartes també va donar una explicació per l'arc de Sant Martí i va observar que l'angle amb que els raigs solars són refractats és sempre de 42° (per la llum vermella) (figura 3.29).

Després de la llei de Snell apareix el principi de Fermat o principi del temps mínim, descrit per primer cop en 1662 pel científic **Pierre de Fermat**. Fermat postula que la trajectòria d'un raig de llum entre dos punts es correspon amb la que requereix el mínim temps per fer-la, a diferència del que havia dit Heró en l'antiga Grècia sobre que la llum pren el camí més curt en distància. Basant-se en aquesta afirmació, Fermat va ser capaç de derivar la llei de Snell, seguint les següents fórmules:

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}{v'}$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{(d - x)}{v'\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}$$

$$0 = \frac{\sin \theta_1}{v} - \frac{\sin \theta_2}{v'}$$

- t: temps
- v: velocitat de la llum en el medi ràpid
- v': velocitat de la llum en el medi lent
- x: distància vertical entre el punt A i el punt de refracció
- a: distància horitzontal entre el punt A i el punt de refracció
- b: distància horitzontal entre el punt de refracció i el punt B
- d: distància vertical entre el punt A i el punt B

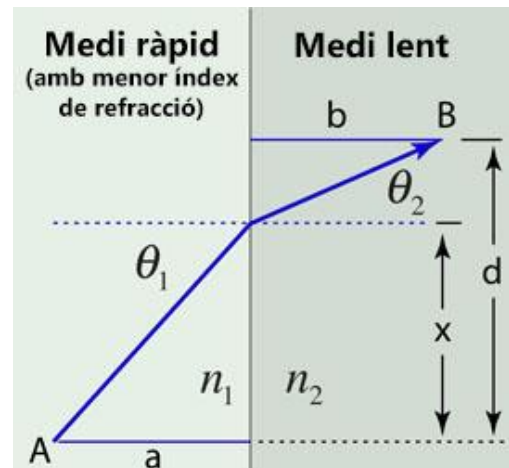


Figura 3.30. Derivació de la llei de Snell utilitzant el principi de Fermat.

Fermat, assumint que la llum viatja pel camí més curt en temps, va prendre el temps t que trigaria un raig a fer el camí d'un primer medi a un segon medi i va calcular la distància com la suma de les dues trajectòries obtingudes utilitzant el teorema de Pitàgores⁸. D'això en resulta una funció que relaciona el temps que triga un raig a recórrer una distància amb el valor de la variable x . Per trobar el mínim temps, és a dir, el suposat camí que agafa la llum, cal derivar la funció respecte a la variable x i igualar-la a zero⁹.

⁸ **Teorema de Pitàgores:** teorema matemàtic que relaciona la longitud de la hipotenusa (a) d'un triangle rectangle amb la longitud dels seus catets (b i c) segons: $a^2 = b^2 + c^2$.

⁹ **Mètode per trobar els màxims/mínims relatius d'una funció:** es deriva la funció respecte de la variable independent per trobar una expressió del seu pendent en funció d'aquesta variable; s'igualar la derivada a 0 i es resol l'equació per la variable independent per determinar el valor en l'eix d'abscisses dels màxims o mínims relatius.

En la funció derivada es pot substituir $\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}}$ per la seva relació trigonomètrica corresponent $\sin \theta_1$ i, similarmet, $\frac{(d-x)}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}$ per $\sin \theta_2$, i l'equació que en resulta relaciona els angles d'incidència i refracció amb la velocitat de la llum en els dos medis. L'últim pas consisteix a aplicar la definició de l'índex de refracció ($n = \frac{c}{v}$) per arribar a la forma més coneguda de la llei de Snell:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Els colors

Durant l'època d'Isaac Newton, molts científics discuteixen sobre la física dels colors, ja que era una propietat que no se sabia si formava part d'un objecte o de la nostra percepció. René Descartes proposa que el color està associat a la velocitat de rotació de les partícules d'èter (un hipotètic cinquè estat de la matèria on estan suspesos els astres de l'univers i pel qual viatja la llum), i que aquestes partícules canvien de color en contactar amb diferents cossos. Segons Descartes, les partícules que roten molt ràpidament donen la sensació de vermell, i les més lentes donen sensació de blau.

D'altres científics pensaven que els cossos lluminosos vibren i aquesta vibració es transmet per l'èter en forma de llum. No obstant això, Newton no està totalment d'acord amb aquestes idees, i és el seu gran experiment, presentat en 1667, que canvia totalment el model de la llum de l'època.

Newton va alinear un prisma triangular amb el camí d'un raig de Sol que entrava en una cambra fosca per un petit forat. Va veure els colors de l'arc de Sant Martí reflectits a la seva paret, com era normal. Malgrat això, va adonar-se que, en comptes de reflectir-se en forma circular a la paret, que és el que hauria de passar si tots els rajos són refractats igualment, la forma reflectida era oblonga, amb una llargada uns cinc cops més gran que l'amplada, sense importar el tipus de prisma que col·loqués. Newton va proposar, doncs, que aquesta forma s'esdevenia gràcies a la diferent refrangibilitat (capacitat de ser refractats) que tenen els rajos de diferents colors, els quals componen la llum blanca.



Figura 3.31. L'experiment de Newton.

La idea de l'experiment (figura 3.32) era fer passar els colors generats per un prisma per un altre prisma. El segon prisma no crea nous colors ni altera els colors formats pel primer prisma, sinó que recupera la llum blanca.

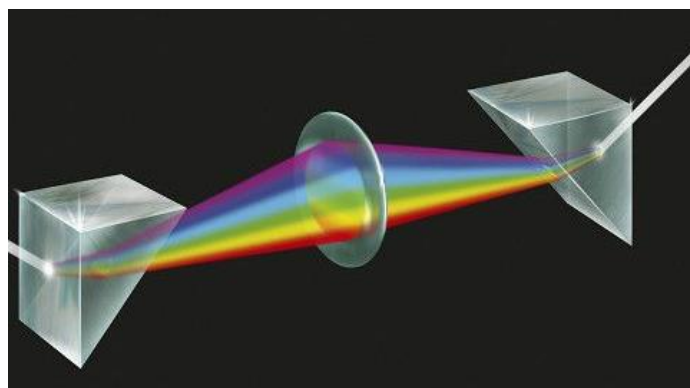


Figura 3.32. Il·lustració de l'experiment de Newton.



Després d'aquest experiment, Newton conclou que el color no es forma a partir de la llum, sinó que n'és una propietat intrínseca: "*Colours are not qualifications of light, [...] but original and connate properties*" (Els colors no són qualitats de la llum, sinó propietats originals i connates).

Gràcies a aquest experiment es va descobrir el que actualment coneixem com a espectre de llum visible: la radiació electromagnètica visible per a l'ull humà.

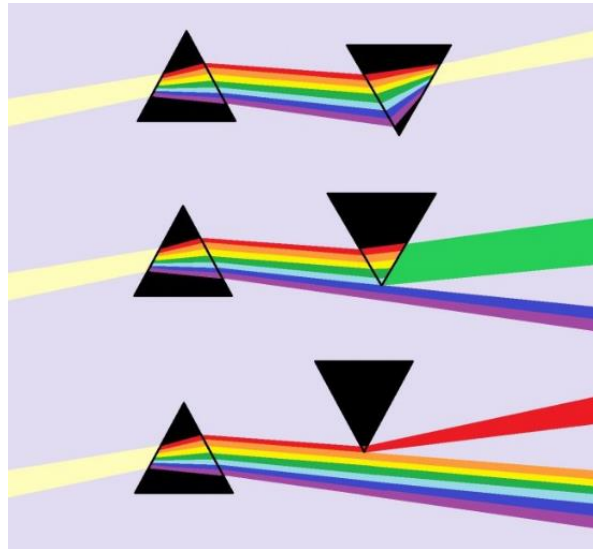


Figura 3.33. Representació esquemàtica de l'experiment de Newton.



Newton era un home molt religiós. Creia que tots els objectes estan subjectes a unes lleis naturals creades per un Déu suprem i omnipotent.

En 1800, William Herschel, observant el Sol amb un filtre vermell, es va adonar que aquest produïa molta calor. Va seguir observant fins que va fer passar la llum per un prisma (seguint l'experiment de Newton) i va posar un termòmetre al costat del punt vermell de l'espectre, on no es projectava cap color. La temperatura que marcava era molt alta comparada amb la de l'ambient, i va concloure així que la llum provinent del Sol té una radiació invisible, a la qual anomenem radiació infraroja.

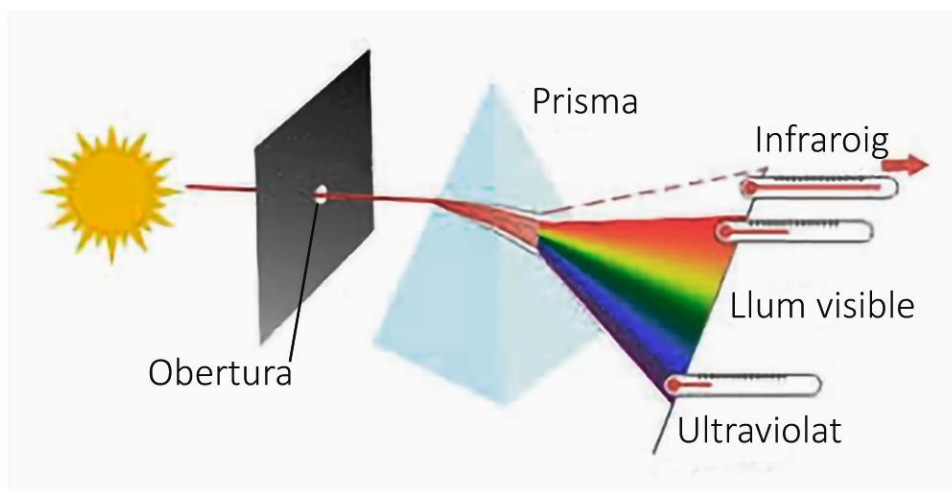


Figura 3.34. Esquema dels diferents tipus de radiació de la llum solar.

Una teoria particular

Fins ara, cap científic havia donat una explicació vàlida i fonamentada sobre la naturalesa de la llum ni sobre de què està formada. Newton fou el primer en intentar explicar això amb la seva teoria corpuscular. Aquesta teoria va ser proposada l'any 1704, i postula que la llum està formada per petites partícules que viatgen juntes en línia recta.

La teoria corpuscular de Newton

- La llum està formada per petites partícules o corpuscles de massa negligible.
- Aquestes partícules són perfectament elàstiques.
- Els corpuscles provenen de fonts de llum com el Sol o el foc i viatgen sempre en línia recta.
- Aquestes partícules es mouen a gran velocitat, i porten energia cinètica amb elles.
- Quan aquestes partícules entren dins de l'ull humà, ens provoquen la sensació de visió.
- Aquestes partícules poden ser de diferents mides, la qual determina el color de la llum.
- Els corpuscles viatgen més de pressa en un medi dens que en un de menys dens. Quan entren en un medi més dens, la força de gravitació és major i la llum s'accelera.
- A aquests corpuscles se'ls apliquen les mateixes lleis físiques que a un projectil (lleis de la balística).

Com es pot observar en les figures 3.35 i 3.36, quan una bola xoca contra una paret, torna amb el mateix angle amb què ha arribat.

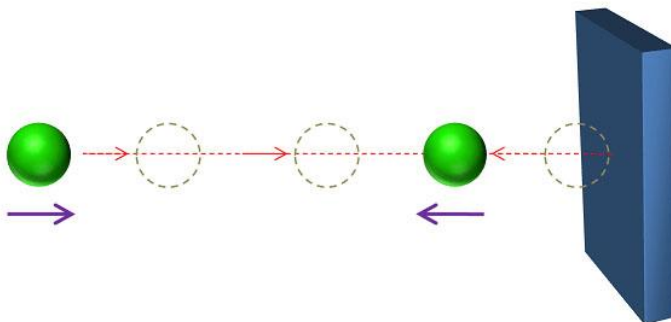


Figura 3.35. Bola xocant perpendicularment contra una paret.

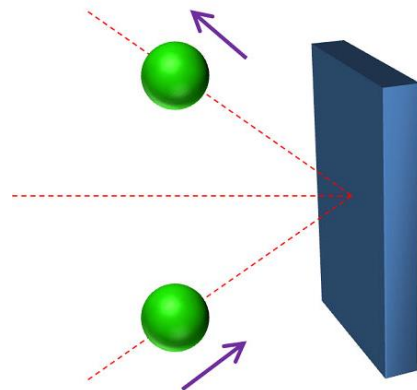


Figura 3.36. Bola xocant contra una paret amb un angle agut respecte de l'eix normal.

Segons Newton, el mateix fenomen és aplicat als corpuscles quan es troben amb un medi reflectant (figura 3.37).

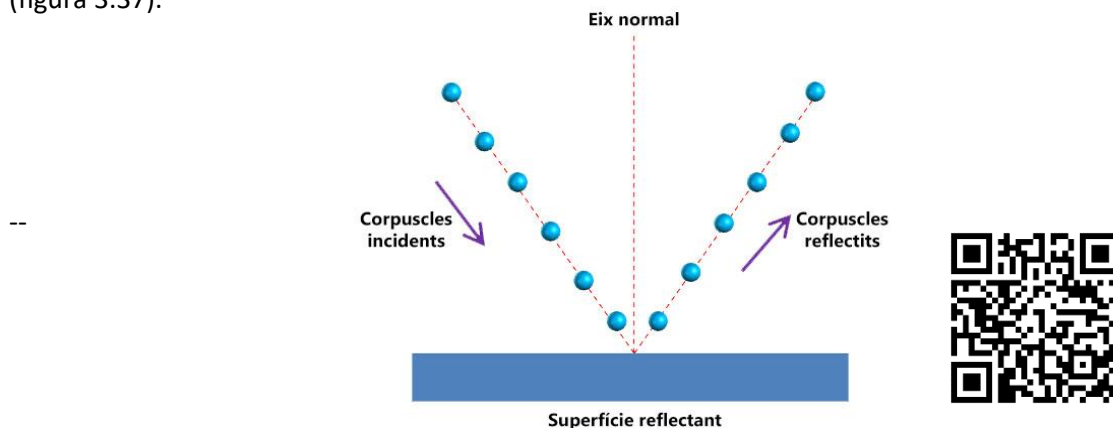


Figura 3.37. Corpuscles incidint en un medi reflectant.



Debat ona-partícula

Al mateix temps en què Newton estava desenvolupant la seva teoria corpuscular de la llum, el científic **Christiaan Huygens** va idear la seva pròpia explicació per al comportament de la llum, plantejant que era una ona. L'any 1690 va publicar la seva explicació sobre la llum en el llibre *Traité de la lumière*, on, al contrari que el que postulava el pensament newtonià de l'època, va basar-se en el descobriment de Rømer del fet que la llum viatja a una velocitat finita per explicar la seva naturalesa de caràcter ondular. Aquesta divergència d'ideals va mantenir la comunitat científica dividida durant anys en dos bàndols: els que afirmaven que la llum està formada per petites partícules (encapçalats per Newton) i els que sostenien que la llum és un feix d'ones (seguint el model de Huygens).



Figura 3.38. Durant molts anys va existir un gran debat sobre si la llum tenia característiques corpusculars o ondulatòries.

No obstant això, primer és important parlar dels descobriments que el van portar a aquesta conclusió, i en especial del físic **Robert Hooke**, considerat el precursor de Huygens. Cap a l'any 1665, Hooke afirmava que la llum no és produïda a partir d'un moviment qualsevol, ja que hi ha moviments molt bruscos que no provoquen cap mena de llum mentre que alguns de lleus poden produir resplendor, com fregar un diamant. Va concloure, doncs, que la llum és produïda gràcies a moviments vibratoris, teoria que serà descartada posteriorment. A més a més, proposa que, per tal de ser propagada, la llum ha de travessar un medi homogeni transmissor capaç d'impulsar aquest moviment, en línia recta i en totes les direccions.

Els estudis de Hooke sobre les molles i el moviment harmònic li van servir de base per argumentar que la llum seguia un comportament ondulatori.

Hooke també va utilitzar el concepte de front d'ona, més tard atribuït i millorat per Huygens, per explicar el fenomen de refracció.

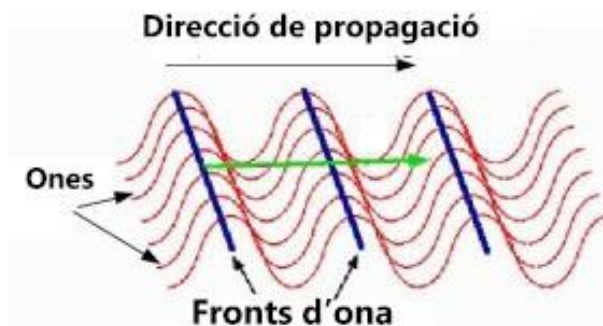


Figura 3.39. Esquema d'una ona i els seus fronts.

Durant els anys posteriors es van fer alguns descobriments sobre el comportament de la llum que no es podien explicar des d'un punt de vista corpuscular, creant així una base per la teoria ondulatòria.

Un dels conceptes relacionats amb la teoria ondulatòria és el fenomen de difracció. Una de les primeres mencions d'aquest succés data de l'any 1665, i es troba en el tractat *Physicomathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis* de **Francesco Maria Grimaldi**. Un dels experiments que apareixen en aquest llibre consisteix a deixar que un petit raig de llum del Sol entri a una sala fosca a través d'un forat en una cartolina. Fent això, es descobreix que la intensitat de la llum projectada és molt major que la que hauria d'aparèixer si la llum es propagués seguint una trajectòria rectilínia. Grimaldi dona a aquest fenomen el nom de difracció.

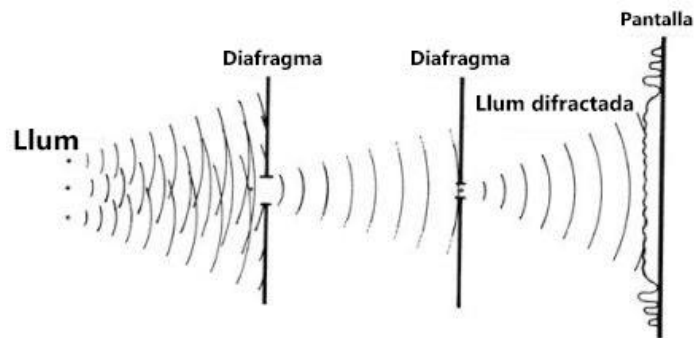


Figura 3.40. Representació esquemàtica del fenomen de difracció, segons Grimaldi.

La difracció de la llum és la petita curvatura que fa quan passa al voltant de la vora d'un objecte. La quantitat de curvatura depèn de la longitud d'ona i de la mida del forat pel qual passa. Si l'obertura és molt més gran que la longitud d'ona, la curvatura serà pràcticament indetectable. Si, en canvi, tenen una mida semblant o igual, la quantitat de curvatura és considerable i visible a ull nu.

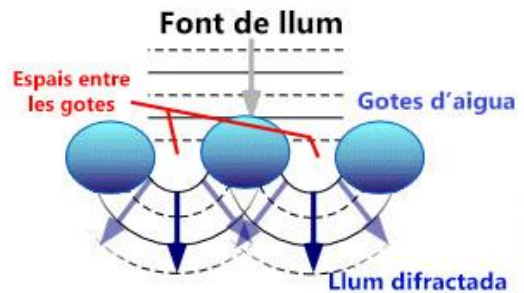


Figura 3.41. Representació esquemàtica del fenomen de difracció amb gotes d'aigua.

Un altre descobriment que va portar a la teoria del fet que la llum es comporta com una ona es va donar l'any 1669, quan **Rasmus Bartholin** va observar el fenomen anomenat birefringència o refracció doble, consistent en la refracció d'un feix de llum en dos feixos amb diferents direccions. Aquest fenomen, publicat en *Experimenta crystalli Islandici disdiaclastici quibus mira & insolita refractio detegitur*, només succeeix a través d'alguns materials, com el mineral calcita, que Bartholin va recollir d'Islàndia en un dels seus viatges.

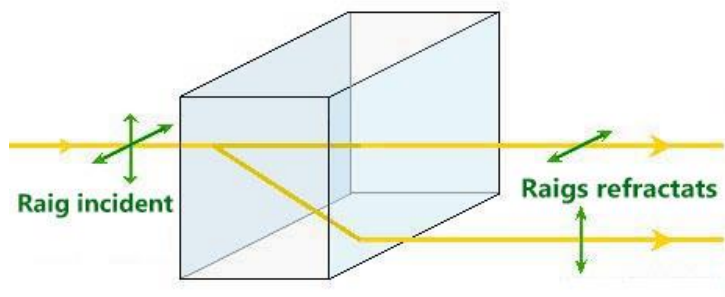


Figura 3.42. Representació esquemàtica del fenomen de birefringència.



Figura 3.43. Cristall de calcita.

Tot i que no va poder explicar el fenomen, aquest nou comportament de la llum va servir per posar en dubte les teories corpusculars del moment. Bartholin també va publicar *Dissertatio mathematica qua proponitur analytica ratio inveniendi omnia problemata proportionalium*, un estudi sobre el moviment harmònic, sense saber que la llum estava formada per ones que segueien el comportament d'aquest tipus de moviment.

Sigui com sigui, no és fins a l'aparició de Huygens que s'unifiquen tots els descobriments recents i es dona una explicació completa sobre la teoria ondulatoria. Segons Huygens, la llum es comporta de manera molt similar al so, propagant-se longitudinalment per un cinquè i hipotètic estat de la matèria anomenat èter, el qual ja havia sigut utilitzat per explicar certes teories anteriorment. Això explicava com la llum es pot propagar pel buit de l'espai. El científic holandès també va definir el que avui dia coneixem com a principis de Huygens, que expliquen com es desplacen les ones de llum.

Principis de Huygens

- Una ona de llum viatja a la velocitat de la llum (un valor constant i determinat) per l'espai.
- Cada punt d'un front d'ona actua com una font d'ona. En el front es formen ones secundàries més petites que se sumen i creen un altre front tangent a totes aquestes.

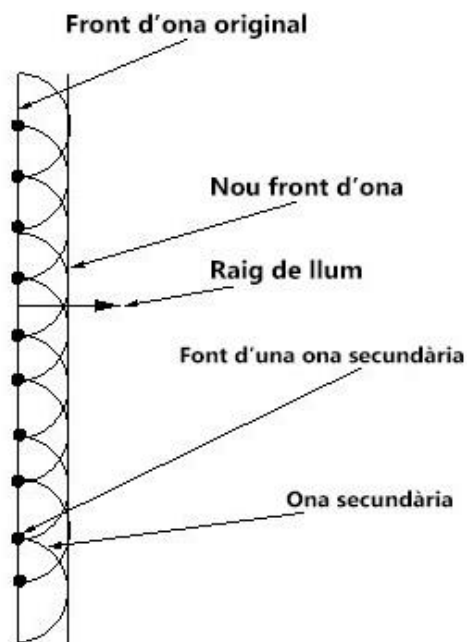


Figura 3.44. Esquema de la llum actuant com a ona, segons Huygens.

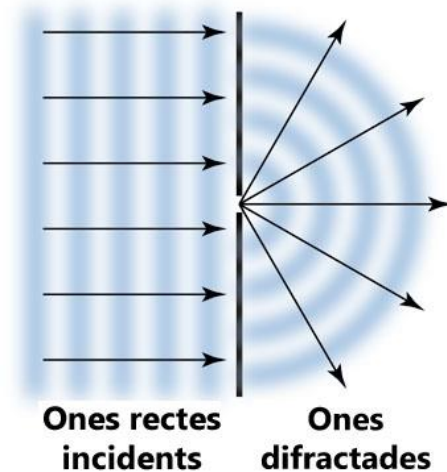


Figura 3.45. Esquema de la llum actuant com a ona, segons Huygens. En aquesta imatge es pot observar com el fenomen de difracció canvia la forma del front d'ona en passar per una petita obertura (de recte a circular).

Aplicant aquests principis, Huygens va proposar que la velocitat de la llum era inversament proporcional a la densitat del medi pel qual viatjava, sent el buit el medi que permet la seva màxima velocitat, l'aire un medi més lent i l'aigua el menys ràpid de tots. Això, un altre cop, anava en contra del que deia Newton sobre que, en passar de l'aire a l'aigua, la llum accelera a causa de l'atracció gravitatòria més gran causada per un medi més dens.

Seguint amb el debat ona-partícula, **Leonhard Paul Euler** també contradiu la teoria corpuscular de Newton. L'any 1740 va fer aportacions a la teoria de la llum que va plantejar Huygens, on sostenia que la llum era una ona, i recolzava l'existència de l'èter. Euler també contradiu Newton en la seva opinió sobre que és impossible crear lents acromàtiques, ja que ell proposava que l'ull està format per lents que poden crear imatges gairebé perfectes. També va demostrar de manera analítica que, amb una combinació exacta de lents de característiques refractives diferents, es pot corregir l'aberració cromàtica, però mai va poder construir aquest sistema que necessitava.

3.4. Edat contemporània: es resol el debat

Durant el segle XIX, es fan grans avenços en les matemàtiques i la geometria gràcies a científics com **Agustin Louis Cauchy**, **Évariste Galois**, **Johann Carl Friedrich Gauss** o **Bernhard Riemann**. També en aquest segle es descobreix gairebé la totalitat dels elements químics, i s'atribueix a **Dmitri Ivánovich Mendeláyev** el disseny de la primera taula periòdica.

D'altra banda, pel que fa a l'òptica, apareixen una sèrie de canvis radicals en la concepció de la llum com a ona, gràcies a científics com Thomas Young i Augustin Fresnel. Aquestes noves idees sobre la llum havien estat prefigurades per Huygens i rebatien la teoria newtoniana anterior.

Més endavant, durant la segona meitat del segle XIX es descobreix la relació entre electricitat i magnetisme gràcies a Clerk Maxwell, **André-Marie Ampère**, Michael Faraday i Carl Friedrich Gauss, i es proposa una nova i revolucionària definició de la llum.

La llum és una ona

El primer a demostrar experimentalment el comportament ondulatori de la llum fou **Thomas Young**, gràcies al seu famós experiment, realitzat l'any 1801, confirmant així de manera definitiva la naturalesa ondulatoria de la llum.

L'experiment en qüestió consisteix a dirigir un raig de llum a una làmina opaca amb dues esclertes paral·leles, de manera que la llum pot passar per totes. La premissa de l'experiment és simple, si la llum és una partícula, en passar per les esclertes haurà de projectar-se amb la mateixa forma que les esclertes, és a dir, formant dues línies paral·leles.

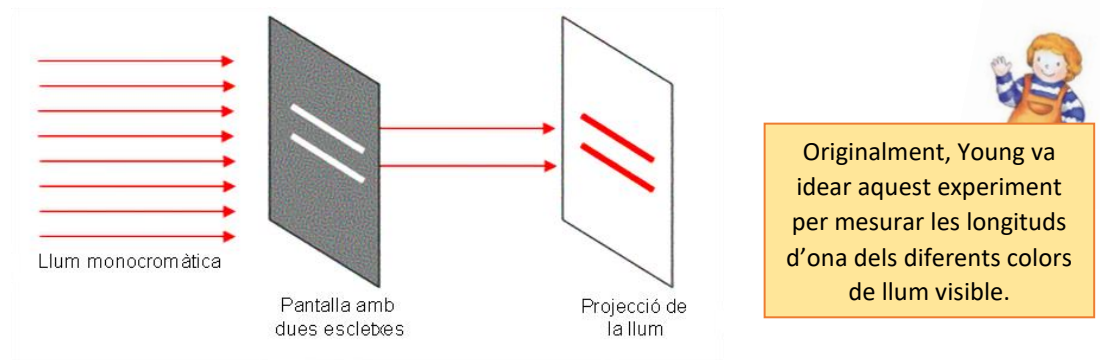


Figura 3.46. Llum actuant com a partícula.

D'altra banda, si la llum segueix un comportament ondulatori (figura 3.47), en passar per les esclertes es difracta (com és el cas real) i les ones resultants interaccionen, destructivament o constructivament, les unes amb les altres per formar una projecció de diverses línies paral·leles amb diferents intensitats.

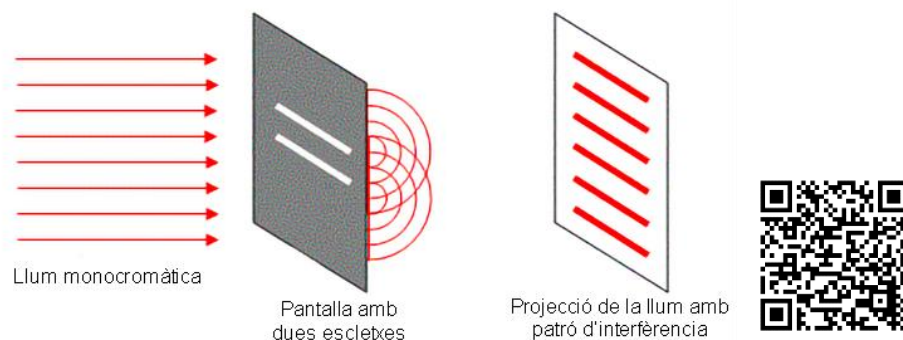


Figura 3.47. Llum actuant com a ona.

Young va utilitzar els resultats d'aquest experiment per mesurar les longituds de les ones de llum visible amb la següent fórmula, que relaciona la distància entre les línies projectades amb la longitud d'ona:

$$\lambda = \frac{xd}{nL}$$

- λ : longitud d'ona
- x : distància de la franja central
- d : distància entre les obertures
- n : nombre segons l'ordre de la franja
- L : distància entre les dues pantalles

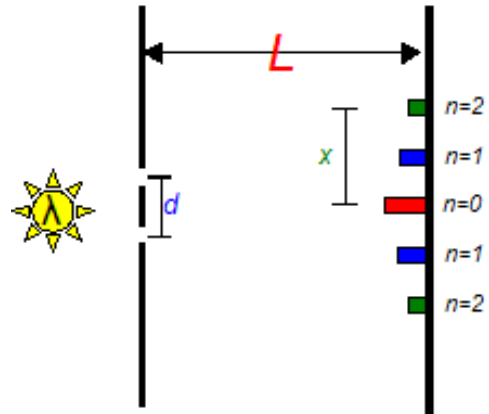


Figura 3.48. Esquema amb els diferents paràmetres necessaris per aplicar la fórmula de Young.

Els resultats obtinguts a l'experiment han estat comprovats avui dia i se sap que van ser molt encertats; el petit marge d'error de Young es deu a la manca de precisió de l'ull humà. També va ser el primer a citar que la llum en forma d'ona tenia almenys una component transversal, al contrari de la creença del moment sobre que era longitudinal. Més endavant, Fresnel demostrarà que és totalment transversal. L'experiment de Young és especialment important perquè més endavant es modificarà per observar la naturalesa dual de la llum.

El següent científic més rellevant, cronològicament, és **Étienne-Louis Malus**. Malus va fer molts estudis relacionats amb la llum, i va realitzar experiments que van donar validesa a la teoria de Huygens. El seu descobriment de la polarització de la llum mitjançant la reflexió es va publicar en 1809 a *Sur la mesure du pouvoir réfringent des corps opaques*.

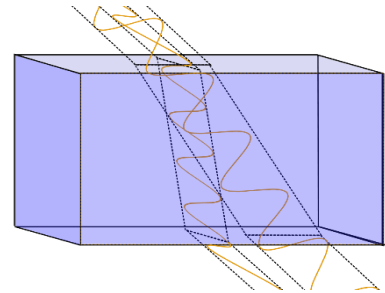


Figura 3.49. Esquema de la birefringència de la llum i de com aquesta esdevé dues ones separades en travessar un determinat material.

L'any següent va publicar la seva teoria sobre la birefringència de la llum en cristalls, i també va estudiar la relació entre l'angle format pel fenomen de reflexió i l'índex de refracció del material reflectant.

La llei de Malus sobre els vidres polaritzadors, els quals canvien l'angle de les ones respecte de l'eix x (figura 3.50) i la intensitat dels feixos de llum, abans i després de travessar-los, segueix la següent fórmula:

$$I = I_0(\cos \theta_i)^2$$

- I_0 : Intensitat de la llum abans d'arribar al polaritzador (en candeles).
- I : Intensitat resultant després de travessar el polaritzador (en candeles).
- θ : Angle entre l'eix que segueixen les ones de la llum abans i després del polaritzador (en radians).

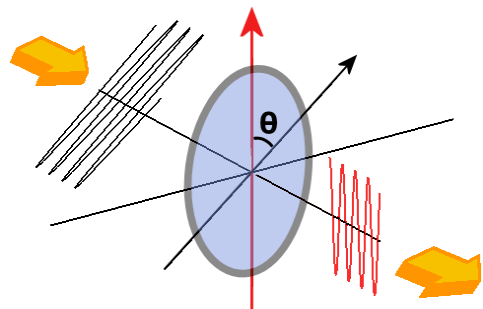


Figura 3.50. Esquema de la polarització d'una ona.

Un invent molt important d'aquest segle i que val la pena esmentar és l'espectroscopi de **Joseph von Fraunhofer**. Aquest aparell va ser inventat l'any 1814 i va ser capaç de mostrar les franges de color que formen l'espectre electromagnètic¹⁰ de cada tipus de llum, abans que es conegués la seva existència. Així va descobrir, el mateix any, les anomenades línies de Fraunhofer. Aquestes línies corresponen a les bandes fosques que es troben a l'espectre electromagnètic de la llum solar, estudiades més endavant pel físic alemany Kirchhoff.

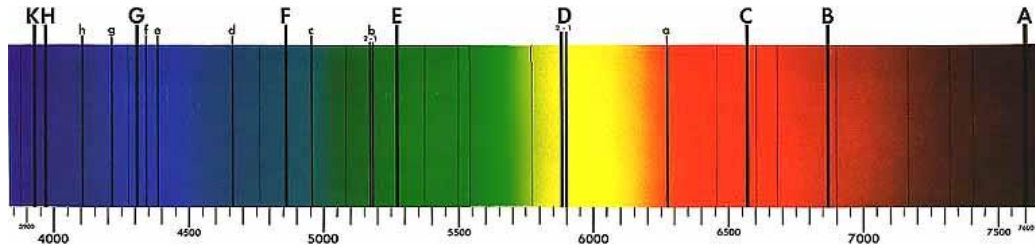


Figura 3.51. Línies de Fraunhofer sobre l'espectre electromagnètic, obtingut amb el seu espectroscopi.

Fraunhofer va inventar una nova retícula de difracció, gràcies a la qual va exposar l'anomenada difracció de Fraunhofer, que provocava uns rajos gairebé paral·lels en fer-los passar per dues lents i una esclatxa.

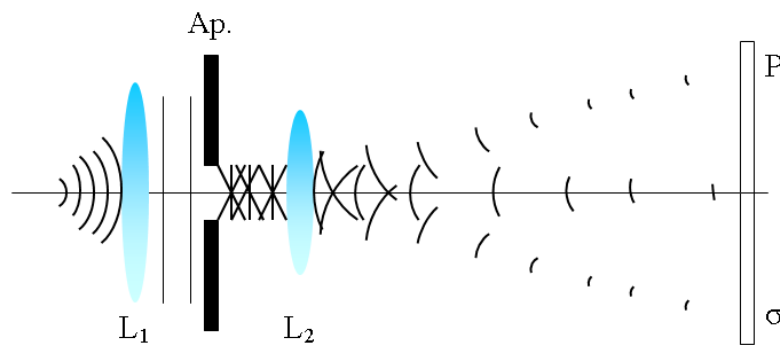


Figura 3.52. Explicació esquemàtica de la difracció de Fraunhofer.

Augustin-Jean Fresnel va exposar, contemporàniament, el seu model de difracció. La difracció de Fresnel és molt similar a la de Fraunhofer, però la diferència està en el fet que la de Fraunhofer disposa la pantalla de projecció molt lluny de l'esclatxa, la qual és més ampla que l'amplitud de l'ona que la travessa. En la difracció de Fresnel, la pantalla de projecció es troba més a prop de l'esclatxa, i aquesta és d'una amplitud menor que la de l'ona.

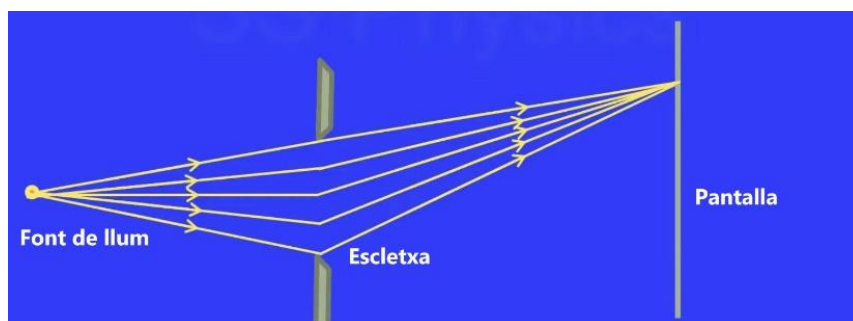


Figura 3.53. Representació esquemàtica de la difracció de Fresnel a través d'una esclatxa.

¹⁰ **Espectre electromagnètic:** conjunt d'ones electromagnètiques diferenciades per la seva freqüència.

Per tant, Fraunhofer demostra que el front d'ona de la llum és pla, ja que els seus rajos es poden considerar paral·lels, mentre que Fresnel demostra que el front d'ona de la llum és cilíndric, ja que els seus rajos convergeixen.

Fresnel, a més a més, va ser el primer científic capaç d'explicar la difracció per vores rectes i la propagació rectilínia amb ones.



Fresnel va descobrir i unificar ell sol el principi de Huygens i les aportacions de Young, sense saber que ells ja ho havien descobert.

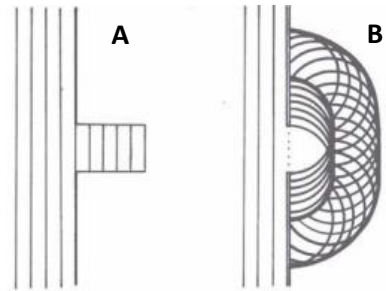


Figura 3.54. Diferència entre una difracció per vores rectes (A) i una difracció de vores corbes (B) en passar per una escletxa.

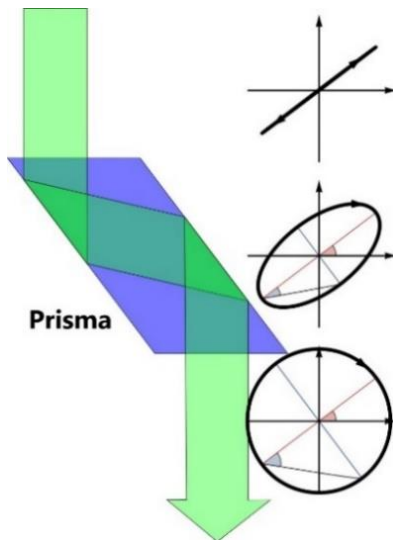


Figura 3.55. Descripció gràfica de l'experiment de polarització de Fresnel.

En 1821, Fresnel publica un estudi molt important sobre la polarització. En aquest estudi, explica, a través de les matemàtiques, que la llum no podria ser polaritzada si tingués algun component longitudinal. A partir del seu descobriment es dedueix definitivament que la llum està formada per ones transversals. En la figura 3.55 s'aprecia que la llum que entra està polaritzada linealment a 45° , mentre que el raig de sortida està polaritzat circularment.

Fresnel havia escrit una memòria sobre els seus descobriments respecte de la difracció de la llum i la va presentar en 1818 a l'Acadèmia Francesa de Ciències de París en el marc d'un concurs científic. Llavors, la teoria ondulatòria seguia sent rebutjada per amplis sectors de la comunitat científica, i entre el jurat es trobava **Siméon Denis Poisson**, partidari de la teoria corpuscular. Poisson va utilitzar les equacions de la teoria de Fresnel per demostrar que impliquen que s'ha de formar un punt brillant en el centre del patró de difracció d'una esfera opaca (a la regió d'ombra) quan aquesta és il·luminada amb llum monocromàtica (d'un únic color). La seva intenció era que aquest resultat ajudés a enderrocar la teoria ondulatòria.

No obstant això, va resultar exactament el contrari. **François Jean Dominique Arago** va verificar experimentalment la predicció ondulatòria, anomenant-se el punt il·luminat des de llavors punt d'Arago o punt de Poisson. Com que el punt brillant es produeix dins de l'ombra geomètrica de l'objecte, cap model corpuscular pot explicar-ho. En canvi, el model ondulatori de la llum prediu que s'ha de produir una interferència constructiva de les llums difractades per cada un dels punts de la vora de l'esfera.

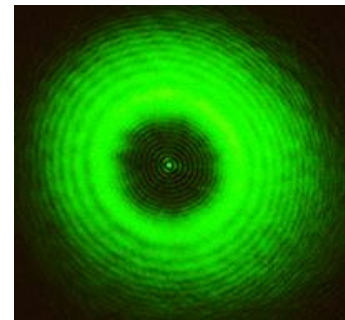


Figura 3.56. En el centre de l'ombra projectada per una esfera apareix un punt brillant.

Quan un objecte esfèric és il·luminat, tots els punts de la seva circumferència actuen com a noves fonts de llum. La llum que arriba al centre de l'ombra haurà recorregut la mateixa distància des de tots els punts de la circumferència, interferint constructivament i creant aquest punt lluminós. Això demostra novament el comportament de la llum com a ona.

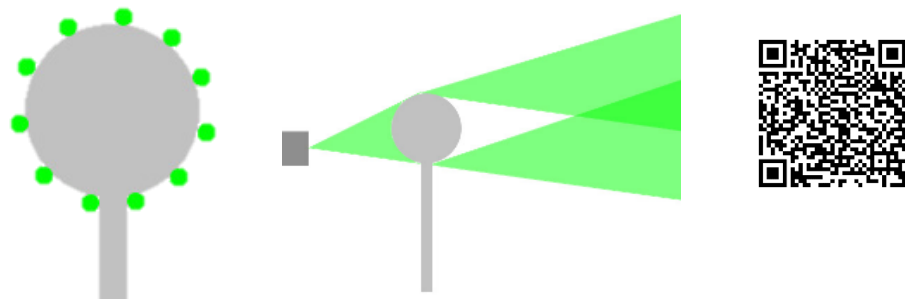


Figura 3.57. Representació esquemàtica del que s'esdevé en l'experiment de Poisson.

Seguint amb els arguments a favor de la naturalesa ondulatoria de la llum, a meitats del segle XIX es descobrí l'efecte Doppler. Aquest efecte va ser descobert pel físic **Christian Andreas Doppler** l'any 1842. A més a més, el mateix efecte va ser descobert per **Armand Hippolyte Louis Fizeau** en 1848, sense conèixer prèviament el treball de Doppler.

L'efecte Doppler es pot definir com l'efecte produït per un generador d'ones en moviment, la freqüència del qual augmenta o disminueix segons si s'apropa o s'allunya, respectivament, de l'observador. Tanmateix, això no vol dir que hi hagi un canvi real en la freqüència generada per la font d'origen.

Aquest efecte pot ser observat en qualsevol classe d'ona. De fet, es pot trobar en la nostra vida diària: com es pot apreciar en la figura 3.58, quan passa un cotxe de policia a prop nostre, notem com el to canvia segons si aquest s'apropa (més agut) o s'allunya (més greu).



Figura 3.58. L'efecte Doppler en una ona sonora en moviment.

Això es deu al fet que, quan una font d'ones s'apropa, la longitud d'ona és menor i, per tant, la freqüència augmenta. Quan la font s'allunya, la longitud d'ona és major i en disminueix la freqüència.

Acostant-nos a c

Durant els segles XIX i XX, l'explicació del comportament de la llum mitjançant ones guanyà l'acceptació de la comunitat científica. És també en aquest moment quan comencen a fer-se mesures més precises de la velocitat de la llum.

Hippolyte Fizeau va investigar els fenòmens d'interferència de la llum, però ens interessa més pels seus estudis sobre la seva velocitat. Va ser el primer científic capaç de mesurar c directament, gràcies al seu experiment fet l'any 1849. El seu resultat pel valor de c fou de 313 000 km/s, un valor molt més aproximat que l'obtingut anteriorment per Rømer.

Fizeau va utilitzar un telescopi, un engranatge i diversos miralls i lents per crear el seu muntatge (figura 3.59).

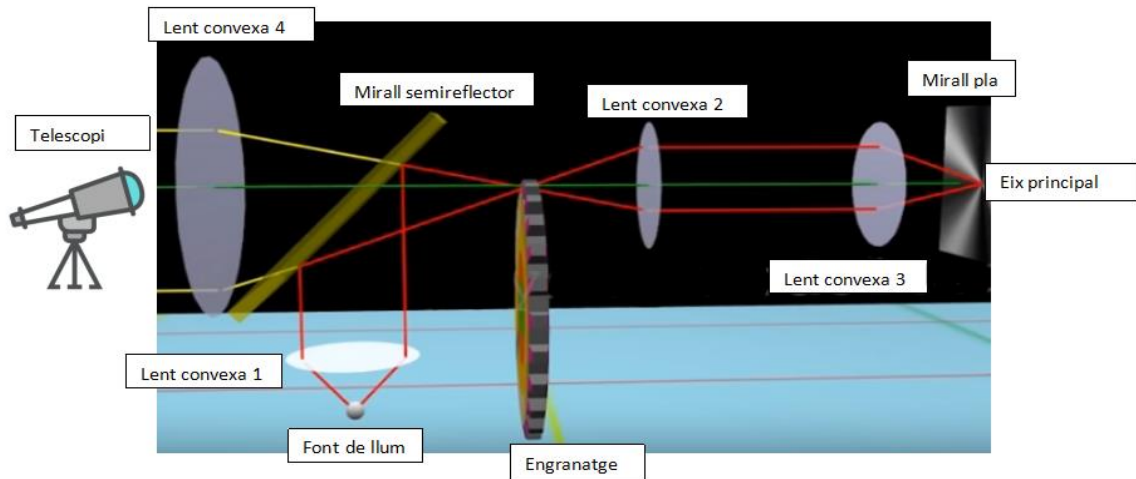


Figura 3.59. Representació esquemàtica del muntatge de Fizeau.

Gràcies a aquest complex sistema, fa viatjar dos raigs de llum entre les dents de l'engranatge i, amb l'ajuda del telescopi, és possible observar com els rajos de llum apareixen i desapareixen a causa de la rotació constant d'aquesta roda dentada. Si els raigs de llum passen per l'espai entre dents, es veu la llum. Si, per contra, els raigs xoquen amb una dent, no es veu la llum. Si la velocitat de l'engranatge comença a augmentar considerablement, veurem com la llum parpelleja cada cop més ràpid, fins que no la veurem en absolut. Sabent la velocitat angular de l'engranatge en aquest punt, es pot trobar el temps que triga la llum a fer tot aquest recorregut i, per tant, la velocitat de la llum.

A partir de l'experiment de Fizeau apareix **Jean Bernard Léon Foucault**, qui, a part de demostrar la rotació terrestre mitjançant el seu pèndol, va mesurar la velocitat de la llum en 1862, donant-li un valor de 298 000 km/s (amb un error del 0,6% respecte del valor acceptat actualment) a través d'una millora de l'anterior experiment. Per fer aquest experiment (figura 3.60), Foucault va utilitzar una font de llum (A), un mirall rotatori (B), un mirall fix (C) i un receptor de llum (Z).



Durant la part pràctica d'aquest treball recrearem aquest assaig de la manera més acurada possible.

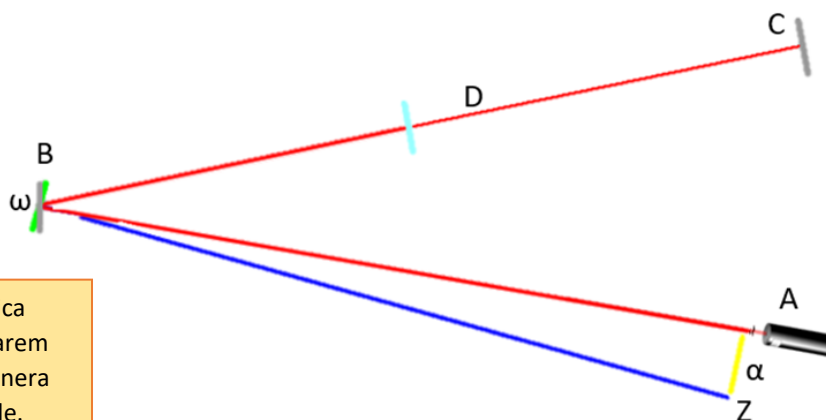


Figura 3.60. Representació esquemàtica del muntatge de Foucault.

En el seu experiment, Foucault emet un raig de llum des d'un punt A a un mirall rotatori amb una velocitat angular coneguda (ω) situat en un punt B. Des del punt B el raig surt reflectit cap a un punt conegut (C) on un mirall reflecteix el raig cap a B de nou, el mirall giratori haurà canviat la seva orientació lleugerament amb el temps que la llum ha trigat a anar i tornar. El canvi d'orientació o angle α , mesurat gràcies al receptor en Z, és utilitzat per mesurar la velocitat de la llum amb exactitud.

A més de donar-li un valor a c , recollint l'experiència de François Arago i millorant el mirall giratori dissenyat per **Charles Wheatstone**, Foucault va demostrar que la llum viatja més ràpidament per l'aire que per l'aigua, fet que va confirmar que la velocitat de la llum varia de manera inversament proporcional a l'índex de refracció del medi pel qual es transmet, restant així un altre punt a la teoria corpuscular de Newton, la qual afirmava el contrari.

El següent en intentar mesurar c és **Albert Abraham Michelson**, el qual va tornar a efectuar l'experiment de Foucault de manera més exacta en 1924, obtenint un resultat de $299\,796 \pm 4$ km/s. A més a més, el 1880 va inventar l'interferòmetre, un aparell capaç de mesurar distàncies molt precises (fins i tot el diàmetre de les estrelles, i posteriorment va servir per a la detecció d'ones gravitacionals, l'anàlisi de fenòmens meteorològics i el desenvolupament de la fibra òptica), gràcies a la interferència entre dos raigs de llum.

En aquest aparell, la llum és dividida en dos feixos i un dels raigs viatja per un camí més llarg que l'altre. Després de travessar diferents distàncies, els dos raigs de llum tornen a unir-se i s'interfereixen entre ells.

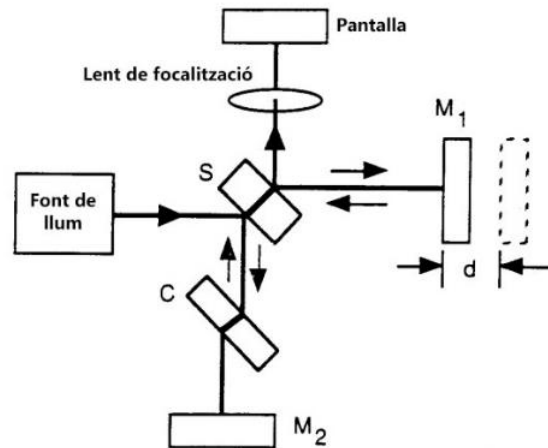


Figura 3.61. Il·lustració esquemàtica de l'interferòmetre de Michelson.

Gràcies a l'interferòmetre, es va realitzar un dels experiments més famosos de la història de la física. Michelson i **Edward Williams Morley** pretenien mesurar la velocitat de la Terra quan viatja per l'èter (substància per la qual estava format l'univers, suposadament) utilitzant el valor de la velocitat de la llum. Fent això, van adonar-se que la teoria del medi èter era falsa, ja que no hi ha una diferència notable entre la velocitat dels diversos raigs de llum. Aquest descobriment va plantejar un nou problema per l'estudi de la llum: per quin medi viatja la llum en l'espai? Amb aquest experiment també es trobà que la velocitat de la llum en el buit (abans considerat l'èter) és constant, independentment de la posició de l'observador. Aquest descobriment portarà a la Teoria de la Relativitat Especial d'Einstein i la Teoria del Big Bang i l'expansió de l'univers.

La llum és una ona electromagnètica

És en 1845 quan **Michael Faraday** descobreix la primera relació física entre la llum i el magnetisme, demostrant que els imants poden afectar la llum en materials dielèctrics¹¹. Va ser capaç de rotar la polarització de la llum induint un camp magnètic en la mateixa direcció que la llum, fenomen que actualment anomenem efecte Faraday, i que es basa en la següent equació:

$$\beta = VBd$$

β : angle de rotació (en radians).

B : flux de densitat magnètica en la direcció de propagació (en Tesles).

d : la longitud del camí òptic (en metres).

V : constant de Veret de cada material; mostra la proporcionalitat (en radians per tesla i per metre) entre el camp i la rotació del pla de polarització.

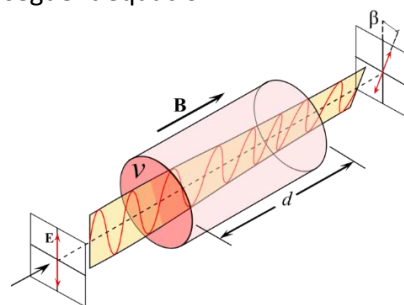


Figura 3.62. Representació gràfica de la polarització d'un raig de llum amb la inducció d'un camp magnètic B en un material dielèctic.

¹¹ **Material dielèctic:** material aïllant el qual pot formar dipòls elèctrics sota l'acció d'un camp elèctric prou intens, és a dir, quan la seva rigidesa dielèctrica és superada.

Després que Faraday hagués establert una relació entre la llum i el magnetisme, el científic **James Clerk Maxwell**, coneixent aquesta relació, va proposar que un camp magnètic i un camp elèctric poden propagar-se per l'espai seguint un moviment ondulatori. És ell qui va aconseguir definir, matemàticament, la velocitat d'aquestes ones i les va anomenar ones electromagnètiques.

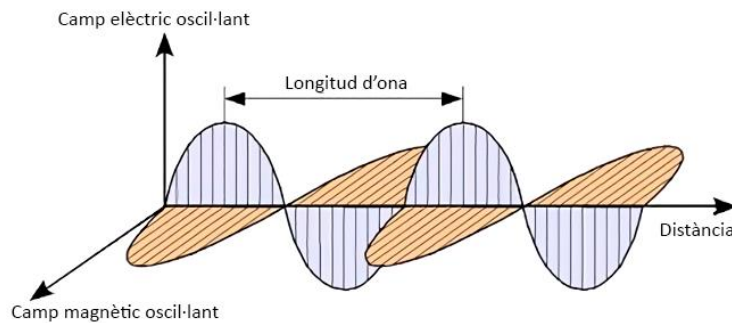


Figura 6.63. Representació esquemàtica d'una ona electromagnètica.

Maxwell va treballar, recollir i sintetitzar les lleis de Coulomb, Gauss, Biot i Savart, Ampère i Faraday per arribar al que actualment coneixem com a les equacions de Maxwell. Les equacions de Maxwell relacionen els vectors del camp elèctric¹² (E) i el camp magnètic¹³ (B) amb les seves fonts, que són les càrregues i els corrents elèctrics.

Les equacions de Maxwell en forma diferencial són les següents:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

Maxwell va concloure amb les seves equacions que la velocitat de les ones electromagnètiques (c) en el buit havia de ser:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

ϵ_0 : permitivitat¹⁴ del buit; aquesta constant forma part de les lleis de Coulomb i de Gauss.

μ_0 : permeabilitat¹⁵ del buit; aquesta constant també apareix a les lleis de Biot i Savart i d'Ampère.

Gràcies a aquesta igualtat, Maxwell va observar que la velocitat de les ones electromagnètiques era molt similar al valor que es tenia en l'època de velocitat de la llum, i d'acord amb això va proposar el que tothom esperava:

LA LLUM ÉS UNA ONA ELECTROMAGNÈTICA

¹² **Camp elèctric:** camp de força generat per l'atracció i repulsió de càrregues elèctriques. Es mesura amb la magnitud vectorial Newtons per Coulomb ($N \cdot C^{-1}$).

¹³ **Camp magnètic:** camp de força generat pel moviment de càrregues elèctriques.

¹⁴ **Permitivitat elèctrica:** constant física que determina l'efecte provocat per un camp magnètic en un medi determinat.

¹⁵ **Permeabilitat elèctrica:** constant física que representa la capacitat d'una substància per absorbir o deixar passar un camp magnètic.

Amb una innovadora visió de la llum, l'any 1873 proposa en *A treatise on electricity and magnetism* que aquesta és una pertorbació electromagnètica que es propaga a una certa velocitat en forma d'ona a través del camp electromagnètic, format per un camp elèctric i un camp magnètic perpendiculars entre si, relacionats per la fórmula:

$$\frac{E}{B} = c$$

En aquesta relació, E és la intensitat del camp elèctric, B la intensitat del camp magnètic i c la velocitat de la llum.

D'aquesta manera, les teories ondulatòries de la llum, que fins llavors depenia del misteriós èter per propagar-se, acaben de consolidar-se, abolint definitivament aquest hipotètic cinquè estat de la matèria.

Després que Maxwell hagués proposat una definició matemàtica per les ones electromagnètiques, només faltava dur a terme un experiment que pogués demostrar la seva teoria. Va ser **Heinrich Hertz** qui, l'any 1887, va comprovar la veracitat de la teoria electromagnètica. Per fer això, va idear diversos experiments que demostren el comportament que prediuen les equacions de Maxwell sobre els camps elèctric i magnètic.

El primer experiment de Hertz es basava en el fet que, si Maxwell tenia raó, l'oscil·lació d'una càrrega elèctrica en un circuit de corrent altern havia de generar ones electromagnètiques. Aquestes ones, en un circuit detector, haurien d'induir un corrent elèctric amb la mateixa oscil·lació.

En un circuit elèctric amb una bobina d'inducció amb els terminals oberts, Hertz va crear una diferència de potencial. Aquesta diferència de potencial era prou gran com per ionitzar l'aire entre els dos terminals i així crear espurnes que oscil·laven entre ells. Si realitzem aquest experiment, veurem que les espurnes generen un camp electromagnètic, el qual es pot detectar amb un cable de coure en forma de C. Entre els dos extrems del cable es formen espurnes com les del circuit original, ja que les ones electromagnètiques han induït un corrent elèctric amb la mateixa oscil·lació.

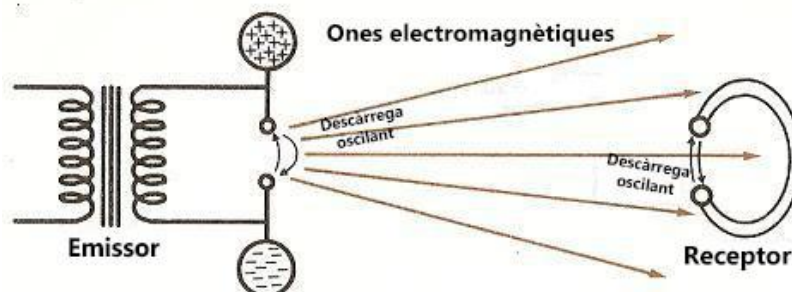


Figura 3.64. Representació esquemàtica de l'experiment de Hertz.

Un cop demostrada l'existència de les ones electromagnètiques, Hertz va utilitzar el mateix muntatge i va posar diferents materials entre l'emissor i el receptor per comprovar la interacció que feien les ones amb aquests.

L'experiència de Hertz

- Utilitzant les superfícies de sòlids va poder reflectir les ones i va observar que l'angle d'incidència era el mateix que el de reflexió.
- Amb materials no conductors va aconseguir refractar les ones electromagnètiques.
- Va enfocar les ones amb miralls còncaus metàl·lics.
- Va posar una pantalla amb un forat petit per difractar les ones.
- Va poder replicar fenòmens d'interferència, creant així ones estacionàries¹⁶.

¹⁶ **Ones estacionàries:** ones generades per la interferència de dues ones amb la característica que es manté oscil·lant en la mateixa posició de l'espai. Té punts que no oscil·len anomenats nodes mentre que els que oscil·len s'anomenen ventres o antinodes.

De les ones estacionàries, va ser capaç de mesurar la distància entre els seus nodes per poder trobar la longitud d'ona. Coneixent la freqüència d'oscil·lació del camp magnètic, va ser capaç de calcular la velocitat d'aquestes ones, confirmant així que viatjaven a la velocitat que Maxwell havia predit, i que era la mateixa que la de la llum.

Gràcies a tots aquests experiments, Hertz es va atrevir a confirmar que la llum és una ona electromagnètica i que, per tant, la teoria electromagnètica de Maxwell és certa, revolucionant així la ciència i marcant un abans i un després en la història de la física.

Hertz també va observar que, si les terminals del circuit on les espurnes eren generades s'il·luminaven amb llum ultraviolada, les espurnes arribaven a una major distància (tenien major energia cinètica) que si es trobessin a les fosques o il·luminades per altres tipus de llums. Hertz, però, va ser incapaç de donar una explicació a aquest fenomen (ara anomenat efecte fotoelèctric) amb la teoria de les ones electromagnètiques, marcant amb aquest misteri el camí que seguiria la física durant el segle posterior.

Abans de passar al segle xx, però, toca parlar de **Gustav Robert Kirchhoff**, al qual hem fet menció anteriorment, ja que el seu treball en termodinàmica és el predecessor de la teoria quàntica de Planck. A ell se li atribueixen les primeres explicacions sobre les línies de Fraunhofer que apareixen a l'espectre solar i que són conseqüència dels gasos emesos per l'atmosfera del Sol.

L'any 1859, Kirchhoff va idear la llei de radiació tèrmica, on exposa que un cos en equilibri termodinàmic¹⁷ irradia la mateixa potència que absorbeix. Per tant, un cos ideal que absorbeix tota la radiació que li arriba ha d'irradiar el 100% d'aquesta energia. A aquest cos el va anomenar cos negre, degut al color que ha de tenir per absorbir tota la radiació que li arriba (la majoria de cossos, però, no tenen aquesta característica). Els cossos selectius (la majoria dels cossos) varien la seva radiació segons la temperatura i la longitud d'ona. Els cossos grisos irradien energia de manera proporcional a la dels cossos negres per a totes les longituds d'ona.

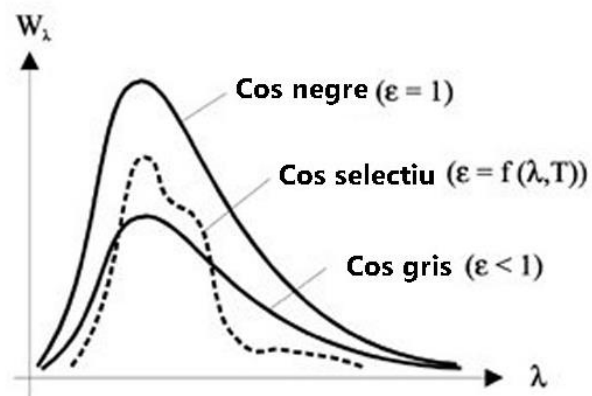


Figura 3.65. Representació actual de la radiació de cossos en equilibri termodinàmic.

Segons aquesta teoria (figura 3.65), W_λ és l'energia irradiada, λ la longitud de l'ona i ϵ la relació entre la radiació d'un cos i la radiació d'un cos negre a la mateixa temperatura. Per als cossos selectius, ϵ s'expressa com una funció de les variables λ i T , ja que, com hem dit abans, la proporció no es manté igual per a totes les longituds d'ona.

Kirchhoff va estudiar la radiació d'aquests cossos experimentalment, però va ser incapaç de trobar la funció que representa aquesta per a qualsevol cos negre, tasca que seria completada mig segle més tard per Max Planck.

¹⁷ **Equilibri termodinàmic:** un cos o sistema es troba en equilibri termodinàmic quan és incapaç d'experimentar un canvi d'estat o procés termodinàmic espontàniament.

3.5. Segle xx: neix la quàntica

El primer quart del segle xx és probablement el període més rellevant de la història de la física, amb la creació de la teoria quàntica de Planck, les aportacions de ments brillants com **Niels Henrik David Bohr**, i la revolucionària teoria de la relativitat d'Einstein. En aquest segle, els científics es van adonar que amb la física proposada per Newton era impossible explicar fenòmens a nivells subatòmics i velocitats tan grans com és la de la llum. Tots aquests descobriments van permetre el naixement de la mecànica quàntica l'any 1925, amb **Richard Phillips Feynman**, **Werner Karl Heisenberg**, **Max Born**, **Ernest Pascual Jordan**, **Paul Adrien Dirac** i **Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger**.

La llum és una partícula?

A principis del segle xx, l'estudi de la llum va començar a prendre una nova direcció amb la recerca del científic **Max Planck**. Planck va estudiar la radiació dels cossos negres de Kirchhoff i va determinar la funció que relacionava la seva radiació amb la longitud d'ona, que és la següent:

$$E_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

λ : longitud d'ona

h : constant de Planck

c : velocitat de la llum

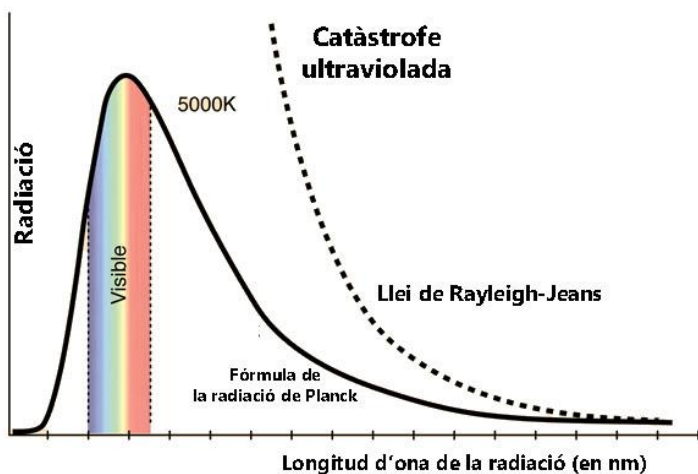
k : constant de Boltzmann¹⁸

T : temperatura del cos negre



“Crec que puc dir amb seguretat que ningú entén la mecànica quàntica”
-Richard Feynman (1918-1988)

Fins al moment, la millor aproximació era la de **John William Strutt** (també conegut com a lord Rayleigh) i **James Hopwood Jeans**. Aquesta donava valors molt encertats per a les longituds d'ona més grans, però per les més petites apareixia el que es coneix com a catàstrofe ultraviolada. Aquest fenomen diu que, a mesura que disminueix la longitud d'ona, l'energia irradiada tendeix a infinit, fet il·lògic i que no s'observa de forma experimental.



Durant els seus experiments, Planck va trobar que l'energia que és irradiada pels cossos sempre és múltiple d'un valor molt petit, és a dir, que augmenta en forma de valors discrets. Aquest fet va contradir la teoria ondulatoria i la seva característica analògica, i va plantejar un nou misteri en el camp de la física. Aquesta petita quantitat es correspon amb el nombre que ara coneixem com a constant de Planck (h):

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Figura 3.66. Comparació entre la funció de Planck i l'aproximació de Rayleigh-Jeans per a la radiació de cossos en equilibri termodinàmic.

¹⁸ **Constant de Boltzmann:** constant física que relaciona la temperatura absoluta i l'energia.

Després que Hertz descobrís l'efecte fotoelèctric, el físic hongarès **Philipp Eduard Anton von Lenard** va dur a terme una sèrie d'experiments l'any 1902. Va arribar a explicar que l'efecte fotoelèctric apareix perquè quan una superfície metàl·lica és il·luminada allibera partícules carregades elèctricament, molt similars als electrons, que és el que van resultar ser. Va descobrir que l'energia cinètica dels electrons alliberats pels metalls no depèn de la intensitat de la llum, com se suposava segons els coneixements de l'època. De fet, l'energia cinètica dels electrons depèn de forma proporcional a la freqüència de la llum. A més, la intensitat afecta el nombre d'electrons alliberats, també de manera proporcional. Aquest comportament no es pot explicar amb la física clàssica, és a dir, amb el model ondulatori de la llum.

Amb això i el descobriment de Planck sobre que l'energia de la llum està quantitzada (augmenta la seva energia en valors discrets), va sorgir un nou repte que la física clàssica no podia explicar:

Per què la llum de vegades no actua com una ona?

La llum és una ona electromagnètica i una partícula

En 1905, el reconegut físic **Albert Einstein** va publicar el seu treball sobre l'efecte fotoelèctric on planteja, com Planck, que la llum és emesa en paquets que adopten un valor discret, anomenats "quanta" d'energia, i reintrodueix la teoria que la llum és una partícula. A diferència del model de Newton, segons el qual la llum ocupa un lloc en l'espai en forma de corpuscles, el d'Einstein ho fa amb aquests paquets d'energia.

En el seu treball, Einstein va donar explicació al fet, fins ara incomprendible, que l'energia dels electrons emesos en l'efecte fotoelèctric depèn de la freqüència, segons la següent fórmula:

$$E = h\nu$$

E : energia del fotó

h : constant de Planck

ν : freqüència

Per a qualsevol metall que desprengui electrons per efecte fotoelèctric, s'aplica la fórmula que inclou la seva funció de treball Φ ¹⁹, de manera que es pot trobar l'energia cinètica real dels electrons.

$$E_k = h\nu - \Phi$$

En aquest treball, Einstein va plantejar per primer cop la naturalesa dual de la llum (la llum és una ona i una partícula), però, a causa de la seva manca d'intuïció i la novetat del concepte, va passar un temps fins que la comunitat científica va acceptar-ho. El 1921, li va ser atorgat el premi Nobel per la seva explicació de l'efecte fotoelèctric.

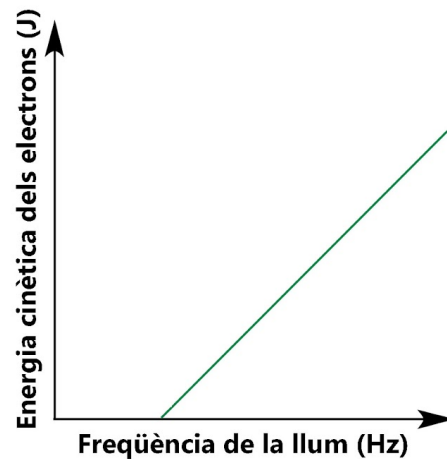


Figura 3.67. Relació entre l'energia dels electrons alliberats per un material i la freqüència de la llum amb què és il·luminat.

¹⁹ **Funció de treball (Φ):** energia mínima que cal proporcionar a un àtom d'una substància determinada per alliberar un electró de la seva superfície.

3.6. La visió actual de la llum

A principis del segle xx, Einstein va revolucionar el món científic amb la idea que la llum és una ona i una partícula alhora, debat que ja es considerava resolt des del segle anterior. En el seu treball sobre l'efecte fotoelèctric, Einstein va utilitzar el concepte de partícula per explicar alguns dels fenòmens que es donaven en les ones electromagnètiques. A diferència de Newton, Einstein va prendre la definició de partícula com a una quantitat minúscula d'energia, en comptes d'un punt en l'espai, ajudant-se dels descobriments anteriors de Max Planck i la teoria quàntica.

Què és la llum

Les partícules, que segons Einstein componen la llum, es coneixen avui en dia amb el nom de fotons. Es considera que un fotó és una quantitat discreta d'energia sense massa que es comporta en molts casos com una ona. Per tant, un raig de llum és un feix de milions de fotons desplaçant-se per l'espai en forma d'ona.

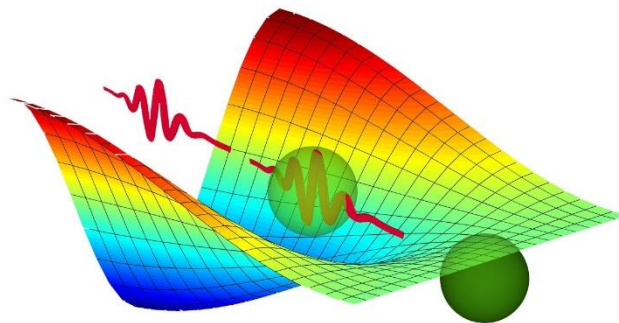


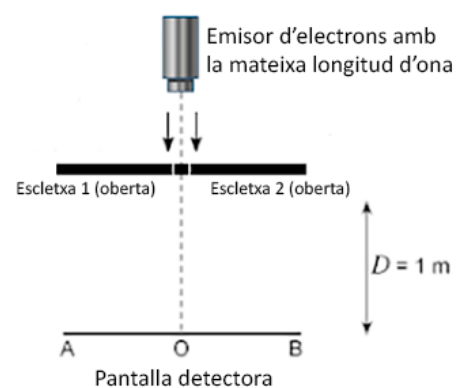
Figura 3.68. Representació gràfica d'un fotó actuant com a ona electromagnètica i partícula al mateix temps.

Més tard, l'any 1924, **Louis de Broglie** va proposar la hipòtesi que, de la mateixa manera que els fotons, totes les partícules amb una massa m i en moviment, és a dir, amb una velocitat v , poden presentar característiques i comportaments ondulatoris, relacionats per la fórmula:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Aquesta hipòtesi implica que tota la matèria té una longitud d'ona (λ) associada i, per tant, pot comportar-se com una ona i com una partícula, exactament com la llum. La hipòtesi de De Broglie va ser comprovada en 1927, utilitzant electrons en una versió quàntica de l'experiment de la doble esclatxa de Young.

Es disparen partícules individuals (electrons) a dues esclatxes de mida nanoscòpica. Tot i ser disparats de forma particular, els electrons formen un patró d'interferència en la pantalla detectora, de la mateixa forma que un raig de llum.



l'experiment de la doble esclatxa amb electrons.

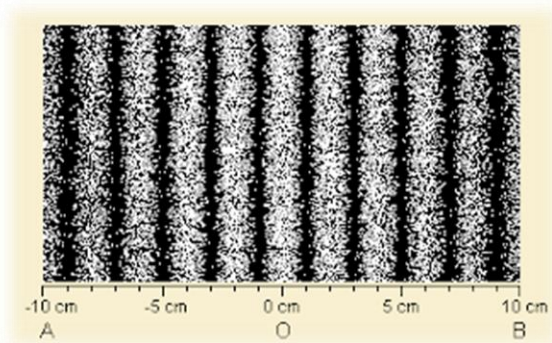


Figura 3.70. Distribució final de la projecció de centenars d'electrons disparats individualment.

Els resultats d'aquest experiment no només van confirmar la hipòtesi de De Broglie, sinó que van permetre observar per primer cop la naturalesa dual de partícules subatòmiques de forma directa.

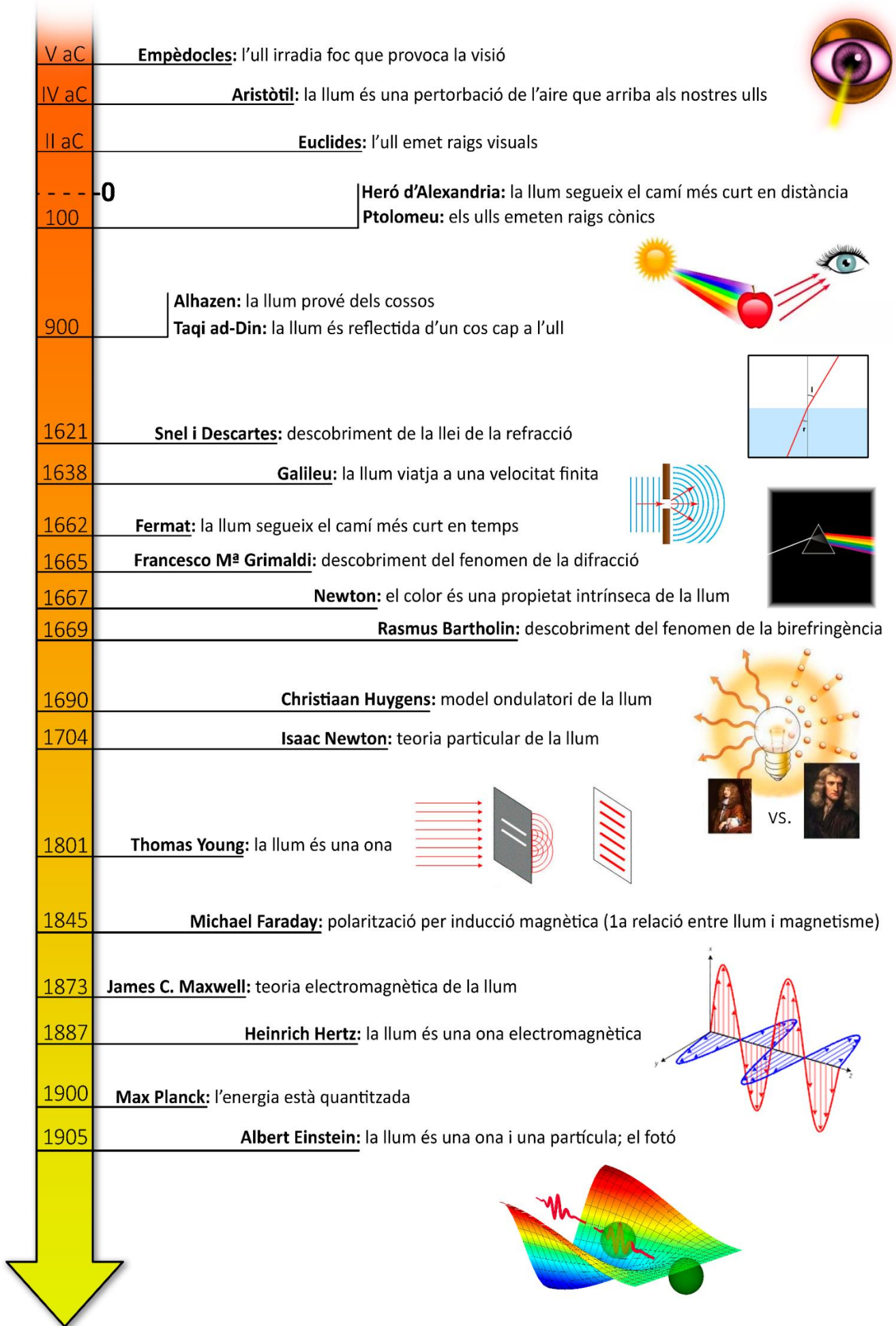
La ciència ha fet un llarg camí per arribar a la conclusió que...



La llum té una naturalesa dual:

D'una banda es comporta com una ona electromagnètica, i d'altra banda té propietats corpusculars, és a dir, la seva energia es transmet en paquets d'energia quantitzats, que són els fotons.

Per concloure aquesta part del treball, a continuació adjuntem un esquema cronològic que hem dissenyat, on es resumeixen els descobriments històrics que han conduït a la definició actual de la llum.



La importància de la velocitat de la llum

«Això està molt bé, heu fet un estudi sobre la velocitat de la llum i els experiments històrics per mesurar-la, però de veritat calia dedicar tot un treball de recerca a aquest tema?»

Doncs sí. Potser per a molta gent la velocitat de la llum no significa res, és una simple xifra (299 792 458 m/s) o una lletra minúscula (*c*), no gaire diferent de qualsevol altra velocitat. Però, què és el que fa realment especial el valor de la velocitat de la llum, i no la velocitat d'un Ferrari?



Figura 3.71. Cotxe de la companyia d'automòbils Ferrari.



Figura 3.72. Il·lustració d'un feix de llum.

Per començar, el Ferrari té massa (és un cos), mentre que la llum no en té. A més, el fet que tinguem una lletra (*c*) per definir la velocitat de la llum (i no la del Ferrari), ja ens fa pensar en la seva particularitat. Per cert, se simbolitza amb aquesta lletra perquè ve del llatí *celeritās* (celeritat, rapidesa).

Però el títol més important que sosté la velocitat de la llum és el de constant universal. Ara bé, què és realment una *constant universal*? Les constants universals són aquells valors que no varien mai, sense importar la seva situació. En paraules d'Albert Einstein, «la velocitat de la llum és una constant al buit». No obstant això, quan la llum no es transmet pel buit, la seva velocitat varia en funció de l'índex de refracció del medi pel qual viatja, que ve donat en funció de la seva permeabilitat magnètica i la seva permitivitat elèctrica. Per tant, quan la llum no està al buit es transmet a una velocitat inferior a *c*.

El nombre 299 792 458 m/s és el valor reconegut oficialment pel Sistema Internacional d'Unitats per a aquesta constant i, des del 21 d'octubre de 1983, es va considerar el metre com una unitat derivada d'aquesta: «*The metre is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of 1/299 792 458 of a second*» (El metre és la longitud del trajecte recorregut per la llum en el buit durant un interval de temps de 1/299 792 458 segons). Òbviament, el valor de *c* també ha servit per precisar el significat de la unitat anys llum, ja que aquesta és la distància que recorre la llum durant un any terrestre, i ens ha sigut útil també per fer avenços en la tecnologia de les comunicacions (per exemple, la fibra òptica transmet informació a la vertiginosa velocitat de la llum).

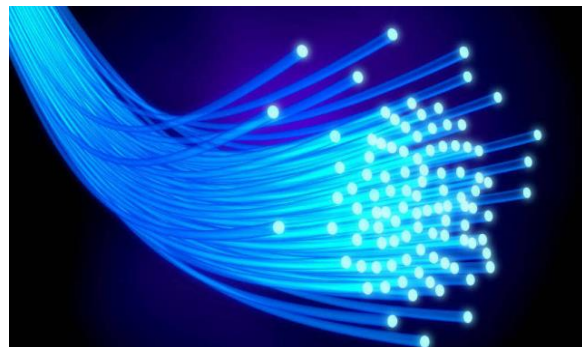


Figura 3.73. Il·lustració de la llum viatjant per un cable de fibra òptica.

La velocitat del Ferrari no és un valor fix, és més, fins que arriba a la seva velocitat màxima ha hagut de passar per totes les velocitats anteriors (ha hagut de partir de 0 i ha anat incrementat la velocitat: 1,2,3,4,5... km/h). Per molt ràpidament que ho faci, sempre hi ha hagut una acceleració per augmentar la seva velocitat.

Doncs bé, amb la llum no és així. Quan encenem un llumí, la llum que emet el foc ja viatja a 299 792 458 m/s des de l'instant inicial, i en cap moment varia. La llum mai passa per un estat de repòs: des de l'instant de la seva emissió, aquesta es transmet immediatament a una velocitat (c) constant.

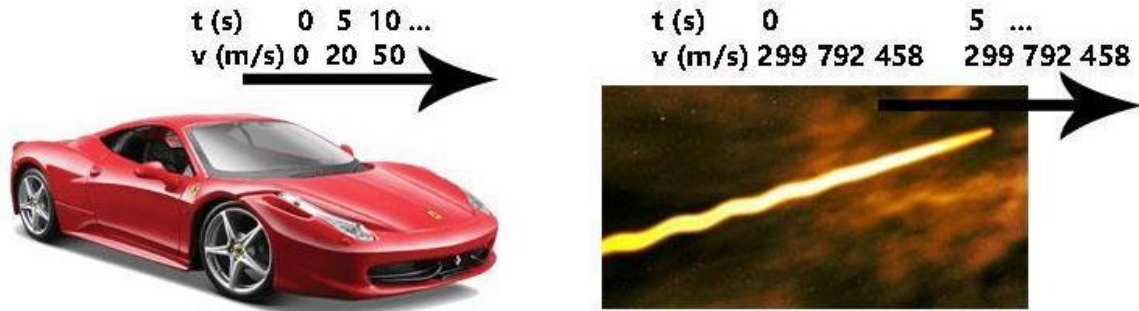


Figura 3.74. La llum és emesa a 299 792 458 m/s des de l'instant en què apareix, mentre que el Ferrari ha d'accelerar des dels 0 m/s.

Posem un altre exemple: la Clara i el Teo volen mesurar les seves forces llançant una pilota com més lluny millor. La Clara comença quieta, i llança la pilota a 100 km/h (tenen un velocímetre que els ha deixat el pare de la Clara, que és policia municipal). Una velocitat de 100 km/h està molt bé, però el Teo és més intel·ligent, i s'ha enfilat al cotxe de la seva mare. Així, tot i que el Teo no és tan fort com la Clara, ha aconseguit llançar la pilota a 170 km/h, ja que el cotxe de la seva mare ja anava a 100 km/h en el moment del llançament.

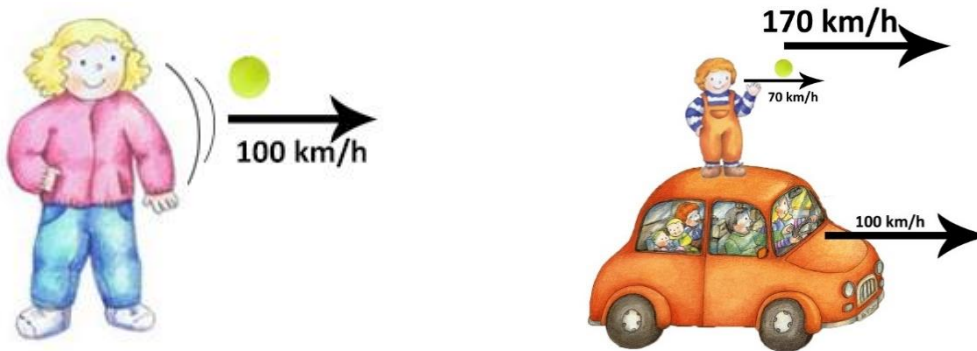


Figura 3.75. Quan el Teo llença la seva pilota, ja porta una velocitat i, per tant, surt disparada amb major rapidesa que la de la Clara.

Com que la Clara considera que el Teo ha fet trampes, repeteixen l'experiment amb una modificació: en comptes de llançar una pilota, hauran d'encendre una llanterna. La Clara comença i, sorprenentment, la llum assoleix el valor de 299 792 458 m/s. Ara li toca al Teo, que no ha après res i segueix volent fer trampes. Agafa el cotxe de la seva mare i, quan arriba a 100 km/h, encén la llanterna. Ah! Sorpresa! La llum viatja a la velocitat de la llum (valgui la redundància), sigui quina sigui la velocitat inicial.

Qui és més llest ara, eh Teo?

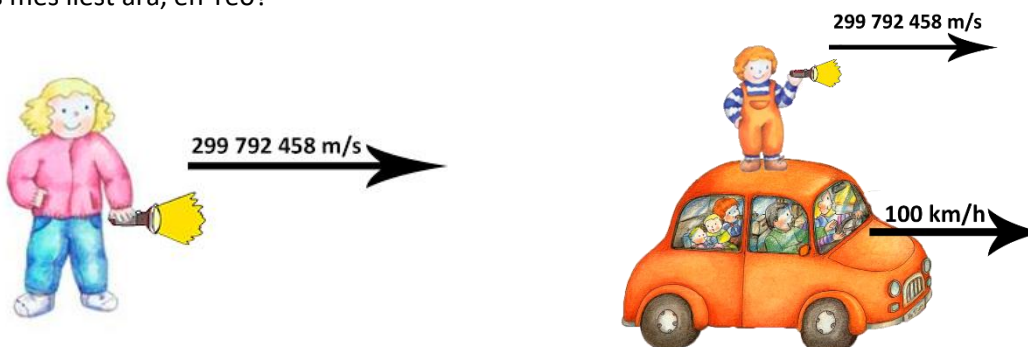


Figura 3.76. La llum sempre viatja a la mateixa velocitat, independentment de la velocitat inicial de la seva font.

El sostre de la velocitat

Com hem vist en l'exemple anterior, c és el valor màxim que pot adoptar qualsevol velocitat; és la velocitat sostre, el límit (si més no en el nostre univers, que se sàpiga).

Les partícules que tenen massa necessiten energia per poder accelerar. Com més a prop es troba una partícula de la velocitat de la llum, més energia li cal per accelerar. Això es deu al fet que les partícules augmenten la seva massa a mesura que augmenta la seva velocitat, és a dir, com més ràpid viatgi una partícula, més massa tindrà. És per això que, si volguéssim accelerar un electró a la velocitat de la llum, necessitaríem una quantitat d'energia infinita, ja que l'electró es tornaria infinitament massiu, la qual cosa és impossible. Els fotons, en canvi, sí que poden viatjar a la velocitat de la llum, com és el cas de totes les partícules sense massa.

La següent fórmula relaciona la massa relativista d'un cos (massa que varia segons el seu sistema de referència) amb la seva velocitat:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

m : massa relativista del cos

m_0 : massa del cos en repòs

v : velocitat del cos

c : velocitat de la llum en el buit

D'acord amb aquesta relació de velocitat i massa, si la velocitat de l'objecte tendeix a c , com seria el cas si l'acceleréssim a la velocitat de la llum, la massa tendeix a infinit. Per tant, requereix infinita energia per accelerar-la. Matemàticament, això és representat pel següent límit:

$$\lim_{v \rightarrow c} \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = +\infty$$

Segons Einstein, la perspectiva d'un fotó és totalment diferent de la nostra. D'acord amb ell, sempre està viatjant a una velocitat infinita, ja que pot anar on vulgui en exactament 0 segons del seu temps. Per un fotó no existeix el temps; tot s'esdevé instantàniament. Això es deu al fet que, si algú fos capaç de viatjar a una velocitat propera a la de la llum, notaria que el temps passa més lent comparat amb la percepció del temps d'algú que no es mou. En l'hipotètic cas que algú pogués viatjar a la velocitat de la llum, modificaria totalment l'espai-temps: en no poder viatjar més ràpidament, el temps es dilataria fins al punt d'aturar-se. Aquest és un dels motius pels quals no es pot viatjar més ràpidament que c ; el temps no pot anar més lent que quan ja s'ha aturat, i això succeeix en el valor exacte de la constant universal c .

4. Part pràctica

Un cop estudiat el que és la llum, encara ens falta trobar el valor de la seva velocitat per completar la definició. És per això que, en la part experimental d'aquest treball de recerca, ens hem proposat mesurar la velocitat de la llum mitjançant diferents experiments. En l'annex d'aquest document es troba l'explicació de la metodologia emprada per determinar l'error en cada experiment que realitzem.

4.1. Hipòtesis

Abans d'endinsar-nos en la metodologia de les pràctiques que durem a terme, cal establir les hipòtesis que fonamenten els objectius que pretenem complir amb aquesta part del treball, i que són les següents:

- **Hipòtesi 1.** Mesurarem la velocitat de la llum amb diferents mètodes.

Estimem que, amb les pràctiques més modernes, com són la 2 i la 4, els resultats que extraurem seran més fiables i propers al valor exacte de la velocitat de la llum.

- **Hipòtesi 2.** Analitzarem els resultats de cada experiment.

Amb l'experiment 2, obtindrem una major exactitud que amb els altres pel que fa a la proximitat del resultat a c , ja que s'hi empra fibra òptica i materials electrònics precisos que s'utilitzen normalment en dependència amb la velocitat de la llum.

- **Hipòtesi 3.** Compararem els nostres experiments amb els originals.

Especulem que els nostres assajos tindran una aparença prou propera als originals, tot i que els nostres sistemes gaudiran de materials més moderns, i que els valors obtinguts coincidiran amb aquells publicats pels seus autors originals.

- **Hipòtesi 4.** Relacionarem els experiments entre ells.

Creiem que les conclusions que extraurem seran d'una clara decantació envers l'exactitud de les experiències més recents en la seva invenció que no aquelles que van ser ideades segles enrere o aquelles menys rigoroses pel que fa a la precisió del material.

4.2. Trobant c

Avui ja sabem que la llum no viatja a una velocitat infinita, és més, tenim una mesura exacta del seu valor. Sigui com sigui, per arribar a aquest nombre conegut com a c s'han realitzat nombrosos experiments al llarg de la història, alguns dels quals ja hem comentat durant la cronologia de l'estudi de la llum.

L'objectiu del nostre treball de camp és replicar algunes de les experiències més conegudes que han estat emprades per definir c , així com d'altres menys convencionals, per aproximar-nos amb la precisió més gran possible al valor real de la velocitat de la llum.

No obstant això, abans de realitzar qualsevol experiment, és necessari investigar els mètodes per mesurar c que s'han fet durant la història. Hem pogut veure com Galileo, Rømer, Bradley, Fizeau,

Foucault i Michelson van fer sengles mesures, cadascú en el seu temps, obtenint un valor cada cop més acurat.

És durant els segles XIX i XX quan comencen a fer-se mesures més precises de la velocitat de la llum, amb una quantitat innumerable d'experiments. Alguns dels més importants són els següents:

Autor/s	Any	Mètode	Valor obtingut	Error
Marie-Alfred Cornu	1872-1876	Millora de l'experiment de Foucault	300 400 km/s	0,2 %
E. B. Rosa i N. E. Dorsey	1906	Tècnica basada en les constants elèctriques	299 784 km/s	±30 km/s
Mercier	1923	Càlcul de la longitud d'ones estacionàries	299 782 km/s	0,003488 %
Karolus i Mittelstaedt	1928	Cel·la de Kerr	299 778 km/s	±20,0 km/s
Östen Bergstrand	1940-1941	Obturador electroòptic i cel·la de Kerr	299 793,1 km/s	±0,2 km/s
Louis Essen i Gordon Smith	1947	Cavitat de microones	299 792 km/s	±3 km/s
Carl I. Aslakson	1949	Radar utilitzat a la Segona Guerra Mundial	299 794,2 km/s	±1,9 km/s
Edge	1956	Geodímetre	299 792,4 km/s	±0,11 km/s
Keith Davy Froome	1958	Interferòmetre de ràdio	299 792,5 km/s	±0,1 km/s
Kenneth Evenson	1973	Sistema de làsers	299 792,457 km/s	±0,001 km/s

Taula 4.1. Els experiments més rellevants conduïts durant els segles XIX i XX per mesurar el valor exacte c , de 1872 a 1973 (font pròpia).

Diversos grups de científics van continuar modificant els experiments anteriors amb làsers, fibra òptica i rellotges atòmics. Finalment, l'any 1983, la Conferència General de Pesos i Mesures va redefinir el metre i va néixer el valor de c (la constant amb la qual s'anomena la velocitat de la llum) que avui dia es considera exacte: 299 792 458 m/s.

4.3. Experiment 1: Foucault

L'any 1862, en ple auge de la teoria ondulatoria de la llum, Jean Bernard Léon Foucault va donar un valor per la velocitat de la llum de 298 000 km/s, utilitzant un muntatge basat en l'experiència anterior d'Hippolyte Fizeau. Foucault va utilitzar el mateix principi que Fizeau, però va substituir la roda dentada per un mirall rotatori per millorar la precisió de l'aparell i donar un resultat amb un marge d'error del 0,6%.

Aquest experiment consisteix a mesurar la velocitat de la llum trobant el desplaçament angular que fa un mirall en el temps que passa entre que hi incideix per primer cop i el segon, quan és reflectit de tornada.

Material

- Un làser (font de llum)
- Un mirall rotatori
- Un mirall fix
- Un mirall semireflector o *beam-splitter*
- Un microscopi
- Dues lents

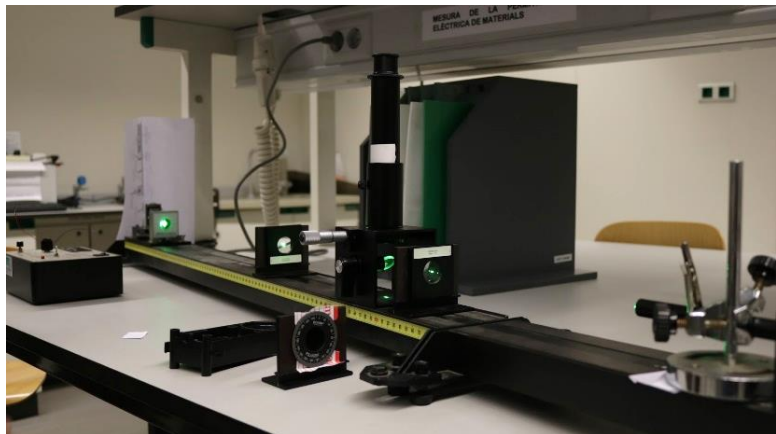


Figura 4.1. Aparell de l'empresa PASCO (font pròpia).

Per fer l'experiment hem emprat un aparell de l'empresa PASCO, proporcionat per la Universitat de Barcelona, el qual inclou tots els elements necessaris (figura 4.1).

Procediment

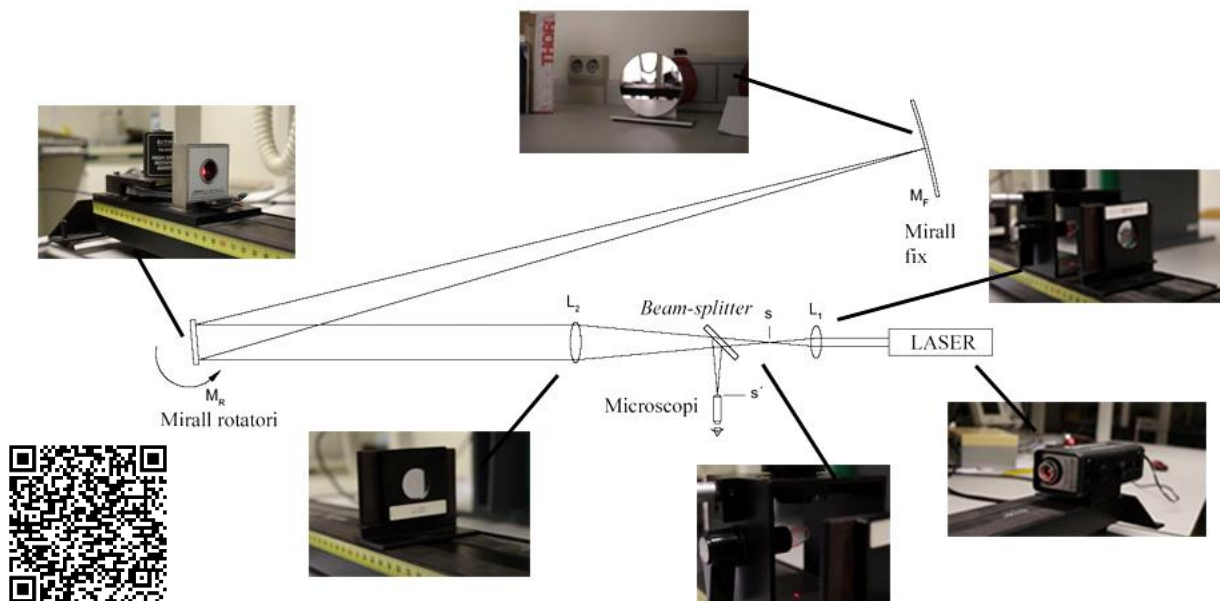


Figura 4.2. Representació esquemàtica del recorregut de la llum a través dels elements del sistema (font pròpia).

El recorregut que fa la llum en aquest experiment és el següent, seguint l'esquema en la figura 4.2:

1. La llum surt del làser i travessa una lent convergent (L_1), que concentra la llum en un punt (s).
2. El feix de llum travessa el mirall semireflectant (*Beam-splitter*), que només deixa passar la llum en aquest sentit.
3. Tot seguit, la llum topa amb la lent convergent (L_2), que torna a eixamplar el feix.
4. En arribar al mirall rotatori (M_r), que es troba en una posició angular inicial, la llum surt reflectida cap a un mirall fix (M_f), el qual es troba lluny del sistema.
5. Des del mirall fix, la llum torna al mirall rotatori, que haurà canviat de posició angular, i la tornarà a reflectir cap a la lent divergent (L_2).
6. La llum concentrada en un punt rebota al mirall semireflector, que ara no permet que la llum el travessi, sinó que la reflecteix, i es dirigeix cap al microscopi, el qual està col·locat perpendicularment al sistema, i és des d'on observarem el punt de llum.

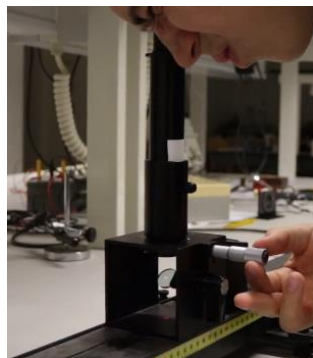


Figura 4.3. Mirall semireflectant dirigint la llum cap al microscopi (font pròpia).

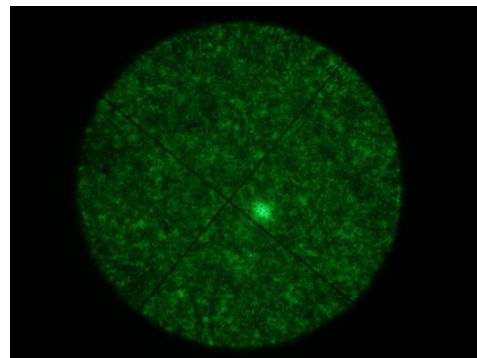


Figura 4.4. Vista des del microscopi amb llum verda (font pròpia).

Un cop tenim la llum al microscopi, cal que desplacem el centre del mirall semireflectant (on es tallen els dos eixos perpendiculars) al punt on rebem la llum (punt verd que destaca en la figura 4.4), i anotem la distància que l'hem mogut.

Tornem a realitzar l'experiència, però aquest cop canviem el sentit del motor que mou el mirall rotatori, de manera que la diferència en la posició del mirall rotatori sigui oposada a la d'abans. Col·loquem l'ull sobre el visor del microscopi i observem que el punt de llum produït pel làser s'ha desplaçat respecte del centre del mirall, on l'havíem situat en la pràctica anterior. D'aquesta manera, si tornem a desplaçar el centre del mirall semireflectant al punt on observem la llum, veurem que aquest ha canviat: hi ha una diferència entre la posició on es rep la llum el primer cop i el segon.

La diferència entre la mesura presa en el primer intent i el segon (quan el mirall gira en el sentit contrari) és equivalent al doble del desplaçament real del mirall rotatori. Per això, quan l'apliquem en la fórmula, l'hauré de dividir entre dos.

Càlculs

Per trobar el valor de c , aquest experiment mesura la variació en la posició angular d'un mirall rotatori en el temps en què reflecteix un raig de llum a un mirall fix a una certa distància i aquest torna.

Seguint l'esquema de la figura 4.5, quan el làser emet un raig i aquest incideix per primer cop en el mirall M_r , surt reflectit cap al mirall M_f formant un angle θ . El raig, doncs, és reflectit d'un punt S de M_f en direcció a M_r i hi incideix formant un angle de 2θ (el doble) amb el raig entrant (a). El cas és el mateix per un raig emès en un instant posterior: incideix per primer cop formant un angle de $\theta + \Delta\theta$ i el raig de tornada incideix en S_1 i forma el doble d'aquest angle amb el d'entrada (b).

L'increment de l'arc, és a dir, la distància entre S i S₁ és, doncs:

$$\Delta S = S_1 - S = D(2\theta_1 - 2\theta) = 2D(\theta + \Delta\theta - \theta) = 2D\Delta\theta$$

D és la distància entre M_f i M_r.

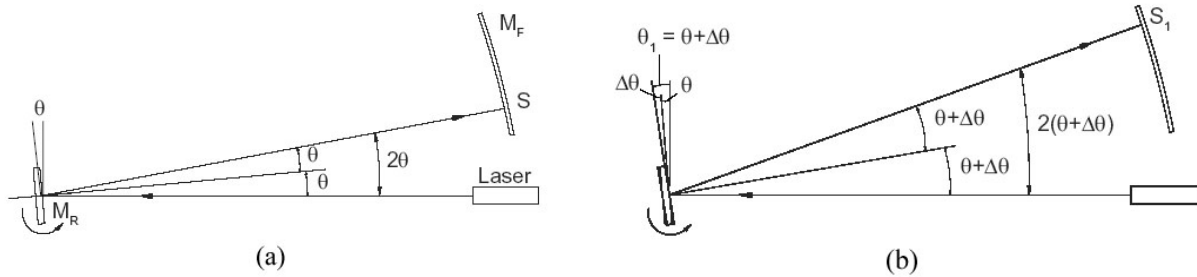


Figura 4.5. Representació esquemàtica del recorregut de la llum en l'experiment.

La mesura de ΔS es fa mesurant en el microscopi Δs', equivalent a Δs i relacionada amb ΔS amb l'augment de formació d'imatges ($\frac{i}{o}$) (equivalent a ($\frac{A}{D+B}$) de la lent L₂.

$$\Delta s' = \Delta s = \left(\frac{i}{o}\right) \Delta S = \frac{A}{D+B} \Delta S$$

Substituint ΔS en la segona equació, per la seva definició en la primera s'obté:

$$\Delta s' = \frac{2DA}{D+B} \Delta\theta$$

I sabent que Δθ és:

$$\Delta\theta = 2D \frac{\omega}{c}$$

El temps que el raig trigarà a anar i tornar ($\frac{c}{2D}$) és igual a la velocitat angular del mirall M_r dividit entre la variació de la seva posició en aquest mateix temps ($\frac{\omega}{\Delta\theta}$).

Una substitució final ens dona l'equació que, amb c aïllada, ens permet arribar al valor de la velocitat de la llum amb les mesures fetes amb el microscopi en el nostre muntatge.

$$c = \frac{4AD^2\omega}{(D+B)\Delta s'}$$

ω: velocitat de rotació del motor (en rad/s).

A: distància entre les lents L₂ i L₁ menys la distància focal de la lent L₁

B: distància entre la lent L₂ i el mirall rotatori M_r.

D: distància entre el mirall rotatori M_r i el mirall fix M_f.

Δs': desplaçament del punt mesurat al microscopi.

En el nostre muntatge, la distància entre el mirall rotatori i el mirall fix (D) era de 9,2 m, la distància entre el mirall rotatori i la lent L₂ (B) era de 0,48 m i la distància A, equivalent a la distància entre L₂ i L₁ menys la distància focal de L₁ (48 mm), era de 0,26 m.

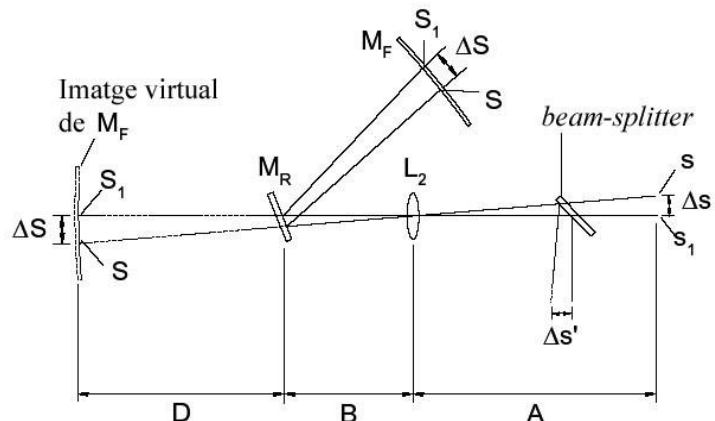


Figura 4.6. Esquema de les distàncies en el muntatge de l'experiment.

Resultats

Intent	Posició inicial del feix de llum (m)	Posició final del feix de llum (m)	Desplaçament del feix de llum (m) $=2 \cdot \Delta s'$	Velocitat obtinguda (m/s)	Error absolut (m/s)
Primer	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$7,40 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^8$	$\pm 6,75 \cdot 10^6$
Segon	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$7,40 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^8$	$\pm 6,75 \cdot 10^6$
Tercer	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^8$	$\pm 5,82 \cdot 10^6$
Quart	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^8$	$\pm 1,74 \cdot 10^6$
Cinquè	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-4}$	$3,18 \cdot 10^8$	$\pm 2,48 \cdot 10^6$
Sisè	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^8$	$\pm 1,74 \cdot 10^6$
Setè	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^8$	$\pm 5,82 \cdot 10^6$
Vuitè	$1,19 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$7,40 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^8$	$\pm 6,75 \cdot 10^6$
Novè	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$7,60 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^8$	$\pm 1,74 \cdot 10^6$
Desè	$1,07 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$3,10 \cdot 10^8$	$\pm 5,82 \cdot 10^6$
Valor mitjà	-	-	$7,56 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^8$	$E_a = \pm 4,54 \cdot 10^6$

Taula 4.2. Recull de les dades i els resultats de l'experiment 1.

Conclusions de l'experiment 1

Tot i no ser exactament igual que el de Foucault, el nostre muntatge ens ha permès trobar un valor per a c d'uns 316 000 km/s amb imprecisió absoluta de $\pm 4,54 \cdot 10^6$ m/s, utilitzant els mateixos principis que ell l'any 1862. Els resultats del nostre experiment donen consistentment un valor per a la velocitat de la llum superior al real. Per tant, sabem que no manca precisió sinó exactitud. Després de diverses revisions dels resultats i el procediment, creiem que això es deu majoritàriament a una desalineació considerable en el muntatge. Aquesta desalineació, i el fet que aquest experiment té per si sol un marge d'error d'un 0,6% (l'error en el valor de l'experiment original de Foucault), és la causa per la qual els nostres resultats no donen un valor exacte per a c , tot i disposar d'una tecnologia més avançada que la que tenia Foucault en l'època.

El més destacable de l'experiment dissenyat per Foucault és la seva relativa simplicitat i gran exactitud, considerant que data del segle XIX. La base d'aquest experiment o el de Fizeau, i el que els fa possibles, és l'ús d'un element rotatori combinat amb una llarga distància. Lluny encara de l'aparició dels primers cronòmetres digitals d'alta precisió, aquests científics van ser capaços de dissenyar experiments que no depenien de la mesura de cap temps, tasca molt difícil a velocitats tan grans com la de la llum, sinó de la mesura de la variació en una posició angular.

4.4. Experiment 2: L'oscil·loscopi

A mesura que la ciència i la tecnologia han anat avançant, s'han creat màquines de tota mena que avui dia ens permeten fer una mesura molt acurada de la velocitat de la llum. En l'experiment següent, farem ús d'un oscil·loscopi (un aparell per a enregistrar i visualitzar gràficament magnituds físiques variables respecte del temps, com els senyals elèctrics dels pols electromagnètics), amb el qual esperem obtenir una mesura molt acurada de c .

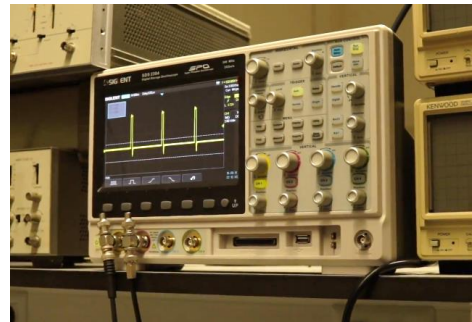


Figura 4.7. Imatge de l'oscil·loscopi que hem utilitzat (font pròpia).

Aquest mètode utilitza el temps (molt petit, captat únicament gràcies a la precisió de la màquina) que triga un feix de llum en viatjar a través d'un cable de fibra òptica d'una distància determinada, de tal manera que en puguem obtenir la velocitat.

Material

Per la realització d'aquest experiment hem utilitzat el següent:

- Un oscil·loscopi
- Un cable de fibra òptica de polimetil metacrilat (índex de refracció: 1,49), de 45 m de llargada i amb 1 mm de diàmetre
- Un generador de polsos de tensió
- Un convertidor de polsos de tensió a llum vermella i viceversa (amb un retràs de 85 nanosegons)
- 3 cables coaxials BNC, amb aïllament de PVC, 6,25 mm de diàmetre exterior, 75 Ohms d'impedància i 0,7 m de longitud

Procediment

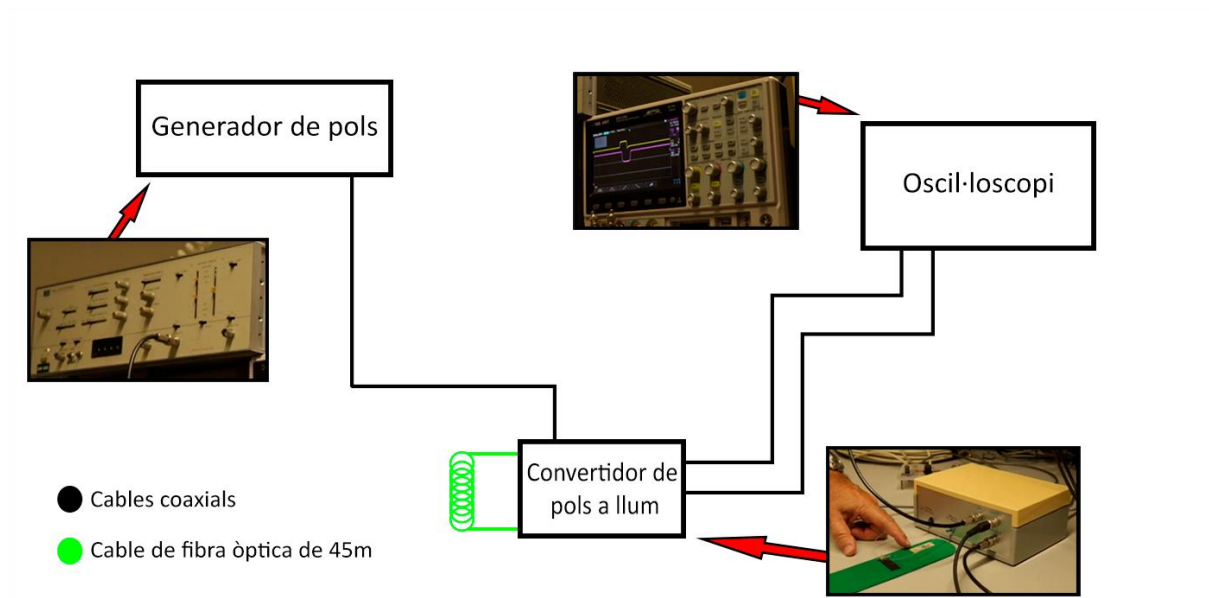


Figura 4.8. Esquema que mostra els diversos elements necessaris per fer aquest experiment (font pròpia).

El procediment en aquest experiment és el següent, segons la figura 4.8:

1. Generem un pols curt i repetitiu de tensió que viatja a través del cable coaxial fins al convertidor.
2. Seguidament, ens assegurem que el convertidor estigui emetent llum vermella polsada i connectem el cable de fibra òptica a l'entrada i la sortida del convertidor.
3. Un cop ens hem assegurat que la llum viatja correctament pel cable de fibra òptica, connectem dos cables coaxials del convertidor cap a dos canals diferents de l'oscil·loscopi.
4. Enguegem l'oscil·loscopi i premem el botó "AutoSetup" perquè ens mostri a la pantalla els senyals dels polsos que rebem del convertidor. Com s'observa en la figura 4.9, el primer senyal que ens marca (groc) és el que rep el convertidor del generador, i el segon (lila) és el que emet el convertidor després que la llum hagi fet el recorregut del cable de la fibra òptica.
5. Un cop tenim els gràfics a la pantalla, ajustem els cursors als punts on comença cada senyal, com s'observa en la figura 4.9. El mateix oscil·loscopi ens ensenya l'increment de temps que hi ha des del primer cursor fins al segon, que és la diferència de temps des que la llum és emesa a la fibra òptica fins que és rebuda a l'oscil·loscopi després d'haver viatjat per tota la distància del cable.



Figura 4.9. Pantalla de l'oscil·loscopi (font pròpia).

Càlculs

En connectar el cable de fibra òptica de 45 m, la màquina marca que la llum ha trigat 310 ns ($3,1 \cdot 10^{-7}$ segons) a fer aquest recorregut. Sabem que el convertidor té un retràs de 85 ns i, per tant, els restarem a aquest temps.

$$t = 310 - 85 = 225 \text{ ns}$$

Ara ja sabem que el temps que triga realment a recórrer el cable és de 225 ns. Un cop tenim aquesta dada, podem utilitzar la simple fórmula de:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{45 \text{ m}}{225 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 200\,000\,000 \text{ m/s}$$

On v és la velocitat, d la distància recorreguda i t el temps que triga a recórrer-la.

Com podem veure, el valor obtingut encara no s'apropa a c . Això és degut al fet que la velocitat de la llum en el buit (la famosa c) no és la mateixa que quan viatja per aquest cable de fibra òptica. L'índex de refracció (n) del cable en qüestió és 1,49. Sabent això, utilitzem la següent fórmula:

$$c = v \cdot n = 200\,000\,000 \cdot 1,49 = 298\,000\,000 \text{ m/s}$$

Resultats

Distància del cable (m)	Temps que triga la llum en recórrer el cable (s)	Velocitat obtinguda (m/s)	Error absolut (m/s)
45,00	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$2,98 \cdot 10^8$	-

Taula 4.3. Recull de les dades i els resultats de l'experiment 2.

Conclusions de l'experiment 2

Després de fer tots els càlculs necessaris per poder interpretar correctament les dades que hem obtingut a través de l'oscil·loscopi, hem assolit un resultat de 298 000 km/s, molt proper a la dada exacta de la velocitat de la llum (299 792 458 m/s). Malauradament, no vam poder obtenir més d'un resultat diferent, ja que només disposàvem d'un cable de fibra òptica de 45 m. Vam realitzar diferents mesures amb el cable, però a causa de la naturalesa dels aparells emprats, el resultat obtingut no varia, motiu pel qual només hem obtingut un valor per a c . Per això mateix, no hem pogut determinar la precisió del procediment, però sabem que és ben exacte, amb una desviació respecte del valor real de c del 0,6%.

Els factor principal pel qual ens hem quedat una mica enrere de valor real de c és el fet que la seva mesura es pren en un cable de fibra òptica en comptes de fer-lo en el buit. La fibra òptica té defectes provinents del seu procés de fabricació que fan que l'índex variï lleugerament al seu llarg i, per tant, el que utilitzem sigui només una aproximació. L'oscil·loscopi en canvi no dona un error perceptible ja que està calibrat internament amb un oscil·lador de quars²⁰. Tot i això, hem quedat satisfets amb l'exactitud del resultat, tenint en compte que és l'experiment més rigorós de tots els que hem fet.

4.5. Experiment 3: El microones

Abans de res, cal esmentar que aquest experiment és casolà i poc rigorós per les dificultats que presenta la presa de dades, que sovint no són prou clares. L'objectiu principal d'aquesta experiència és demostrar que és possible trobar un valor relativament exacte per a c amb l'ús d'objectes quotidians. És una demostració completament anecdòtica, ja que, sense el coneixement previ de la velocitat de la llum i les seves propietats, no seria possible dur-lo a terme.

James Clerk Maxwell proposa al segle XIX la Teoria Electromagnètica. Aquesta teoria sosté que la llum, el magnetisme i l'electricitat són part d'un mateix camp; el camp electromagnètic, pel qual les ones es mouen i es propaguen en forma d'ones transversals. En conseqüència, les microones i les ones de la llum tenen la mateixa velocitat. Sabent això, podem fer un experiment casolà per determinar la velocitat de la llum amb un microones i una simple fórmula matemàtica.

²⁰ **Oscil·lador de quars/cristalls:** Circuit electrònic que genera un senyal de freqüència molt precisa utilitzant la ressonància mecànica d'un cristall vibratori.

Material

Per fer aquest experiment necessitem el següent:

- Un microones del qual sabem la freqüència de les ones que genera
- Un tros de cartró pla, amb unes dimensions aproximades de 15 x 20 x 0,5 cm
- Aigua
- Un regle
- Un suport per evitar que el cartró giri dins del microones

Procediment

1. Per dur a terme aquest experiment, modifiquem el microones de manera que no pugui rotar, traient el plat giratori que solen contenir els microones i col·locant-hi un suport fix. En el nostre cas utilitzarem una base de cartró.
2. Mulem amb aigua de l'aixeta el tros de cartró, fins que quedi ben impregnat de manera homogènia per tota la superfície, i el posem a sobre del suport. El fem al microones entre 15 i 30 segons a una freqüència determinada (depenent del microones pot tenir unes freqüències diferents, però en el nostre cas és de 2450 MHz).
3. Retirem el cartró del microones i observem que hi ha punts més secs i punts més mullats, però segueixen un patró concret que es va repetint. Busquem el centre de les seccions més seques o de les més mullades, i mesurem les distàncies entre ells, com en la figura 4.11. Aquesta mesura correspon a la meitat de la longitud d'ona de les microones (que viatgen a la velocitat de la llum i que, per tant, les mesures són iguals a la meitat de la longitud d'ona de la llum)²¹.



Figura 4.10. Imatge de la col·locació del tros de cartró en el microones (font pròpia).

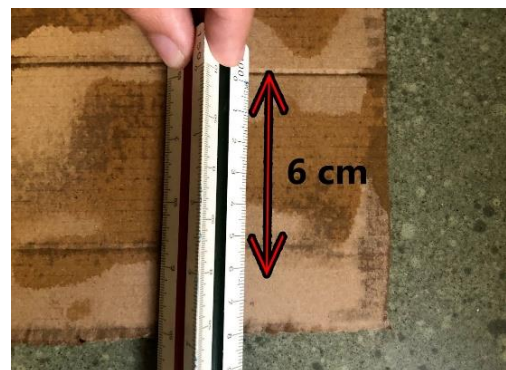


Figura 4.11. Imatge que mostra la mesura que s'ha de prendre en aquest experiment (font pròpia).

Càlculs

En aquest experiment participen les següents variables:

λ : longitud d'ona (el doble de la distància entre les diferents seccions mullades o seques, en metres)

f : freqüència (la que ens indica el microones, en Hertz)

v : velocitat (a la que es propaguen les ones, en metres per segon)

c : velocitat de la llum (la incògnita que volem aclarir, en metres per segon)

Sabent la fórmula de la velocitat de propagació de les ones respecte de la seva longitud ($v = \lambda \cdot f$), podem substituir-la per la velocitat de la llum, ja que aquesta es comporta com una ona:

$$c = \lambda \cdot f \text{ (m/s)}$$

²¹ En l'annex d'aquest treball es troben la resta d'imatges corresponents als diversos assajos d'aquest experiment.

Així doncs, substituïm λ per les mesures obtingudes i les multipliquem per 2, ja que aquestes corresponen a mitja longitud d'ona, com mostra la figura 4.12.

El magnetró del nostre microones, com el de tots els microones comercials, té una freqüència de $2,45 \cdot 10^9$ Hz.

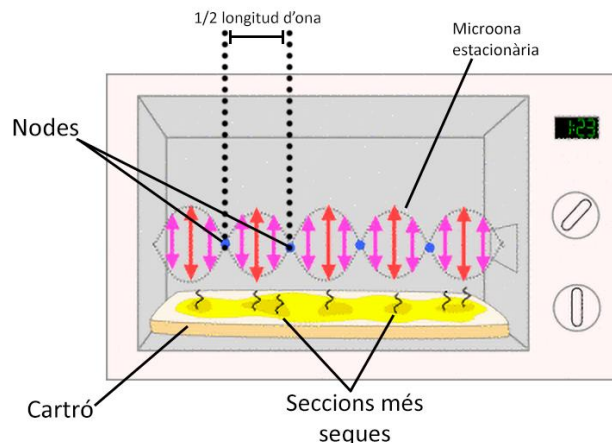


Figura 4.12. Esquema el qual mostra què s'esdevé en el microones quan realitzem aquest experiment.

Resultats

Intent	Distància entre les marques (m)	Resultat (m/s)	Error absolut (m/s)
Primer	$6,90 \cdot 10^{-2}$	$3,38 \cdot 10^8$	$\pm 3,40 \cdot 10^7$
Segon	$5,70 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^8$	$\pm 2,50 \cdot 10^7$
Tercer	$6,50 \cdot 10^{-2}$	$3,19 \cdot 10^8$	$\pm 1,50 \cdot 10^7$
Quart	$6,00 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^8$	$\pm 1,00 \cdot 10^7$
Cinquè	$6,00 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^8$	$\pm 1,00 \cdot 10^7$
Valor mitjà	$6,20 \cdot 10^{-2}$	$3,04 \cdot 10^8$	$E_a = \pm 1,88 \cdot 10^7$

Taula 4.4. Recull de les dades i els resultats de l'experiment 3.

Conclusions de l'experiment 3

Com hem esmentat, aquest experiment casolà és força imprecís i inexacte, però és especial pel fet que pot ser dut a terme per qualsevol ment curiosa que disposi d'una cuina amb microones i uns coneixements bàsics per relacionar conceptes com la freqüència de les microones amb la velocitat de la llum. Tot i que al principi crèiem que ens seria fàcil distingir els patrons d'interferència de les microones sobre el cartró mullat, de vegades ens vam trobar davant d'un resultat molt abstracte i complicat de desxifrar, fins que vam deduir que l'aigua s'estava assecant massa i vam reduir el temps el qual s'exposava a les ones.

Pel que fa als resultats que hem obtingut, observem que aquests varien considerablement i que, per tant, aquest no és un experiment precís (amb una imprecisió absoluta de $E_a = \pm 1,88 \cdot 10^7$ m/s). Comparar els resultats amb el valor real de c ens permet determinar que l'experiència no és gaire exacta, desviant-se del valor real un 1,4%.

Concloem doncs, que es tracta d'un experiment assequible i curiós que demostra que la llum i la seva velocitat estan constantment influint en la nostra vida quotidiana. Hem vist, a més a més, que no és tan difícil trobar-ne el valor, tot i que amb una imprecisió i desviació força elevades.

4.6. Experiment 4: La Lluna

Mentre buscàvem més maneres de trobar c , vam trobar a la bibliografia que una persona tenia una afició molt peculiar. Resulta que existeix un programa creat per Joe Taylor, guanyador del premi Nobel de Física l'any 1993, que, amb l'equipament adequat, permet enviar una ona de ràdio a la Lluna (la qual viatja a la mateixa velocitat de la llum, en ser una ona electromagnètica). Aquesta ona rebota i torna cap a la Terra, on és captada per un altre posseïdor d'aquest programa i equipament.

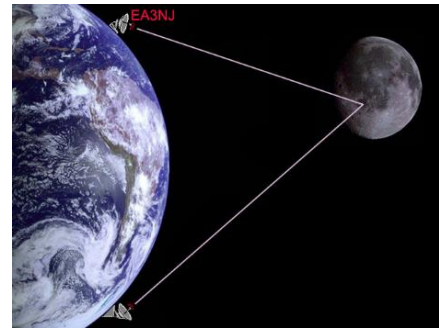


Figura 4.13. Representació esquemàtica del viatge que fa l'ona de ràdio.



Figura 4.14. En Joan Bertran utilitzant el seu aparell de ràdio (font pròpia).

Hem tingut la sort de conèixer una de les poques persones que a Catalunya es dedica a fer això, anomenat Joan Bertran (de pseudònim EA3NJ en el món de la ràdio), enginyer de telecomunicacions i professor a la Universitat Politècnica de Catalunya. Gràcies al seu equipament i al programa de Taylor, ha contactat amb més de 400 persones de països arreu del món, i ha guanyat més de 500 premis en relació a aquest programa. Ell ens ha ensenyat el funcionament de la seva maquinària, la qual ens ha permès fer una altra mesura de la velocitat de la llum.

Material

Per la realització d'aquest experiment és necessari el material següent:

- Una estació radiofònica que disposi d'aparells de radiocomunicació (figura 4.14) i antenes capaces d'arribar a la Lluna amb ones de ràdio (figura 4.15).
- Una plataforma de comunicació amb altres estacions radiofòniques a través d'internet.
- Un programa d'ordinador que detecti la diferència de temps entre l'emissió i la recepció de l'ona.



Figura 4.15. Fotografia de les antenes necessàries (font pròpia).

Procediment

1. Situem l'antena emissora enfocada envers la Lluna (cal saber la distància entre la Terra i el satèl·lit en aquell precís moment) i hi emetem un feix continu d'ones de ràdio. Existeix un observatori americà que cada dia calcula la distància entre la lluna i la terra. En el nostre cas, la distància era de $3,60 \cdot 10^8$ m.
2. Comunicuem a la resta d'internautes radioaficionats que estem emetent una ona a la Lluna, i esperem que algú ens respongui.
3. Quan alguna estació de ràdio d'arreu del món contesti a la nostra crida, el programa ens facilitarà el temps que ha passat des que hem emès l'ona fins que ha estat rebuda. Totes les estacions enregistrades oficialment disposen de la seva geolocalització.

4. Responem al nostre interlocutor dient que hem rebut el seu missatge de resposta, i tallem la comunicació.

Càlculs

Per obtenir el valor que busquem, que és una velocitat, necessitem realitzar un càlcul molt senzill: dividir distància (d), en metres, entre temps (t), en segons.

La distància recorreguda per l'ona que hem emès és la que hi ha entre la nostra posició (Vilanova i la Geltrú, Catalunya, Espanya), la Lluna, i de tornada a la Terra (ens han respost des d'Itàlia). El que succeeix és que la distància entre Espanya i Itàlia (o qualsevol punt del planeta) és tan petita comparada amb la distància de la Terra a la Lluna, que la considerem negligible. Així doncs, l'espai recorregut per l'ona correspon a la distància que hi ha entre la Terra i la Lluna en aquell dia, dos cops (d'anada i de tornada). Aquest valor, juntament amb l'increment de temps que ens ha donat el programa i que correspon al que triga l'ona de ràdio en anar i tornar, podem trobar la velocitat de la llum:

$$c = \frac{d}{t} = \frac{(3,6 \cdot 10^8) \cdot 2}{1,98 \text{ s}} = 363 \text{ 636 363,64 m/s}$$

Resultats

Intent	Temps que triga la llum en anar a la Lluna i tornar (s)	Velocitat obtinguda (m/s)	Error absolut (m/s)
Primer	1,60	$4,50 \cdot 10^8$	$\pm 8,60 \cdot 10^7$
Segon	1,80	$4,00 \cdot 10^8$	$\pm 3,60 \cdot 10^7$
Tercer	2,70	$2,67 \cdot 10^8$	$\pm 9,70 \cdot 10^7$
Quart	2,00	$3,60 \cdot 10^8$	$\pm 4,00 \cdot 10^6$
Cinquè	1,80	$4,00 \cdot 10^8$	$\pm 3,60 \cdot 10^7$
Sisè	2,00	$3,60 \cdot 10^8$	$\pm 4,00 \cdot 10^6$
Valor mitjà	1,98	$3,64 \cdot 10^8$	$E_a = \pm 4,38 \cdot 10^7$

Taula 4.5. Recull de les dades i els resultats de l'experiment 4.

Conclusions de l'experiment 4

Quan analitzem els resultats d'aquest experiment queda clar que els resultats difereixen molt entre ells i respecte de la velocitat real de la llum, donant així una gran dispersió i, per tant, imprecisió. Això es deu a diversos factors:

- En primer lloc, i més important, es troba el fet que el software WSJT 9.7, creat pel premi Nobel en física Joseph Hooton Taylor i emprat per dur a terme tot el procés d'emetre les ones de ràdio i captar la resposta, no està dissenyat per la mesura precisa del temps que triga a anar i tornar la llum. Aquesta dada és merament secundària en una comunicació d'aquest tipus i és per això que en algunes mesures pot resultar incoherent.
- En segon lloc, hi ha altres petits factors, com les irregularitats de la superfície lunar, la refracció de les ones en passar de l'atmosfera terrestre al buit de l'espai i la diferència en la posició de l'emissor i

el receptor, que es poden sumar a l'error total, però en quantitats gairebé imperceptibles. Tot i això, el valor real de c es troba dins dels resultats obtinguts, i amb això podem afirmar que l'experiment, tot i que és molt imprecís, resulta força exacte.

Des del punt de vista teòric, aquest és l'experiment més senzill de tots els que hem fet, ja que per determinar la velocitat de la llum, només cal relacionar una distància que recorre amb el temps que triga a recórrer-la. El que n'és destacable, però, són els avenços tecnològics del darrer segle que han fet possible que, amb un equip relativament senzill, puguem enviar ones electromagnètiques a milers de quilòmetres (en aquest cas la Lluna) i detectar-les quan són reflectides.

En resum, aquesta experiència està basada en conceptes molt senzills, plantejats fa segles, però és només en les últimes dècades que ha sigut possible de dur a terme gràcies al desenvolupament de la tecnologia.

4.7. Conclusions

El nostre objectiu principal per la part pràctica d'aquest treball era mesurar la velocitat de la llum i, amb major o menor precisió, és un objectiu que hem aconseguit. Per posar en context la rellevància dels experiments que hem dut a terme, cal primer entendre per què és tan important el valor de la velocitat de la llum i per què és tan difícil de mesurar.

La primera de les qüestions ja l'hem respost anteriorment, al final del punt 3 d'aquest treball. En resum, la velocitat de la llum és un valor molt important perquè és una constant universal amb totes les implicacions que surten d'aquest fet.

El motiu pel qual c és tan difícil de mesurar és simple: viatja a una velocitat molt elevada, la màxima, de fet. A velocitats tan grans com la de la llum, la física ja no segueix els models clàssics de Newton i s'han de tenir en compte factors relativistes a l'hora de treballar-hi que, malauradament, nosaltres no hem aplicat, ja que les matemàtiques implicades són d'una gran complexitat. A velocitats tan elevades també calen aparells molt precisos, ja que una dècima de segon pot suposar una diferència de 100.000 km/s. Tan de pressa viatja la llum que fins fa 400 anys encara se sostenia que es propagava instantàniament.

Tenint en compte el que acabem d'esmentar i tot el que hem estudiat al llarg d'aquest treball, hem volgut dividir les conclusions d'aquest apartat en tres parts. En primer lloc, hem fet diverses comparacions que hem trobat interessants entre alguns dels experiments, tant en l'àmbit teòric com pràctic. En segon lloc, hem analitzat els resultats de les experiències i també n'hem fet una comparació numèrica. Per acabar, hem revisat les hipòtesis inicials per confirmar-les o refutar-les i hem fet un resum del més destacable que hem trobat amb un recull de les nostres experiències i pensaments d'aquesta darrera part del treball.

Comparacions

- Experiments 2 i 4 (l'oscil·loscopi i la Lluna)

Aquests dos experiments són molt similars en el seu fonament, i és per això que pensem que val la pena dedicar-los un parell de paràgrafs. A primera vista pot semblar que enviar un raig a la lluna i mesurar quant temps triga a anar i tornar no comparteix cap similitud amb generar un pols electromagnètic en un cable de fibra òptica, però en realitat en els dos casos el que s'està fent és mesurar el temps que triga la llum a recórrer una certa distància. L'experiment que involucra l'oscil·loscopi té una escala minúscula en comparació amb l'experiència lunar, motiu pel qual calen uns aparells molt més precisos i sensibles. En canvi, el segon es duu a terme a una escala astronòmica i, doncs, els aparells necessaris requereixen una potència molt gran. Per tant, en tots dos casos s'aplica

el mateix principi, relativament senzill, però difereixen en considerar l'escala a la qual els experiments són realitzats.

Observant els nostres resultats també es pot extrapolar que el procediment a escala més petita és el més exacte, però cal mencionar que no existeix una correlació entre l'escala de l'experiment i la seva exactitud. De fet, una major distància redueix la precisió necessària en la mesura del temps. Teòricament, l'experiment lunar té el potencial de ser tant o més exacte que el de la fibra òptica, però per motius que ja hem enumerat abans, no ho ha sigut en el nostre cas. També cal destacar que és l'únic dels experiments on la mesura de la velocitat de la llum es dona en el buit.

Si l'experiment de laboratori és el més exacte, és perquè ha sigut dissenyat per a mesurar la velocitat de la llum, al contrari que el sistema de ràdio, que té l'objectiu de comunicar radioaficionats arreu del món.

- Experiments 1 i 2 (Foucault i l'oscil·loscopi)

Uns altres experiments que trobem interessants de comparar són els dos que considerem més rigorosos. Tant l'experiment de Foucault com el de la fibra òptica els hem dut a terme en un laboratori i amb un muntatge especialitzat en mesurar la velocitat de la llum. És per això que són els que donen els resultats amb el menor marge d'error.

Malauradament, l'experiment de Foucault no ha tingut l'èxit que esperàvem, per motius que ja hem descrit, i per això no podem fer una comparació legítima entre els resultats d'aquests dos experiments. No obstant això, basant-nos en els resultats obtinguts per Foucault i Michelson, podem dir que són d'una exactitud similar.

Una diferència notable són els principis en què es basen els experiments per determinar el valor de c . En un dels casos, la mesura que es fa és una variació angular, mentre que en l'altre es mesura un temps. Aquesta diferència es deu al moment en què aquests experiments van ser dissenyats. Quan Foucault va inspirar-se en l'experiència de Fizeau, encara no existien cronòmetres amb precisió de nanosegons. És per això que en els experiments del segle XIX no es fa una mesura del temps, ja que, llavors, era tecnològicament impossible. En canvi, l'experiment més modern dels dos utilitza uns aparells comuns en laboratoris de física avui en dia, que permeten simplificar el procés experimental de la determinació de la velocitat de la llum.

- Experiments 3 i 4 (la Lluna i el microones)

Per últim, ens agradaria comentar les semblances i divergències entre l'experiment de la Lluna i el del microones. Per començar, la diferència més remarcable que comparteixen aquestes dues experiències és la seva assequibilitat. D'una banda, tenim un experiment que qualsevol persona amb un microones pot dur a terme a la cuina de casa seva i, en l'altre extrem, es troba l'experiment lunar, que utilitza un sistema molt complex de *hardware* i *software*.

Sorprenentment, en la nostra experiència el sistema més senzill i assequible dels dos ha sigut el que ha donat resultats més exactes. Però, com ja hem dit abans, això es deu majoritàriament a la finalitat del sistema de ràdio més que a la «immensa» afinitat del nostre microones. Independentment de la seva exactitud, que no és el motiu pel qual hem escollit fer-los, els dos experiments donen resultats entre els quals es troba el valor real de c , motiu suficient per considerar la seva legitimitat.

Finalment, ens agradaria reiterar que aquests dos experiments, tot i que ens permeten mesurar la velocitat de la llum, no tenen un valor especial en aquest sentit, ja que ambdós depenen dels coneixements que tenim avui en dia sobre les ones electromagnètiques i la seva velocitat.

Anàlisi dels resultats i valoració dels experiments

Com ja hem vist, no tots els experiments que hem escollit tenen la mateixa precisió o exactitud i, de fet, varien molt entre ells en aquests aspectes. En la figura 4.16 hem recollit en un gràfic el valor mitjà per a la velocitat de la llum que ens ha donat cada experiment, a més del grau de dispersió que li correspon. En el gràfic, la línia taronja representa el valor real de la velocitat de la llum, per posar en perspectiva tots els resultats i la seva imprecisió.

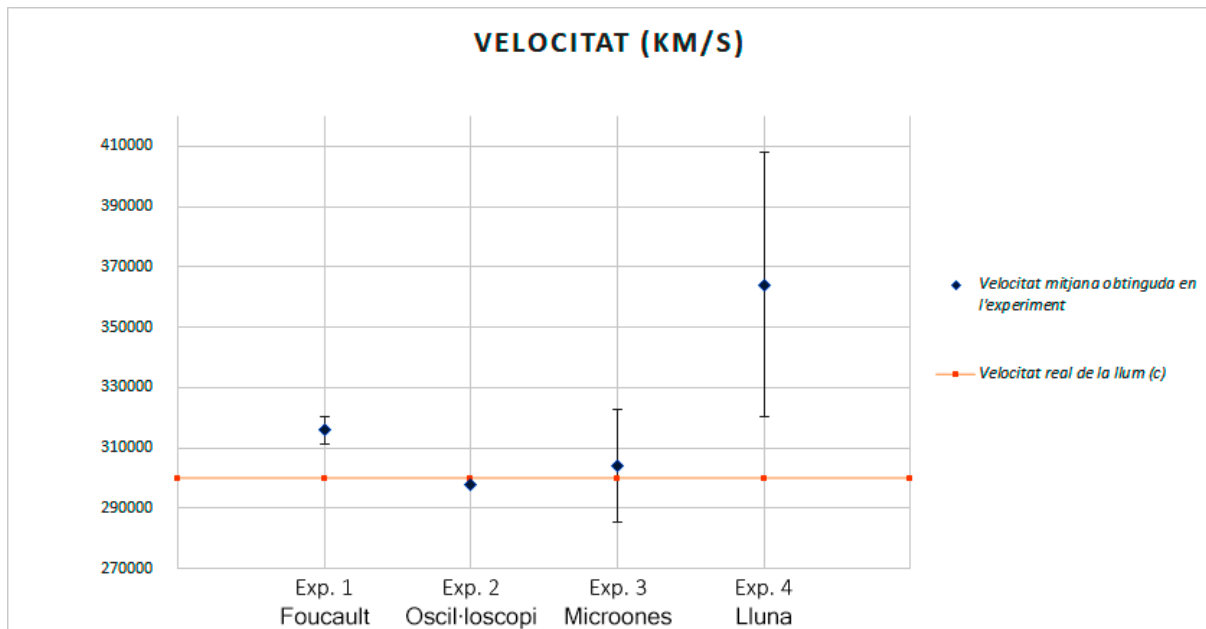


Figura 4.16. Gràfic que representa la precisió i l'exactitud de cada experiment respecte del valor real de la velocitat de la llum (font pròpia).

En la taula 4.7 hem resumit la mitjana dels resultats dels 4 experiments, així com la seva imprecisió i, addicionalment, el valor que més s'ha acostat a c en cadascun.

	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3	Experiment 4
Mitjana dels resultats, en m/s	$3,16 \cdot 10^8$	$2,98 \cdot 10^8$	$3,04 \cdot 10^8$	$3,64 \cdot 10^8$
Imprecisió absoluta (dispersió), en m/s	$E_a = \pm 4,54 \cdot 10^6$	-	$E_a = \pm 1,88 \cdot 10^7$	$E_a = \pm 4,38 \cdot 10^7$
Valor més encertat, en m/s	$3,11 \cdot 10^8$	$2,98 \cdot 10^8$	$2,94 \cdot 10^8$	$2,67 \cdot 10^8$

Taula 4.6. Recull dels resultats finals dels experiments.

- Experiment 1:

L'experiment de Foucault és molt precís, amb un rang de valors molt limitats, és a dir, amb una imprecisió absoluta força petita. Malgrat la seva precisió, els nostres resultats són inexactes per errors en el procediment. Podem concloure, doncs, que és un experiment que dona valors per a c molt encertats i amb poca dispersió sempre que no hi hagi errades en el procediment.

- Experiment 2:

L'experiment 2, que utilitza un sistema digital i un cable de fibra òptica, és el que presenta els resultats més exactes, amb un marge d'error respecte de c mínim. La dispersió és nul·la per a una única llargada del cable de fibra òptica, ja que les mesures són les mateixes en tots els intents i, per tant, és infinitament precís. És, sabent això, un experiment molt encertat per determinar la velocitat de la llum amb un marge d'error mínim.

- Experiment 3:


L'experiment del microones, tot i la gran dispersió que té, dona resultats força exactes per a c . A causa de la forma amb què les mesures són preses, aquesta experiència dona dades amb molta fluctuació. És per això que aquest experiment és massa imprecís com per a mesurar correctament la velocitat de la llum, però, com ja hem dit abans, és prou exacte per dur-lo a terme anecdòticament.




- Experiment 4:

L'experiment 4 és l'experiment més imprecís (amb una dispersió molt elevada) a causa del programari encarregat de fer les mesures, que no està especialitzat. També és l'experiment més inexacte, ja que, com es pot observar, el valor real de c no es troba dins del seu marge d'error. Malgrat això, sí que hem obtingut un valor relativament encertat amb aquest experiment, tot i que això no demostra la seva exactitud, sinó més aviat el seu elevat grau de dispersió. En resum, aquesta experiència no és la més efectiva per mesurar empíricament la velocitat de la llum, però n'és una demostració espectacular.

Conclusions finals

Un cop finalitzades les pràctiques del nostre treball, per assegurar-nos del valor dels nostres resultats i del compliment de les expectatives exposades, comentarem a continuació la seva validesa, amb les seves corresponents argumentacions.

Hipòtesi	Assoliment
<p>1. <i>Estimem que, amb les pràctiques més modernes, com són la 2 i la 4, els resultats que extraurem seran més fiables i propers al valor exacte de la velocitat de la llum.</i></p>	<p>La primera hipòtesi ha estat assolida parcialment degut al vast marge d'error (inicialment inesperat) que ha comportat l'execució de l'experiment 4. Contràriament, la pràctica 1 ha resultat ser, juntament amb la 2, un experiment de resultats molt fiables en comparació amb l'antiguitat del seu origen, ja que, tot i comptar amb un disseny força bàsic i rudimentari, els seus valors no difereixen prou entre ells com per a generar un error de dispersió comparable amb el d'altres experiments, com el 4.</p> 

<p>2. <i>Amb l'experiment 2, obtindrem una major exactitud que els altres pel que fa a la proximitat del resultat a c, ja que s'hi emprava fibra òptica i materials electrònics precisos que s'utilitzen normalment en dependència amb la velocitat de la llum.</i></p>	<p>Pel que fa a la segona hipòtesi, el resultat ha estat prou satisfactori com per a poder dir que l'assaig 2 comporta una màxima exactitud (i una precisió englobada per un únic resultat obtingut) en comparació amb els 3 restants, ja que els elements que conformen el seu muntatge (la fibra òptica, l'oscil·loscopi i el convertidor) són emprats actualment en funció de la velocitat de la llum que viatja a través seu. </p>
<p>3. <i>Especulem que els nostres assajos tindran una aparença prou propera a la de l'original, tot i que els nostres sistemes gaudiran de materials més moderns, i que els valors obtinguts coincidiran amb aquells publicats pels seus autors originals.</i></p>	<p>En referència a la hipòtesi número 3, podem resoldre que hem utilitzat, en l'experiment 1, una versió actualitzada (i facilitada per l'empresa PASCO) de l'original dissenyat per Léon Foucault. Es podria dir que les experiències 2 i 4 han estat reproduïdes amb els seus materials originals, ja que, tot i ser escassos i difícils d'aconseguir, hem pogut tenir-hi accés gràcies al suport de la Universitat de Barcelona. El tercer experiment és realitzable a qualsevol cuina que disposi de microones, i va ser dissenyat per dur-se a terme de manera casolana, tal com vam fer nosaltres satisfactòriament. </p>
<p>4. <i>Creiem que les conclusions que extraurem seran d'una clara decantació envers l'exactitud de les experiències més recents en la seva invenció que aquelles ideades segles enrere o aquelles menys rigoroses pel que fa a l'exactitud del material.</i></p>	<p>Respecte de la hipòtesi 4, hem constatat que l'experiment 4, tot i ser molt modern i estar format per materials precisos, aquests no han estat concebuts per mesurar normalment la velocitat de la llum com nosaltres vam fer, i és això el que difereix de la hipòtesi que havíem postulat. </p>

En conclusió, estem satisfets amb els resultats de la part experimental del nostre treball, però alhora hem d'admetre que no és tot el que ens hauria agradat que fos. Quan vam idear la part pràctica d'aquest treball, vam proposar un nombre major d'experiments que els que hem pogut incloure, però ens ha sigut impossible realitzar-los tots, a causa de limitacions pel que fa al temps o al material.

Pel que fa als resultats que hem obtingut per la velocitat de la llum, considerem que han complert les nostres expectatives. L'únic experiment que no ha proporcionat resultats adequats, a causa d'una desalineació en el muntatge, ha sigut el de Foucault. Ens hauria agradat repetir l'experiment, però per manca de temps hem decidit incloure els resultats obtinguts.

Finalment, podem concloure que el desenvolupament d'aquesta part pràctica ha suposat un balanç positiu, ja que ens ha permès endinsar-nos en el món de la física experimental i conèixer amb certa profunditat la rigorosa metodologia emprada en qualsevol projecte científic.

5. Conclusió: *sic luceat lux*

Després de tot el que hem vist fins ara, en Teo s'ha fet un expert en òptica. Ha estudiat i entès minuciosament el comportament i la composició de la llum, així com la seva velocitat. Com que és un noi molt curiós i amant de la ciència, mai no creu el que li diuen si no ho demostra, i desconfia de tot allò que no està comprovat. Inconformista com ell sol, quan a l'escola li van dir que la llum viatja a una velocitat aproximada de 300 000 km/s, en Teo es va quedar fascinat, però no va sucumbir a la temptació d'assimilar aquell valor sense trobar-lo ell mateix. D'aquesta manera va començar aquest dur treball, el d'aconseguir mesurar la velocitat de la llum pels seus propis mitjans.

No obstant això, abans de realitzar les pràctiques amb què aconseguiria obtenir un resultat plausible, va trobar adient investigar sobre el que és realment la llum, quins elements la formen i com interactua amb els diferents medis. També va dur a terme una recerca exhaustiva sobre els estudis realitzats fins a l'actualitat (i des de temps immemorables) en tot allò relacionat amb la llum i la seva velocitat, i es va basar en alguns dels experiments practicats al llarg de la història per mesurar la velocitat de la llum amb les seves mans.

Ara, aquesta experiència li ha servit per comprendre teòricament i pràcticament el concepte de velocitat de la llum, i ha adquirit una quantitat de coneixements històrics i científics que l'ajuden a percebre més clarament l'evolució dels estudis en el camp de l'òptica. Ha constatat que la llum es transmet seguint un moviment harmònic, cosa que feia molt difícil el seu estudi pels científics més antics, i ha estudiat l'espectre de llum visible, que ens permet observar tot el que ens envolta. Ha conclòs que la llum està formada per feixos de quantitats discretes d'energia, anomenades fotons, que tenen un comportament ondulatori i que es propaguen a través d'un camp electromagnètic (format per càrregues elèctriques i magnètiques enllaçades entre si). I, per si semblés que els coneixements adquirits no eren prou definitius, en Teo no ha realitzat un, ni dos, ni tres experiments: ha dut a terme un total de quatre pràctiques diferents per acostar-se, mitjançant mètodes històrics i actuals, al valor real de c .

Aquest viatge temporal, exposat en el punt 3 del treball i posat en pràctica al punt 4, ha permès al Teo adonar-se de les dificultats amb què s'havia de lidiar en les èpoques en què van ser ideats aquests experiments. D'assajos arcaics com els realitzats per Foucault ara fa més d'un segle, o els que podem portar a terme nosaltres mateixos des de la cuina, fins a un dels mètodes més efectius i innovadors dels laboratoris actuals; amb aquesta diferència d'èpoques i de resultats, en Teo ha contrastat els resultats i els ha relacionat amb les dificultats que presentaven els recursos i amb la manca de precisió dels aparells emprats en les proves. Així doncs, ha obtingut uns valors per la velocitat de la llum en el buit (amb els seus respectius marges d'error) que s'acosten suficientment al de la constant c com per estar segur que aquest resultat és el real.

Amb tot, en Teo ha madurat intel·lectualment, no tan sols pel que fa allò tocant a la velocitat de la llum, però sobretot en allò que més li serà d'utilitat en el futur: ha sigut capaç de cercar, identificar i filtrar informació de diverses fonts, adonant-se de les dificultats que presenta una investigació d'aquest tema degut a l'escassa presència de representació a Internet. Ha après a redactar adequadament un treball seriós i professional de divulgació científica. Ha dut a terme indagacions i assajos pràctics seguint el mètode científic, prenent consciència d'aspectes tan importants com són la fidelitat de tots els factors que hi intervenen i els errors en les diferents mesures que s'hi prenen. Finalment, després de 9 mesos de treball i de recerca, en Teo ha donat a llum una compilació d'estudis d'òptica que pot ajudar a qualsevol persona que es vulgui iniciar en l'apassionant món de l'electromagnetisme i vulgui comprovar per si mateix el valor de la velocitat de la llum.

6. Annex

En l'annex d'aquest treball hem inclòs un índex biogràfic de tots els científics esmentats en negreta a l'apartat *Cronologia de l'estudi de la llum*, per ordre d'aparició i segons els descobriments que van fer.

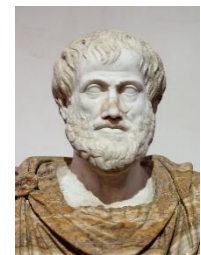
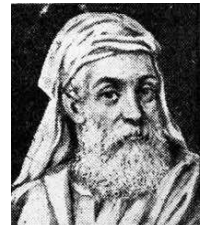
A més a més, hi expliquem la metodologia emprada per calcular l'error en els resultats dels experiments i hi afegim un recull de diverses imatges preses durant les pràctiques que poden ser d'interès.

6.1. Índex onomàstic

Edat antiga: primeres observacions de la llum

La filosofia de la visió

- **Empèdocles d'Akragas [pàg. 12]**, en grec Ἐμπεδοκλής (Agrigent, Sicília, 492 aC - íd., 432 aC): Reconegut filòsof i polític de l'Antiga Grècia, és conegut sobretot per les seves obres en vers sobre les seves teories místiques i racionalistes. També va fer aportacions a la ciència, i va establir la teoria dels quatre elements (terra, aigua, foc i aire). Va morir llençant-se intencionadament a un cràter de l'Etna.
- **Aristòtil [pàg. 12]**, en grec Ἀριστοτέλης (Estagira, Grècia, 384 aC - Calcis, íd., 322 aC): Probablement un dels pensadors (juntament amb Plató) més importants de la Grècia clàssica. La seva qualitat d'erudit li va permetre dedicar-se, a part de la filosofia, a la ciència. Partidari de la teoria d'Empèdocles sobre els rajos oculars, Aristòtil va descriure, per primer cop en la història registrada, la formació del fenomen conegut com a arc de Sant Martí, tot i que no va ser del tot encertada.

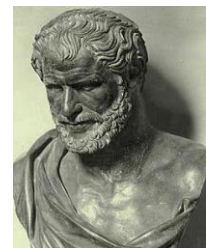
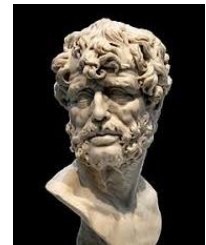
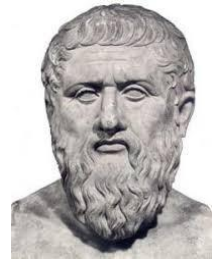


Geometria i llum

- **Euclides d'Alexandria [pàg. 13]**, en grec Ευκλείδης (Alexandria, Egipte, 325 aC - íd., 265 aC): Conegut com el Pare de la Geometria gràcies als seus estudis matemàtics i geomètrics. A causa de l'escassetat d'informació sobre aquesta figura, hi ha hipòtesis que afirmen que les seves obres van estar escrites (completament o parcialment) per l'equip de matemàtics d'Alexandria del qual formava part o que simplement van signar amb el seu nom en honor a Euclides de Mègara (filòsof socràtic grec que va viure el segle anterior).
- **Heró d'Alexandria [pàg. 15]**, en grec Ἡρῶν ὁ Ἀλεξανδρεὺς (Alexandria, Egipte, 10 dC - íd., 70 dC): Considerat per molts com el major experimentador de l'antiguitat, Heró va ser un matemàtic i enginyer molt important pel desenvolupament de futures invencions, com una rudimentària màquina de vapor (o eolípila). Va proposar per primer cop el principi d'acció i reacció (que Newton va perfeccionar) i el principi de la palanca d'Arquimedes. També va dissenyar un orgue que funcionava amb aigua i va decretar la denominada fórmula d'Heró, en relació amb l'àrea geomètrica dels triangles.

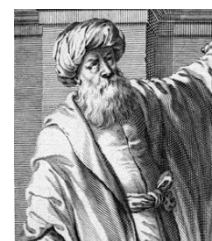


- **Claudi Ptolemeu [pàg. 15]**, en grec Κλαύδιος Πτολεμαῖος (Ptolemaida Hermia, Egipte, 100 dC - Canop, íd., 170 dC): Treballador de la famosa Biblioteca d'Alexandria, va destacar en àmbits com l'astronomia, l'astrologia, la química, la música, la geografia i les matemàtiques. Va proposar el model geocèntric de l'univers (que col·locava la Terra al centre de l'univers). També a fer estudis d'òptica, aprofundint sobretot en els fenòmens de reflexió i refracció de la llum.
- **Plató [pàg. 15]**, en grec Πλάτων (Atenes o Egina, Grècia, 427 aC - íd., 347 aC): Segurament el filòsof grec més influent de la història. Va ser l'hereu de Sòcrates i el mestre d'Aristòtil. Va fundar l'Acadèmia vers l'any 367 aC, una escola filosòfica que perduraria més de nou-cents anys. Més enllà de la filosofia, Plató es va dedicar també a l'estudi de la política, el llenguatge i la cosmologia, entre altres disciplines. Va relacionar els elements proposats per Empèdocles amb cossos geomètrics regulars (o sòlids platònics), intuït que un cinquè estat de la matèria (idea que més tard prendria el nom d'èter) hauria de formar el cosmos.
- **Pitàgores de Samos [pàg. 15]**, en grec Πυθαγόρας (Samos, Grècia, 569 aC - Metapont, Itàlia, 475 aC): Considerat el primer matemàtic pur, els seus estudis abasten també el territori de la filosofia, la música (l'harmonia), la geometria i l'aritmètica. Fundador de l'Escola Pitagòrica (que tocava temes com la religió, la filosofia, la medicina, la cosmologia, la política i l'ètica). Els seus principis van influir a molts pensadors posteriors, i avui dia encara es sostenen molts dels seus postulats.
- **Luci Anneu Sèneca o Sèneca el Jove [pàg. 15]**, en llatí Lucius Annaeus Seneca (Còrdova, Espanya, 4 aC - Roma, Itàlia, 65 dC): Senador de l'Imperi Romà durant quatre governs i ministre i tutor de l'emperador Neró, aquest gran pensador va destacar per les seves qualitats com a filòsof, polític, orador i escriptor. La seva obra i el seu pensament ha inspirat centenars d'intel·lectuals durant tota la història.
- **Demòcrit d'Abdera [pàg. 15]**, en grec Δημόκριτος (Abdera, Tràcia, 460 aC - ? 370 aC): Es va guanyar sobrenoms com el Filòsof que Riu, el Pare de la Física o el Pare de la Ciència Moderna gràcies als seus amplis estudis sobre filosofia, natura i física (i el seu suposat sentit de l'humor). Els seus estudis geomètrics sobre el volum, l'àtom o la naturalesa corpuscular de la llum van ser molt útils per l'esclat de la Revolució Científica segles més tard.



Edat mitjana: les contribucions de la civilització islàmica a l'òptica

- **Alhazen [pàg. 16]**, en àrab Ibn Al-Haytham (Basora, Emirat Buyí, actual Irak, 965 - El Caire, Egipte, 1040): Va ser un gran matemàtic i físic àrab que va fer importants aportacions a l'estudi de l'òptica, a més d'altres camps científics com l'astronomia i les matemàtiques. Alhazen va viure durant l'Època Daurada de Medicina Islàmica, i la seva teoria de la visió va contribuir de gran manera al camp de l'oftalmologia. Gràcies a les seves importants contribucions a l'estudi de la llum, és considerat per molts "el pare de l'òptica".



- **Averrois [pàg. 17]**, en àrab Abū l-Walīd'Ahmad ibn Muḥammad ibn Rušd (Còrdova, Espanya (al-Àndalus), 1126 - Marràqueix, Imperi Almohade, 1198): Averrois fou un filòsof i pensador musulmà d'origen andalusí interessat en una gran varietat de temes, com la filosofia, la teologia, la medicina, l'astronomia, la física i la jurisprudència, sobre els quals va dedicar-se a escriure. Sovint feia menció a Aristòtil en els seus treballs sobre filosofia, la qual cosa va fer que fos conegut com *el Comentador*. Segons el seu pensament, la ciència, la filosofia i la religió poden conviure perfectament, idea que transcendiria al llarg dels segles.



- **Al-Qarafi [pàg. 17]**, en àrab برحلة (Bahfashīm, Bahnasa, Sàhara, 1228 - El Caire, Egipte, 1285): És considerat un dels teòrics jurídics més importants de l'escola Maliki, i va proporcionar diverses reformes en la legislació islàmica.

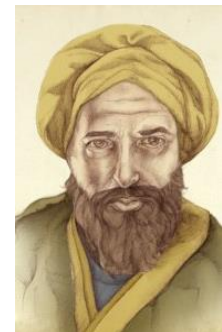
- **Nasir al-Din al-Tusi [pàg. 17]**, en persa نصير الدين الطوسي (Tus, Khorasan, Iran, 1201 - Kadhimiya, Bagdad, Iraq, 1274): Va ser un arquitecte i filòsof persa considerat el creador de la trigonometria com a disciplina matemàtica. A més, el seu treball va recollir i aprofundir els estudis d'Euclides, Arquímedes i altres matemàtics.



- **Qutb-ad-Din Xirazí [pàg. 17]**, en persa قطب‌الدین شیرازی (Shiraz, Iran, 1236 - Tabriz, íd., 1311): Poeta i erudit del segle XIII que va contribuir en camps com l'astronomia, les matemàtiques i la medicina. També va ser alumne de Nasir al-Din Tusi, el científic mencionat anteriorment.



- **Taqi ad-Din Muhammad ibn Ma'ruf ash-Shami al-Asadi [pàg. 17]**, en àrab تقي الدين محمد بن معروف الشامي (Damasc, Síria, 1526 - Istanbul, Turquia, 1585): Va ser un erudit que es va especialitzar en l'astronomia, l'enginyeria, les matemàtiques, els mecanismes òptics i els rellotges. Juntament amb més intel·lectuals, va construir un observatori a Constantinoble i, gràcies al seu coneixement sobre rellotges, va dissenyar instruments per observar els estels. El mètode que utilitzava per trobar les coordenades de les estrelles fou un dels més precisos a la seva època.



- **Kamal Al-Din Al-Farisi [pàg. 17]**, en persa کمال‌الدین فارسی (Tabriz, Iran, 1265 - íd., 1318): Va ser un científic persa que va fer grans aportacions en òptica i en teoria de nombres. És conegut per haver sigut l'alumne de Qutb al-Din al-Shirazi. Va aconseguir explicar correctament i de manera matemàtica l'arc de Sant Martí, així com la natura dels seus colors.



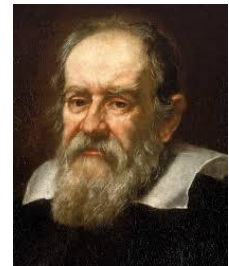
Edat moderna: revolució científica

- **Nicolau Copèrnic [pàg. 18]**, en polonès Mikołaj Kopernik (Toruń, Prússia, Polònia, 1473 - Frombork, íd., 1543): Sovint conegut com el precursor del model heliocentrista de l'univers, va ser un monjo i astrònom del Renaixement. Els seus estudis van ser una peça clau en el desenvolupament de la Revolució Científica. A més dels seus estudis astronòmics, el seu treball abasta terrenys com les matemàtiques, la física, la jurisprudència i l'economia. La seva teoria sobre l'organització del Sistema Solar, publicada l'últim any de la seva vida, va ser rebutjada perquè representava una contradicció radical als coneixements sostinguts en aquella època.



Aproplant-nos a l'espai

- **Galileu Galilei [pàg. 18]**, en italià Galileo Galilei (Pisa, Toscana, Itàlia, 1564 - Arcetri, íd., 1642): Científic revolucionari del renaixement italià. Va destacar en les disciplines de física, matemàtiques, astronomia, enginyeria i filosofia, així com en les arts. Les seves aportacions més rellevants a la ciència són la primera llei del moviment (atribuïda a Newton), una millora del telescopi òptic i un important suport a la teoria heliocentrista de Copèrnic. Els seus esforços per donar importància al mètode científic, així com l'oposició al pensament aristotèlic de l'època, van fer que es guanyés la rivalitat de l'Església, que el va processar en 1633 per heretgia.
- **Hans Lippershey [pàg. 18]** (Wesel, Alemanya, 1570 - Middelburg, Països Baixos, 1619): També conegut com a Johann Lippershey, va ser tècnic de lents. Li és atribuïda la invenció del telescopi perquè va ser el primer a intentar patentar-ho, tot i que no se sap si això és realment verídic.
- **Johannes Kepler [pàg. 19]** (Würtemberg, Alemanya, 1571 - Ratisbona, íd., 1630): Important matemàtic i astrònom durant el període de la Revolució Científica. Conegut principalment per les seves lleis sobre el moviment planetari, també va fer aportacions al camp de l'òptica amb el seu disseny d'un telescopi reflectant.
- **Isaac Newton [pàg. 19]** (Woolsthorpe, Lincolnshire, Anglaterra, 1642 - Kensington, Londres, íd., 1727): Un dels científics més importants de la història. Va exercir com a físic, filòsof, teòleg, inventor, alquimista i matemàtic. Va descriure la llei de la gravitació universal i va establir les bases de la mecànica clàssica. També va fer grans aportacions al camp de l'òptica i va desenvolupar el càlcul matemàtic infinitesimal.



- **William Herschel [pàg. 20]** (Hannover, Sacre Imperi Romanogermànic, 1738 - Slough, Anglaterra, 1822): De naixement romanogermànic i més endavant de nacionalitat anglesa, Herschel fou un destacat astrònom i compositor que va desenvolupar els seus propis telescopis, característics per la seva gran mida. Entre els seus descobriments es troba la radiació infraroja i, amb l'ajuda del seu telescopi, el planeta Urà.



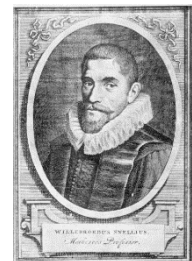
La llum viatja a una velocitat finita

- **Ole Christensen Rømer [pàg. 21]** (Aarhus, Dinamarca, 1644 - Copenhaguen, íd., 1710): Va ser un astrònom holandès i el primer a donar un valor a la velocitat de la llum. Rømer també va inventar un termòmetre que mesura la temperatura entres dos punts fixos. A més a més, gràcies a la seva posició com a matemàtic, va introduir el primer sistema internacional per pesos i mesures a Dinamarca.
- **James Bradley [pàg. 22]** (Sherborne, Gloucestershire, Regne Unit, 1693 - Chalford, íd., 1762): James Bradley va ser un rellevant astrònom anglès de la *Royal Society* durant el segle XVIII. Va descobrir l'aberració de llum estel·lar, fenomen el qual va permetre li va permetre fer una mesura més precisa de la velocitat de la llum. Un altre descobriment important que li és atribuït és el de la nutació de l'eix de la Terra, és a dir, la lleugera variació de l'orientació d'aquest en el temps.



El misteri de la refracció

- **Willebrord Snel van Royen [pàg. 22]** (Leiden, Holanda Meridional, Països Baixos, 1580 - íd., 1626): També conegut com a Snell, va ser un astrònom i matemàtic holandès. Va donar nom a la llei de la refracció de la llum, la qual ara s'anomena la llei de Snell. Altrament, va descobrir un nou mètode per calcular el nombre π .
- **René Descartes [pàg. 22]** (La Haye en Touraine, França, 1596 - Estocolm, Suècia, 1650): Filòsof, matemàtic i físic, considerat el pare de la geometria analítica. A ell se li atribueix el principi «penso, llavors existeixo» (en llatí, *cogito ergo sum*), que resumeix el racionalisme dictat per la filosofia cartesiana. Els eixos cartesianes van ser proposats també per ell, i avui dia són molt utilitzats per representar punts, línies i vectors sobre un pla amb coordenades.
- **Pierre de Fermat [pàg. 23]** (Beaumont, França, 1601 - Castres, íd., 1665): Un dels matemàtics més reconeguts de la seva època. Entre les seves aportacions es troben el desenvolupament de les teories de probabilitats i de nombres. És famós sobretot per l'últim teorema de Fermat, demostrat en 1995 per Andrew Wiles.



Debat ona-partícula

- **Christiaan Huygens [pàg. 27]** (La Haia, Holanda, 1629 - íd., 1695): Científic crucial en el desenvolupament de la teoria ondulatoria de la llum a finals del segle XVII. Va fer importants aportacions al camp de la probabilitat, la física i l'astronomia, entre les quals es troba la invenció del rellotge de pèndol.
- **Robert Hooke [pàg. 27]** (Freshwater, Anglaterra, 1635 - Londres, íd., 1703): Considerat un dels científics més influents de la història de la ciència, va fer investigacions en els camps de la biologia, la medicina, la cronometria, la física planetària, la mecànica de sòlids deformables, la nàutica i l'arquitectura. Va formular la *Llei d'elasticitat de Hooke*, la qual postula que un cos elàstic s'estira de manera proporcional a la força la qual li és aplicada.
- **Francesco Maria Grimaldi [pàg. 28]** (Bolonya, Itàlia, 1618 - íd., 1663): Cura, matemàtic i físic italià, professor al col·legi jesuïta de Bolonya. Va col·laborar en el càlcul de la constant gravitacional gràcies a les oscil·lacions d'un pèndol i en la construcció d'aparells astronòmics molt importants. També va ser el primer en fer una observació acurada de la difracció de la llum, donant-li el nom a aquest fenomen, i la difracció per bandes.
- **Rasmus Bartholin [pàg. 28]** (Roskilde, Dinamarca, 1625 - Copenhague, íd., 1698): Va ser un matemàtic, físic, catedràtic de medicina i professor de geometria. En 1667 va ser nomenat *matemàtic real*. Va descobrir la refracció doble de la llum.
- **Leonhard Paul Euler [pàg. 29]** (Basilea, Suïssa, 1707 - Sant Petersburg, Imperi Rus, 1783): Principalment conegut pel nombre que porta el seu nom, e , va fer grans aportacions a les matemàtiques i la física per les quals és sostingut com un dels millors científics del segle XVIII. Són destacables les seves contribucions a la notació matemàtica moderna, entre les quals es troba la introducció del nombre i per representar els nombres complexos.

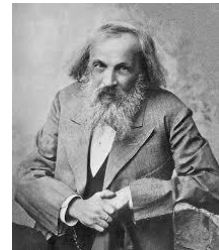


Edat contemporània: es resol el debat

- **Agustin Louis Cauchy [pàg. 30]** (París, França, 1789 - Sceaux, íd., 1857): Va ser un matemàtic, enginyer i físic francès que va contribuir de gran manera en diverses branques de les matemàtiques, provant diversos teoremes de càlcul i ideant, pràcticament sol, l'anàlisi complexa (l'estudi de funcions de nombres complexos) i l'estudi de permutacions. A més a més, Cauchy va contribuir en el camp de l'òptica amb treballs sobre la propagació d'ones electromagnètiques.



- **Évariste Galois [pàg. 30]** (Bourg-la-Reine, França, 1811 - París, íd., 1832): la contribució més destacada del matemàtic i activista polític Évariste Galois en el món de les matemàtiques fou el desenvolupament de la teoria que porta el seu nom, la qual permet trobar la solució a un polinomi mitjançant radicals. Altrament, va ser el primer a utilitzar el terme de "grup" en un context matemàtic.
- **Johann Carl Friedrich Gauss [pàg. 30]** (Braunschweig, Alemanya, 1777 - Göttingen, íd., 1855): Popularment conegut com el Príncep de les matemàtiques, Johann Carl Friedrich Gauss va ser un físic i matemàtic alemany que va destacar en àlgebra, nombres complexos i astronomia. A Gauss se'l considerava un perfeccionista i un home molt treballador que no publicava res que no estigués completament acabat. Mai li va agradar la idea de ser mestre però va donar alguna classe.
- **Bernhard Riemann [pàg. 30]** (Breselenz, Alemanya, 1826 - Selasca, Itàlia, 1866): Va ser un matemàtic alemany que va tenir molt ressò dintre del camp de l'anàlisi i la teoria dels nombres. Va ser el primer a formular una integral coneguda com la integral de Riemann. Des de petit ja destacava a les classes de matemàtiques i va acabar sent alumne de Gauss. Va marxar a la universitat de Berlín per estudiar matemàtiques i allà va presentar tots els seus descobriments.
- **Dmitri Ivánovich Mendeléiev [pàg. 30]** (Tobolsk, Imperi Rus, 1834 - Sant Petersburg, íd., 1907): Químic i inventor rus, és conegut sobretot per mostrar el patró que existeix en la taula periòdica dels elements respecte de les seves propietats, el que el va ajudar a predir l'existència de 8 elements que no havien sigut descoberts encara.
- **André-Marie Ampère [pàg. 30]** (Lió, França, 1775 - Marsella, íd., 1836): Físic i matemàtic francès, va ser un dels fundadors de l'electromagnetisme clàssic, i fins i tot se l'anomena el pare de l'electromagnetisme. Va inventar el telègraf elèctric, va contribuir a la invenció del galvanòmetre i, amb l'ajuda d'Arago, van crear l'electroimant. La unitat del Sistema Internacional d'Unitats per mesurar la intensitat d'un corrent elèctric es diu Ampere en el seu honor.



La llum és una ona

- **Thomas Young [pàg. 30]** (Milverton, Anglaterra, 1773 - Londres, íd., 1829): Possiblement un dels físics més rellevants de la història. Young va fer contribucions més que notables en els camps de la visió, la llum, la mecànica dels sòlids, l'energia, el llenguatge i l'harmonia musical, entre d'altres. El seu descobriment major fou la demostració del comportament ondulatori de la llum, gràcies a l'experiment que porta el seu nom. Entre altres gestes, va col·laborar en el desxiframent de jeroglífics egipcis mitjançant la pedra Rosetta.

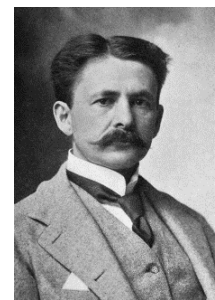


- **Étienne-Louis Malus [pàg. 31]** (París, França, 1775 - íd., 1812): Reconegut matemàtic i físic francès gràcies als seus estudis en el camp de l'òptica, al qual va aportar la llei que porta el seu nom i fa referència a la polarització de la llum. També va formar part de l'exèrcit de Napoleó amb els títols de capità i enginyer militar.
- **Joseph von Fraunhofer [pàg. 32]** (Stranbing, Baviera, Alemanya, 1787 - Munic, íd., 1826): Astrònom i físic alemany, principalment conegut pel seu treball en el camp de l'espectroscòpia. Fou el primer a estudiar les línies de l'espectre solar, les quals més endavant van ser anomenades línies de Fraunhofer, i va inventar l'espectroscopi, aparell capaç de mesurar les diferents freqüències corresponents a un moviment ondulatori.
- **Augustin-Jean Fresnel [pàg. 32]** (Broglie, Eure, França, 1788 - Ville d'Avray, íd., 1827): Físic i enginyer civil francès que va fer aportacions crucials a l'òptica durant el segle XIX, les quals van ajudar a consolidar la teoria ondulatoria de la llum. Va suposar que el color consisteix d'ones sinusoidals per explicar la difracció per vores rectes. També va explicar la polarització i molts altres fenòmens de la llum, fonamentant-se en les teories dels seus predecessors.
- **Siméon Denis Poisson [pàg. 33]** (Pithiviers, Loiret, França, 1781 - París, íd., 1840): Matemàtic i físic francès, professor de l'Escola Politècnica i la Facultat de Ciències de París. Va fer notables contribucions a les matemàtiques i la física, com la classificació de cossos aïllants i conductors, el desenvolupament de la teoria del potencial gravitatori i la llei de Poisson (expressió que relaciona el volum i la pressió d'un gas ideal).
- **François Jean Dominique Arago [pàg. 33]** (Estagel, Roussillon, França, 1786 - París, íd., 1853): Matemàtic, físic i astrònom francès el qual va arribar a ser cap de govern de la República Francesa. Va ser un dels descobridors del magnetisme rotatori i va fer grans contribucions a les teories òptiques de Fresnel a través del seu experiment anomenat punt d'Arago.
- **Christian Andreas Doppler [pàg. 34]** (Salzburg, Imperi Austríac, 1803 - Venècia, íd., 1853): Matemàtic, físic i astrònom austríac majoritàriament conegut per la seva hipòtesi sobre la variació de la freqüència d'una ona des d'un punt de vista determinat, avui en dia coneguda com l'efecte Doppler.
- **Armand Hippolyte Louis Fizeau [pàg. 34]** (París, França, 1819 - Jouarre, íd., 1896): Físic i astrònom francès que va descobrir l'efecte Doppler sense l'ajuda de Christian Andreas Doppler. A més a més, va mesurar la velocitat de la llum amb un sistema de rodes dentades i miralls.

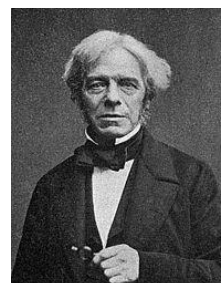


Acostant-nos a c

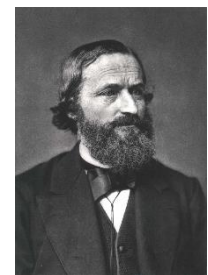
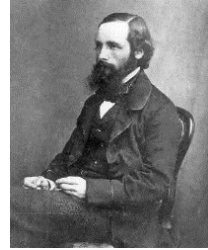
- **Jean Bernard Léon Foucault [pàg. 35]** (París, França, 1819 - íd., 1868): Físic francès que va mesurar el valor de la velocitat de la llum amb l'ajuda de les aportacions de Fizeau mitjançant un experiment amb miralls rotatoris. El valor exacte que va obtenir va ser 298 000 km/s. També va demostrar que la llum viatja més lentament quan incideix a l'aigua. Una altra invenció que va fer va ser el pèndol de Foucault, avui en dia molt reconegut.
- **Charles Wheatstone [pàg. 36]** (Barnwood, Anglaterra, 1802 - París, França, 1875): Científic anglès que va contribuir en l'estudi dels primers espectroscopis. També va aconseguir explicar la visió binocular a través d'un aparell que ell mateix va dissenyar, el qual funciona amb miralls, anomenat estereoscopi.
- **Albert Abraham Michelson [pàg. 36]** (Strzelno, Regnat de Prússia, 1852 - Califòrnia, EUA, 1931): Físic americà que va mesurar el valor de la velocitat de la llum millorant el mètode de Foucault, l'anomenat experiment de Michelson-Morley. El resultat més exacte que va aconseguir trobar va ser de $299\,774 \pm 11$ km/s.
- **Edward Williams Morley [pàg. 36]** (Nova Jersey, EUA, 1838 - Connecticut, íd., 1923): Científic conegut per fer una molt acurada i precisa mesura del pes atòmic de l'oxigen i per la seva col·laboració en l'experiment de Michelson-Morley, el qual va portar a la teoria de la relativitat d'Einstein.

La llum és una ona electromagnètica

- **Michael Faraday [pàg. 36]** (Londres, Anglaterra, 1791 - Molesey, íd., 1867): Físic i químic britànic que va fer grans aportacions en el camp del magnetisme i de l'electricitat. Els seus descobriments més importants van ser el principi d'inducció electromagnètica, el diamagnetisme (propietat dels elements que fa que repel·leixin els camps magnètics), i les lleis de l'electròlisi.

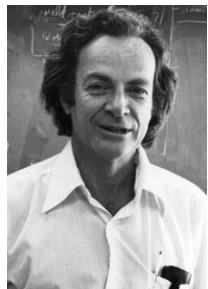


- **James Clerk Maxwell [pàg. 37]** (Edimburg, Escòcia, 1831 - Cambridge, Anglaterra, 1879): Matemàtic i físic escocès que, gràcies al seu treball per aconseguir formular la teoria clàssica de la radiació electromagnètica, va ser molt reconegut per tota la comunitat científica. Aquesta teoria relaciona l'electricitat amb el magnetisme i la llum. Les seves equacions són considerades la segona gran unificació de la física (després de la realitzada per Isaac Newton), i el seu treball és un dels més importants de la història de la ciència.
- **Heinrich Hertz [pàg. 38]** (Hamburg, Confederació Germànica, 1857 - Bonn, Imperi Alemany, 1894): Físic alemany el qual va fer molta recerca en el camp de l'estudi de la llum. Va descobrir l'efecte fotoelèctric (l'emissió d'electrons per un material quan incideix sobre ell una llum ultraviolada), la propagació d'ones electromagnètiques i les formes de detectar-les. La unitat de freqüència del SI porta el seu cognom en honor a les seves abundants aportacions a la física.
- **Gustav Robert Kirchhoff [pàg. 39]** (Königsberg, Prússia, 1824 - Berlín, Alemanya, 1887): Físic alemany que va fer grans aportacions dintre del camp de circuits elèctrics, òptica i radiació. Les més conegudes són les tres lleis de l'espectroscòpia (lleis que descriuen l'emissió de la llum als objectes incandescents), les dues lleis de l'electricitat (principis de conservació de la càrrega i l'energia) i la seva fórmula de la difracció de la llum.



Segle xx: neix la quàntica

- **Niels Henrik David Bohr [pàg. 40]** (Copenhaguen, Dinamarca, 1885 - íd., 1962): Bohr a proposar un nou model atòmic basant-se en el de Rutherford, introduint-hi la teoria dels orbitals quantificats. Va rebre, en 1922, el Premi Nobel de Física pels seus treballs sobre l'estructura atòmica i la radiació, els quals van permetre una major comprensió de l'àtom i la mecànica quàntica.
- **Richard Phillips Feynman [pàg. 40]** (Nova York, Estats Units, 1918 - Califòrnia, íd., 1988): Físic teòric reconegut per les seves contribucions a la mecànica quàntica i l'electrodinàmica quàntica. Va rebre el premi Nobel de Física en 1965 pel seu treball en aquest últim camp. És el creador dels diagrames de Feynman, els quals representen les expressions matemàtiques que estableixen el comportament de les partícules subatòmiques. A més a més, va contribuir en el desenvolupament de la bomba atòmica durant la Segona Guerra Mundial.



- **Werner Karl Heisenberg [pàg. 40]** (Würzburg, Imperi Alemany, 1901 - Munic, Alemanya de l'Est, 1976): Físic teòric i un dels fundadors més importants de la mecànica quàntica, el qual el va fer guanyador del Premi Nobel de Física l'any 1932. És conegut sobretot per l'anomenat principi d'incertesa de Heisenberg, el qual diu que no es pot mesurar el moment i posició d'una partícula a la vegada.



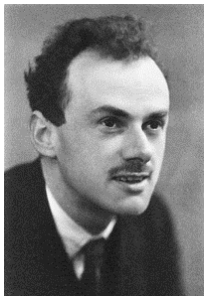
- **Max Born [pàg. 40]** (Breslau, Imperi Alemany, 1882 - Göttingen, Alemanya de l'Est, 1970): Físic i matemàtic molt implicat en el desenvolupament de la mecànica quàntica. Va fer grans contribucions a la física de l'estat sòlid i l'òptica. En 1954 va rebre el Premi Nobel de Física per la seva recerca en l'àmbit de la mecànica quàntica i la interpretació estadística de la funció d'ona.



- **Ernest Pascual Jordan [pàg. 40]** (Hannover, Imperi Alemany, 1902 - Hamburg, Alemanya de l'Est, 1980): Físic i naturalista conegut sobretot per les seves aportacions a la mecànica quàntica i la teoria quàntica de camps. També va ajudar a crear la mecànica matricial, juntament amb Heisenberg i Born.



- **Paul Adrien Dirac [pàg. 40]** (Bristol, Anglaterra, 1902 - Florida, EUA, 1984): Enginyer elèctric, matemàtic i físic britànic el qual va fer grans aportacions en la mecànica quàntica. Uns dels seus grans èxits va ser el resultat d'unir el treball previ de Heisenberg i de Schrödinger relacionat amb la quàntica. També fou el creador de l'equació encarregada de descriure els electrons, la qual actualment coneixem com equació de Dirac, en el seu honor.

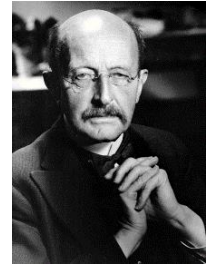


- **Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger [pàg. 40]** (Viena, Àustria, 1887 - íd., 1961): Professor i físic austríac que va destacar molt en el camp de la mecànica quàntica. Va aconseguir formular l'equació que determina l'evolució de la funció d'ona i que avui en dia és una de les bases de la quàntica. Schrödinger va rebre el Premi Nobel de Física gràcies a aquesta equació.



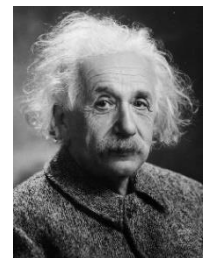
La llum és una partícula?

- **Max Planck [pàg. 40]** (Kiel, Holstein, Alemanya, 1858 - Göttingen, íd., 1947): Important físic teòric de principis del segle xx, conegut principalment pel desenvolupament de la teoria quàntica gràcies a la qual va guanyar el premi Nobel de Física l'any 1918. Entre les seves aportacions es troben el descobriment de la constant de Planck (h) i la llei de radiació dels cossos negres. En el seu honor, la Societat Kaiser Wilhelm va ser redenominada com a la Societat Max Planck.
- **John William Strutt [pàg. 40]** (Essex, Anglaterra, 1842 - íd., 1919): Físic i catedràtic britànic que va fer grans aportacions en el camp de l'òptica. Es va especialitzar en la polarització de la llum i el color. Un dels seus treballs més importants va estar relacionat amb la teoria de la radiació del cos negre. En 1904 va rebre el Premi Nobel de Física per descobrir l'argó.
- **James Hopwood Jeans [pàg. 40]** (Southport, Anglaterra, 1877 - Dorking, íd., 1946): Físic, astrònom i matemàtic conegut sobretot per l'anomenada llargada de Jeans, la qual determina la mida crítica d'un núvol interestel·lar homogeni i isotèrmic (de temperatura constant). També va col·laborar en el descobriment de la llei de Rayleigh-Jeans, la qual relaciona la densitat de la radiació d'un cos negre amb la temperatura emesa.
- **Philipp Eduard Anton von Lenard [pàg. 41]** (Presburg, Imperi Austríac, 1862 - Messelhausen, Alemanya, 1947): Físic hongarès el qual va ampliar el treball sobre òptica de Hertz i va fer una abundant investigació sobre els raigs catòdics i com estudiar-los. Gràcies a aquest treball va ser premiat amb el Premi Nobel de Física.



La llum és una ona electromagnètica i una partícula

- **Albert Einstein [pàg. 41]** (Ulm, Württemberg, Alemanya, 1879 - Princeton, Nova Jersey, EUA, 1955): Conegut com un dels científics més importants de la història, Einstein fou un físic teòric alemany creador de la teoria de la relativitat, una de les teories més rellevants de la física moderna. Amb centenars de publicacions i treballs, entre les quals està inclosa l'explicació de l'efecte fotoelèctric per la qual va guanyar el Nobel en 1921, Albert Einstein ha suposat un abans i un després en el món de la física i la forma en què els humans entenem la realitat.



La visió actual de la llum

- **Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie [pàg. 42]** (Dieppe, França, 1892 - Louveciennes, íd., 1987): Físic quàntic que va explicar la naturalesa ondulatoria dels electrons i va mencionar la possibilitat que tota la matèria tingui propietats ondulatòries, concepte conegut com a hipòtesi de Broglie. Va guanyar el Nobel de Física en 1929, quan va ser demostrat el comportament ondulatori de la matèria experimentalment.



6.2. Metodologia emprada per determinar el marge d'error

En la part pràctica del nostre treball de recerca ens hem proposat recrear una sèrie d'experiments de diverses èpoques i característiques per mesurar la velocitat de la llum (c). En el procés experimental moltes causes poden afectar la mesura de les magnituds, i això dona lloc a errors. Per assegurar que l'error en els resultats de cada experiment és mínim, hem fet múltiples mesures per reduir i determinar estadísticament el marge d'error de cadascun.

Per a determinar la desviació del valor obtingut experimentalment (x) respecte del valor real (x_0) s'utilitza l'error absolut (Δx), definit com la diferència d'aquests dos valors:

$$\Delta x = |x - x_0|$$

Per la quantitat percentual d'error en un resultat, respecte del seu valor real s'utilitza el concepte d'error relatiu (ε), equivalent a:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0}$$

Aquest resultat és expressat en percentatge com $\varepsilon \times 100\%$

Degut a que l'objectiu del nostre treball és determinar la velocitat de la llum, no utilitzarem el seu valor real (x_0) en la determinació dels errors relatius i absoluts. En canvi, els errors estan expressats com a la desviació respecte de la mitjana aritmètica de tots els resultats que hem obtingut. Sabent que la mitjana aritmètica (\bar{x}) és:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_n$$

On N és el nombre de mesures fetes i x_n cadascuna de les mesures. Per tant, l'error absolut respecte a la mitjana aritmètica serà:

$$\Delta x = |x - \bar{x}| = \left| x - \frac{1}{N} \sum x_n \right|$$

I, similarment, l'error relatiu respecte a la mitjana aritmètica és:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} = \frac{\Delta x}{\frac{1}{N} \sum x_n}$$

Per determinar la imprecisió de l'experiment utilitzarem el concepte de imprecisió absoluta (E_a), equivalent a la mitjana aritmètica de tots els errors absoluts corresponents a cada intent:

$$E_a = \frac{\sum \Delta x_n}{N} = \frac{\sum |x_n - \bar{x}|}{N}$$

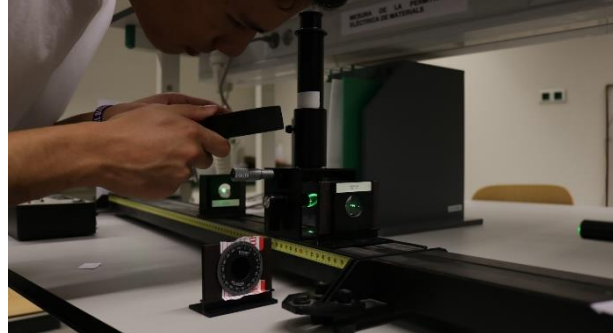
6.3. Galeria d'imatges

Totes les imatges a continuació són de font pròpia.

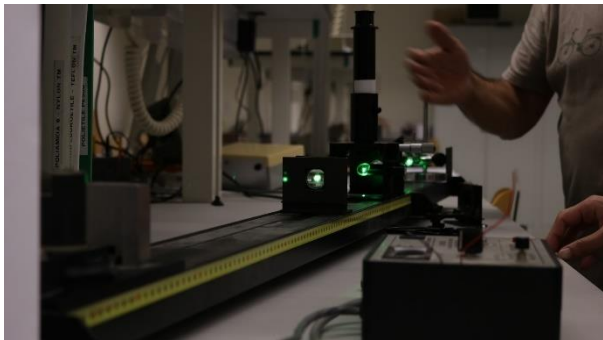
Muntatge de l'experiment 1



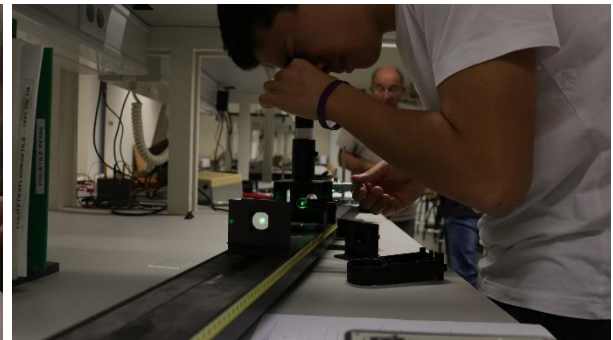
Imatge 1. Làser verd de l'experiment de Foucault.



Imatge 2. Membre del grup mesurant el desplaçament angular $\Delta s'$.

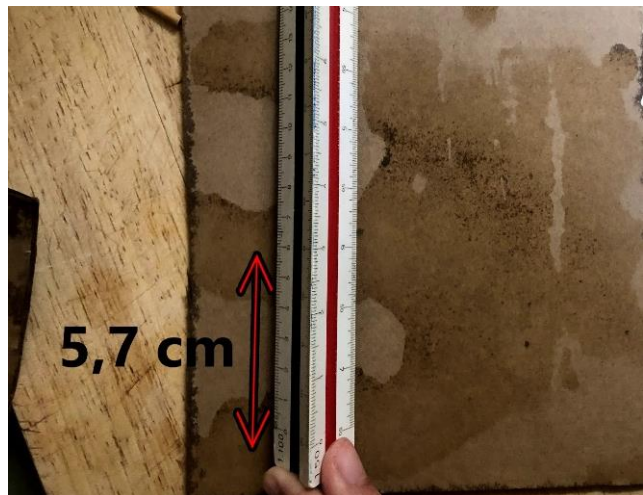
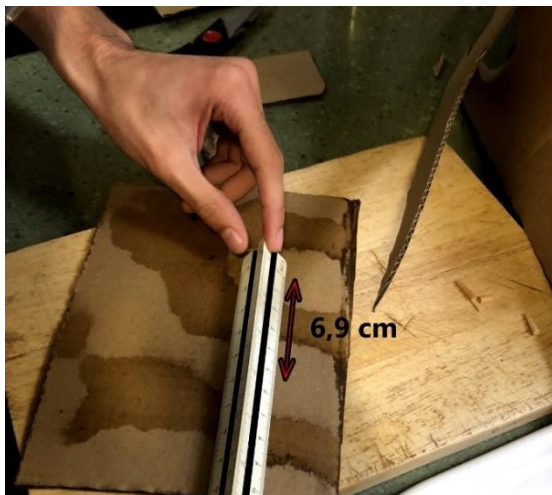


Imatge 3. Aparell de PASCO de l'experiment de Foucault.



Imatge 4. Membre del grup mirant pel visor.

Mesures preses en l'experiment 3



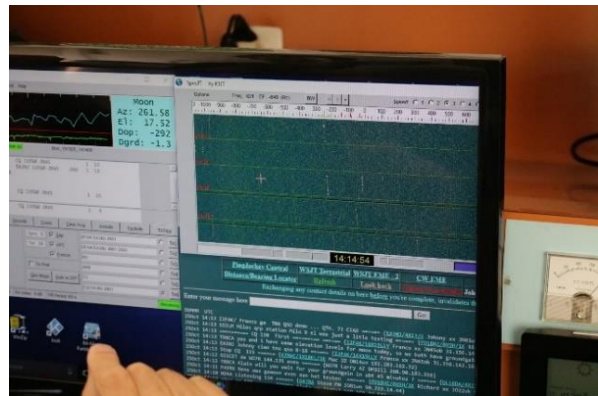


Imatges 5, 6, 7 i 8. Mesura de les distàncies entre els punts secs i humits del cartró en l'experiment 3.

L'estació radiofònica d'en Joan Bertran (Experiment 4)



Imatge 9. Estació radiofònica d'en Joan Beltran.



Imatge 10. Software WSJT 9.7 per comunicacions de ràdio.



Imatge 11. Foto grupal a l'estació de ràdio d'en Joan Beltran (d'esquerra a dreta: n'Enric Bertran, en Joan Esteve, en Joan Bertran i el nostre grup).

7. Bibliografia i webgrafia

Llibres

- CABRERA, Blas, *Física Experimental II*, Madrid, Ed. Labor s. A. , 1933.
- CREASE, Robert P., *The Prism and the Pendulum: The Ten Most Beautiful Experiments in Science*, EEUU, Random House Inc, 2003.
- DITCHBURN, Robert William, *Óptica*, Barcelona, Editorial Reverté, s. A., 1982.
- FIGUERAS ATIENZA, Marc, *Del Fuego al Láser, qué es la luz y cómo se genera*, Barcelona, Ed. UOC, 2017.
- HAKFOORT, Casper, *Optics in the Age of Euler*, Amsterdam, Editions Rodopi, 1986.
- KLEM-MUSATOV, Kamill; et al. *Classical and Modern Diffraction Theory*, EEUU, SEG Books, 2016.
- MALACARA, Daniel, *Óptica básica, Tercera edición*, México, Fondo de Cultura Económica, 2015.
- RIEDL, Max J., *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition*, SPIE Press, Bellingham, WA, 2001.
- SERRA, Salvador; ARMENGOL I SOLÉ, Montserrat; MERCADÉ I CAPELLADES, Joan, *Física 2n batxillerat*, McGrawHill Interamericana, 2018.
- TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene, *Physics for Scientists and Engineers*, EEUU, W. H. Freeman and Company, 2008.

Articles de revistes i premsa

- ASLAKSON, Carl I. (1951), *A New Measurement of the Velocity of Radio Waves*, Nature, <https://doi.org/10.1038/168505a0>, <<https://www.nature.com/articles/168505a0>>
- BACHILLER, Rafael, *¡La luz es una onda!*, El Mundo, [16/09/2015], <<https://www.elmundo.es/ciencia/2015/09/16/55f678c3ca4741ce708b4570.html>>
- COHEN, Bernard (1940), *Roemer and the First Determination of the Velocity of Light (1676)*. Isis, 31(2), 327–379. doi:10.1086/347594., <<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/347594>>
- DANESHFARD, B.; DALFARDI, Benham; NEZHAD, Golnoush Sadat Mahmoudi (2014), *Ibn al-Haytham (965–1039 AD), the original portrayal of the modern theory of vision*. Journal of Medical Biography, 24(2), 227–231. doi:10.1177/0967772014529050, <<https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/347594>>
- FARA, Patricia (2015), *Newton shows the light: a commentary on Newton (1672) 'A letter ... containing his new theory about light and colours...'*, 373 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, <http://doi.org/10.1098/rsta.2014.0213>, <<https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2014.0213>>
- GONZÁLEZ-CANO, Agustín (2015), *Alhacén: una revolución óptica*. Arbor, 191 (775): a262., <<http://dx.doi.org/10.3989/arbor.2015.775n5001>> [Consulta: 18 de juny de 2019]
- KUMAR, Arvind (2006), *Newton's Contributions to Optics*, Reson. 11, 10., <<https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/011/12/0010-0020>>
- SHEA, James H. (1997), *Ole Rømer, the speed of light, the apparent period of Io, the Doppler effect, and the dynamics of Earth and Jupiter*, Am. J. Phys., Vol. 66, No. 7, <<https://pdfs.semanticscholar.org/7d36/f0888edba1150b9bc5413edbd72db4a22e93.pdf>>
- URTUBIA, César (1988), *Aportación a la óptica de Robert Hooke*. Ver y oír, març-abril 1988, núm. 31, p. 33-37, <<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/753>>
- WHEATON, Bruce R., *Philipp Lenard and the Photoelectric Effect, 1889-1911.*, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 9, 1978, pp. 299–322. JSTOR, www.jstor.org/stable/27757381., <https://www.jstor.org/stable/27757381?seq=1#page_scan_tab_contents>
- ZUBAIRY, Muhammad Suhail (2016), *A Very Brief History of Light*. In: Al-Amri M., El-Gomati M., Zubairy M. (eds) *Optics in Our Time*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_1>

Pàgines web

- AZOOPTICS (2014), *Michelson Interferometer - Definition and Applications*, azooptics.com, <<https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=698>> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
- *Breve historia de la óptica geométrica y de las lentes*, teleformacion.edu.aytolacoruna.es, <<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicalInteractiva/OptGeometria/historia/Historia.htm>> [Consulta: 20 de maig de 2019]
- COX, Chris (1993), *Chris Cox NØUK/G4JEC*, chris.org, <<https://chris.org/>> [Consulta: 26 d'octubre de 2019]
- CROW (2015), *Polymer Properties Database*, polymerdatabase.com, <<http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Epsilon%20Table.html>> [Consulta: 1 de novembre de 2019]
- DAVIDSON, Michael W. (2015), *Leonhard Euler*, micro.magnet.fsu.edu, <<https://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/euler.html>> [Consulta: 20 de juny de 2019]
- *Diffraction of Light*, alternativephysics.org, <<http://www.alternativephysics.org/book/Diffraction.htm>> [Consulta: 19 de maig de 2019]
- *Dualidad onda-partícula. Teoría de De Broglie*, eis.uva.es, <[http://www.eis.uva.es/~qgintro/atom/tutorial-09.html#targetText=La%20relaci%C3%B3n%20entre%20estas%20magnitudes,%CE%BD\)%20de%20la%20onda%20asociada.](http://www.eis.uva.es/~qgintro/atom/tutorial-09.html#targetText=La%20relaci%C3%B3n%20entre%20estas%20magnitudes,%CE%BD)%20de%20la%20onda%20asociada.)> [Consulta: 9 d'octubre de 2019]
- DENOU, Violeta (2019), *Teo y su familia*, teo.es, <<http://www.teo.es/es/teo-y-su-familia>> [Consulta: 24 de novembre de 2019]
- EKSPON, Gösta (1999), *The dual nature of light as reflected in the Nobel archives*, nobelprize.org, <<https://www.nobelprize.org/prizes/themes/the-dual-nature-of-light-as-reflected-in-the-nobel-archives>> [Consulta: 29 d'agost de 2019]
- FISICALAB, *Errores Absolutos y Relativos*, fisicalab.com, <<https://www.fisicalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos#contenidos>> [Consulta: 23 de novembre de 2019]
- FRANCO GARCÍA, Ángel, *El principio de Fermat*, sc.ehu.es, <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica_/ondas/reflex_trans/snell/snell1.html> [Consulta: 19 de juny de 2019]
- GÓMEZ-ESTEBAN GONZÁLEZ, Pedro (2012), *Las ecuaciones de Maxwell*, eltamiz.com, <https://eltamiz.com/files/Ecuaciones_Maxwell.pdf> [Consulta: 3 de juliol de 2019]
- *Heinrich Hertz (15 - 1894): Radio waves – photoelectric effect – speed of radio waves*, physics.usyd.edu.au, <http://www.physics.usyd.edu.au/teach_res/hsp/u7/t7_hertz.pdf>
- HENDERSON, Tom, *The Doppler Effect*, physicsclassroom.com, <<https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/The-Doppler-Effect>> [Consulta: 20 de juny de 2019]
- HERSCHEL, Caroline (2009), *Newton's Reflecting Telescope*, ecuip.lib.uchicago.edu, <<http://ecuip.lib.uchicago.edu/multiwavelength-astronomy/optical/history/04.html>> [Consulta: 18 de juny de 2019]
- JDELACIENCIA (2015), *Francesco Grimaldi, descubridor de la difracción*, juandelaciencia.wordpress.com, <<https://juandelaciencia.wordpress.com/2015/04/01/francesco-grimaldi-descubridor-de-la-difraccion/>> [Consultat: 17 de juny de 2019]
- KHAN ACADEMY (2019), *Introduction to simple harmonic motion review*, khanacademy.org, <<https://www.khanacademy.org/science/ap-physics-1/simple-harmonic-motion-ap/introduction-to-simple-harmonic-motion-ap/a/introduction-to-simple-harmonic-motion-review>> [Consulta: 28 d'agost de 2019]
- LEA, Robert (2018), *The Double Slit Experiment Demystified. Disproving the Quantum Consciousness connection*, medium.com, <<https://medium.com/predict/the-double-slit->

- experiment-demystified-disproving-the-quantum-consciousness-connection-ee8384a50e2f> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
- LEÓN, Manuel de (2016), *Las matemáticas de la luz: Euclides*, madrimasd.org, <<https://www.madrimasd.org/blogs/matematicas/2016/04/13/140946>> [Consulta: 17 de juny de 2019]
 - LEÓN, Manuel de (2016), *Las matemáticas de la luz: Herón y Ptolomeo*, madrimasd.org, <<https://www.madrimasd.org/blogs/matematicas/2016/04/20/140950>> [Consulta: 17 de juny de 2019]
 - LEÓN, Manuel de (2016), *Las teorías de la luz en la Europa moderna: Johannes Kepler*, madrimasd.org, <<https://www.madrimasd.org/blogs/matematicas/2016/05/13/141334>> [Consulta: 18 de juny de 2019]
 - LÓPEZ SANCHO, José María; MORENO GÓMEZ, Esteban; GÓMEZ DÍAZ, María José (2005), *La medida de la velocidad de la luz: el siglo XIX*, museovirtual.csic.es, <<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz16.htm>> [Consulta: 18 de juny de 2019]
 - LUCAS, Jim (2015), *What Is Electromagnetic Radiation?*, livescience.com, <<https://www.livescience.com/38169-electromagnetism.html>> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
 - *Maxwell's Equations: Electromagnetic Waves Predicted and Observed*, courses.lumenlearning.com, <<https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/24-1-maxwells-equations-electromagnetic-waves-predicted-and-observed/>> [Consulta: 3 de juliol de 2019]
 - MOEDING, Ansgar (2007), *Make more miles on VHF*, mmonvhf.de, <<http://mmonvhf.de/index.php>> [Consulta: 26 d'octubre de 2019]
 - *Moon Distances for Barcelona, Spain - Barcelona*, timeanddate.com, <<https://www.timeanddate.com/astronomy/moon/distance.html>> [Consulta: 29 d'octubre de 2019]
 - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, SCIENCE MISSION DIRECTORATE (2010), *Anatomy of an Electromagnetic Wave*, science.nasa.gov, <https://science.nasa.gov/ems/02_anatomy> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
 - NAVE, Rod, *Law of Reflection, Fermat's Principle: Reflection, Fermat's Principle and Refraction*, hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/Fermat.html>> [Consulta: 19 de juny de 2019]
 - O'CONNOR, John Joseph; ROBERTSON, Edmund Frederick (2002), *Light through the ages: Ancient Greece to Maxwell*, history.mcs.st-and.ac.uk, <http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/HistTopics/Light_1.html> [Consulta: 20 de maig de 2019]
 - PADMARAJU, Kishore, *Faraday Rotation*, pas.rochester.edu, <https://www.pas.rochester.edu/~advlab/reports/padmaraju_faraday.pdf> [Consulta: 21 de juny de 2019]
 - PALOMARES, Manuel, *Los Meteorológicos de Aristóteles en el Toledo del siglo XII*, divulgameteo.es, <<http://www.divulgameteo.es/uploads/Meteorológica-Aristóteles.pdf>> [Consulta: 24 d'agost de 2019]
 - PASCO, *Speed of Light Experiment*, pasco.com, <https://www.pasco.com/prodCatalog/EX/EX-9932_speed-of-light-experiment/index.cfm#> [Consulta: 29 d'octubre de 2019]
 - PATEL, Nikita; VO, Kevin; HERNANDEZ, Mateo (2019), *Electromagnetic Radiation*, chem.libretexts.org, <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation)> [Consulta: 19 de maig de 2019]
 - PÉREZ PORTO, Julián; MERINO, María (2008), *Definición de la reflexión de la luz*, definicion.de, <<https://definicion.de/reflexion-de-la-luz/>> [Consulta: 19 de maig de 2019]
 - *Photoelectric effect*, britannica.com, <<https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect>> [Consulta: 3 de juliol de 2019]

- *Recorrido: Ondas*, virtual.ffyb.uba.ar, <<http://virtual.ffyb.uba.ar/mod/book/view.php?id=88043&chapterid=1838>> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
- SACK, Harald (2014), *Hippolyte Fizeau and the Speed of Light*, scihi.org, <<http://scihi.org/hippolyte-fizeau-and-the-speed-of-light/>> [Consulta: 19 de juny de 2019]
- SEGAL, Jessie; CEDARMAN, Alyssa; MACISAAC, Dan, *Poisson's Spot Using a Pin and Office Supplies*, physicsed.buffalostate.edu/, <<http://physicsed.buffalostate.edu/pubs/StudentIndepStudy/EURP09/Spot/spot.html#references>> [Consulta: 3 de juliol de 2019]
- SHAIK, Asif (2019), *Corpuscular Theory of Light*, physics-and-radio-electronics.com, <<https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/corpuscular-theory-light/>> [Consulta: 18 de juny de 2019]
- *The Electromagnetic Spectrum*, imagine.gsfc.nasa.gov, <<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
- *The Michelson Interferometre*, physics.iitm.ac.in, <<http://www.physics.iitm.ac.in/~ph5060/manuals/Michelson.pdf>> [Consulta: 2 de juliol de 2019]
- TOMÉ LÓPEZ, César (2016), *La primera confirmación experimental de la teoría de Maxwell*, culturacientifica.com, <<https://culturacientifica.com/2016/08/09/la-primera-confirmacion-experimental-la-teoria-maxwell/>> [Consulta: 3 de juliol de 2019]
- TOPDEMIR, Hüseyin Gazi (2007), *Kamal Al-Din Al-Farisi's Explanation of the Rainbow, The Optical Researches of Kamāl al-Dīn al-Fārisī, in Nūsha (Journal of Oriental Studies)*, muslimheritage.com, <<http://muslimheritage.com/article/kamal-al-din-al-farisi%E2%80%99s-explanation-rainbow>> [Consulta: 19 de juny de 2019]
- TOPDEMIR, Hüseyin Gazi (2007), *Taqi al-Din ibn Ma'ruf and the Science of Optics: The Nature of Light and the Mechanism of Vision*, muslimheritage.com, <<http://muslimheritage.com/article/taqi-al-din-ibn-ma%E2%80%98ruf-and-science-optics-nature-light-and-mechanism-vision>> [Consulta: 19 de juny de 2019]
- WEISSTEIN, Eric W. (2007), *Fresnel Diffraction*, scienceworld.wolfram.com, <<http://scienceworld.wolfram.com/physics/FresnelDiffraction.html>> [Consulta: 20 de juny de 2019]
- ZIDBITS (2011), *Why Can't Anything Go Faster Than The Speed Of Light?*, zidbits.com, <<https://zidbits.com/2011/05/why-cant-anything-go-faster-than-the-speed-of-light/>> [Consulta: 6 d'octubre de 2019]

Vídeos

- ANCLIFF, Mark (2016), *Modern Physics 2-2: Measuring the Speed of Light (Foucault Experiment)*, <<https://www.youtube.com/watch?v=o6xsCz1oXHI>>
- OPENMIND (2017), *El Efecto Fotoeléctrico*, <<https://www.youtube.com/watch?v=0b0axfyJ4oo>>
- PHYSICS MODELS by kaustubhan (2017), *Speed of Light by Fizeau method* <<https://www.youtube.com/watch?v=XMzpaJAJu2Y>>
- SCIENCE PLUS (2015), *Why Is The Speed Of Light So Important?*, <https://www.youtube.com/watch?v=QSE_evUBNsU&t=316s>
- SS PHYSICS (2017), *Diffraction of light, Fraunhofer and Fresnel Diffraction, Physics, WATCH COMPLETE VIDEO*, <<https://www.youtube.com/watch?v=Q-oQKSLhLkKw&feature=youtu.be>>
- TECHLABORATORIES (2013), *Fresnel and the Story of Light*, <<https://www.youtube.com/watch?v=G5kxYTT-t28&t=107s>>
- VERITASIVM (2013), *The Original Double Slit Experiment*, <<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0>>



Totes les imatges d'en Teo són propietat de Carlota Goyta Vendrell, Asunción Esteban Noguera i Ana Vidal, il·lustradores de les obres d'aquest personatge.

Agraïments

En primer lloc, voldríem dedicar unes paraules de consideració al suport i l'ajuda proporcionats pel nostre tutor i supervisor del Treball de Recerca, en Xavi Talavera. Sense ell, ara mateix estaríem perduts en la immensitat del cosmos, intentant trobar una manera de viure a Mart i crear-hi una atmosfera terrestre artificial. Va ser ell qui ens va ajudar a trobar un tema més adequat al resultat que esperàvem obtenir, i ens va guiar, sempre amb un somriure i molta motivació, a través de tot aquest viatge de nou mesos a la velocitat de la llum. Gràcies a la seva comprensió dels nostres objectius, als suggeriments que ens va proposar i a l'entusiasme que sempre va mostrar envers el tema, avui tenim aquest treball, el qual li dediquem com a cinquè membre del grup.

Tot seguit, agrair el suport que ens va ser ofert pel programa FORCES de la Universitat de Barcelona, el qual ens va facilitar un magnífic tutor extern, en Joan Esteve (professor emèrit de la Facultat de Física). Ell, a banda de revisar-nos el projecte, ens va ajudar en tot el treball de camp, i ens va facilitar l'ús dels laboratoris de la Universitat i tota mena de material. Vam enriquir els nostres experiments per mesurar la velocitat de la llum gràcies als seus nombrosos contactes en l'àmbit de l'òptica, entre els quals és necessari esmentar al catedràtic de Física Enric Bertran per la seva ajuda en les pràctiques que vam dur a terme, i el radioaficionat Joan Bertran per acollir-nos al seu fascinant estudi de ràdio i fer possible un dels experiments que aquí exposem.

Gràcies també a la Marisa García, exprofessora de Física a l'institut, per mostrar l'interès que ens va impulsar cap endavant amb aquest treball. Voldríem agrair, a més, els seus esforços per revisar la nostra feina de manera altruista i sense cap obligació a fer-ho. Els seus consells, basats en els treballs que havia tutoritzat anys enrere, ens van servir de gran ajuda i guia quan encara no teníem plantejat el tema que tractaríem.