

# La velocitat de la llum

---

Treball de recerca de batxillerat 2017

27/11/2017

## La velocitat de la llum

*“Curiosament, tot i que comencem utilitzant el món per a descobrir la llum,  
és la llum la que ens acaba descobrint el món.”*

Pedro Gómez-Esteban en els articles “El tamiz”.

# ÍNDEX

---

1.	INTRODUCCIÓ .....	1
2.	OBJECTIUS.....	2
	MARC TEÒRIC.....	3
3.	LA LLUM .....	3
3.1	HISTÒRIA .....	3
3.1.1	Primeres concepcions primitives sense fons empíric .....	3
3.1.2	Ones o partícules? .....	4
3.1.3	Ones longitudinals i transversals.....	7
3.1.4	La polarització de la llum.....	7
3.1.5	Concepció de la llum abans de Maxwell.....	7
3.1.6	Ona electromagnètica: Faraday i les equacions de Maxwell.....	8
3.1.7	Experiment de Michelson i Morley: l'interferòmetre.....	8
3.1.8	Dualitat ona-partícula.....	8
3.2	DEFINICIÓ ACTUAL I CONCEPTES GENERALS.....	10
3.3	FENÒMENS ASSOCIATS A LA PROPAGACIÓ DE LA LLUM .....	11
4.	LA VELOCITAT DE LA LLUM .....	14
4.1	LA VELOCITAT DE LA LLUM AL LLARG DE LA HISTÒRIA.....	15
4.1.1	1638, Galileu: almenys 10 vegades més ràpid que el so. ....	17
4.1.2	1675, Ole Roemer: 214.000 Km/s.....	18
4.1.3	1728, James Bradley: 309.397 Km / s.....	22
4.1.4	1849, Hippolyte Louis Fizeau: 313.000 Km / s.....	24
4.1.5	1862, Leon Foucault 299.796 Km / s .....	26
4.1.6	1879 i 1926, Albert Michelson: 299.910 km/s i 299.796 km/s .....	28
4.1.7	Mesures a partir d'unitats electromagnètiques (1868 i 1907).....	30
4.1.8	Altres intents del mètode del mirall rotatori (1876 i 1883) .....	31
4.1.9	Mètodes que utilitzen un obturador electroòptic (1925, 1940 i 1950).....	31
4.1.10	Mesures d'ones electromagnètiques de radiofreqüència (1947 i 1952) .....	32
4.1.11	Mètodes amb làsers (a partir del 1970) .....	32
5.	PRÀCTIQUES PER MESURAR “c” .....	33
6.	CONCLUSIONS.....	42
7.	BIBLIOGRAFIA.....	44
8.	ANNEXOS.....	46

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Com la majoria d'alumnes, no vaig tenir gaire clar el meu treball des del principi. Sentia que no tenia prou coneixements, per molt que em documentés, com per poder plantejar una proposta raonable amb la seguretat que m'agradés i fos realitzable. Poc a poc m'he adonat que d'això es tracta: escollir a cegues per a desentelar la vista progressivament durant la recerca; assolint els teus objectius inicials, o d'altres més prometedors que sorgeixen en el camí.

Partint de la convicció que el meu treball havia de ser de la branca física o tecnològica, perquè són les ciències que m'agraden més, vaig començar la meua recerca. Se'm va oferir l'oportunitat de treball amb universitats i centres d'estudis, i vaig decidir comprometre'm amb l'ICFO, l'Institut de Ciències Fotòniques. El que inicialment havia de ser un treball enfocat en el grafè, del departament de tecnologia; ha desencadenat en un treball centrat en la velocitat de la llum, purament científic.

Va ser el meu pare el que, quan vaig deixar caure la paraula "fotònica", va enviar-me immediatament un link d'uns articles de "El tamiz" que, cito textualment: "són esclaridors des de l'inici fins al final". Quan me'ls vaig llegir, em va fascinar l'evolució històrica dels nostres coneixements sobre la llum i les deduccions claus d'uns genis a partir d'altres. El fet d'entendre poc a poc una cosa tant extremadament complexa com la llum, m'ha motivat durant la recerca i per aquesta raó, la història és tant important dins la meua part teòrica.

Durant l'estiu vaig sintetitzar els articles sobre la llum i la informació referent als diferents mètodes per a estimar la velocitat de la llum, però l'objectiu i repte més important per a mi va ser entendre'ls en la seva totalitat. Trobar els càlculs i esquemes originals va ser també un desafiament, al que fins ben entrat setembre, no vaig trobar solució en llibres i estudis, majoritàriament en anglès.

Pel que fa al meu marc pràctic, he desitjat dur a terme milers de projectes i un a un, he estat conscient de les limitacions a les que es veurien sotmesos a mesura que investigava sobre els materials i condicions que requerien.

Tot i així, he dut a terme dues pràctiques molt diferents entre si sistemàticament, però amb un objectiu comú: esbrinar la velocitat de la llum. Ambdues han estat curioses i no han fet més que corroborar el que la meva recerca teòrica m'indicava: el mínim experiment científic implica un treball i precisió impensable.

A més a més, com em va costar molt recol·lectar la informació sobre els experiments reals que van dur a terme tan Roemer, com Bradley, Fizeau o Foucault; he decidit crear un lloc web sites on encabir el meu treball de recerca, la síntesi d'informació que m'hagués agradat trobar en un principi per facilitar l'enteniment de tants conceptes nous per a mi.

## 2. OBJECTIUS

---

- Entendre la llum en tots els seus aspectes i l'evolució dels nostres coneixements sobre aquesta.
- Reproduir els càlculs realitzats per estimar la velocitat de la llum al llarg de la història.
- Reproduir l'experiment de Foucault de 1849 de la manera més fidel possible.
- Estimar amb el mínim error la velocitat de la llum a partir d'algun experiment actual, realitzant els càlculs amb les dades recollides.

## MARC TEÒRIC

# 3. LA LLUM

---

La llum ha suposat tal enigma pels éssers humans, que la majoria de genis al llarg de la història han aportat el seu gra de sorra provant de definir-la, estudiar-la i abastir-la.

Des de filòsofs amb meres deduccions fins a científics mitjançant complexos experiments, hem anat aproximant-nos, esglaó a esglaó, al que a dia d'avui coneixem com una porció de l'espectre electromagnètic.

Tal i com cita Pedro Gómez-Esteban en els articles "El tamiz": "Curiosament, tot i que comencem utilitzant el món per a descobrir la llum, és la llum la que ens acaba descobrint el món."

## 3.1 HISTÒRIA

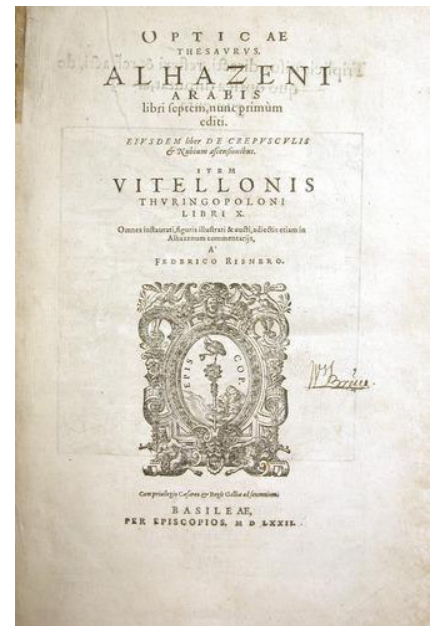
### 3.1.1 Primeres concepcions primitives sense fons empíric

No fem menció de la llum fins el segle V a.C. Situant-nos a la Grècia clàssica, filosofia i ciència encara no s'han separat. Per tant, només es formulen hipòtesis fonamentades en raonaments sense experimentació.

- **Empèdocles d'Agrigent**, al voltant de l'any 450 a.C, amb la seva hipòtesi d'emissió, sustenta que l'ull humà posseeix un foc interior i la interacció entre els raigs emesos pels objectes i els emesos per l'ull permet la visió. És un dels primers en especular que la llum viatja amb velocitat finita. Casi un mil·lenni més tard, Anicuis Boethius intenta determinar aquesta velocitat, però és decapitat per traïció i bruixeria.
- **Aristòtil**, amb la seva hipòtesi d'absorció, afirma que només gràcies a una llum externa que abasteix tant els objectes com l'ull, és possible la visió. També planteja la llum com un fenomen ubic, present a tot arreu al mateix temps.
- En el segle I a.C, **Tito Lucreci Caro**, defineix la llum com minúscules partícules que es mouen a una velocitat enorme.
- **Herón d'Alexandria** afirma que la llum ha de tenir velocitat infinita, perquè objectes tan distants com les estrelles els veiem instantàniament a l'obrir els ulls.

## La velocitat de la llum

- **Claudi Ptolomeu (segle II d.C)**, publica el seu tractat: Òptica, que capta la visió general dels científics pel que fa referència a la llum. Aquests són els coneixements que perduren fins el segle X, degut a que no hi ha cap altre avanç científic fins llavors. Ptolomeu estudia amb més profunditat la refracció, en funció de l'angle i la seva relació amb la densitat. S'adona que el canvi de direcció dels raigs està relacionat amb la densitat dels materials. Si el canvi de densitat d'un medi a un altre és lleuger, el canvi de direcció també ho és, mentre que si el canvi de densitat és brusc, el canvi de direcció també. Tot i que realitza meticuloses taules amb els angles d'incidència i refracció, no aconsegueix una llei matemàtica que relacioni ambdós.
- Segons els **científics de Bagdad** del s. X, la visió es deu únicament a l'entrada dels raigs a l'ull i la llum es propaga per l'espai, no és ubiqua.
- **Abū Rayhān al-Bīrūnī** postula la hipòtesi de que la llum ha de ser molt més ràpida que el so, perquè veiem un raig abans d'escoltar-lo.
- **Alhacén**, entre 1011 i 1021, escriu un tractat d'òptica en 7 volums que esclareix molts conceptes, entre aquests, com la llum penetra perpendicularment a la còrnia de l'ull.



**Il·lustració 1: Portada d'una traducció al·latí del setè volum de l'Òptica d'Alhacén, una edició de 1574. Font: Articles "El tamiz".**

### 3.1.2 Ones o partícules?

El primer terç del segle XVII persisteix entre els científics un debat sobre la natura de la llum.

Descartes, basant-se en les similituds de la llum i el so, afirma que ambdues són ones: hipòtesis ondulatòria. Així explica també la refracció: quan una ona lluminosa canvia de medi, també ho fa de velocitat i per tant, de direcció, com el so. És la teoria més acceptada a l'època.

## La velocitat de la llum

Pierre Gassendi afirma el contrari: la llum està formada per petites partícules (com deia Lucreci): hipòtesis corpuscular. S'argumentava en el fet que tot a la natura estava format per petits corpuscles, per tant la llum havia de tenir aquesta mateixa estructura.

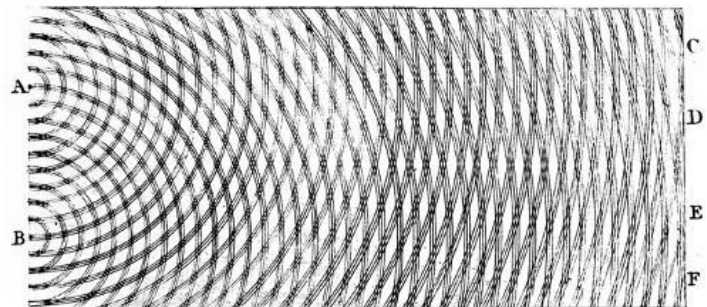


**Il·lustració 2: René Descartes (1596-1650) vs. Pierre Gassendi (1592-1655) Font: Articles "El tamiz".**

A l'any 1660 James Gregor aconseguia visualitzar la difracció de la llum en un experiment amb una ploma. Això s'oposava a l'argument principal d'Isaac Newton, a favor de la teoria corpuscular, la llum produeix ombres ben definides, no es difracta com les ones. Newton modifica llavors les seves idees per explicar tal fenomen, introduint el concepte de l'èter i ho publicà al tractat "Òptica" (1704).



**Il·lustració 3: Ombres de les ones del mar. Font: Articles "El tamiz".**



**Il·lustració 4: Diagrama de Young sobre el seu experiment de la doble esclatxa. Font: Articles "El tamiz".**

Huygens, a favor de la teoria ondulatoria, no podia explicar-se la capacitat de la llum de propagar-se pel buit, si el so, que també era una ona, requeria d'un medi. Trobà la resposta també amb el concepte de l'èter luminífer.

L'èter luminífer era una hipotètica substància extremadament lleugera que es creia que ocupava el buit i era el medi de propagació de la llum.



## La velocitat de la llum

Huygens especula llavors el perquè la llum es comporta contràriament al so i viatja molt més ràpid en una substància poc densa: perquè aquestes deixen més espai a l'èter. Per això, per exemple, la llum viatja més lenta a l'aigua que a l'aire, al contrari que el so.

Newton realitza tres experiments molt importants, fent passar la llum per prismes.

Constata que:

-La manera de descompondre's de la llum blanca en els respectius colors de l'arc de Sant Martí i la seva recomposició.

-La llum monocromàtica és indivisible.

-El color blanc és la traducció que fa el cervell del fet que des d'un punt arribin al ull raigs lluminosos de tots els colors.

La hipòtesi final de Newton combinava aspectes corpusculars amb altres d'ondulatoris: la llum estava formada per corpuscles, àtoms lluminosos; però com que provocaven ones, vibracions de l'èter per on es desplaçaven, es notaven fenòmens ondulatoris associats a ells.



**Il·lustració 5: Christiaan Huygens (1629-1695) vs. Isaac Newton(1642-1727). Font : Articles « El tamiz »**

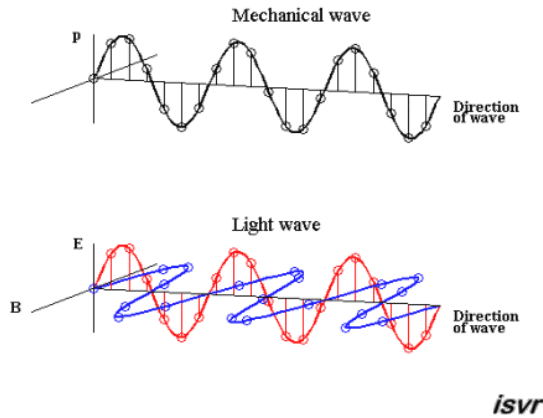
Fins un segle després, el XVIII, no es canvia aquesta idea. Entre 1797 i 1799, Thomas Young aconsegueix la interferència d'un raig de llum quan travessa una escletxa, fenomen inherentment ondulatori.

### 3.1.3 Ones longitudinals i transversals

Augustin-Jean Fresnel, presenta el 1821 una modificació fonamental respecte la hipòtesi ondulatoria de Huygens: l'abandonament de la concepció de la llum com una ona

longitudinal.

Una ona longitudinal, com és el so, és un conjunt de vibracions sempre en la mateixa direcció de propagació. Pel contrari, una ona transversal, consta d'oscil·lacions perpendiculars en la direcció del moviment de l'ona, o en moltes direccions barrejades.



Il·lustració 6: Ones longitudinals i ones transversals. Font :<http://sistemasencomunicacione.s.blogspot.com.es/2011/03/tipos-de-ondas-ondas-longitudinales-y.html>

### 3.1.4 La polarització de la llum

Diem que una ona transversal està polaritzada quan es forcen les vibracions a produir-se en una sola de les perpendiculars a la propagació de l'ona. El 1815, un escocès, David Brewster, publica un article en el que descriu com polaritzar la llum reflectint-la a determinats materials amb angles superiors a cert límit (angle de Brewster).



Il·lustració 7: Newton (Esquerra) vs. Young (a dalt esq.), Malus (a baix esq) i Brewster (a baix dreta). Font: Articles "El tamiz".

### 3.1.5 Concepció de la llum abans de Maxwell

La concepció de la llum l'any 1821 era que es tractava d'una ona transversal que viatjava a través de l'èter. Però encara hi havia problemes:

## La velocitat de la llum

1. L'èter havia de ser sòlid, perquè les ones transversals no es propaguen per fluids.
2. L'èter havia de ser molt dens, perquè les ones transversals viatgen més ràpid com més dens és el medi.

### 3.1.6 Ona electromagnètica: Faraday i les equacions de Maxwell

Micheal Faraday, l'any 1845, troba una connexió molt important entre la llum i el magnetisme. Tarda dos anys en postular una intuïtiva hipòtesi: potser la llum era una vibració d'alta freqüència de la pròpia electricitat i el magnetisme.

L'escocès James Clerk Maxwell, l'any 1862, elabora un sistema de vint equacions que descriu i relaciona ambdós conceptes, electricitat i magnetisme, anomenat a partir de llavors: electromagnetisme.

L'alemany Heinrich Rudolf Hertz, el 1885, realitza una sèrie d'experiments amb circuits d'alt voltatge que demostren definitivament que la llum és una ona electromagnètica. S'esbrina llavors que existeixen ones de menor freqüència, invisibles per a l'ull humà.

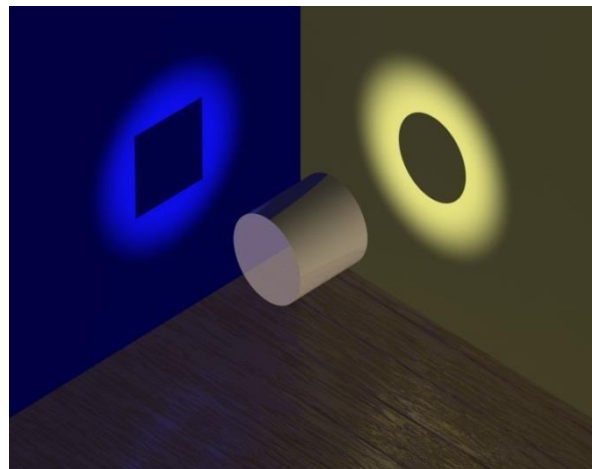
### 3.1.7 Experiment de Michelson i Morley: l'interferòmetre

L'any 1887, Edward Morley i Albert Michelson confeccionen l'experiment fallit més important de la història de la física. L'interferòmetre era un instrument dissenyat per detectar l'èter, objectiu que mai va aconseguir, pel simple fet que no existia tal substància.

### 3.1.8 Dualitat ona-partícula

El 1905 Albert Einstein postula el comportament corpuscular de la llum i explica l'efecte fotoelèctric (capacitat de la llum d'alliberar electrons d'una superfície metàl·lica) amb l'existència dels fotons, (feixos de llum amb propietats de partícules).

El 1924, el físic francès Louis-Victor de Broglie, basant-se en l'explicació d'Einstein, formula una hipòtesi en la que afirma: "Tota la matèria, no sols la llum, presenta



Il·lustració 8: Imatge il·lustrativa de la dualitat ona-partícula, s'aprecia que un mateix fenomen pot tenir dues percepcions diferents. Font: Wikipedia, dualitat ona-partícula.

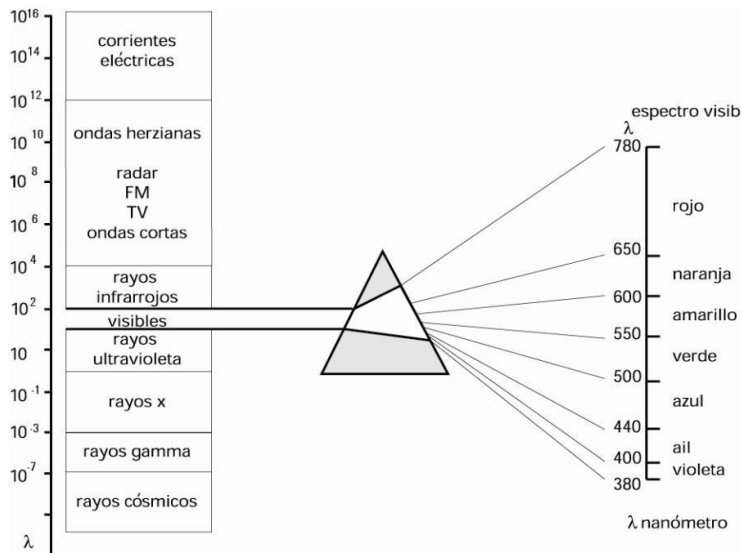
## La velocitat de la llum

característiques tant ondulatòries com corpusculars.”

A partir d'aquesta dualitat ona-partícula sorgeix la física quàntica, que estudia el comportament de la llum i de la matèria a escales microscòpiques.

### 3.2 DEFINICIÓ ACTUAL I CONCEPTES GENERALS

L'espectre electromagnètic és el conjunt de totes les possibles ones electromagnètiques, ordenades segons la longitud d'ona o la freqüència, des de les de major freqüència, com els raigs gamma i raigs X; fins a les de menor freqüència, com les ones de ràdio.



La llum visible és una radiació electromagnètica dins la porció de l'espectre electromagnètic visible per a l'ull humà. És aquella amb longituds d'ona d'entre aproximadament 380 nm i 780 nm i una freqüència entre

Il·lustració 9: Espectre electromagnètic. La llum visible. Font: Wikipedia. La llum.

789 terahertz (THz) i 385 THz.

La llum blanca és una barreja de totes les longituds d'ones possibles.

A causa de la dualitat ona-partícula, la llum presenta propietats tant d'ones com de partícules, anomenades fotons.

Actualment, sabem que la seva velocitat exacte en el buit és de 299 792 458 m/s, però aquesta xifra disminueix si la llum es propaga per la matèria. La relació entre la velocitat de la llum en el buit i en un medi s'anomena índex de refracció.

L'òptica és la branca de la física que s'encarrega d'estudiar el comportament de la llum i les seves propietats.

### 3.3 FENÒMENS ASSOCIATS A LA PROPAGACIÓ DE LA LLUM

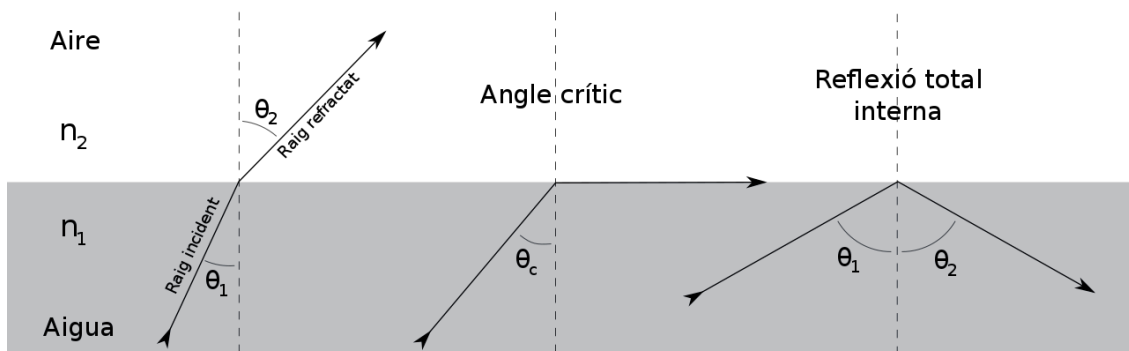
#### Reflexió i refracció

La **reflexió** és una modificació en la direcció d'una ona electromagnètica quan troba una superfície d'un medi diferent que no absorbeix energia radiant.<sup>1</sup> L'angle del raig incident i el reflectit són iguals però oposats.

Pot ser especular: té lloc en una superfície llisa i totalment no absorbent, o difusa.

La **refracció** és el fenomen que succeeix quan la llum passa d'un medi transparent a un altre de diferent densitat. Llavors es produeix un canvi en la seva direcció degut a la diferent velocitat de propagació que té la llum en diferents medis materials.

L'índex de refracció és la relació entre la velocitat de la llum en el buit i la velocitat de propagació d'una longitud d'ona determinada en una substància.



Il·lustració 10: Refracció i reflexió de la llum. Font: Wikiwand. Reflexió.

#### Dispersió

La **dispersió** és el fenomen pel que la velocitat d'una ona electromagnètica varia per a cadascuna de les diferents longituds d'ona de l'espectre.

Il·lustració 11: Dispersió de la llum blanca. Font: Wikipedia. Dispersió.

La dispersió succeeix degut a que l'índex de refracció disminueix per a les longituds d'ona més llargues (vermell), que es desvien menys que les curtes (blau-violeta).



<sup>1</sup> L'energia radiant és l'energia de les ones electromagnètiques continguda en la llum visible i altres formes de radiació, com els raigs X. Quan la matèria absorbeix la radiació experimenta un augment de l'energia tèrmica.

### Absorció

L'**absorció** és la conversió de la llum en una altra forma d'energia, generalment calòrica, elèctrica o química. També pot canviar a una radiació de diferent longitud d'ona (fluorescència).

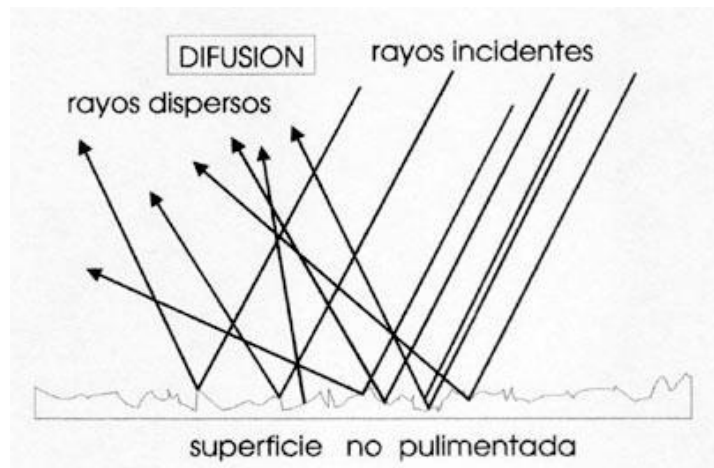


Il·lustració 12: Absorció de la llum. Font: <http://www.fotonostra.com/fotografia/absorcion.htm>

### Difusió

Quan un raig de llum incideix sobre una superfície amb obstacles materials o irregularitats de dimensió major a la longitud d'ona que la travessa, l'energia lluminosa es distribueix en totes les direccions des del punt d'incidència. Aquest efecte s'anomena **difusió**.

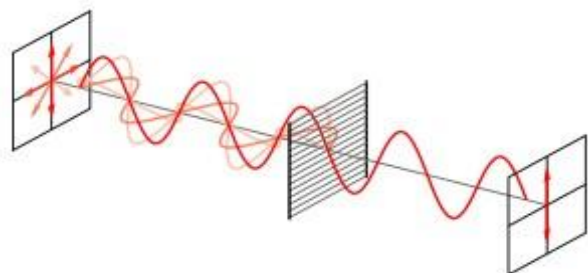
La boira i els núvols són un exemple de l'efecte de difusió a l'aire degut a la presència de petites gotes d'aigua en suspensió.



Il·lustració 13: Difusió de la llum. Font: Wikipedia.

### Polarització

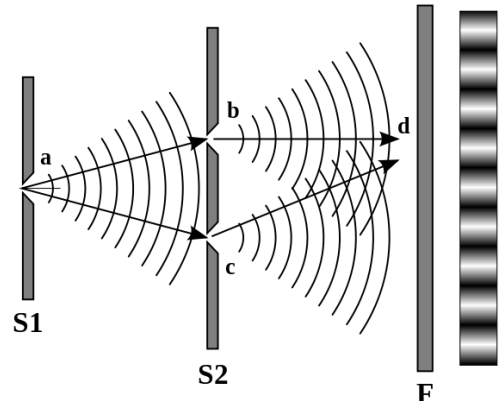
Les ones electromagnètiques que formen la llum posseeixen camps elèctrics i magnètics perpendiculars a la direcció de propagació. Per cada ona existeix un pla que conté la direcció del camp i la direcció de propagació. Això es coneix com el pla de polarització de l'ona.



Il·lustració 14: Polarització de la llum. Font: <https://fotografiaencatalablog.wordpress.com/2016/08/21/va-de-filtres-el-polaritzador/>.

### Difracció i interferència

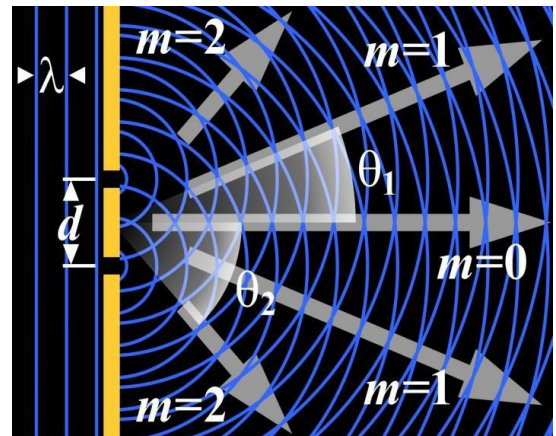
La **interferència** és un fenomen en el que dos o més ones es superposen i formen una ona resultant de major, menor o igual amplitud. Per exemple, la interferència d'una ona del mar amb l'ona que crea un vaixell: si les dues crestes coincideixen, es combinen i formen una ona més gran, més petita o s'anul·len entre elles.



Il·lustració 15: Experiment de Young per a mostrar el patró d'interferència de la llum. Font: Wikipedia, la llum.

La **difracció** és un fenomen característic de les ones que es basa en la desviació d'aquestes quan troben un obstacle o travessen una escletxa.

La difracció succeeix en tot tipus d'ones.



Il·lustració 16: Difracció de la llum. Font: Wikipedia, difracció.



## 4. LA VELOCITAT DE LA LLUM

---

La velocitat de la llum es simbolitza amb la lletra  $c$ , provinent del llatí *celéritās* (en català celeritat o rapidesa).

Abans del 1600, encara es creia que la llum es transmetia de manera instantània. Des de la necessitat d'utilitzar mesures astronòmiques fins la creació d'experiments encabits en laboratoris,  $c$  és una constant universal que hem estimat almenys 163 cops durant la història, minimitzant l'error respecte el valor real a mesura que la ciència avançava.

La velocitat de la llum en el buit té un valor de 299792,458 km/s i fou inclòs oficialment en el Sistema Internacional d'Unitats com a constant el 21 d'octubre de 1983, més de 300 anys després del primer mesurament seriós. El metre pren una nova definició com a conseqüència d'això: "la longitud del camí que recorre la llum al buit durant un interval de  $1/299792458$  d'un segon".

A través d'un medi que no sigui el buit,  $c$  depèn de la seva permitivitat elèctrica, permeabilitat magnètica i d'altres característiques electromagnètiques.

La velocitat de la llum es relaciona amb la freqüència i longitud d'ona de qualsevol radiació electromagnètica, per:  $c = f\lambda$  i amb la massa i energia, per la fórmula d'Einstein:  $E = mc^2$ .

En medis materials, aquesta velocitat és inferior a "c" i queda codificada a l'índex de refracció:  $\mu = \frac{c}{v}$  on  $\mu$  és l'índex de refracció i  $v$  la velocitat de la llum en un medi determinat.

La diferència entre la velocitat de fase a l'aire i la velocitat al buit és d'1 partit entre 3000, casi menyspreable. Per això es parla de la velocitat en el buit tot i que la mesurem amb la presència d'una atmosfera.

Seguidament, explicaré els mesuraments històrics més rellevants de la següent taula.

#### 4.1 LA VELOCITAT DE LA LLUM AL LLARG DE LA HISTÒRIA

ESTIMACIONS DE LA VELOCITAT DE LA LLUM AL LLARG DE LA HISTÒRIA					
Data	Investigador	País	Mètode	Valor obtingut (km/s)	Error absolut
1638	Galileu	Itàlia	Llanternes cobertes	>so	-
1676	Ole Röemer	França	Astronòmic: eclipsis de Júpiter	214.000	90000
1729	James Bradley	Anglaterra	Astronòmic: aberració estel·lar	310.000	210
1834	Charles Wheatstone	Anglaterra	Mirall rotatori	400.000	100000
1849	Hippolyte Fizeau	França	Roda dentada	313.000	14000
1862	Léon Foucault	França	Mirall rotatori	298.000	1800
1868	James Clerk Maxwell		Càlculs teòrics	284.000	16000
1875	Marie-Alfred Cornu	França	Mirall rotatori	299.990	197,5
1880	Albert Michelson	EE.UU	Mirall rotatori	299.910	120
1883	Simon Newcomb	Anglaterra	Mirall rotatori	299.860	70
1906	Edward Bennet Rosa i Noah Dorsey	EE.UU	Teoria electromagnètica	299.781	11,5
1923	Andre Mercier	França	Ones estacionàries a filferros	299.782	10,5

## La velocitat de la llum

1925	Karolus i Mittelstaedt	Alemanya	Modulador cel·la Kerr	299.778	14,5
1926	Albert Michelson	EE.UU	Mirall rotatori	299.797	4,5
1940	Hüttel	Alemanya	Cel·la Kerr	299.768	25
1950	Bergstrand	Suècia	Geodímetre	299.792,7	0,24
1950	Louis Essen	Anglaterra	Cavitats de microones	299.792,5	0,04
1951	Carl Aslakson	EE.UU	Radar shoran	299.794,2	1,7
1952	Davy Froome	Anglaterra	Interferòmetre de microones	299.792,6	0,14
1956	Edge	Suècia	Geodímetre	299.792,9	0,44

1973	Evenson and Wells	EE.UU	Làser	299,792.4570	0,0001
1978	Peter Woods i companys	Anglaterra	Làser	299,792.4588	0.0008

1983	Valor admès	Bureau International des Poids et Mesures		299,792.458	
------	-------------	---	--	-------------	--

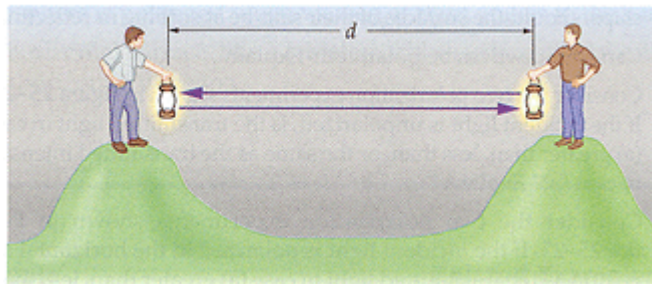
#### 4.1.1 1638, Galileu: almenys 10 vegades més ràpid que el so.

En 1638, Galileu fou el primer científic en intentar estimar la velocitat de la llum. El seu mètode era bastant simple. Ell i un assistent tenien llums que podien ser cobertes i descobertes a voluntat, una a gran distància de l'altre. Galileu descobria la seva llum i tan aviat com l'assistent la veia, en destapava la seva també.

El retard en rebre la llum mostraria el temps que tardava la llum en recórrer el camí d'anada i tornada entre els dos. Efectivament, el primer observador rebia la llum amb cert retràs, però quan Galileu repetia l'experiment duplicant la distància, el temps de retard era el mateix.

Galileu va arribar a la conclusió que la velocitat de la llum era una xifra molt elevada, almenys 10 vegades més que la del so, i el retard de temps observat es devia al temps de reacció del segon observador a l'hora de descobrir la seva llanterna.

**$c > 3,4$  quilòmetres per segon**



Il·lustració 17: Esquema visual del mètode de Galileu. Font: <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/galileo-attempted-measure-speed-light-measuring-the-time-elapsed-opening-lantern-seeing-lig-q224331>.

-Giovanni Domenico Cassini (1625-1712)

Després de 16 anys de la perseverant tasca d'elaborar les precises taules d'eclipsis dels satèl·lits de Júpiter, va encarregar a Ole Rømer, la comprovació d'aquestes.

#### 4.1.2 1675, Ole Roemer: 214.000 Km/s

El 1675, l'astrònom danès Ole Roemer observava les llunes de Júpiter (que curiosament van ser descobertes per Galileu). Va adonar-se llavors que els eclipsis dels satèl·lits, en concret Io, tenia un retard de fins a 10 min, segons l'època de l'any en la que prenia la dada. El període d'Io variava i, astronòmicament parlant, amb les lleis de Kepler ja plenament demostrades, això no tenia sentit.

Si la Terra era a prop de Júpiter, les òrbites de les seves llunes semblaven accelerar-se i Io emergia abans. Si la Terra estava lluny de Júpiter, en canvi, semblaven ralentitzar-se.

A partir d'aquesta observació, va raonar que aquest retràs es devia a la distància extra que havia de recórrer la llum quan la Terra estava més allunyada de Júpiter.

Al voltant d'aquella època, el valor comunament acceptat per al diàmetre de l'òrbita de la Terra en aquella època era mitjanament erroni, degut a que la unitat astronòmica (distància entre la Terra i el Sol) s'estimava a prop de 140 milions de km, en comptes de 150 milions de km. A més a més el temps calculat de retard, 22 min, es tractava en realitat de 16,5 min. Va ser Christian Huygens el que a partir de les dades i conclusions extretes per Röemer, va realitzar els càlculs. La llum havia d'haver viatjat a 214.000 km / s.



Il·lustració 18: Fase d'ocultació de les llunes de Júpiter.

Font:<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz12.htm>

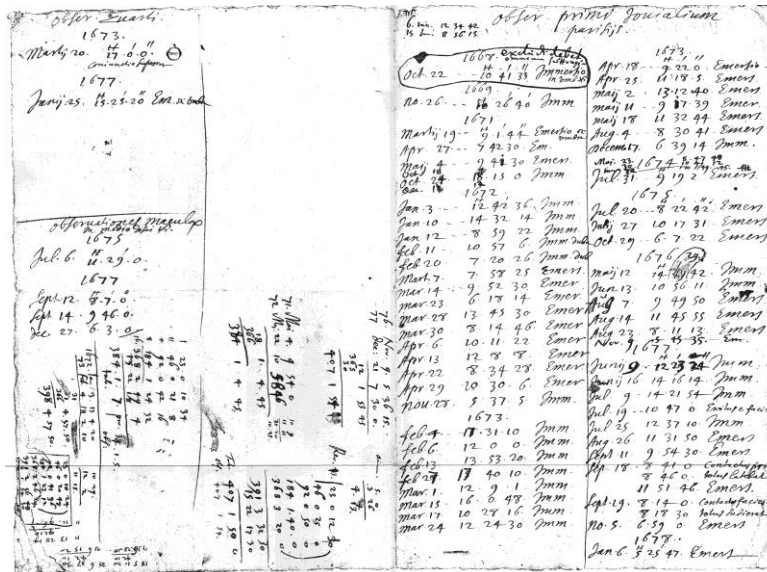


Il·lustració 19: Fase d'aparició de les llunes de Júpiter.

Font:<http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz12.htm>

## La velocitat de la llum

La velocitat de la llum era doncs, tan elevada, que requerien d'una distància planetària per tal de mesurar-la.



II-lustració 20: Rømer's aide-mémoire, escrit en algun moment del 1678. Els períodes dels eclipses d'Io a la dreta de l'imatge. Font: Wikipedia, speed of light.

## CÀLCULS OLE ROEMER

Per realitzar aquests càlculs, no s'ha tingut en compte l'excentricitat de la Terra (0,017) ni la de Júpiter (0,048), així com no s'ha considerat la variació de distància amb Ió.<sup>2</sup>

- Període orbital d'Io:

Primer calculem el període per a saber els segons de retràs respecte el període real del satèl·lit quan la Terra està més lluny.

1. Apliquem l'equació del moviment circular uniforme, la de la força gravitatòria i la centrípeta i les igulem.

### Força gravitatòria

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

### Força centrípeta

$$\Sigma F = m \cdot a_c = m \frac{v^2}{r}$$

$$m \frac{v^2}{r_{io}} = G \frac{M \cdot m}{r_{io}^2}$$

2. Aïllem la velocitat orbital:

$$m \frac{v^2}{r_{io}} = G \frac{M \cdot m}{r_{io}^2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r_{io}}}$$

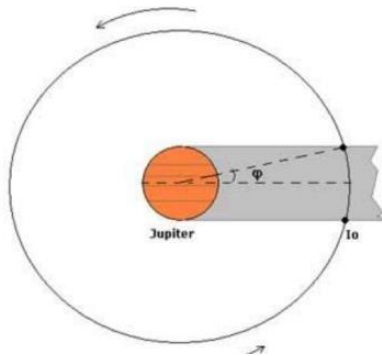
<sup>2</sup> Considerem el radi d'Ió molt petit respecte la distancia J-T, i per tant, menyspreable pels càlculs.

## La velocitat de la llum

- Obtenim el període orbital del satèl·lit introduint la velocitat que havíem aïllat a la fórmula del període.

$v = \frac{2\pi r_{io}}{P_{io}} \rightarrow P_{io} = \frac{2\pi r_{io}}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r_{io}^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{(4,216 \cdot 10^8)^3}{6,67 \cdot 10^{-11}}} = 152748,4 \text{ segs} = 1,769 \text{ dias}$   
 Així  $P_{io}$  estimar el temps que tardava Io a donar una volta a Júpiter, 4 h aproximadament.

- Esbrinem l'angle a partir del radi de Júpiter i el radi orbital d'Io.



$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_j}{r_{io}} \rightarrow \varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{R_j}{r_{io}} \right) = \operatorname{arctg} \left[ \frac{7,1398 \cdot 10^7}{4,216 \cdot 10^8} \right] = 0,1678$$

Il·lustració 21: Pas d'Io a través de l'ombra de Júpiter. Font: casanchi.com.

- Determinem el temps que tarda Io en travessar aquesta ombra a partir d'una simple proporció amb el seu període orbital.

$$\frac{t}{P_{io}} = \frac{2\varphi}{2\pi} \rightarrow t = \frac{P_{io}}{2\pi} 2\varphi = \frac{1,769 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi} \cdot 2 \cdot 0,1678 = 8164 \text{ s} = 136,07 \text{ min} = 2,27 \text{ horas}$$

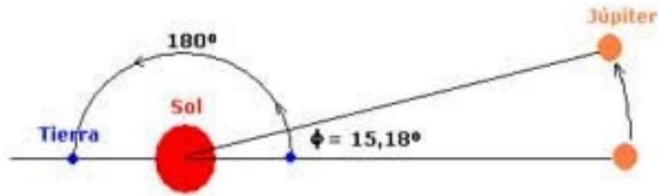
- Distància final entre Júpiter-Terra

Quan la Terra està en la seva posició més allunyada, aquesta serà la distància que haurà de recórrer la llum.

## La velocitat de la llum

1. Situació dels planetes Terra i Júpiter mig any després de la situació d'oposició.

$$\frac{0,5}{11,86} = \frac{\phi}{360} \rightarrow \phi = \frac{360 \cdot 0,5}{11,86} = 15,18^\circ$$



**Il·lustració 22 :** Mentre la Terra ha recorregut 180°, Júpiter ha recorregut un angle de 15,18°. Font: casanchi.com.

2. Relació entre el retràs i les distàncies

Des de la seva situació inicial, el període de Io és de 152748,4 segons i a mesura que s'allunya la Terra, s'observa un retràs de 990 segons.

Només necessitem trobar la distància entre la Terra i Júpiter quan estan més lluny l'un de l'altre. A la fase d'oposició, quan la Terra era més a prop, la distància J-T era de 4,203 UA. Per tant:

$$c = \frac{d - 4,203}{990}$$

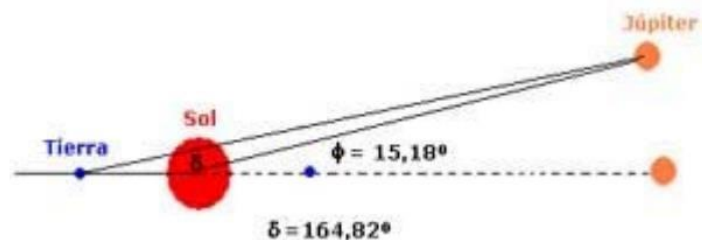
3. Distància entre els dos planetes mig any després de la situació d'oposició

Coneixem dos costats del triangle Terra-Sol-Júpiter, i l'angle comprès entre ells.

T-S: 1UA

S-J: 5,203 UA

$\delta$ :  
164,82°



**Il·lustració 23:** Relacions d'angles T-J quan Júpiter ha recorregut 15,18°. Font: casanchi.com.

Aplicuem a aquest triangle el teorema del cosinus, per esbrinar d, T-J.

$$d^2 = TS^2 + SJ^2 - 2TS \cdot SJ \cdot \cos \delta$$

$$d^2 = 1^2 + 5,203^2 - 2 \cdot 5,203 \cdot \cos(164,82) = 28,0712 + 10,406 \cdot 0,965290 = 38,1160$$

d = 6,174 UA



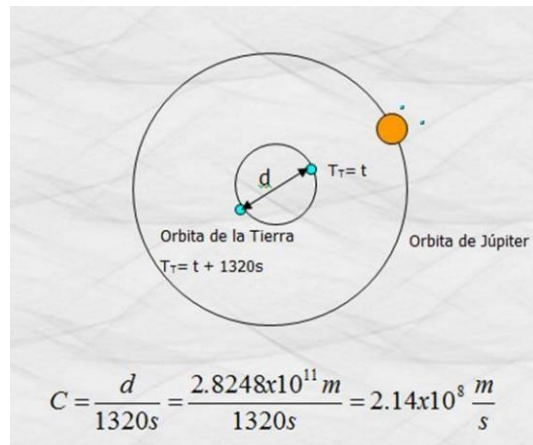
## La velocitat de la llum

Càlcul final correcte de “c” (16,5 min de retràs, UA= 150 milions de km)

$$c = \frac{d - 4,203}{990} = \frac{6,174 - 4,203}{990} = \frac{1,971}{990} \text{ UA/s} = \frac{1,971 \cdot 15 \cdot 10^7}{990} \text{ km/s} = 2,98636 \cdot 10^5 \text{ km/s}$$

Càlcul del 1675 amb dades errònies (22 min de retràs, UA= 140 milions de km)

$$c = \frac{2,48248 \times 10^{11} \text{ m}}{1320 \text{ s}} = 2,14 \times 10^8 \text{ m/s}$$



Il·lustració 24: Càlcul erroni de “c” del 1638. Font: casanchi.com.

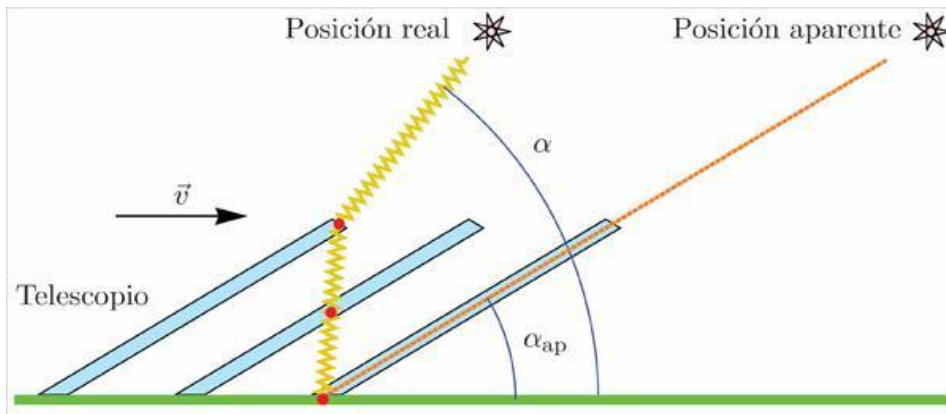
### 4.1.3 1728, James Bradley: 309.397 Km / s

L'any 1728, l'astrònom anglès James Bradley va adonar-se d'un fenomen que succeïa mentre observava la que, en aquell moment, es tractava de l'estrella Polar, molt a prop de l'actual, situada fa uns 3000 anys apuntant l'eix terrestre.

Intentava mesurar la distància a la que es trobava aquesta estrella, Draconis, mitjançant l'observació d'aquesta en dos moments distants de l'any. Bradley volia obtenir una triangulació amb el moviment de translació de la Terra. Llavors es va adonar d'un problema en les dades i va descriure l'**aberració estel·lar**, és a dir, la diferència entre la posició observada d'una estrella i la seva posició real deguda a la combinació de la velocitat de l'observador i la velocitat de la llum. Amb aquesta definició va confirmar inequívocament la translació de la Terra.<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Quan es parla de velocitats tan grans com la llum, s'hauria d'aplicar la física relativista d'Einstein, però Bradley no ho va fer.

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\text{velocitat de la Terra}}{\text{velocitat de la llum}}$$



Il·lustració 25: Aberració estel·lar, posició aparent i real d'un astre observant amb telescopi. Font: <http://arbor.revistas.csic.es/index.php/arbor/article/viewArticle/2069/2631>

## CÀLCULS BRADLEY

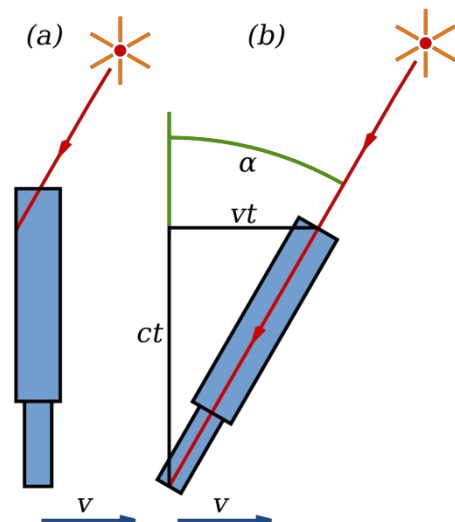
1. Calculem la velocitat orbital aproximada de la Terra. Podem suposar que és una circumferència de  $r=150$  milions de km. La longitud de la circumferència és  $2 \cdot \Pi \cdot r = 942,5$  milions de kilòmetres. La terra recorre aquesta distància en un any, és a dir, uns 2,58 milions de km/dia, equivalent a 30 km/s.
2. Hem de calcular el valor de la velocitat de la llum per a que sigui necessari inclinar el telescopi 20 segons d'arc (en cada una de les direccions del moviment de la Terra) per a que la llum segueixi la inclinació del tub i arribi al nostre ull.
3. Obtenim llavors la tangent de 20 segons d'arc. Tenint en compte el vector velocitat de la terra i el vector velocitat de la llum, podem establir la relació tangencial amb l'angle.

$$\tan \frac{20}{3600} = 0,00009696$$

4. Substituïm a la fórmula:

$$0,00009696 = \frac{30}{c}$$

5. S'obté una velocitat de 309.397 km/s.



Il·lustració 26: Relació entre l'angle i els vectors velocitats de l'aberració estel·lar. Font: Wikipedia, aberració de la llum.

**-1834. Wheatstone**

Wheatstone proposa el primer mètode que incorpora un mirall rotatori en el camí de la llum. Arago (1838), Foucault i més tard Michelson el duen a terme, millorant la tècnica progressivament.

**4.1.4 1849, Hippolyte Louis Fizeau: 313.000 Km / s**

L'any 1849, un físic francès de nom Fizeau, va confeccionar un mètode per a calcular la velocitat de la llum que no requeria distàncies astronòmiques.

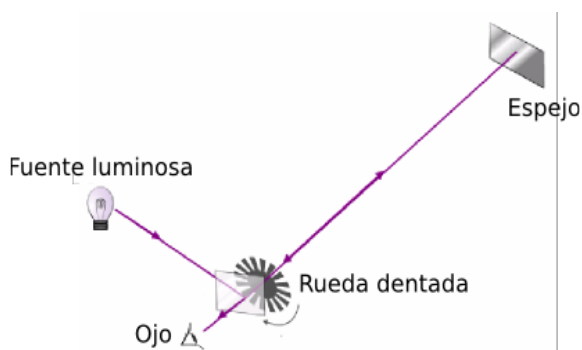
L'experiment constava de:

- Una font lluminosa, per mitjà d'un soplet d'hidrogen i oxigen.
- Una roda dentada de velocitat coneguda i constant
- 2 miralls, un dels quals era semitransparent.

Va aconseguir estimar la velocitat de la llum de la següent manera:

En mig del camí de la llum, va col·locar la roda dentada, amb un gran número de dents i buits entre ells. Si una dent s'interposava en el camí de la llum i el mirall, no s'arribava a reflectir.

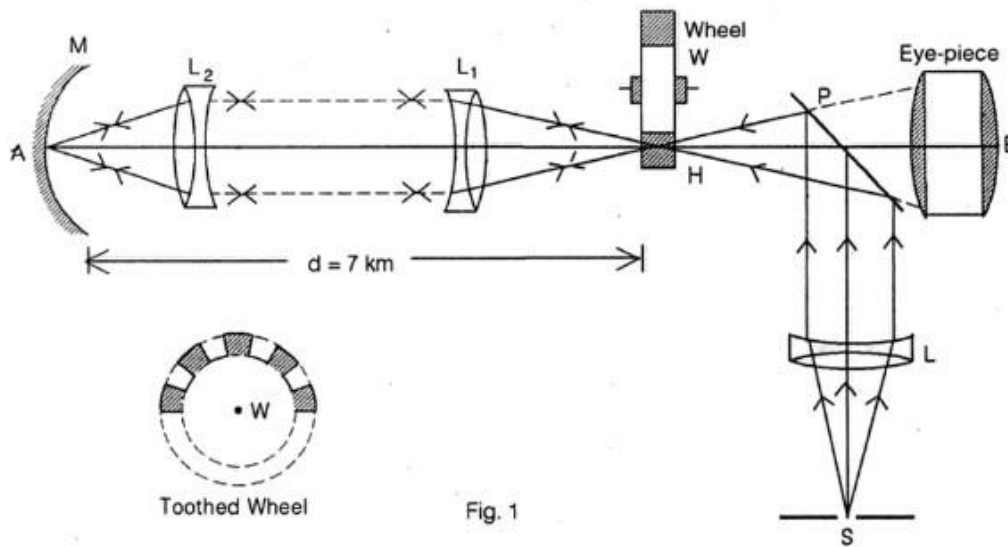
La clau de l'experiment era girar la roda suficientment ràpid per tal d'aconseguir no veure absolutament res de llum. Això succeeix si el feix de llum que passa entre el buit de les dents de la roda es troba amb la següent dent després de reflectir-se, en comptes del buit pel que ha passat.



**Il·lustració 27: Esquema simplificat de l'experiment de Fizeau. Font: Wikipedia, Fizeau.**

Aquest fenomen era possible, tot i l'elevada velocitat de la llum, perquè contava amb un recorregut relativament llarg, mentre que entre dent i dent de la roda, hi havia mil·límetres.

Mesurant el temps que tardava en recórrer la distància es va estimar amb precisió la velocitat de la llum: 310 000 km/s. (un 5% més elevat que la dada exacte).

**Funcionament:**

Il·lustració 28: Esquema més elaborat del mètode de Fizeau. Font: Llibre "Engineering Physics".

Quan la roda dentada W està quieta, la llum de la font S fa 2 cops la distància  $d$ , fins el mirall M i de tornada. Quan la roda gira, la llum es troba amb la següent dent i ja no la veiem tornar. Si W gira suficientment ràpid, la imatge apareix i desapareix 16 cops en un segon, degut a la persistència de la nostra visió. La imatge és, però, menys brillant que una observada directament. Quan incrementem encara més la velocitat aquesta imatge acaba desapareixent.

**Càlculs Fizeau**

La velocitat de la llum serà igual a la distància recorreguda entre el temps.

$$c = \frac{2d}{t}$$

Si  $m$  és el número de dents i  $n$  les revolucions per segon, el temps és igual a:

$$t = \frac{1}{2mn}$$

Igual·lem les equacions:

$$\frac{1}{2mn} = \frac{2d}{c}$$

$$c = 4mnd$$

A l'experiment real de Fizeau:

- Velocitat de rotació de la roda dentada (n)=12,6 rev/seg
- Número de dents de la roda (m)=720 dents
- Distància recorreguda per la llum (d)=8633m
- Velocitat de la llum obtinguda:  

$$c = 4 \times 720 \times 12,6 \times 8633 = 3,13 \times 10^8 \text{ m/s}$$

#### 4.1.5 1862, Leon Foucault 299.796 Km / s

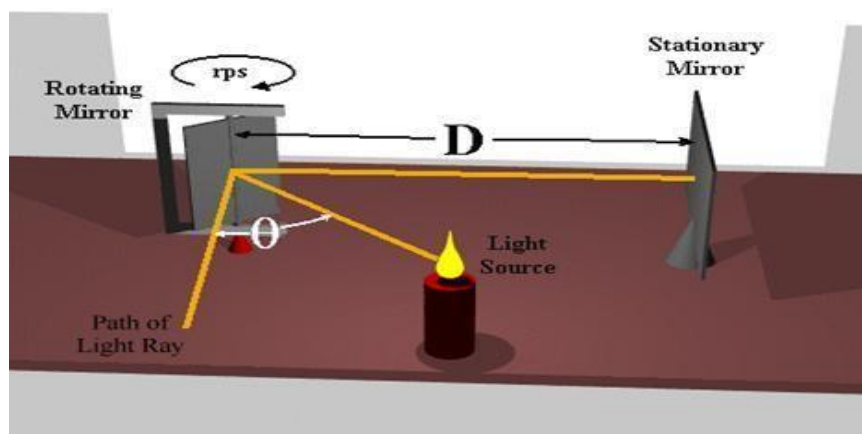
Un altre físic francès, Leon Foucault, va utilitzar un mètode similar a Fizeau, substituint la roda dentada per un mirall rotatori.

El feix de llum es reflectia en un mirall rotatori que girava a una velocitat elevada i controlable, a un de fixe i seguidament, tornava al rotatori.

Com aquest primer mirall rotava, l'angle del feix resultant variava lleugerament de l'angle incident inicialment. Mitjançant aquest angle, es va poder mesurar la velocitat de la llum.

Foucault va augmentar contínuament la precisió d'aquest mètode al llarg dels anys. La seva mesura final el 1862 va determinar que la llum viatjava a 299,796 km/s.

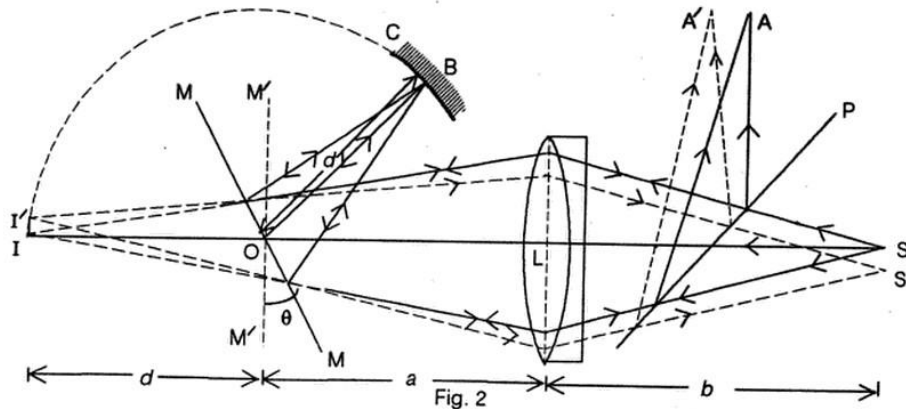
També va estimar la velocitat de la llum a l'aigua.



Il·lustració 29: Esquema simplificat del mètode de Foucault.

Font: [http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure\\_c.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure_c.html)

**Funcionament:**



**Il·lustració 30: Esquema més elaborat del mètode de Foucault. Font: Llibre “Engineering Physics”.**

La font lluminosa S emet un feix de llum al mirall semitransparent P, inclinat 45°. La llum es refracta i quan passa per la lent L convergeix, fins el mirall rotatori MM. Llavors es reflecteix a la superfície del mirall còncau C, al punt B. Com el mirall rota, quan torna a succeir tot el cicle, el mirall està en posició M’M’ i la posició final del feix és diferent (A A, A’ A’). Aquest desplaçament es mesura amb un microscopi.

**Càlculs Foucault:**

t és el temps que triga la llum en fer la distància d: anada i tornada del mirall rotatori MM fins el mirall còncau C. El mirall rotatori serà en un angle determinat  $\theta$ .

$$t = \frac{2d}{c}$$

El mirall fa n revolucions per segon, la seva velocitat angular serà  $2\pi n$ .

$$t = \frac{\theta}{2\pi n}$$

Igualem t:

$$\frac{2d}{c} = \frac{\theta}{2\pi n} \quad ; \quad \theta = \frac{4\pi n d}{c}$$

En el temps en que la llum va del mirall rotatori fins el mirall còncau i torna, l’angle farà un angle  $\theta$  i quan torni reflectit serà un angle  $2\theta$ .

$$2\theta = \frac{II'}{d} \quad \text{o} \quad II' = 2\theta \times d$$

La distància de la font S i el mirall rotatori M fins la lent L serà b i a respectivament. I i I’ són les imatges que obtenim de la lent L quan gira el mirall.

$$\frac{SS'}{II'} = \frac{SL}{LI} = \frac{b}{(a + d)}$$

$$SS' = \frac{b \times II'}{(a + d)}$$

Si ajuntem ambdues expressions:

$$SS' = \frac{b \times 2 \theta \times d}{(a + d)}$$

Suposem que  $SS' = AA' = x$

$$x = \frac{2b d \theta}{(a + d)}$$

$$\theta = \frac{x(a + d)}{2bd}$$

Igualem  $\theta$ :

$$\frac{4\pi n d}{c} = \frac{x(a + d)}{2bd}$$

$$c = \frac{8\pi n b d^2}{x(a + d)}$$

A l'experiment real de Foucault:

- Distància (d): 20 m
- 5 miralls de radi de curvatura equivalent a: 4 m.
- Desplaçament d'imatge: 0,7 mm
- Lents focals de 190 cm
- Velocitat de rotació del mirall (n): 438 rev/s
- Velocitat de la llum obtinguda:  $c = \frac{8\pi n b d^2}{x(a+d)} = 2,98 \times 10^8$  m/s

#### 4.1.6 1879 i 1926, Albert Michelson: 299.910 km/s i 299.796 km/s

El seu sistema, semblant al de Foucault però amb una òptica millorada, va donar un valor bastant exacte de la velocitat de la llum. El mirall rotatori va ser modificat: es tractava d'un prisma d'acer octogonal i equiangular, amb les cares extremadament polides. Hi havia llavors diversos miralls, alguns d'ells còncaus, i un prisma en el que reflectia el feix de llum a l'últim punt del seu recorregut fins el microscopi.

Michelson va repetir l'experiment afegint moltes millores i amb la col·laboració de Simon Newcomb. A partir de 1920 va començar a planificar la mesura definitiva, des de l'Observatori de Monts Wilson fins la Lookout Mountain, un cim a la cresta meridional

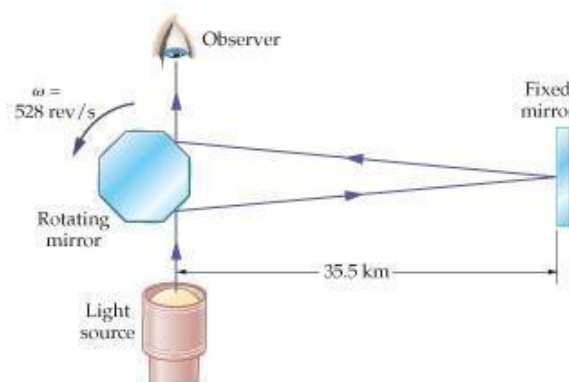
del mont Sant Antoni, a unes 22 milles de distància. Va obtenir un valor més aproximat:  $299.796 \pm 4$  km/s.

Aquesta famosa mesura es va veure perjudicada per alguns problemes, com la foscor produïda pel fum dels incendis forestals, que va fer que la imatge del mirall quedés desenfocada. També pot ser que el terratrèmol de Santa Bàrbara, Califòrnia, el 29 de juny de 1925, afectés als resultats.

Michelson va iniciar el 1930 una col·laboració amb Francis G. Pease i Fred Pearson per a realitzar una mesura amb un tub de buit de 1,6 km de longitud, i evitar així les dificultats que ocasionaven els efectes atmosfèrics en els mesuraments.

Va morir quan s'havien realitzat 36 de les 233 sèries de mesuraments.

**Il·lustració 31:** Esquema simplificat del mètode de Michelson. Font: Wikipedia, Albert A. Michelson.



**Funcionament:**

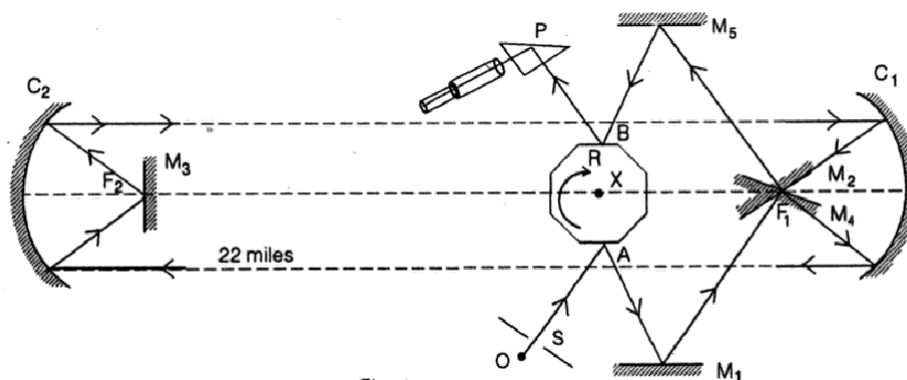


Fig. 4

**Il·lustració 32:** Esquema més elaborat del mètode de Michelson. Font: Llibre "Engineering Physics".

La font lluminosa O emet un feix de llum. Quan el mirall rotatori octogonal roman estacionari, veiem llum pel microscopi. Si incrementem la velocitat de rotació del mirall, hi haurà un moment que veurem la llum al punt P de l'observador, la mateixa posició que quan no rotava. Això succeeix quan la llum reflectida d'A arriba a la superfície de B, en el mateix temps que el mirall octogonal ha rotat 45°.



**Càlculs Michelson:**

Si  $d$  és la distància total en metres recorreguda per la llum de la posició A fins la cara oposada B, el temps és  $d/c$ , on  $c$  és la velocitat de la llum.

El temps al seu torn és  $1/8$  d'una revolució del mirall.

Igualem les dues expressions:

$$\frac{1}{8n} = \frac{d}{c}$$

$$c = 8nd$$

A l'experiment original de Michelson:

- Distància recorreguda per la llum: 22 milles
- Velocitat requerida del prisma rotatori: 528 rev/s
- $c = 2.99797 \times 10^8 \text{ m/s}$

**4.17 Mesures a partir d'unitats electromagnètiques (1868 i 1907)**

1868, James Clerk Maxwell, 299.000 km/s: Maxwell va deduir la velocitat de la llum i altres formes de radiació electromagnètica sense cap mesurament, sinó amb deduccions matemàtiques. A partir de dades disponibles aleshores, calcula la velocitat en el buit d'una ona electromagnètica i la concordança dels resultats el porta a especular una relació entre la llum i l'electromagnetisme.

Extreu aquesta conclusió de les equacions, on  $\epsilon$  és la permitivitat i  $\mu$  és la permeabilitat de l'espai. Pràcticament sense voler, troba  $c$ .

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$$

$$\epsilon : 8.89 \times 10^{12} \text{ F/m}$$

$$\mu : 4\pi \times 10^{-7} \text{ mT/A}$$

$$c : 2,99 \times 10^8 \text{ m/s}$$

1906, Rosa i Dorsey, 299788 ±11,5 km/s: Rosa i Dorsey determinen la velocitat de la llum a partir de la relació entre la capacitat d'un condensador mesurat en unitats electrostàtiques i electromagnètiques. Es va demostrar més tard que aquest resultat

estava fortament condicionat per la inseguretats en les característiques dels materials elèctrics de l'època. Aquesta mesura va iniciar una tendència de valors a la baixa.

**418 Altres intents del mètode del mirall rotatori (1876 i 1883)**

1876, Cornu,  $299.000 \mp 197,5 \text{ km/s}$ : Marie Alfred Cornu, un físic francès, millora significativament l'experiment de Foucault i la precisió dels resultats obtinguts.

1883, Newcomb,  $299.860 \pm 70 \text{ km/s}$ : Newcomb, va experimentar amb Michelson amb el mètode del mirall rotatori i basant-se en les seves millores, pren mesures del temps que tardava la llum en viatjar del seu laboratori a un mirall situat al monument de Washington, i de tornada al seu laboratori. La distància que recorria era: 7.44373 km.

**419 Mètodes que utilitzen un obturador electroòptic (1925, 1940 i 1950)**

1925, Karolus i Mittaelstaedt,  $299.778 \pm 14.5 \text{ km/s}$

Va resultar el primer mètode exitós encabint en un laboratori.

Com a l'experiment de Fizeau, les cel·les de Kerr actuaven com a obturadores de la llum. Un obturador electroòptic és capaç de "dividir" un feix de llum diversos centenars de vegades més ràpidament que una roda dentada.

El voltatge queia del màxim a zero en  $\frac{1}{4}$  de

segons, on f és la freqüència de variació de voltatge de les cel·les.

$$t = \frac{1}{4f} ; c = \frac{d}{t}$$

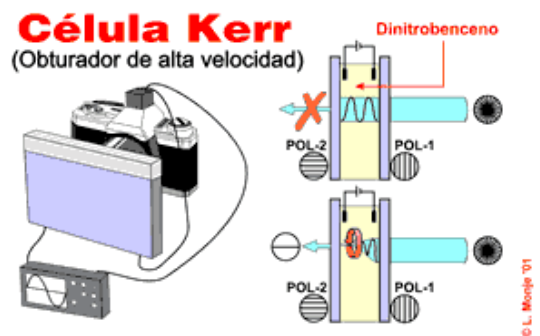
$$c = \frac{d}{\frac{1}{4f}} = 4fd$$

Del resultat de 775 observacions, el valor obtingut va ser de  $c = 2,99778 \times 10^8 \text{ m/seg}$ .

1940, Huttel i 1941, Anderson,  $299.768 \mp 25 \text{ km/s}$

1950, Bergstrand,  $299792,7 \pm 0,24 \text{ km/s}$

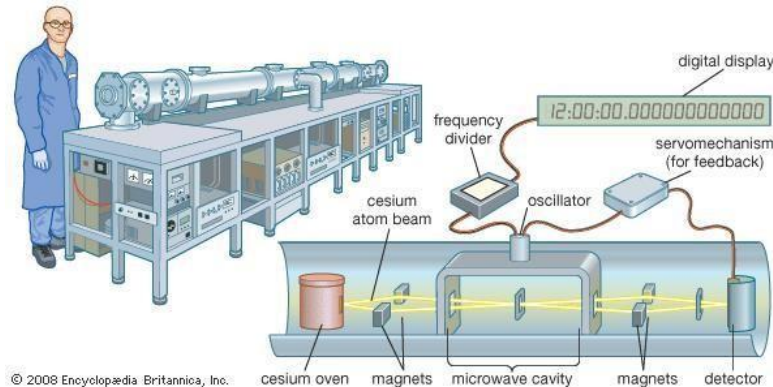
Utilitzen un obturador electroòptic. En una sèrie d'experiments realitzats entre 1947 i 1953, Bergstrand obtenen el resultat més aproximat al real.



Il·lustració 33: Cel·la Kerr, obturador electroòptic. Font: [http://www.difo.uah.es/curso/flash\\_y\\_filtros.html](http://www.difo.uah.es/curso/flash_y_filtros.html)

#### 4.1.10 Mesures d'ones electromagnètiques de radiofreqüència (1947 i 1952)

1947, Louis Essen,  $299.792,5 \pm 0,04$  km/s: El 1947, el físic anglès Louis Essen i Bol utilitzà una cavitat de microones per a calcular la velocitat de llum, a partir de la mesura de les freqüències de ressonància de les microones a la cavitat i de les longituds d'ona de les mateixes, deduïbles del dispositiu. La velocitat obtinguda va ser de  $299.792 \pm 3$  km/s. Després de refinar l'experiment el 1950, el valor final va ser de  $299.792,5 \pm 1$  km/s.



**Il·lustració 34: Mètode de Louis Essen utilitzant una cavitat de microones. Font: <https://www.britannica.com/technology/atomic-clock>**

1952, Davy Froome,  $299.792,6 \pm 0,14$  km/s: Froome va utilitzar un interferòmetre de microones per a determinar la longitud d'ona a l'aire a una freqüència determinada. Amb les dades va obtenir un valor de  $c$ :  $299.792,9$  m/s  $\pm 0,7$  km/s.

#### 4.1.11 Mètodes amb làsers (a partir del 1970)

1973 i 1978, Keneth. M Evenson i Peter Woods i companys

Amb l'ús de làsers, a partir del 1970, van poder refinar els resultats dels mètodes i obtenir valors molt més precisos:  $299,792.457$  m/s i  $299,792.458$  m/s respectivament (error ínfim). L'últim és el valor admès per el "Bureau International des Poids et Mesures".<sup>4</sup>

Amb l'avenç de l'electrònica a alta velocitat, és possible mesurar directament el retard de l'arribada de polsos òptics curts a mesura que augmentem la distància entre l'emissor i el receptor.

<sup>4</sup>L'Oficina Internacional de Pesos i Mesures és una organització internacional de normalització. És un dels tres organismes creats per al manteniment del Sistema Internacional d'Unitats (SI).

## 5. PRÀCTIQUES PER MESURAR “c”

### Pràctica 1: Estimació de la velocitat de la llum amb un microones.

#### 1. Objectius

Determinar la velocitat de les ones electromagnètiques de la porció de l'espectre del microones, mesurant la distància entre punts calents amb diferents aliments i materials.

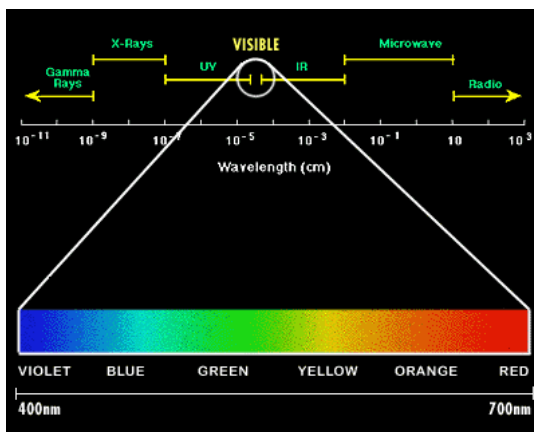
#### 2. Introducció

Les microones, com la llum, són un exemple d'ones electromagnètiques. Les ones electromagnètiques tenen freqüències diferents.

A mesura que la freqüència disminueix, també minva l'energia. La longitud d'ona és inversament proporcional a la freqüència d'una determinada ona. Aquelles amb alta freqüència tenen poca longitud d'ona, i viceversa.

Les ones electromagnètiques interactuen amb els materials de diferent manera, depenent de la natura del material i la freqüència de l'ona. Les microones són les més adients per escalfar aliments perquè la seva energia pot ser absorbida per molècules que es troben al menjar, aigua, sucres i greix, i les escalfa.

Com es pot observar a la Il·lustració 35, el rang de les longituds d'ona d'un microones és de 0,01 cm a 10 cm.

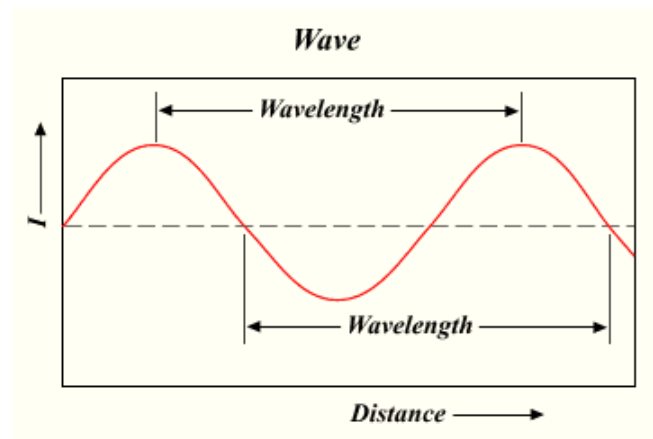


Il·lustració 35: L'espectre electromagnètic. La llum (la part de l'espectre electromagnètic visible als ulls). Els raigs X i les ones del microones són exemples d'altres ones electromagnètiques. Font: Abrisa Glass & Coatings, 2005.

En aquest projecte, aprofitarem propietats físiques de les ones per estimar la velocitat de la llum; com la **interferència** i la seva relació amb la **velocitat** d'una ona, la **frequència** i la **longitud** d'aquesta.

A l'interior d'un microones, les ones es reflecteixen a la superfície de l'aparell i succeeix allò que anomenem interferència. Els patrons d'interferència poden crear punts “calents” i “freds” a les àrees on l'energia del microones és més alta o més baixa de la mitjana. Per això els microones tenen plats rotatoris, per escalfar l'aliment de manera equitativa. En aquest experiment el retirarem per tal d'apreciar els efectes de la interferència.

Cuinarem un ou, plastilina i regalèssia durant suficient temps per a que algunes parts es solidifiquin (en els punts “calents” del microones), mentre que la resta romandrà parcialment cuita. Mesurant la distància entre les parts cuites, estarem determinant la meitat de la longitud d'ona de les microones. Coneixent la freqüència



Il·lustració 36: Longitud d'ona. Font: [https://simple.wikipedia.org/wiki/Sine\\_wave](https://simple.wikipedia.org/wiki/Sine_wave)

d'aquestes ones, podem calcular la velocitat de la llum, a partir de la següent relació:

$$c = f\lambda$$

### 3. Material i equipament

- Microones
- Plat o cartró (segur per utilitzar en el microones)
- Guants de forn
- Regle
- Calculadora
- 3 o 4 ous
- Regalèssia
- Plastilina

## 4. Procediment experimental

1. Prescindeix del plat rotatori del microones. No podràs detectar “punts calents” si no ho fas.



Il·lustració 37: Freqüència del microones utilitzat en tots els experiments, 2450 MHz.

### Ou

2. Trenca l'ou i separa el rovell de la clara.
3. Aboca part de la clara en un plat. Estén la clara per la major àrea possible del recipient que utilitzis.
4. Posa-ho al microones i comença a cuinar l'ou, 30 segons per començar. Deixa'l més o menys temps segons l'estat de cocció en el que es trobi. El plat ha d'estar fixe, no es pot moure. Volem aconseguir cuinar parcialment la clara en alguns llocs i totalment en altres.
5. Mesura la distància entre les porcions cuites de l'ou.
6. Notes:
  - a. Els centres de les porcions cuites no estaran clarament definits.
  - b. El teu objectiu amb aquestes mesures és trobar la distància mitjana entre les porcions cuites i estimar l'error del teu mesurament.
  - c. Mesurant des dels centres i les vores dels punts calents tindràs límits inferiors i superiors sobre l'error de la teva mesura.
7. Repeteix l'experiment els cops que faci falta.

## Regalèssia

2. Retalla una superfície de cartró de la mateixa longitud i amplada que el teu microones, perquè les mostres es mantinguin fixes.
3. Col·loca la regalèssia paral·lela a la porta del microones.
4. Enganxa amb celo els dos extrems
5. Comença a cuinar-la, variant el temps de cocció segons convingui.
6. Pren mesures entre els punts calents, de centre a centre i de vora a vora.
7. Repeteix l'experiment els cops que faci falta.

## Plastilina

2. Retalla una superfície de cartró de la mateixa longitud i amplada que el teu microones, perquè les mostres es mantinguin fixes.
3. Estén un tros de plastilina en el cartró, cobrint la major superfície possible.
4. Comença a cuinar-la, variant el temps de cocció segons convingui.
5. Fixa't en les zones en les que la plastilina s'ha elevat lleugerament, fent una bombolla o turonet. Pren mesures entre aquests punts, de centre a centre i de vora a vora.
6. Repeteix l'experiment els cops que faci falta.

## 5. Càlculs, tractament de dades i resultats

Trobaràs la freqüència a l'etiqueta darrere el microones. L'espai entre els punts calents serà equivalent a la meitat de la longitud d'ona d'una microona. Calcula la velocitat de la llum amb la mitjana de la longitud d'ona (ja mesurada) i la freqüència (a l'etiqueta del microones).

## 5.1 Ou



Il·lustració 38: Clara d'ou cuita 30 segons sobre una fusta. No podem apreciar amb exactitud els punts calents.



Il·lustració 39: Clara d'ou cuita 5 segons sobre un plat de vidre. Diferenciem més els punts calents.

Com que els resultats no van ser gaire bons, no he fet cap càlcul.

## 5.2 Regalèssia

- Taula de dades: Regalèssia.<sup>5</sup>

Mitjana de la longitud d'ona= 5,8 cm

$$c = f\lambda$$

$$f = 2,45 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$\lambda = 5,8 \times 10^{-2} \times 2 = 1,16 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$c = 284.200,00 \mp 15.593 \text{ km/s}$$

---

<sup>5</sup> Annexos (pàg. 47)



### 5.3 Plastilina

- Taula de dades: Plastilina. <sup>6</sup>

Mitjana de la longitud d'ona= 6,8cm

$$c = f\lambda$$

$$f = 2,45 \times 10^9 \text{Hz}$$

$$\lambda = 6,8 \times 10^{-2} \times 2 = 13,6 \times 10^{-2} \text{m}$$

$$c = 333.200,00 \mp 33.400 \text{ km/s}$$

## 6. Conclusions

La precisió de les dades pot variar, bé perquè el microones no emet la totalitat de la seva freqüència o per errors en les mesures.

L'experiment més eficaç per a estimar la velocitat de la llum al meu parer ha estat el que utilitzava plastilina, perquè tot i que no obtenim el mínim error en comparació amb els altres, ha requerit menys intents i podíem observar més punts calents degut a que es cobria tota l'àrea del cartró.

### 6.1 Ou

El plat no estava correctament fixat al microones i no podem apreciar amb exactitud els punts calents perquè les mostres no han estat immòbils. A més a més, en el primer cas, hem cuinat en excés l'ou. Els resultats no són els esperats.

### 6.2 Regalèssia

Hem obtingut un valor bastant acceptable, amb un error absolut de  $\mp 15.593 \text{ km/s}$  respecte el valor real de  $c$ . La clau ha estat col·locar les mostres més properes a la paret del microones, on s'apreciaven més els punts calents.

---

<sup>6</sup>Annexos (pàg. 47)

### **6.3 Plastilina**

Al meu parer, és el millor experiment pel que fa a la metodologia. Es veien els punts calents amb més claredat. S'obté un error de  $\mp 33.400 \text{ km/s}$ .

## **Pràctica 2: Estimació de la velocitat de la llum amb el mètode de Foucault**

### **1. Objectiu**

-Calcular la velocitat de la llum seguint una simplificació molt casolana del mètode de Foucault.

### **2. Introducció**

Tal i com explico a la pàgina 28, el mètode de Foucault no era gaire senzill de dur a terme. Contava amb una distància de 20 metres i un equipament apropiat.

### **3. Material i equipament**

- Làser
- Mirall rotatori
- Mirall estacionari
- 2 o més lents
- Superfície de fusta

### **4. Procediment**

- 4.1. Ens situem en un lloc espaiat, en el meu cas, el jardí de casa meva. El làser, que jo he fixat a una cadira amb cinta americana, emet un feix de llum que focalitza la lent que he extret d'un projector antic.
- 4.2. El mirall rotatori, acoblat a un motor "dremel", girarà a 30000rpm teòricament. L'he fixat amb cinta a un banc de fusta. El feix de llum s'ha de focalitzar i seguidament reflectir-se del mirall rotatori a un altre mirall (i una lent), perpendicular a aquest.
- 4.3. Amb una disposició de l'equip adequada, hauríem de veure dos punts de llum simultàniament a una fusta o superfície a uns metres de distància, si tot està correctament focalitzat.



Il·lustració 40: Muntatge casolà del mètode de Foucault.



Il·lustració 41: Superfície de fusta.  
Punt de llum focalitzat.

## 5. Càlculs, tractament de dades i resultats

Malauradament, no he pogut anotar cap dada ni fer cap càlcul. Tot i que el mirall rotatori girava correctament, la llum no estava correctament focalitzada. A més a més hi havia molts altres problemes, com per exemple:

- La necessitat de cobrir el mirall rotatori per només observar el feix de llum que ens interessava.
- La col·locació adequada de tot el sistema, incloent les lents.
- La mala qualitat del mirall rotatori.

## 6. Conclusions

Un experiment com aquest comporta molta més precisió del que pensava. Si hagués comptat amb recursos, com lents amb les distàncies focals adequades, potser hauria pogut ja no calcular, però entreveure mínimament com seria el mètode de Foucault.

## 6. CONCLUSIONS

---

Durant aquesta recerca, m'he adonat de molts aspectes que passaven desapercibuts per a mi anteriorment pel que fa referència a la llum, la ciència i el rang d'informació que abastim amb l'internet.

La llum, un fenomen que ja preveia complicat, ha resultat ser el protagonista de milers de debats històrics, hipòtesis errònies que resultaven el camí per a respostes correctes; i deduccions claus, que només podien ser claus gràcies a l'existència d'altres que el pas del temps ha qualificat d'irrellevants.

El rang d'informació de l'internet en espanyol se'm quedava curt en alguns aspectes que pretenia explicitar, i les pàgines webs i llibres en anglès han estat un recurs que he apreciat i valorat. He hagut de entendre i traduir coherentment molta informació per a després sintetitzar-la amb èxit, així com els càlculs realitzats.

També he pogut comprovar com la majoria d'informació relativa als primers experiments estava excessivament simplificada per tal de fer-la comprensible: explicacions i il·lustracions esquemàtiques pel que en realitat són instruments molt més elaborats amb minuciosos detalls i ajustaments claus. Per aquesta raó, vaig proposar-me inicialment un objectiu que prèviament m'ha resultat impossible assolir, la reproducció del mètode de Foucault.

Em va costar molt trobar informació específica referent a les estimacions de la velocitat de la llum. Per sort vaig trobar els llibres i estudis de les fonts fiables que esmento abans. He establert a partir d'aquesta informació una comparativa entre els mètodes esquemàtics i els reals, a la meua part teòrica.

A més a més, he encabít tota la meua recerca a un lloc web sites. Ha estat interessant i bastant senzill utilitzar aquesta eina.

Un altre conclusió d'aquest treball és la constatació que la ciència depèn enormement de la tecnologia: el que fa anys resultava un mesurament que requeria aparells molt

complexes i una gran infraestructura, ara el podem realitzar a la cuina de les nostres cases. Aquesta recerca doncs, m'ha donat la perspectiva suficient per afirmar que els experiments científics que avui en dia veiem com a costosos i complicats, en un futur, i gràcies al desenvolupament tecnològic, seran molt més simples i econòmics.

## 7. BIBLIOGRAFIA

---

### Libres:

- J. JEAN-CLAUDE, Joseph: *Quanto-Geometry: Overture of Cosmic Consciousness or Universal Knowledge For All*, Ed., 26 gener 2015
- DITCHBURN, R. W: *Óptica*, Ed. Reverté, S.A. Barcelona, 1982.
- *Krishina's Engineering Physics; Volume III; Optics; 2001*, Krishna Prakashan Media
- MALACARA, Daniel, *Óptica Básica*, 2 desembre 2015

### Articles:

- GÓMEZ-ESTEBAN, Pedro: “La naturaleza de la luz” *El tamiz*, (I) 19 Juny 2013.
- GÓMEZ-ESTEBAN, Pedro: “La naturaleza de la luz” *El tamiz*, (II) 19 Juny 2013.
- GÓMEZ-ESTEBAN, Pedro: “La naturaleza de la luz” *El tamiz*, (III) 19 Juny 2013.

### Pàgines d'internet:

#### **Durant l'estiu i setembre:**

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Speed\\_of\\_light#Measurement](https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light#Measurement)
- <http://casanchi.com/fis/roemerluz01.pdf>
- [http://www.pas.rochester.edu/~pavone/particle-  
www/teachers/demonstrations/FoucaultDemonstration.htm](http://www.pas.rochester.edu/~pavone/particle-<br/>www/teachers/demonstrations/FoucaultDemonstration.htm)
- [http://www.speed-light.info/measure/speed\\_of\\_light\\_history.htm](http://www.speed-light.info/measure/speed_of_light_history.htm)
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm>
- [http://www.speed-light.info/speed\\_of\\_light\\_12000.htm](http://www.speed-light.info/speed_of_light_12000.htm)
- <https://www.youtube.com/watch?v=H9kZTm4Xm-8>

- [https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project\\_ideas/Phys\\_p056.shtml#summary](https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project_ideas/Phys_p056.shtml#summary)
- <http://www.astronomia.net/cosmologia/lec123.htm>
- <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz12.htm>
- <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz18.htm>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/celeste/roemer/roemer.htm>
- <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz15.htm>
- [http://www.csuohio.edu/sciences/sites/csuohio.edu.sciences/files/media/physics/documents/Speed%20of%20Light\\_0.pdf](http://www.csuohio.edu/sciences/sites/csuohio.edu.sciences/files/media/physics/documents/Speed%20of%20Light_0.pdf)
- <https://web.njit.edu/~sirenko/Phys450/speedoflight.pdf>

### Octubre:

- [https://ph208.edu.physics.uoc.gr/refs/Exp10/Voros\\_EJP3\\_1\\_2015.pdf](https://ph208.edu.physics.uoc.gr/refs/Exp10/Voros_EJP3_1_2015.pdf)
- <http://elneutrino.blogspot.com.es/2011/02/la-medida-de-la-velocidad-de-la-luz.html>
- <https://www2.stat.duke.edu/courses/Spring99/sta110a/newcomb.html> 22:25, 19 del 10
- <https://medidasvelocidadluzhistoricas.wordpress.com/>
- [https://escolesvalencianesassociades.files.wordpress.com/2015/04/pep-vac3b1c3b3\\_midiendo-la-velocidad-de-la-luz.pdf](https://escolesvalencianesassociades.files.wordpress.com/2015/04/pep-vac3b1c3b3_midiendo-la-velocidad-de-la-luz.pdf)
- [https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project\\_ideas/Phys\\_p056/physics/measuring-the-speed-of-light-with-a-microwave-oven#procedure](https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project_ideas/Phys_p056/physics/measuring-the-speed-of-light-with-a-microwave-oven#procedure)
- <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/speedoflight/> 21 10 21:45
- [http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure\\_c.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/SpeedOfLight/measure_c.html)

### Novembre (del 12 fins el 21)

- <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/speedoflight/> 12/11
- <https://www.xataka.com/espacio/como-una-luna-perezosa-fue-fundamental-en-la-determinacion-de-la-velocidad-de-la-luz>
- <http://vigo.ime.unicamp.br/~fismat/newcomb.pdf>



## 8. ANNEXOS

---

- El meu lloc web sites:

[https://sites.google.com/s/1Pqh4m9fYvymht4uqpkRI6TSxi5AC\\_MU1/p/1kNknD2IA58LI4Evc5TbHakSwe3jFUT7S/edit?authuser=1](https://sites.google.com/s/1Pqh4m9fYvymht4uqpkRI6TSxi5AC_MU1/p/1kNknD2IA58LI4Evc5TbHakSwe3jFUT7S/edit?authuser=1)

- Més imatges de la pràctica 1:



Il·lustracions 42 i 43: Col·locació de les mostres al microones amb un cartró.



Il·lustracions 44 i 45: Punts calents assenyalats.

**Més imatges de la pràctica 2:**



Il·lustracions 46 i 47: Soldadura del cub de llautó que acoblem a l'eix del motor.







Il·lustracions 48, 49 i 50: Mirall rotatori i lent d'un projector antic amb mirall fixe.

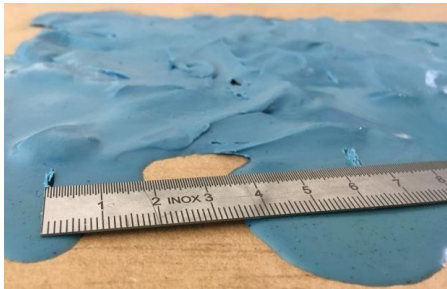




Il·lustracions 51, 52 i 53: Posicionament de l'equip

**Taula de dades de la pràctica d'estimació de la velocitat de la llum 1: Regalèssia**

Proves regalèssia	Temps de cocció (s)	Longitud d'ona (cm)	Modificacions	Imatges	Observacions
1	30				Només tenim un “punt calent”. No puc mesurar res.
2	30	De centre a centre: 8 De vora a vora: 4	Col·loquem les mostres més al fons del microones.		Tenim 2 “punts calents”, la distancia comença a aproximar-se.
3	30	De centre a centre: 7 De vora a vora: 3,5			
4	60	De centre a centre: 8 De vora a vora: 4,5	Baixem potència, mode descongelat.		La regalèssia està molt més cuïta, els punts calents són negres.

### Taules de dades de la pràctica d'estimació de la velocitat de la llum 1: Plastilina

Proves plastilina	Prova 1	Prova 2	Prova 3
<b>Temps de cocció (s)</b>	45 s	60 s	45 s
<b>Longitud d'ona (cm)</b>	De centre a centre: 6,4 De vora a vora: 7,3	-	De centre a centre: 7 De centre a centre: 6,5
<b>Modificacions</b>	-	Estenem la plastelina per tal que ocupi més superfície del cartró.	Posem el cartró més proper a la paret del fons del microones
<b>Imatges</b>			
<b>Observacions</b>	S'aprecien bastant bé dos punts calents a la part més propera a la paret del microones.	Hem cuinat la plastilina en excés. *Lea prova de la imatge ha estat manipulada.*	S'aprecien també 2 punts calents.