



Ones

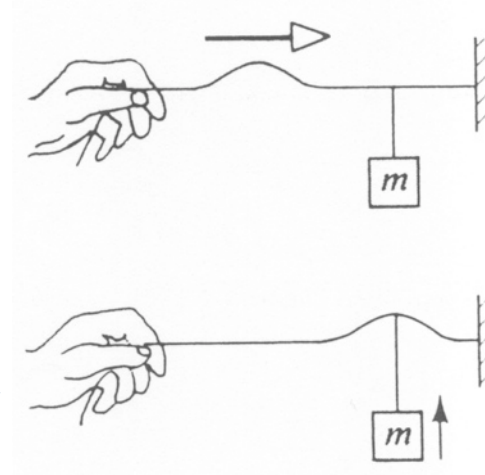
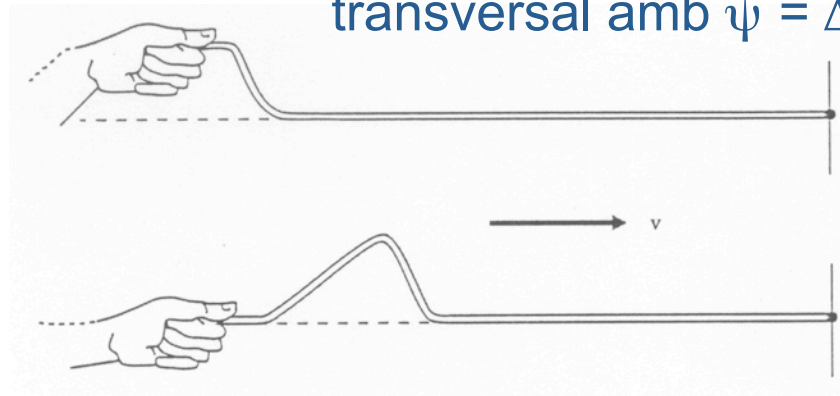
Ones: Propagació d'una pertorbació ψ

Transport d'energia sense transport de matèria

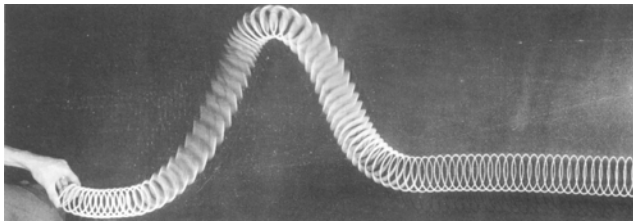
Tipus d'ones

- Pols d'ona en una corda (en una dimensió, 1D)

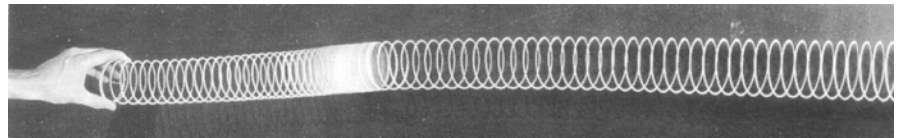
transversal amb $\psi = \Delta y$



- Pols d'ona en una molla (1D)



Transversals ($\psi = \Delta y$)

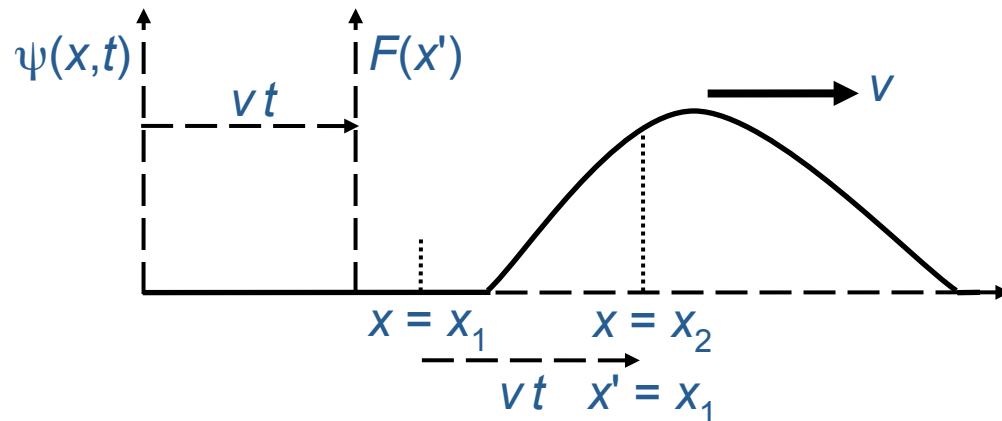
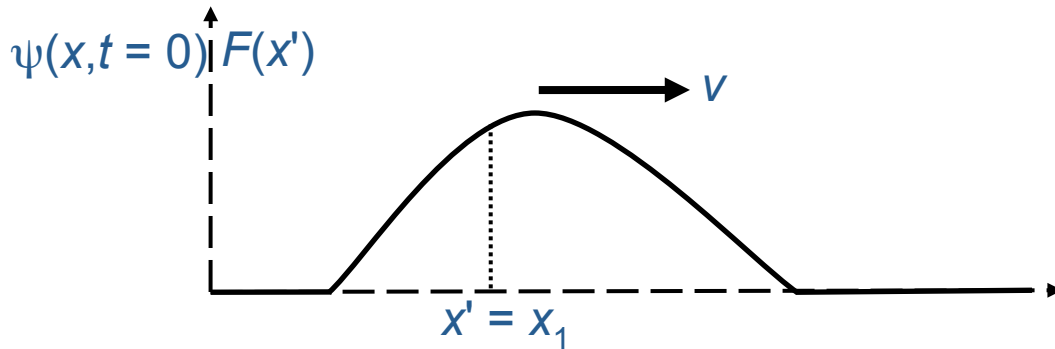


Longitudinals ($\psi = \Delta \text{esp}/\text{long}$)

Funció d'ona: $\psi(\mathbf{r}, t)$

Per a ones planes o 1D: $\psi(x, t)$, $\psi(y, t)$ o $\psi(z, t)$

si es propaguen en la direcció x , y o z



Equació d'ones

$$\frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2}$$

$$x = x' + vt \Rightarrow x' = x - vt$$

$$\psi(x, t) = F(x') = F(x - vt)$$

Si es propaga cap a la **dreta**

$$\psi(x, t) = F(x - vt)$$

Si es propaga cap a l'**esquerra**

$$\psi(x, t) = F(x + vt)$$

Ones harmòniques

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

$$k = \frac{\omega}{v} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad f = \frac{1}{T}$$

A = Amplitud

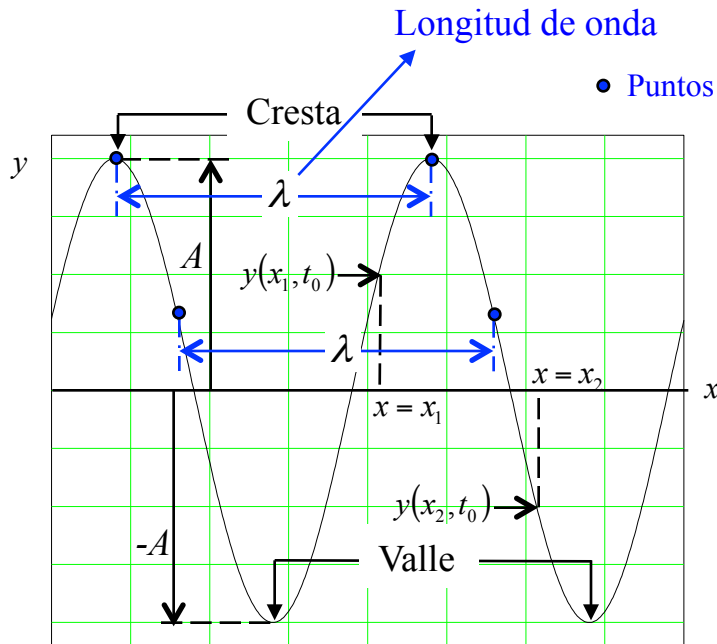
T = Període

k = Número d'ones

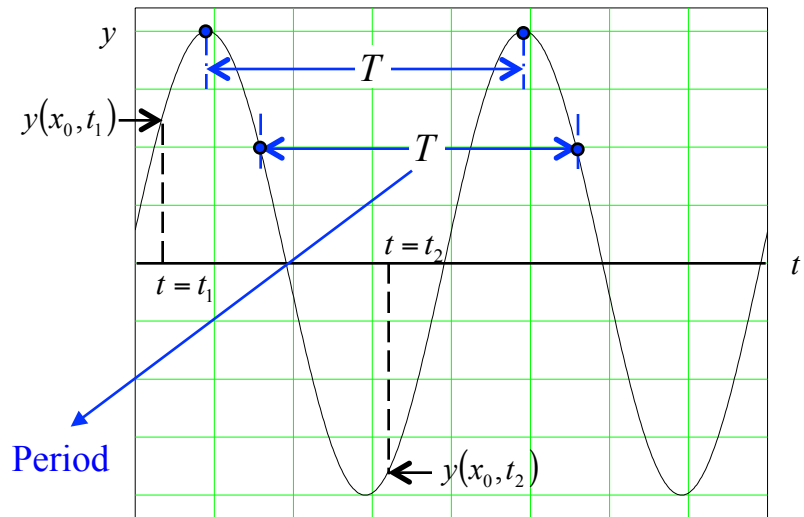
λ = Longitud d'ona

ω = velocitat angular

f = Freqüència

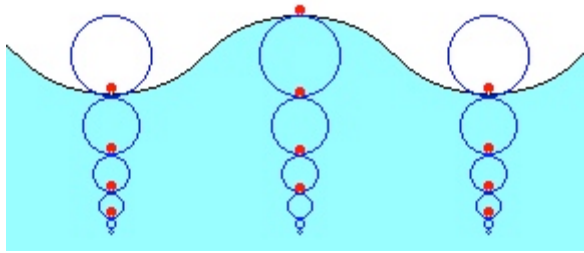


Perfil de onda para $t = t_0$



Dependencia temporal en $x = x_0$

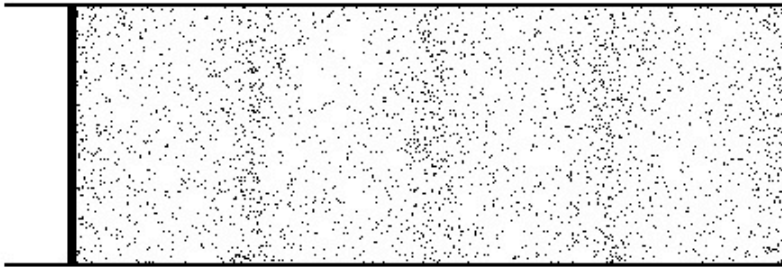
- **Ones a la superfície de l'aigua** (en dues dimensions, 2D)



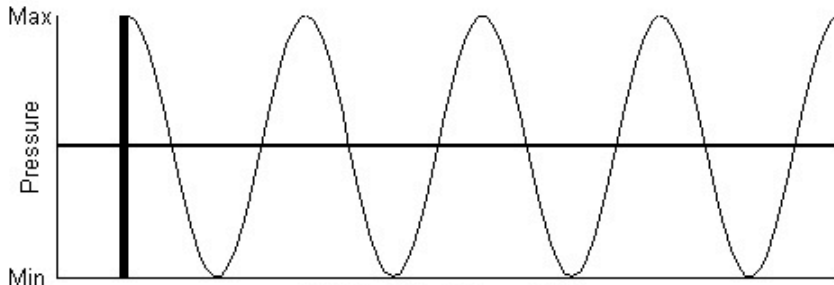
transversals
i longitudinals

- **Ones sonores en un tub** (en tres dimensions, 3D)

Acoustic Plane Wave



$\psi = \Delta P$ longitudinals



@ Ralph Muehleisen, 2004

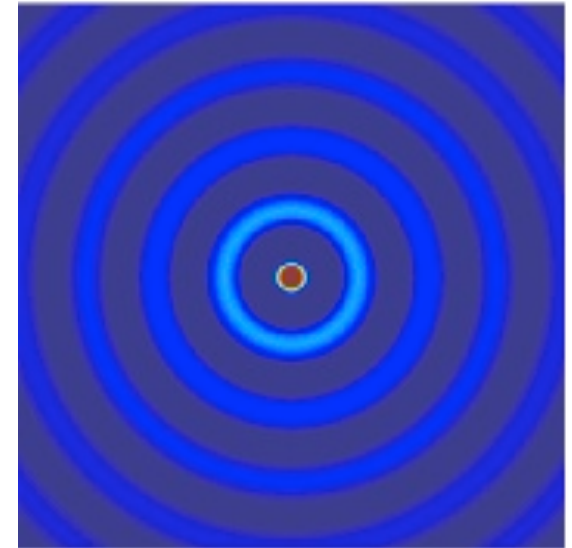
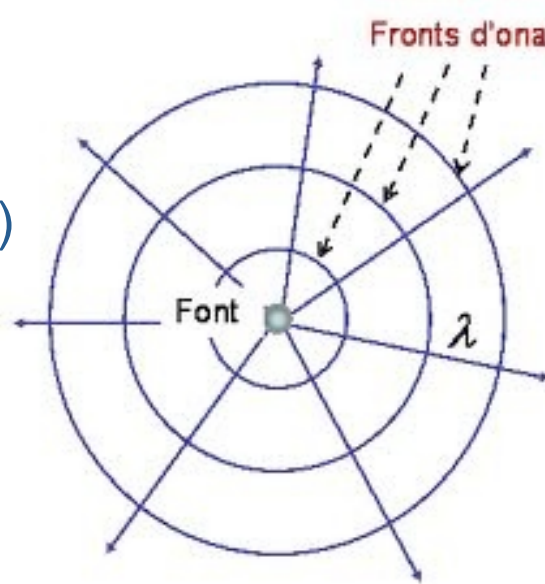


$v_{so} = 340 \text{ m/s}$

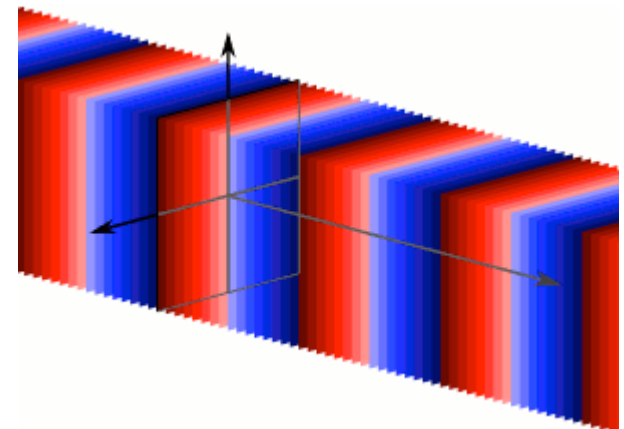
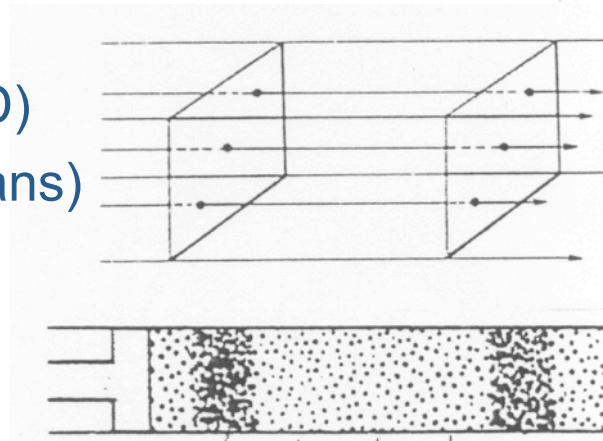
Front d'ona: Punts amb la mateixa pertorbació

Raig: línia perpendicular als fronts d'ona i en el sentit de propagació

- **Ona circular (2D)**
(fronts d'ona circulars)
- **Ona esfèrica (3D)**
(fronts d'ona esfèrics)



- **Ona plana (3D)**
(fronts d'ona plans)



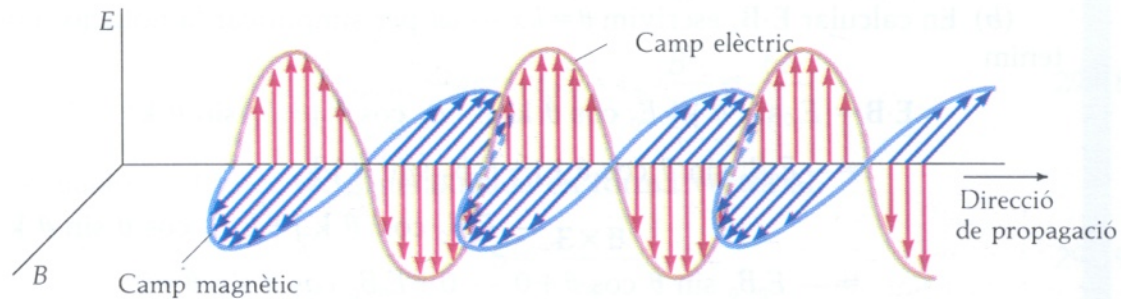
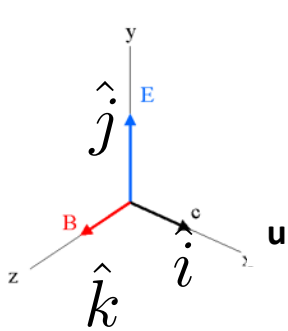
ONES ELECTROMAGNÈTIQUES

Perturbació de un camp elèctric \mathbf{E} i un magnètic \mathbf{B}

$\psi = \mathbf{E}$ i \mathbf{B} , transversals, 3D, i perpendiculars a la direcció de propagació \mathbf{u}

- **Es poden propagar en el buit** (a la velocitat de la llum $c = 3 \times 10^8$ m/s) i en segons quins medis materials

Ones radio i TV, microones, infrarojos, llum visible, raigs UV, X i γ .



$$\vec{u} = \hat{i}$$

Relació entre \mathbf{u} , \mathbf{E} i \mathbf{B} : sentit de \mathbf{B} , el de un tornavis que gira de \mathbf{u} a \mathbf{E}

$$\vec{E} = E \hat{j}$$

Unitats de \mathbf{B} en el sistema SI: Tesla

$$\vec{B} = B \hat{k}$$

Relació entre els moduls: $|\mathbf{E}| = c |\mathbf{B}|$

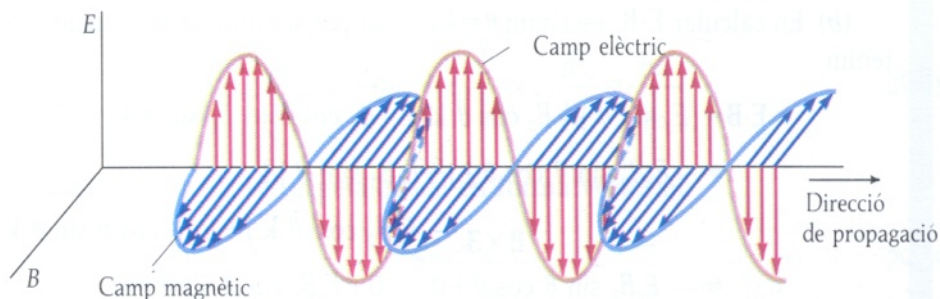
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}$$

Llum polaritzada

OEM linealment polaritzada



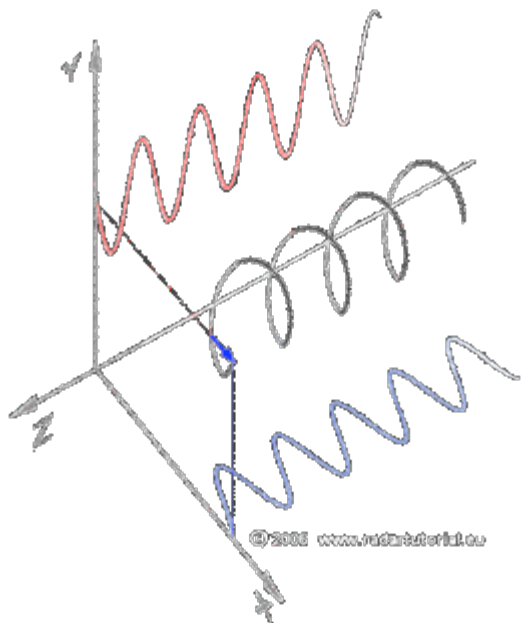
El camp elèctric **E** oscil·la en un **pla de vibració**, i en cada punt sobre una línia

$$\vec{u} = \hat{i}$$

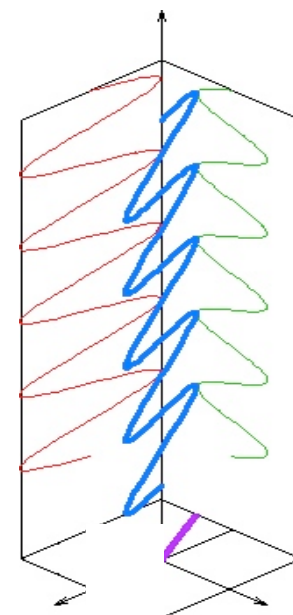
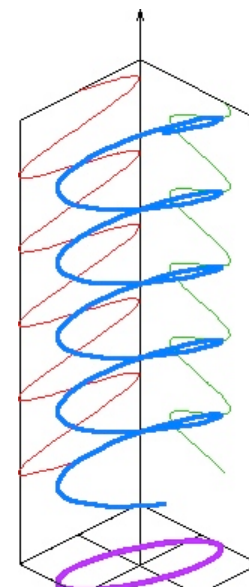
$$\vec{E} = E\hat{j} \sin(kx - \omega t)$$

$$\vec{B} = B\hat{k} \sin(kx - \omega t)$$

OEM polaritzada el·lípticament (circularment):



Superposició de dues OEM polaritzades linealment, perpendiculars i **desfasades** (90° o en quadratura)



en fase

Densitat d'energia i intensitat del camp electromagnètic

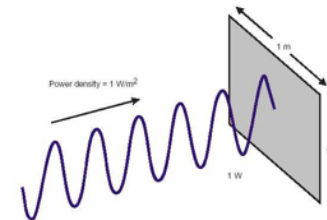
El camp elèctric **E** i el magnètic **B** porten energia que es transporta per l'espai

Densitat de energia: Energia per unitat de volum deguda a la presència dels camps **E** i **B**

$$\eta = \frac{1}{4} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2 \right) = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2} \frac{E^2}{c^2 \mu_0} \left(\frac{J}{m^3} \right)$$

Intensitat: Potència per unitat de superfície que travessa una superfície perpendicular a **u**

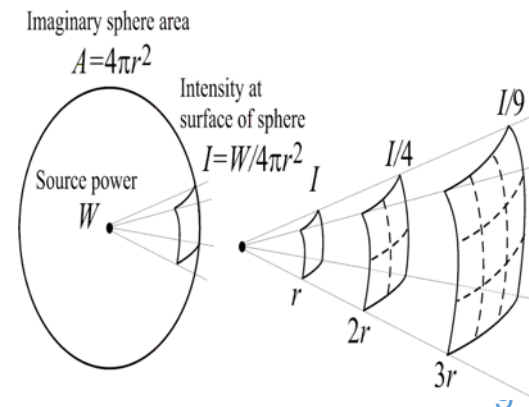
$$I = \frac{1}{2c\mu_0} E^2 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$



Ones esfèriques que emeten amb potència P_e

$$I = \frac{P_e}{4\pi r^2}$$

$$E = \sqrt{\frac{2\mu_0 c P_e}{4\pi r^2}} \sim \frac{1}{r}$$

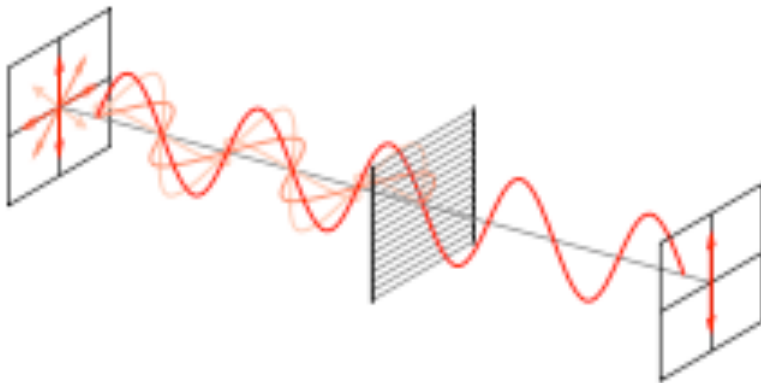
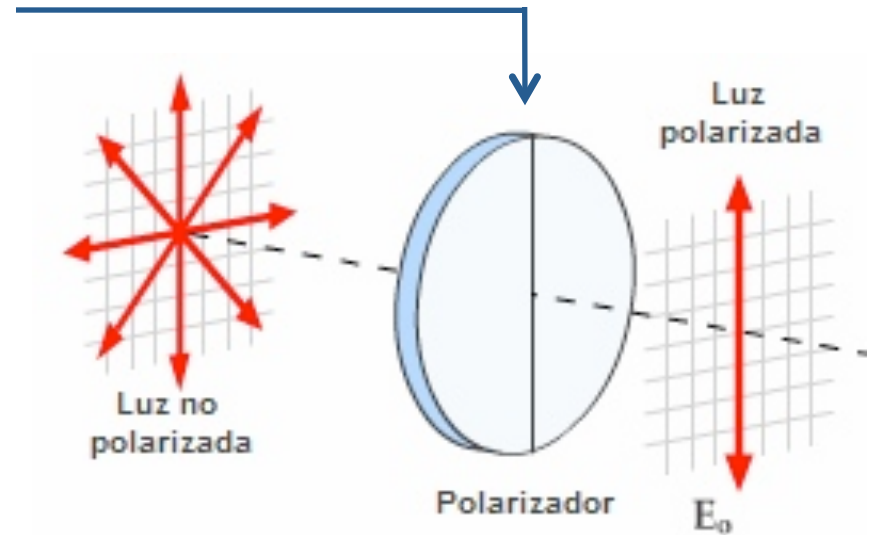


Polaritzadors

Dispositiu òptic que només deixa passar llum polaritzada en una direcció (**eix de polarització o transmissió**)

Exemple: Polarització per absorció

Els **polaroides** són làmines formades per molècules d'hidrocarburs de cadena llarga (com alcohol de polivinil dopat amb iodina) alineats, de manera que la llum polaritzada amb el camp elèctric paral·lel a les cadenes és absorbida, mentre que la polaritzada perpendicularment pot passar



La intensitat de la llum natural (no polaritzada) després de passar per un polaritzador es redueix a la meitat

$$I = \frac{I_{\text{nat}}}{2}$$

I_{nat} ≡ intensitat llum natural (no polaritzada)

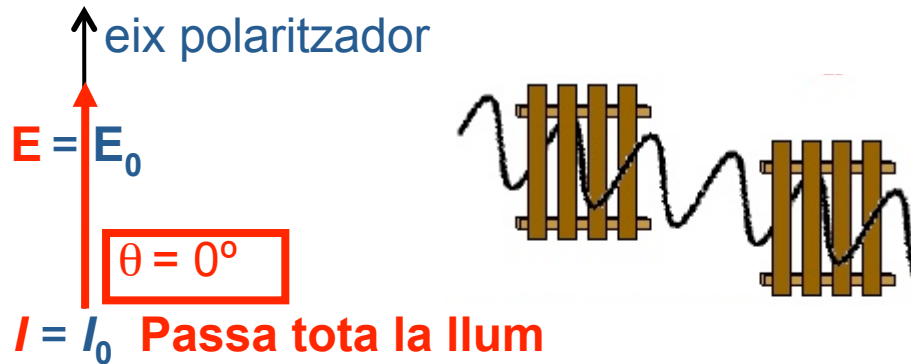
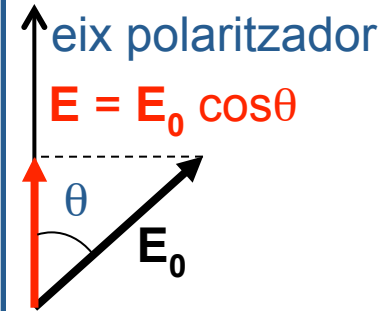
I ≡ intensitat llum polaritzada

Llei de Malus

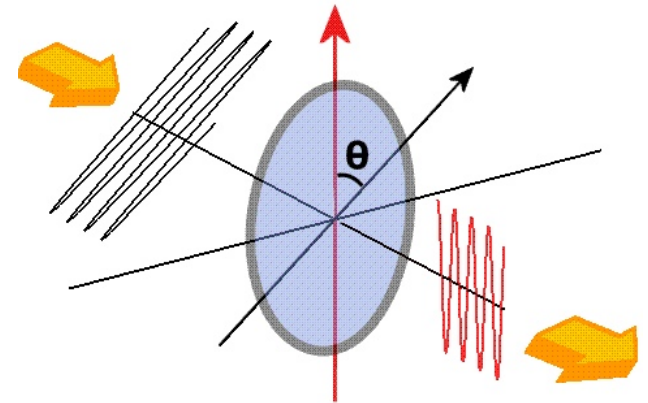
Si incideix llum polaritzada amb un camp elèctric d'amplitud E_0 que forma un angle θ amb l'eix de polarització, la llum transmesa té un camp elèctric d'amplitud en la direcció de l'eix de polarització, i la intensitat ($I \propto E^2$) transmesa és

$$E = E_0 \cos\theta$$

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$



$I = I_0$ Passa tota la llum



$I = 0$ No passa llum

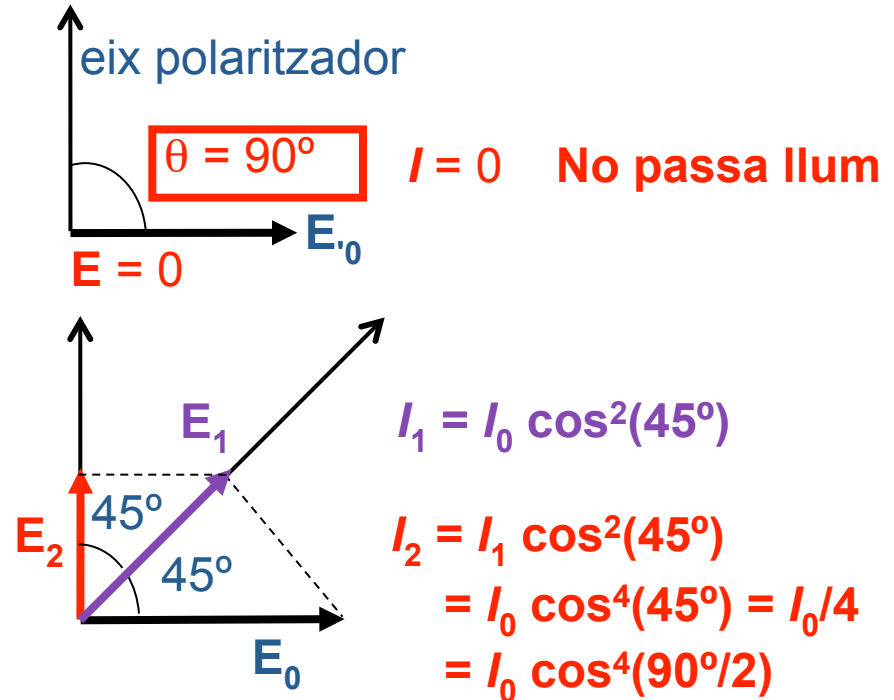
Paradoxa de la polarització

Si un feix de llum polaritzada horitzontalment passa per un filtre polaritzador amb l'eix de transmissió vertical ($\theta = 90^\circ$), **NO passa llum**.

Si entre els dos filtres en posem un altre amb l'eix de transmissió formant un angle $\theta = 45^\circ$, **si que passa llum**.

Si la llum polaritzada passa per N filtres, tals que dos eixos de transmissió consecutius formen un angle $\theta = 90^\circ/N$

$$I_N = I_0 \cos^{2N}(90/N)$$



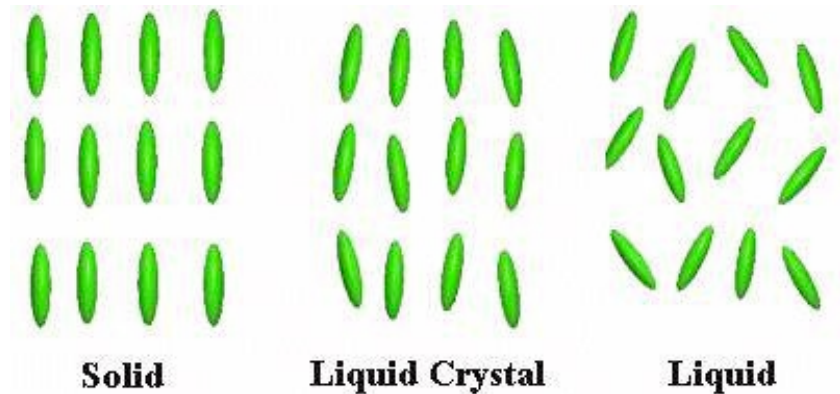
$\lim_{N \rightarrow \infty} I_N = I_0$

Si $N \rightarrow \infty$, passa tota la llum i el pla de polarització gira 90°

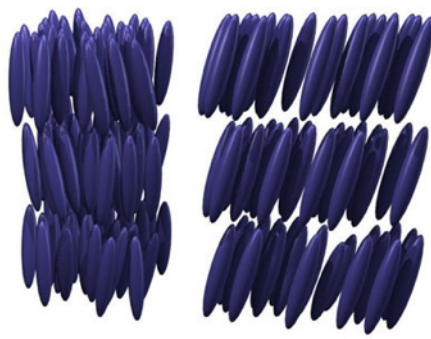
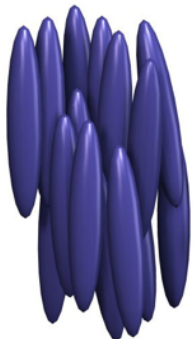
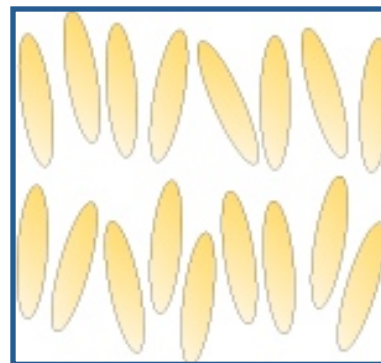
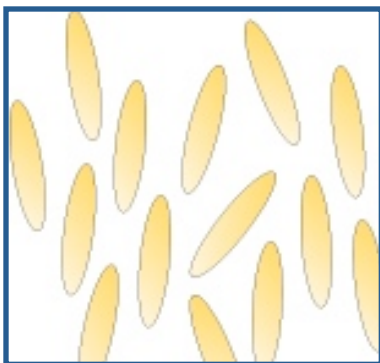
Pantalles de cristall líquid

Cristalls líquids (LC)

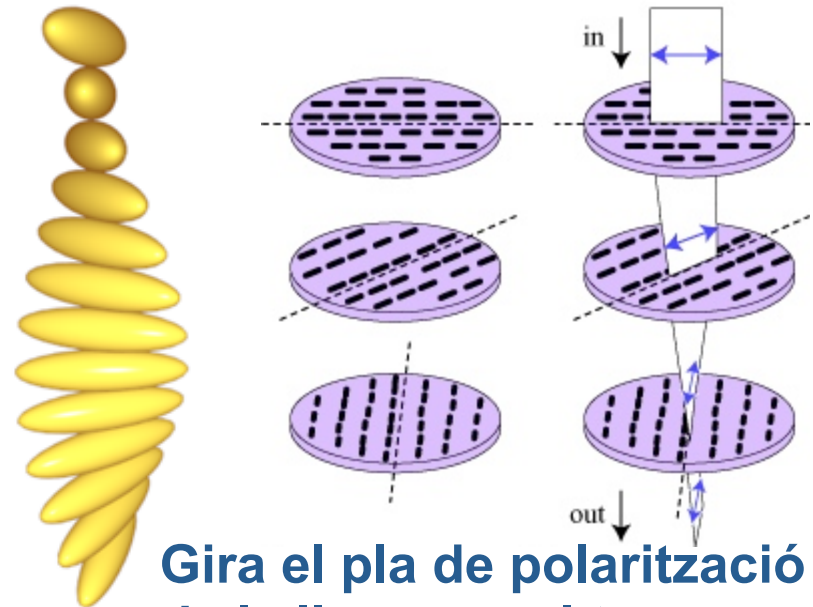
Formats per molècules allargades que es poden difondre com en un líquid i orientar-se ordenament com als cristalls.



Els LC poden estar en tres fases:
nemàtica **esmèctica**

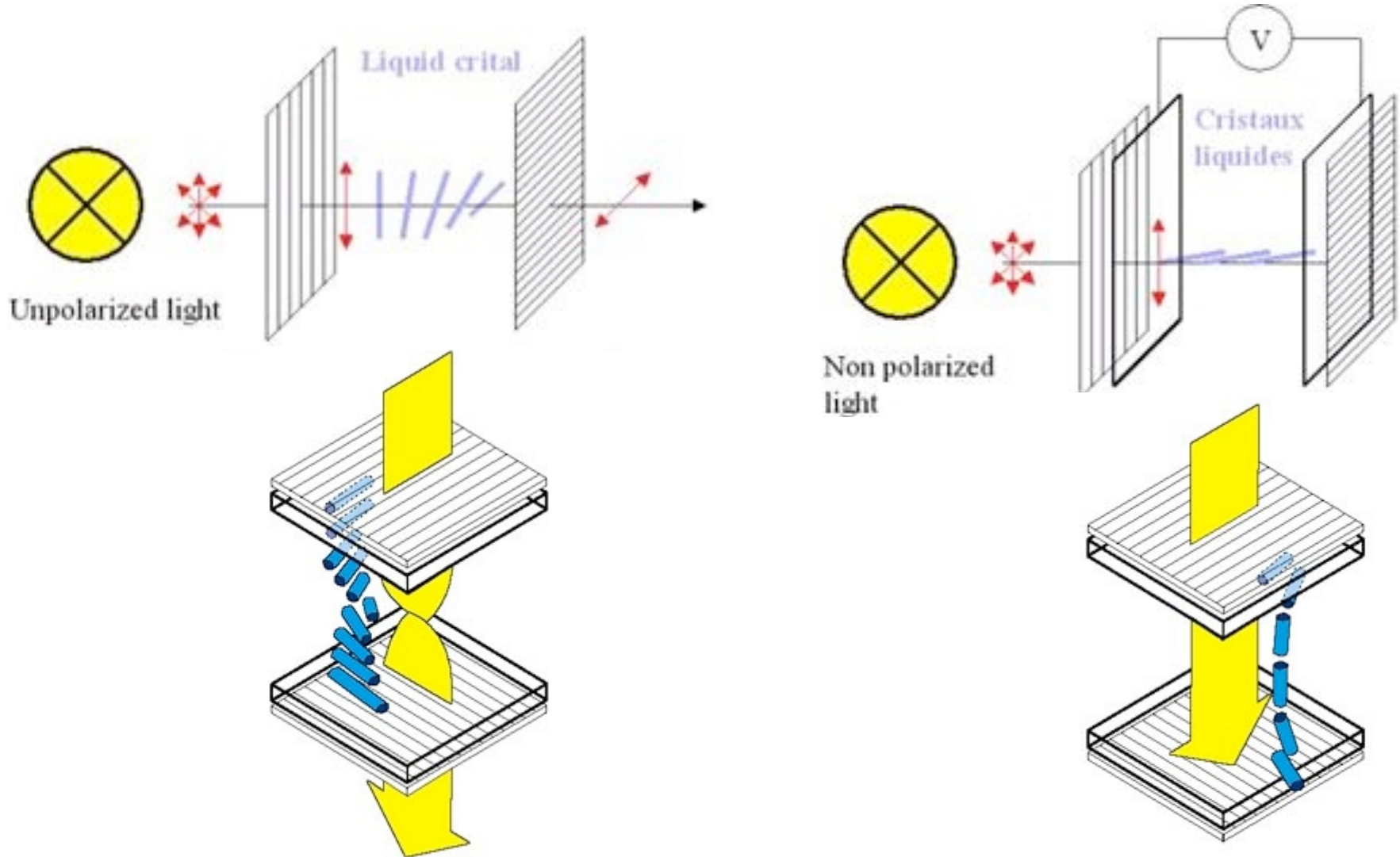


colestèrica (*chiral or twisted nematic*)



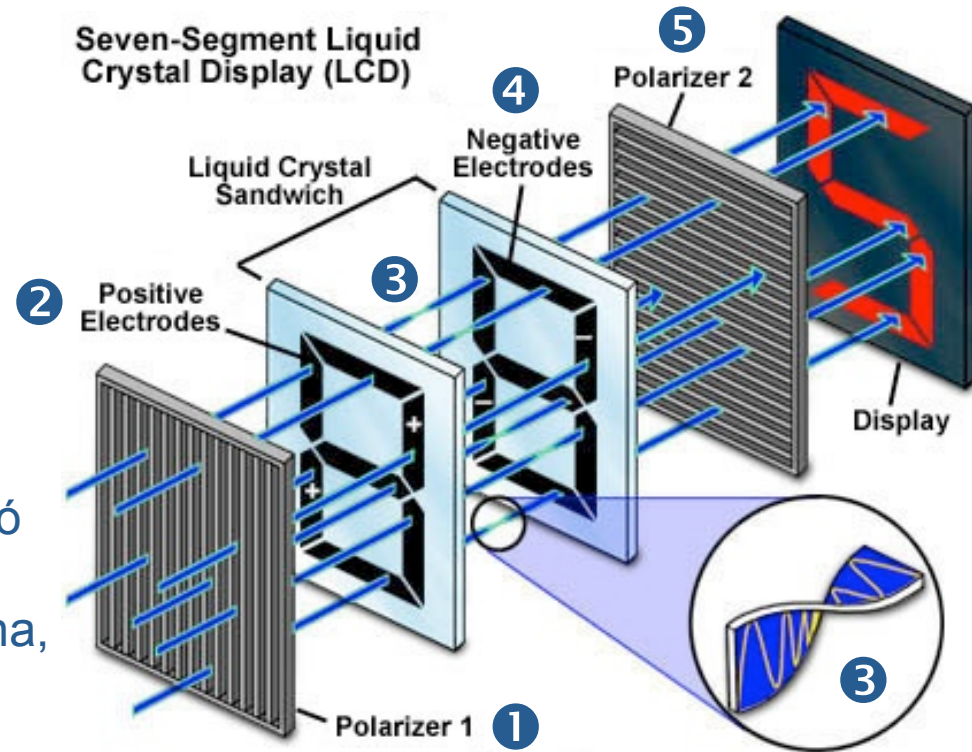
Gira el pla de polarització de la llum que el travessa

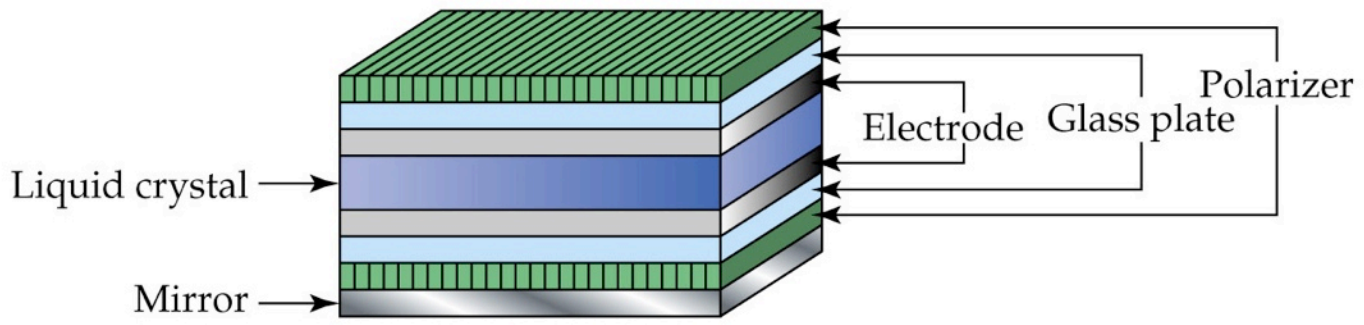
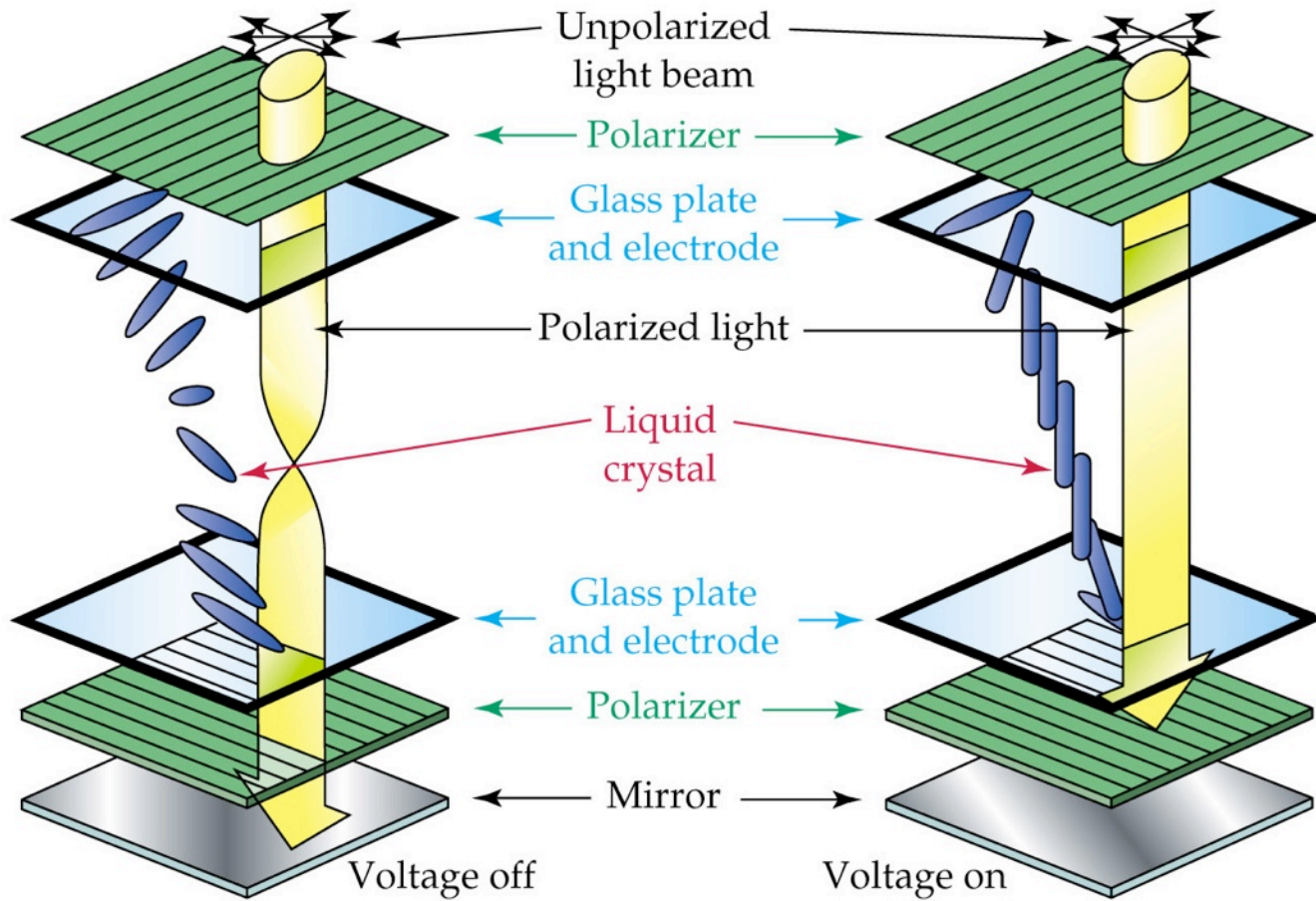
L'hèlix que formen les molècules dels LC en fase colestèrica es pot desfer amb un camp elèctric, que les alinea en el sentit del camp i, llavors, no giren el pla de vibració de la llum que les travessa.



Pantalles de cristall líquid (LCD, Liquid Crystal Display)

1. Polaritzador vertical.
2. Vidre amb elèctrodes positius que marquen les zones que quedaran negres (rectangles per fer píxels).
3. Capa de cristall líquid. Quan un feix de llum polaritzada travessa una zona del cristall líquid, la seva polarització canvia de direcció perquè els cristalls formen una hèlix. Però, si s'aplica una tensió a una zona, l'hèlix es desfà i la polarització de la llum no canvia.
4. Vidre amb elèctrodes negatius.
5. Polaritzador horitzontal. Només deixa passar la llum que ha canviat la direcció de polarització en passar per l'hèlix del cristall líquid.
- (6) Superfície reflectant (no sempre necessària) perquè la llum torni a l'observador.
- (0) Font de llum.

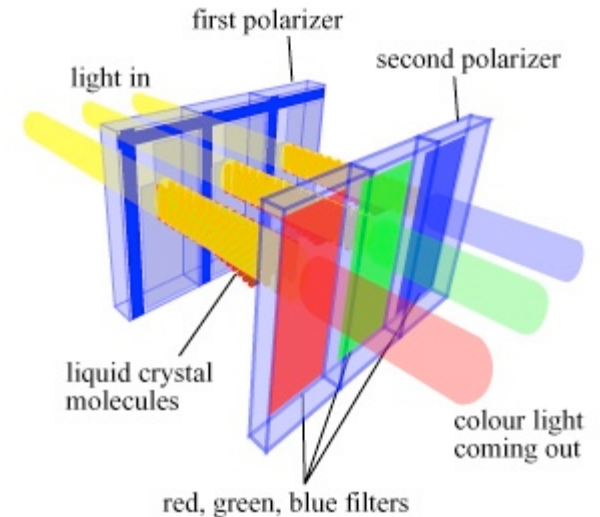




A cada píxel d'una LCD hi ha una Twisted Nematic cell (TN-cell) d'uns $10 \mu\text{m}$ de gruix que deixa passar o no la llum.

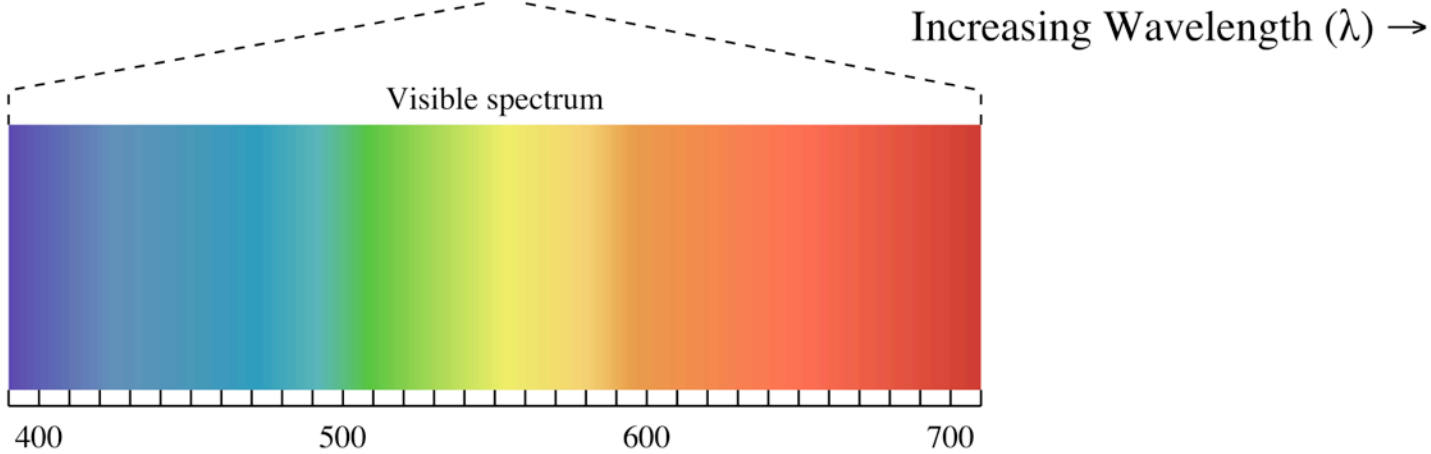
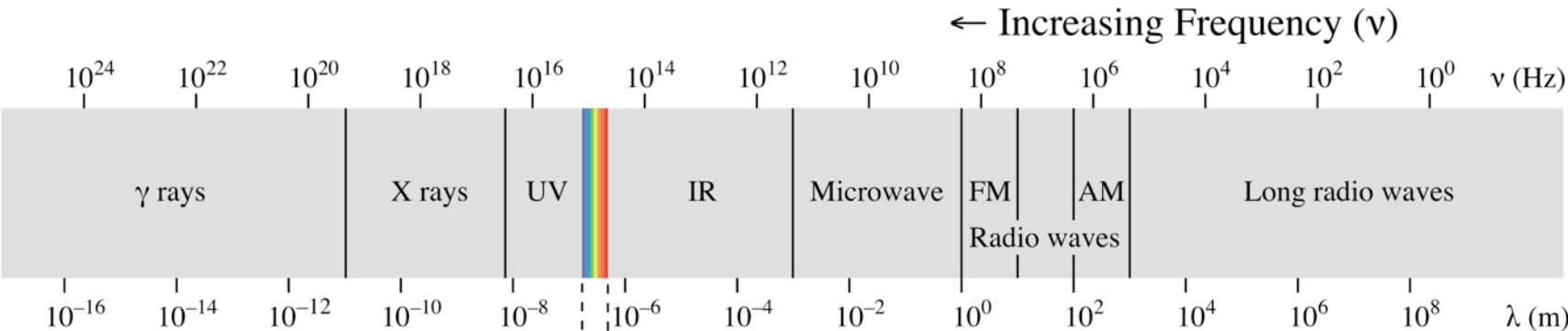
La superfície on incideix la llum i que està en contacte amb el LC, té unes estries longitudinals paral·leles a l'eix de transmissió del primer polaritzador, i la superfície de l'altre costat té les estries paral·leles a l'eix de transmissió del segon polaritzador, per tal que el LC adopti la forma d'hèlix amb un gir de 90° .

La sensació de colors s'obté situant a cada píxel tres TN-cell amb filtres de diferents colors (blau, verd, vermell)

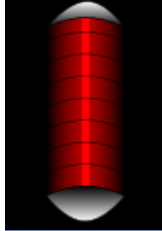
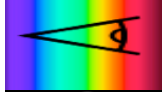


Podeu comprovar que la llum que surt d'una LCD està polaritzada fent girar un filtre polaritzador al seu davant.

Espectre Electromagnètic



$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J/s}$$

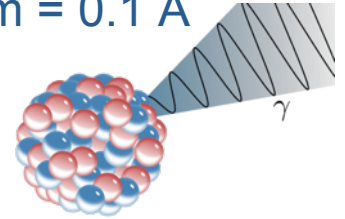


banda espectral	$\lambda = c/f$	f	energia = hf (J) = hf/e (eV)
raigs gamma	< 0.1 Å	> 30.0 EHz	> 20×10^{-15} J = 0.124 MeV
raigs X	< 100 Å	> 30.0 PHz	> 20×10^{-18} J = 0.124 keV
ultraviolat llunyà	< 200 nm	> 1500 THz	> 1000×10^{-21} J = 6.2 eV
ultraviolat proper	< 380 nm	> 790 THz	> 523×10^{-21} J = 3.3 eV
llum visible	< 740 nm	> 405 THz	> 268×10^{-21} J = 1.7 eV
infraroig proper (NIR)	< 2,5 µm	> 120 THz	> 79.5×10^{-21} J = 500 meV
infraroig mitjà (MIR)	< 50 µm	> 6.00 THz	> 4×10^{-21} J = 25 meV
infraroig llunyà o submil·limètric (FIR)	< 1000 µm	> 0.30 THz	> 0.2×10^{-21} J = 1.24 meV
microones	< 30 cm	> 1.0 GHz	> 66×10^{-24} J = 4 µeV
ràdio de freqüència ultraalta (UHF)	< 1 m	> 300 MHz	> 2.0×10^{-25} J
ràdio de freqüència molt alta (VHF)	< 10 m	> 30 MHz	> 2.0×10^{-26} J
ràdio d'ona curta	< 180 m	> 1.7 MHz	> 1.1×10^{-27} J
ràdio d'ona mitjana	< 650 m	> 650 kHz	> 4.3×10^{-28} J
ràdio d'ona llarga	< 10 km	> 30 kHz	> 2.0×10^{-29} J
ràdio de freqüència molt baixa (VLF)	> 10 km	< 30 kHz	< 1.99×10^{-29} J

- **Raigs γ :** $f > 30 \times 10^{18}$ Hz $\lambda = c/f < 0.1 \times 10^{-10}$ m = 0.1 Å
 $E = hf/e > 0.124$ MeV (molt energètics i perillosos)

$h = 6.6 \times 10^{-34}$ J/s ; eV = e(1 V) = 1.6×10^{-19} J

Origen nuclear (substàncies radioactives i reaccions nuclears)



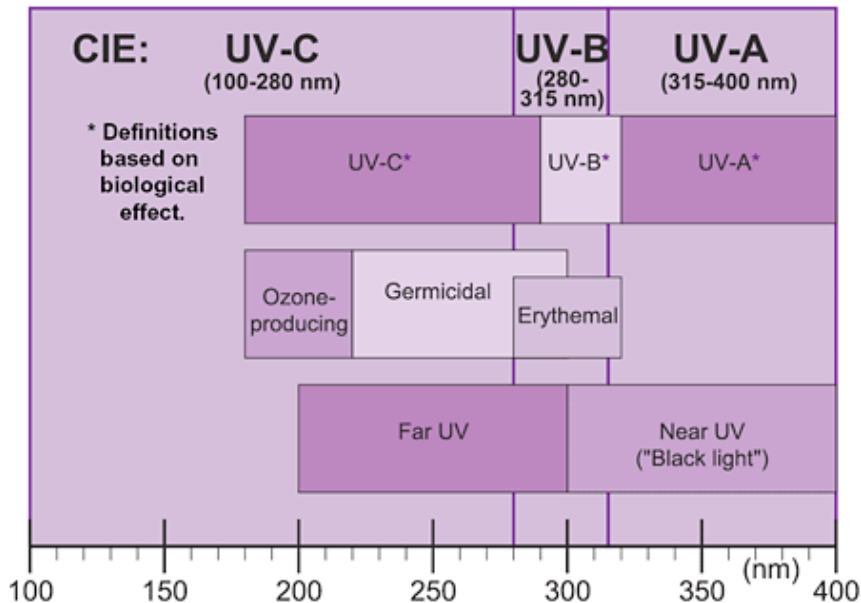
- **Raigs X:** 30×10^{18} Hz $> f > 30 \times 10^{15}$ Hz $0.1 \text{ Å} < \lambda < 100 \text{ Å}$
 $124 \text{ keV} > E > 0.124 \text{ keV}$ (també molt energètics i perillosos)

Deguts a transicions d'electrons entre capes internes dels àtoms i a la desacceleració d'electrons d'alta energia

Hard X	0.1 - 1 Å
Soft X	1 - 100 Å



- **Ultraviolat:** 30×10^{15} Hz $> f > 750 \times 10^{12}$ Hz $10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$
 $124 \text{ eV} > E > 3.1 \text{ eV}$ (bronzegen però són perillosos)



El Sol és un potent emissor de UV (que la capa d'ozó absorbeix)

Produïts per salts d'electrons entre nivells atòmics

- **Microones** $300 \times 10^9 \text{ Hz} > f > 1 \times 10^9 \text{ Hz}$ $0.1 \text{ cm} < \lambda < 30 \text{ cm}$

Generades (i captades) per circuits electrònics

- radar (detecció d'objectes amb la seva reflexió)
- telefonia mòbil (permeten moltes converses)
- GPS (1.2 GHz - 1.6 GHz)
- comandaments a distància (també amb infraroig)
- forns (freqüència de vibració de l'aigua = 2.45 GHz)



- **Radio i TV:** $1 \times 10^9 \text{ Hz} > f$

Generades (i captades) per circuits electrònics oscil·lants (antenes)

- radio de freqüència ultraalta (UHF > 0.3 GHz)
- radio de freqüència molt alta (VHF > 30 MHz)
(TV i radio FM)
- ones curtes i mitjanes de radio AM (MHz)
- ones llargues de radio (kHz)

$$0.3 \text{ m} < \lambda$$

$$0.3 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ m}$$

$$1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$$

$$10 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ km}$$

$$1 \text{ km} < \lambda$$

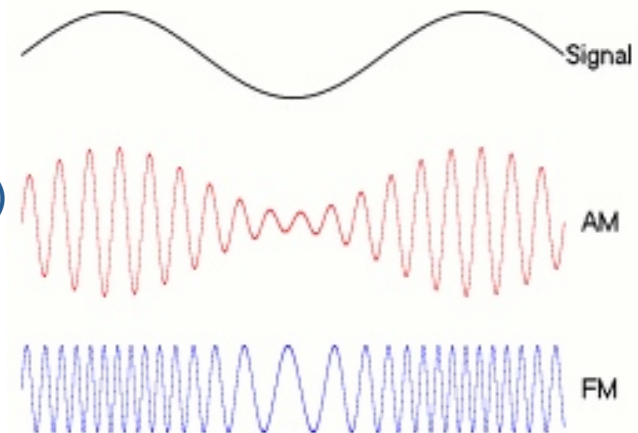


AM ≡ Modulació d'amplitud:

L'ona portadora (alta freqüència ≈ MHz) canvia d'amplitud d'acord amb el senyal de la informació (música o veu) de baixes freqüències (20 kHz-0.1 kHz)

FM ≡ Freqüència modulada:

La freqüència de l'ona portadora canvia segons el senyal de baixa freqüència



- **Llum visible:** $790 \times 10^{12} \text{ Hz} > f > 405 \times 10^{12} \text{ Hz}$ $380 \text{ nm} < \lambda < 740 \text{ nm}$
 Deguda a salts electrònics entre nivells atòmics i moleculars externs

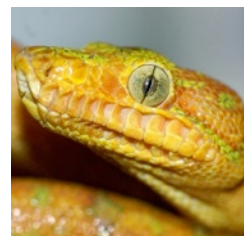
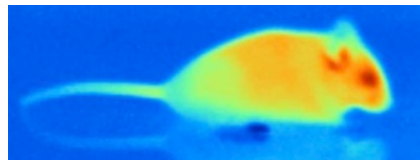
Color	Interval de longitud d'ona	Interval de freqüència
violat	~ 380 a 430 nm	~ 790 a 700 THz
blau	~ 430 a 500 nm	~ 700 a 600 THz
cian	~ 500 a 520 nm	~ 600 a 580 THz
verd	~ 520 a 565 nm	~ 580 a 530 THz
groc	~ 565 a 590 nm	~ 530 a 510 THz
taronja	~ 590 a 625 nm	~ 510 a 480 THz
vermell	~ 625 a 740 nm	~ 480 a 405 THz



Visió dels gossos



Visió de les serps



- **Infraroig:** $405 \times 10^{12} \text{ Hz} > f > 0.3 \times 10^{12} \text{ Hz}$ $0.7 \mu\text{m} < \lambda < 1000 \mu\text{m}$
 Produïts per vibracions i rotacions moleculars dels cossos calents
 També n'emeten dispositius electrònics com díodes d'unió
 i s'utilitzen en els comandaments a distància



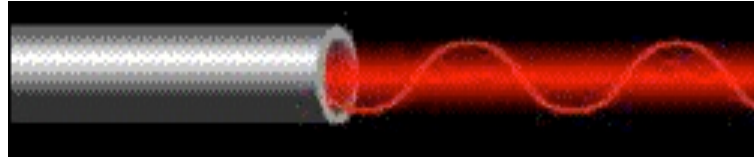
**No es veuen,
 però les càmeres digitals els capten**

Near Infrared	NIR	0.7 - 3 μm
Mid Infrared	MIR	3 - 50 μm
Far Infrared	FIR	50 - 1000 μm

Làsers

Làser

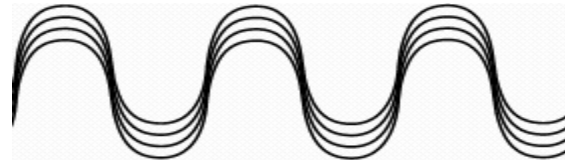
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Un làser és una font de llum que utilitza l'emissió estimulada, per emetre un feix de llum

- **coherent**

(la relació de fase entre dos punts és constant)



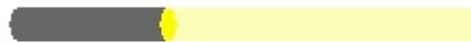
- molt **monocromàtic**

(d'un sol color, una sola freqüència)

- **altament direccional**

i molt **col·limat**

(raigs pràcticament paral·lels)



- força **intens**

- sovint **polaritzat**.

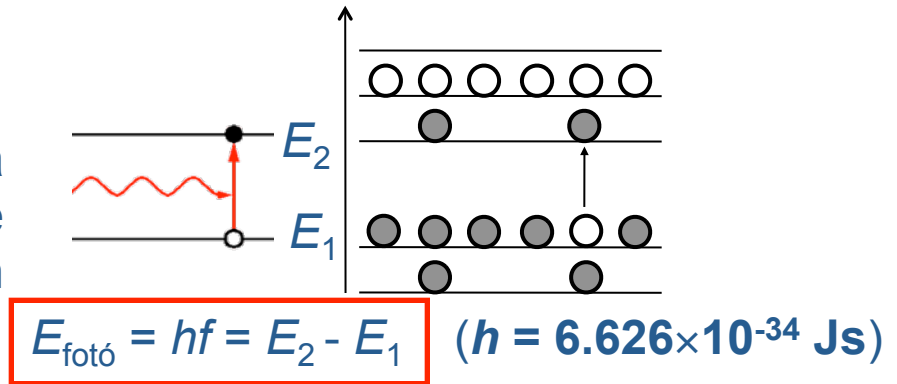
El làser es basa en dos fenòmens físics:

1) **L'emissió estimulada** en un **medi actiu**

2) **Amplificació i interferència** en una **cavitat ressonant**

Absorció (excitació):

Quan un electró d'un àtom o molècula absorbeix un fotó, s'excita i passa de l'estat d'energia E_1 on es troba a un d'energia $E_2 > E_1$. Només passa si



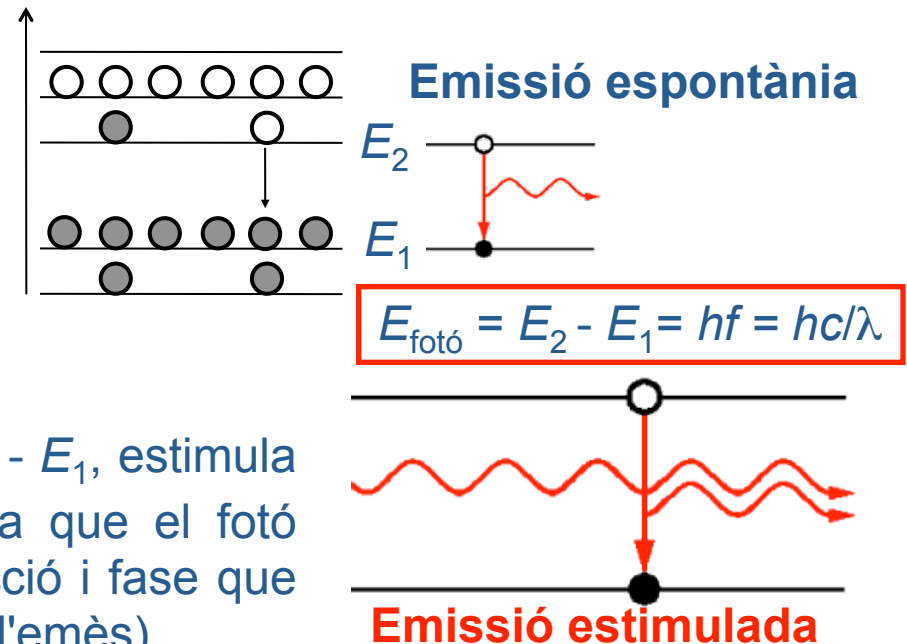
Emissió (desexcitació):

Quan un electró d'un àtom o molècula, d'un estat excitat d'energia E_2 , passa a un estat d'energia $E_1 < E_2$, emet un fotó d'energia $E_{\text{fotó}} = E_2 - E_1 = hf$.

▪ **Emissió espontània**

▪ **Emissió estimulada:**

Un fotó incident, amb energia $hf = E_2 - E_1$, estimula la desexcitació de l'electró i provoca que el fotó emès tingui la mateixa energia, direcció i fase que el fotó incident (que **s'amplifica** amb l'emès).



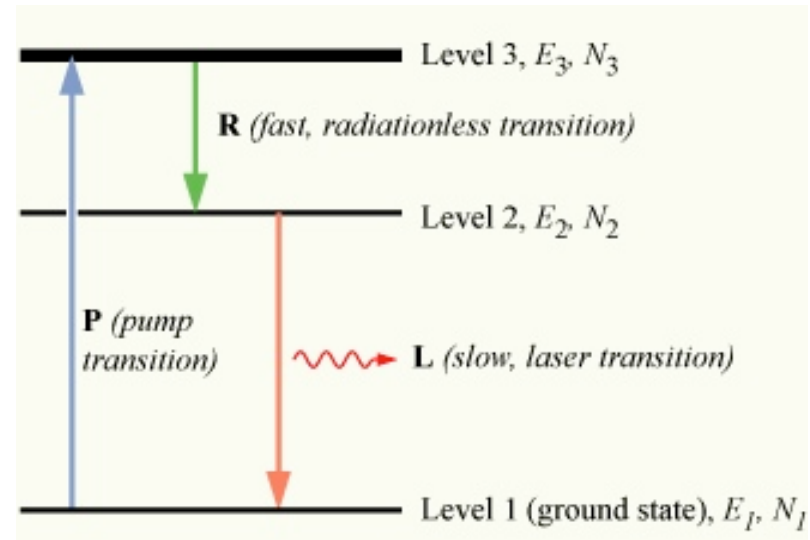
Medi actiu

(material on es produeix l'emissió estimulada)

Els electrons dels seus àtoms o molècules poden ocupar diferents nivells d'energia

$$E_1 \text{ (estat fonamental)} < E_2 < E_3 < \dots$$

Si s'il·lumina el medi actiu hi haurà absorció, doncs l'estat fonamental E_1 acostuma a estar més poblat que els excitats E_2, E_3, \dots



Perquè hi hagi emissió estimulada cal que hi hagi **inversió de població** (que la població del nivell excitat E_2 sigui més gran que la del E_1).

Per aconseguir la inversió de població, es fa un **bombeig**, que consisteix en, amb una font externa (una descàrrega elèctrica, un flaix de llum, un altre làser, una ddp), donar prou energia als electrons perquè pugin a un nivell $E_3 > E_2$.

El nivell E_3 és **poc estable** i els electrons es desexciten ràpidament passant al nivell E_2 que és **metastable**.

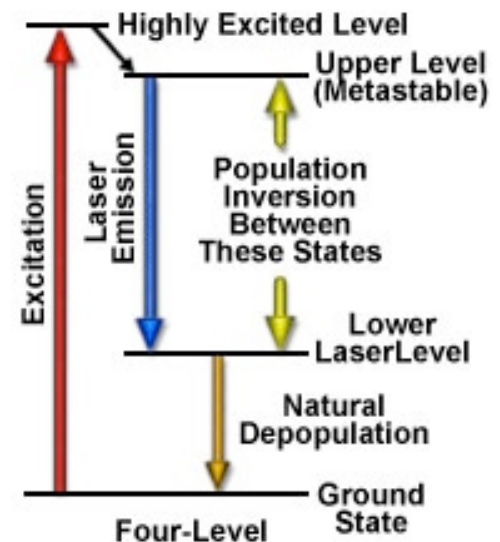
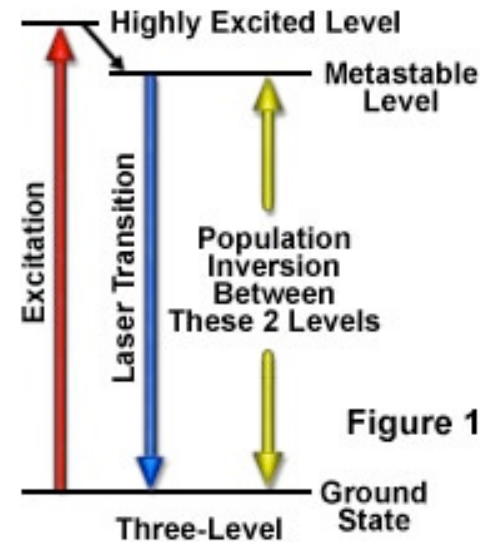
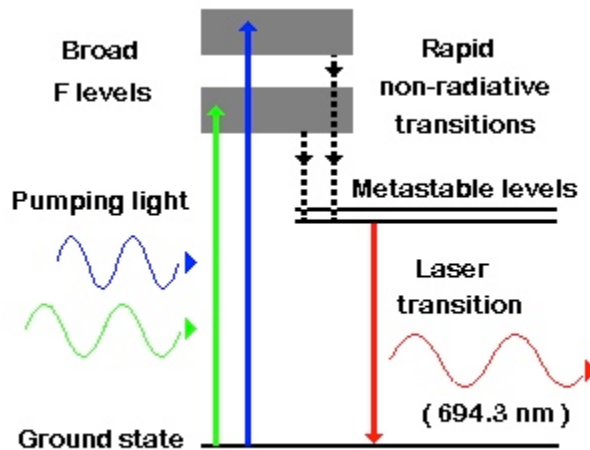
Els electrons estan al nivell E_2 prou temps perquè es produeixi la inversió de població i es pugui produir l'emissió estimulada.

- El primer làser, construït per Maiman el 1960, utilitzava com a medi actiu un cristall de robí dopat que tenia 3 nivells d'energia.

- Interactive Physics with Java: The Laser (S. Kiselev and T. Yanovsky-Kiselev)

(http://www.physics.uoguelph.ca/applets/Intro_physics/kisalev/java/laser/)

- En altres làsers, com el de Heli-Neó (He-Ne), hi ha 4 nivells d'energia, la qual cosa permet assolir més fàcilment la inversió de població.



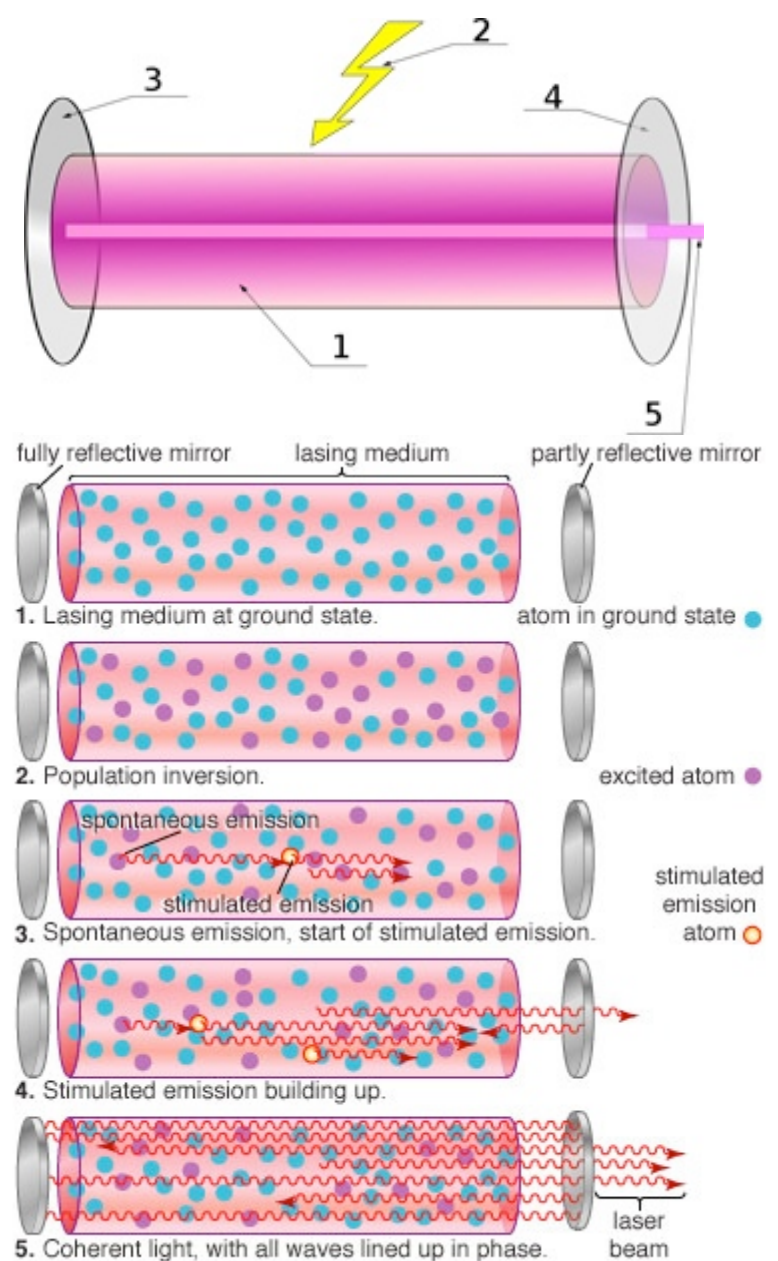
Cavitat ressonant (o interferòmetre)

La cavitat ressonant, acostuma a consistir en dos miralls als extrems del medi actiu (1):
(3) un perfectament reflector,
(4) un que deixa passar una part de llum,
la que surt del làser (4).

Sense miralls, el feix de llum que es genera només passaria un cop pel medi actiu.

Amb miralls, el feix es confina i està obligat a fer un camí d'anada i tornada entre els miralls de manera que a cada pas s'**amplifica** (amb **interferència constructiva**) cada vegada més gràcies a l'emissió estimulada.

Jugant amb la distància entre miralls i la seva reflectivitat, s'aconsegueix l'equilibri entre l'amplificació del feix i la pèrdua d'energia a través del mirall amb la llum útil que emet.



Resum del procés d'emissió làser

- 1.El **bombeig** (amb una descàrrega elèctrica, un flaix de llum, un altre làser, una diferència de potencial) excita electrons i crea la inversió de població: més electrons excitats que en estats de menor energia.
- 2.Els àtoms retornen a un estat inferior d'energia per **emissió espontània**, emetent fotons de qualsevol fase i en qualsevol direcció. La majoria d'aquests fotons es perden sense més efecte.
- 3.Alguns dels fotons emesos surten aleatòriament en la direcció de l'eix de la **cavitat ressonant** i queden confinats pels miralls, viatjant endavant i endarrere.
- 4.Els fotons confinats provoquen l'**emissió estimulada** de nous fotons en interaccionar amb el medi actiu (que segueix en inversió de població pel bombeig).
- 5.L'emissió estimulada assegura que els nous fotons seran idèntics (en freqüència, fase i direcció) a l'original.
- 6.Els nous fotons s'afegeixen al procés iniciat pels primers al pas 3.
- 7.La quantitat de fotons generada creix exponencialment fins que el ritme de creació s'equilibra amb les pèrdues de llum a través d'un dels miralls (la llum làser que surt de l'aparell i que podem aprofitar).
- 8.L'emissió espontània (aleatòria i en totes direccions) segueix tenint lloc, però és negligible comparada amb l'estimulada.

Alguns tipus de làser:

- **Gas:** El medi actiu és un gas com He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$) o Ar.
En el He-Ne el bombeig es fa per descàrrega elèctrica d'uns 1000 V.
S'utilitzen en d'espectacles, discoteques i laboratoris (de 1 a 100 mW).
- **Estat sòlid:** El medi actiu és un cristall dopat (com el de robí, ara poc utilitzat).
El bombeig es fa amb llum.
- **Semiconductors:** El medi és un díode (λ entre 375 i 1800 nm).
El bombeig es fa polaritzant directament al díode.
Molt habituals: DVD, punters làser, lectors codis barres, etc.
Poden ser de 10 kW i s'usen a la indústria per tallar i soldar.

Algunes aplicacions:

- Lectura i gravació en suports òptics digitals (CD, DVD, Làser Disc, etc.)
- Lectura de codis (de barres, matricials, etc.)
- Mesura de distàncies (telemetria) i velocitats
- Medicina (cirurgia, oftalmologia, dermatologia)
- Tractament de materials (tall, soldadura, etc.)
- Impressió làser
- Holografia
- Telecomunicacions per fibra òptica
- Transmissió entre satèl·lits

Energia i potència d'un làser

Energia d'un feix làser de N fotons \equiv $E = Nhf = Nhc/\lambda$ ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js)

Potència d'emissió d'un làser \equiv $P = \Delta E/\Delta t = nhf = nhc/\lambda$

$n = \Delta N/\Delta t \equiv$ fotons emesos per unitat de temps

Potència	Aplicacions	tipus
1-5 mW	Punters làser	Semiconductors
5-10 mW	DVD player	Semiconductors
250 mW	DVD burner	Semiconductors
1-20 W	Microtecnologia	Estat sòlid
30-100 W	Cirurgia	Gas (CO ₂)
100-3000 W	Tall de metalls	Gas (CO ₂)

