

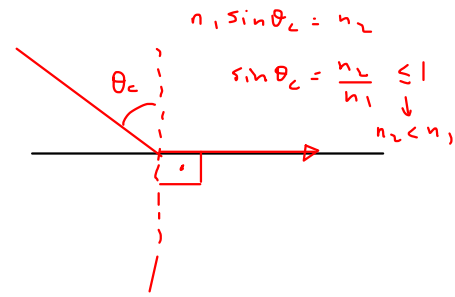
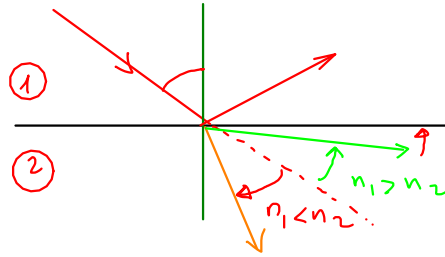
# ÒPTICA GEOMÈTRICA

\* Reflexió

\* Reflexió: 2 mitjans transparents  $n = \frac{c}{v}$

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

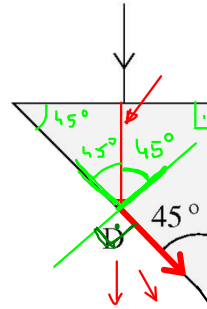
$\Rightarrow$  Reflexió total interna



25 Un feix de llum incideix perpendicularment sobre una de les cares d'un prisma de vidre com el de la figura. El valor mínim de l'índex de refracció del vidre necessari per tal que un observador no vegi llum emergent per la cara D del prisma és:

- a)  $n = 1.41$
- b)  $n = 1.33$
- c)  $n = 1.28$
- d)  $n = 1.54$

$$\theta_c = 45^\circ$$



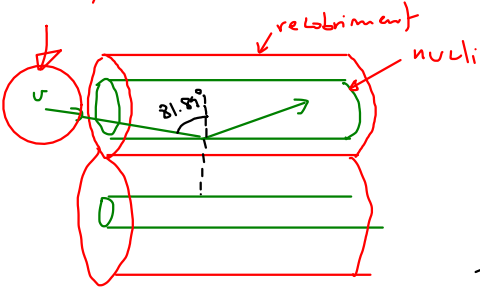
$$n_v \sin 45^\circ = 1 \cdot \sin 90^\circ$$

$$n_v = \frac{1}{\sin 45^\circ} = \sqrt{2} \approx 1.41$$

21. A les fibres òptiques és essencial que la llum que es propaga pel nucli es reflecteixi totalment en la separació nucli-recobriment. Suposem que tenim una fibra amb nucli de quars d'índex de refracció 1.46 i un recobriment d'índex 1.4454.

a) Calculeu l'angle crític per tal que es produeixi l'esmentada reflexió total interna.

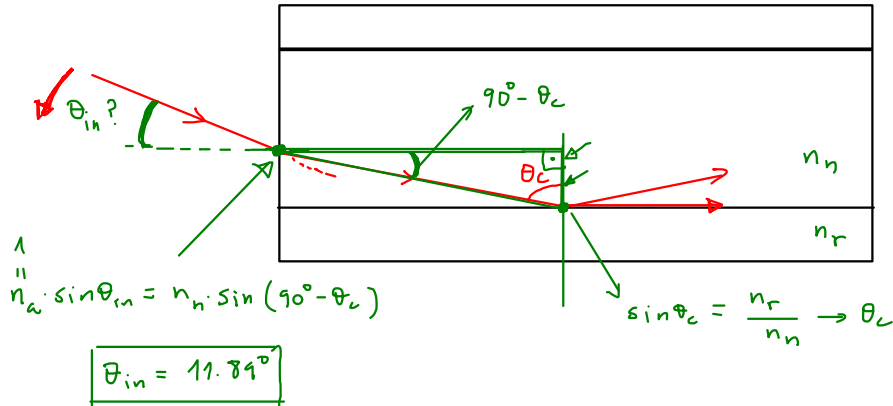
b) A l'entrada de la fibra, quin serà l'angle màxim que podrà formar un raig de llum amb l'eix de la fibra per tal que, un cop dins de la fibra, reboti totalment en les parets interiors?



$$n_r < n_n$$

a)  $\theta_c \rightarrow \sin \theta_c = \frac{n_r}{n_n} \rightarrow \theta_c = 81.89^\circ$

b)



22. Un cable de comunicacions rectilini de fibra òptica de 50 km està format per un nucli de quars amb un índex de refracció 1.46 i una capa envoltant de quars dopat amb  $B_2O_3$  d'índex 1.457.

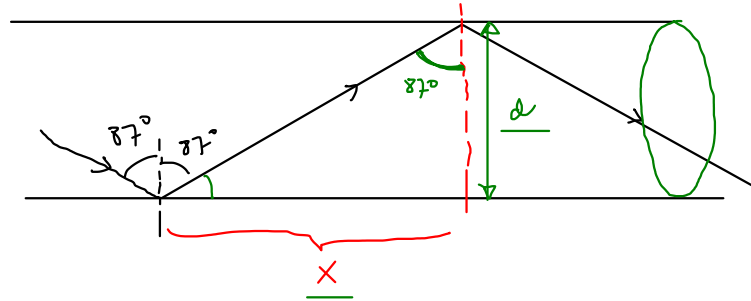
a) Quin és l'angle crític?

b) Si les reflexions totals internes es fan totes amb un angle de  $87^\circ$  i el diàmetre del nucli és de  $100 \mu m$ , quin és el nombre de reflexions que hi ha en el cable?

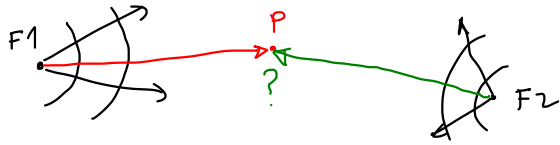
c)  $\theta_c = 86.33^\circ$

$$\tan 87^\circ = \frac{x}{d} \Rightarrow x = d \tan 87^\circ$$

$$N_{\text{refl}} = \frac{L}{x} = \frac{50 \text{ km}}{x} = 26 \cdot 10^6$$



→ Superposició de dues ones: monocromàtiques ( $\omega$ ), mateixa freqüència, mateixa amplitud

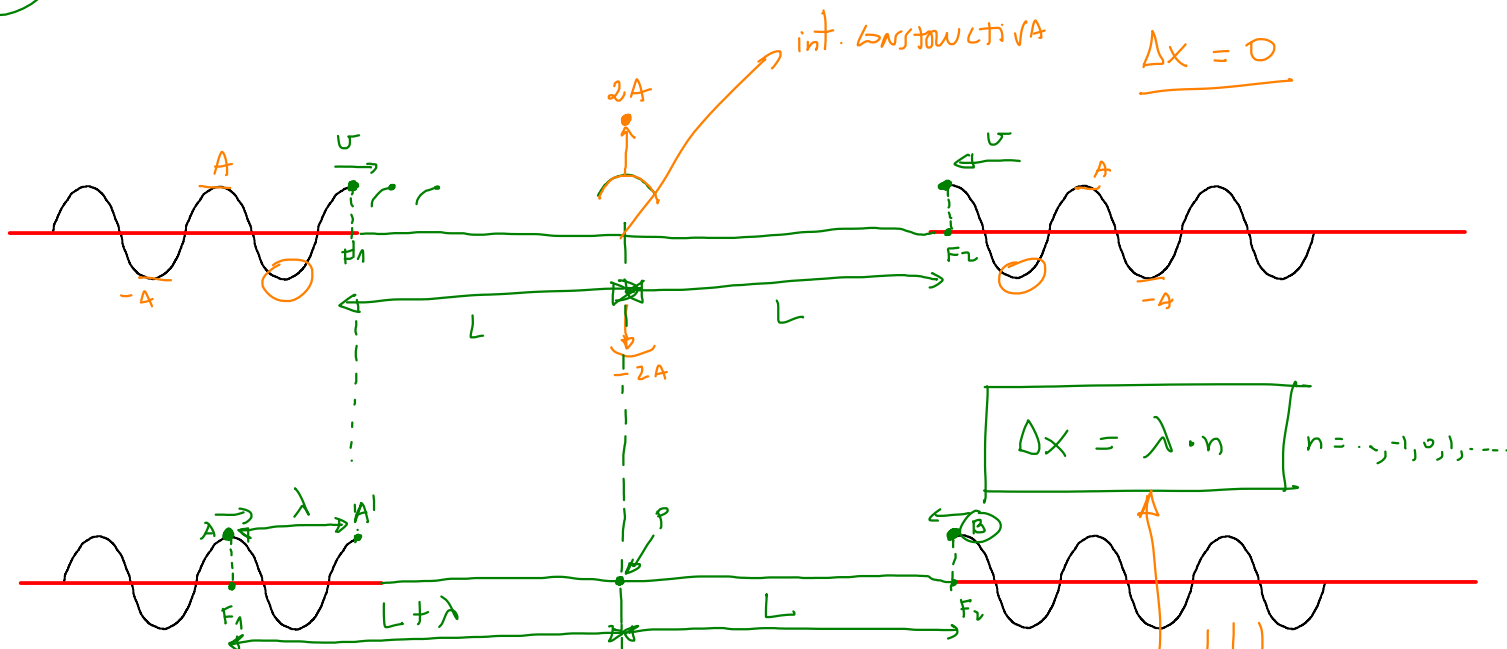


PRINCIPIS SUPERPOSICIÓ

$$y_P = y_1 + y_2$$

→ INTERF. CONSTRUCTIVA / DESTRUCTIVA

1-D

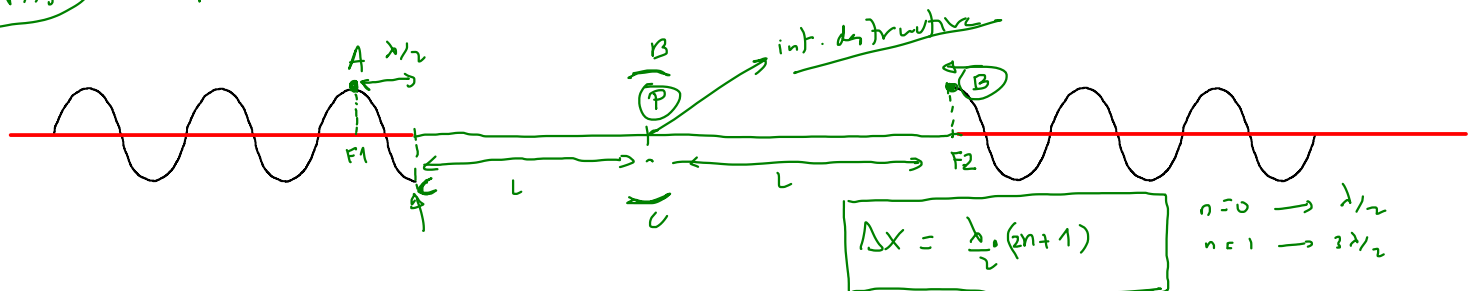


→ Fins aquí: fonts coherentes, amb la mateixa fase

→ OPOSICIÓ DE FASE

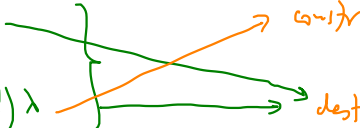



EN FASE → interferència destructiva



EMETENT EN FASE

OPPOSIT FASE

\* CONST.  $\Delta x = n \lambda$    $\rightarrow$  const.

\* DESTR.  $\Delta x = \left(\frac{2n+1}{2}\right) \lambda$    $\rightarrow$  destr.

23. Supposeu que tenim dues fonts coherents que emeten ones electromagnètiques en fase, amb el mateix vector amplitud (de mòdul  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ ) i amb una longitud d'ona de 1 m. Digueu quina serà l'amplitud de l'ona resultant en un punt que es troba a les següents distàncies de les fonts 1 i 2, respectivament:

a) 20 m i 21 m

b) 21 m i 21.5 m

$\Delta x = 21 - 20 = 1 \text{ m} = 1 \cdot \lambda$

$\downarrow$   
I. Constr.  $\Rightarrow 2 \cdot E_0 = 2 \frac{\text{V}}{\text{m}}$



b)  $21.5 - 20 = 1.5 = \frac{3}{2} \lambda$

$\downarrow$   
I. destr.  $\Rightarrow \emptyset \frac{\text{V}}{\text{m}}$

$\Delta x = \lambda \rightarrow$  I. constructiva

$\Delta x = \frac{3}{2} \lambda \rightarrow$  I. destructiva

24. Repetiu el problema anterior suposant ara que les fonts també són coherents però emeten en oposició de fase (diferència de fase de  $180^\circ$ )

T8) En una cubeta amb aigua tenim dos actuadors mecànics que vibren en fase, amb la mateixa freqüència i amplitud. Si  $d_1$  i  $d_2$  són les distàncies de les fonts (actuadors) a un punt P, quina de les afirmacions següents és certa?

- ⇒ a) Si  $d_2 - d_1 = 0$  al punt P hi ha interferència destructiva.
- ⇒ b) Si  $d_2 - d_1 = \lambda/2$  al punt P hi ha interferència constructiva.
- ⇒ c) Si  $d_2 - d_1 = 2\lambda$  al punt P hi ha interferència destructiva.
- d) Cap de les anteriors és certa.

T7) Els emissors d'ultrasons  $E_1$  i  $E_2$  de la figura emeten en fase ones de 40 kHz de freqüència.

Diem  $d_1$  i  $d_2$  a la distància de  $E_1$  i  $E_2$  al receptor  $R$ . Sabent que és  $d_1 = 5$  cm per quin dels següents valors de  $d_2$  (expressat en cm), es detectarà a  $R$  una interferència constructiva? (Velocitat de propagació del so a l'aire  $v = 340$  m/s)

$$d_2 - d_1 = n \cdot \lambda$$

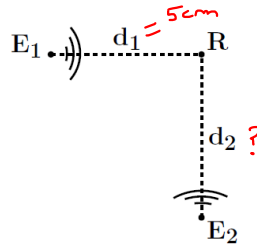
a) 5.425 cm      $0.425 \text{ cm} = \frac{\lambda}{2} = \Delta x$

b) 4.575 cm

c) 6.275 cm

⇒ d) 5.85 cm =  $d_2$

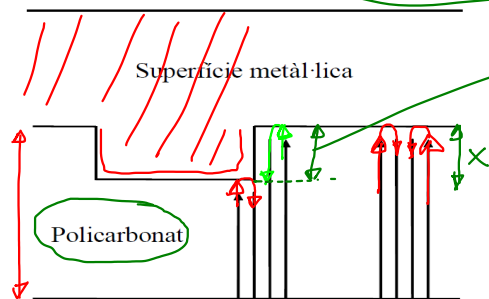
$$d_2 - d_1 = 0.85 \text{ cm} = \lambda$$



$$v = \lambda \cdot f$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{34000 \text{ cm/s}}{40 \cdot 10^3} = 0.85 \text{ cm}$$

26. La profunditat dels forats de la superfície metàl·lica d'un CD-ROM és de  $0.11 \mu\text{m} = x$ . Aquesta superfície es troba recoberta de policarbonat ( $n = 1.55$ ) de tal manera que quan la llum es reflecteix en una part plana hi ha interferència constructiva i quan ho fa en un esglaó hi ha interferència destructiva (vegeu la figura). Els dos estats de la llum reflectida s'interpreten com els dos bits. Quina ha de ser la freqüència del làser utilitzat per a la lectura?



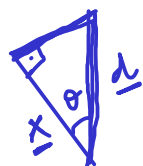
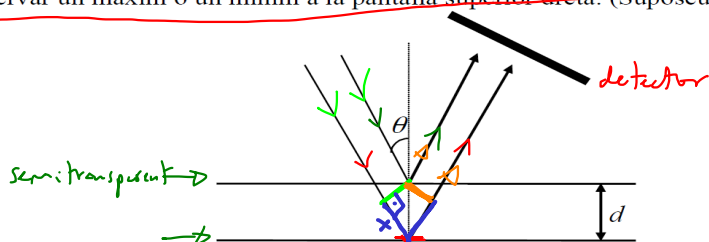
destructive  
 $\Delta = \frac{2n+1}{2} \lambda$

$2x \text{ alçada} = \Delta$

$2x = \frac{2n+1}{2} \lambda' = \frac{2n+1}{2} \frac{\lambda}{n} = \frac{2n+1}{2} \frac{c}{n \cdot f}$   
 $c = \lambda \cdot f$

$f = \frac{c}{4nx}$  (for  $n=0$ )  
 $f = \frac{c}{4nx} = 4.4 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$   
la mínima

25. La figura següent representa un interferòmetre format per dos miralls, el superior semitransparent (deixa passar una part de la llum que incideix sobre seu). Si la distància entre ells és  $d$  i l'angle d'incidència és  $\theta$ , trobeu quines són les condicions per tal d'observar un màxim o un mínim a la pantalla superior ~~deixa~~. (Suposeu ones planes).

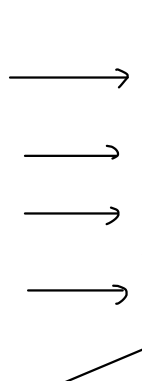
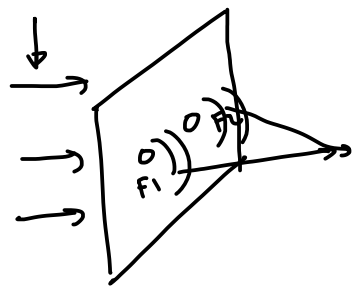


$\cos \theta = \frac{x}{d} \rightarrow x = d \cos \theta$

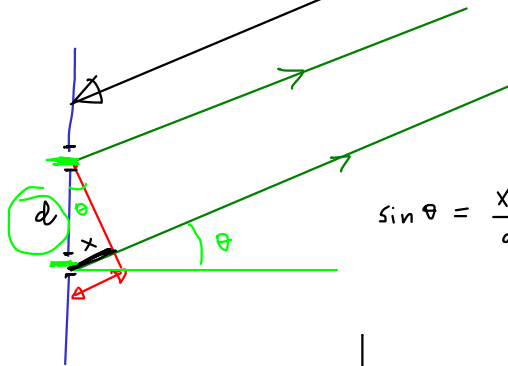
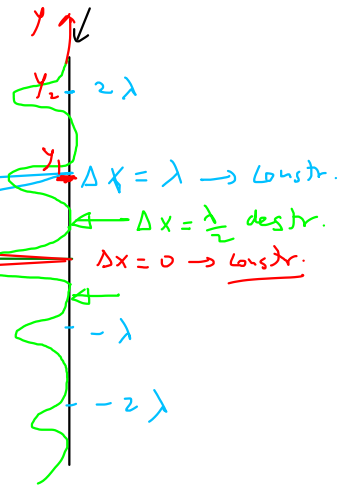


$\Delta = 2x = 2d \cos \theta = n \cdot \lambda$  (constructiva)

# DOBLE ESCLETXA

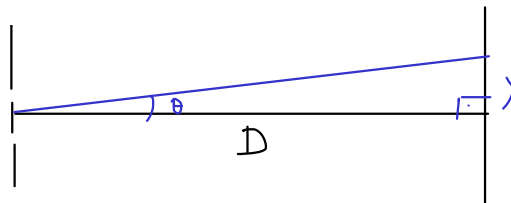


on constr. / destr.



expressé en fonction de y

$$\sin \theta = \frac{x}{d} \rightarrow x = d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$



$\theta$  must be petit

$$\tan \theta = \frac{y}{D} \approx \sin \theta$$

$$d \cdot \frac{y}{D} = n \cdot \lambda \Rightarrow$$

$$y = n \lambda \frac{D}{d}$$

$n = \dots, -1, 0, 1, \dots$

$n=0 \rightarrow$  maximum central

$n=1 \rightarrow$  1<sup>er</sup> maximum secondaire

$$y = \lambda \cdot \frac{D}{d}$$



23. Supposeu que tenim dues fonts coherents que emeten ones electromagnètiques en fase, amb el mateix vector amplitud (de mòdul  $E_0 = 1 \text{ V/m}$ ) i amb una longitud d'ona de  $1 \text{ m}$ . Digueu quina serà l'amplitud de l'ona resultant en un punt que es troba a les següents distàncies de les fonts 1 i 2, respectivament:

$$\frac{1}{2} = 0.5 \text{ m}$$

- a) 20 m i 21 m
- b) 21 m i 21.5 m
- c) 22 m i 22.25 m

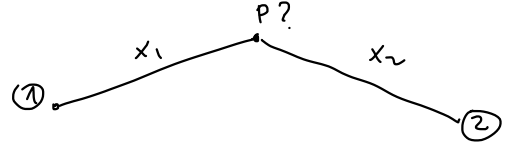
$$\rightarrow \Delta x = 22.25 - 22 = 0.25 \text{ m} = \lambda/4 !$$

(Considereu que les ones són planes i que, per tant, la seva amplitud no varia amb la distància. Considereu també que les dues ones es troben polaritzades en la mateixa direcció.)

$$y_1(x_1, t) = A \sin(kx_1 - \omega t + \varphi_1)$$

$$y_2(x_2, t) = A \sin(kx_2 - \omega t + \varphi_2)$$

$$y_p = y_1 + y_2$$



$$\sin(a) + \sin(b) = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y_p = A \cdot 2 \cos\left(k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(k \frac{x_1 + x_2}{2} - \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

NO depèn de t                      depèn de t  $[-1, 1]$

AMPLITUD!

$$A_T = 2A \cos\left(k \frac{x_1 - x_2}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)$$

si en fase  $\rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 \Rightarrow \varphi_1 - \varphi_2 = 0$   
i si  $\Delta x = n\lambda$

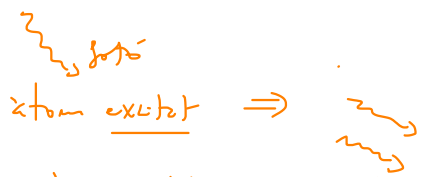

$$A_T = 2A \cos\left(k \frac{n\lambda}{2} + 0\right) =$$

$$= 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{n\lambda}{2}\right) = 2A \cos(n\pi) = \pm 2A$$

c)  $A_T = 2 \cdot E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{22 - 22.25}{2} + \phi\right) = \sqrt{2} \frac{\text{V}}{\text{m}}$

725

## ⇒ FUNCIONAMENT LÀSER

- \* EXISTEIX EMISSIÓ ESTIMULADA   $\Rightarrow$
- \* Treballs INVERSIÓ POBLACIÓ  $\rightarrow$  més àtoms excitats que no excitats
- \* Dins CAVITAT RESONANT  $\rightarrow$   LÀSER

en els darrers fulls us adjunto un resum preparat per en Manel Canales sobre el funcionament del làser, on també hi ha links amb animacions

#### 4.8 Làser (30')

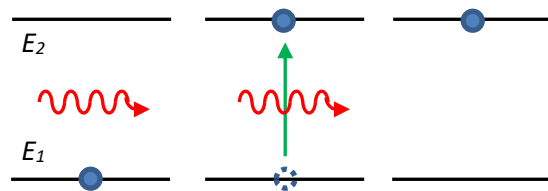
Els fenòmens **d'interferència** deixen clar que la llum és una **ona**. Per determinats fenòmens com, per exemple **l'efecte fotoelèctric**, cal adoptar, però, una descripció radicalment diferent que considera que la **llum** està formada per **partícules**, que anomenem **fotons**. L'energia de cada fotó d'un feix de llum de **frequència  $f$**  és:

$$E_{foto} = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

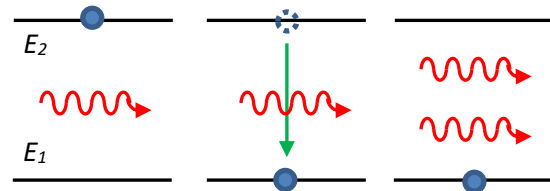
On  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J.s és la **constant de Planck**.

¿Com es crea la llum d'un làser? Per respondre cal estudiar els processos **d'absorció**, **emissió estimulada** i **emissió espontània** que poden aparèixer quan un feix de **llum** incideix sobre un **material** o aquest **emet espontàniament**.

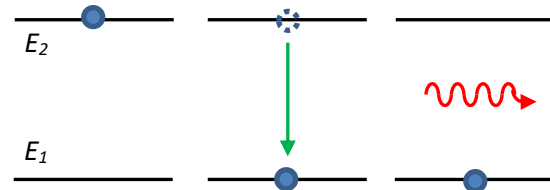
L'**absorció** consisteix en el procés pel que un **electró** d'un àtom o molècula que ocupa un nivell d'energia  $E_1$  **absorbeix un fotó augmentant la seva energia** i pujant per tant a un nivell d'energia superior  $E_2$ . Això només passa si **l'energia del fotó  $E_{fotó}$**  coincideix amb la **diferència entre els dos nivells  $\Delta E = E_2 - E_1$** .



L'**emissió estimulada** és el procés pel qual un **electró** d'un àtom o molècula en un **estat excitat  $E_2$**  és **estimulat per un fotó** incident i **cau a un estat de menor energia** (o l'estat fonamental)  $E_1$  **emetent un fotó de la mateixa energia, en la mateixa direcció i en fase amb el primer**. Per tant, **el fotó incident és amplificat**. Perquè es produeixi l'emissió estimulada cal **que l'energia dels dos fotons** (l'emès i el que estimula)  $E_{fotó}$  coincideixi amb la de la **diferència d'energia entre els dos nivells  $\Delta E = E_2 - E_1$** .



L'**emissió espontània** és el procés pel qual un **electró** d'un àtom o molècula en un **estat excitat  $E_2$**  **cau espontàniament a l'estat fonamental o a un estat de menor energia  $E_1$**  amb la consegüent **emissió d'un fotó** d'energia  $E_{fotó}$  igual a la **diferència d'energia entre els dos nivells  $\Delta E = E_2 - E_1$** .



Per qualsevol dels tres casos l'energia total  $E_{tot}$  i la potència  $P$  d'un feix de llum format per  $N$  fotons que incideix o és emès és:

$$E_{tot} = NE_{foto} = \frac{Nhc}{\lambda}$$

$$P = \frac{E_{tot}}{t} = nE_{foto} = n \frac{hc}{\lambda}$$

On  $n = N/t$  és el **nombre de fotons que per unitat de temps són emesos o absorbits**.

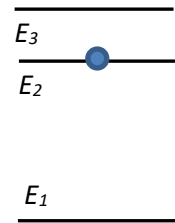
Un **làser** (acrònim de Light Amplification by Stimulated Emission Radiation) és un dispositiu que utilitza **l'emissió estimulada** per emetre un raig de **llum intens, coherent, col·limat** (feix estret) i **monocromàtic**.

Es basa en dos fenòmens físics:

1. **L'emissió estimulada** en un medi que anomenem **medi actiu**.
2. **Amplificació** en una cavitat ressonant.

El medi actiu està format per àtoms amb diferents nivells d'energia. Si  $E_1$  és l'energia del **nivell fonamental** i  $E_2$  la del **primer nivell excitat** i il·luminem el medi actiu hi haurà **absorció**, ja que generalment **l'estat fonamental està més poblat** que l'excitat. Com va demostrar Einstein el 1916, només **si la població del nivell excitat és més gran que la del fonamental, hi haurà emissió estimulada**.

Per aconseguir aquesta **inversió de població** es fa un **bombeig**, que consisteix en **proporcionar prou energia** als electrons del medi perquè pugin a un nivell d'energia  $E_3$  **superior a  $E_2$** , utilitzant una font externa (de llum o de corrent). El nivell  $E_3$  és **poc estable** i, per tant, els electrons es desexciten ràpidament i ocupen el nivell  $E_2$  **que és metaestable**. Els electrons estan en aquest estat el temps suficient com perquè hagi més electrons al nivell  $E_2$  que al nivell fonamental, que hi hagi inversió de població, i per tant hagi emissió estimulada.



El primer làser, construït per Theodore Maiman el 1960, utilitzava com a medi un cristall dopat de robí amb **3 nivells d'energia**. En d'altres casos, com el làser de gas de Heli-Neó, el medi té **4 nivells d'energia**. Per aquests sistemes la inversió de població s'assoleix més fàcilment.

A les adreces següents es mostra el procés d'emissió estimulada per sistemes amb 3 i 4 nivells

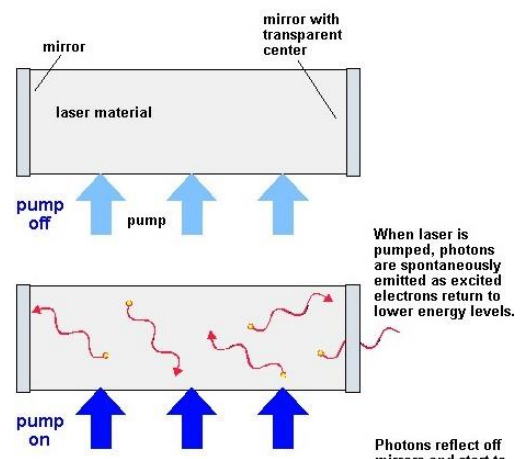
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/stimulatedemission/>

[https://www.youtube.com/watch?v=JOchLyNO\\_w](https://www.youtube.com/watch?v=JOchLyNO_w)

Per que hagi amplificació cal que la llum estigui **confinada en un cavitat** ressonant amb **una superfície totalment reflectora i l'altra parcialment** (per exemple el 85%) de manera que deixi passar una determinada quantitat de llum, que és la que el làser emet. Les dimensions de la cavitat estan dissenyades perquè en l'equilibri la quantitat de llum emesa sigui igual a la que es crea.

El funcionament del làser es resumeix en els següents 5 processos:

1. **S'inicia el bombeig** i es fa pujar electrons a nivells d'energia superiors al fonamental.
2. Els àtoms es **des-exciten per emissió espontània, emeten fotons** amb diferents fases i direccions. La majoria d'aquests fotons es perden.
3. **Alguns electrons emesos es mouen en la direcció de l'eix de la cavitat** ressonant, i



quedaran confinats dins ella, anant davant i darrere. Com el bombeig sempre hi és, en aquests trajectes els fotons interactuen amb els àtoms del medi actiu i provoquen **emissió estimulada**. Aquests nous fotons són idèntics en freqüència, fase i direcció als originals, i es crea una reacció en cadena.

4. El nombre de fotons creix exponencialment fins que s'arriba a un equilibri dinàmic. El **ritme de creació de fotons es compensa amb de sortida** per la cavitat, que constitueix el feix làser.
5. Durant tot el procés també hi ha **emissió espontània**, però és **negligible** comparada amb l'estimulada.

D'entre els diferents **tipus de làsers** podem destacar els de:

1. **Gas**: el medi actiu és un gas com He-Ne, d'Ar, CO<sub>2</sub>. Pel cas del He-Ne el bombeig es fa per descàrrega elèctrica.
2. **Estat sòlid**: el medi actiu és un cristall dopat (com el de robí de Maiman del 1960). El bombeig es fa amb llum.
3. **Semiconductors**: el medi és un díode, i els nivells són les bandes de valència i de conducció de la unió pn. El bombeig es fa aplicant una tensió de polarització directa al díode. Són els més abundants: DVD, punters làser, codis de barres.

Alguns exemples de làsers comercials

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 <sub>2</sub> )
100-3000 W	Tall de metalls	Gas (CO <sub>2</sub> )

A les següents adreces hi ha simulacions Java de làsers. Destaca sobretot la primera:

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/lasers>

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/heliumneonlaser/index.html>

