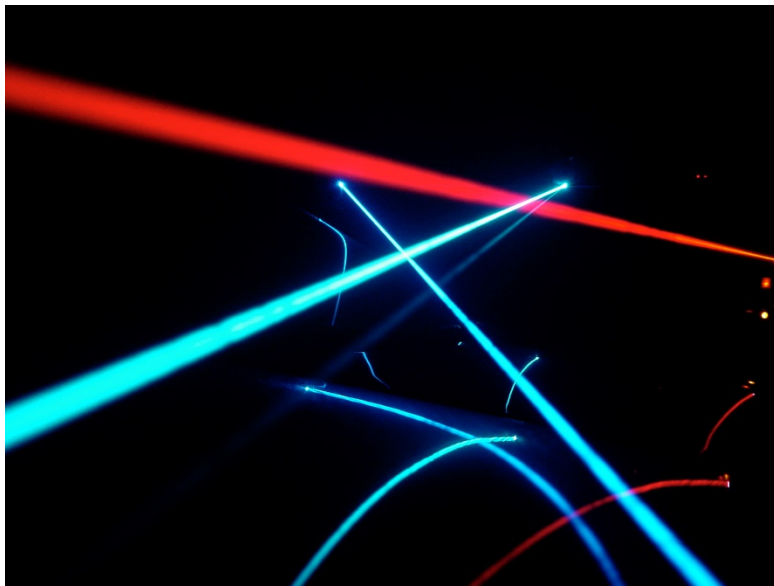


Treball de Recerca

EL LÀSER, UNA REVOLUCIÓ DEL SEGLE XX?



Pseudònim: "NAMOR"

Agraïments

Vull expressar el meu agraïment a la meva tutora del Treball de Recerca, per haver fet possible la realització d'aquest treball.

També agraeixo a l'ICFO i, especialment a la Míriam Martí Pallarès i al Vahagn Mkhitryan, per donar-me l'oportunitat de poder haver visitat les instal·lacions de l'ICFO i haver-me ajudat i proporcionat fonts d'informació en la realització del meu projecte.

Per últim, vull donar les gracies a totes les persones que m'han estat al costat durant la realització d'aquest treball: a la família i als amics.

Índex

1. Introducció i motivació	3
2. Presentació i objectius.....	4
3. La mecànica quàntica i les ones electromagnètiques.....	5
3.1. Què és la llum?	5
3.2. Ones electromagnètiques	7
3.3. Mecànica quàntica	9
4. Estructura i funcionament del làser.....	12
4.1. Model atòmic de Bohr	12
4.2. Absorció i emissió espontània	13
4.3. Làser: Emissió estimulada i amplificació de la llum.....	13
4.4. Equilibri tèrmic i inversió de la població	14
4.5. Bombeig i làsers de diferents nivells	15
5. Parts del làser	18
5.1. Medi actiu.....	18
5.2. Sistema de bombeig.....	18
5.3. Cavitat òptica o ressonador òptic.....	21
6. Propietats de la llum làser	26
6.1. Monocromaticitat.....	26
6.2. Coherència	26
6.3. Direccionalitat.....	27
7. Tipus de làsers.....	28
7.1. Làsers de gas.....	28
7.2. Làsers d'estat sòlid	34
7.2.1. Làsers de materials dopats amb metalls de transició	34
7.2.2. Làsers de materials dopats amb terres rares.....	36
7.3. Làsers de Díode	37

7.4.	Làser de Colorant (Líquid)	39
7.5.	Altres làsers	39
7.6.	Altres classificacions	41
8.	Història dels làsers	43
8.1.	Història fins al làser (1916 – 1960)	43
8.2.	El làser en la història (1960 – Actualitat)	45
9.	Aplicacions dels làsers	47
9.1.	Aplicacions Industrials	47
9.2.	Aplicacions Mèdiques	48
9.3.	Aplicacions en les Comunicacions	49
9.4.	Aplicacions Militars	54
9.5.	Aplicacions Quotidianes	54
9.6.	Aplicacions en la Investigació Científica	58
9.7.	Altres Aplicacions	59
10.	Experimentació de les propietats de la llum amb làsers.....	60
10.1.	Pràctica I: Monocromaticitat	60
10.2.	Pràctica II: Quantificació de la reflexió interna total.....	61
10.3.	Pràctica III: Experiment de la doble escletxa	62
11.	Conclusions	64
12.	Fonts d'informació	65
	Bibliografia.....	65
	Webgrafia	65

1. Introducció i motivació

Des de ben petit sempre he estat molt curiós, sempre he volgut saber el perquè de les coses, de què estan fetes, com funcionen. A mesura que he anat creixent, la meva curiositat també ho ha fet i m'he anat apassionant cada cop més per les ciències, en especial, la física, ja que en ella s'estudia des de les partícules més petites que formen els àtoms fins a les enormes galàxies que formen l'univers en què vivim.

Aquesta inquietud, moltes vegades em feia plantejar preguntes que no podia respondre a classe, i investigava a través d'Internet i llegint llibres. Amb l'arribada del Treball de Recerca vaig veure una oportunitat per poder fer una recerca que respongués alguna d'aquestes preguntes que em feia.

Tenia ben clar que volia fer-lo de física. Se'm van ocórrer molts temes diferents. Volia que fos un tema de futur, i també relacionat amb la llum. La llum sempre ha intrigat al llarg de la història als científics. Des dels filòsofs grecs fins a l'actualitat, passant per científics com Newton o Einstein, els científics han intentat explicar de què està formada la llum. Fins i tot avui en dia, es considera la llum com una ona i a la vegada com una partícula (dualitat ona-corpúscle).

Així que finalment vaig decidir realitzar el meu treball sobre els làsers, ja que em permet estudiar la llum i a més a més altres temes com la mecànica quàntica, l'electrònica... Un altre motiu important ha estat el fet de poder visitar les instal·lacions de l'ICFO (Institut de Ciències Fotòniques), un dels centres d'investigació en fotònica més importants de tota Europa.

També, m'ha motivat el fet que els làsers, a diferència del que molta gent pensa, és un descobriment que ha tingut molta repercussió en les nostres vides. Ha permès innovar en molts camps de la ciència com, per exemple, les comunicacions, la medicina, etc.

Però tot això només és la punta de l'iceberg, el làser té molt de futur i en general la fotònica. Per exemple, l'any que ve, el 2015, serà "l'Any Internacional de la Llum i les Tecnologies Basades en la Llum" tal i com ha proclamat l'Assemblea General de l'ONU amb l'objectiu de destacar la importància d'aquestes tecnologies.

Molta gent diu que la fotònica és en el segle XXI el que va ser l'electrònica en el segle XX.

2. Presentació i objectius

El meu treball de recerca es titula “El làser, una revolució del segle XX?” i amb ell pretenc estudiar el làser, dispositiu que emet llum gràcies a uns fenòmens de la mecànica quàntica i inventat l’any 1960 per Theodore Maiman als Estats Units, i veure si és cert que ha estat una revolució que ha canviat les nostres vides. Els principals objectius d’aquest treball són:

- Estudiar el funcionament i l’estructura del làser.
- Conèixer i analitzar les seves propietats i les propietats de la llum experimentalment.
- Donar a conèixer el làser i la seva història al llarg dels anys.
- Veure els diferents tipus de làsers que existeixen.
- Investigar les seves aplicacions en els diversos camps en els que s’utilitza actualment.

La pregunta doncs, que pretenc respondre amb aquest treball és: Ha estat el làser una revolució important del segle XX?

3. La mecànica quàntica i les ones electromagnètiques

L'òptica és la branca de la física que estudia l'emissió i l'absorció de la llum així com la seva propagació en els diferents medis. El làser és un dispositiu que emet llum. Per entendre'l bé, primer s'ha d'entendre què és la llum.

3.1. Què és la llum?

La llum és la part de l'espectre electromagnètic visible per l'ull humà, però quan diem llum, a física, ens referim a tot l'espectre electromagnètic, és a dir, a totes les formes de radiacions electromagnètiques visibles o no.

Des del principi, els científics s'han preguntat de què estava composta la llum. Al llarg de la història hi ha hagut diverses teories: des de les teories filosòfiques gregues fins a l'actualitat. Actualment, es considera que la llum es comporta com a partícula quan interactua amb la matèria (fotó) i com a ona quan es propaga (ona electromagnètica), però hi ha hagut un llarg camí fins arribar a dir això.

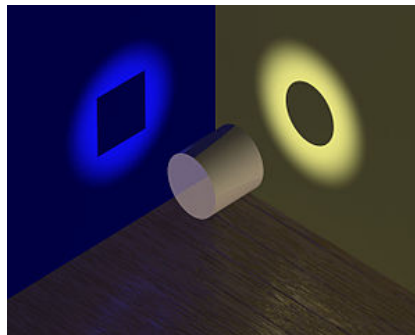


Figura 1: Imatge il·lustrativa de la dualitat ona-partícula, en el qual es pot veure com un mateix fenomen pot tenir dues percepcions diferents

Principalment, hi havia científics que defensaven que la llum estava formada per partícules, com per exemple Isaac Newton (Anglaterra 1643 – 1727), i d'altres que deien que eren ones, com per exemple Christiaan Huygens (Holanda 1629 – 1695).



Figura 2: Christiaan Huygens



Figura 3: "Traité de la lumière", obra de Huygens on explica la teoria ondulatoria de la llum

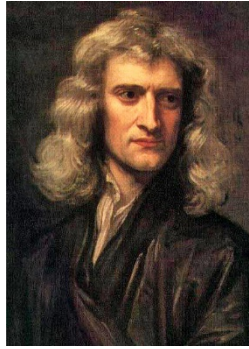


Figura 4: Isaac Newton

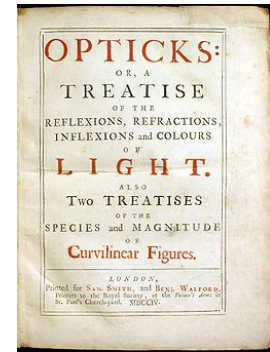


Figura 5: "Opticks", obra de Newton on explica la naturalesa de la llum

Durant aquella època, la teoria corpuscular de la llum va ser més acceptada, principalment a la gran reputació que tenia Newton. Però l'any 1801, el físic Thomas Young (Anglaterra 1773 – 1829) va demostrar la teoria ondulatoria de la llum mitjançant el famós experiment de la doble esclatxa o també conegut com l'experiment de Young.

Aquest experiment consistia en fer travessar un feix de llum a través de dues ranures i veure la imatge. El resultat va ser un patró de interferències típic de les ones, ja que la llum al passar per les esclatxes es difracta i es produeixen interferències, fenomen on dues o més ones es superposen per a formar una de resultant, de major o menor amplitud. En el punt on hi ha dues crestes o valls, es sumen les amplituds (interferència constructiva) i d'altra banda, si coincideix una vall i una cresta d'igual amplitud s'anul·len (interferència destructiva).



Figura 6: Thomas Young

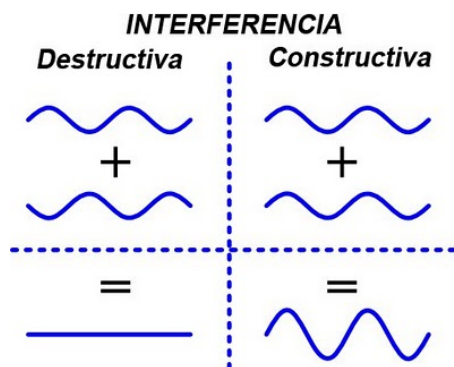


Figura 7: Esquema d'interferències

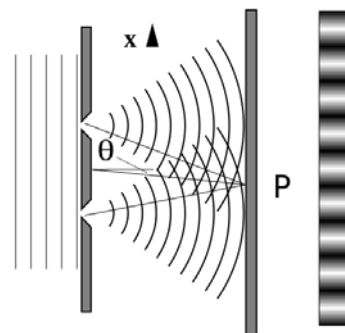


Figura 8: Esquema de l'experiment de la doble esclatxa

Aquest experiment avui en dia, també es pot realitzar amb partícules subatòmiques, com per exemple electrons, obtenint els mateixos resultats demostrant la dualitat ona-corpúscle de la mecànica quàntica.

3.2. Ones electromagnètiques

Amb l'experiment de Young, es tenia la certesa que la llum eren ones. Però, quin tipus d'ones? La resposta arribà amb James Clerk Maxwell, físic i matemàtic escocès (1831 – 1879) que amb les equacions de Maxwell (equacions que descriuen completament els fenòmens electromagnètics descoberts durant aquella època) va predir l'existència d'ones electromagnètiques que es propaguen en el buit, és a dir, no necessiten d'un medi per a propagar-se i ho fan amb velocitat constant. Aquesta velocitat de propagació d'aquestes ones electromagnètiques calculada a partir de la permeabilitat elèctrica i la permeabilitat magnètica coincidia amb la velocitat de la llum en el buit calculada experimentalment (aproximadament $c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Aquest fet va portar a teoritzar que la llum havia de ser una d'aquestes ones electromagnètiques.

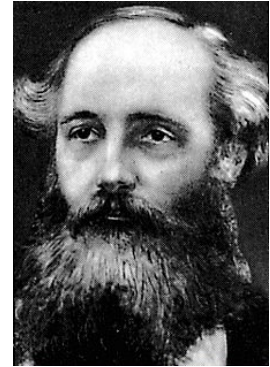


Figura 9: Clerk Maxwell

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

Equacions de Maxwell:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \text{ (Llei de Gauss per al camp elèctric)}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \text{ (Llei de Gauss per al camp magnètic)}$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ (Llei de Faraday)}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} \text{ (Llei d'Ampère)}$$

Posteriorment, pocs anys després de la mort de Maxwell, el físic alemany Heinrich Hertz (1857 – 1894) descobrí la forma de produir i detectar les ones electromagnètiques predites per Maxwell. En honor seu es dóna el nom de la unitat de freqüència en fenòmens periòdics, l'hertz (Hz).



Figura 10: Heinrich Hertz

Així doncs, gràcies a Maxwell i Hertz entre d'altres, en el segle XIX s'aconseguí unificar l'electricitat, el magnetisme i l'òptica.

Concepte i propietats de les ones electromagnètiques:

Per tant, *una ona electromagnètica* es defineix com un tipus de camp electromagnètic variable, una combinació de camps elèctrics i magnètics oscil·lants perpendiculars entre sí, que es propaguen a través de l'espai transportant energia d'un lloc a un altre i ho fan en línia recta i a velocitat constant, c .

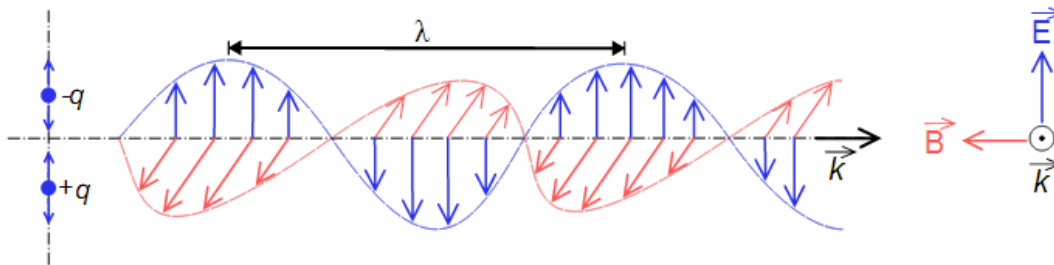


Figura 11: Esquema d'una ona electromagnètica

Es caracteritza per:

- **Longitud d'ona (λ):** distància entre dos punts consecutius d'una ona que es troben en el mateix estat d'oscil·lació. En el cas de la llum visible determina el seu color.
- **Període (T):** temps que tarda una ona a recórrer una longitud d'ona.
- **Freqüència (ν):** nombre d'oscil·lacions per unitat de temps.
- **Velocitat de propagació (c):** quocient entre la longitud d'ona i el període.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$$

Com que la velocitat de propagació és igual en totes les ones, podem ordenar-les segons les diferents longituds d'ona o freqüències. És el que es coneix com a espectre electromagnètic. La llum visible per l'ull humà va aproximadament dels 380 nm (violeta) als 780 nm (vermell).

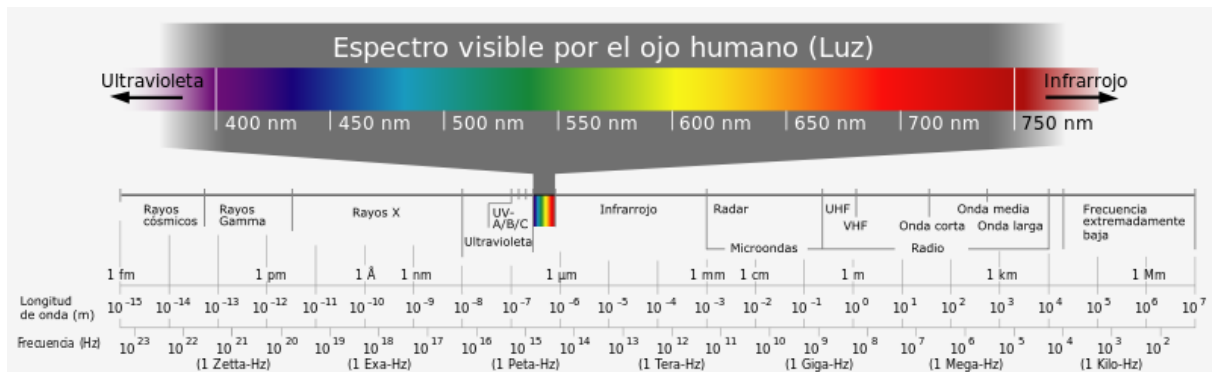


Figura 12: Espectre electromagnètic

3.3. Mecànica quàntica

Les ones electromagnètiques semblaven explicar completament el fenomen de la llum. Explicava tots els fenòmens de la seva propagació com ara la reflexió, la refracció, la polarització o la difracció.

Però hi havia alguns fenòmens que no tenien explicació. El primer va ser la radiació electromagnètica emesa per sòlids, que consisteix en a l'escalfar prou alguns sòlids i líquids poden arribar a emetre llum. La radiació emesa en funció de la temperatura calculada experimentalment no coincidia amb la prevista segons la mecànica clàssica. Un altre fenomen sense explicació, a partir de la teoria ondulatoria de la llum, era l'efecte fotoelèctric (observat pel físic alemany Hertz) que consisteix en l'emissió d'electrons d'un material quan es fa incidir sobre ell certa radiació electromagnètica. Aquest problema va ser resolt per Albert Einstein (Alemanya 1879 – 1955), amb l'explicació donada per la teoria quàntica.

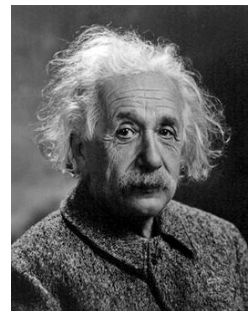


Figura 13: Albert Einstein

$$h\nu = W_0 + K$$

*Wo és la funció de treball o treball d'extracció (l'energia mínima necessària per arrencar un electró d'un sòlid)
K és l'energia cinètica de l'electró arrencat
hν és l'energia lumínica incident.*

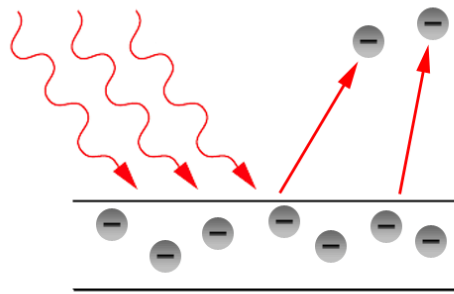


Figura 14: Esquema efecte fotoelèctric

La teoria quàntica permet explicar aquests fenòmens. Va ser iniciada al 1900 pel físic alemany Max Planck. Aquesta teoria considera que la matèria emet o absorbeix energia radiant de forma discontinua en forma de paquets o quants d'energia, anomenats fotons.

La radiació electromagnètica transporta la seva energia en forma de fotons. L'energia d'un fotó es directament proporcional a la seva freqüència.



Figura 15: Max Planck

$$\varepsilon = h\nu$$

h és la constant de Planck

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

$$E = n\varepsilon = nh\nu = \frac{nhc}{\lambda}$$

Quantitat d'energia total transportada per una radiació monocromàtica constituïda per molts fotons

Aquesta teoria també explicava la radiació electromagnètica emesa i absorbida pels gasos, que a diferència de l'espectre produït per un sòlid o un líquid, una substància que es troba en estat gasós, per exemple, la descàrrega elèctrica a baixa pressió o una substància volatilitzada en una flama, l'espectre que s'observa no és continu, sinó discontinu. Podem distingir-los en:

- **Espectre d'emissió:** conjunt de freqüències d'ones electromagnètiques emeses pels àtoms de l'element quan se li comunica energia.
- **Espectre d'absorció:** mostra la fracció de radiació electromagnètica incident que absorbeix un material. S'obté quan la llum blanca passa a través d'un gas a baixa pressió.

Els espectres d'emissió i d'absorció d'una substància són complementaris. Cada element té un espectre diferent, com si fos la seva empremta dactilar.

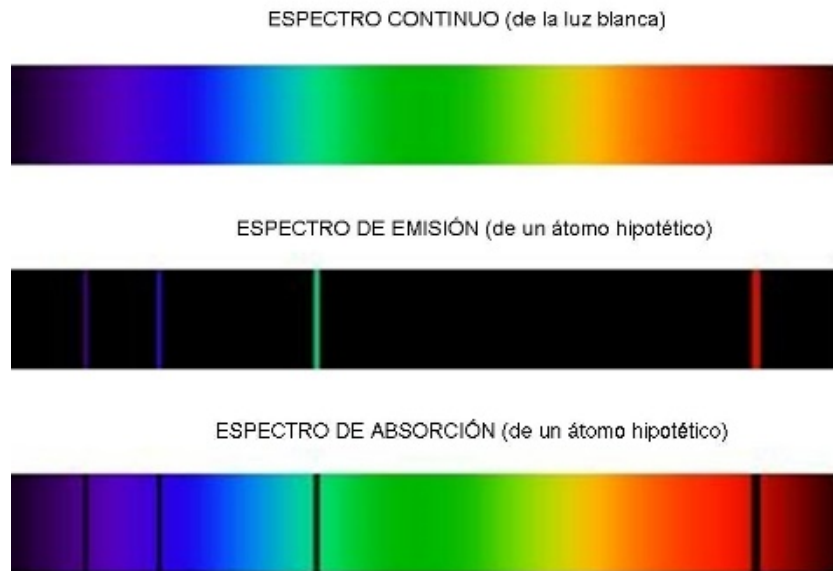


Figura 16: Espectres d'un àtom hipotètic en estat gasós

4. Estructura i funcionament del làser

El làser és un dispositiu que emet llum gràcies a un procés quàntic anomenat emissió estimulada de radiació electromagnètica, tal i com indica el seu acrònim en anglès: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificació de llum per emissió estimulada de radiació). Veiem primer aquests dos fenòmens.

4.1. Model atòmic de Bohr

Per estudiar el làser, ens és suficient el model atòmic de Niels Bohr (Dinamarca 1885 – 1962), un model senzill per entendre l'àtom basat en la teoria quàntica (encara que en realitat només és vàlid per àtoms monoelèctrics). Segons aquest model podem dir que l'àtom està format per un nucli massís amb càrrega positiva, on es troben els protons i neutrons, i els electrons amb càrrega negativa que giren al seu voltant i que només ho poden fer en uns orbitals (nivells energètics o quàntics principals) concrets (on el seu radi compleixi que el moment angular de l'electró sigui múltiple enter de $\hbar = h/2\pi$), i ho fan sense

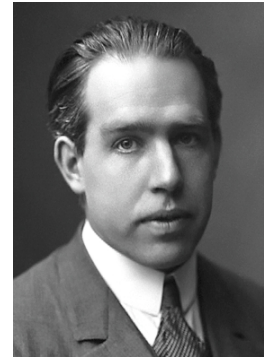


Figura 17: Niels Bohr

emetre radiació, contradient les idees electromagnètiques clàssiques. Així doncs, l'energia de l'electró que es mou en un mateix nivell energètic és constant, es diu que es troba en estat estacionari i la seva energia és la suma de la seva energia cinètica (partícula en moviment) i la seva energia potencial elèctrica (càrrega negativa dins un camp elèctric positiu creat pel nucli).

A cada nivell energètic principal li correspon un nombre natural anomenat nombre quàntic principal. El nivell més pròxim al nucli és el $n=1$, al qual li correspon l'energia menor.

Quan l'electró es troba en l'estat d'energia més baix, es diu que està en *estat fonamental* (l'àtom és estable). Els altres estats s'anomenen *estats excitats*.

Quan un àtom s'ionitza diem que ha estat excitat al nivell quàntic $n=\infty$.



Figura 18: Diagrama del model de Bohr

Els electrons poden saltar d'un nivell a un altre, és el fenomen anomenat *transició electrònica*.

4.2. Absorció i emissió espontània

Si l'àtom absorbeix energia, és a dir, un fotó, l'electró passarà d'un nivell a un altre més energètic (*absorció*). L'energia d'aquest fotó haurà de ser la diferència d'energies entre els dos nivells quàntics, ja que si no és així la llum travessa el material sense ser absorbida. Es pot escriure com:

$$E_{final} - E_{inicial} = \Delta E = \varepsilon = h\nu$$

Si per el contrari, un electró es troba en un nivell excitat, aquest és inestable i, tard o d'hora, caurà a un nivell menys energètic, emetent un fotó. És el que es coneix com a *emissió espontània*.

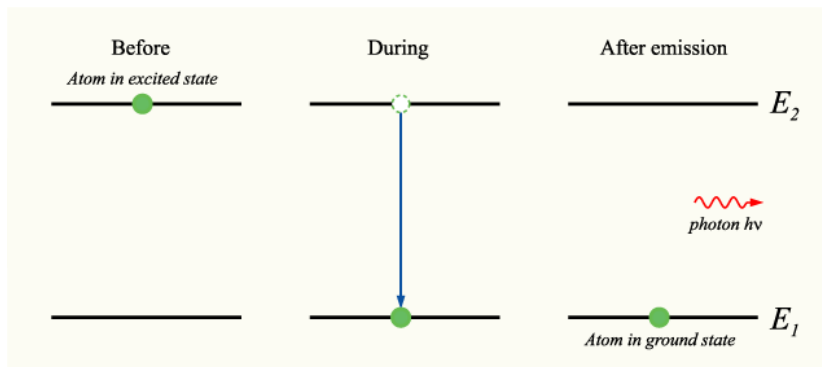


Figura 19: Diagrama de l'emissió espontània d'un fotó

4.3. Làser: Emissió estimulada i amplificació de la llum

L'absorció i l'emissió espontània es produeixen de forma natural per sí soles. L'home ha creat un fenomen anomenat emissió estimulada. Consisteix en la interacció entre un fotó i un àtom inicialment excitat. Això provoca que l'àtom decaigui a l'estat fonamental, emetent un fotó idèntic a l'inicial, obtenint en total dos fotons amb les mateixes característiques a partir d'un.

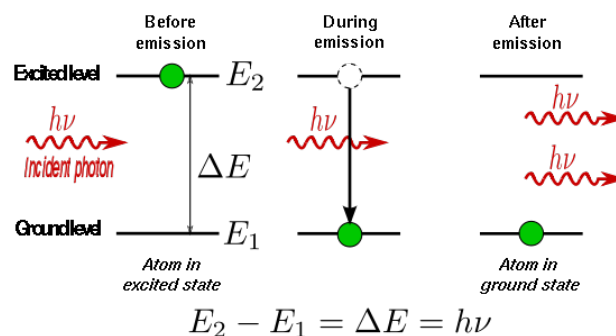


Figura 20: Diagrama de l'emissió estimulada d'un fotó

Gràcies a l'emissió estimulada, el número de fotons del medi augmentarà, cosa que farà estimular a altres àtoms excitats del medi, produint-se un allau d'emissions de fotons. És el que es coneix com *amplificació de la llum*.

4.4. Equilibri tèrmic i inversió de la població

Segons la estadística de Maxwell-Boltzmann, hi ha una relació entre el nombre de població d'un nivell d'energia específic i la temperatura.

$$N_i = A \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

- N_i = Nombre de població = nombre d'àtoms per unitat de volum en cert nivell i.
- A = Constant de proporcionalitat de certa població.
- E_i = Energia del nivell i ($E_i > E_{i-1}$).
- k = Constant de Boltzmann ($k=1,3806504 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$).
- T = Temperatura (en kelvin)

Segons aquesta equació, a major temperatura, major nombre de població; i a major nivell d'energia, menor nombre de població. Podem calcular la població relativa (N_2/N_1) entre dos nivells d'energia: E_2 i E_1 :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{A \cdot e^{-\frac{E_2}{kT}}}{A \cdot e^{-\frac{E_1}{kT}}} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}}$$

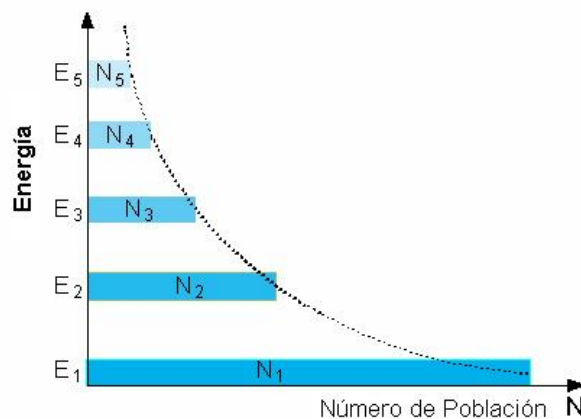


Figura 21: Gràfica de l'energia d'un nivell i el número de població d'aquest

Observem que, en equilibri termodinàmic, hi ha més electrons com més baix és el nivell d'energia (per naturalesa un sistema tendeix a trobar-se en el menor estat d'energia possible). Per tant es produirà absorció.

Per tal que es produeixi una emissió estimulada, és necessari que hi hagi una inversió de població, és a dir, que hi hagi més àtoms excitats (en un nivell més energètic) que àtoms de menor energia, al contraria del que tenim en una població normal (equilibri tèrmic).

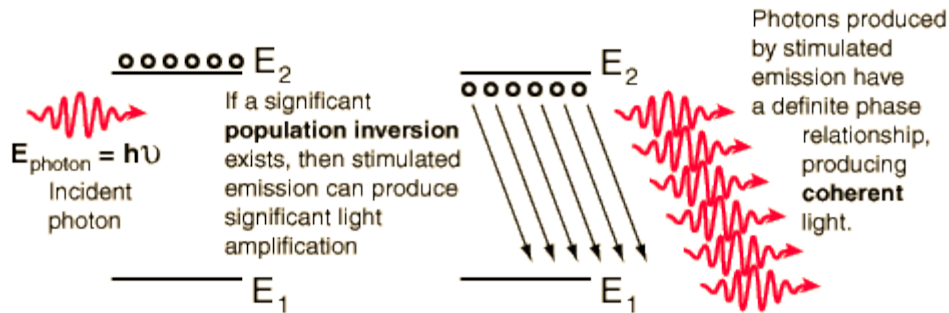


Figura 22: Diagrama de la inversió de població

4.5. Bombeig i làsers de diferents nivells

La inversió de població s'aconsegueix subministrant energia al sistema. Tanmateix, aquesta inversió de població acabaria desapareixent per si sola, ja que a mesura que els àtoms van emetent radiació, el nombre d'àtoms en estat fonamental augmenta i els excitats disminueix, i començaria a absorbir en lloc d'emetre. Així que es necessari un mecanisme que exciti els àtoms per aconseguir i mantenir aquesta inversió de població al llarg del temps. Aquest mecanisme es coneix com a bombeig. Més endavant, veurem quins tipus hi ha.

D'altra banda, fins ara només hem considerat dos nivells de energia: el fonamental i l'excitat. Però, normalment es sol utilitzar tres o quatre nivells d'energia per a facilitar la inversió de població i augmentar el rendiment.

Làser de quatre nivells:

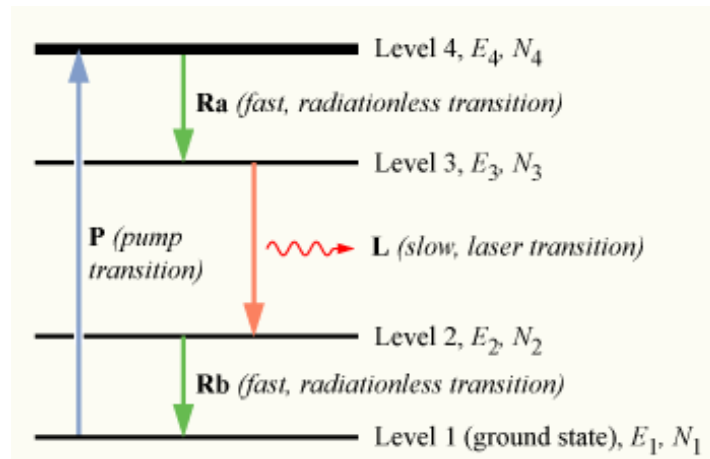


Figura 23: Diagrama d'un làser de quatre nivells

En el de quatre nivells, tenim quatre nivells d'energia, on les seves energies són $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$; i les seves poblacions d'electrons: $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$.

El que es fa és bombejar els electrons del nivell fonamental 1 al nivell excitat 4 (P). Llavors aquests electrons cauran ràpidament (aprox. 10^{-8}) al nivell 3 (Ra), ja que està més a prop i la diferència d'energia és menor. Aquests electrons es quedaran en aquest nivell durant un temps relativament llarg (nivell metaestable), ja que el temps de transició L és superior.

A més a més, els electrons del nivell 2 cauran ràpidament al nivell fonamental 1 per la mateixa causa (Rb). Gràcies això, es crea una gran diferència de nombre d'electrons entre els nivells del làser E_3 i E_2 , i s'aconsegueix la inversió de població.

Cal dir que la transicions que es produeixen entre els nivells auxiliars i els intermedis són no òptiques (no radioactives), és a dir, no hi ha emissió d'un fotó, ja que la diferència d'energia és suficientment petita per a que aquesta pugui ser cedida en forma de calor.

Làser de tres nivells:

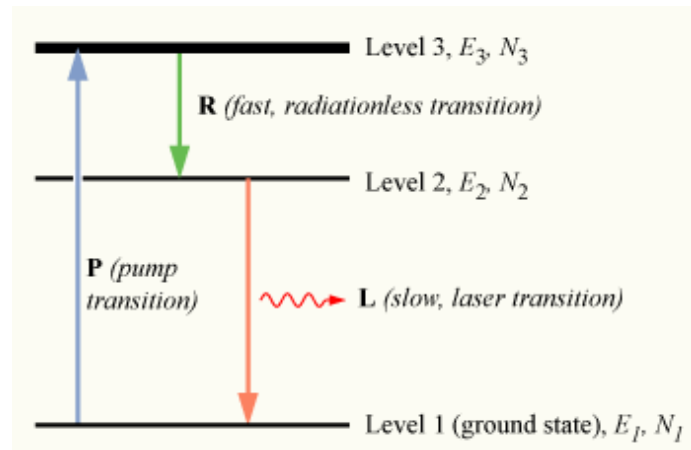


Figura 24: Diagrama d'un làser de tres nivells

El làser de tres nivells és molt similar al làser de quatre nivells, encara que és molt menys eficient, ja que s'ha de bombejar més electrons. Els electrons són bombejats del nivell E_1 on hi ha més fins al nivell E_3 (P). Els electrons del nivell 3 de l'àtom excitat decauran al nivell E_2 ràpidament (R), on s'acumularan.

5. Parts del làser

Hi ha diferents tipus de làser, però tots ells estan constituïts per tres elements indispensables: el medi actiu, el sistema o mecanisme de bombeig i la cavitat òptica o ressonador òptic.

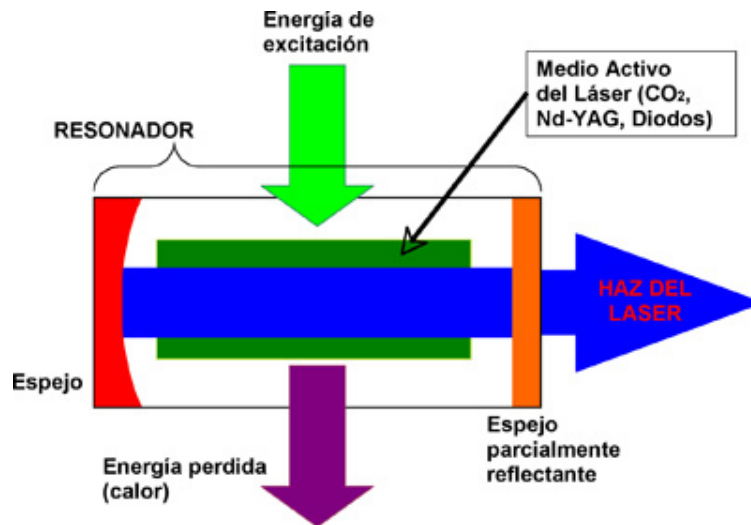


Figura 25: Esquema de les parts d'un làser

5.1. Medi actiu

El medi actiu és el conjunt d'àtoms, molècules o ions que s'exciten per crear la inversió de població i obtenir radiació electromagnètica amplificada mitjançant l'emissió estimulada. Aquest material es pot trobar en qualsevol estat de la matèria: sòlid, líquid, gas o plasma. El medi actiu determina les possibles longituds d'ona que podrà emetre el làser, segons les transicions electròniques entre els diferents nivells d'energia del material. A més a més, segons el medi actiu que tinguem, el làser tindrà un sistema de bombeig o un altre, la seva potència de sortida serà major o menor i l'emissió serà continua o polsada, etc.

5.2. Sistema de bombeig

El sistema de bombeig o mecanisme d'excitació és la font d'energia que permet que els àtoms passin al seu nivell excitat, i aconseguir la inversió de població.

Cal dir que l'energia subministrada pel sistema de bombeig sempre serà menor que l'energia emesa amb forma de radiació electromagnètica pel làser, segons el principi de conservació de l'energia. Tanmateix, hi ha làsers amb rendiments del quasi 100% i d'altres de menys de l'1%.

Hi ha diferents tipus de bombeig. Principalment poden classificar-se en:

5.2.1. Bombeig òptic

L'energia es subministra al medi actiu en forma de radiació electromagnètica (fotons). Aquests fotons seran absorbits pels àtoms que s'excitaran. S'utilitza normalment en els làsers d'estat sòlid i en els de colorant.

La radiació electromagnètica pot provenir de:

- **Làmpada de flash:** formada per un tub de quars ple de gas a baixa pressió, normalment xenó, o en làsers més potents, criptó o heli, de menor pes atòmic.

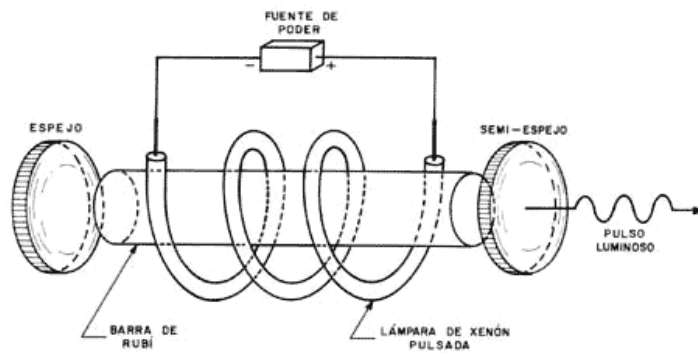


Figura 26: Esquema d'un làser amb una làmpada de flash

- **Un altre làser:** normalment de menor longitud d'ona.
- **Una altra font de llum:** per exemple, LEDs, la llum solar, etc.

5.2.2. Bombeig elèctric

L'energia subministrada en el medi actiu es fa mitjançant una descàrrega elèctrica normalment en un gas. Normalment és el que s'utilitza en els làsers de semiconductor i de gas.

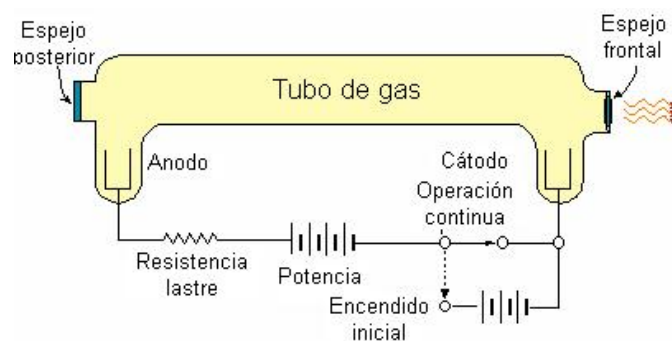


Figura 27: Esquema d'un làser amb bombeig elèctric

Consisteix en aplicar un alt voltatge en els extrems del tub ple de gas. Els electrons es mouren des del càtode (-) fins a l'ànode (+), xocant amb les molècules o àtoms del medi actiu. En aquests xocs l'energia cinètica dels electrons, a causa del seu moviment originat per la diferència de potencial, és transferida a les molècules o àtoms els quals s'excitaran.

El voltatge necessari per a començar la descàrrega elèctrica és major que el necessari per a mantenir-lo. Per això, s'aplica un pols de voltatge elevat per a produir la descàrrega inicial, i després va disminuint fins arribar a un voltatge determinat.

5.2.3. Bombeig per col·lisió entre àtoms

En aquest sistema de bombeig hi ha almenys dos gasos en el medi actiu. Consisteix en un bombeig elèctric que accelera els electrons lliures que xoquen amb els àtoms/molècules d'un gas. El segon gas s'excita amb les col·lisions de les molècules del primer gas.

Aquest mecanisme és l'utilitzat en els làsers de gas comercials com el làser d'Heli-Neó i el làser de Diòxid de Carboni.

5.2.4. Bombeig químic

L'energia prové d'una reacció química entre dos compostos. Només s'utilitza en els làsers químics.

5.2.5. Bombeig nuclear

Alguns làsers utilitzen com a font d'energia per al bombeig l'energia de la fissió nuclear.

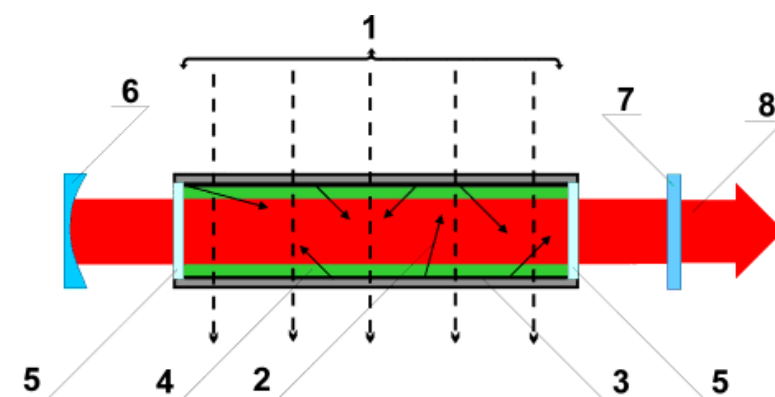


Figura 28: Esquema làser de bombeig nuclear

- 1- Flux de neutrons 2- Fragments de fissió 3- Làmina d'Urani-235 4-Medi Actiu 5- Finestra òptica 6- Mirall "retroalimentació 7- Mirall de sortida 8 – Feix de llum làser

El medi actiu està en un tub recobert amb urani-235 per on hi passa un gran flux de neutrons que provoquen una reacció en cadena del urani-235. Els fragments de la fissió (ions molt energètics) passen al medi actiu en forma de plasma excitant els àtoms, aconseguint una inversió de població.

5.3. Cavitat òptica o ressonador òptic

Consisteix en la disposició de dos miralls als extrems del medi actiu. Un d'ells reflecteix totalment i l'altre parcialment per on surt el feix de llum làser. Amb això s'aconsegueix que els fotons passin diverses vegades a través del medi actiu i augmentar el nombre de fotons amplificats.

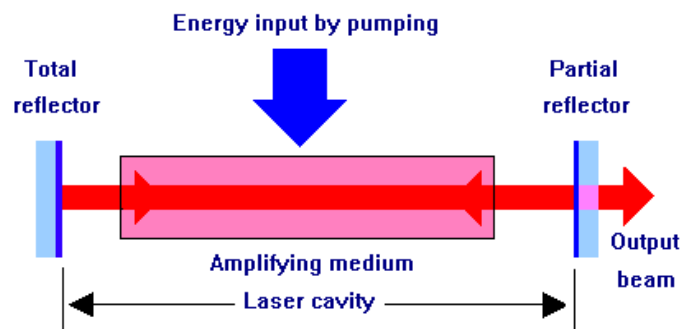


Figura 29: Esquema cavitat òptica

Gràcies a la cavitat òptica obtenim major intensitat al passar diferents vegades l'electró. També fa una selecció de la direcció del fotons, ja que si la direcció d'aquests no és perfectament perpendicular als miralls (eix òptic), les reflexions acabaran desviant-lo i sentit absorbit.

A més a més, al reflectir la llum en els miralls es forma una ona estacionària, ja que hi ha dues ones amb mateixa amplitud i freqüència que es propaguen en la mateixa direcció i en sentit contrari.

Les longituds d'ona que podran produir ones estacionaries són:

$$\lambda_m = \frac{2L}{m}$$

- L = longitud de la cavitat òptica
- m = numero de mode longitudinal
- λ_m = longitud d'ona del mode m .

La longitud d'ona segons l'índex de refracció i la freqüència segons el mode longitudinal són:

$$\lambda_m = \frac{\lambda_o}{n} \rightarrow c = \lambda_o v = n \lambda_m v_m \rightarrow v_m = \frac{c}{n \lambda_m} \rightarrow v_m = m \frac{c}{2nL}$$

- λ_o : longitud d'ona en el buit.
- n : índex de refracció.
- v : freqüència
- c : velocitat de la llum en el buit.

El primer mode d'oscil·lació de la cavitat òptica (anomenat mode longitudinal bàsic) és:

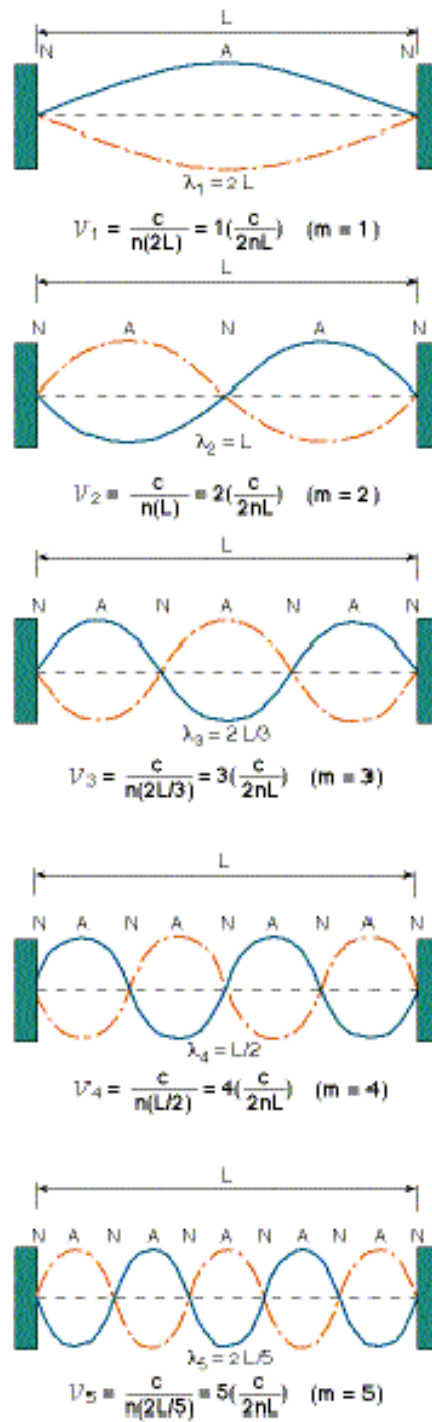
$$v_1 = \frac{c}{2nL}$$

La freqüència de cada mode és igual a 'm' vegades la freqüència bàsica. Per tant, la diferencia entre les freqüències de dos modes longitudinals consecutius és:

$$\Delta v = \frac{c}{2nL}$$

Si l'índex de refracció de la cavitat òptica i el medi actiu són diferents, l'expressió és:

$$\Delta v_{MS} = \frac{c}{2n_1L_1 + 2n_2L_2}$$



A=Antinodo N=Nodo

$\text{velocidad onda} = \frac{c}{n}$

$\text{Frecuencia} = \nu = \frac{c}{n\lambda}$
--

$\Delta\nu = \frac{c}{2nL}$

Figura 30: Diferents modes d'oscilació

Tanmateix, la llum emesa i amplificada en el medi actiu posseeix un cert ample espectral, major del que volem que emeti el làser. Això es produeix perquè els nivells atòmics no es troben mai ben definits i per tant l'emissió estimulada no es produeix en una única freqüència,

sinó en un petit rang entorn la freqüència de transició ideal. Això fa que, el poder amplificador del medi (corba de guany del medi actiu) tingui una forma acampanada, sent màxim per a la freqüència de transició ideal.

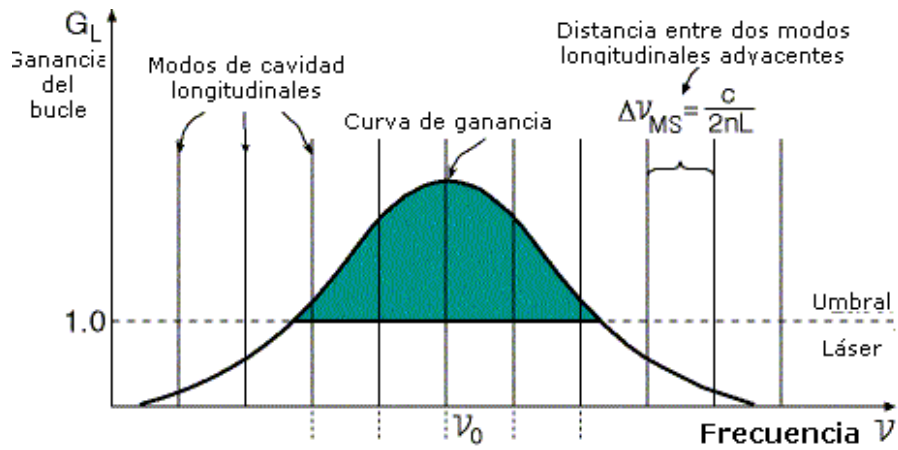


Figura 31: Gràfica de la corba de guany del medi actiu

Cada mode longitudinal és suficientment estret perquè es consideri monocromàtic. Només els modes longitudinals que superin el llindar d'acció del làser sortiran del làser.

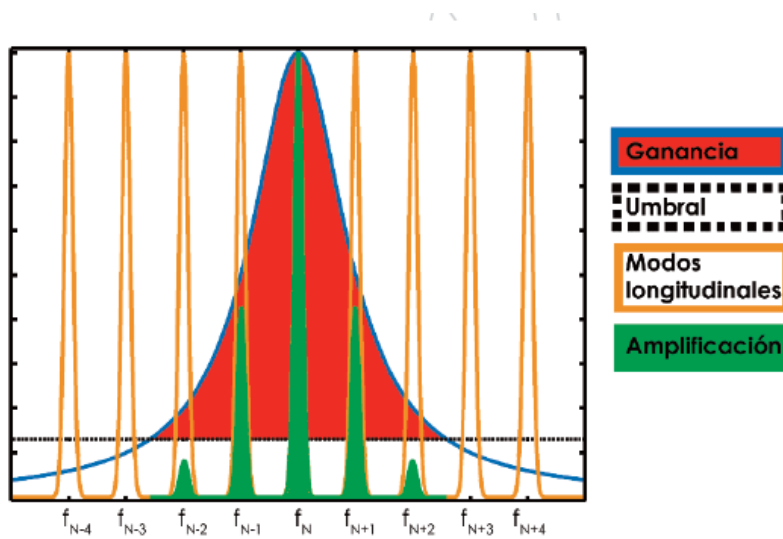


Figura 32: Diagrama de l'energia dels modes del làser

Segons el tipus de miralls utilitzats trobem diferents cavitats òptiques, cadascuna amb diferents avantatges i inconvenients:

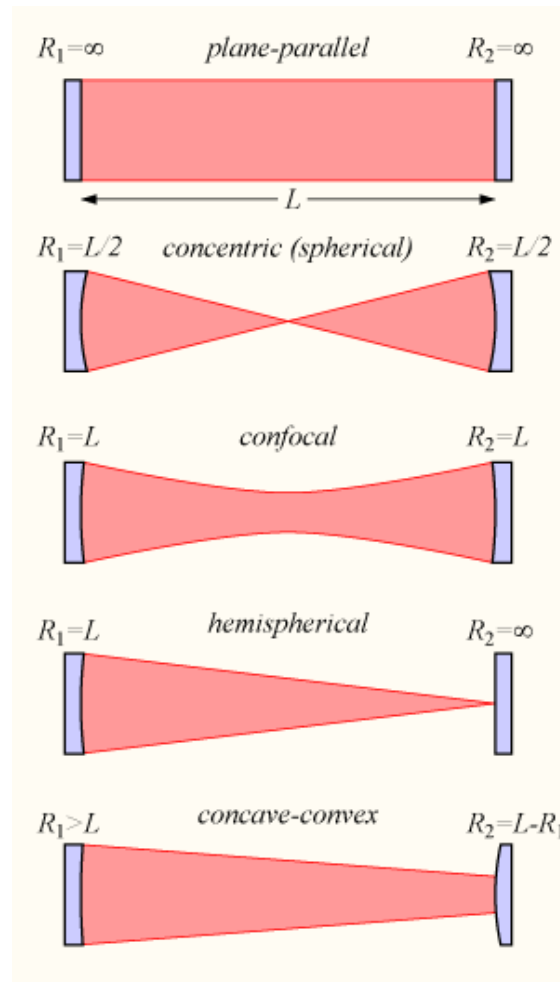


Figura 33: Imatge de les diferents cavitats òptiques

En les diferents cavitats òptiques sempre hi ha pèrdues. Aquestes poden ser a causa de:

- Pèrdua d'alineament dels miralls del làser: es produeix quan els miralls no estan perfectament alineats amb l'eix del làser.
- Absorció, dispersió i pèrdua en els elements òptics: sempre hi ha algunes pèrdues amb els miralls on la llum per exemple és absorbida.
- Pèrdues per difracció: sempre que la llum travessa una obertura petita (similar a la seva longitud d'ona) es difracta.

6. Propietats de la llum làser

A diferència de la llum solar, la llum blanca, la llum del làser té unes propietats especials que la diferencien dels altres i fa que tingui tantes utilitats. Aquestes propietats són: la monocromaticitat, la coherència i la direccionalitat i existeixen gràcies a l'emissió estimulada que produeix dos fotons idèntics.

6.1. Monocromaticitat

Com el seu nom indica significa d'un color. La *llum monocromàtica* és aquella radiació electromagnètica que *només té una longitud d'ona*, a diferència de la llum blanca, llum policromàtica, formada per molts colors, moltes longituds d'ona.

Això es pot comprovar fent passar la llum a través d'un prisma òptic, i veient si es forma un feix de llum de molts colors o un sol.

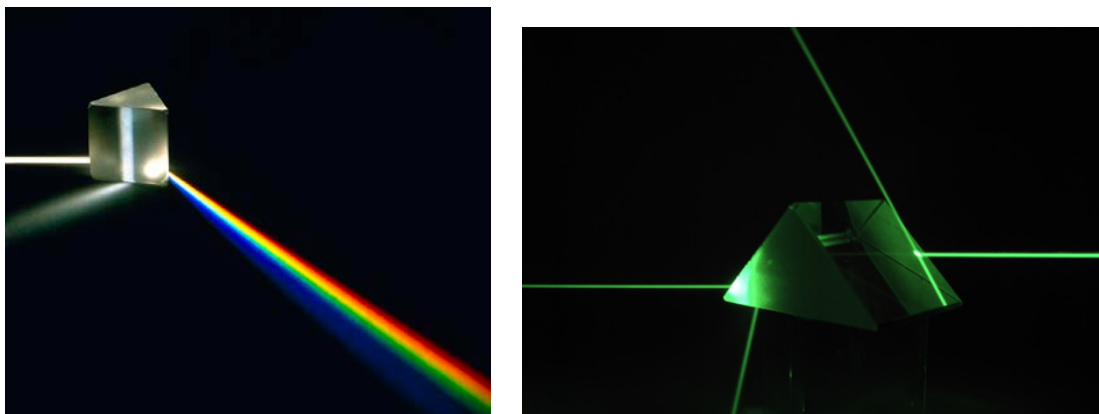


Figura 34: A l'esquerra llum policromàtica, i a la dreta llum monocromàtica

Com s'ha explicat abans, és impossible aconseguir un camp monocromàtic totalment perfecte, però els làsers emeten un interval de freqüències suficientment estret per a que es consideri perfectament monocromàtic. Trobem làsers que emeten longituds d'ona visible, infraroig, ultraviolat, raigs X. Els làsers de colorant emeten una gamma més ampla de longituds d'ona.

6.2. Coherència

La llum coherent és aquella en la *que tots els seus fotons estan en fase*. Com es propaguen en la mateixa direcció, les amplituds dels fotons es sumen, obtenint un efecte d'amplificació de la intensitat lluminosa. En canvi, en la llum d'una bombeta, la llum s'emet de forma incoherent, fet que fa que es dispersi. La propietat de coherència dels làsers és utilitzada en holografia per crear imatges tridimensionals.

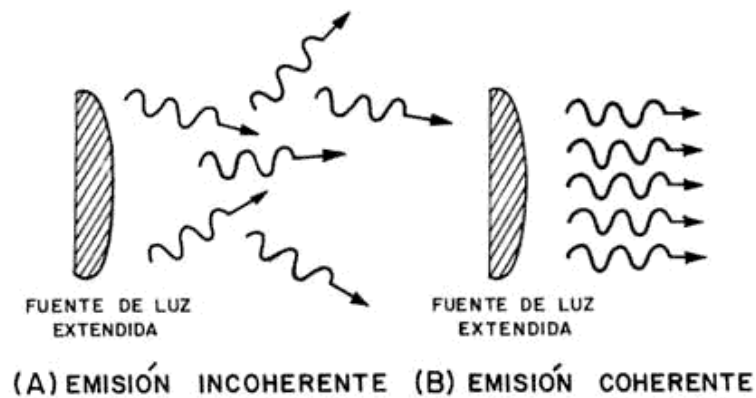


Figura 35: Dibuix de la coherència de la llum

6.3. Direccionalitat

Gràcies a la cavitat òptica que només amplifica els fotons paral·lels a l'eix òptic; la llum làser *és propaga en una sola direcció*, al contrari de la llum d'una bombeta que quan l'encens il·lumina tota l'habitació ja que es propaga en totes les direccions. Aquesta propietat de direccionalitat del làser fa que sigui utilitzat en tècniques que es necessita molta precisió com per exemple tallar un vidre o un metall, corregir problemes de visió, en els reproductors de CD...

Tot i així, la direccionalitat del làser no és absoluta, al igual que la monocromaticitat. Té una certa divergència (de l'ordre de miliradians) que com més gran és, més es dispersa. Hi ha làsers que tenen tan poca divergència que poden recórrer la distància d'anada i tornada de la Lluna a la Terra i mesurar la distància que hi ha.

7. Tipus de làsers

Encara que tots els làsers comparteixen les propietats de monocromaticitat, coherència i direccionalitat, existeixen un enorme ventall de tipus. Principalment els podem classificar segons:

- **L'estat de la matèria del medi actiu:** sòlid, líquid, gas o plasma.
- **El rang espectral de la longitud d'ona:** espectre visible, IR, UV, etc.
- **El sistema de bombeig:** bombeig òptic, bombeig elèctric, etc. (explicats en l'apartat 5.2.).
- **Les característiques de la radiació emesa**
- **Els nivells d'energia del làser:** de dos, tres o quatre nivells (explicats en l'apartat 4.5.).

7.1. Làsers de gas

Els làsers de gas, utilitzen com a medi actiu un gas o una barreja de gasos, a baixa pressió. El sistema de bombeig més utilitzat és l'elèctric. Són els més comuns i útils ja que presenten molts avantatges: poden tenir un volum gran de medi actiu, els gasos són barats i no pateixen danys, la seva homogeneïtat i facilitat per refrigerar-los i transportar-los. Els làsers de gas es poden dividir en:

7.1.1. Làsers de gas neutre o atòmic

Estan compostos per àtoms: gasos nobles o vapors metàl·lics:

- **Làser d'Heli-Neó (He-Ne):**

El làser d'Heli-Neó va ser dels primers en ser inventats i és un dels més utilitzats i econòmics. La longitud d'ona amb la que opera és de 632,8 nm (color vermell).

Utilitza heli (85-90%) i neó (10-15%) a una pressió d'uns 0.01 atm en un tub de vidre cilíndric. Utilitza un bombeig elèctric de 1 000 – 2 000 V i tenen una potència d'entre 1mW i 100 mW. És un làser de quatre nivells.

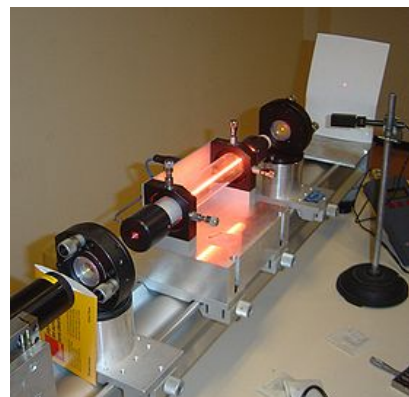


Figura 36: Làser d'He-Ne

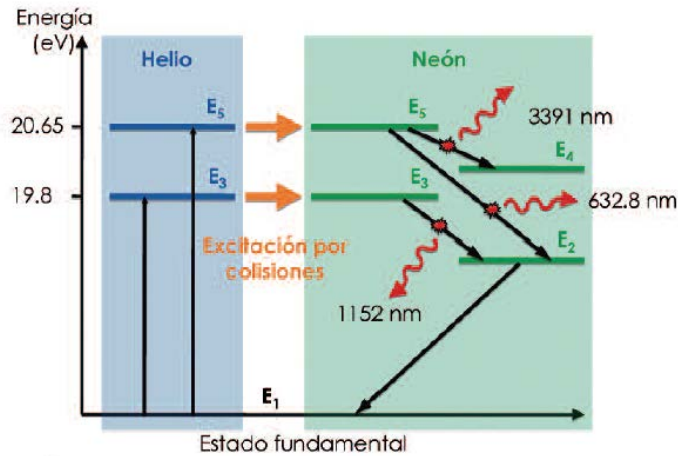


Figura 37: Diagrama dels nivells d'energia del làser He-Ne

L'heli actua transferint l'energia al neó mitjançant col·lisions entre els àtoms, ja que hi ha un nivell excitat de l'heli molt a prop d'un del neó. El neó és en el que hi ha la inversió de població, i la transició electrònica. Així que l'heli només fa augmentar el rendiment de la excitació.

- **Làser de Vapor Metà·lic Neutre**

El medi actiu està format per un vapor d'àtoms metà·lics. Emeten radiació electromagnètica visible en forma de polsos ràpids. Hi trobem:

- **Làser de Vapor de Coure (CVL):** opera longituds d'ona de color verd (510,6 nm) i groc (578.2 nm). És un làser de tres nivells.
- **Làser de Vapor d'Or (GVL):** opera longituds d'ona de color vermell (628 nm).

7.1.2. Làsers iònics

Estan compostos per gasos ionitzats. Tenen molta més potència però es necessita molta energia per invertir la població. A més a més, arriben a temperatures i pressions molt elevades. Per això, es necessita refrigerar amb aigua. La seva vida útil és més curta que la dels altres làsers de gas.

- **Làser iònic d'Argó (Ar^+)**

És el làser iònic més utilitzat. Té una potència de 30 – 100 W. Opera diferents longituds d'ona de radiació visible i ultraviolada. Les més intenses són la de 488 nm (blau) i la de 514,5 nm (verd).

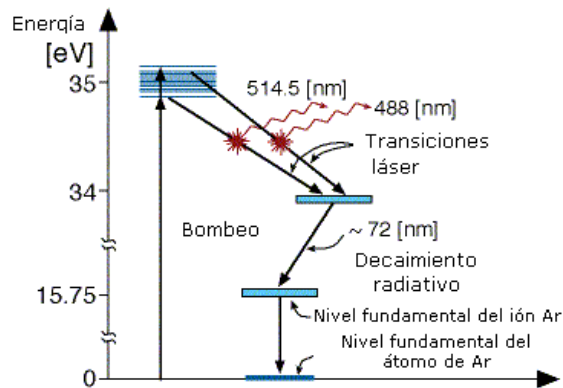


Figura 38: Diagrama dels nivells d'energia del làser d'Ar+

- **Làser iònic de Criptó (Kr^+)**

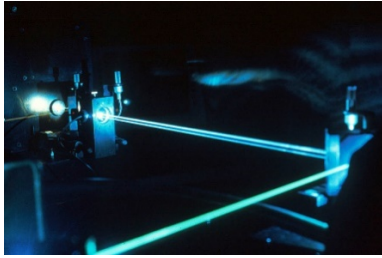
És igual que el d'Argó però de menor rendiment. Té moltes longituds d'ona de l'espectre visible, principalment del groc fins al vermell.

- **Làser iònic de Xenó (Xe^+)**

Opera en longituds d'ona de l'espectre infraroig, visible i ultraviolat. S'utilitza en la investigació científica.

- **Làser d'Heli-Cadmi (He-Cd) (Làser de Vapor Metà·lic Ionitzat)**

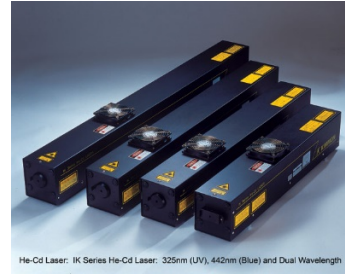
El medi actiu està format per heli i cadmi. L'heli actua igual que en el làser He-Ne i transfereix l'energia mitjançant xocs als ions metà·lics cadmi, en forma de vapor, que són els que fan les transicions del làser, les longituds de les quals es situen en l'espectre ultraviolat (UV) (i violat/blau): 441,6 nm i 325,0 nm.



Làser d'Argó



Làser de Criptó



Làser d'Heli-Cadmi

Figura 39: Làsers iònics

7.1.3. Làsers de molècules

Els làsers de molècules són aquells que el seu medi actiu està format per molècules de gas. Les transicions no són entre diferents nivells energètics principals, sinó que són transicions entre estats moleculars de vibració i rotació. Aquestes transicions entre estats són menys energètiques, per això emeten una radiació infraroja (IR) (major longitud d'ona).

- **Làser de Diòxid de Carboni (CO₂)**

És el làser més comú dintre els làsers moleculars. Utilitza diòxid de carboni i un bombeig elèctric amb l'ajuda d'un altre gas, nitrogen (N₂) i a vegades també heli (He). És de quatre nivells i tenen una elevada potència (més de 100.000 W). La longitud d'ona que emet entre 9 i 11 μm (IR). Opera tant de forma continua com pulsada i té un rendiment molt alt (30%). És fàcil d'utilitzar i no és tòxic.



Figura 40: Làser de CO₂

- **Làser de monòxid de carboni (CO)**

És molt similar al de CO₂. Té longituds d'ona de 5-6 μm . Té el problema que el CO és tòxic.

- **Làser de Nitrogen (N₂)**

És molt econòmic i fàcil de construir. Emet radiació de forma pulsada en la regió ultraviolada (UV) (337.1 nm).

- **Làzers d'Excímer**

Són làzers els quals el seu medi actiu està compost per molècules inestables formades per un àtom de gas noble (argó, criptó o xenó) i un àtom d'un halogen (fluor, clor, brom o iode) a alta pressió. Aquest tipus de molècules s'anomenen *excímers*. El nom prové de la combinació de les paraules en anglès *excited dimer* (dímer excitat). Com el seu nom indica, els excímers estan formats per dos àtoms que només poden enllaçar-se en els seus estats excitats, ja que els gasos nobles són molt inerts en el seu estat estable. Els excímers duren molt poc temps fins que es dissocien. (menys de 10 ns). Un exemple d'excímer és el XeF. (353 nm), ArF (193 nm), KrCl (222 nm), etc.

Aquests làzers emeten radiacions ultravioletes (UV) molt potents en polses curts (de microsegons - nanosegons) (alguns també emeten radiacions del color blau). Permeten inversions de poblacions grans, però es necessita molt energia en el bombeig, que és elèctric.

Aquests làzers tenen un preu elevat però es fan servir molt degut a les seves propietats úniques.

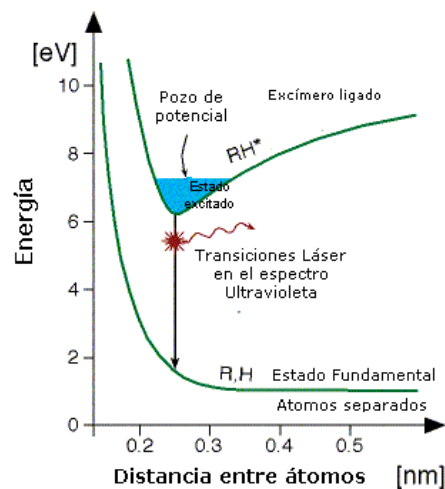


Figura 41: Diagrama dels nivells d'energia del làser d'excímer

- **Làzers químics**

Aquests làzers, com es diu en l'apartat 5.2.4., l'energia del bombeig s'obté d'una reacció química. Operen amb longituds d'ona del espectre infraroig i són bastant potents.

Els compostos utilitzats en aquests làzers principalment són halurs d'hidrogen a una pressió baixa. El més important és el fluorur d'hidrogen (HF) amb una $\lambda=2.7 - 2.9 \mu\text{m}$. També

s'utilitza el deuteri (^2H), que és un dels isòtops estables de l'hidrogen, igual que el protí (H) i el triti (^3H). En aquest cas, el làser ^2HF emet radiacions de aproximadament $\lambda=3.8 \mu\text{m}$

L'hidrogen es pot obtenir d'hidrocarburs; i el fluor de compostos formats per fluor com poden ser el SF_6 (hexafluorur de sofre) o NF_3 (trifluorur de nitrogen).

Les reaccions químiques es produeixen en l'anomenada càmera de reacció. Mitjançant una descàrrega elèctrica el fluor es separa de la molècula i reacciona amb la molècula d'hidrogen gas. A vegades, s'afegeix oxigen per a què reaccioni amb el sofre, en el cas del SF_6 , i que es formi SO_2 (diòxid de sofre).

Esquema de les reaccions químiques:

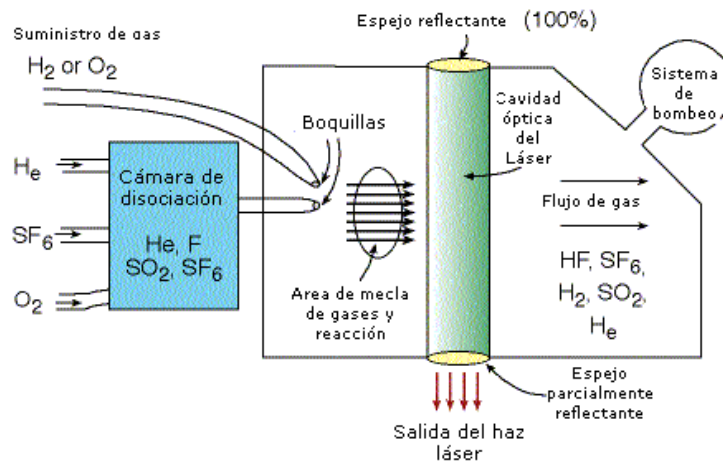
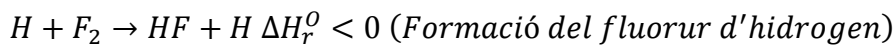
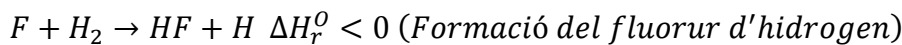
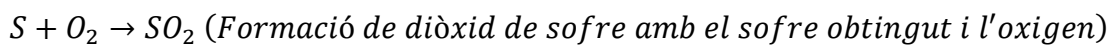
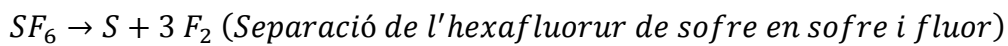


Figura 42: Esquema de la estructura d'un làser químic

Un altre exemple de làser químic és el làser químic d'oxigen-iode (COIL), el qual es produeix una reacció entre l'oxigen i el iode.

7.2. Làsers d'estat sòlid

Els làsers d'estat sòlid utilitzen com a medi actiu un material sòlid (un cristall, un vidre o una fibra) dopat amb unes impureses iòniques d'un altre material (un 1%), que són les que emeten la radiació. Així que les propietats del làser vindran donades segons les impureses. Aquestes impureses es distribueixen en la matriu sòlida del material base que pot tenir forma de prisma, cilindre, etc. Els ions utilitzats són metalls de transició (Cr, Ti,...) o terres rares (Nd, Er, Yb,...).

El sistema de bombeig utilitzat és el bombeig òptic, i poden emetre radiació tant de forma polsada com continua.

7.2.1. Làsers de materials dopats amb metalls de transició

- Làser de Robí

El làser de robí va ser el primer làser construït, per Theodore Maiman en el 1960. Està format per robí que és un tipus de mineral format per òxid d'alumini (Al_2O_3) (corindó) on una petita proporció d'alumini (Al) està substituïda per crom (Cr^{+3}) (una impuresa del 0.05%). El crom és el responsable del seu color vermell, i seran els àtoms de crom els que participaran en el procés làser.

El làser de robí és un làser de tres nivells. El bombeig dels ions crom es produeix amb làmpades de flash de xenó. Opera amb $\lambda=694,3$ nm (vermell) i s'emet de forma polsada.

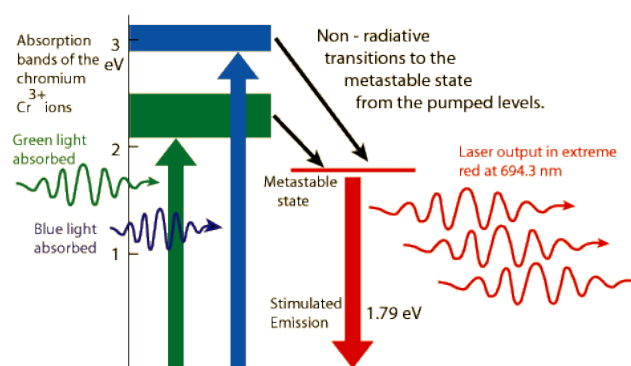


Figura 43: Diagrama dels nivells d'energia del làser de robí

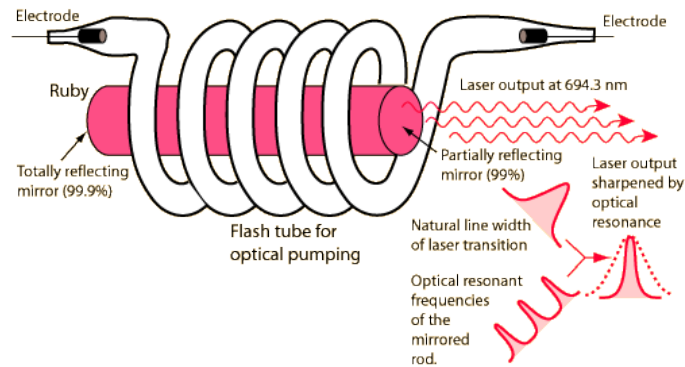


Figura 44: Esquema estructura làser de robí

- **Làser de Titani Safir**

El làser de titani-safir és un altre tipus de làser sòlid dopat amb un metall de transició, en aquest cas de titani (Ti^{+3}). El safir, igual que el robí, és un mineral format per Al_2O_3 on es substitueix una part dels àtoms d'Alumini (0.1%) per, en aquest cas, els ions titani.

El primer làser Ti:Safir va ser construït per Peter Moulton en 1982 en el MIT Lincoln Laboratory. És un làser fiable, fàcil de fer servir i eficient (80% a temperatura ambient). Opera en l'espectre visible (vermell) i Infraroig Proper (NIR). [670 – 1100 nm].

El temps de vida excitat d'aquest làser és massa curt ($3,2 \mu m$) per utilitzar una làmpada de flash com a sistema de bombeig. És per això que s'utilitza un altre làser, normalment làsers d'ió Argó o de vapor de coure.

S'utilitza en la investigació, principalment en l'espectroscòpia. Un exemple és el projecte LASE de la NASA (*Lidar Atmospheric Sensing Experiment*) en el que amb l'ajut d'aquests làsers es calcula la quantitat de vapor d'aigua, aerosols i núvols de l'atmosfera.



- **Làser d'Alexandrita**

El làser d'Alexandrita és en el que hi ha ions Crom (Cr^{+3}), en una quantitat del 0.01-0.4%, incrustats en alexandrita (pedra preciosa formada per $BeAl_2O_3$). Aquest làser té de longitud d'ona 755 nm i és de quatre nivells (Al principi era de tres nivells i operava a 680 nm).

Té una potencia mitjana i s'utilitza principalment per a la depilació.

7.2.2. Làsers de materials dopats amb terres rares

- Làser de Nd YAG i Làser de Nd Vidre

Tant el làser de Nd-Yag com el làser de Nd-Vidre utilitzen ions de neodimi Nd^{+3} com impureses en la matriu sòlida del medi actiu. Segons per a què es vulgui utilitzar el làser s'utilitza l'un o l'altre. Els dos tenen un bombeig òptic i són de quatre nivells. Emeten radiació infraroja propera (NIR).

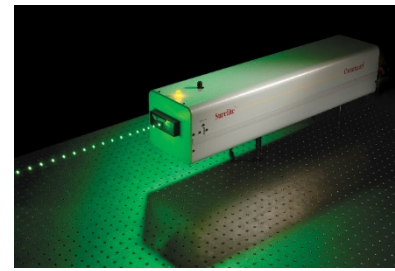


Figura 45: Làser de Nd-YAG

El làser Nd-YAG té com a matriu sòlida un vidre sintètic anomenat YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) (*yttrium aluminium garnet*).

S'utilitza per a polses d'alta velocitat de repetició (més d'un pols per segon). Són cars ja que el procés de fabricació d'aquests cristalls YAG és lent. Tenen una impuresa de 1-4%. Operen a $1.06 \mu m$.

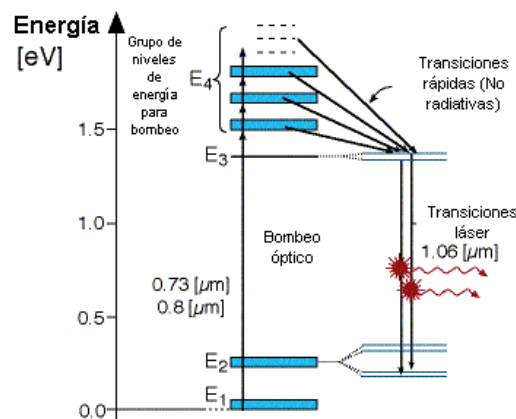


Figura 46: Diagrama dels nivells d'energia del làser de Nd-YAG

El làser de Nd-Vidre, en canvi, s'utilitza per a polses de repetició lenta. Es pot fabricar en forma circular o cilíndrica. Són econòmics de fabricar i tenen una impuresa del 6%. La part negativa d'aquest tipus de làsers és que tenen una conductivitat tèrmica que fan que sigui difícil refredar-los quan operen a una alta velocitat de repetició.

A part d'aquests dos làsers esmentats, actualment existeixen moltes variants de làsers sòlids on s'afegeixen més elements.

7.3. Làsers de Díode

El díode làser (DL) o làser de díode és un làser construït amb materials semiconductors igual que un LED o qualsevol díode.

Un díode és un component electrònic que permet la circulació de corrent elèctrica a través d'ell en un sol sentit (es pot utilitzar per transformar AC a CC (corrent alterna a corrent continua)). Un LED (del acrònim anglès *light-emitting diode* “díode emissor de llum”) és un díode que emet llum. Justament, aquest any, 2014, els guanyadors dels premis Nobel de Física, els professors universitaris: Isamu Akasaki, Hiroshi Amano i Shuji Nakamura, han estat guardonats amb aquest premi per la invenció de díodes emissors de llum blava eficients, que han permès fonts de llum blanca brillants que estalvien energia.

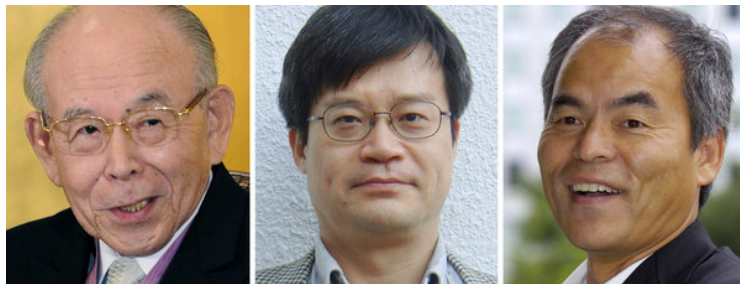


Figura 47: Guanyadors del premi Nobel de Física 2014

El làsers de díode, també coneguts com làsers semiconductors, làsers d'unió o làsers d'injecció, són els làsers més utilitzats i venuts (milions per any) i tenen infinitats d'usos tant comercials (CDs, impressores, lectors de codis de barris, comunicació òptica) com en la investigació. Va ser inventat en 1962 alhora en tres laboratoris diferents d'Estats Units.

Aquest làser es pot considerar com un làser sòlid, ja que està fabricat amb sòlids semiconductors. Però, a causa del seu funcionament i la seva importància i gran ús, es sol catalogar com un tipus de làser diferent.

Els semiconductors són aquells materials que no són ni aïllants ni conductors, sinó que la seva conductivitat elèctrica depèn de diversos factors, com el camp elèctric o magnètic, la radiació incident (cèl·lules fotovoltaïques) o l'augment de temperatura, al contrari que en els metalls els quals disminueixen la seva conductivitat elèctrica a l'augmentar la temperatura, a causa de l'increment de les vibracions dels àtoms. Els semiconductors són la base de tota la nostra electrònica, incloent cèl·lules solars, els LEDs esmentats abans, circuits integrats i els transistors amb els què es fabriquen els microprocessadors dels ordinadors, mòbils, i un llarg

etc. Exemples de semiconductors són el silici (més utilitzat) (Si), el germani (Ge), l'arsènic (As)...

Els díodes semiconductors estan formats per dues parts, una part anomenada N, i una altra anomenada P, separades per una conjuntura anomenada barrera o unió (gap). Aquesta barrera és de 0,3 V en el díode de germani i 0,6 V en el díode de silici.

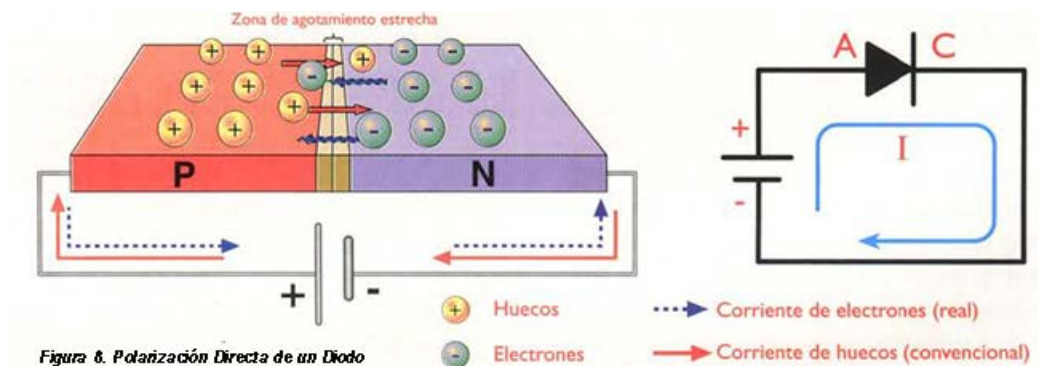


Figura 8. Polarización Directa de un Díodo

Figura 48: Esquema d'un semiconductor

El semiconductor de tipus N té electrons lliures (excés d'electrons) (cargues negatives) i el semiconductor de tipus P té buits lliures (falta d'electrons) (cargues positives). Quan una tensió positiva s'aplica al costat P i una negativa al costat N, els electrons de la banda N són empesos al costat P i els electrons flueixen a través del material P. De la mateixa manera els buits en el material P són empesos amb una tensió negativa al costat del material N i els buits flueixen a través del material N. És l'anomenada polarització directa.

Aquest fet es pot aplicar en els díodes làsers. Si els electrons i els buits es troben en una mateixa regió, poden recombinar-se, ocupant l'electró el forat del buit, caient l'electró al buit de l'àtom i emetent un fotó. Aquest és el funcionament de un LED. Si a més a més, abans que es produeixi la recombinació i caigui el electró, passa un fotó amb l'energia necessària, es produirà una emissió estimulada i el fotó obtingut serà igual.

Els díodes làsers tenen l'avantatge de ser molt petits (poden ser <math><1\text{mm}</math>), d'utilitzar poca energia i ser molt eficaços. La longitud d'ona que emeten depèn de l'amplada de la unió PN (sense tenir en compte la temperatura que també afecta). Normalment tenen longituds d'ona de color vermell i infraroig; tot i que, avui en dia, trobem díodes làsers operant des de l'espectre IR fins a l'UV. Tenen una gran importància en les comunicacions òptiques.



Figura 49: Díode Làser

7.4. Làser de Colorant (Líquid)

Els làsers de colorant són un tipus especial de làsers que utilitzen un colorant orgànic com a medi actiu. Normalment són solucions líquides, per això també es coneixen com a làsers líquids. Tenen la particularitat que es poden utilitzar amb una ampla gamma de longituds d'ona, que fa que siguin molt útils.

Va ser construït per primera vegada el 1965 en els laboratoris d'IBM als Estats Units, per Peter P. Sorokin i J.R. Lankard.

Les molècules de colorant són molècules orgàniques grans amb estructures cícliques, que es troben dissoltes en un dissolvent orgànic, normalment un tipus d'alcohol; i que són fluorescents amb un sistema de bombeig òptic (normalment un altre làser).

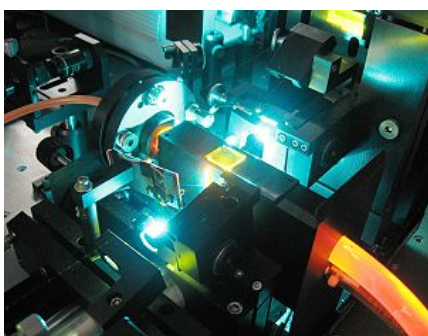


Figura 50: Làser de colorant

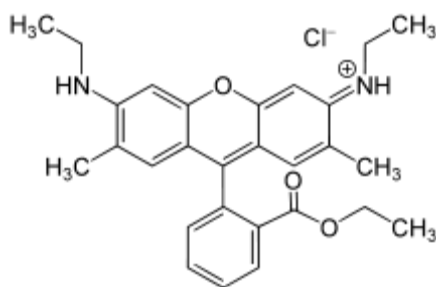


Figura 51: Estructura química de la Rodamina 6G

El colorant més típic és la Rodamina 6G dissolt en metanol (CH₃OH), el qual el seu làser emet longituds d'ona de 580 nm (groc-taronja).

7.5. Altres làsers

- **Làser d'electró lliure (FEL)**

Els làsers d'electró lliure són un tipus de làsers molt particulars. El seu medi actiu no és ni sòlid, ni líquid ni gas, sinó un feix d'electrons a velocitats pròximes a la de la llum que converteixen la seva energia cinètica en radiació.

Per tant, no hi ha inversió de població, i la coherència s'obté fent passar els electrons per un oscil·lador de camps magnètics alterns, de forma que tots emetin en fase.

Aquest tipus de làser té molts avantatges: es sintonitzable en un rang molt ampli de freqüències (des de microones fins a quasi els raigs X), només variant la velocitat dels

electrons i la mida dels imants de l'oscil·lador; tenen una intensitat de sortida molt elevada; no necessiten refrigeració i no hi ha possibilitat de danyar el material.

Tanmateix, el gran desavantatge que tenen és que són cars i complexos de construir, ja que es necessita un accelerador d'electrons.

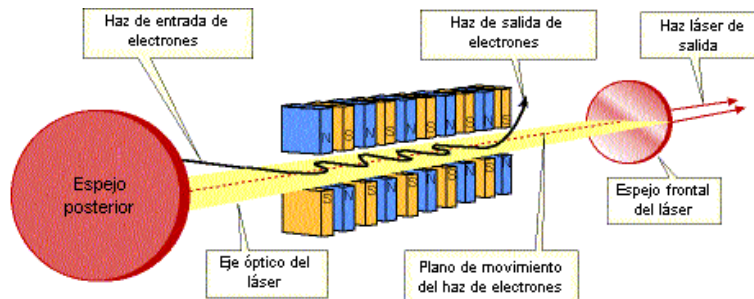


Figura 52: Estructura d'un FEL

- **Làser de raigs X**

Els làsers de raigs X són els làsers de major freqüència que s'han aconseguit construir, però són molt difícils de construir.

Normalment, s'utilitza transicions quàntiques entre nivells d'energia molt distants per aconseguir aquests làsers. Per aconseguir-ho, es pot ionitzar àtoms grans en forma de plasma. Entre les aplicacions que poden tenir els làsers de raigs X hi ha la holografia de materials biològics, fotolitografia, espectrografia de raigs X, microscòpia, etc.

El primer làser de raigs X construït va ser l'any 2009 per un grup de científics del departament d'energia del *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) als Estats Units. Aquest làser, anomenat LCLS (*Linac Coherent Light Source*), emet un pols de radiació de raigs X de una duració de femtosegons (10^{-15} s).



Figura 53: Làser LCLS

A més a més, a Europa està en construcció un làser de raigs X que està previst que comenci a operar l'any 2017. Es tracta del XFEL (*European X Ray Free-Electron Laser*), un làser d'electrons lliures de raigs X com el LCLS. Hi participen 11 països entre els quals hi ha Espanya. El làser es troba a Hamburg, Alemanya i ocupa en total 3,4 quilometres, i emetrà 27 000 polsos per segon d'una durada de menys de 100 fs i d'una longitud d'ona d'entre 0,05 a 6 nm.



7.6. Altres classificacions

7.6.1. Classificació làsers segons el tipus d'emissió

Trobem làsers que emeten de forma continua i làsers que emeten de forma polsada. Segons la Norma Europea 60.825, es considera que un làser emet de forma continua si és de mínim 0,25 segons, que equival a la duració del reflex palpebral (reflex defensiu dels humans que evita que la còrnia sigui lesionada).

7.6.2. Classificació làsers segons potencia

Segons la potència de sortida dels làsers trobem:

- Làsers de baixa potencia (< 2 mW)
- Làsers de mitjana potencia o tous (entre 5 i 200 mW)
- Làsers d'alta potencia o durs (> 1W)

7.6.3. Classificació làsers segons seguretat

Els làsers es classifiquen segons les precaucions que cal prendre segons la IEC, norma 60.825-1.



Figura 54: Senyal de perill de radiació làser

Classe 1	Segurs.
Classe 1M	Segurs si no es miren a través d'elements òptics.
Classe 2	Làzers visibles, segurs davant d'exposicions accidentals (<0.25 s). Pot causar danys oculars si s'observa directament el feix làser durant un període superior a 0.25 segons i si es fa durant més de 15 minuts el dany pot ser crònic.
Classe 2M	Làzers visibles, segurs davant d'exposicions accidents (<0.25 s) si no són observats a través d'elements òptics. Els danys són els mateixos que els de classe 2.
Classe 3R	Làzers no segurs. Risc moderat. Poden causar danys irreversibles a la retina si són observats més de 25 segons.
Classe 3B	Làzers perillosos. Segurs si es mira les seves reflexions difuses. Si es miren directament poden causar danys oculars aguts i crònics.
Classe 4	Làzers molt perillosos. No es poden mirar les reflexions difuses i poden causar traumatismes irreversibles. Poden causar cremades a la pell i incendis.

8. Història dels làsers

El làser ha estat un dels descobriments científics que més ràpidament s'ha introduït en la indústria tecnològica en molts àmbits diferents, el que ens dóna una idea de la importància de la seva troballa.

8.1. Història fins al làser (1916 – 1960)

El descobriment del làser no va ser fruit d'una ocurrència d'una única persona, sinó que, com sol ser habitual, va ser la suma de nombroses contribucions realitzades al llarg del segle XX.

- **1916 – 1917: Teoria de l'emissió estimulada**

Es van teoritzar sobre el concepte d'emissió estimulada desenvolupat per Albert Einstein, explicat en capítols anteriors i sobre l'amplificació de la llum. Malgrat això, no es veia possible portar-ho a la pràctica.

- **1928: Primeres observacions que indicaven l'existència de l'emissió estimulada**

Van ser Rudolf Ladenburg i Hans Kopfermann els primers en comprovar que les prediccions fetes per Einstein encaixaven perfectament amb les dades obtingudes experimentalment en l'estudi de la propagació de la llum a través d'un gas de neó, prèviament excitat amb una descàrrega elèctrica.



Figura 55: Rudolf Ladenburg

- **1939: Primeres reflexions sobre la inversió de població**

Valentin A. Fabrikant, un modest investigador rus, va ser el primer a plantejar-se realment què podia passar si la majoria dels àtoms o molècules de un mitjà es trobaven en un estat excitat (inversió de població). Fabrikant va dedicar tota la seva tesi doctoral a trobar maneres d'aconseguir inversió de població en un medi i va veure que es podia aconseguir una amplificació de la llum si s'aconseguia una emissió estimulada. Malauradament, mai va ser capaç de demostrar les seves idees experimentalment, entre altres coses, per la arribada de la Segona Guerra Mundial, durant la qual es va concentrar en passar desapercebut. Després de la guerra, ja en els anys 50, va reprendre les seves investigacions sense aconseguir res.

- 1947: Segona corroboració experimental de l'emissió estimulada
- **1950: Proposta del bombeig òptic per aconseguir la inversió de població**

Alfred Kastler, professor de l'École Normale Supérieure a París, juntament amb un nodrit grup de brillants estudiants, d'entre els quals va destacar Jean Brossel, van desenvolupar diversos mètodes per a l'estudi de les ressonàncies hertzianes entre els quals hi havia el bombeig òptic. Va ser en 1952 quan Jean Brossel, Alfred Kastler i Jacques Winter van aconseguir demostrar experimentalment el bombeig òptic utilitzant àtoms de sodi. Aquesta mateixa tècnica, que el grup de Kastler utilitzava per conèixer amb detall l'estructura de la matèria, seria utilitzada uns anys més tard en el primer disseny del làser.

- **1951 – 1955: Cap a la presentació del primer màser (el làser de microones)**

El 1953, Charles H. Townes i els estudiants de postgrau James P. Gordon i Herbert J. Zeiger van construir el primer màser: un dispositiu que funcionava amb els mateixos principis físics que el làser però que produeix un feix coherent de microones.

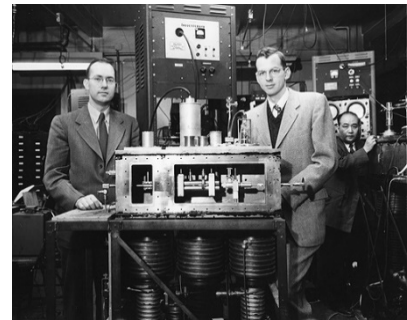


Figura 56: Townes i Gordon amb el màser

De manera simultània i independent, Nikolai Basov i Alexander Prokhorov, de l'Institut Lebedev de Moscou, van publicar entre 1954 i 1955 una altra proposta de màser, també basat en amoníac.

- 1956 – 1958: Primera proposta de un màser de estat sòlid amb esquema de tres nivells
- 1957: Primer document en el que apareix la paraula *làser* dita per Gordon Gould.



Figura 57: Aquesta és la primera pàgina del famós quadern de Gordon Gould, en què va encunyar l'acrònim LASER i descriu els elements essencials per a la construcció d'un.

- 1958: Primera publicació detallada que descriu el làser
- **1960: Primer làser funcionant en el laboratori (Làser de Robí)**

El primer làser va ser un làser de robí amb bombeig òptic que emetia llum de color vermell i va funcionar per primera vegada el 16 de maig de 1960. Va ser construït per Theodore Maiman (1927 – 2007), un jove físic que treballava en els Laboratoris Hughes Research a Malibú, Califòrnia. El fet que els seus resultats es publicaran amb algun retard a *Nature* (famosa revista científica britànica), va donar temps a la posada en marxa d'altres desenvolupaments paral·lels. Per aquest motiu, Townes i Arthur Leonard Schawlow també són considerats inventors del làser, els quals van patentar-lo en 1960 Townes des dels Laboratoris Bell.



Figura 58: Theodore Maiman

8.2. El làser en la història (1960 – Actualitat)

- **1961:** Alan Javan fabrica el primer làser d'He-Ne en els Laboratoris Bell
- **1962:** S'inventa independentment el díode làser en tres laboratoris d'investigació diferents d'Estats Units.
- **1963:** Es desenvolupa el primer làser de nitrogen.
- **1964:** William Bridges en Hughes inventa el primer làser d'Argó.
- **1964:** Kumar Patel en els Laboratoris Bell inventa el primer làser de diòxid de carboni.
- **1964:** Townes, Basov i Prokhorov comparteixen el Premi Nobel en Física pels seus estudis fonamentals que van portar a la construcció d'oscil·ladors i amplificadors basats en els estudis del màser i que van ser el fonament dels làsers.
- **1965:** Apareix el primer làser químic desenvolupat per J.V.V. Kasper i G.C.Pimental.
- **1965:** Apareix el primer làser de colorant en els laboratoris d'IBM als Estats Units, per Peter P. Sorokin i J.R. Lankard.
- **1966:** Es construeix el primer làser de vapor de coure.
- **1969:** Es troba la primera aplicació industrial del làser en les soldadures dels elements de la xapa de vehicles.
- **1971:** El grup de científics de l'URSS: Basov, Danilychev i Popov inventen el làser d'excímer.

- **1971:** Dennis Gabor obte el Premi Nobel en Física com a inventor principal de l'holografia, una de les aplicacions més espectaculars de la tecnologia làser que permet crear fotografies 3D.
- **1974:** El lector de codis de barres és la primera aplicació comercial del làser.
- **1975:** IBM llança la primera impressora amb tecnologia làser, la impressora IBM 3800.
- **1975:** John Madey inventa el làser d'electró lliure en la Universitat d'Stanford.
- **1981:** Bloembergen i Schawlow reben el Premi Nobel en Física per les seves contribucions a l'espectroscòpia làser.
- **1997:** Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji i William D. Phillips comparteixen el Premi Nobel en Física per les seves contribucions en els mètodes de refredament i atrapament d'àtoms amb llum làser.
- **2000:** Zhores I. Alferov i Herbert Kroemer reben el Premi Nobel en Física per la seva contribució en el desenvolupament dels semiconductors. En particular es van destacar els seus estudis sobre heteroestructures de semiconductor que van ajudar a desenvolupament dels làsers de semiconductor.
- **2001:** Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle i Carl Wieman reben el Premi Nobel en Física per aconseguir Condensats de Bose-Einstein al laboratori i per l'estudi de les seves propietats fonamentals. Per aconseguir observar aquests condensats van utilitzar diverses tècniques de refredament, una d'elles el refredament làser.
- **2002:** Científics australians aconseguen teletransportar un feix de llum làser d'un lloc a un altre.
- **2005:** Roy J. Glauber, per la seva contribució a la teoria quàntica de la coherència òptica, i John L. Hall i Theodor W. Hänsch per la seva contribució en el desenvolupament de noves tècniques d'espectroscòpia làser de precisió, reben el Premi Nobel de Física.
- **2008:** S'aconsegueix generar un pols de 80 attosegons (l'ordre de 10^{-18} segons).
- **2009:** Charles K. Kao rep el Premi Nobel en Física pels seus èxits en la transmissió de llum mitjançant fibra òptica.
- **2009:** En Berkeley creen el làser més petit del món (només 5 nm de diàmetre).

9. Aplicacions dels làsers

Degut a les seves característiques úniques, les aplicacions del làsers són tantes que és impossible explicar totes en un sol treball. Explicarem algunes de les més importants classificant-les segons el camp on s'usen:

9.1. Aplicacions Industrials

La indústria va considerar el làser com una eina de treball poc després que fos inventat al 1960.

Al principi, el làser es va utilitzar per prendre mesures i per l'alineament, però amb el temps les aplicacions que utilitzen feixos làsers d'alta potencia van arribar a ser més comuns.

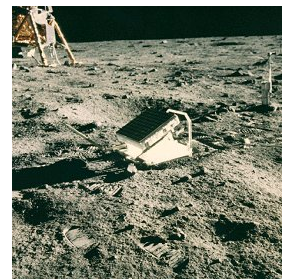
Les principals aplicacions són:

- **Mesures de precisió (Distància, Moviment, Interferometria)**

Gràcies a que els làsers emeten radiació electromagnètica, i que aquesta viatja a la velocitat de constant de la llum, es poden realitzar mesures molt precises, i alhora de objectes que es mouen a una alta velocitat.

Un exemple és la mesura de la distància de la Terra a la Lluna. Els astronautes del Apol·lo 11 Buzz Aldrin i Neil Armstrong el 21 de Juliol de 1969, una hora abans d'acabar el seu últim viatge per la Lluna, van col·locar sobre la pols de la Lluna (sobre el Mar de la Tranquil·litat) un paper d'uns 60 cm d'amplada recobert per 100 miralls apuntant a la Terra: la “matriu retroreflectora de mesura làser lunar” (*Laser Ranging Retro-Reflector*), també anomenat LR-3.

Aquest experiment instal·lat en l'ALSEP (*Apollo Lunar Surface Experiments Package*) en un total de tres de les missions d'Apol·lo (Apol·lo 11, 14 i 15), més de 40 anys més tard, es segueix utilitzant per a mesurar la distància entre la Terra i la Lluna de forma molt precisa mitjançant polsos de làser i poder verificar les teories sobre la gravetat.



Funciona enviant un pols làser des d'un telescopi en la Terra, aquest creua la distància Terra-Lluna, i impacta sobre la matriu que està formada per miralls reflectors cúbics que envien el pols

làser en la mateixa direcció en la que s'ha emès. Els científics mesurant el temps que triga el

Figura 59: Matriu retroreflectora del Apol·lo 11

làser a fer tot el recorregut, poden saber amb molta precisió la distància de la Lluna (menys de pocs centímetres d'error sobre 385.000 km de mitjana).

- **Senyalització de línia recta, o pla de referència**

Gràcies a que la llum làser es propaga en línia recta, s'utilitza per alinear túnels (com l'Eurotúnel que connecta Anglaterra i França), sistemes mecànics, camins, tubs de gas, aigua, etc.

- **Processat de materials: tall, soldadura, enduriment, fusió, vaporització, fotolitografia, etc.**

Gràcies a la gran alta precisió que s'aconsegueix amb un làser i l'alta potència que tenen, el làser és una gran eina en el processat de materials: tall (d'acer, tela, plàstic, cautxú...), soldadura, enduriment, fusió, vaporització i fotolitografia, estereolitografia en 3D.

9.2. Aplicacions Mèdiques

Els làsers tenen un gran ventall d'aplicacions mèdiques. La interacció entre la seva radiació electromagnètica i els teixits biològics depèn de: la longitud d'ona de la radiació (l'energia de cada foto), la intensitat de la radiació (el nombre de fotons), la forma de radiació (si es continua o polsada).

Segons la longitud d'ona que emetin llum, afectaran de diferent forma amb els teixits biològics:

- Regió UV Curt: interactua amb proteïnes, ARN i ADN, i mata cèl·lules.
 - Regió UV Proper i Visible Curt: produeix reaccions fotoquímiques (per exemple, la fotosíntesi).
 - Regió Visible i Infraroig Proper: té efectes tèrmics.
- **Cirurgia Làser (Làsers durs o quirúrgics (HLLT))**

Els làsers s'utilitzen en cirurgia per a l'eliminació o el tall d'algun teixit, obtenint millors resultats que amb un bisturí. Alguns avantatges són que la esterilització ve incorporada, hi ha menys dolor postoperatori, es pot controlar mitjançant un ordinador, etc. Podem trobar làsers en:

- **Cirurgia General:** tall d'una hemorràgia (làser Nd-YAG), tall net (làser d'Excímer), tall general (làser CO₂).
- **Odontologia:** tractaments dentals de teixit blanc i teixit dur.
- **Dermatologia:** eliminació de quasi tots els defectes de la pell (pigments de la pell, creixement anormal de la pell, taques, tatuatges, malformacions, depilació...)
- **Oftalmologia:** operacions de retina i còrnia, etc.
- **Altres:** ginecologia, urologia, oncologia, ortopèdia, neurocirurgia, veterinària, cardiovascular, etc.
- **Diagnòstic mèdic, i combinació amb drogues**

El làser s'utilitza per al diagnòstic de cèl·lules canceroses utilitzant fluorescència i teràpia fotodinàmica (PDT). La PDT és un mètode que utilitza unes drogues especials que s'injecten en el cos del pacient i s'acumulen principalment (no se sap el motiu) a les cèl·lules canceroses. Aquestes drogues són sensibles a la llum de longituds d'ona específiques, que fa que emetin llum fluorescent i es pugui identificar les cèl·lules canceroses. La droga més coneguda és la *Photofrin*, un derivat de l'Hematoporfirina (HPD).

- **Làsers tous o terapèutics (mitjana potència) (LLLT)**

Els làsers de tous s'utilitzen en aplicacions com:

- Curació de ferides
- Enriment de la destrucció de cèl·lules nervioses danyades
- Reconnexió de vasos sanguinis
- Alleujament del dolor
- Eliminació de pèl corporal (depilació làser)

9.3. Aplicacions en les Comunicacions

9.3.1. Comunicació amb fibra òptica

El làser ha provocat un gran canvi a les comunicacions. Gràcies a la fibra òptica es pot transmetre llum làser (IR) codificada a través de desenes de quilòmetres sense necessitat d'amplificar-la.

El fenomen físic que hi ha darrera de la fibra òptica és la reflexió interna total. La llum, al principi de tot del treball, hem dit que quan es propaga es comporta com una ona electromagnètica, i com tota ona, té la capacitat de reflectir-se, és a dir, de canviar de direcció

(desviar-se) quan entra en contacte amb una superfície de separació de dos medis i continua propagant-se en el mateix medi; i també de refractar-se, és a dir, de canviar la seva direcció al passar d'un medi a un altre, ja que la densitat dels dos medis es diferent, i la velocitat de la llum en cada un d'ells també ho és.

L'índex de refracció (n) de una substància és la relació entre les velocitats de la llum en el buit (c) i a través de la substància (v).

$$n = \frac{c}{v} > 1$$

Experimentalment s'ha comprovat que tant la reflexió com la refracció, el raig incident, la normal (recta perpendicular a la superfície de separació dels dos medis) i el raig reflectit o refractat es troben en el mateix pla.

A més a més, en la reflexió l'angle incident (i) és igual a l'angle reflectit (r).

$$r = i$$

En canvi, en la refracció l'angle incident (i), i l'angle refractat (r') es troben relacionats per l'anomenada llei de Snell, formulada pel matemàtic holandès Willebrord Snell l'any 1621:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

L'índex de refracció augmenta amb la densitat, en canvi, la velocitat disminueix.

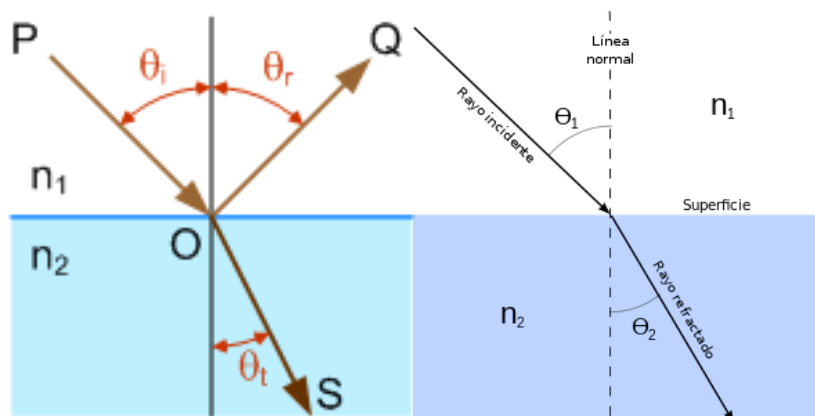


Figura 60: Reflexió i refracció

La reflexió interna total és el fenomen que es produeix quan un raig de llum viatja d'un medi amb un índex de refracció major a un altre amb un índex de refracció menor.

L'angle crític o l'angle límit és l'angle mínim d'incidència pel qual l'angle de refracció és de 90° i per tant, es produeix la reflexió interna total:

$$\frac{\sin i_L}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow i_L = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad n_2 < n_1$$

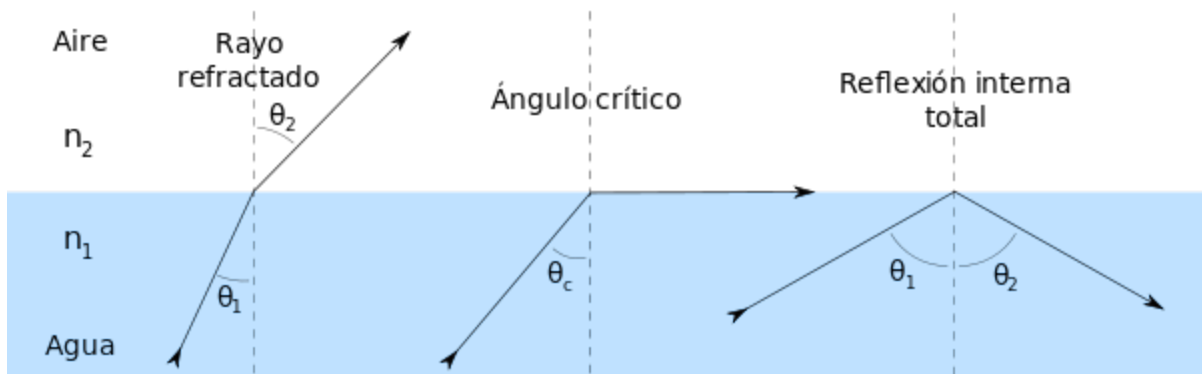


Figura 61: Reflexió interna total

Podem fer múltiples reflexions internes per poder guiar la llum, per exemple en un xorroll d'aigua o en una fibra òptica.

La fibra òptica és un sistema de transmissió de dades, format per un fil molt fi de un material transparent (vidre o plàstics) per on s'envien polses de llums codificats per a transmetre informació d'un extrem a un altre.



Figura 62: La llum no pot sortir del xorroll d'aigua a causa de les reflexions totals

La fibra òptica està formada per un nucli central per on viatja la llum (*core*) envoltat d'un revestiment (*cladding*) que té un índex de refracció menor que el nucli i fa que la llum quedi atrapada dins. A més a més, estan recoberts d'una o dues capes protectores (*jacket*). En total, la fibra òptica té un gruix d'entre 4 mm a 63 mm.

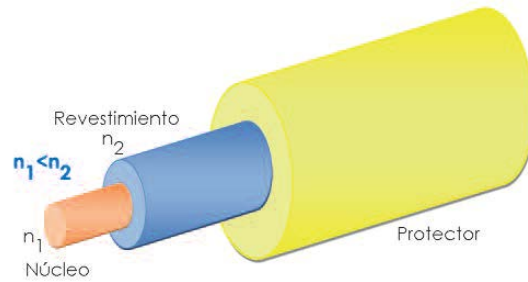


Figura 63: Estructura fibra òptica

La llum que viatja dins la fibra òptica es codifica per a transportar la informació que volem mitjançant díodes làsers o LEDs. Els làsers tenen l'avantatge de ser monocromàtics, cosa que permet mantenir millor la forma del pols en llargues distàncies. Els làsers modulen la llum de longitud d'ona d'infraroig (1000 – 1300 nm). Un cop arriba la informació on volem, un sensor torna a transformar la senyal de llum codificada en senyal elèctric que l'ordinador pot processar per extreure la informació.

Una altra aplicació de la fibra òptica és en la medicina per a l'exploració del cos humà.

Existeixen dos tipus de fibra òptica: la fibra multimode (amb un nucli de 50 – 62,5 μm) i la fibra monomode (amb un nucli de 4 – 8 μm). La diferència és que en la fibra multimode existeixen més d'un mode o camí per on es propaga la llum i per tant, es pot transmetre més informació, tot i que són més costoses de fabricar.

El principal avantatge de les comunicacions amb fibra òptica respecte els cables coaxials de coure que transmeten senyals elèctriques d'alta freqüència és que poden transmetre una gran quantitat d'informació a la vegada. A més a més, ho fan a la velocitat de la llum i les pèrdues de senyals són molt menors, cosa que fa que no s'hagi d'instal·lar tants repetidors (dispositius per amplificar la senyal per a que pugui seguir viatjant).

Altres característiques són que: són molt lleugeres i flexibles, no produeixen interferències, tenen una gran resistència mecànica, resisteixen a la calor, el fred i la humitat. El principal desavantatge és que es necessita sempre un convertidor òptic-elèctric, i tot i que, els cables de fibra òptica són econòmics, els dispositius i connectors són cars, i la seva instal·lació és complicada ja que és fràgil.

Va ser al 1977 quan es va utilitzar per primera vegada una connexió telefònica mitjançant fibres òptiques, i en 1988, va haver-hi el primer cable transatlàntic de fibra òptica que connectà Europa amb Amèrica del Nord. Actualment hi ha més d'un bilió de quilometres de fibra òptica arreu del món i al fons del oceans, fent possible la connexió entre ordinadors d'arreu del planeta.

Investigadors de la Universitat de Eindhoven i de la Universitat Central de Florida han creat un cable de fibra òptica que transmet 255 Tbps, és a dir, que només aquest cable podria reemplaçar tots els cables transoceànics que hi ha entre el continent europeu i americà. Ho han aconseguit transmetre una distància d'un quilòmetre. La clau d'aquest cable és que transmet diferents longituds d'ona alhora. Malgrat lo increïble que és, el preu és massa car perquè pugui comercialitzar-se. Han publicat els seus estudis en la revista científica *Nature*.

9.3.2. Comunicació òptica en l'espai (FSO)

Consisteix en la transmissió d'informació mitjançant llum (visible o infraroja) a través de l'atmosfera. A l'igual que la fibra òptica, s'utilitzen LEDs i làsers com a font de llum de transmissió. Aquesta tecnologia permet la comunicació amb naus espacials i satèl·lits de forma fàcil. Té l'avantatge que no necessita d'una instal·lació complicada, és segura, ràpida i no té interferències.

Tot i això, la comunicació òptica en l'espai encara està molt verda. Els principals inconvenients són les dispersions de la llum que es produeixen a l'atmosfera com la dispersió de Rayleigh i la dispersió de Mie, l'absorció de radiació per part de les molècules de l'atmosfera i els fenòmens meteorològics com la pluja, la boira o la neu.

Però aquest any, la NASA ha aconseguit per primera vegada transmetre un vídeo d'alta definició per làser des de l'espai, des de l'Estació Espacial Internacional (ISS) fins a la Terra. La transmissió ha estat de 175 Mb, i ha estat possible gràcies



a l'aparell OPALS (*Optical Payload for Lasercomm Science*) de la ISS que ha enviat la senyal làser. Amb aquesta tecnologia, tal com explica la NASA, s'aconsegueixen velocitats de transmissió entre 10 i 1 000 vegades més ràpides que les actuals.

9.4. Aplicacions Militars

- **Posicionament làser**

Els làsers són utilitzats per calcular distàncies d'un blanc per a disparar artilleria o míssils. També ens permet calcular la velocitat d'un blanc en moviment i la seva direcció encara que es mogui ràpidament.

- **Indicadors d'objectiu**

També són utilitzats per a marcar els objectius de míssils guiats, ja que al propagar-se en línia recta a la velocitat de la llum, es pot marcar l'objectiu si es codifica la llum amb un patró de polsos de llum per a què el míssil el detecti.

Altres aplicacions militars que tenen són per exemple l'ús d'un sistema làser per a encegar les tropes militars i que no puguin veure o la de l'ús d'armes làsers, però aquesta última encara està molt verda.

9.5. Aplicacions Quotidianes

Tot i les moltes aplicacions que tenen els làsers en les indústries, les empreses, els militars, etc.; trobem molts làsers en la nostra vida quotidiana:

- **Punters làsers**

Els punters làsers són una de les aplicacions del làser més conegudes. Són molt econòmics i petits. Això fa que siguin làsers de semiconductors que es produeixen de forma industrial. Serveixen per a senyalar alguna cosa d'interès. Els més econòmics són els de color vermell que emeten en una banda de 650 – 670 nm. Els primers daten de 1980. També existeixen de color verd, el segon més famós, que encara que alguns tinguin la mateixa potència que els vermells, ens sembla que són més potents ja que el nostre ull humà té major sensibilitat per aquesta longitud d'ona. També hi ha d'altres com els de color taronja o els d'infraroig que utilitzen diferents tecnologies.

També es poden acoblar a una arma per ajudar a apuntar. Un altre lloc on els trobem és en les discoteques o en concerts, que serveixen com a decoració.

- **Lector de codis de barres**

Va ser una de les primeres aplicacions del làser a la vida quotidiana. Va ser a l'any 1971, quan la companyia *Computer Identics* va instal·lar el primer lector de codis de barres en una fàbrica de *General Motors*, a Michigan, Estats Units. Des d'aleshores, aquesta indústria mou milers de milions d'euros a l'any, tenint en compte l'enorme quantitat de productes que porten codis de barres.

El funcionament d'aquests lectors és el següent: el làser, normalment de díode, incideix sobre el codi, compost de ratlles blanques i negres. La radiació del làser és absorbida per les ratlles negres i reflectida per les blanques, per tant, depenent de si incidim en una zona blanca o negra la senyal reflectida pel codi serà més o menys intensa. La llum que viatja de volta al lector, és enviada a un fotodetector que converteix la intensitat lluminosa en impulsos elèctrics. D'aquesta manera és descodificada la informació que conté el senyal lluminós remesa pel codi. Per recórrer tot el codi de barres, la llum del làser s'incideix primer a un mirall que va rotant per anar recorrent tot el codi, a una velocitat tan ràpida que l'ull humà veu una línia en lloc de punts.

- **Emmagatzematges òptics: CD/DVD/Blu-Ray**

Aquesta és una altra important aplicació dels làsers en la vida quotidiana. Les unitats de disc òptic utilitza làsers per a la lectura i escriptura d'informació des d'un arxiu (text, so, imatge, etc) a discs òptics perquè pugui ser transportada i llegida sense pèrdua d'informació. Aquesta informació és emmagatzemada en codi binari (una successió de zeros i uns). El mètode d'emmagatzematge consisteix a modificar l'índex de refracció de la superfície del disc per realitzar una sèrie de marques de manera organitzada. Per a això, la superfície es divideix en circumferències, la qual l'amplària és de l'ordre de les micres (pistes), al llarg de les quals es realitzen les marques.

D'aquesta manera, si dividim una pista en regions iguals, aquelles que estiguin marcades representaran un 1, mentre que les que no ho estiguin, un 0. Com més petites i precises siguin aquestes marques, major nombre de zeros i uns podem representar en un disc, i per tant, més quantitat d'informació serem capaços d'emmagatzemar.

El làser és qui s'encarrega de realitzar aquestes marques d'una manera precisa, eficaç, i repetitiva. A més, la miniaturització dels làsers de díode fa d'aquests el dispositiu perfecte per al seu acoblament als sistemes de gravació i lectura de discos.

La diferència entre CD, DVD i Blu-Ray és la mida de les marques que depèn de la longitud d'ona del làser utilitzat. Així que quan més petita sigui la longitud d'ona del làser, més petita serà la marca i per tant, més informació es podrà emmagatzemar en el disc.

Unitat d'emmagatzematge	Capacitat	Longitud d'ona del làser de lectura	Mida de les marques	Any d'aparició
CD (Disc Compacte)	700 MB de dades	780 nm (infraroja)	0,8 μm	1982
DVD (Disc Versàtil Digital)	4,7 GB de dades	650 nm (vermell)	0,4 μm	1995
Disc Blu-ray	25 GB de dades	405 nm (blau)	0,15 μm	2007

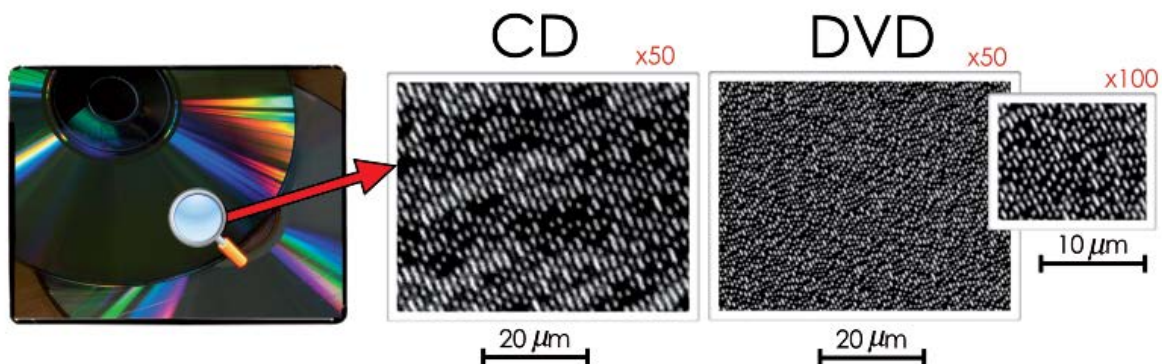


Figura 64: Superfície ampliada d'un CD i un DVD

D'altra banda, per a llegir la informació del disc es projecta un feix làser de menor intensitat sobre el disc, de manera que la llum reflectida varia en funció de la presència o absència de marques en el substrat, de forma similar al lector de codis de barres. Un fotodetector tradueix les variacions de zeros i uns a format digital, que finalment és descodificat de manera electrònica per obtenir la informació emmagatzemada.

- **Impressora làser**

La impressora làser combina una tècnica d'impressió inventada per Chester Carlson al 1938, coneguda com xerografia, amb una font làser. La impressora làser va ser inventada el 1972 per la Companyia Xerox.

En una impressora làser el component principal és un corró o tambor que està revestit d'una substància fotoconductora (substància que condueix el corrent elèctric només quan li arriba llum). Aquest corró es troba inicialment carregat negativament.

El funcionament d'una impressora làser és el següent: l'ordinador envia la senyal d'imprimir cap a la impressora. Llavors l'electrònica de la impressora dirigeixen la llum del feix làser, d'intensitat variable, sobre un mirall i aquest reflecteix la llum, que és infraroja, cap a les zones del corró o tambor. D'aquesta manera com que el tambor té una substància fotoconductora, les zones il·luminades pel làser comencen a conduir electricitat que fa que perdin les càrregues negatives inicials. Així s'aconsegueix que el tambor es trobi carregat negativament en les zones que no han rebut llum, i sense càrrega en les zones que han rebut la llum làser.

El següent pas consisteix en banyar el corró d'una pols molt fina de color negre amb càrrega positiva, anomenat tòner. Com que el tòner té càrrega positiva només s'adherirà a les zones del rodets que es trobin amb càrrega negativa. Així la imatge de càrregues es converteix en una imatge de tinta.

En el següent pas la impressora comunica càrrega positiva a un full de paper i fa que el corró rodi sobre ella. Llavors el paper que és ara portador de càrrega positiva, atrau les partícules del virador carregades negativament i les separa del tambor.

De seguida, aquesta imatge formada en el tambor és transferida al paper per mitjà d'una càrrega negativa major a la qual posseeix el cilindre; aquesta càrrega és produïda per una altra corona denominada de transferència.

A continuació, el tòner que es va transferir al paper és adherit a aquest per mitjà d'un parell de rodets, un encarregat de generar calor i, l'altre amb l'objectiu de pressionar la fulla sobre l'anterior.

Per tornar a l'estat inicial, el tòner restant en el cilindre és netejat per mitjà d'una làmina plàstica i al mateix temps s'incideix llum sobre el cilindre per deixar-lo completament descarregat.

El principal avantatge de la impressora làser respecte a les impressores convencionals de tinta, és la velocitat, i per tant el volum de còpies per minut. Es per això que moltes empreses les

utilitzen tot i ser més cares que les impressores convencionals. El preu dels tòners només s'amortitza si es fan moltes impressions.

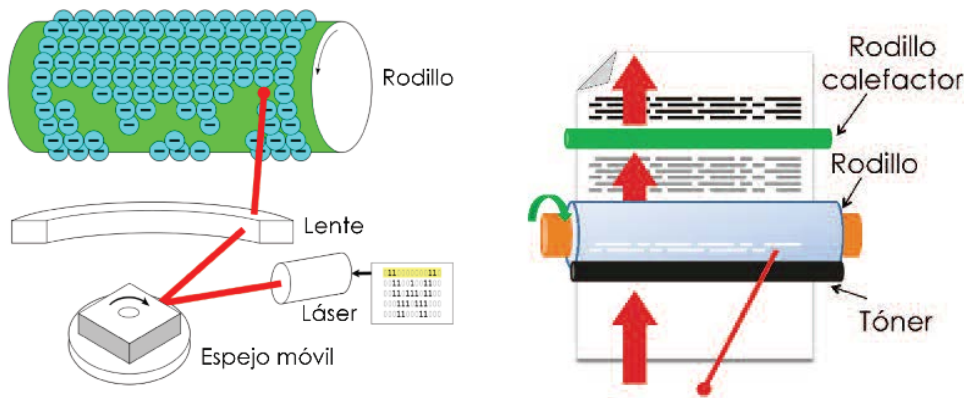


Figura 65: Disseny d'una impressora làser

9.6. Aplicacions en la Investigació Científica

La primera aplicació del làser va ser en l'àmbit científic, per estudiar la física quàntica i la química. Els làsers són molt importants en l'àmbit científic ja que tenen múltiples utilitats, com per exemple:

- Detectar els moviments de l'escorça terrestre i per efectuar mesures geodèsiques.
- Detectar certs tipus de contaminació atmosfèrica.
- S'utilitzen en experiments de relativitat (òptica relativista).
- Desenvolupar commutadors molt ràpids activats per làser per al seu ús en acceleradors de partícules
- Atrapar amb feixos de làser un nombre reduït d'àtoms en un buit amb la finalitat d'estudiar seus espectres amb una precisió molt elevada.
- Obtenir pressions i temperatures extremes
- Espectroscòpia
- Refredar àtoms o molècules a temperatures pròximes al zero absolut*
- Reaccions nuclears induïdes per làsers
- S'utilitzen com a "pinces òptiques" per manipular mostres biològiques, com ara els glòbuls vermells i microorganismes.

* Investigadors de la Universitat de Yale han aconseguit refredar una molècula fins a la temperatura més baixa possible fins ara: 0,0004 graus per sobre del 0 K, és a dir, -273,15 °C. Es tracta de la molècula de monofluorur d'estronci. Els resultats han estat publicats en la

prestigiosa revista *Nature*. Per fer-ho, van necessitar 12 làsers de diferents longituds d'ona per poder retenir i refredar la molècula.

9.7. Altres Aplicacions

Les aplicacions del làser són immenses i encara hi ha algunes per descobrir que estan desenvolupant-se, com pot ser els ordinadors òptics que en lloc d'utilitzar circuits integrats (IC), utilitzarien circuits òptics (IO), que serien bastant més potents que els ordinadors actuals.

Altres aplicacions no explicades en aquest treball són les aplicacions en l'art i l'holografia, que permet crear imatges tridimensionals gràcies a diferents raigs làsers (l'holografia també s'aplica a la seguretat, permetent codificar informació) o la utilització de làsers com a font d'energia per a la propulsió de coets espacials mitjançant cèl·lules fotovoltaïques.

10. Experimentació de les propietats de la llum amb làsers





Els làsers utilitzats en aquestes pràctiques tenen una potència $<1\text{mW}$ i una longitud d'ona de llum visible de color vermell (630 – 680 nm). Segons la norma vigent (EN 60825-1) aquests làsers pertanyen a la classe 2, i per tant no són perillosos per la pell ni pels ulls i no es necessari l'ús d'ulleres de protecció. Tanmateix, mai s'ha de mirar directament un raig làser.



10.1. Pràctica I: Monocromacitat

Objectiu: Comprovar que la llum d'un làser és monocromàtica, i que en canvi, la llum blanca d'una bombeta és policromàtica. (6. Propietats de la llum làser)

Material:

Xarxa de difracció	Làser vermell	Bombeta o llanterna	Pantalla (Pissarra blanca)
			

Procediment:

1. Enfoquem la llum làser cap a una xarxa de difracció i observem el resultat en la pantalla.
2. Repetim el procés amb la llum blanca de la llanterna.
3. Comparem els resultats.

Resultats:

S'observa que la llum blanca es dispersa en tots els colors de l'Arc de Sant Martí, mentre que la llum làser no. Això justifica la monocromacitat del làser, és a dir, que només emet una

longitud d'ona, en aquest cas de color vermell, mentre que la llum blanca de la bombeta està formada per tots els colors que es dispersen quan la llum travessa la xarxa.



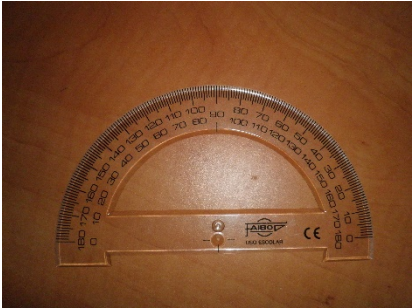


Llum blanca (policromàtica) – Llum làser (monocromàtica)

10.2. Pràctica II: Quantificació de la reflexió interna total

Objectiu: Observar el fenomen de reflexió interna total i calcular experimentalment l'angle límit de l'aigua (9.3.1. Comunicació amb fibra òptica)

Material:

Contenedor en forma de mitja lluna	Làser vermell	Transportador
		

- Full de paper

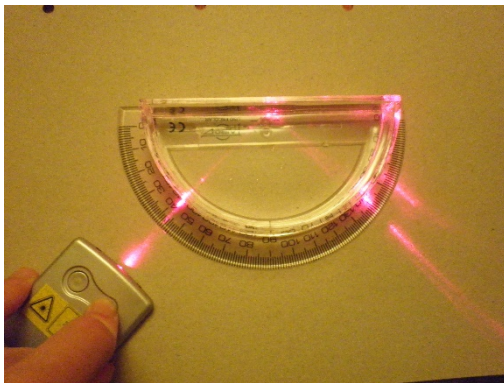
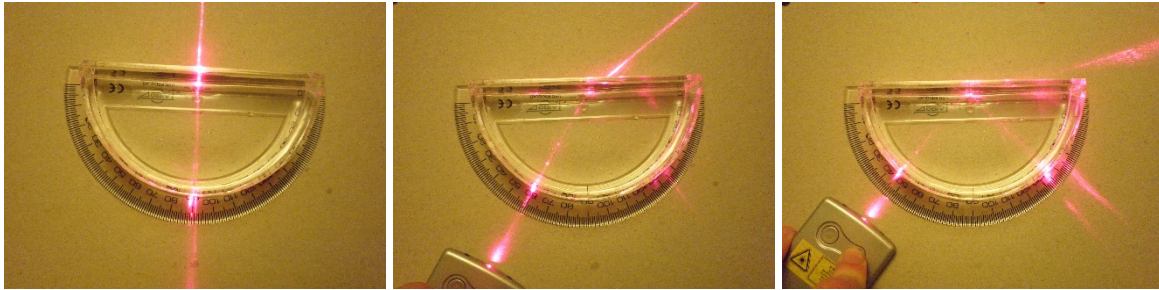
- Aigua

Procediment

1. Col·loquem el transportador a sobre el full de paper blanc.
2. Omplim el contenidor en forma de mitja lluna d'aigua i el col·loquem a sobre el transportador.
3. Apuntem amb el làser cap a la superfície corbada formant diferents angles.

4. Gràcies al full de paper en blanc, observem els feixos de llum làser reflectits i refractats.
5. Anem girant el làser fins arribar al punt on el feix es reflexa completament (angle límit).

Resultats



S'observa que l'angle límit experimentalment és d'uns 47° respecte la normal. A partir d'aquest angle el feix làser no es refracta com passava abans. Aquest fenomen és l'utilitzat en les fibres òptiques per no deixar escapar la llum.

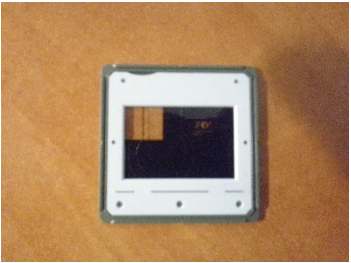


Si l'índex de refracció de l'aigua és de 1,33 i el de l'aire aproximadament 1. Teòricament, l'angle límit

ha de ser: $i_L = \arcsin \frac{1}{1,33} = 48,7^\circ$, un valor molt semblant al que hem obtingut de forma experimental.

10.3. Pràctica III: Experiment de la doble escletxa

Objectiu: Dur a terme l'experiment de la doble escletxa, fet per primera vegada per Thomas Young, que demostra la naturalesa ondulatoria de la llum. (3.1. Què és la llum?)

Material

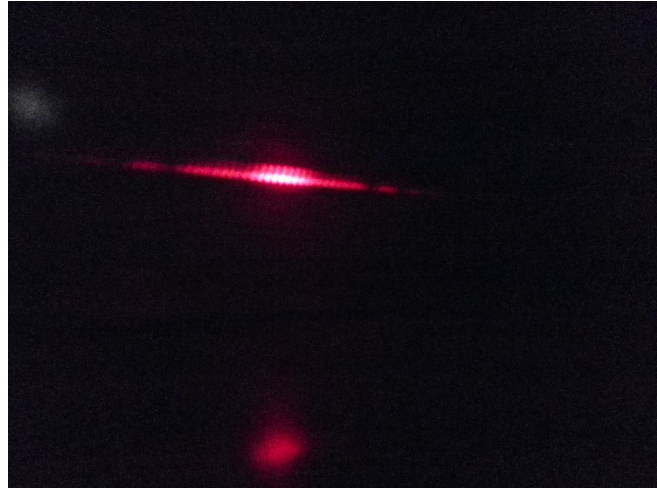
<p>Diapositiva amb dobles escletxes</p> 	<p>Làser vermell</p> 	<p>Pantalla (Pissarra blanca)</p> 
---	--	---

Procediment

1. Amb la llum apagada, apuntem amb el làser cap a la doble escletxa de la diapositiva, que es troba a certa distància.
2. Observem la imatge que es forma en la pissarra blanca.

Resultats

Es veu clarament que es forma un patró d'interferència, una sèrie de punts lluminosos, deguts a una interferència constructiva, i uns punts on no hi ha llum degut a una interferència destructiva. Amb això es demostra que la llum es comporta com una ona i que quan travessa la doble escletxa es difracta i es formen dos focus de llum que interfereixen produint el dibuix obtingut en la pantalla.



Dades de la doble escletxa:

- *Amplada: 0,025 mm*
- *Separació entre els centres de les dues escletxes: 0,05 mm*

11. Conclusions

Després d'haver fet aquest treball, he arribat a moltes conclusions. Una de les principals ha sigut la dificultat que comporta realitzar un treball com aquest; mai havia fet cap abans amb aquesta importància i he après moltes coses que no s'han de fer; que m'han ajudat a millorar de cara al futur.

Gràcies al Treball de Recerca, he millorat la meua capacitat de buscar, analitzar, endreçar i sintetitzar informació, d'interpretar textos científics tant en català, castellà o anglès, i d'explicar coses avançades de manera senzilla i resumida.

En relació als làsers, he après molt sobre aquests i tot el potencial que tenen de cara el futur; he complert els objectius que m'havia proposat a l'inici: he estudiat el seu funcionament i la seva estructura; he vist la gran varietat de tipus que hi ha i les seves propietats tan fantàstiques que té que fa que tingui innumerables aplicacions en molts camps.

M'he adonat que el làser ha estat la culminació de diferents investigacions de científics al llarg del segle XX i no només d'una sola persona, i que avui encara segueix creixent amb noves investigacions i aplicacions que faran que el làser tingui un paper molt important en les nostres vides al futur, més que el que té ara ja.

També he vist que la indústria dels làsers mou milions de diners l'any i que els trobem molt sovint en la nostra vida quotidiana. M'ha cridat l'atenció que la majoria, per no dir totes, les invencions del làser han estat en Estats Units.

Durant el treball he tingut alguns problemes ja que les coses mai surten com tu vols. Per exemple, he hagut d'evitar la complexitat de les matemàtiques del làser ja que són d'un nivell molt superior; no he pogut fer cap pràctica a l'Institut de Ciències Fotòniques per certs motius de personal i de temps; i he hagut de suportar la manca de temps de les últimes setmanes per haver començat el treball massa tard.

Finalment, arribo a la conclusió que pel seu ampli ventall d'aplicacions, el làser ha permès millorar la nostra qualitat de vida en molts aspectes: en la salut, les comunicacions, la indústria, etc. A més a més, s'ha avançat molt en la investigació científica gràcies al seu descobriment. Per tant, el làser ha estat un dels invents més importants dels últims segles. Ha passat molt de temps des de 1960 quan es va construir per primera vegada, i les seves aplicacions no han parat de créixer i no crec que ho facin, sinó al contrari, serà molt important en els propers anys.

12. Fonts d'informació

Bibliografia

- MARÍN, A.; PFEIFFER, N.; TRAVESSET, A. *Física 2: Batxillerat*. 3^a ed. Barcelona: Casals, 2013.
- MASJUAN, M. D.; PELEGRÍN, J. "Estructura atòmica i propietats atòmiques periòdiques". *Química 2: Batxillerat*. 4^a ed. Barcelona: Casals, 2013.
- ALONSO, Benjamín, et al. *El láser, la luz de nuestro tiempo*. Universidad de Salamanca, 2010.
- YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. *Física universitaria con física moderna volumen 2*. 12^a ed. Pearson Educación, 2009.
- KAKU, Michio. *Física de lo imposible*. 5^a ed. Barcelona: Debolsillo, 2012.
- Institut de Ciències Fotòniques. *Programa LifeLong Learning de Formació per a Professors a l'ICFO*. 2011

Webgrafia

- <http://www.um.es/LEQ/laser/Preface/Toc.htm>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/ligcon.html#c1>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93ptica>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Light>
- <http://curiosidades.batanga.com/2011/05/25/el-experimento-de-la-doble-rendija-de-thomas-young>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_at%C3%B3mico_de_Bohr
- <http://www.clpu.es/divulgacion/bits/que-son-la-emision-espontanea-la-emision-estimulada-y-la-inversion-de-poblacion>
- http://www.fis.utfsm.cl/fis140/El_Laser.pdf
- http://www.ippe.obninsk.ru/podr/tpl/device/lael_a.html
- http://ge-iic.com/files/aplicacionlaser/fundamentos_fisicos_tecn_laser.pdf
- http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/laser_morrillo.pdf
- http://ge-iic.com/files/aplicacionlaser/fundamentos_fisicos_tecn_laser.pdf
- <http://science.howstuffworks.com/laser7.htm>
- <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/factsheets/LASE.html>

- <http://www.lavanguardia.com/ciencia/20141007/54416831597/nobel-fisica-2014-akasaki-amano-nakamura.html>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Diodo>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor>
- <http://oregonstate.edu/ehs/laser/training/laser-types-and-classification>
- http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_types
- http://www.asifunciona.com/fisica/af_diodos/af_diodos_5.htm
- <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Diodos-Semiconductores.php>
- <http://galeon.com/semiconductores/diodos.html>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Rodamina_6G
- http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
- <http://www.troteclaser.com/es-ES/Servicio/Preguntas-Frecuentes/Pages/Seguridad-Laser.aspx>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cronolog%C3%ADa_del_l%C3%A1ser
- http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_applications
- http://lcls.slac.stanford.edu/WhatIsLCLS_1.aspx
- http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/68/440/Add.2&referer=http://www.un.org/en/events/observances/years.shtml&Lang=S
- http://sociedad.elpais.com/sociedad/2013/12/23/actualidad/1387824975_214879.html
- <http://www.icfo.eu/>
- <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=42279>
- http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2004/21jul_llr/
- <http://www.monografias.com/trabajos61/laser-aplicaciones/laser-aplicaciones2.shtml#xapliclaser>
- <http://html.rincondelvago.com/aplicaciones-del-laser.html>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_de_disco_%C3%B3ptico
- <http://phys.org/news/2014-08-world-coolest-molecules.html>
- <http://es.kioskea.net/faq/10558-fibra-optica-funcionamiento-y-rendimiento>
- <http://www.nature.com/nphoton/journal/v8/n11/full/nphoton.2014.243.html>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Comunicaci%C3%B3n_%C3%B3ptica_por_el_espacio_libre
- http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/opals_beams_video/index.html#.VIZzHNWG9A3