

# Els làsers: quaranta anys d'història d'una revolució científica i tecnològica<sup>1</sup>

CARMEN CARRERAS BÉJAR

MANUEL YUSTE LLANDRÉS

Universitat d'Educació a Distància

Des que el 7 de juliol de 1960 es va presentar en societat el primer *làser*, ha suscitat un gran interès no sols en el món científic, també entre el gran públic. Això es deu a l'espectacular desenvolupament que ha provocat en la ciència i en la tecnologia modernes i a les seues aplicacions múltiples en camps molt diversos. En aquest treball pretenem mostrar les propietats del làser i descriure els seus fonaments físics i les seues aplicacions més importants. Per això apareix estructurat en tres apartats que poden ser llegits independentment segons els interessos del lector.

## 1. Què és un làser?

Un làser és un dispositiu que produeix llum amb unes característiques peculiars que el diferencien de les fonts convencionals (el Sol, les bombetes elèctriques, els tubs fluorescents...). Vegem quines són les seues propietats.

### Direccionalitat

En primer lloc, els feixos de llum provinents d'un làser són, en la majoria dels casos, pinzells molt estrets; és a dir, l'energia lluminosa que transporten viatja en línia recta (fotografia 4.a, al final del volum). Aquesta propietat és una diferència important en relació amb el Sol o amb una bombeta elèctrica, els quals produeixen energia lluminosa que viatja en totes les direccions de l'espai.

Si volem il·luminar una estança no hem d'utilitzar mai un làser perquè només és capaç d'il·luminar un punt de la paret on xoca el feix; però, si volem transportar energia lluminosa molt lluny, no hem d'emprar una bombeta elèctrica perquè la seua intensitat (energia per unitat de temps i superfície) disminueix molt a mesura que ens allunyem d'ella. És evident que aquesta propietat peculiar dels làsers pot utilitzar-se per transmetre informació, codificant el feix de llum. Això ha permès el desenvolupament a fons del *tractament òptic de la informació* (comunicacions per fibra òptica). També gràcies a aquesta direccionalitat s'ha desenvolupat la branca de la telemetria que s'anomena *telemetria làser*, entre les mesures més espectaculars de la qual es troba l'estudi de la deriva dels continents i el seguiment de la trajectòria de la Lluna al voltant de la Terra amb una precisió de centímetres en 380.000 Km. D'aquesta manera s'ha pogut calcular que la Lluna s'allunya de la Terra a un promedi de 3 cm per any.

<sup>1</sup> Traducció del castellà d'Adolf Piquer.

## Potència i intensitat

El fet que els làsers puguin produir milers de vats de manera contínua en el temps o bilions de vats en intervals de temps molt curts (al voltant de la mil milionèsima de segon) ha estat emprat en molts processos industrials i en el desenvolupament de tècniques quirúrgiques noves.

D'altra banda, encara en els làsers de potència petita (d'alguns milivats), poder concentrar-la en superfícies molt reduïdes (al voltant del mil·límetre quadrat) proporciona feixos de llum molt intensos ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ). El Sol, la font de llum més potent del nostre entorn (10 bilions de bilions de vats), produeix sobre la superfície de la terra (a 150 milions de Km) una intensitat lluminosa de  $1.350 \text{ W/m}^2$ ; és a dir, semblant a la d'un làser petit de 1mW de potència.

## Monocromaticitat i coherència

Una altra propietat espectacular dels làsers és la seua monocromaticitat. La llum que ix d'un làser té un color molt pur. La seua puresa és major que la que es podria obtenir per qualsevol procediment químic (pintures, tints, pigments...) o que la corresponent a la línia d'emissió atòmica de la qual procedeix. Això és a causa d'una propietat de la radiació làser, la seua coherència, que és la principal responsable de les seues peculiars característiques.

En les fonts convencionals la llum es produeix per emissions atòmiques totalment aleatòries, el resultat de les quals és radiació *incoherent*. És un efecte semblant al que obtenim quan sobre la superfície d'un estany tirem un munt de pedres. Cadascuna d'elles genera la seua pròpia ona que se suma a les altres en cada punt de l'estany, donant lloc a un moviment ondulatori "no regular". Tanmateix, en el cas del làser, de la multitud de transicions atòmiques que es produeixen en el seu medi actiu, sols s'aprofiten aquelles que tenen lloc entre dos nivells atòmics determinats (totes proporcionen el mateix color) i es troben en fase. Tornant al símil de l'estany, és el mateix que succeeix quan llencem les pedres una a una sobre el mateix punt i a intervals de temps regulars. Cada pedra genera una ona que reforça l'anterior i és reforçada per la següent, de manera que el resultat global és una ona perfectament "regular", l'amplitud de la qual és molt gran, molt més que la que genera cada pedra per separat. A aquest tipus de radiació se la coneix com a radiació *coherent*. Entre les ones electromagnètiques sols s'havia aconseguit la coherència en el domini de les ones de ràdio i de televisió, les longituds de les quals són entre deu mil i mil milions de vegades majors que les de la radiació làser. Aquesta propietat ha permès el desenvolupament i ha estat el motor de gran part de la investigació bàsica actual (*espectroscopia làser, holografia, fotònica, ciència de nous materials...*), i en el laboratori d'estudiants permet visualitzar fàcilment la difracció de la llum per objectes molt petits (fotografia 4.b, al final del volum) i la interferència de dos feixos lluminosos (fotografia 4.c, al final del volum).

## 2. Els fonaments físics del làser

La paraula làser prové de les sigles de l'expressió anglesa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificació de la llum per emissió estimulada de la radiació) i conté dos aspectes físics de diferent índole. Un clàssic, l'*amplificació de la llum en una cavitat ressonant*, i un altre quàntic, l'*emissió estimulada de la radiació*. Els descriurem tot seguit.

### L'emissió estimulada

La interacció entre la llum (o una altra radiació electromagnètica) i la matèria (els àtoms) es pot descriure a través de diversos mecanismes, entre els quals cal destacar els processos d'absorció i d'emissió. Per entendre aquests fenòmens es necessari recordar quelcom sobre la matèria i els àtoms. A finals del segle XIX ja se sabia *del tot cert* que la matèria estava composada per àtoms, que eren partícules extraordinàriament petites (deu milions d'àtoms alineats ocuparien escassament un mil·límetre). Constituïen allò que anomenaven *elements químics*, i el químic rus Mendeleiev n'havia classificat prop d'un centenar en el seu Sistema Periòdic dels Elements. Aquests àtoms es podien associar en forma de molècules, enllaçats per forces elèctriques. En els sòlids es trobaven rígidament units, de manera que mantenien la seua forma i el seu volum; en els líquids podien lliscar uns sobre altres, com els grans d'un munt de blat, adaptant la seua forma al cossi que els contenia, però conservant el seu volum; en els gasos, finalment, els àtoms estaven totalment deslligats els uns dels altres, movent-se lliurement en línia recta, topant amb altres àtoms o amb les parets del recinte que els conté i ocupant tot el seu volum. El moviment dels àtoms en el gas és completament caòtic i, precisament, per aquesta raó el químic holandès Von Helmont va batejar els vapors amb el nom de gas, del llatí *chaos* i del grec  $\chi\alpha\omicron\zeta$ .

En aquesta època se sabia també que els àtoms relacionats amb la llum, que eren capaços d'absorbir-la i emetre-la. Aleshores es va establir una branca de la física, l'espectroscopia, que va permetre identificar els àtoms per l'espectre de la llum que emetien en determinades condicions. En estat gasós, els colors que emetia cada tipus d'àtom eren molt purs i servien per diferenciar-lo dels demés, identificant-lo com els codis de barres identifiquen ara els productes.

Per aquell temps (finals del segle XIX) es van fer uns descobriments molt importants que demostraven que l'àtom no era indivisible, com se suposava des de l'època en què el filòsof grec Demòcrit d'Abdera (460-370 a. J. C.) introduís el concepte d'àtom.<sup>2</sup> Els àtoms estaven composts per partícules molt diminutes, enllaçades també per forces de tipus elèctric. El més senzill de tots ells era l'àtom de l'hidrogen, compost per un electró i un protó, dues partícules carregades amb la mateixa càrrega elèctrica, però una positiva (el protó) i una altra negativa (l'electró). La força elèctrica de Coulomb fa que s'atreguin mútuament formant l'àtom. El protó, d'una massa unes 1.836 vegades major que la de l'electró, actua com un sol al voltant del qual es menejaria l'electró com un planeta. Aquest primer model atòmic va ser adoptat pel físic danès Niels H. D. Bohr (1885-1962), que en l'any 1913 va assolir un èxit notable en explicar amb ell les línies de colors

<sup>2</sup> En grec  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron$  significa "sense divisió".

que emetia l'esmentat àtom i predir altres que haurien d'aparèixer en el domini ultraviolat. En el seu estudi va arribar a la conclusió, sorprenent per a la física d'aleshores, que l'electró no podia moure's al voltant del protó en una òrbita qualsevol, com podria esdevenir en un sistema planetari real, sinó que havia de fer-ho en òrbites de radi predeterminats, propis de l'àtom concret. Existia un radi mínim, en el qual l'electró orbitava com més a prop podia del protó i en el qual estava unit a ell de la manera més intensa possible. Es deia que aquest estat, al qual corresponia una determinada energia, era el seu *estat fonamental*. Però existien també altres possibles estats, amb radi cada vegada més grans i amb energies més elevades, en els quals l'electró estava lligat menys intensament al protó, que s'anomenaven *estats excitats*. L'electró podia passar d'una òrbita a una altra de les preestablertes, però no podia moure's en una òrbita de radi intermedi. Llavors es va dir que l'energia corresponent a cadascun dels seus estats estava quantificada.

I ací apareix la relació entre els àtoms i la llum. Quan un àtom passa d'un estat a un altre, pot fer-ho emetent o absorbint radiació lluminosa. En els primers anys del segle, Max Carl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) i Albert Einstein (1879-1955) ja havien utilitzat una descripció de la radiació lluminosa en forma de corpuscles, quanta de llum, que més tard es van anomenar *photons*. En aquesta teoria, quan un fotó (paquet o quàntum d'energia  $h\nu$ , on  $\nu$  és la freqüència de la radiació i  $h$  la constant universal introduïda per Planck) xoca amb un àtom, aquest l'absorbeix si l'energia que transporta coincideix amb la diferència d'energies entre dos dels seus nivells. Abans d'interactuar, l'àtom es troba en un estat d'energia  $E_1$  (veure figura 4.1). Després d'absorbir el fotó  $h\nu$  passa a un estat  $E_2$  d'energia major. Es diu que l'àtom s'ha *excitat*.

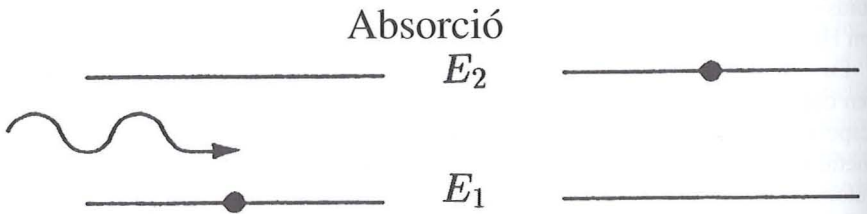


Figura 4.1. Esquema del mecanisme d'absorció.

Quan l'àtom es troba en l'estat excitat  $E_2$  tendeix a *desexcitar-se* de manera espontània descendint al nivell  $E_1$  i emetent un fotó d'energia  $h\nu = E_2 - E_1$  (veure figura 4.2).

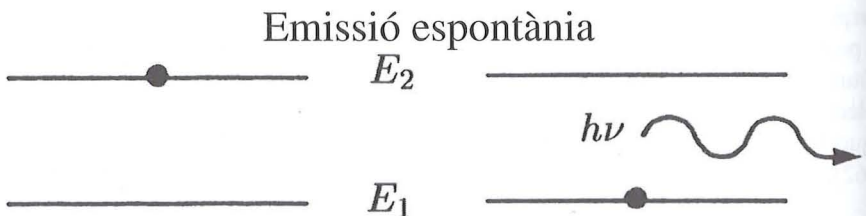


Figura 4.2. Esquema del mecanisme d'emissió espontània.

Aquests dos mecanismes són, en essència, els responsables de la producció de llum (emissió) i de la seua detecció per l'ull o qualsevol altre element sensible (absorció).

D'altra banda, Ludwig Boltzmann (1844-1906) havia establert en la seua mecànica estadística quin era el percentatge d'àtoms corresponent a cada nivell energètic en una col·lectivitat que es trobava en equilibri termodinàmic. En un conjunt d'àtoms s'estan produint contínuament emissions i absorcions d'energia, qualsevulla que sigui la temperatura a la qual es trobi el conjunt. És a dir, sempre hi ha àtoms que es troben en diferent nivell energètic. Però si el conjunt es troba en equilibri termodinàmic; és a dir, si la seua temperatura no varia, el percentatge d'àtoms que tenen un determinat nivell és sempre el mateix, i obeeix a una estadística precisa que va introduir Boltzmann. Quan més alt és l'esmentat nivell, menor és el percentatge d'àtoms que hi ha en ell.

Si augmenta la temperatura del conjunt arribant a un altre estat d'equilibri, es reorganitza la distribució d'àtoms per nivells, augmentant-ne els percentatges en els nivells superiors i disminuint en els inferiors. A temperatures elevades, els àtoms de les estrelles o dels filaments de les bombetes es troben en la seua majoria en estats molt excitats. En la desexcitació emeten fotons de diversa energia, produint així els diferents colors de la llum. Quan l'emissió es produeix de manera espontània la radiació és *incoherent*.

En 1916 Einstein va aplicar aquestes idees a un conjunt d'àtoms i fotons en equilibri termodinàmic, en el qual estaven produint-se contínuament absorcions i emissions de fotons per part dels àtoms, com succeeix en la superfície del Sol. Intentava explicar la llei d'emissió del cos negre que Planck havia establert setze anys abans.

Com que perquè es produeixi el pas d'un àtom del nivell d'energia  $E_1$  al nivell d'energia  $E_2$  és necessari que s'absorbeixi un quàntum  $h\nu$  (veure figura 4.1), el nombre d'absorcions serà major quant més radiació de freqüència  $\nu$  existeixi i quant major sigui el percentatge d'àtoms en el nivell  $E_1$ .

Perquè es produeixi el pas contrari; és a dir, que l'àtom passi del nivell  $E_2$  al nivell  $E_1$  (veure figura 4.2), es podria invocar el principi de Le Chatelier-Braun de la física clàssica que estableix que els sistemes evolucionen espontàniament cap a nivells de mínima energia. Però en el cas dels àtoms era difícil d'admetre que aquest procés es produís sense que hagués cap pertorbació externa. Einstein, amb la seua genial intuïció, va suposar que el mecanisme d'emissió espontània és *totalment aleatori*, tant amb relació a l'instant en què es produeix com amb relació a la direcció en què s'emeteix la radiació.

Aquests dos mecanismes no eren suficients per explicar la llei de Planck, la qual cosa va conduir Einstein a introduir un segon mecanisme d'emissió, que va anomenar *emissió estimulada o induïda* per la radiació. Segons aquest mecanisme (figura 4.3) la radiació

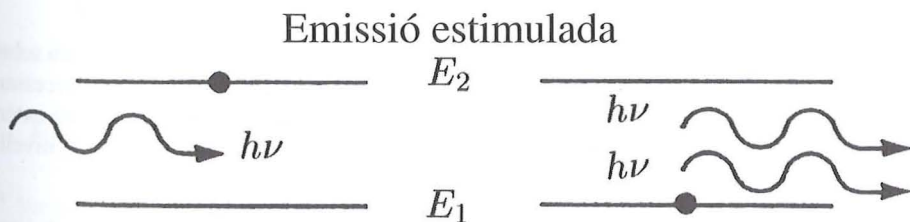


Figura 4.3. Esquema del mecanisme d'emissió estimulada o induïda.

pot provocar també emissions. És a dir, si un fotó pertorba un àtom, existeix una certa probabilitat que l'esmentat àtom canviï de nivell energètic: si es troba en el nivell  $E_p$ , passa al nivell  $E_2$ , absorbint el fotó  $h\nu$  pertorbador; si es troba en el nivell  $E_2$ , passa al nivell  $E_1$ , emetent un fotó  $h\nu$  que acompanya el fotó pertorbador. Això permetia explicar perfectament la llei de Planck.

L'existència del mecanisme de l'emissió estimulada va ser provada experimentalment anys més tard (cap a 1929) pel físic alemany Rudolf W. Lauderburg (1882-1952), i la justificació d'aquest s'emmarca dins de la física quàntica. Amb aquesta teoria es demostra que els dos fotons resultants són absolutament idèntics, de manera que l'ona electromagnètica representativa del fotó emès per l'àtom coincideix en amplitud i fase amb l'ona electromagnètica que presenta el fotó incident; és a dir, les ones associades a ells se sumen, reforçant-se. Així obtenim una ona d'amplitud doble, produint-se un procés d'amplificació de la llum, que és el fonament de la radiació làser. Aquests dos fotons poden produir, si es troben amb altres dos àtoms excitats, altres dos fotons emparellats amb ells, resultant quatre fotons iguals, i així successivament. La radiació que s'obté d'aquesta manera és *coherent*.

### La cavitat làser

Com és natural, per aconseguir que hi hagi emissions estimulades i obtenir així una radiació coherent, amb els avantatges que això comporta, és necessari comptar amb un gran nombre d'àtoms en estats excitats. És de destacar que tant l'absorció com l'emissió estimulada són mecanismes induïts per la presència de radiació (un fotó). Per aquesta raó, ambdós processos competeixen, ja que en augmentar el nombre d'emissions augmenta també el nombre de fotons, que fa que augmenti, al seu torn, el nombre d'absorcions. Aquesta competitivitat fa que el predomini d'un d'ells pugui fer ombra a l'altre.

La teoria elaborada per Einstein ens permet de determinar els percentatges relatius d'absorcions, emissions induïdes i emissions espontànies en les diverses zones de l'espectre electromagnètic. En la següent taula s'indiquen els citats percentatges per certes longituds d'ona de l'espectre solar, des de l'ultraviolat fins les microones, passant pel visible i per l'infraroig.<sup>3</sup>

Regió de l'espectre	Absorcions (%)	Emissions incluídes (%)	Emissions espontànies (%)
ultraviolat	100	~0	~100
visible	100	0,5	99,5
infraroig	100	78	22
microones	100	~100	~0

Com pot veure's, en el cas de l'ultraviolat i del visible, les absorcions dominen sobre les emissions induïdes. Perquè predominin aquestes sobre les absorcions és necessari invertir aquesta tendència de la natura, provocant, mitjançant aportació energètica externa (mecanisme de bombeig) que hi hagi més àtoms en estats excitats que en altres nivells

<sup>3</sup> En tots els casos s'ha assignat el 100% a les absorcions perquè es comparen els percentatges d'emissions i absorcions per cada freqüència en particular.

d'energia més baixa, fenomen conegut com *inversió de població*. Això sols s'aconsegueix en cada làser entre dos nivells ben determinats, la qual cosa selecciona el color de la radiació emesa; és a dir, la seua freqüència  $\nu$  o la seua energia  $h\nu$ .

Encara que per mitjà del bombeig s'aconsegueixi que les emissions estimulades o induïdes predominin sobre les absorcions, també és necessari aconseguir que predominin sobre les emissions espontànies, que es produeixen sempre de manera aleatòria (radiació incoherent). En la taula anterior es pot constatar que en l'ultraviolat i en el visible predominen les emissions espontànies, mentre que en el rang del microones el predomini correspon a les emissions estimulades. Per aquesta raó, la primera amplificació d'ones electromagnètiques per emissió estimulada es va obtenir en aquest domini de freqüències (MASER = Microwaves Amplification by Stimulated Emission of Radiation).<sup>4</sup>

Per obtenir radiació amplificada coherent en els dominis visible i ultraviolat és necessari establir un mecanisme pel qual vagi en augment la quantitat de radiació de freqüència  $\nu$  en un conjunt d'àtoms, però que no variï sensiblement el percentatge d'àtoms en el nivell d'energia  $E_2$ . D'aquesta manera el nombre d'emissions espontànies es manté pràcticament constant, mentre que el d'emissions induïdes augmenta en augmentar la quantitat de radiació.

Això s'aconsegueix introduint el *medi actiu* (conjunt d'àtoms que produiran la radiació làser, per exemple, un cristall de robí, una barreja de gasos...) en una *cavitat ressonant* constituïda per dos espills paral·lels, un d'ells parcialment transparent. Aquest sistema òptic és essencialment un interferòmetre Fabry-Perot clàssic (figura 4.4), proposat pels físics francesos Charles Fabry (1867-1945) i Alfred Perot (1863-1925) a finals del segle XIX.

El medi actiu està generant contínuament radiació, tant per emissió espontània com per emissió estimulada. Qualsevulla de les emissions espontànies pot ser l'origen d'una cadena d'emissions estimulades. La probabilitat que això ocorri en qualsevol punt del

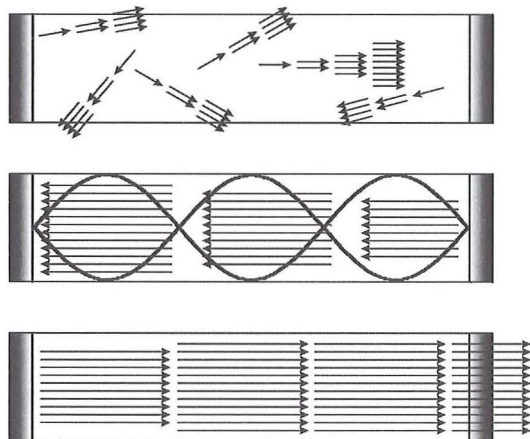


Figura 4.4. Cavitat làser: ressonador òptic Fabry-Perot.

<sup>4</sup> Van ser físics procedents del camp de les microones, com l'americà Charles Hard Townes (1915-) i els soviètics Genadievich Basov (1922-) i Aleksandr Mikhailovitch Prokhorov (1916-) els que van desenvolupar els principis del màser i del làser.

medi actiu i en qualsevol instant de temps és la mateixa. El conjunt d'aquesta radiació seguirà sent incoherent, però en tancar el medi actiu en una cavitat ressonant del tipus Fabry-Perot, seleccionem aquelles cascades d'emissions estimulades que, per múltiples reflexions en els espills, es propaguen segons l'eix d'aquesta (veure figura 4.4). De totes aquestes, sols aquelles que constitueixin una ona ressonant s'amplificaran progressivament (com ocorre amb les ones sonores produïdes per les cordes de la guitarra en la seua caixa de ressonància), aconseguint una amplitud en els ventres de l'ona estacionària diversos ordres de magnitud major que la de les emissions espontànies. Part d'aquesta ona estacionària ix a l'exterior per l'espill semitransparent amb les extraordinàries característiques descrites anteriorment: direccionalitat, potència, intensitat, monocromaticitat i alta coherència.

Amb aquests principis físics s'han construït des de 1960 multitud de làsers amb diferents medis actius i en distints dominis de l'espectre electromagnètic (des de l'ultraviolat fins a l'infraroig). En l'actualitat es disposa de làsers de gas, d'estat sòlid, de colorant..., als quals se'ls ha trobat una gran diversitat d'aplicacions. En la següent taula s'indiquen alguns dels làsers més importants i, a continuació, es descriu el funcionament de dos d'ells: el primer en aparèixer, *làser de robí*, i el més conegut de tots, *làser de He-Ne*.

*Longituds d'ona<sup>5</sup> de les línies d'emissió dels làsers més utilitzats.*

Làser	Medi actiu	Longitud d'ona (µm)	Color
Ar	gas	0,351 1	ultraviolat
		0,457 9	blau
		0,488	blau
		0,514 5	verd
He-Ne	gas	0,632 8	roig
		1,152 3	infraroig
		3,390	infraroig
CO <sub>2</sub>	gas	10,6	infraroig
He-Cd	gas	0,325 0	ultraviolat
		0,441 6	blau
		0,537 8	verd
Kr	gas	0,350 7	ultraviolat
		0,356 4	ultraviolat
		0,461 9	blau
		0,676 4	roig
		0,753 0	roig
		0,799 3	roig
Nd:vidre	sòlid	1,06	infraroig
Nd:YAG	sòlid	1,063	infraroig
Robí	sòlid	0,694 3	roig
GaAs	semiconductor	0,837 (a 4,2 K)	infraroig
		0,843 (a 77K)	infraroig

<sup>5</sup> En la taula venen expressades en micres, µm, que són mil·lèsimes de mil·límetre, i, com pot veure's en ella, totes les llargàries d'ona dels làsers són aproximadament d'aquest tamany. És a dir, si les ones de llum poguessin materialitzar-se com les ones d'aigua en un estany, la distància entre crestes o valls consecutius de llum seria més petita que un microbi o que un glòbul roig.



## El làser de robí

Aquest làser va ser desenvolupat en 1960 per l'enginyer nord-americà Theodore Maiman en els Laboratoris Hughes Aircraft Company en Malibú (Califòrnia). Consisteix en una barra cilíndrica de robí, d'uns 4 cm de llarg i uns 3 mm de secció, amb els extrems polits formant dos plans paral·lels perpendiculars a l'eix. Un d'ells està totalment platejat i l'altre només parcialment, constituint així la cavitat ressonant (figura 4.5).

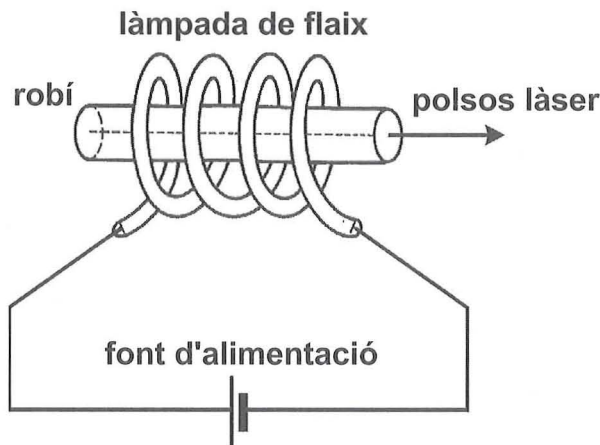


Figura 4.5. Esquema d'un làser de robí.

La barra està envoltada per una làmpada de flaix helicoidal que s'utilitza per al bombeig. El medi làser és un cristall de coridó ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que conté impureses del ió  $\text{Cr}^{+++}$ . Aquest ió substitueix en la xarxa cristal·lina al ió  $\text{Al}^{+++}$  en la proporció 5 ions de  $\text{Cr}^{+++}$  per cada 10.000 de  $\text{Al}^{+++}$ . El ió  $\text{Cr}^{+++}$  inserit en la xarxa cristal·lina absorbeix la llum visible en dues bandes amples, una en la zona blava i l'altra en la verda (veure figura 4.6), que corresponen a transicions de l'estat fonamental (estat de més baixa energia) a estats

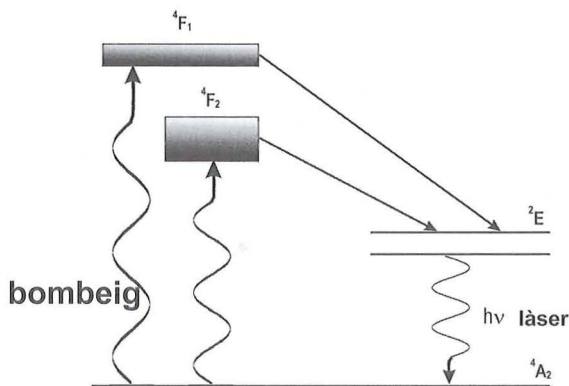


Figura 4.6. Nivells energètics del ió  $\text{Cr}^{+++}$  que intervien en la línia d'emissió del làser de robí.

excitats. Amb la làmpada de flaix, durant intervals de temps petits, de l'ordre del milisegon, es proporcionen les radiacions de blau i de verd necessàries perquè es produeixin les transicions. Els ions així excitats es relaxen ràpidament de manera no radiativa a un estat metaestable, en el qual romanen diversos milisegons abans de desexcitar-se i passar a l'estat fonamental.

Si la llum de la làmpada de flaix és suficientment intensa s'aconsegueix que més del 50% dels ions  $\text{Cr}^{+++}$  siguin bombejats als nivells excitats i, com per relaxació pràcticament el 100% decauen a l'estat metaestable, s'aconsegueix *inversió de població* entre l'esmentat estat i l'estat fonamental. Tot aquest procés per aconseguir la inversió de població es coneix com *bombeig òptic*. Entre el nivell metaestable i el nivell fonamental es desencadena el procés d'emissió estimulada, obtenint-se la radiació roja característica del làser de robí. Com el bombeig es produeix de manera polsant, les condicions d'inversió de població sols es mantenen durant el curt interval de temps que dura el pols i així, l'emissió del làser de robí és, també, polsant. La duració del pols és de 2 deumil·lèsimes de segon. Aquest és un làser de potència amb el qual es pot obtenir entre 0,25 i 2,5 kW/pols.

### El làser de He-Ne

Aquest és el làser que comunament s'utilitza en els laboratoris d'alumnes. Va ser desenvolupat per A. Javan en els Laboratoris de la Bell Telephone en 1961. El medi làser està constituït per una barreja d'heli i de neó, en una proporció de set àtoms d'heli per un de neó, tancat en un tub de descàrrega de quars, a una pressió baixa (una centèsima d'atmosfera). El tub té un diàmetre d'uns pocs mil·límetres i una llargada que varia entre 10 i 50 cm (figura 4.7).

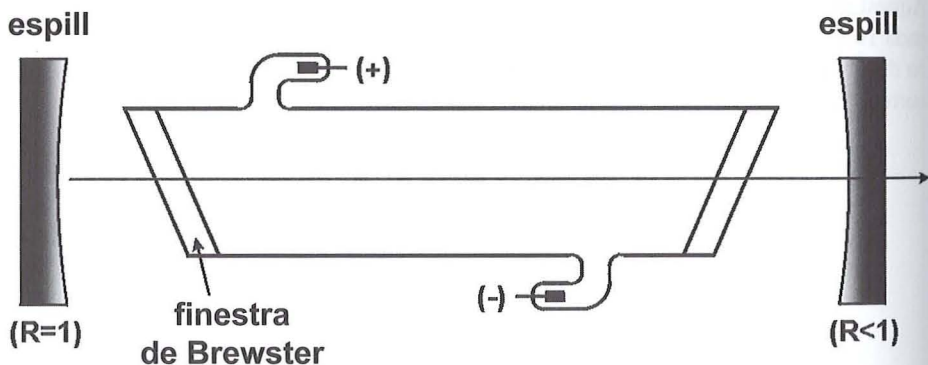


Figura 4.7. Esquema d'un làser He-En.

Els nivells d'energia involucrats en l'emissió làser pertanyen a l'àtom de neó i estan esquematitzats en la figura 4.8.

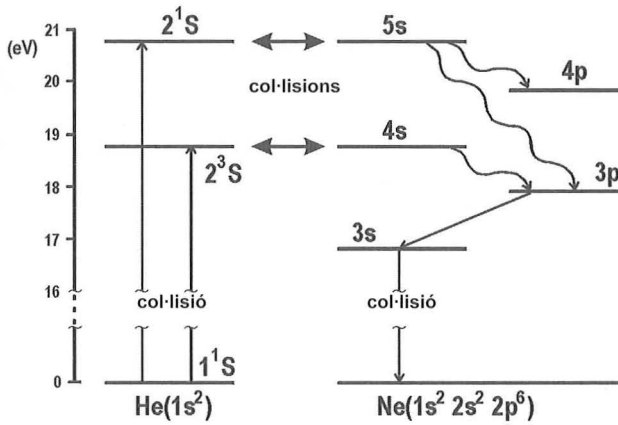
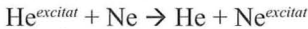


Figura 4.8. Nivells energètics dels àtoms d'heli i neó que intervenen en la línia d'emissió d'un làser de He-Ne.

Aplicant una tensió elèctrica contínua entre l'ànode i el càtode d'uns 1.000 a 1.500 V es produeix un corrent d'electrons d'uns 10 mA. Els electrons accelerats xoquen preferentment amb els àtoms d'heli, fent que aquest passi del seu nivell fonamental a diferents estats excitats per absorció d'energia en col·lisió. D'entre ells, l'àtom roman en dos estats més temps que en els restants per ser metaestables.

Quan els àtoms d'heli excitats en un d'aquests nivells col·lionen amb els de neó que es troben en l'estat fonamental es produeix una absorció d'energia en ressonància. Això es deu a que existeixen dos nivells del neó que tenen la mateixa energia que els anteriorment citats de l'heli, produint-se la reacció:



Aquests estats tenen una vida mitja de l'ordre de  $10^{-7}$  s. Per sota d'ells existeixen dos nivells d'energia els temps de vida dels quals són de l'ordre dels  $10^{-8}$  s; és dir, deu vegades menor, per la qual cosa s'aconsegueix la inversió de població entre ells.

La línia més coneguda i utilitzada és la línia roja<sup>6</sup> de llargada d'ona 0,632 8 mm. L'amplada d'aquesta línia pot arribar a ser molt petita (una deubilionèsima de micra), més de cent mil vegades menor que la de les línies espectrals més fines (els colors més purs) dels tubs de descàrrega. Amb aquest tipus de làsers s'ha redefinit la unitat de longitud (el metre) i en l'actualitat s'està proposant redefinir la unitat de temps (el segon) a partir dels làsers, amb els quals s'ha aconseguit obtenir una precisió superior a la dels rellotges atòmics. En la pròxima Conferència General de Peses i Mesures aquesta qüestió segurament eixirà a debat. D'aquesta manera els làsers jugaran un paper importantíssim en la metrologia.

El règim de treball dels làsers de He-Ne és continu. La seua potència està limitada a uns 100 mW. Per damunt d'aquest valor apareixen problemes d'estabilitat seriosos.

<sup>6</sup> En l'actualitat existeixen altres radiacions làser de He-Ne compreses entre el verd i el roig, però perquè es produeixin necessiten un major afegit energètic (bombeig) i la seua intensitat és menor.

### 3. Aplicacions més importants

És impossible descriure ací totes les aplicacions dels làsers, no sols pel seu nombre sinó per la varietat de camps en què la seua utilització ha suposat un gran avanç tant tecnològic com científic (veure esquema de la figura 4.9). Hem seleccionat aquelles que, al nostre parer, representen millor les possibilitats reals d'aquesta nova eina científica.

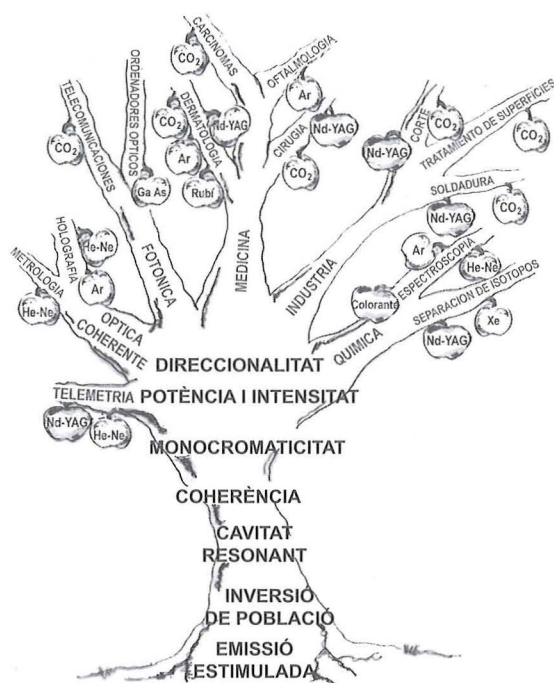
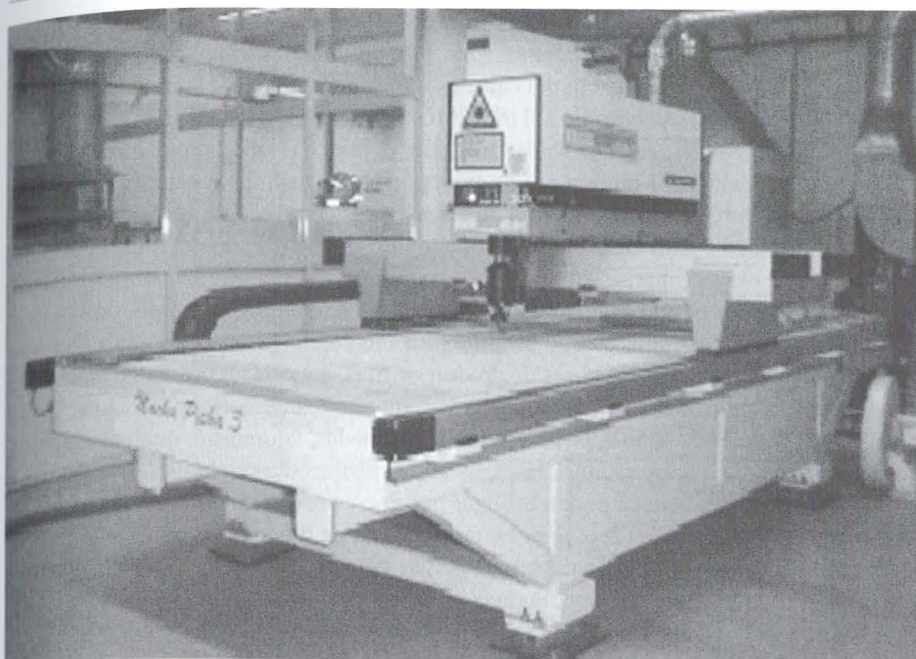


Figura 4.9. Línies d'investigació que l'existència dels làsers ha permès iniciar i desenvolupar.

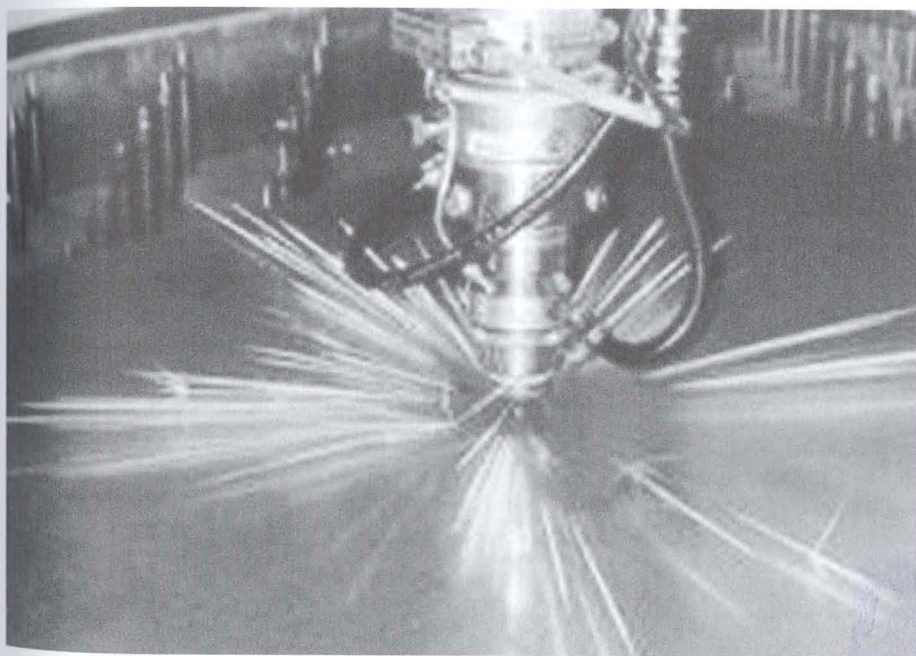
#### El làser en la indústria

El làser s'utilitza en la indústria per tallar, taladrar, soldar i gravar, tant materials durs (acer, diamant...) com blans (teles, ceràmiques, plàstics...). S'utilitzen làsers potents amb sistemes òptics de precisió per focalitzar el feix, realitzant el control de moviments automàticament per ordinador. Dels làsers utilitzats en les aplicacions industrials cal destacar el làser de  $\text{CO}_2$  i els de Nd:vidre i Nd:YAG.

En particular, el làser de  $\text{CO}_2$  és molt adequat per tractar metalls. Aquests, en estat sòlid, reflecteixen la major part de l'energia emesa pel làser ( $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ). Tanmateix, si són sotmesos a altes temperatures, passen fàcilment a un estat líquid, canviant dràsticament la seua capacitat d'absorció. Aquest fenomen és el que ens permet utilitzar el làser per taladrar o soldar els metalls (veure figures 4.10 i 4.11).



*Figura 4.10. Tall amb làser.*



*Figura 4.11. Taladre amb làser.*



S'aconsegueix això tant amb làsers que treballen en règim continu com polsant, concentrant el feix amb lents escaients. Una part del metall es vaporitza, formant una petita cavitat en ell. La dissipació del calor és molt ràpida. Baixant la potència del làser es deixa de produir la vaporització i el metall fos reompli la cavitat. Només passa el feix, se solidifica immediatament. Les soldadures làser es poden fer molt ràpidament, en punts o zones molt localitzats i amb una gran penetració. A causa de la seua extraordinària precisió es poden realitzar treballs fora de l'abast de les eines convencionals.

Per tallar metalls amb làser el procés que té lloc és una reacció del metall (evaporat per làser) amb oxigen, que se subministra coaxialment. El tall és efectuat per l'oxigen, mentre que el làser el que fa és mantenir la reacció. L'avantatge d'emprar el làser per tallar o taladrar els metalls és que produeix un tall fondo, net i estret amb una zona mínima afectada pel calor. En el cas de produir orificis, aquests no presenten les rebaves típiques del taladrat mecànic. Si es controlen automàticament els moviments, bé del làser bé de les peces a tallar o taladrar, amb un ordinador, la precisió, qualitat i rapidesa que proporcionen aquests sistemes làser els fan insubstituïbles en la indústria moderna.

De la mateixa manera es poden utilitzar per gravar caràcters en peces de qualsevol proporció. En aquest cas, el feix làser no té necessitat de travessar el material. Des d'un ordinador s'indiquen tant els caràcters a gravar com la proporció, tipus d'impressió, velocitat, profunditat, etc. De nou, la precisió de l'operació ha fet que la seua utilització amb aquesta finalitat sigui massiva.

Aquests treballs amb metalls que hem descrit breument també poden fer-se en materials molt blans o que baden fàcilment, tot canviant només la potència del feix, la velocitat del procés...

Per últim, també s'aplica el làser en la indústria del tractament tèrmic de superfícies. Un exemple típic és l'enduriment per transformació. Consisteix a escalfar el material per sota de la temperatura de fusió, temprar-lo i solidificar-lo, distribuint uniformement el carbó present en el material. És en essència un procés d'autotemprat: l'energia del feix làser penetra en el material per elevar ràpidament la seua temperatura, posteriorment es refreda ràpidament i adquireix gran duresa.

### **El làser en medicina**

Els diferents tipus de làser han trobat multitud d'aplicacions en medicina. Les més importants es troben en el camp de la cirurgia. Per a la seua utilització en aquesta branca és necessari tenir en compte les corbes d'absorció de l'hemoglobina i de l'aigua, que venen indicades en la figura 4.12. En ella estan assenyalades també les línies dels làsers més emprats comunament, que són essencialment les línies blava ( $0,488 \mu\text{m}$ ) i verda ( $0,5145 \mu\text{m}$ ) del làser d'argó i les infraroges de  $1,06 \text{ mmm}$  del làser de Nd-Yag i de  $10,6 \mu\text{m}$  del de  $\text{CO}_2$ .

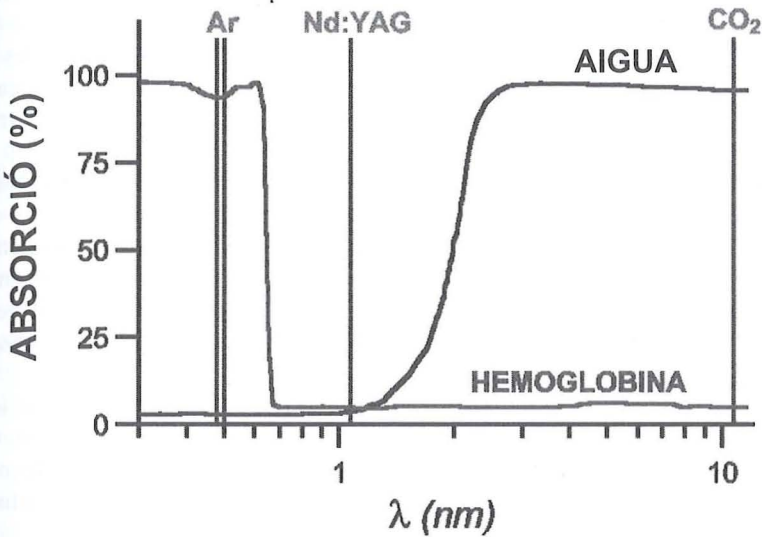


Figura 4.12. Espectres d'absorció de l'hemoglobina i de l'aigua.

Per sota de  $0,6 \mu\text{m}$  l'hemoglobina absorbeix quasi el 100% de la llum, per la qual cosa, els làsers que emeten en aquesta regió (Ar, Kr...) són molt adequats per als processos de coagulació de la sang en les hemorràgies superficials (trencament de glòbuls rojos i danys en les parets dels vasos sanguinis).

Entre  $0,6 \mu\text{m}$  i  $1,5 \mu\text{m}$  ni l'hemoglobina ni l'aigua absorbeixen molta quantitat de llum, per la qual cosa els làsers que operen en aquesta zona poden penetrar en els teixits fins les profunditats de l'ordre del mil·límetre. Això permet la seua utilització per a la coagulació en el cas d'hemorràgies internes més abundoses.

A partir de  $2 \mu\text{m}$  l'aigua absorbeix molt, per la qual cosa el làser de  $\text{CO}_2$  és emprat per a provocar l'evaporació, dessecant i destruint els teixits,<sup>7</sup> malgrat que a causa de la forta absorció la penetració del làser es limita a unes  $50 \mu\text{m}$ . Dos exemples de com s'empra aquesta propietat del làser de  $\text{CO}_2$  en la microcirurgia són el tractament dels carcinomes de les cordes vocals i del coll d'úter. Es vaporitza el carcinoma amb el làser sense danyar els teixits sans del seu voltant, el que representa l'enorme avantatge de l'absència d'edema postoperatori, per la qual cosa la curació es fa molt més ràpida i en condicions òptimes. Com el làser de  $\text{CO}_2$  és invisible, es focalitza la zona a irradiar amb l'ajut d'un làser de He-Ne i d'un sistema microscòpic.

Com les aplicacions dels làsers en el camp de la Medicina són innumbrables, indiquem a continuació sols algunes de les més usuals fent esment, a més, dels làsers que en elles s'empenen.

<sup>7</sup> L'aigua és el constituent més abundant dels teixits (del 80% al 90%).

- En oftalmologia s'utilitzen els làsers d'argó, kriptó, de colorant i excimer per tractar el despreniment de retina, la retinopatia diabètica, els tumors intraoculars, la correcció dels defectes oculars...

- En endoscopia, la utilització dels làsers (CO<sub>2</sub>, Ar i Nd-YAG) junt amb les fibres òptiques flexibles ha permès explorar més profundament els bronquis, les cavitats pulmonars, l'aparell digestiu..., i fer el diagnòstic i el tractament de tumors, hemorràgies, carcinomes...

- En ginecologia, els làsers de CO<sub>2</sub> i de Nd-YAG s'empren per a la cirurgia intrauterina i per al tractament de lesions de la vulva i de la vagina.

- En dermatologia s'usen els làsers d'argó, robí, CO<sub>2</sub> i de colorant, per al tractament de taques, angiomes, tatuatges... Encara que els làsers de He-Ne i de GaAs s'estan emprant en els salons de bellesa per tonificar i estirar la pell ("lifting"), des del punt de vista científic no es poden considerar provats els beneficis que pregona la seua propaganda (veure fotografia 4.d, al final del volum).

- En otorinolaringologia s'empra fonamentalment el làser de CO<sub>2</sub> per tractar les lesions de laringe, la cavitat bucal, la llengua, el nas, els oïts i la faringe.

- En neurocirurgia s'empren els làsers de robí, CO<sub>2</sub>, Nd-YAG i argó per fer estudis clínics de minigiomes, de lesions del cervell, de l'espina dorsal, de malformacions vasculares, efectes de l'anestèsia i de la teràpia per fotorradiació.

- Finalment, també s'utilitza el làser en altres tipus de cirurgia com ara la cardiovascular (recanalització arterial, revascularització del cor i cirurgia intracardíaca), la urològica (tumors de veixiga, càlculs renals...), la dental...

Com pot veure's, en aquest camp de la Medicina és on la humanitat ha rebut els majors beneficis del descobriment de la radiació làser. No obstant, la seua utilització ha de ser controlada per especialistes i és necessari extremar les precaucions en treballar amb aquests aparells, sobretot en relació amb els accidents que poden afectar la visió.<sup>8</sup> Per aquesta raó s'ha establert una reglamentació per al seu ús i existeixen una sèrie de senyals de perill que han de posar-se en lloc visible en els laboratoris i centres de treball en què s'empren làsers. Els usuaris han d'usar ulleres protectores per evitar els reflexos de la llum làser al llarg del seu recorregut.

## L'holografia

L'holografia va ser descoberta pel físic hongarès Denis Gabor (1900-1979) cap a 1948, encara que el seu desenvolupament no es va produir fins l'aparició dels làsers, fonts de llum coherent.

L'holografia és un mètode de registre d'imatges que permet la *reproducció* en relleu, en tres dimensions, d'un objecte utilitzant les interferències produïdes per dos feixos de llum coherents: un de *referència*, que prové directament d'un làser, i un altre, anomenat *objecte*, que prové de la llum reflectida per l'objecte que ha estat il·luminat amb el mateix làser.

<sup>8</sup> Ja l'any 1977 es va registrar el primer accident d'aquest tipus: un reflex de làser polsat de làser de Nd-YAG de 6 mJ i 10 ns de pols va produir una hemorràgia interocular en la retina.



Quan l'holograma (placa sobre la qual s'ha enregistrat la figura d'interferències) s'il·lumina amb el feix de referència, s'obté una imatge de l'objecte tan convincent que sembla que aquest està suspès en l'espai per davant, per darrere i, fins i tot, travessat en la placa hologràfica; i l'observador pot tenir la falsa aspiració de voler tocar-lo amb la mà.

Per *enregistrar*<sup>9</sup> un holograma es treballa de la següent manera (veure figura 4.13): el feix que procedeix d'un làser es divideix en dues parts amb un divisor de feix. Tenim així dos feixos que, a través d'espills i d'expandidors, farem coincidir sobre una placa o pel·lícula hologràfica. Un d'ells és l'anomenat feix de referència i porta la informació de la font de llum coherent utilitzada (un làser de He-Ne, per exemple). L'altre il·lumina l'objecte del qual volem obtenir un holograma. La llum reflectida per ell ha d'incidir també sobre la mateixa placa hologràfica. Quan aquests dos feixos arriben a la placa, un d'ells conserva la seua forma original, el de referència, però l'altre ha estat "deformat" per l'objecte. És a dir, ja no estan en fase i es produeixen interferències. La llum reflectida per l'objecte haurà recorregut diferents camins òptics des de les seues diferents parts. A cada punt de la placa arriba llum de totes elles i en cadascun dels esmentats punts "s'enregistra" una panoràmica diferent de l'objecte. És a dir, en cada punt de la placa hologràfica hi ha "informació" de tot ell. Per aquest motiu, quan es trenca una placa hologràfica cadascun dels trossos segueix contenint imatges completes de l'objecte, encara que amb perspectives diferents.

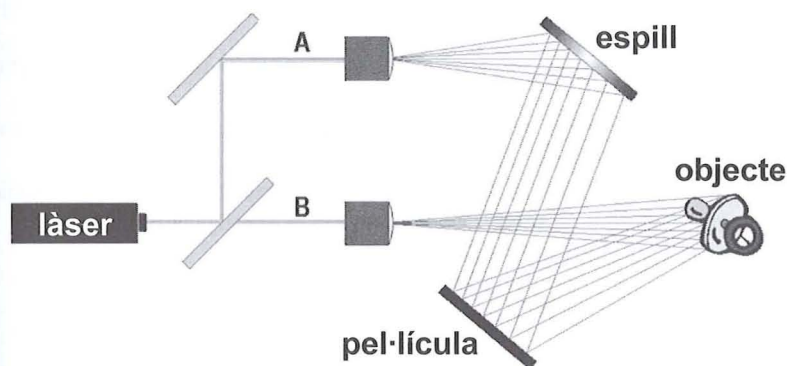


Figura 4.13. Dispositiu experimental per al registre d'un holograma.

La placa hologràfica és sotmesa a continuació a un procés químic, equivalent al revelat de la pel·lícula fotogràfica, per "fixar" la figura d'interferències. Posteriorment és il·luminada amb el mateix feix de referència amb què va ser enregistrada i s'observa una imatge tridimensional de l'objecte. Si algú es mou davant de l'holograma veu imatges d'ell en diferents perspectives, cosa que és impossible d'obtenir amb una fotografia.

<sup>9</sup> Es diu així al procés d'enregistrament de la figura d'interferències sobre un determinat material, una placa hologràfica.

Tanmateix, els hologrames no reproduïxen fidelment el color, i la imatge final depèn del color del làser amb què es va il·luminar l'objecte. Les imatges multicolor s'obtenen utilitzant làsers de diferents colors i enregistrant la figura d'interferències successivament sobre la mateixa placa.

Les tècniques hologràfiques han anat desenvolupant-se progressivament des de l'aparició dels làsers, tant en l'augment dels materials per a l'enregistrament hologràfic i pels diferents tipus de registre i de reconstrucció<sup>10</sup> com per la diversitat de làsers.

L'alta monocromaticitat dels làsers i, conseqüentment, el seu alt grau de coherència els fa imprescindibles per a l'obtenció d'imatges hologràfiques d'alta qualitat. Per aquesta raó, els làsers més emprats en holografia són els de gas, que posseeixen les línies més estretes.

També va en augment el número d'aplicacions de l'holografia. Entre elles destaquem les següents:

- Codis de barres dels productes, que porten informació sobre el citat producte i el seu preu, i que han permès fer el balanç d'existències i el seu cobrament de manera ràpida i segura en els grans supermercats.

- Control de peces mecàniques en la indústria, a través d'un mètode anomenat *càmera hologràfica*. Permet detectar defectes interns sense necessitat de deteriorar la peça o, en el cas de sistemes perillosos, com és el nucli d'un reactor nuclear d'una central elèctrica per exemple, es pot verificar l'existència de clivelles o avaries.

- Targetes de crèdit de seguretat. S'utilitzen hologrames enregistrats per impedir la seua falsificació.

- Comprovació de les tensions o deformacions que pateix un objecte (un pneumàtic o un pot de cervesa).

- Com a material d'arxiu. Ocupa molt poc d'espai i pot acumular gran informació. La seua utilització s'està generalitzant en biblioteques, arxius, hospitals...

- En museus, sales d'exposició..., per reproduccions de joies, relíquies, peces úniques..., que poden ser deteriorades o robades si estiguessin exposades al públic.

- Com anuncis publicitaris cridaners, i un llarg etcètera.

## El làser en química

En els darrers vint anys, la química s'ha vist afavorida en el seu desenvolupament en el coneixement profund de l'estructura dels àtoms i molècules gràcies a l'aplicació dels làsers en espectroscòpia.

L'extraordinària monocromaticitat d'aquesta radiació ha permès fer espectroscòpia d'alta resolució, en la qual intervenen tècniques òptiques com ara les interferometries Michelson i Fabry-Perot, la difusió Brillouin i Raman, que, si bé ja havien estat emprades en el passat, la utilització del làser com a font de llum ha potenciat enormement. Així, per exemple, s'han pogut estudiar amb molta precisió els estats vibracionals i rotacionals de les molècules, els temps de vida dels diferents estats excitats...

<sup>10</sup> Existeixen diferents tipus d'hologrames, d'imatge real o virtual, obtinguts per reflexió o per transmissió, de color real o fals, hologrames d'arc iris, múltiples...

D'altra banda, l'enorme intensitat que es pot aconseguir amb els làsers, unida a la seua monocromaticitat, ha servit perquè es produeixin les reaccions químiques de manera òptima. La radiació emesa pel làser proporciona l'energia d'activació al reactant perquè pugui tenir lloc la reacció, però, a més, l'anàlisi espectral de la interacció entre la radiació làser i els productes químics permet seguir la reacció i estudiar-la en les seues diferents fases.

Un altre exemple important de l'aplicació del làser en química el constitueix la separació dels isòtops. Els nuclis dels àtoms estan composts per protons (càrregues elèctriques positives) i per neutrons (partícules amb una massa lleugerament superior a la dels protons, però sense càrrega elèctrica). Un àtom queda perfectament definit indicant el nombre d'electrons que giren al voltant del nucli, que és igual al nombre de protons, per la qual cosa l'àtom és neutre. Per cada àtom existeixen diverses possibilitats pel que fa al nombre de neutrons. Aquesta circumstància dóna lloc a l'existència d'isòtops, àtoms amb el mateix nombre de protons i, per tant, d'electrons, però amb diferent nombre de neutrons. Exemples en són el  $\text{Co}^{60}$  utilitzat en oncologia, el  $\text{U}^{238}$  en els reactors nuclears, etc. El  $\text{Co}^{60}$  es troba en la natura en una proporció molt petita, barrejat amb el  $\text{Co}^{59}$ , majoritari, i altres isòtops. Per la seua utilització és necessari separar-lo de la resta. La forma més elemental que ha estat ja experimentada consisteix a separar els isòtops per desviació sota camps magnètics o elèctrics. Per això s'ajusta a la longitud d'ona d'un làser sintonitzable de manera que exciti sols un dels isòtops presents en un feix atòmic d'una determinada espècie. L'esmentat isòtop en estat excitat posseeix distintes propietats elèctriques i magnètiques que les posseïdes en el seu estat fonamental, per la qual cosa pot ser desviat de manera diferent als demés isòtops que no han estat excitats (veure figura 4.14).

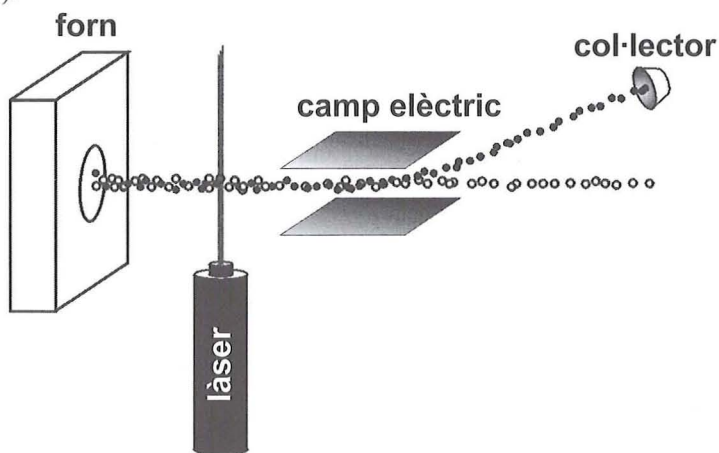


Figura 4.14. Separació d'isòtops amb làser.

Una altra manera de desviar els isòtops per separar-los consisteix a sotmetre'ls a un raig làser intens, de manera que mentre el travessen un dels isòtops pugui absorbir, reemetre per fluorescència, tornar a absorbir, i així successivament molts fotons i experimentar al final un canvi en la seua quantitat de moviment fins desviar-se fora del feix original.

Un altre mètode de separació dels isòtops amb làser consisteix a dissociar les molècules d'un feix en què un dels components té un sol isòtop i l'altre component dos isòtops. Només es dissocia la molècula d'un d'ells i, en trencar-se l'enllaç químic, l'isòtop dissociat es desvia.

Finalment, una altra tècnica de separació d'isòtops amb làser, aplicable a àtoms neutres, consisteix a excitar primerament un dels isòtops amb làser d'alta monocromaticitat per, una vegada excitat, ionitzar-lo amb altres làsers; és a dir, aportar-li un excés de càrrega positiva o negativa. Un cop ionitzat l'isòtop, es fa passar el feix per un camp elèctric intens, que el desvia, quedant en el feix sols l'isòtop no ionitzat. Aquesta tècnica ha estat emprada per enriquir un feix de  $U^{238}$ , separant d'ell el  $U^{235}$ .

### La fotònica

El desenvolupament dels làsers de semiconductors ha fet sorgir un nou camp tecnològic que s'anomena fotònica. En ell, els fotons estan cridats a jugar un paper semblant al que juguen els electrons en l'electrònica.

Ja hem assenyalat que els àtoms es troben rígidament units en el cas dels cossos sòlids. Però aquesta rigidesa no significa immobilitat. Els àtoms estan vibrant al voltant de les seues posicions d'equilibri, apropant-se i allunyant-se dels seus veïns, a causa de les forces elèctriques que els uneixen. Dins dels àtoms, els electrons també estan movent-se al voltant dels seus respectius nuclis, però alguns d'ells, els més allunyats del seu nucli atractor, poden ser "compartits" pel nucli d'un àtom veí, establint l'enllaç necessari perquè el sòlid mantingui la seua estructura. Aquests electrons tenen un moviment limitat espacialment i els valors de la seua energia es troben compresos en una banda contínua, anomenada *banda de valència*, que és característica del sòlid en qüestió. Si a aquests electrons se'ls comunica energia suficient, poden passar a un estat de moviment molt més lliure en el cos sòlid, desplaçant-se al seu través si se'ls sotmet a l'acció d'un camp elèctric. La banda d'energia que correspon a aquest cas s'anomena *banda de conducció*, i els seus valors són més elevats que els de la banda de valència. No pot haver electrons en el sòlid que tinguin una energia compresa entre les dues bandes. A la zona intermèdia se l'anomena *zona prohibida*. En els semiconductors aquesta última zona és molt estreta, en comparació amb la dels aïllants, per la qual cosa resulta relativament fàcil fer passar electrons de la banda de valència a la de conducció i viceversa.

El funcionament dels làsers de semiconductors està fonamentat en les propietats de les unions p-n. En els semiconductors de tipus-p hi ha una manca d'electrons en la seua banda de valència (excés de "forats"), mentre que en els de tipus-n hi ha un excés d'electrons en la banda de conducció. Quan es fa créixer sobre un substrat una pel·lícula de semiconductor de tipus-n seguida de una altra de tipus-p, en la zona d'unió entre les dues es creen parelles electró-forat a causa de l'excés d'electrons d'una banda i al de forats de l'altra. Si s'aplica una diferència de potencial amb l'elèctrode positiu (que atrau les càrregues negatives dels electrons) en la zona p (on manquen aquests) i el negatiu en la zona n, s'afavoreix la recombinació electró-forat provocant l'emissió de fotons d'energia  $h\nu$  igual a la diferència d'energies entre la banda de valència i la de conducció del semiconductor. Aquests fotons poden induir altres recombinacions electró-forat i, a partir d'un determinat corrent lliurar, la unió p-n actua com un petit làser.

El desenvolupament experimentat en els darrers anys en el domini del creixement de pel·lícules semiconductores mitjançant la tècnica d'epitaxia de feix molecular ha possibilitat la fabricació de microlàzers de dimensions de l'ordre de la micra. En la epitaxia del feix molecular el substrat on es farà créixer la pel·lícula es troba en un recinte amb un buit molt elevat. El recinte està connectat amb una sèrie de dipòsits en els quals es troben emmagatzemats els diferents tipus d'àtoms que formaran part de la pel·lícula. Van obrir-se les diferents portes que donen pas als diversos àtoms i així va produint-se la cristallització de la capa prima. La tècnica necessita d'uns controls extraordinàriament sofisticats i d'un grau de netedat molt elevat per evitar la contaminació dels productes, però es poden aconseguir créixer capes l'espessor de les quals sigui el corresponent a un sol àtom. Això ha permès fer, a banda dels microlàzers, guies de llum, amplificadors òptics i detectors de proporció micromètrica. Amb ells s'han iniciat els treballs per a la construcció d'ordinadors òptics, en els circuits dels quals els fotons reemplacen els electrons. Els avantatges que s'esperen obtenir es fonamenten, essencialment, en la major velocitat de transmissió de la informació a través de les guies de llum i en la major quantitat d'informació transmesa al mateix temps (unes mil vegades més) sense que es produeixin fenòmens d'interferència.

En els darrers anys han experimentat un enorme avanç els estudis teòrics i pràctics sobre les anomenades *nanoestructures*, en els quals les dimensions dels elements són encara menors. Corresponen a les dimensions dels àtoms i a les de les distàncies que els separen en els sòlids, que són entre mil i deu mil vegades menors que la micra.<sup>11</sup> Això obri encara més aquest fascinant camp i planteja problemes en els quals la física quàntica (pous quàntics, fils quàntics, gotes quàntiques) té el paper predominant. En l'actualitat, la teoria en aquest camp camina junt amb la tecnologia, fins i tot va obrint-li camí a aquesta. Com a dada curiosa, el cor d'un lector de discs compactes és un làser de pou quàntic, el cost de fabricació del qual deu estar en l'actualitat per un valor inferior al mig dòlar.

### En resum...

L'escassa imaginació de cineastes, literats i dibuixants de contes infantils en tractar els temes científics ha presentat el làser, quasi amb exclusivitat, com una espasa flamígera, eina de destrucció i càstig. Tanmateix, el làser és, per damunt de tot, un tema científic de gran riquesa conceptual, que ha permès un desenvolupament espectacular de la ciència en els seus quaranta anys d'història, i un instrument tecnològic de primer ordre de gran profit per a la humanitat.

### Agraïments

Els autors volen agrair el Professor García Moliner per haver-los convidat a realitzar aquesta col·laboració i pels seus encertats suggeriments per donar-li el seu caràcter divulgatiu actual. Així mateix, volen expressar el seu agraïment a Juan Pedro Sánchez per la seua inestimable ajuda en la presentació de les fotografies i figures.

<sup>11</sup> S'utilitza per mesurar-les una nova unitat de distància, l'Angstrom (Å) que és una deumil·lèsima de  $\mu\text{m}$ .