

# Elektroi askeen laserra: gainikuspena

J. Iturbe

Kimika Fisikoko Saila. Zientzi Fakultatea  
Euskal Herriko Unibertsitatea. Leioa, Bizkaia

## Abstract

*The synchrotron radiation associated with an accelerated electron beam spans a wide range of frequencies from microwaves to the far ultraviolet. It is possible to work this radiation and create a unique kind of lasers, the so-called free-electron lasers (FEL).*

*The different parts of these lasers are presented:*

- (1) Electron accelerators as source of radiation*
- (2) Wigglers as undulators*
- (3) Resonant cavity as in classical lasers*

*The FEL beam power, monochromaticity, tunability and other features give a broad field in both pure and applied research. Just only from the chemical point of view, the study of transientes, vibrational photochemistry, selective excitation, two-color experiments, surface studies, new materials, and catalysis are just a few of the areas that can be successfully revisited with this new and powerful tool.*

Oak Ridge-n Elektroi Askeen Laserrean ere inziatu ninduen Rafael Pérez-i adiskidetasunez.

b) Erradiazio elektromagnetikoak, materia eszitatua bilakaera aztertzea ahalbidetzen du.

## SARRERA

### Erradiazio elektromagnetikoa

Kimikarientzat, erradiazio elektromagnetikoa —argia— da materiaren eta erreakzioen oinarriak aztertzeke ezinbesteko tresna.

Tresna honek bi alde desberdin ditu:

a) Erradiazio elektromagnetikoak iturriaren informazioa ematen du: emisio-espektroak, adibidez.

Horregatik oso beharrezko da kimikarientzat erradiazio elektromagnetikoa eta honen iturriak aztertzea.

### Erradiazio elektromagnetikoaren iturriak

Erradiazio elektromagnetikoaren iturriak oso ugari dira, eta era askotara sailka daitezke. Espektro elektromagnetikoaren zatiketaren arabera hiru mota bereiz daitezke:

uhin luzeak	
uhin ertainak	
uhin laburrak	
mikrouhinak	eskualde azpioptikoa
infragorria	— 1 mm
ikuskorra	eskualde optikoa
ultramorea	
X izpiak	— 100 nm
$\gamma$ izpiak	
izpi kosmikoak	eskualde gainoptikoa

- Eskualde azpioptikoaren ataleko iturriak.
- Eskualde optikoaren ataleko iturriak.
- Eskualde gainoptikoaren ataleko iturriak.

Kimikariontzat hiru eskualdeak dira interesgarri, ebatzi nahi den problemaren arabera, baina batez ere eskualde optikoa da interesatzen zaiguna.

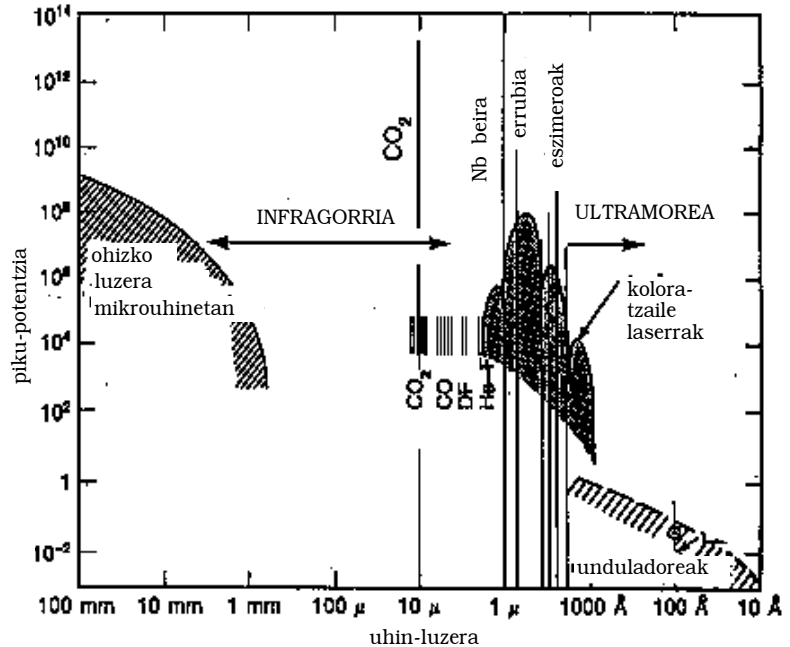
Iturriak, bestalde, hiru ataletan bereiz daitezke, halaber, espektro elektromagnetiko osoa betetzen dutelarik:

- Iturri "klasikoak"  
Erradiazio ez-koherentea ematen dutenak.
- Laserrak  
Erradiazio koherentea ematen dutenak.
- Sinkrotroiaren erradiazio-iturriak

Partikula kargatuek azeleratzean emititzen duten erradiazio elektromagnetikoa egozten duten iturriak.

Azken erradiazio-iturri hauek kimikariontzat berri xamarra dira, baina hona hemen oraintsu agertutako bi liburuk zer dioten:

"The vacuum ultraviolet region is an important one, at last for gas-phase photochemistry, because many highly energetic processes can occur, including those involving higher excited states and photoionization. Light sources for this region are generally poor, particularly since continuum sources whose spectral distribution approaches anything like that of a black body at accessible temperatures has negligible output. Low-pressure discharge sources exist, but they produce specific, generally atomic, spectral lines. An exception is provided by synchrotron radiation. Electrons are accelerated in circular orbits to a velocity approaching that of light. The laws of electromagnetism require that radiation be emitted, and the resulting



synchrotron radiation is a structureless continuum spanning the X-ray region to the infrared. The beam is well collimated, and can thus be dispersed with a monochromator to give a narrow band output of high intensity. The radiation is also produced in bursts, with pulse lengths as short as 100 ps, so that timeresolved experiments are possible.”

Richard P. Wayne, in “Principles and Applications of Photochemistry”, p. 159, Oxford U.P., Oxford (1988).

“For certain applications, synchrotron radiation from a synchrotron storage ring is appropriate. A synchrotron ring consists of an electron beam (actually a series of closely spaced packets) travelling in a circle of several meters in diameter. Since accelerated charges emit radiation, and electrons travelling in a circle are being constantly accelerated by the forces that constrain them to their path, the beam emits radiation. The emitted radiation spans a wide range of frequencies, up to and including the far ultraviolet, and in all except the microwave region is much more intense than can be obtained by most conventional sources. The disadvantage of the source is that it is so large and costly that it is essentially a national facility, and not a laboratory commonplace.”

P. W. Atkins, in “Physical Chemistry”, 4th ed., p. 461, Oxford U.P., Oxford (1990)

Aipatutako testu biek gauza asko iradokitzen dituzte, baina, oraingoz, honakoa aipatuko da: hiru eskualdeetako erradiazio-iturriek, nahiz eta espektro elektromagnetiko osoa bete, ez dute berdin betetzen.

a) Iturri klasikoek espektro osoa betetzen dute, baina ultramo-

rean eta gainoptikoan arazo larriak dituzte.

- b) Laserrek, eskualde azpioptikoa (maserrak) eta eskualde optikoaren atal bat betetzen dute (eta oso ondo gainera).
- c) Sinkrotroiaren erradiazioak, berez espektro elektromagnetiko osoa betetzen du, baina era ez-koherentean.

Ondoko irudian ikus daiteke argi-iturri koherente eta intentsoak zein eskualdetan dauden; gaur egun zientzilariei gehien interesatzen zaizkien iturri-motak, alegia.

Hori ikusita, galdera sortzen da: posible al da sinkrotroiaren erradiazioa erabiliz, I Gan eta UMan (eta uhin-luzera txikiagoetan) agertzen diren hutsuneak “laser potente, koherente eta sintonizagarriez betetzea?”

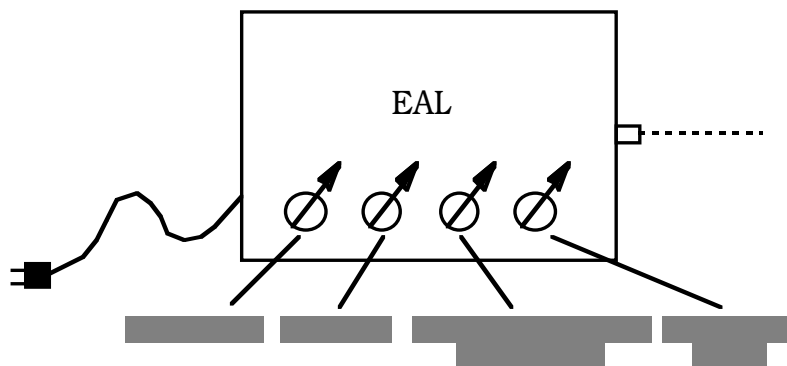
Galdera horren erantzuna baiezkoa da, 1977.ean Madey-k elektroien askeen laserraren bidez frogatu zuenez.

## OINARRIAK

Elektroien askeen laserra aztertzeko hiru hurbilketa-mota egin daitezke:

- a) Kutxa beltzaren hurbilketa
- b) Hurbilketa deskriptiboa
- c) Hurbilketa sakona

Lehen hurbilketaren arabera, laser hau honela ikus dezakegu:



Hurbilketa hau da gero eta gehiago erabiltzen dena; erabiltzailetik hurbilen baitago.

c. motako hurbilketa hitzaldi baterako gehiegizkoa da, eta kimikari xume batentzat ere bai, zeren laser-mota honek alor askotako adituak batzen baititu (fisikariak, kimikariak, material-zientzilariak, teknikariak, teorikoak, ...)

Beraz, hurbilketa hau ez da hemen egingo. Hurbilketa deskriptibo hutsa egingo da, eta Bibliografian ematen diren artikuluen bidez, sakonago non aztertu badago.

Hurbilketa deskriptiboa. Laser honek hiru atal ditu:

- A. Partikula kargatu eta azeleratu batek erradiazio elektromagnetikoa emititzen du. Beraz, elektroiz azeleragailu bat behar da.
- B. Erradiazio elektromagnetikoa "hezi" egin behar da, horretarako unduladore bat, "bihurtzaile" bat, "wiggler" bat, erabiltzen da.
- C. Hutsune baten bidez, barrunbe edo erresonadore baten bidez, laserra lortzen da.

Eta deskribapenari hasiera emateko formula bat jarriko da, formula bakar bat, baina deskribatzean elektroiz askeen laserra asko erraztuko duena.

$$\lambda_L \cong \frac{\lambda_w}{\gamma^2}$$

$\lambda_L$ : laser-argiaren uhin-luzera.

$\lambda_w$ : wiggler-aren, unduladorearen ezaugarri bat, gero ikustekoa, baina zentimetro gutxi batzuetakoa ohi dena.

$\gamma$ : elektroien energia, elektroien geldiuneko energi unitatetan adierazita (0,511 MeV).

Ikusten denez,  $\lambda_L$ , elektroien energiaren menpekoa da. Ideia bat izateko, 100 MeV-eko energia duten elektroientzat, eta  $\lambda_w = 2$  cm izanik,

$$\lambda_L \cong \frac{\lambda_w}{\gamma^2}$$

hots, espektroaren alde ikuskorrean emititzen da.

#### A. Azeleragailuak

Aurreko formula horrek ematen du zein magnitudeetako energiak behar diren. Bestalde, elektroiz-azeleragailuetan elektroien energia alda daiteke, eta, beraz, uhin-luzera ere jarraikero alda daiteke.

Uhin-luzera mikrouhinetatik ikuskorrera sintonizatu nahi bada,  $\lambda$  L-aren tarte 10.000 ingurukoa da (mikrouhin uhin-luzerak, 0,1 m ingurukoak dira, eta ikustorrean  $10^{-5}$  m ingurukoak). Beraz, elektroien energiak bi magnitude-ordenatan aldatu ahal izan behar dira.

Gaur egun, elektroiz-azeleragailuak era askotakoak dira. Hona hemen, laburki, ezagunenak.

##### a) Induziozko azeleragailu linealak

Ezaugarriak:

energia,  $E < 3$  MeV  
uhin-luzera,  $\lambda > 9$  mm  
elektroi-intentsitatea oso altua (850 A)  
Potentzia oso altua  
Efizientzia oso altua (% 45)

IR hurbileraino erabil daiteke, baina elektroiz-sorta kolimatzea zaila denez, ezin da uhin-luzera laburretan erabili. Argi-iturri bezala baino gehiago, kanpo-argi baten aplikadore bezala erabiltzen da. Bestalde, hemen aipatuko diren beste azeleragailu guztiak, osziladore bezala, argi-iturri bezala dute erabilpena.

##### b) Van de Graaff azeleragailua

Ezaugarriak:

energia,  $E = 3 - 6$  MeV  
uhin-luzera,  $\lambda = 100 - 400$   $\mu$ m  
Erresoluzio oso ona du.

c) Mikrotroia. RF azeleragailua

Ziklotroiaren antzeko elektro-azeleragailua da, txikiagoa eta erabilgarriagoa, besteekin konparatuta.

Ezaugarria:

uhin-luzera,  $\lambda = 30 \mu\text{m}$

Elektroi-sortak ezegonkortasunak ditu, baina ehundaka wattetako potentziak egozten ditu kalitate oneko erradiazio bezala.

d) RF azeleragailu lineala

Ezaugarriak:

uhin-luzera,  $\lambda = 9 - 35 \text{ m}$

pultsuak, 10 kW-ekoak

100 ms-koak

efizientzia = % 2, baina erabilitako energia-ren % 70 birziklatu egin daiteke.

Sorta optikoaren kalitatea oso ona, teoriokoarekin ia bat.

Etorkizun oso ona dute honela lortutako laserrek.

e) Azeleragailu gaineroalea

Ezaugarriak:

uhin-luzera,  $\lambda = 2,6 - 3,1 \mu\text{m}$

(harmonikoeekin ikuskorra ere lortzen da)

pultsuak, 2  $\mu\text{s}$ -koak

Oso potentzia altuak

Etorkizun ona dute.

f) Eratzun elektroimetatzaileak

Ezaugarriak:

Uhin-luzera laburrenak (ikuskorra, UM)

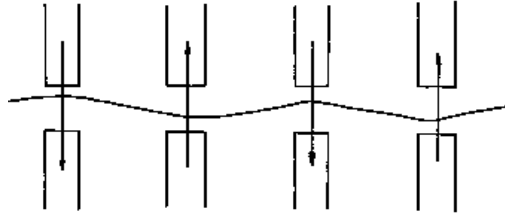
Oso egonkorak (egunetan lan egin dezakete)

Oso kalitate oneko sortak sortzen ditu.

Oso etorkizun ona dute.

B. Unduladorea / Wiggler-a (bihurtzailea)

Elektroi batek, bere ibilbidean poloak alternatuta dituzten imanen artean joanarazten bada, ibilbide undulatua egingo du, eta elektroiarekin asoziatuta doan fotoiaren uhin-luzera imanek determinatuko dute.



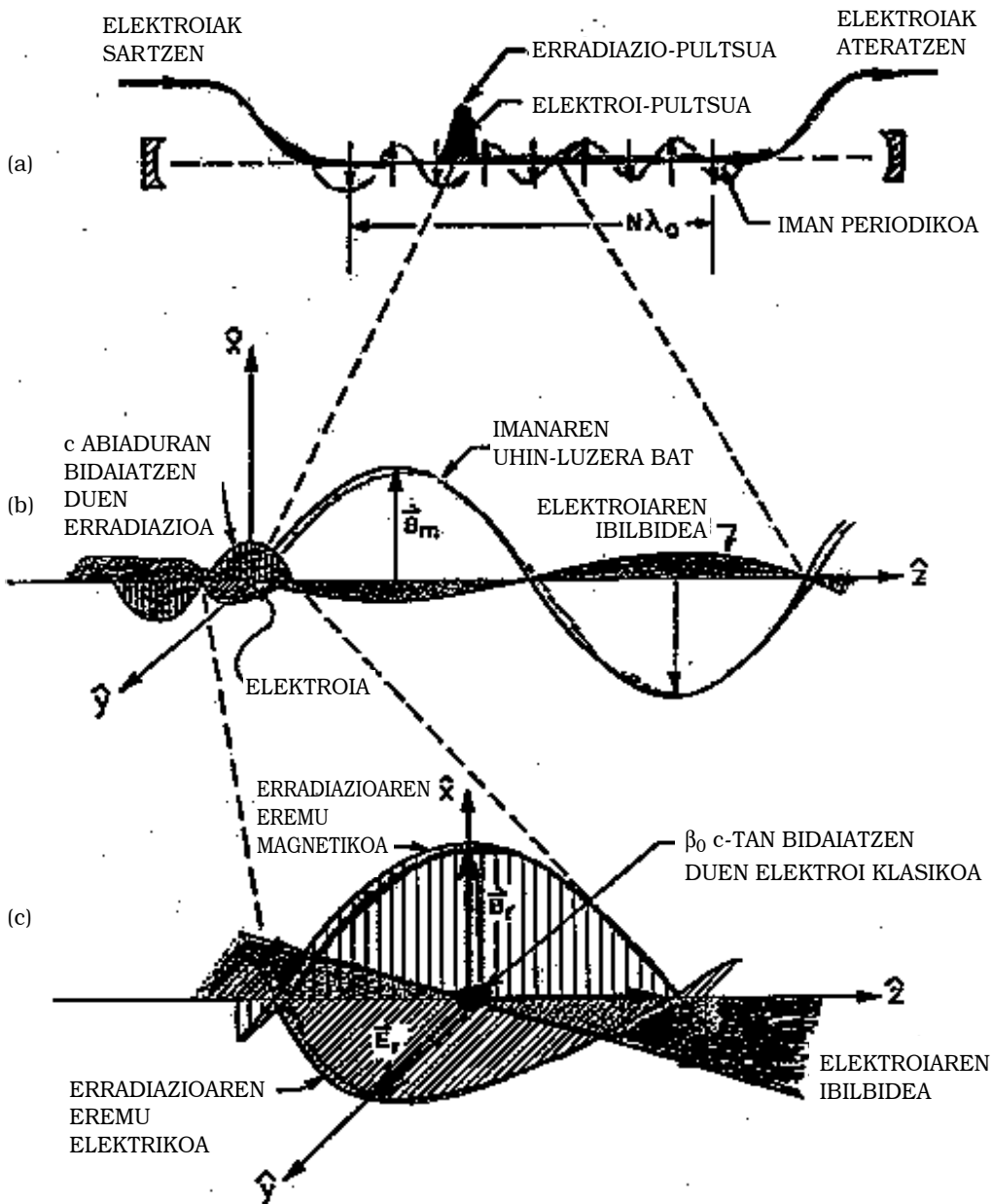
Horregatik, gorago emandako formularen  $\lambda_w$ -arekiko uhin-luzeraren dependentzia agertzen da, eta beronen balioa lehen hurbilketan imanen arteko distantzia da, ohizko distantzia 2 cm-koa delarik.

Unduladorearen barruan zer gertatzen den ikusteko, ondoren datorren irudia ikus daiteke, eta bertan ikusten da elektroioaren eta eremu elektromagnetikoaren egitura. Elektrodinamikak oso egoki adierazten du teorikoki wiggler-aren barruan zer gertatzen den.

C. Hutsunea (barrunbea, erresonadorea)

Laser efektua lortzeko ispiluak jartzea nahikoa izango da. Hemen ere teorikoki gauzak zertxobait nahaspilatu egiten dira, zeren eremu elektromagnetikoak eta elektroioi-sortak elkarri ekiten baitiote, uhin-luzera bakar bat eta koherentea lortzeko. Baina bai teorikoki, era korapilotsu batez, eta bai esperimentalki, laser efektua lortu da. Laser efektua lortzeko ispilu batek isladaren osoa eduki behar du, eta besteak partziala, horren laser-argia lortzen delarik.

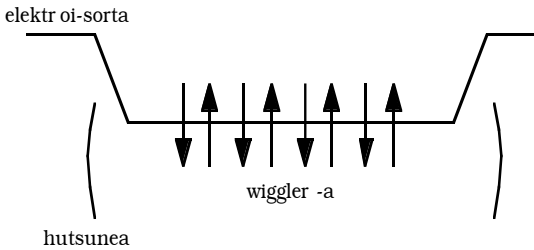
Kontutan hartu ispiluen materiala uhin-luzeraren arabera aldatu egin behar dela eta infragorrian, ikusgarrian, ultramorean eta X



izpien eskualdean material desberdinen trasmintantziak oso desberdinak direla. Halaber, potentziak hain handiak direnez, material egoki gutxi daude horrelako hutsu-

neak egiteko, eta material berriak sortu egin behar dira uhin-luzera askotarako.

Laburki, elektroi askeen laserraren ezau-garriak hauek dira:



unduladorearen luzera:	$L = 5 \text{ m}$
unduladorearen uhin-luzera:	$w = 5 \text{ cm}$
unduladorearen eremu-indarra:	$B = 3 \text{ kG}$
elektroi-sortaren intentsitatea:	$I = 1\text{--}1000 \text{ A}$
elektroien energia:	$E = 50 \text{ MeV}$
elektroi-sortaren tamaina:	$r = 1 \text{ mm}$
hutsunearen luzera:	$S = 10 \text{ m}$

## APLIKAZIOAK

Argi-iturrien artean laserrak agertzeak iraultza eragin zuen, eta iraultza horren ondorioak gero eta gehiago nabari dira.

Baina laserrak oraindik mugak dituzte, eta kimikarioroi interesatzen zaizkigun aplikazioetan hona hemen bi: bata, laserren uhin-luzerak IG hurbilean, ikuskorrean, eta zertxobait ultramorean daude, nonbaiten lerro zenbaitzuen salbuespenarekin, baina IR ertainean, UMan eta X izpien eskualde hurbilean ez dago argi koherenterik, eta behin baino gehiagotan horren gabezia sentitu izan da.

Bestea, laserrek potentzi mugak bat dute; beroaren eliminazio-abiadura. Laserretan materia eszitatzean, beroa absorbatu egiten da, eta material lasergarria suntsi ez dadin beroa askatu egin behar da. Gas-laserretan bakarrik da posible energia erraz askatzea, baina hauetan dentsitatea oso baxua da, eta horregatik ezin da potentzia alturik lortu. Elektroi askeen laserretan energia hori elektroiek eraman egiten dute, eta ez dago potentzi mugarik (edo, behar bada, potentzi mugak askoz urrutirago eraman da).

Horrela, uhin-luzeren tarteen hedapenak eta potentziaren arteagotzeak erabilpen-pila bat ahalbidetuko du. Laserren ganean esan

zenaren ondoren (hots, problemen zain dagoen ebatzia dela) orain, elektroi askeen laserraz honakoa esan daiteke: muga bakarria ikertzailearen irudimena dela.

Gauza konkretuagoak esanda, aplikazioak bi multzo nagusitan bereiztuko dira: infragorrian eta ultramorean. Espektrorik elektromagnetikoaren beste ataletan, laserrek eta maserrek egiten dutena areagotu egiten du elektroi askeen laserrak, baina dagoeneko eskualde horiek nahikoa landuta daudenez, erabilpen berriak ez dira horrenbeste izango.

Ultramorean —eta X izpien eskualdean— laserra egitea da gaur egungo problema. Beraz, ikerkuntzan gaur egun laserra egiteko behar diren materialak eta egiturak diseinatzea eta jartzea da problema. Hala ere, aurrakuspenak oso onak dira eta oso potentzia altuko eta oso pultsu-denbora laburreko pultsuak lortuko direla espero da. Eskualde honetako aplikazioak uhin-luzeraren menpekoak izango dira, noski, eta biokimika, kristalografia, egoera solidoa, eta abar aprobetxatuko dira martxan.

Infragorrian izan ditzakeen aplikazioak askoz ere zehatzagoak dira, zeren laser batzuk martxan baitaude jadanik, eta, bestalde, aplikazio desberdinen arabera diseinatzen ari dira beste batzuk munduan zehar. Kontutan hartu esperimendu guztietarako nahikoa malgua litzatekeen laser bakarria ez dela egongo. Adibidez, batzuetan oso pultsu laburrak nahi izango dira (pikosegundokoak) eta beste batzuetan pultsu luzeak edo emisio jarraia. Batzuetan FELa nahikoa izango da esperimendu bat egiteko, baina beste batzuetan beste ekipamendu batekin lotuta joan beharko du eta FEL/laser arrunta edo FEL/sinkrotroia edota FEL/FEL konfigurazioak beharko dira.

Edonola ere, hemen zenbait ikerketa aipatuko da:

a) Trantsienteen ikerkuntza

Kimikaren alorra tartekari erreaktiboz, energetikoz eta ez-egonkorrez gainezka dago,

hauen bizitza-denborak pikosendotatik mikrosegundorarte hedatzen direlarik, salbuespenak salbu. Tartekari hauetako buruzko informazioa lortzeko biderik aproposena laser infragorria da. Gaur egungo iturriek, CO<sub>2</sub>-laserrak, CO-laserrak, Raman desplazamenduko laserrek, eta antzekoek, problema asko dituzte (egonkortasuna, eskuragarritasuna, sintonizagarritasuna, ...). Adibide espezifikokoak:

- Erradikal aske organikoak
- Erradikal aske ez-organikoak
- Tartekari organometalikoak -katalisi homogenoa, ...
- Van der Waals multzoak (clusters)
- Cluster metalikoak eta adsorbatoak

#### b) Fotokimika bibrazionala

Sintonizagarritasunak eta pultsu-iraupeko laburtasunak, fotoi infragorri bakarraren fotokimika eta prozesu multifotonikoak ahalbidetzen dute. Gainera, absortzioaren ondoko denbora-bilakaera posible da aztertzea. Gaur egungo laserren batek egin dezake fotokimika-mota hau, baina ikerketa sakonagoak eta hedatuagoak egiteko, errepikapen-abiadurak (hots, pultsu kopurua/denbora unitatea) oso baxuak dira eta FELak gaindi dezake problema hori.

#### c) Eszitazio selektiboa

FELak bibrazio-modo bat selektiboki popula dezake, eta honen bilakaera denboran

zehar aztertzea posible izango da. Horrela erreazio kimikoaren prozesua askoz hobeto ulertzeko ahalmena izango da.

#### d) Disoziazio-espektroskopia

Kontzentrazio baxutan dauden espezieak determinatzeko erabili daiteke, absortzio-metodo arruntak erabili ezin direnean. CO<sub>2</sub>-laserra erabili izan da horretarako eta oso komenigarritzat jotzen da beste uhin-luzeretan erabiltzea.

#### e) Bi koloreko esperimentuak

IRFELaren erabilpen ugari bi kolore, hots, bi frekuentzia desberdin, erabiliko dituzte. Lehen koloreak, prozesu bat eragingo du edo egoera molekular bat sortuko du, eta bigarrenak, lehenarekin sinkronizaturikoak lorturiko egoera detektatu edo aztertuko du, aldi berean edo denbora bat pasatu ondoren. Pikosegundotako pultsuek ahalbidetuko dute fluoreszentziaren eta fotoionizazioaren ondorengo prozesuak pikosegundoko denbora-eskaletan neurtzea.

#### f) Materialen ikerkuntza

Gainazalen gainean gertatzen diren prozesuak oso garrantzitsuak dira gaur egun kimikan, bai teorikoki eta bai praktikoki: katalisia, adsortzioa, eta abar. Material berezien sintesiak ere potentzia handiko laserrak eskatzen ditu.

## BIBLIOGRAFIA

1. RABEK, J. F., "Experimental Methods in Photochemistry and Photophysics", John Wiley and Sons, Chichester, UK (1982).
2. BRAU, C. A., "Recent Developments in Free-Electron Lasers", Laser Focus, 40-46 (1987).
3. BRAU, C. A., "Free-Electron Lasers", Science, 239, 1115-1120 (1988).
4. LEVI, B. G., "Free-Electron lasers take small steps towards distant goal", Physics Today, 17-19 (June, 1987).
5. "Report of the Workshop on Scientific Opportunities for Infrared Free-Electron Lasers", Materials and Chemical Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, February, 1989.