

Egoera solidoko fisikaren alderdi esperimentalak

J. M. Barandiaran

UPV/EHU Zientzi Fakultatea
Elektrika eta Elektronika Saila

Abstract

Solid State Physics has experienced a tremendous growth in the second half of the century, incorporating to every day life new materials and phenomena. In this work we summarize the various techniques currently used for preparing materials as well as for studying their structure and physical properties. Special attention is paid to spectroscopic methods using both electromagnetic fields and particle beams. Some topics are: Low frequency Electric and Magnetic Susceptibility, Magnetic Resonance, Optical Spectroscopy, X-Ray scattering, Mössbauer Spectroscopy, Electron and Neutron Scattering, Positron Annihilation and Muon Depolarization.

Materiala lortzeko prozedurek (monokristala, xafla mehea, fase metaegonkorra, etab.) geroko aplikazioak mugatzen dituzte.

Material berria lortu ondoren, bere propietateak eta egitura ikertzea ezinbestekoa da. Alde batetik, pentsaturiko aplikazioetara egokitzeko eta hainbatetan egokitzapen honen ahaleginak enpirikoki eginez, berrikuntza interesgarriak aurkitu dira. Bestalde, propietate eta egituraren ikerketa; materiaren jokoerari buruzko ezagutza zabaltzeko aukera bakarra da, hots, materiaren jokoerari buruzko teoria eta ereduak frogatzeko edo baztertzeko bide bakarra da. Azken finean, behar edo eraiki nahi diren material berriak aurre-sateko edo diseinatze oinarria da.

Material berriak prestatzea

Materialak prestatzeko ondoko metodoak aipa ditzakegu laburki:

- a) Metodo tradizionalak: materia-kopuru makroskopikoen erreakzio "kimikoetan" oinarrituak. Ondoko mota desberdinak ditugu:
 - 1) Disoluzio bidez sorturiko fase likidoko erreakzioak: hauetariko batzuek, kontrolaturiko hauspeaketaz monokristalak lortzeko dira; kontrolik gabekoak eta azeleratuak, kristalizazioa oztopatuz amorfoak lortzeko dira.
 - 2) Estalketa elektrolitikoak: oso teknika sinplea da eta industrian oso hedatua

Sarrera

Azken urteotan, eta bereziki Bigarren Mundu-Gerraren ondoren, egoera solidoaren fisika bultzada handiz garatu da. Garapen honen ondorioz mikroelektronikaren aurrerapenak, eraikuntza aeronautikarako material berriak, forma-oroimeneko materialak, amorfoak, quasikristalak, etab. etorri dira. Kasu gehienetan jarraituriko ikerketa-prozedura nahikoa sinplea da: lehenik materialaren prestaketa eta ezaugarripena konposizio, homogenotasun eta abar luze bati buruz. Gaur egun material berriaren prestaketa ez da ezagutzen ez den konposizioetara murrizten.

dago elementu batzuen purutasuna lortzeko eta materialak merke estaltzeko.

- 3) Urturiko fase likidoaren erreakzioa: beharrezkoa monokristal metalikoak eta erdieeroaleak prestatzeko; baita erai-kuntz aleazio berriak, solidotze arinez prestatuturiko amorfo metalikoak, etab. lortzeko ere.
- 4) Sinterizazioa: oso garrantzitsua ondoko materialak prestatzeko: material zerami-koak, ferritak, YBaCuO motako superre-roaleak, etab. Hautsen metalurgian ere asko erabiltzen da.

b) Metodo atomikoak: atomoen arteko elkar-errekintzan oinarrituak daude eta metodo tradizionalak baino zentzu "fisikoagoa" dute. Hauetariko prestaketa-metodoak lurrin-keta, birrintze katodikoa (sputtering), sorta molekularretako edo fase likidoko epitaxiak, etab. dira. Metodo hauek maila atomikoko egiturak lortzeko aukera ematen dute. Adibide modura AsGaAl-AsFa egiturako erdieeroaleen putzu koantikoak, edo propietate magnetiko berriak dituzten geruzanitzak ditugu. Material hauek, materiaren egitura berriak dira; naturan aurkitu ezinezkoak, hain zuzen ere.

eragingarriei materiaren erantzuna mugatzean datza. Konbinazio posibleak antiz dira eta 1. irudian adierazitako batzuk falta daitezke. Termoluminiszentziaren kasuan adibidez, erradiazio ikuskorraren igorpena tenperatura altxatzean neurtzen da eta ez dago erreakzio erasotzailerik. Kalorimetriaren kasuan, berriz, tenperatura altxatzeko ekoiztu beharreko energia termikoa ikertzen da.

Erradiazio elektromagnetiko erasotzailea partikula modura trata daiteke. Fotoia dugu orduan. Solidoa ikertzeko partikulak, berriz, mota askotakoak izan daitezke. Kasu guztietan sorta eratzzailea gutxi-asko mugaturiko energiaren eta momentuaz (E, \mathbf{p}) emanik dator (monokromotasuna). Elkarrekintzaren ondoren irtetzen den sortak E' energia eta \mathbf{p}' momentua du. Beraz, laginari energia eta momentua transferitu egiten zaizkio.

- a) Energi transferentzia $\hbar\omega = E' - E$
- b) Momentu transferentzia $\hbar\mathbf{q} = \mathbf{p}' - \mathbf{p}$

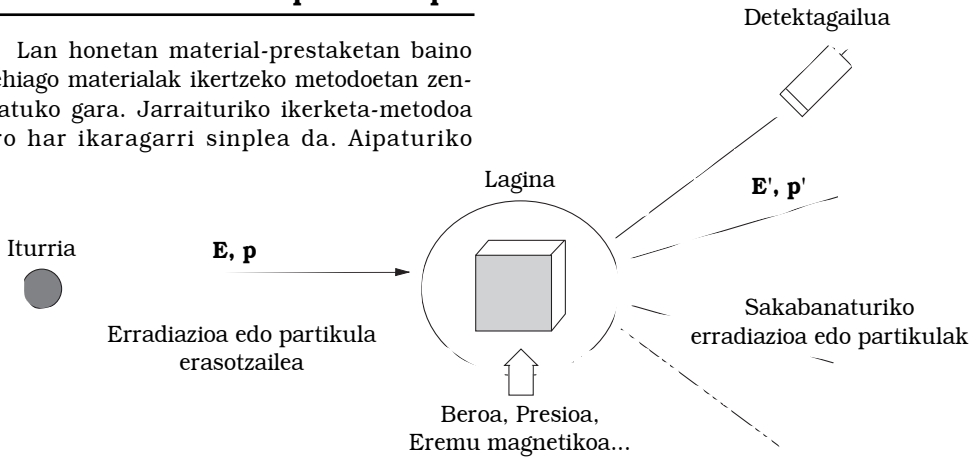
Materian gertaturiko prozesuen lehen sailkapena, energiari dagokiona izan daiteke:

Prozesu elastikoak: energi transferentziarik gabekoak; $E' = E$

Prozesu inelastikoak: energi transferentzia sortzen dutenak; $E' \neq E$

Solidoen espektroskopia

Lan honetan material-prestaketan baino gehiago materialak ikertzeko metodoetan zentratuko gara. Jarraituriko ikerketa-metodoa oro har ikaragarri sinplea da. Aipaturiko



1. irudia.

Aukera guztien sailkapena egitea gure helburuetatik at dago. Hala ere, eremu elektromagnetikoa eta partikulen bonbardaketa erabiltzen dutenetan bide luzean bidaiatuko dugu. Teknika-mota hauek **espektroskopia** izenaz ezagutzen dira eta neurri mekaniko edo kalorimetrikoekin erlazio txikia dute.

1. Eremu elektromagnetikoak

Eremu elektromagnetikoa erabiltzen duten teknikek, propietate estatikoetatik γ erradiazioetaraino doaz. Beraz, tartea oso zabala da.

1.1. Eremu estatikoak

Eremu elektriko edo magnetikoa (**E** edo **H**) aplikatzean materia polarizatu edo magnetizatu (**P** edo **M**) egiten da. Eroaleak aztertzen direnean, **J** korrante-dentsitateaz deskribaturiko korrante elektrikoaz azaltzen da. Ondoko adierazpenen arabera, materiaren erantzuna oro har eraginarekiko proportzionala da:

$$\mathbf{P} = \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E} \quad ; \quad \mathbf{M} = \chi_M \mathbf{H} \quad ; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

non χ_e , χ_M eta σ hurrenez hurren suszeptibilitate elektriko, magnetiko eta eroankortasuna diren. Magnitude hauek ezagututa, materiako egoera elektronikoen, loturen, etab.en informazioa izaten da. Kasu honetan magnituden horien temperaturarekiko menpekotasuna ezagutzea oso garrantzitsua da, metalak erdieroale eta supereroaleetatik bereizteko, paramagnetikoak ferro edo antiferromagnetikoetatik, etab. Maila honetan eremu elektrikoak eta magnetikoak batera akoplaturik gabe daude. Beraz, neurgailuak oso desberdinak dira. Suszeptibilitate elektrikoak χ_e (edo hobe ϵ konstante dielektrikoak, $\epsilon = 1 + \chi_e$), edo σ eroankortasuna neurtzeko zirkuitu elektrikoek balantza magnetikoekin edo oso berriak diren supereroale magnetometrikoekin (SQUID)-ekin ez dute zerikusirik.

1.2. Maiztasun baxuak

Maiztasun tarte hau mikrouhinetaraino iristen da (GHz batzuetaraino). Propietate

elektriko eta magnetikoak eremu estatikoetan lortzen direnetatik ez daude oso urrun. Beraz, erantzun dielektrikoak, ϵ (ω) konstante dielektrikoaz deskriba daiteke. Maiztasuna handitzean polarizatzen laguntzen duten unitate atomiko eta molekular (dipoloak) batzuek ez dute eremuaren aldaketa arina izango eta ϵ magnitudearen balioan jauzi bat ageriko da. Aldi berean konstante dielektrikoaren alde irudikari batez deskriba daitezkeen energi-zurgapena ageri da. Prozesu honi **lasaikuntza dielektriko** deritzo eta benetako espektroskopioa osatzen du; polarizazioaren eta lotura kimikoen ardura duten unitatei buruzko informazioa ematen bait du. Halaber, talde molekularren higidurarako beharrezko "aktibazio"-energiari buruzko informazioa ere ematen du. Ikuspuntu magnetikotik lasaikuntza magnetikoa sortzen duten prozesuak lasaikuntza dielektrikoak sortzen dutenekin konparatuta oso desberdinak izan arren, egoera berdintsua da. Baldintza batzuen pean erresonantzia magnetikoa agertzea bi lasaikuntz moten arteko desberdintasun nabariena da. Erresonantzia hauek momentu magnetiko nuklearren zein elektronikoen higidurak sorturikoak dira. Erresonantziak espektroskopia "lokalak" dira; hurbiltasuneko atomo edo nukleo desberdinak bereiz bait ditzakete (protoiaren erresonantzia, ^{13}C , etab.). Erresonantzia magnetiko nuklearren edo elektronikoaren behaketa, NMR edo EPR, hurrenez hurren, aldi berean bi eremu magnetiko aplikatuta gertatzen da. Bata, estatikoa, momentu magnetikoak ordenatzen dituena da eta bestea aldatzeko, erresonantziaren kitzikatzailea. Aplikaturiko eremu estatikoa 0,1–1 T tartekoa denean, erresonantziarako maiztasun-ordena ondokoa da:

$$\text{NMR } f \approx 100 \text{ MHz} \quad \text{eta} \quad \text{EPR } f \approx 10 \text{ GHz}$$

Maiztasunen desberdintasun nabariak tresneria esperimenteral desberdinak eskatzen ditu. Erresonantzia elektronikoaren kasurako uhin gidatuak behar dira. Hala eta guztiz ere, erabilitako iturri eta detektatzaileak **zirkuitu**

elektrikoen tartean sar daitezke (osziladoreak, impedantziak, diodoak, etab.).

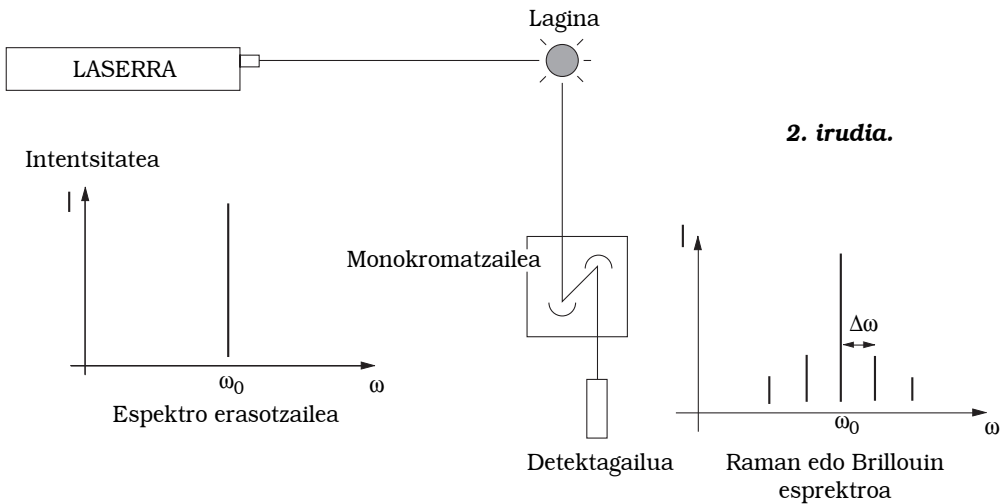
1.3. Maiztasun optikoak

Espektroskopia optikoa da erabiliena eta berez espektroskopia izena sorterazi zuena. Infragorrian hasirik ultramorerraino iristen da. Espektroskopia optikoak ondoko tekniketara sailka ditzakegu:

- a) Zurgapena: polarizazio ionikoaren (infragorrian) edo elektronikoen (ikuskor - ultramorean) "erresonantziari" dagokio. Erresonantzia honek isolatzailetako ezpurutasun eta akatsetan gertaturiko trantsizio elektronikoen informazioa eskaintzen du. Halaber erdieroiletako eroankortasuneko bandarainoko balentzi elektroiaren kitzikapenari buruz eta metaletako fotoigorpenaz. Esperimentu hau oso sinplea da. Sorta monokromatikoko baten intentsitate-neurketetan (lagina zeharkatu aurretik eta ondoren) oinarritzen da.
- b) Fluoreszentzia eta denboran bereizturiko espektroskopia: teknika honek informazio gehiago ematen du. Zurgapen optikoa gertatutakoan kitzikaturiko energi mailen bizitza-denbora edo akatsen birkonbinazio-

-denbora ematen du. Neurketa hau egiteko, deskitzikapen-prozesuan igorritako "argia" neurtu behar da. Honek, kitzikapen-pultsu laburrak eskatzen ditu (laser pultsatuak) eta, halaber, detektagailu eta elektronika arina igorpena mugatu ahal izateko.

- c) Sakabanaketa inelastikoa: laginean sakabanaturiko eta argi erasotzailearen hurbileko uhin-luzera duen argi-intentsitatea neurtzen da. Argi erasotzaileak oso ongi mugaturiko uhin-luzera behar du, hots, monokromotasun altua behar du. Laserra argi-iturritzat izatea ezinbestekoa da. Halaber, sakabanaturiko erradiazioaren uhin-luzeren ekorketak doitasun handikoa izan behar du. Beraz, monokromatzaile bikoi-tzak edo hirukoitzak erabiltzen dira. Fabry-Perot (Brillouin espektroskopia) interferometroak ere erabil daitezke. Sakabanaturiko erradiazioaren espektroan maiztasun erasotzaileari ez dagozkion balioetan gailurrak ageri daitezke (ikus 2. irudia). Maiztasunen arteko desberdintasunak meV edo μeV balioetakoak izan ohi dira; erradiazioak solidoaren **kitzikadura kolektiboekin** (fonoiekin, magnoiekin) elkarrekitan sorturikoak. Kitzikadura kolektiboak sakabanakorak izan arren, hots, beren energiak uhin-bektorearen menpekotasuna



izan arren ($\omega = f(q)$), fotoien sakabanaketa-erlazioa dela eta espektroskopia optikoek $q = 0$ trantsizioari soilik dagokion informazioa eman dezakete.

Espektroskopia optikoetan uhin-luzeren tartea oso zabala izan arren, erabilitako iturri eta detektagailuak antzekoak dira. Iturriak zirkuitu oszilatzaile konplexuak izan behar diren, lanparak dira. Hauek oinarritzat atomo eta molekulen bibrazio edo eszitazio elektronikoa dute. Goritasun-lanparek erradiazio ikuskorra eta infragorria ematen dute. Espektroaren tarte ultramore ikuskorra berriz, gas-deskargek. Laser argiaren purutasunak eta intentsitateak iraultza eragin du, eta egun infragorritik ultramore hurbileraino erabiltzen dira. Azkenik **sinkrotroi** erradiazioa aipatu behar da; ultramore hurbiletik X izpi gogorretaraino ematen bait du paregabeko intentsitatea.

Detektagailuei dagokienez, bolometro eta termopiletatik (infragorria) fotoanizkoitzetaraino (ikuskorra-ultramorea) daude. Erdierdale-detektagailu arin eta sentikorrek (fotodiodoak) gero eta aplikazio gehiagotan aurki daitezke; hauek espektroko edozein tarte bereizmen handiz neur bait dezakete.

1.4.- X izpiak

Materiaren egitura elektronikorekin oso erlaxionatuak daude, eta aspaldidanik, egoera solidoko fisikarien oinarritzko tresna bihurtu da.

a) Sakabanaketa elastikoa edo difrakzioa: materiaren egitura-ikerketen oinarrian dago. Metodo honen oinarria oso sinplea da; X izpi hauen uhin-luzera atomoen arteko distantziaren neurrikoa bait da ($\sim 1\text{\AA}$, X izpien energia hamar keV ordenakoa izanik). X izpien sakabanaketa elastikoan atomoaren elektroiz guztiek parte hartzen dute. Beraz, kokapen atomikoen informazioa emateaz gain, baldintza konkretu batzuen pean, dentsitate elektronikoren mapak egin daitezke.

b) Zurgapen eta sakabanaketa inelastikoa: X izpiekin elkarrekitean laginaren atomoak kitzikatu zein ionizatu egin daitezke. Elkarrekintza honen ondorioz elektroiz edo X izpiak (zulo elektronikoa betetzean sorturikoak) sor daitezke. Lehenbizikoek solidoko egoera elektronikoen dentsitatea eza-gutzeko aukera ematen dute. Bigarrenak, berriz, lagina analizatzeko erabiltzen dira. (X izpien fluoreszentzia).

X izpien zurgapen-ertzaeren egitura finak atomoak desberdintzeko balio duenez, oso interesgarria da. Egitura fin hori fotoelektronen difrakzioz (hurbiltasuneko atomoez) sorturikoa da. Beraz, atomo konkretu bakoitzaren hurbiltasuneko informazioa lor daiteke. Aipaturikoa EXAFS eta XANES tekniken oinarria da.

X izpien teknika guztiek iturri eta detektagailu amankomunak dituzte. X izpiak hodi batean sortzen dira. Bertan tentsio altuz azeleraturiko elektroiz anodo finko edo birakor baten aurka talka egitean balaztapen-erradiazioa igortzen dute. Potentzia eta itzulkortasun handiko alternatiba, sinkrotroi-erradiazioa da. Sinkrotroi-erradiazioa magnetoen bidez elektroiz edo positroi oso arinen desbideraketak sorturikoa da. Azeleradore handia behar delako oso garestia da eta mantentzen zaila. Honelako tresna handietan, Grenoblen eraikitzen ari den sinkrotroi europarrean adibidez, hautaketa sakon baten ondorioz batzorde zientifiko batek garrantzi nagusiko esperimendu batzuetan (difrakzioan) argazki-pelikulak erabiltzen dira.

1.5.- Gamma izpiak

γ izpien erradiazioa nukleo atomikoetan sorturikoa da eta beraren energi tartea keV gutxi batzuetatik ehundaka MeV-etaraino iristen da. Elkarrekintza hiperfinez ez bada, nukleoa atomoaren egitura elektronikorekiko ez da sentikorra. Mössbauer efektuak trantsizio nuklearren bereizmen energetiko itzelak ($\Delta E/E \approx 10^{-13}$) erabiltzen ditu. Ere mu lokalaren bidez, nukleo batzuen ingurunea,

nukleoaren dentsitate elektronikoa eta sarearen eremu elektrikoa iker daitezke. Mössbauer espektroskopian erabilitako γ izpien iturriak, zurgatzailearen araberako nukleo erradioaktibo konkretua da. Grenobleko azeleradore berriaren sinkrotroi-erradiazioa ere Mössbauer espektroskopian erabiltzea pentsatzen da. Detektagailuak X izpien kasuan erabilitakoen berberak dira; Mössbauer efektua burutzeko energi tartea X izpiena bait da.

2. partikulak

Materialen ikerketan erabilitako partikulen barietatea nahikoa zabala da. Partikula kargatuak, neutroak zein pisutsuak eta arinak erabili ohi dira. Partikula kargatuetatik (eta horien artean arinetatik) abiatuko gara:

2.1.- Elektroiak

Partikula hauek materiarekin duten elkarrekintza uhin elektromagnetikoen antzerakoa izan arren, indartsuagoa da eta, halaber, energia/uhin-luzera erlazioa fotoiena ez bezalakoa da. Hau da eV gutxi batzuko elektroiek 1Å-eko uhin-luzera edukitzearen arrazioa.

a) Elkarrekintza elastikoak: elkarrekintza honen ondorioa elektroien difrakzioa da. X izpien difrakzioaren antzeko izan arren, elektroien zurgapena materialen dela eta geruza atomiko gutxi batzuetara mugatua dago. Honek, elektroien difrakzioa gainazalera eta xafla mehetara mugatzen du. Bestalde, hutsune handia behar da elektroien garraioa iturri igortzaitetik lagineraino eta hemendik detektagailuraino burutu ahal izateko.

b) Elkarrekintza inelastikoa: elektroiek materiarekin elkarrekin ondoren, "irteera" desberdinak daude, bakoitza teknika espektroskopiko bati egokitu zaiolarik. Detektatzen dena argi ikuskorra bada, "katodo-luminiszentzia" dugu. X izpiak neurtzen baditugu, EDAX (mikroanali-

siaren oinarria). X izpi honen barne-konbertsioko elektroiak ikertzen baditugu, AUGER espektroskopioa.

"Irteera" hauetako hainbat, ekorketako mikroskopia elektronikoen irudiak osatzeko oinarritzat har daitezke. Hala ere, arruntena elektroien sekundarioak sortutako irudiak dira, hots, elektroien erasotzaileak laginarekin talka egin ondoren ionizazio-prozesuan askaturiko elektroiek sorturikoa.

Azkenik, elektroien energi-galeretako espektroskopioa dugu; egun transmisio-mikroskopioketan analisi metodo modura komertzializatzen den teknika.

Elektroien iturriak sinpleak dira. Nahikoa da harizpi metalikoa berotzen jartzea efektu termoionikoaz elektroiak sortzeko. Detektagailu-motak asko dira: pantaila fluoreszenzenteak, argazki-plakak, ionizazio-detektagailuak, Faraday kutxak, etab.

2.2.- Positroiak (e^+)

Elektroien antipartikulak, eta beraiekin, elektroiekin, elkartzean orokorki bi gamma izpi sortuz deuseztatzen direnak. Gamma izpi honen detekzioa **positroi-deuseztapena** izeneko teknikaren oinarria da. Teknika honek dentsitate elektronikoen eta sareko akatsen informazioa lortzen du. Positroien iturriak, β^+ partikulen nukleo igortzaileak dira eta deuseztapeneko γ izpien bidez detektatzen dira.

2.3.- Muoiak (μ)

Elektroien antzeko partikulak dira, baina pisutsuagoak. Muoien ezaugarri garrantzitsuenak, eremu magnetiko lokalarekiko duten momentu magnetikoaren prezesioa da. Prezesioaren maiztasunak eremu magnetiko lokalaren balioa ematen du. **Muoien despolariizazio**-ikerketak konplexuak dira; muoien partikula pisutsu eta arinen arteko talke sortu ahal izateko azeleradoreak behar bait dira. Positroiekin gertatzen den bezala, despolariizazioa igorritako γ izpien bidez detektatzen da.

2.4.- Partikula pisutsuak

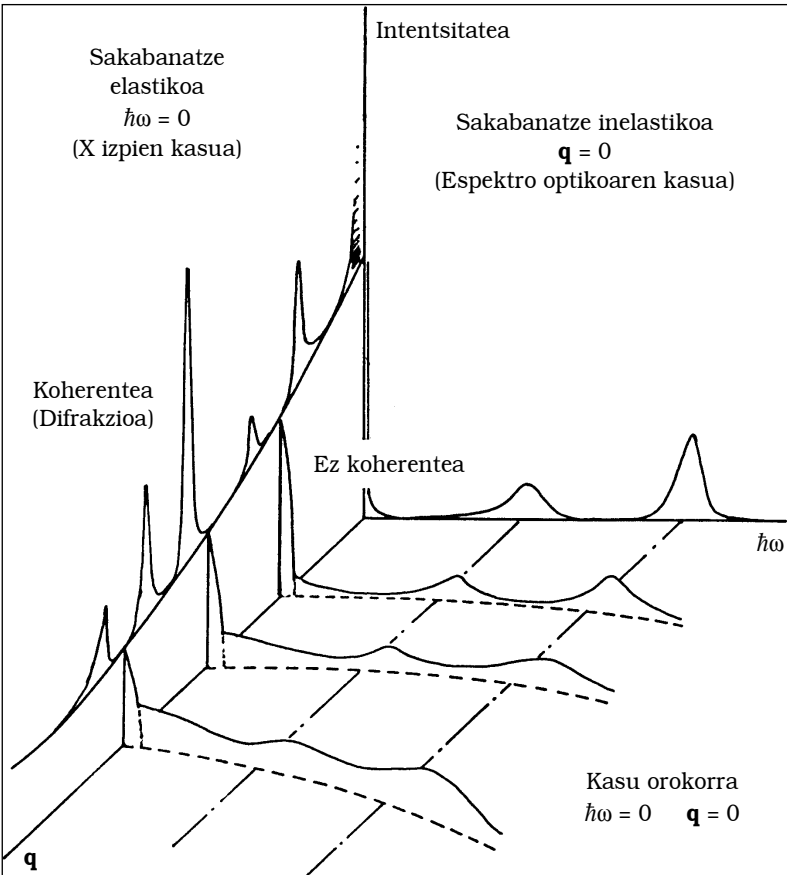
Protoiak eta alfa partikulak solidoak iker-
tzeko erabilgarri izan arren, ez dira sarritan
erabiltzen. Hala ere bidenabar Rutherford
atzera-sakabanaketa analisi modura erabil-
tzen dela aipatuko dugu. Protoi-sorten aplika-
zio berria, ezaugarritzko X izpien (EDAX) lorpe-
na da, hauek elektroiek sorturiko balaztaper-
-erradiazio hondo jarraia ez bait dute sortzen.

2.5.- Neutroiak

Partikula neutroak direnez, ez dute ma-
teriarekin elkarrekintza indartsurik jasaten,
eta elektroiak ez bezala, materiaren barru-
raino sar daitezke. Neutroien ezaugarri in-

teresgarriena energia/momentua erlazioa da.
Erlazio horri esker, neutroien energia materia
solidoko kitzikaduren ordenakoa denean,
uhin-luzera atomoen arteko distantziaren
araberakoa da. Neutroiak momentu magne-
tiko txikia izan arren, momentu magnetiko
elektronikoarekin elkarrekin dezake, elka-
rrekintza hori nukleararen intentsitate pa-
retsukoa izanik. Beraz, ikerketa magne-
ti-koetarako paregabeko tresna da. Beste ka-
suetan bezala, hemen ere sakabanaketa
elastikoa edo inelastikoa izan daiteke.

a) Sakabanaketa elastikoa (difrakzioa): X
izpien difrakzioak baino informazio zeha-
tzagoa eman dezake egituraz. Elkarrekintza
nukleoeekin denez, edozertarako puntual-



3. irudia.

tzat har daiteke. Are gehiago, hidrogenoa bezalako nukleo arinek, neutroiekiko beste nukleo pisutsuago batzuek bezalako itxura aurkez dezakete. Beraz, beste teknike-tarako "itsu" diren atomo arinak neutroietarako ikuskor bihurtzen dira. Difraziko magnetikorako neutroiak erabiltzea derri-gorrezkoa da eta berari esker egitura magnetiko konplexuak iker daitezke: helimagnetismoa, egitura konikoak, etab. Monokristalen difrakzioaren bidez spin-dentsitate mapak eraiki daitezke, atomo bateko elektroi desberdinen momentu magnetikorako ekarpenak ezarritik.

b) Sakabanaketa inelastikoa: "lokalizaturiko" kitzikadurak (adibidez, sarearen eremu elektrikoak bikoizturiko egoeren arteko trantsizioak) nahiz kitzikadura kolektiboak (magnoiak, fonoiak) sakabanaketa inelastikoaren bidez iker daitezke. Azken kasu honetan, neutroien energia/momentua erlazioak kitzikaduren sakabanaketa-kurba osoa, q guztietarako, onartzen du, hots, espektroskopia optikoan ageri den $q = 0$ trantsizioetarako onarpen soila, neutroiekin ez da gertatzen. Egungo tresneriaren bereizmenak (spin-oihartzun espektrometroa) kitzikadura quasi-elastikoak, mikroelevonvolt azpikoak, ikertzea onartzen du.

Sakabanaketa prozesu hauez gain, neutroien sakabanatze ez-koherentea gerta daiteke, hots, isotopo desberdinetarako eta nukleoien spin-egoera desberdinetarako gerta daitekeen sakabanaketa. Sakabanatze ez-koherentea neutroi-espektroetan zarata moduan ageri da. Beraz, ahal den gehiena txikiagotzea komeni da. Sakabanatze ez-koherentea murrizteko lagin deuteratuak erabiltzen dira.

3. irudian neutroi-espektrometriaren ahalmenak adierazi dira. Bertan ikus daitekeenez, espektromeria optikoan gertatzen ez den bezala, neutroiek $q - \omega$ plano osoa ekor dezakete.

Neutroien aplikazio gutxietarako eraikuntza esperimentalen konplexutasuna nabari da. Lehenik, itxurazko fluxua duen neutroi-iturriak eraikin handia behar du: erreaktore nuklearrak edo protoi-azeleradoreetan oinarrituriko espalaziokoak. Beraz, sinkrotroiaren kasuan bezala, hemen ere denbora esleitzea beharrezkoa da esperimentuak egiteko (Institute Laue-Langevin, Rutherford-Appleton Laboratory). Bestalde, esperimentuak elektromekanika eta mekanika oso delikatuak eta konplexuak da. Beraz, tresneria prest mantentzeko espezialista-talde bat behar da. Laburtuz, neutroien teknikak oso garestiak dira eta ezinbesteko kasuetan bakarrik erabiliko dira.

BIBLIOGRAFIA

- "Espectroscopias de Sólidos y Superficies". P.M. Etxenike. EHU/UPV-ko Udako Ikastaroak. EHU/UPV-ko argitarapen-zerbitzua (1991).
- "Neutron Diffraction". G.E. Bacon. Oxford University Press (1975)
- "Implanted muon studies in condensed matter science". S.F.J. Cox, J. Phys. C:Solid State Physics 20 (1987).
- "Modulation Spectroscopy". M.Cardona. Academic Press. New York (1969)
- "Optical absorption and dispersion in solids". J.N.Hodgson. Chapman and Hall (1970).