

# Sinkrotroi erradiazioa: ezaugarriak eta historia

*Oier Bikondoa del Barrio*

CRG SpLine (Sinkrotroi Erradiazio-Lerro Espainiarra)  
European Synchrotron Radiation Facility  
6, rue Jules Horowitz  
B.P. 220  
38043 GRENOBLE cedex 09  
FRANTZIA

**Laburpena:** Artikulu honetan, sinkrotroi erradiazioaren propietate garrantzitsuenak aurkezten dira. Halaber, sinkrotroi erradiazioaren historia gainbegiratu egiten da, eredu teorikoa garatu zenetik gaur egunera arte. Ondoren, gaur egungo sinkrotroi baten funtzionamendua era errazean esplikatzen da eta sinkrotroi erradiazioa erabiltzen duten zenbait alor aipatzen dira. Azken paragrafoan etorkizunari buruz hitz egiten da.

## 1. SARRERA

Sinkrotroi erradiazioa (SE), abiadura erlatibistaz (hau da,  $v \approx c$  abiaduraz) aldiuneko orbita zirkularrean higitzen diren partikula kargatuek igortzen duten erradiazioa da [1]. Gaur egun, bere propietate bereziengatik, materia aztertzeko zunda erabilienetako bat da hainbat eta hainbat arlotan: biologian, medikuntzan, egoera solidoko fisikan, kimikan... SEren historia, zientziaren kasu bitxi bat da: aurkikuntza (1947. urtean) ezustekoa izan zen, haren ezaugarriak ia 40 urte lehenago proposatu baziren ere (1908. urtean). Gainera, beharrezkoa izan zen beste 16 urte itxarotea lehen erabilera esperimentalera arte, eta ordutik hona, SEren garrantzia izugarri handitu da. Egun, 40 sinkrotroi baino gehiago daude munduan.

## 2. SINKROTROI ERRADIAZIOA: PROPIETATEAK

Azeleraturiko kargak erradiazio elektromagnetikoa igortzen dute. Elektrodinamika klasikoaren arabera, igorritako potentzia, kargak jasaten duen azelerazioaren karratuarekiko proportzionala da [1]. Argiarenareki-

ko abiadura txikia duen karga batek erradiatutako aldiuneko potentzia osoa (P), Larmor-en formulak ematen digu:

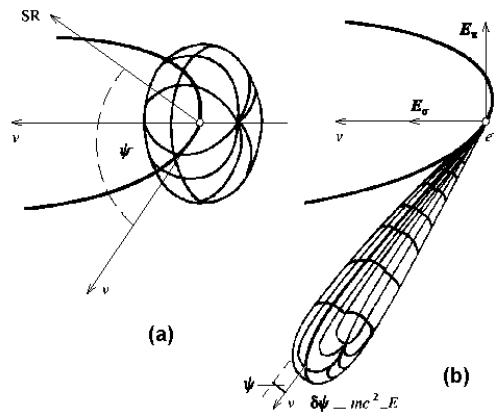
$$P_{v \ll c} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \dot{v}^2, \quad (1)$$

$v$  kargaren abiadura,  $c$  argiaren abiadura,  $e$  karga elektrikoa eta  $a$  azelerazioa izanik.

Liénard-ek (1898) eta Heaviside-k (1902), Larmor-en formula edozein abiadurarako orokortu zuten. Bereziki,  $R$  erradioko orbita zirkular batean higitzen den kargak igortzen duen aldiuneko potentzia osoa ondokoa da [4]:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R^2} \beta^4 \gamma^4, \quad (2)$$

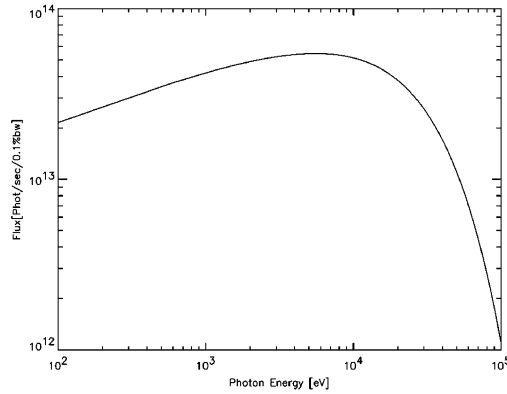
non  $\beta = v/c$  eta  $\gamma = E/(m_0 c^2)$  diren,  $E$  eta  $m_0$  kargaren energia eta masa izanik hurrenez hurren. (2) formulak, igorritako potentzia energiaren laugarren berreduraren arabera handitzen dela erakusten du. Gaur egungo sinkrotroietan lortzen den energia zenbait  $GeV$  ingurukoa denez, igorritako potentzia oso handia da.



**1. irudia.** Erradiazio-igorpenaren banaketa angeluarra.  
(a)  $v \ll c$  kasua. (b)  $v \approx c$  kasua.

SEren berezitasunetako bat haren banaketa angeluarra da, hots, erradiazioa zein norabidetan erradiatzen den. Karga ez-erlatibista batek igorri-

tako erradiazioaren banaketa angeluarrak toroide eitea du (ikus 1(a) irudia). Karga erlatibista baten igorpen gehiena aldiz, kargak duen aldiuneko abiadurarekiko norabide tangentean egongo da (ikus 1(b) irudia), ia kono itxura izanik. Doppler efektuagatik<sup>1</sup>, toroidea deformatu egiten da, kono eite antzeko hori emanez.



**2. irudia.** Kurbadura-iman baten igorpen-espektroa.

Halaber, S Eren energia-espektroa, hots, zenbat fotoi igortzen diren energia bakoitzeko, oso zabala da: infragorritik gamma izpietaraino doa (ikus 2. irudia). Maiztasun angeluar kritikoa deritzona defini daiteke:

$$\omega_c = \frac{3}{2} \gamma^3 \left( \frac{c}{R} \right) = \frac{3}{2} \left( \frac{E}{m_0 c^2} \right)^3 \frac{c}{R}. \quad (3)$$

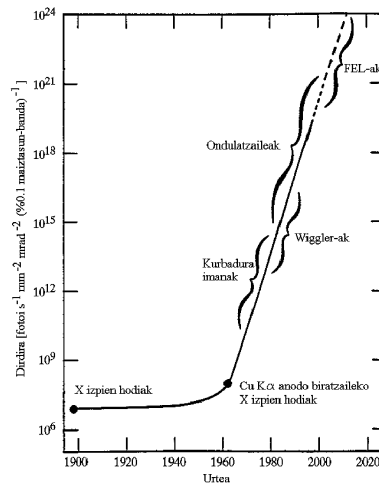
$\omega_c$ -k, igorpen-espektroa bitan banatzen du: igorritako energia guztia-  
ren erdia  $\omega_c$  baino maiztasun angeluar handiagoko erradiazio moduan  
igortzen da eta beste erdia,  $\omega_c$  baino txikiagokoa moduan. Kargaren orbi-  
taren planoan eta haren abiadurarekiko tangentea den norabidean maizta-  
suna angeluar ( $\omega$ ) bakoitzeko igortzen den fotoi kopurua, gutxi gorabehe-

<sup>1</sup> Egunero nabari dezakegu efektu hau: adibidez, kotxe bat gureganantz hurbiltzen de-  
nean, motor-hotsaren tonua altuago (zorrotzago) entzuten dugu, eta bestalde, kotxea alden-  
tzean aldiz, baxuago (grabeago). Fisikoki, honen arrazoia kotxearen eta gure arteko abiadu-  
ra erlatiboan datza: kotxea gureganantz datorrenean, heltzen zaigun soinu-uhinaren  
maiztasuna, kotxea aldentzen denekoa baino handiagoa da. Kotxean dagoenak aldiz, ez luke  
inolako soinu ezberdintasunik nabariko, haren erreferentzia-sisteman uhinak, une oro, maiz-  
tasun bera duelako.

ra  $\omega^{2/3}$  bezala handitzen da,  $\omega$  maiztasun kritikoaren inguruan maximora iristen da eta  $\omega_c$ -tik aurrera esponentzialki gutxitzen da [1].

Erradiazio-konoaren zabalera bertikala ( $\sigma_\psi$ ) ere, igorritako erradiazio-maiztasunaren arabera aldatzen da: igorritako erradiazio-maiztasun angeluarra  $\omega = \omega_c$  bada, orduan  $\sigma_\psi \sim 1/\gamma \sim 1/(1957E)$  da, E partikula kargatuaren energia GeV unitateetan izanik;  $\omega \ll \omega_c$  kasurako,  $\sigma_\psi \sim 1/\gamma (2\omega_c/\omega)^{1/3}$  eta  $\omega \gg \omega_c$  bada,  $\sigma_\psi \sim 1/\gamma (2\omega_c/3\omega)^{1/2}$ . Adibidez, 6GeV-ko energia duten elektroiek,  $\omega_c$  maiztasun angeluarreko erradiazioa  $85\mu\text{m}$ -ko zabalera bertikala duen kono batean igortzen dute.

Beste propietate interesgarri bat erradiazioaren polarizazioa da: SE, kargen orbitaren planoan linealki polarizaturik dago, eta planotik kanpo, eliptikoki.



### 3. irudia. Iturrien dirdira izugarri handitu da urteekin.

Bi SE iturri erkatzeko gehien erabiltzen den parametroa *dirdira*<sup>2</sup> da. Zenbat eta handiagoa izan dirdira, handiagoa eta kontzentratuagoa izango da erradiazio-igorpena, eta iturria egokiagoa izango da saiakeretarako. 3. irudian iturrien dirdira denboran zehar nola handitu den ikus daiteke.

<sup>2</sup> Dirdiraren unitateak (fotoi/(s × mm<sup>2</sup> × mrad<sup>2</sup> × %0.1E.B.)) dira, non E.B. energia-birtarte esan nahi duen. E-0.001 × E, E + 0.001 × E energia-tartean, milimetro karratuko azalera eta miliradian karratuko angelu solidoan, segunduko zenbat fotoi igortzen diren adierazten digu.

### 3. SINKROTROI ERRADIAZIOAREN HISTORIA

#### 3.1. Hastapenak

Seren oinarri teorikoa, James Clerk Maxwell-ek 1873. urtean<sup>3</sup> plazaratutako eta haren izena duten ekuazioekin hasi zen. Maxwell-en arabera, karga-dentsitate eta korrante elektriko aldakorrek uhin elektromagnetikoak igortzen dituzte. Uhin hauen existentzia, Hermann von Helmholtz-en ikaslea zen Heinrich Hertz-ek frogatu zuen, 1887. urtean. Azeleratutako kargak eta korrante elektriko aldakorrek igorritako erradiazioaren teoria orokorra azkar garatu zen, baina ekuazioak geroz eta luzeagoak bilakatzeko joan ziren: kontzeptualki bakuna zen teoria, laister algebraikoki moldagaitz bihurtu zen.

1898. urtean, Alfred Liénard-ek, École de Mines de Paris-eko irakasleak, «*Champ Électrique et Magnétique produit par une charge électrique concentrée en un point et animée d'un mouvement quelconque*» izeneko artikulua kaleratu zuen **L'Éclairage Électrique** aldizkarian. Bertan, atzeratutako potentzialen kontzeptua aurkeztu zuen lehen aldiz<sup>4</sup>. Potentzial hauek erabiliz formulak izugarri sinplifika zitezkeen. Aipatu artikuluan, Liénard-ek, beste zenbait ekuazioen artean, karga puntual batek zirkularki mugitzen denean erradiazio moduan galtzen duen energiaren ekuazioa lortu zuen. Gogoratu beharra dago J.J. Thomson-ek urte bat lehenago elektroia aurkitu zuela eta ondorioz, Liénard-ek bere lana kaleratu zuenerako, karga «puntuala» ez zela jadanik hipotesi hutsa, existentzia fisikoa zuen izatea baizik.

Liénard-en lana, Emil Wiechert-ek 1900. urtean **Archives Néerlandaises** aldizkarian argitara emandako beste lan batek indartu zuen. Wiechert, Göttingen-eko Unibertsitateko geofisika-irakaslea zen eta edozein motatako uhinetan interesaturik zegoen, bereziki lurrikarek sortutako uhin sismikoetan. Wiechert-ek, bere aldetik, potentzial atzeratuen antze-

---

<sup>3</sup> Urte horretan, *A treatise on Electricity and Magnetism* (London) argitaratu zuen, baina 1864. urtean jada, eremu elektromagnetikoaren teoria dinamikoa garatzen zuen artikulua kalean zegoen.

<sup>4</sup> Laburki: urrutiko karga higikor batek gauden lekuan sortzen duen eremua kalkulatzeko, ekuazioetan, karga zegoen lekutik erradiazioa honuntza bidaiatzen hasi zeneko denbora eta kargaren posizioa kontutan hartu behar ditugu. Metodo honi, *atzeratutako potentzialen* edo *Liénard-Wiechert-en potentzialen metodoa* deritzo. Adibide batez argituko dugu hau: demagun eguzkiak igorritako erradiazioa Lurrari neurtu nahi dugula. Eguzkitik irteten den erradiazioa  $c \approx 3 \times 10^8$  m/s abiadura finituaz barreiatzen denez, denbora-tarte bat igaroko da Lurrara heldu baino lehen. Eguzkiaren eta Lurraren arteko distantzia  $d$  baldin bada, guregana  $t$  unean heltzen den erradiazioa, eguzkitik  $t' = t - d/c$  unean irten zen. Hau da,  $t$  unean neurtutako erradiazioaren ezaugarriak,  $t'$  uneko baldintzek mugatzen dute. Horregatik, atzeratutako potentzialak deritze.

ko kontzeptua sortu eta erabili zuen. Potentzial atzeratuei, gaur egun Liénard-Wiechert-en potentzialak esaten zaie, nahiz eta egiazki kontzeptua proposatzen lehena Ludwig Lorentz izan, 1867. urtean [2].

Aurrerapauso teoriko garrantzitsuena 1908. urtean jazo zen; Cambridge-ko Trinity College-ko George A. Scott-ek, Adams Saria irabazi zuen «*Electromagnetic Radiation*» lanarekin<sup>5</sup>. Adams Saria, Cambridge-ko Unibertsitateak ematen zuen oso sari garrantzitsua zen. Aurretik sari hori irabazi zutenen artean badaude zenbait izen famatu: J.C. Maxwell (1859), J.J. Thompson (1883), J. Larmor (1900)... Aurkeztutako lanek epaimahaiak aukeratutako gai baten gainean idatzitako saio matematikoak behar zuten izan. Schott-ek, erradiazio elektromagnetikoaren funtsezko oinarri teorioak aurkezten ditu lehenik, eta ondoren, edozein motatako elektroi-mugimenduei aplikatzen dizkio, bai elektroi bakarrari, bai elektroi-taldeei ere, kasu bakoitzari dagokion erradiazio-igorpena kalkulatzeko asmoz. Agertzen den adibideetako bat, orbita zirkularrean higitzen den elektroiaren kasua da. Edozein elektroi-abiadura hartzen du kontutan, baita argiarenak baino handiagoak ere [2].

Schott-en lanean SE-ren zenbait ezaugarri erakusten dira. Horietako lehena energia-galera da. Schott-ek, Liénard-ek aurretik lortutako emaitza egiaztatuz, energia-galera elektroiaren energiaren laugarren berredurarekin handitzen dela frogatzen du. Ondoren, erradiazioaren banaketa angeluarra eta polarizazio-egoerak kalkulatu ditu. Azkenik, erradiazioaren maiztasun-banaketa aztertzen du, eta erradiazio-espektroa deskribatzen duen ekuazio batera heltzen da. Halere, ekuazio honetan oso ordena handiko Bessel-en funtzioak (funtzio matematiko berezi batzuk, alegia) agertzen dira, garai hartako tauletan aurkitu ezin zitezkeenak. Ekuazio horren baliokidea den beste bat ere aurkezten du, baina hau ere ezin zitezkeen sinplifikatu. Horregatik ez zuen aurrera jo erradiazio-espektroaren azterketan.

Schott-en lanaren asmoa atomoaren espektroaren izaera diskretua<sup>6</sup> argitzea zen. Baina oinarriztat garai haietan zeuden atomoaren ereduak hartu zituen, batez ere elektroiak karga positiboaren inguruan zirkularki higitzen zirela onartzen zuten ereduak. Ezinezkoa izan zitzaion atomoaren

---

<sup>5</sup> Lana 1912. urtean argitaratu zen. Ordurako, Schott Matematika Aplikatuko irakaslea zen Aberystwyth-eko University College of Wales-en.

<sup>6</sup> Atomo bat uhin elektromagnetikoekin argitzen denean, atomoak uhin-luzera jakin batzuk bakarrik zurgatzen dituela ikus daiteke. Hau, mekanika kuantikoaren ondorio zuzena dugu: teoriak auresaten duenez, elektroiak ezin dezakete edozein energia izan, zenbait energia-maila berezitan egon daitezke soilik, eta atomoak zurga edo igorri ditzazkeen fotoien energiak (edo baliokidea dena, uhin-luzerak,  $\lambda = hc/E$  delako,  $\lambda$  uhin-luzera,  $h$  Planck-en konstantea,  $c$  argiaren abiadura eta  $E$  energia izanik), maila hauen energien arteko diferentziarekiko proportzionalak dira.

erradiazioaren izaera elektromagnetika klasikoaren baitan esplikatzea<sup>7</sup>. Arrazoi honegatik, bere lana ia ahazturik egon zen ia 30 urte baino gehiagoz, haren interes bakarra akademikoa izanik. Ondorioz, ez zen esperimentalki frogatzeko inolako saiakerarik egin, eta azeleraturiko karga batek igorritako erradiazioa testu-liburu bakan batzuetan aipatzen zen soilik [3].

### **3.2. 40ko hamarkada: lehenengo sinkrotroien eraikuntza**

Badirudi azeleraturiko kargak igortzen duten erradiazioari buruzko interesa lehenik Sobiet Batasunean berpiztu zela. 1939. urtean, Leningradoko Estatuko Fisika Institutuan lan egiten zuen I. Ya Pomeranchuk-ek, partikula kosmiko kargatuek Lurraren eremu magnetikoaren elkarrekintza pairatu ondoren Lurraren azalera heltzean izan zezaketen energia maximoa kalkulatu zuen [4].

Garai berean, Don Kerst-ek, munduko lehen betatroia<sup>8</sup> eraiki zuen Illinois-eko Unibertsitatean. Betatroi honek 2.3MeV-ko energia zinetikodun elektroiak erabiltzen zituen eta Kerst berak eta Bob Serber-ek lehenago kaleratutako artikulua batean aipatzen zituzten oinarrien arabera egin izan zen. General Electric Company enpresa azkar interesatu zen asmakuntza berrian, X izpien iturri interesgarria izan zitekeelakoan<sup>9</sup>, eta Kerst gonbidatu zuen General Electric Research Laboratory-a bisitatzerako. Bertan, Kerst-ek, W.F. Westendorp-ek lagunduta, 20MeV-ko betatroi bat eraiki zuen 1941. urtean.

Dirudenez, Kerst-ek eta Serber-ek Schott-en lana ezagutzen zuten baina haien ustez, 20MeV-ko energiadun elektroiek azeleratzen zirenean igor zezaketen erradiazioa arbuigarria zen eta horregatik artikuluetan ez zuten aipatu erradiazio hori, ez eta energia altuagoak erabiltzen zirenean ager zitezkeen arazoak [2].

---

<sup>7</sup> Elektrodinamika klasikoaren arabera, atomoaren nukleoaren inguruan biratzen ari den elektroiek uhin elektromagnetikoak igorriko lituzke. Igorpen prozesu honek, elektroien energiaren gutxitzea eta orbita-erradioaren txikitzea leharke. Denbora aurrera joan ahala, elektroia nukleorantz amilduko litzateke. Atomo egonkorren existentziak elektrodinamika klasikoaren oinarriak guztiz zuzenak ez zirela argi frogatzen zuten.

<sup>8</sup> Betatroia indukziozko azeleragailua da. Elektroiak, denborarekin handitu egiten den eremu magnetiko batean higitzen dira [4]. Betatroiaren ideia 1922. urtekoa da, baina inork ez zuen bat eraikitzea lortu Kerst-ek erdietsi zuen arte [2].

<sup>9</sup> Betatroian azeleraturiko elektroien sorta metalezko harizpi edo xafla baten kontra talka egitera behartuko balitz, X izpiak sortuko lirateke, X izpien hodieta gertatzen den bezalaxe (ikus [5]). Horrelako prozesu batean sortzen den erradiazioari, *bremstrahlung* edo *balaztatze-erradiazioa* deritzen. Betatroiak eta sinkrotroiak eraikitzearen lehen asmoa, *bremstrahlung* erradiazio hau sortzea eta erabiltzea izan zen.

General Electric-en, 1945. urtean, Westendorp eta E.E. Charlton-ek 100MeV-ko betatroi bat eraiki zuten (ikus 4. irudia). Urte bat lehenago, D.D. Ivanenko eta I. Ya Pomeranchuk-ek gutun labur bat bidali zuten **Physical Review** aldizkarira. Gutun horretan, betatroieta espero zen elektroien energia-galeraren formula lortu eta energia altuko betatroieta-rako iruzkin batzuk egin zituzten.



**4. irudia.** E. Charlton (ezkerraldean) eta W. Westendorp, General Electric Research Laboratory-ko 100MeV-ko betatroiaren aurrean ([2] aipamen bibliografikotik hartua).

Sobietarrak zuzen ote zeuden jakiteko, GE Research Laboratory-ko John P. Blewett-ek kalkuluak berregin zituen oinarrietatik hasita, Liénard eta Schott-en lanen berri ez zekielako [2]. Zuzen zeudela iritzi zien, eta gainera, energia-galera horiek 100MeV-ko betatroian detekta zitezkeela ondorioztatu zuen. Guztiek ez zuten Blewett sinesten: Westendorp-ek erradiazio-igorpenik ezin zitezkeela egon uste zuen, betatroiko elektroiek korrante zuzen bat osatzen zutela pentsa baitzitekeen eta korrante zuzen-ek ez baitute erradiatzen<sup>10</sup>. Blewett-ek, elektroien orbitetan gertatzen ziren igorpenarengatik desbiderapenak kalkulatu zituen. Baldin eta elektroiek erradiazioa igorriko balute, haien energia gutxituko zatekeen eta ondorioz, zuketeen orbita aldatuko zen. Neurketak egitean, Blewett-en kalkuluak eta saiakera-emaitzak bat zetozela ikusi zuten. Hala ere, portae-

---

<sup>10</sup> Westendorp-ek baina, ez zituen kontutan hartu gorabehera kuantikoak eta efektu erlatibistak, azken emaitza lortzeko beharrezkoak direnak [10].



ra hori esplikatzeko baita ere posible ziren beste zenbait azalpen desberdin zeuden, erradiazioaren hipotesiaren beharrik ez zutenak [10]. Beste neurketa-mota bat behar zen Blewett zuzen zegoen ala ez jakiteko.

Desbiderapenez gainera, Blewett-ek igorritako erradiazioaren espektroa nolakoa zen kalkulatu zuen. Kalkuluen arabera, erradiazioak elektroiaren oinarritzko biraketa-maiztasunaz eta haren zenbait harmonikoez osaturik egon behar zuen<sup>11</sup>. Kasu berezi hartan, oinarritzko biraketa-maiztasuna 50Hz-koa zen eta Blewett-en taldeak detektagailu batekin 50Hz-tatik 1.000Hz-ko maiztasuneraino bilatu zuen (irradi-uhinetatik mikrouhinetaraino), baina ez zuen ezer aurkitu. Detektatu izan balute, erradiazioak ziurrenik «betatroi erradiazioa» izena izango zukeen gaur egun.

Zenbait urte beranduago, Julian Schwinger-ek, arazo bera aztertzean, igorritako erradiazioaren maximoak oinarritzko biraketa-maiztasunaren inguruan egon ordez, askoz ere ordena altuagoko harmonikoei legokiekeen maiztasuna izango zukeela ondorioztatu zuen<sup>12</sup> [6]. 100MeV-ko betatroiaren kasuan, igorritako erradiazio gehiena argi ikusgaiaren tartean egongo zen, baina betatroiaren huts-hodia<sup>13</sup> opakoa zenez, ezinezkoa izan zen hura kanpoaldetik ikustea.

Karga azeleratuek igorritako erradiazioaren lehen behaketa zuzena guztiz ezustekoa izan zen. 1945. urtean, McMillan eta Vekster-ek sinkrotroia asmatu zuten<sup>14</sup> eta sinkrotroi bat martxan jartzen lehenak, British Admiralty-ko Goward eta Barnes izan ziren. Lehen sinkrotroi honek 8MeV-ko elektroiarekin lan egiten zuen. Munduan eraiki zen bigarrena General Electric-eko 70MeV-koa izan zen, Herb Pollock, Robert Langmuir, Frank Elder eta Anatole Gurewitsch-en eskutik, 1947. urtean (ikus 5. eta 6. irudiak). Urte horretako apirilaren 24an, sinkrotroia lanean ari zen eta bere osagaiek matxurarik jasaten ez zutela ikusteko, ispilu bat jarri zuten babes-estalkiaren alde batean. Babes estalkia guztiz beharrezkoa zen sinkrotroiak erradiatutako *bremsstrahlung* X izpiengandik gerizatzeko. Sinkrotroi honen huts-hodia gardena zen. Floyd Haber operariak ispiluari begiratu behar zion. Bat-batean, makina itzali zezatela oihukatu zuen, arku voltaiko bat ikusi omen zuelako huts-hodi barruan. Laister konturatu ziren ikusitakoa ez

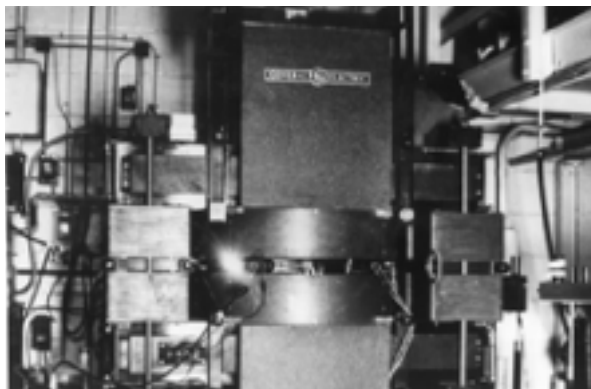
---

<sup>11</sup> Oinarritzko biraketa-maiztasuna ( $\nu$ ), partikula batek duen orbitan bira bat emateko behar duen denboraren ( $\tau$ ) alderantzizkoa da (hau da,  $\nu = 1/\tau$ ). Harmonikoak, oinarritzko biraketa-maiztasunaren multiploak dira.

<sup>12</sup> L.A. Artsimovich eta I. Ya Pomeranchuk emaitza berberera iritsi ziren bere kabuz [2]. Ikus [4] sobietarren ekarpenei buruz gehiago jakitea nahi izanez gero.

<sup>13</sup> Elektroiak hodi baten barrutik higitzen dira. Hodi honen barruan, hutsa egin behar da elektroiak inguruneke partikulekin talka egin ez dezaten.

<sup>14</sup> Sinkrotroian, elektroiak lehenik denborarekin handitzen den eremu magnetiko bat aplikatuz azeleratzen dira (betatroiaren kasuan bezala), eta ondoren, azelerazioa eremu elektriko oszilator baten bidez eragiten da. Zehaztasun gehiago nahi izanez gero, ikus [7-9].



**5. irudia.** General Electric-eko 70MeV-ko sinkrotroia. Ezkerraldean ikusten den dirdira, sinkrotroi argia da ([2] aipamen bibliografikotik hartua).



**6. irudia.** General Electric-eko taldea (ezkerretik esku-mara, Langmuir, Elder Gurewitsch, Carlton eta Pollock), 70MeV-ko sinkrotroiaren huts-hodia begiratzen ([2] aipamen bibliografikotik hartua).

zela arku voltaiko bat, Blewett bila ari zen erradiazioa baizik. Pollock-en taldeak ikerketa espektroskopiko bat burutu eta ikusitako argia teoriak aurre-sandakoarekin bat zetorrela frogatu zuen<sup>15</sup> [10].

---

<sup>15</sup> Hau da hedatuen dagoen bertsioa, baina beharbada ez da guztiz zuzena. 1976. urtean, Gerald Knowlton-ek notario batek sinatutako idatzi bat bidali zuen American Institute of

Ikusitako erradiazioari «sinkrotroi erradiazioa» deitu zitzaion<sup>16</sup>. Erradiazio horrek jakin-min handia sortu zuen: aurkikuntzaren hurrengo bi urteetan, sei Nobel saridun joan ziren hura ikustera. Beste bisitari bat Ronald Reagan izan zen, garai hartan General Electric Company-rako iragarkiak egiten zituen eta. Baina badirudi oso interes gutxi erakutsi zuela [2].

### **3.3. 50eko hamarkadatik gaur egunera arte**

Urte askotan, sinkrotroi erradiazioaren garrantzi bakarra partikula-azeleragailuak diseinatzen zituzten ingeniariari sortzen zizkien trabetan zetzan soilik, partikulek erradiatzean energia galtzen zutelako eta honek mugak jartzen zizkiolako azeleragailuen etekinari. SEK etekinari buruzko informazioa eman zezakeen [2].

1956. urtean, D.H. Tombouliau eta P.L. Hartman-ek, SE erabiliz espektroskopia-saiakerak burutzeko aukera erakutsi zuten [12]. Hauxe, lehen aldiz R.P. Madden eta K. Codling-ek egin zuten, 1963. urtean [13], Washington-en zegoen National Bureau of Standards-eko 180MeV-ko sinkrotroian.

Zer dela eta horrenbeste denbora pasatu zen SEren lehen behaketatik bere erabilera praktikora arte? Hau esplikatzeke zenbait balizko arrazoi daude [14]. Lehen, aurretik espektroskopistek erabiltzen zituzten iturri eta tresnekin alderatuz, erradiazio-iturri hau erabiltzeko konplexutasunean datza. Bigarren funtsezko arrazoa, SE iturriak zeuden azeleragailu eta bilketa-eraztunak («storage rings» direlakoak) energia altuetako fisikariari esku zeudela da, beraien nahi eta beharrei egokituak. Izatez, lehen SE iturriak partikulen talkak egiteko erabiltzen ziren azeleragailuetan zeuden eta haietan sortzen zen erradiazioa profitatzen zuten. 1960-1970 urte bitartean, zenbait leku berezitan aurki zitezkeen SE iturriak: NBS-a Washington-en, INS-a Tokio-n, DESY Hamburg-en... 1970. urtean, Wisconsin-eko Stoughton-en zegoen TANTALUS bilketa-eraztuna batik bat SE iturri bezala lan egiteko moldatua izan zen, baina berau ez zen SE iturri izateko bereziki diseinatu. Berdina gertatu zen Orsay-ko ACO-rekin. Guzti hauei «lehen belaunaldiko sinkrotroiak» deritze.

---

Physics-era. Idatzi horretan, Knowlton-ek sinkrotroi erradiazioa ikusten lehen bera izan zela zin egiten du. Dioenez, Haber-ek gelatik alde egin zuen behaketa gertatu baino hamabost edo hogeita minutu lehenago, eta berak, babes-estalkiaren barrualdean argia ikustean Langmuir-i oihu egin zion. Ostera, ispilu bat jarri zen jendeak argia ikus zezan [3].

<sup>16</sup> Sinkrotroi erradiazioa astrofisikan ere ikusi izan da, adibidez, eguzkiaren orbanetako, Jupiterren erradiazio-gerrikoetako (Van Allen gerrikoak) eta Karramarroaren nebulosako erradiazioan [1].

1976. urtean 300MeV-ko ISN-SOR bilketa-eraztuna martxan jarri zen Tokio-n. ISN-SOR-a, bereziki SE iturri bezala diseinatutako lehen sinkrotroia izan zen. Ia aldi berean, NBS-n, SURF II jarri zen martxan. Beranduago, beste zenbait sinkrotroi eraiki ziren: VEPP 2M eta VEPP 3 Novosibirsk-en, SPEAR Stanford-en, DORIS Hamburg-en, SRS Daresbury-n, Photon Factory Japonian... Guztiak SE iturri bezala lan egiteko diseinatuak izan ziren arren, erabilitako teknologia eta jakituria energia handiko partikula-azeleragailuetan garatutakoaren oinordekoa zen eta bi-garren belaunaldiko sinkrotroien taldea osatzen dute.

**1. taula.** Munduko zenbait sikrotroiren zerrenda.

---

Herraldea	Izena (hiria)
<b>Europa</b>	
Danimarka	ASTRID (Aarhus)
Frantzia	LURE (Orsay), ESRF (Grenoble)
Alemania	ANKA (Karlsruhe), BESSY (Berlin), DELTA (Dortmund)
	ELSA (Bonn), HASYLAB (Hamburg)
Britainia Handia	SRS (Daresbury)
Italia	ELETTRA (Trieste)
Suedia	MAX (Lund)
Suitza	SLS (Vilingen)
<b>Amerika</b>	
EEBB	ALS (Berkeley), APS (Argonne), CAMD (Baton Rouge)
	DFELL (Durham), CHESS (Ithaca), NSLS (Upton)
	SRC (Madison), SSRL (Standford), SURF II (Gaithersburg)
Brasil	LNLS (Campinas)
Kanada	CLS (Saskatoon)
<b>Asia</b>	
Txina	IHEP (Pekin)
India	INDUS (Indore)
Japonia	Nano-Hana (Ichihara), Photon Factory (Tsukuba),
	SPRING-8 (Nishi-Harima)
Errusia	SSRC (Novosibirsk)
Hego Korea	Pohang Accelerator Lab (Pohang)
Taiwan	SRRC (Hsinchu)

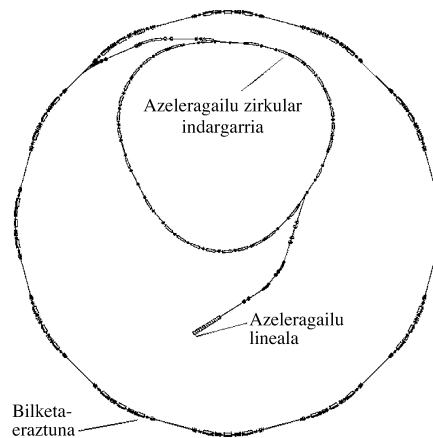
---

80ko hamarkadan, aurreko sinkrotroiekin lortutako esperientzian oinarrituz, sinkrotroi-projektu berriak garatzen hasi ziren. Sinkrotroi berri hauetan (hirugarren belaunaldikoak) erabilitako teknologiak etekina askoz hobea izatea ahalbidetu du. Hauen artean martxan jarri zen lehena Grenoble-ko European Synchrotron Radiation Facility-a (ESRF)

da, 6GeV-koa. 1998.urtean, Japoniako Spring-8 (8GeV) jarri zen martxan eta baita EEBBetako APS ere (7GeV). Hiru sinkrotroi hauek dira munduko handienak. 1. taulan, munduan dauden zenbait sinkrotroi ageri dira ([http://www-ssrl.slac.stanford.edu/sr\\_sources.html](http://www-ssrl.slac.stanford.edu/sr_sources.html) web gunean zerrenda luzeagoa kontsulta daiteke).

#### **4. GAINBEGIRADA BAT SINKROTROI BATEN FUNTZIONAMENDUARI**

Gaur egungo sinkrotroietan hiru zati nagusi bereiz daitezke: azeleragailu lineala, azeleragailu zirkularra eta bilketa-eraztuna (ikus 7. irudia). Harizpi bero batek igorritako elektroiak azeleragailu linealean azeleratu eta ondoren azeleragailu zirkularrean injektatzen dira. Elektroiak multzoetan («bunch») egoten dira bildurik. Bira bakoitzeko, multzoak geroz eta gehiago azeleratzen dira. Nahikoa energia dutenean, bilketa-eraztunera pasatzen dira. Bilketa-eraztunean elektroiak biraka mantentzen dira energia konstantearekin.

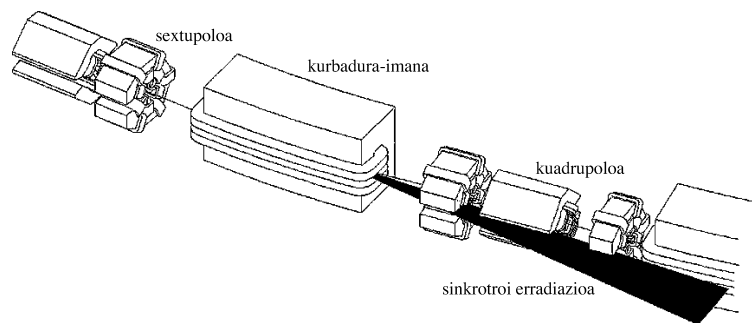


**7. irudia.** Gaur egungo sinkrotroi baten zati nagusiak. (<http://www.lis.ifae.es> web gunetik hartua).

Bilketa-eraztuneko elektroiak desbideratzeko, eremu magnetiko dipolarrak erabiltzen dira. Eremu horiek, kurbadura-imanak («bending magnets») deritzenekin lortzen dira. Elektroiak zuzenki higitzen dira kurbadura-iman batera heldu arte. Eremu magnetikoan sartzen direnean, elektroiak desbideratu egiten dira, eta eremutik irtetzean direnean, zu-

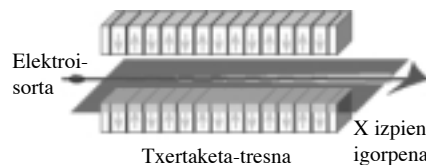
zenki higitzen jarraitzen dute, baina sartzean zuten norabidearekiko desbideraturik. Bilketa-eraztuna ez da egiazki zirkularra, poligonala baizik, eta erpin bakoitzean kurbadura imanak daude.

SEren igorpena, kurbadura-imanetan gertatzen da, elektroiek eremu magnetikoan azelerazioa jasaten baitute. Bi kurbadura-imanen arteko tartean, kuadropolo eta sextupolo magnetikoak jartzen dira elektroietara fokalizatzeko (ikus 8. irudia).



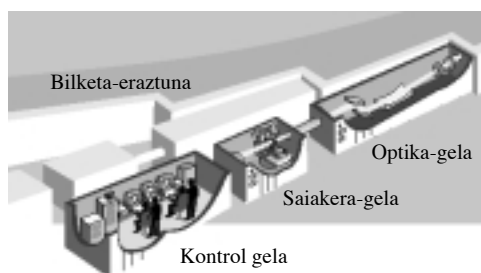
**8. irudia.** Bilketa-eraztuneko zenbait osagai: kurbadura-imanak, kuadropoloak eta sextupoloak. Sinkrotroi erradiazioaren igorpena kurbadura imanetan gertatzen da. Beste bi osagaiek elektroietara fokalizatzen dute. (<http://www.lis.ifae.es> web gunetik hartua).

Tarteetan, txertaketa-tresnak («insertion devices») ere kokatzen dira. Tresna hauek, norabide ezberdinak dituzten txandaka jarritako dipolo magnetikoak dira (ikus 9. irudia). Elektroiek sigi-saga antzerako bidea egiten dute txertaketa-tresnen eremu magnetikoaren barnean, eta norabidez aldatzen duten bakoitzean, SE igortzen dute. Irteeran, elektroiek sartzeraoan zuten norabide berbera mantentzen dute. Txertaketa-tresnak, gaur egun dauden SE iturri boteretsuenak dira. Igorritako erradiazioaren ezaugarrien arabera, bi txertaketa-tresna bereizten dira: astintzaileak («wiggler») eta izurtzaileak («undulator»).



**9. irudia.** Txertaketa-tresna baten eskema. (<http://www.esrf.fr> web gunetik hartua).

Erradiatzean elektroiek galtzen duten energia berreskura dezaten, irradi-maiztasuneko barrunbeak («radiofrequency cavities») daude bilketa-eraztunean. Bertan, galdutako energia irradi-uhinen bidez ematen zaie elektroiei. Orokorrean, porlanezko horma oso lodiek estaltzen dute bilketa-eraztuna, ingurunea erradiazioetik babesteko.



**10. irudia.** Erradiazio-lerro baten eskema. (<http://www.esrf.fr> web gunetik hartua).

SE erradiazio lerroetan («beamlines») erabiltzen da (ikus 10. irudia). Hiru alde bereiz daitezke erradiazio-lerroetan: optika-gela («optical hut»), saiakera-gela («experimental hut») eta kontrol-gela («control cabin»). Optika-gelan, kurbadura-iman edo txertaketa-tresna batetik da-



**11. irudia.** Grenoble-ko ESRF sinkrotroiak ia kilometro bateko perimetroa du. Kanpai itxura duen eraikuntza grisa, ILL-eko (Institut Laue Langevin) erreaktore nuklearra da.

torren erradiazioa egokitzeko tresneria dago: osagai fokalizatzaileak, monokromatzailea, zirrituak... Saiakera-gelan difraktometroak egoten dira, eta horietan, aztertu nahi den lagina jartzen da. Optika-gelan egokitutako erradiazioak lagina argitzen du eta detekttagailuen bidez difraktatu edo zurgatutako erradiazioa neur daiteke. Bai optika-gelan, bai saiakera gelan dagoen tresneria guztia, kontrol-gelan dauden ordenagailuen bidez kontrolatu ohi da. Normalean optika- eta saiakera-gelak, berunezko horma sendoak izaten dituzte, kanpoaldea X izpietatik babesteko.

Gaur egungo sinkrotroiek tamaina izugarria izan dezakete (ikus 11. irudia). Adibidez, ESRF-ko bilketa eraztunak, 844 m-ko zirkunferentzia du eta 50 saiakera-lerro inguru daude. 500 pertsona inguruk lan egiten dute bertan eta urteko aurrekontua 400 milioi liberakoa da gutxi gorabehera.

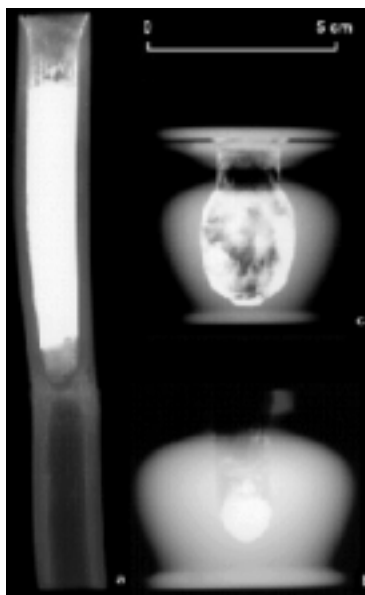
## **5. ERABILERAK**

Sinkrotroi-lerro bakoitza, ondoko teknika bat edo gehiago burutzeko egokiturik dago: difrakzioa, hauts-difrakzioa, biomolekulen kristalografia, angelu txikiko sakabanatzea, sakabanatze magnetikoa, topografia, gainazal eta fasearten analisia, sakabanatze inelastikoa, sakabanatze nuklearra, zurgapen-espektroskopia, X izpien bidezko dikroismo zirkular magnetikoa, tomografia, mikroskopia, fluoreszentzia, medikuntza-diagnosia (angiografia, tomografia)... Teknika hauek, hainbat alorretako ikerkuntzan erabiltzen dira. Bakan batzuk aipatuko ditugu:

- *Biologian*: sendagaiak sortzeko garrantzitsua izan ohi da haien egitura ezagutzea, horrek gorputzak nola zurgatuko dituen muga baitezake. Orokorrean, lagin biologikoen difraktatze-ahalmena oso txikia denez, fotoi ugari eskaintzen duen iturri bat nahitaezkoa da. Horregatik, SE berebizikoa da ikerkuntza mota hauetarako. Birus, proteina eta abarren egiturak lortzeko ere erabiltzen da.
- *Industrialian*: kosmetikatik hasita mikroelektronikaraino. SEri esker, egiptoarrek erabiltzen zituzten zenbait makilajeren osaera zehazki ezagutu ahal izan da (ikus 12. irudia). Gaur egungo kosmetikako produktuak hobetzeko ere erabiltzen da: mikrodifrakzio-tekniken bidez, kosmetikoak azalaren zein ilearen gainean nola eragiten duten zuzenki azter daiteke. Beste adibide bat plastikozko botiletan dugu: plastiko hauen propietateetan, polimeroen egituraketa eta orientazioak eragiten dute. Hauek, SEren bidez azter daitezke. Mikroelektronikan, siliziozko olatetan egon daitezkeen mikrokutsadura neurtzeko X izpien guztizko islatze-fluoreszentzia (Total X-Ray Reflection Fluorescence) deitzen den teknika erabil daiteke. Elementu kutsatzaileen kantitatea oso txikia denez, halaber SE moduko fotoi-iturri boteretsu bat beharrezkoa da.



- *Medikuntzan*: SE bereizmen handiko angiografiak egiteko erabiltzen da. Bestetik, tomografia tekniken bidez, hezurren hiru dimentsioko ereduak lor daitezke.
- *Fisikan eta kimikan*: material ezberdinen egitura, osaera eta propietateak aztertzeko (elektroi-egitura, egitura atomikoa, loturak, erreakzioak, katalisia, presio eta tenperaturaren arabeko portae-rak, litografia...).



**12. irudia.** Louvre Museoko zenbait egiptoar ontziren X izpien bidezko erradiografia. (<http://www.esrf.fr> webgunetik hartua).

## 6. ETORKIZUNA

Dirudienez, baliteke etorkizuneko sinkrotroiak azeleragailu linealak erabiltzen dituzten elektroien askeko laserretan (FEL: Free Electron Laser) oinarritzea [15]. Munduan badira zenbait talde ikerketa eta diseinu berriak garatzen: Stanford Linear Accelerator Center-a, Brookhaven National Laboratory-a, DESY<sup>17</sup>... Baina hauen etekina hirugarren belaunaldiko

---

<sup>17</sup> FEL-ei buruzko informazio zabala nahi izanez gero, <http://www.desy.de/~wroblewt/sci-fel/> webgunean aurki daiteke.

sinkrotroiena bezain ona izateko agian hamarkada bat baino gehiago itxaron beharko dugu.

Hirugarren belaunaldiko sinkrotroi berriak eraikitzekeo proiektuak ere badaude: SOLEIL Frantzia<sup>18</sup>, DIAMOND Britainia Handian (bi proiektu hauetan Espainiak ere parte hartzen du), Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Llaboratori de Llum Sincrotró Katalunian<sup>19</sup>... Ziur esan daitekeena da hamarkada berri honetan SEren erabilerak gora egiten jarraituko duela.

## ESKERRONAK

Egileak, Espainiako Hezkuntza eta Zientzia Ministerioak emandako Ikertzaileak Prestatzeko Beka eskertu nahi du.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] JACKSON, John D. 1999. *Classical Electrodynamics*, 3. argitalpena, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [2] BLEWETT, John P. 1998. «Synchrotron Radiation-Early History». *Journal of Synchrotron Radiation*, **5**, 135-139.
- [3] KOCH, Ernst-Eckhart *et al.* (1983). «Synchrotron Radiation-a powerful tool in science». Non: *Handbook on synchrotron radiation*. E.E. KOCH (argitaratzailea). NH Publishing Company.
- [4] TERNOV, I.M. 1995. «Synchrotron Radiation». *Physics Uspekhi*, **38**(4), 409-434.
- [5] EZPELETA, J.M. 1998. «X izpien bidezko kristalografia». *Ekaia*, **9**, 31-65.
- [6] SCHWINGER, Julian. 1949. «On the classical radiation of accelerated electrons». *Physical Review*, **75**, 12. zbkia., 1.912-1.925.
- [7] BOHM, D. eta FOLDY, L. 1946. «The theory of the Synchrotron». *Physical Review*, **70**, 5.-6. zbkia., 249-258.
- [8] MCMILLAN, Edwin M. 1945. «The Synchrotron-A Proposed High Energy Particle Accelerator». *Physical Review*, **68**, 143-144.
- [9] ELDER, F.R., GUREWITSCH, A.M., LANGMUIR, R.V. eta POLLOCK, H.C. 1947. «A 70MeV Synchrotron». *Journal of Applied Physics*, **18**, 810-818.
- [10] BALDWIN, George C. 1975. «Origin of Synchrotron Radiation». *Physics Today*, **28**, urtarrila, 9-10.

---

<sup>18</sup> Proiektu honek zenbait gorabehera izan ditu: 1998. urtean proiektua alde batera utzi zen, baina 2000.ean berriz ere aurrera egitea erabaki da.

<sup>19</sup> Proiektu hau gaur egun geldirik dago baina litekeena da aurtan berrekitea. Bideragarritasun-txostena ondoko web gunean kontsulta daiteke: <http://www.lls.ifae.es/report/report.html>.

- [11] ELDER, F.R., LANGMUIR, R.V. eta POLLOCK, H.C. 1948. «Radiation from electrons accelerated in a synchrotron». *Physical Review*, **74**, 1go zbkia., 52-56.
- [12] TOMBOULIAN, D.H. eta HARTMAN, P.L. 1956. «Spectral and angular distribution of ultraviolet radiation from the 300-MeV Cornell Synchrotron». *Physical Review*, **102**, 6. zbkia., 1.423-1.447.
- [13] MADDEN, R.P. eta CODLING, K. 1963. «New autoionizing atomic energy levels in He, Ne and Ar». *Physical Review Letters*, **10**, 12. zbkia., 516-518.
- [14] KUNZ, C. 1979. «Introduction-Properties of Synchrotron Radiation». Non: *Synchrotron radiation: techniques and applications*. KUNZ, C. (argitaratzailea). Springer-Verlag, Berlin.
- [15] WINNICK, Herman. 1998. «Synchrotron radiation sources-Present capabilities and future directions». *Journal of Synchrotron Radiation*, **5**, 168-175.