

Zer da eta zertarako balio du Bilboko ESS Partzuergoak eraikiko duen azpiegiturak?

F. Javier Bermejo

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Estructura de la Materia, eta UAI Física Aplicable (CSIC - UPV/EHU)

Laburpena: Artikulu honetan, ESS-Bilbao Partzuergoaren ekimena sortzean gertatu ziren zirkunstantzia bereziak azalduko dira lehenik, horien ondoriozkoak baitira egungo konfigurazioa eta helburuak. Jarraian, esperimentaziorako neutroi sortak darabiltzaten tekniken garapenari buruzko zenbait ohar egin ondoren, egun ESS-Bilbao ekimenak garatzen diharduen egitasmoa azaltzen da, bide batez instalazio horrek hainbat arlotan izan ditzakeen aplikazioak aipaturik. Eraiki nahi den neutroi-iturriak 110 kW-eko potentzia izango du, baina aukera dago instalazioa zabaltzeko, etorkizunean behar izanez gero. Azeleragailuaren espezifikazio teknikoa bateragarria da ESS-AB enpresak Lundén (Suedia) eraikitzen diharduen azeleragailuarekin. Bilbon gauzatuko den proiektuak bereganatu egingo ditu garatzen ari diren zenbait proiektuekiko sinergiak, hala nola CERNeko LHCra injektore berriarekikoa (Linac4), edo Britainia Handiko ISIS espazio bidezko neutroi-iturrian eraikitako FETS azeleragailuarekikoa, edo Ameriketako Estatu Batuetako Oak Ridgeko Spallation Neutron Sourcen eraikitako bigarren itu-estazioa eraikitzeko proiektuarekikoa, edota Ganilgo (Caen, Frantzia) Spiral2 instalazioarekikoa. Bilboko instalazioan aurreikusita dauden aplikazioen artean honakoak daude, besteak beste: materialak, osagai elektronikoak eta lagin biologikoak irradiazeko laborategiak, eta $\text{Be}(p,xn)$ erreakzio zuzenean oinarrituriko neutroi-iturria. Azken iturri horretako neutroi-fluxuak aski handiak izango dira hainbat aplikazio ahalbidetzeko bai instrumentazio neutronikoaren arloan eta bai irakaskuntzan eta erabiltzaileen trebakuntzan ere; halaber, fluxu egokiak izango dira instalazio handietan egin beharreko esperimentuen prestakuntzan laguntzeko, baita materialak irradiazeko energia altuko neutroiekin, edota moderatzaileen optimizaziorako ikerkuntzak eginda neutroi-iturri handietan aprobetxamendu optimoa lortu ahal izateko.

Abstract: In this paper, first special circumstances set up by ESS-Bilbao Consortium are presented, which are derived from the objectives of the current configuration. Then, after some observations on the development of techniques experiments with neutron beams, it is dedicated the ESS-Bilbao initiatives to the development of the project, and applications of this installation can be applied in different areas.

1. NOLA ETA ZERGATIK SORTU DA ESS-BILBAO EKIMENAREN GAUR EGUNGO EGITURA? NEUTROI-ITURRI EUROPARRA IZATEKO HAUTAGAITZA BAZTERTU ZELAKO

1.1. Hasierako proposamenak (2003-2005)

Ia hamar urte joan dira, UPV/EHUko irakasle batzuk Euskal Herrian azpiegitura zientifiko-tekniko handi bat eraikitzeko posibilitatea aztertzen hasi zirenetik. Ekimen haren zergati bultzatzailea izan zen, hain zuzen, Cerdanyola del Vallésen ALBA sinkrotoiaren eraikuntza fasea abiatzeko unea. Gure lurraldeetan instalazio horren bikia eraikitzeko asmoa —horixe baitzen hasierako ideia— baztertu ondoren, espalazio bidezko neutroi-iturri bat garatzeko proiektua gauzatzeko lehenengo ahalegin bat bideratu zen, pentsatuz ezen horrek zerbitzu egokia eman ziezaiekeela mota horretako teknika esperimentaletan interesaturik zeuden erabiltzaileei, estatu espainiarreko eta inguruko estatuetako ikertzailei bereziki.

1.2. Nazioarteko aditu talde batek emaniko lehenengo gomendioa (2006ko abendua)

Proiektu horretarako Bizkaiko Foru Aldundiak jarritako diruak ahalbidetu egin zuen lehenengo azterketa tekniko arrazoizkoa egitea, eta arlo horretako aditu talde bati eskatu zitzaion lan hori aztertzea 2006an. Batzordearen buru Dr. David Long Price izan zen, espalazio bidezko lehenengo neutroi-iturriaren egileetako bat, Argonne National Laboratory (USA) zentroan dagoen Intense Pulsed Neutron Source (IPNS) instalazioaren sortzaileetako. Halaber, batzordekide izan ziren zenbait espalazio-gunetan ardura zuzena zeukaten adituak, hala nola Britainia Handiko ISIS zentroko Dr. Andrew D. Taylor, Oak Ridge-ko (USA) Spallation Neutron Source-ko Dr. Ian Anderson, Japoniako J-PARC zentroko M. Arai eta Los Alamos Neutron Scattering Centerreko Dr. F. Mezei. Batzorde horrek bere ondorioak aurkeztu zizkien 2006ko abenduaren 18an hemengo arduradunei, horien buru izanik Perez Iglesias irakaslea, garai hartan UPV/EHUko errektore zena. Ondorio horiek laburbilduta aurkeztuko ditugu jarraian, hitzez hitz:

- Make the bid for the ESS a priority with the expectation of a European decision within about 2 years.
- Immediately proceed to build an ESS-Bilbao project team to address specific technical and scientific goals (accelerator design, target, instrumentation, civil engineering, safety and project management).
- We envisage that the scientific-technical activities will lead to the foundation of a Centre for Spallation Technology in Biscay that will allow the Spanish community to grow relevant core competencies

and develop the expertise required for future projects of this nature. If Biscay is selected as the site for the ESS, this Centre will enable Spain to contribute effectively to the international project. If the ESS is not built in Spain, the Centre will become the nucleus for a regional project. In particular, it will enable the Spanish community to evaluate the option that best serves their needs including the detailed optimization of a 250-kW Short Pulse Spallation Source (SPSS) and consideration of a 750-kW Long Pulse Spallation Source (LPSS).

1.3. Zenbait arrazoi hautagaitzaren porrota hain erabatekoa zergatik izan zen azaltzeko

Administrazioak kontuan hartu zituen partzialki aditu batzordeak egitza gomendioak, eta partzuergo publiko bat eratu zen erdibana espainiar administrazio zentralaren eta euskal erkidegoaren administrazioaren artean. Iturri europarra gure lurraldean kokatzea zen helburua.

Nolanahi dela, saiakera horretan ez zen kontuan hartzen (ez garai hartan ez egun) azpiegitura horren eraikuntzarako europar funtsak lortzea; hortaz, finantzazioa estatuen arteko akordio alde bikoien menpe geratu zen.

Alde batetik, administrazioen arteko akordio horrek finantzazio nahikoa eman zion ESS-Bilbao Partzuergoari, berari zegozkion atazak bideratu ahal izateko; baina, bestalde, bertan ez ziren kontuan hartu proiekturako talde tekniko baten nukleazioari buruzko gomendioak, bereziki taldeak konpetentziak izan zituzan pisu espezifikoko eta izaera profesional propioko talde tekniko bat lortzeko; gutxienez, hori zen egoera 2007. urtean. Izan ere, beren eginbeharrak partzuergoaren arduradunek plazaratu zuten ikusmenak erakutsi zuenez, negoziazio- eta propaganda-ariketatzat zeukaten soilik, eta ondorioz, ekimen hura zientzia esperimentaletatik kanpoko langileen esku utzi zuten.

Bilboko egitasmoarekin batera, Suediako Lund eta Hungariako Debrecen ere bazeuden antzeko egitasmoak. 2008ko erdialderako, proposaturiko hiru egitasmoen ezaugarri teknikoak aurkeztu behar zitzaizkion Batzorde Europarreko European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) erakundeak izendaturiko ebaluazio-batzorde bati. Hori dela-eta, Partzuergoak zuzenketa partzialak egin behar izan zituen, eta horrela ahalbidetu egin zen langile batzuen kontratazioa, eta UPV/EHUko irakasleekin eta CSICeko zenbait kiderekin batera lan eginez, instalazioaren [1] eskema kontzeptuala prestatu zuten. Garai hartako Lundeko eta Debrecengo proposamenak ez bezala, eskema nahikoa hurbil zegoen egungo ESS-AB (Lund) erakunde publiko suediarrean kontuan hartu den diseinutik.

Geroago, 2008ko udan, hiru hautagaitzak aztertzeko ESFRI erakundeak sorturiko European Working Group for Siting the ESS (EWESS) era-

kundeak Bilbora eginiko bisitaldian, oso iritzi ona adierazi zuten, eta behin eta berriro adierazi zizkioten Partzuergoari beren ustez Bilboko proiektuak gainerako lehiakideen aurrean zituen abantailak. Zernahi gisaz, orduan sorturiko aukeraz ez ziren era egokian baliatu, zeren, horretarako askoz ere ahalegin handiagoa egin beharko baitzen garapen zientifiko-teknikoei zegokienez, gure hautagaitzaren bideragarritasun teknikoari buruzko zalantzak argitze aldera; gainera, ordezkaritza politikoa eta instituzionala egokitu egin beharko zen uneko premietara, kaudimen teknikoan indar eginez eta gaian interesaturik zeuden beste herrialdeei eskainiko zitzaizkien kontrapartidak identifikatuz.

Gauzak horrela, proiektuaren kokalekuari buruzko azken erabakia 2009ko maiatzaren bukaeran hartu zen, ezustean, Bruselan eginiko afari batean. Bertan, herrialdeen ordezekoak bozkatzera halabehartu ziren. Bilera hartara Espainiako Zientzia eta Berrikuntzarako Ministerioko ordezkariak eramandako proposamenak oinarri hauek zeuzkan: batetik, proiektuaren kokalekuari eta finantziarioari buruzko erabakia atzeratzea; bestetik, ahaleginak instalazioaren birdiseinuan kontzentratzea, gure hautagaitzak aurkezturiko makinaren eskemari jarraituz; eta, azkenik, kostu errealak berriro ere zenbatestea, errore marjina onargarriak kontuak hartuz, azpiegituraren eraikuntzari argi berdea eman baino lehen. Proposamen hori ez zen onartua izan une hartan, baina, harrigarriro, proposamen horixe da gaur egun arte ESS-AB erakundearen jardueraren muina.

2. PREMIA BERTUTE BIHURTUZ. TOKIKO GARAPENERAKO PROIEKTU BAT, INSTRUMENTAZIO AURRERATUKO GAITASUN TEKNIKO ETA INDUSTRIALEN ARLOAN

Portugalek baino ez zuen aldeko botua eman, eta botuen alde ikaragarriaz hautagaitza galdu eta handik gutxira, Zientzia eta Berrikuntzarako Ministerioak Akordiorako Memorandum bat sinatu zuen bere homologo suediarrekin 2009ko ekainaren 6an, non konpromisoa hartu baitzuen 180 M€-ko inbertsio bat egiteko, eta preseski Bilbon esperimentazio-zentro bat eraikitzeke; horrela, ESSko garapenari laguntza modura lan egingo zuen, parte batean behintzat. Memorandum horren egitaraua eztabaidagarria bada ere, sinadura horrek ahalbidetu egin du bi administrazioen arteko Partzuergo bat berrezartzea; zer esanik ez, hala egin zen helburuak moldatuz eta zenbait urteko programa eta egitura berria adostuz.

Gaur egun, Bilbon eraiki beharreko instalazioaren ezaugarriak eta helburuak zehaztu gabe daude oraindik, aditu batzordeen txostenetan definitu beharreko oinarrien zain. Edozelan ere, proiektua konfiguraturik dago garapen autonomoari begira, instalazioa etorkizunean gai izan dadin oinarriko laborategi modura erabilia izateko, estatuak parte hartzen duen hainbat

arlotan (CERN, ILL, ISIS, FAIR, etab.); horrela ahalbidetu egingo zaio komunitate zientifiko-teknikoari eta «Zientziaren Industria» deritzon arloko enpresei lehiakortasun egokia lortzea, lankidetzaz horretan parte hartzeak eskatzen dien gastuaren neurrian bederen.

2.1. Non gauden zientzian eta teknologian: gure ahuluneak eta gabeziak

Erkidego baten garapen zientifikoa neurtzeko onartu ohi den metrika, oro har, komunitate horretan sorturiko artikuluen portzentajea adierazten duten indize bibliometrikoa da; indizea finkatzeko, kontuan hartzen da Institute for Scientific Information (egun Thomson Reuters elkargoaren menpekoa) eta antzerako institutu espezializatuak bilduriko argitalpenak, eta bai artikuluko horietako aipamenak, horiek guztiak kalitate neurriari loturik baitaude. Urtero argitaraturiko artikuluek oinarri hartuta, Espainiako estatua zortzigarren edo bederatzigarren postuan dago munduan. Artikulu bakoitzeko aipamenen kopuruari dagokionez, batez bestekoa 10, 20 da, ez oso urrun Italiatik (11,54) eta Frantziatik (11,93), baina urrun samar AEBetatik, herrialde eskandinaviarretatik edota Erresuma Batutik, non 15 aipamen inguru diren.

Dena den, egoera ez da hain faboragarria patente triadikoak kontuan hartuz gero. Patente horiek baliagarriak dira Europar Batasunean, Japonian eta Ameriketako Estatu Batuetan, eta adierazle gisa erabiltzen dira herrialdeen emaitzak neurtzeko eta alderatzeko, berrikuntzaren eta nazioarteko zabalkundearen arloetan. Espainiako estatuan sorturiko patenteak UE27 taldean sorturikoen % 2 (ehuneko bi) baino ez dira; gainera, batez ere bioteknologiakoak dira, eta neurri txikiagoan TICekoak.

Baina, Espainiako estatuak urtero 160 M€ inguruko ordainketa egiten du instalazioetan beste estatuakiko partaidetzetan, eta horrez gain, beste 200 M€ gastatzen ditu Europako Espazio Agentzian. Hala ere, dirutza garrantzitsu horren ordainketa ez da konparagarria instalazioak hornitzeko industriako kontratazioan itzultzen zaionarekin (gastaturikoaren % 20 baino gutxiago); gainera, dirua gastatzen dugun azeleragailu-instalazioak edo espazio-teknologia bezalako arloetan harrigarriki txikia da gure presentzia, guk baino askoz ere gutxiago gastatzen duten estatuen aldean behintzat.

Aurreko paragrafoan aipatu dugun ordainezko itzulketako gabeziaren azalpenetarako gako bat da, preseski, estatuan ez egotea tamaina egokiko oinarriko laborategirik, hainbat lankidetzatan partaide sinesgarritzat hartuak izateko moduan behintzat. Baldintza horien pean, bigarren mailakoak izan dira Zientziaren Industriako gure ekarpena egiteko abiatu diren jarduera gehienak; ondorioz, balio erantsi gutxien duten arloetan parte hartu dugu, bazkide nagusientzat lehentasunezkoak ez diren arloetan, hain zuzen ere.

2.2. Zer ekar diezaiokeen gure herrialdeari honelako proiektu batek

Gauza jakina da Espainiako estatuak indar nahikorik ez duela eragin funtsezkoa edukitzeko goi-mailako erabaki garrantzitsuetan, baina, badira gure industria-ehunean ondo frogaturiko gaitasunak eta ekimenak, tamaina txiki eta ertaineko enpresek garapenkontratuak eta instrumentazio aurreratuko hornidurako lehiaketetan parte hartzeko, eta horrelakoak lortzeko. Izatezko gertaera hori, lehenik eta behin, ekintzaileen apostu sendo eta saiatuaren ondorioa da, Zientziaren Industriaren INEUSTAR elkartearen bateginik dardena; kontuan izan behar da bestetik, ondo baliatu direla administratibotik bultzatu eta lagunduriko zenbait ekimen, zeintzuen eraginez transmititu egin zaizkion enpresa-sektore horri beharrezkoak diren teknologia-gaitasunak. Gainera, artikulu honen espezializazioarlotari dagokionez, egun, gure herrialdeko enpresa elkarte batzuek teknika-gaitasun handiagoak dituzte teknologia sektore publikotik sektore pribatura eraman beharko luketen zentroek baino (Unibertsitateak eta Ikerkuntza Erakunde Publikoek ari gara).

Orain arte azaldutakoa laburbilduz, duela hogeita hamar urtetik (alegia, estatuak CERNeke kide izatea eskatu zuenetik), argi dago gabezia handia dugula parte hartzen hasi garen erakunde zientifiko-teknikoetan, benetako ordezkariari dagokionez behinik behin. Gabezia edo defizit horren ondorioz, batetik, zailtasunak izan ditugu ekipamendu-kontratuak ekartzeko, baina, bestetik, are garrantzizkoago, ez dugu gaitasunik izan eragina sortzeko gure bazkideengan, noiz eta erabaki estrategikoak hartzeko orduan. Horren adibide nabaria da esate baterako, ESSren kokalekuaren irabazle gisa Lund-en hautagaitza aukeratzeko erabakian CERNeke izan duen jokamoldea, ez da ahaztu behar Espainiako estatua bosgarrena dela diru-ekarpenean. Beraz, agerikoa denez, jabetu beharra dago nahitaezkoa eta urgentea dela azpiegitura guztiz desberdina sortzea; gaur egun Azpiegitura Zientifiko-Tekniko Singularren mapan operatiboak direnekiko bereizgarria izango litzateke azpiegitura hori, eta epe ertainean horrek ahalbidetuko liguke egun esleitzen zaigun bigarren mailako izaera latz hori gainditzea. Gauzak horrela, azpiegitura horrek izan beharko du gaitasun tekniko aski, bazkide fidagarri izan gaitezen parte hartuko dugun lankidetzetan eta bai erantzunkizuna hartu ahal izateko balio erantsi handiena daramaten langintzetan ere; gainera, geure inguruneke enpresek aukera izan beharko dute prototipo ustiagarrien industrializazioan eta prestakuntzan parte hartu ahal izateko, garapen propioko produktu modura.

3. ESPERIMENTAZIORAKO NEUTROI-ITURRIAK: EZAUGARRIAK, HISTORIA ETA PERSPEKTIBAK

Gauza ezaguna da goi atmosferako espalazio-erreakzioen ondorioz, ezin konta ahala neutroi iristen direla egunero Lurraren gainazalera [2],

eta hala jakin arren, halaber, material fisionagarriko arroken pilaketaren ondorioz errektore nuklear natural bat existitu dela, gutxienez, Afrikako mendebaldeko kostaldean (Oklo, Senegal); hala ere, duela laurogei urte abiatu zen neutroiak kontrolpean baldintza kontrolatuetan ekoizteko ekimena. Orduan, hain zuzen, James Chadwick-ek [4] dispositibo txiki bat eraiki zuen; aparailu horretan, polonioaren desintegrazioan sorturiko alfa partikulek (helionukleoak) beriliozko itu baterantz bideratzen ziren, eta, elkarrekintzaren ondorioz, neutroi-fluxu txiki bat sortzen baitzen. Orduetik aurrera, esperimentazioan erabili ahal izateko asmoz, hainbat bide aztertu dira neutroi sorten sorkuntza eta erabilerarako, nahiz eta joan den mendeko laurogeiko hamarkadara iritsi arte, neutroi sortez hornituriko esperimentazio-instalazioak errektore nuklear esperimentaletakoak ziren, eta gai ziren 10^{160} n/cm² · s ordenako fluxuak sortzeko.

3.1. Hirurogei urtetik gorako historia. Neutroi-sortak erabiliz eginiko funtsezko aurkikuntzak

Fermi eta beraren lankideak izan ziren 1947an materialen egitura aztertzeke neutroi sortak erabiltzeko posibilitatea iradoki zuten lehenak; hain zuzen, Chicagoko errektoreen hirugarren bertsioan (Chicago Pile3) oinarriturik, neutroiek materialetan jasaten duten Bragg sakabanaketaren propietateak erabili zituzten, sekzio nuklear eraginkorrak neurtzeko. Nolanahi den, erkidego akademikoari dagokionez, hirurogeiko hamarkada ondo sartuta egon arte, neutroi sortak ez ziren erabiltzen hasi egitura eta dinamika atomikoa aztertzeke, eta hori gertatu zen Chalk Riverko (Kanada), Oak Ridgeko (AEB) eta Harwellgo (Erresuma Batua) instalazioak kanporako ireki zirenean. Geroztik, mota guztietako materialak ikertu dira teknika horien bidez: kristal sinpleak, biomaterialak eta Oinarrizko Fisikaren arlokoak. Gainera, teknika horiei esker ekarpen garrantzitsuak egin dira funtsezko garrantzia duten hainbat fenomenoren azalpenean eta kuantifikazioan; besteak beste, honako hauek aipa daitezke:

- Antiferromagnetismoa eta egitura magnetiko konplexuak. Materialen momentu magnetikoen ezartze-moduari buruz daukagun ezagutza ia guztia neutroi sortekin eginiko esperimentuetatik dator. Hain zuzen, neutroiekin eginiko esperimentuek argitu zuten zenbait material magnetikotan momentu magnetikoek duten ezarpena, preseski, imanazio makroskopikoa agertzen ez duten material magnetiko batzuen kasuan, non aurkako magnetizazioko dun sare tartekatua dauden, elkarren barnean sarturik; gaur egun, fenomeno horri antiferromagnetismoa deritzo.
- Spin uhinak eta bestelako kitzikapenak material magnetikoetan. Neutroien bidez frogatu da horrelako fenomenoen izaera kooperati-

boa gertatzen dela, eta argitu egin da horien zeregina hainbat propietate makroskopikoren azalpenean.

- Fonoiak eta solidoetan kokaturiko kitzikapenak. Soinu-uhinak direnez, fonoiak materialetan gertatzen den bero-garraioaren arduradunak dira, eta spin-uhinen antzera, funtsezko zeregina dute materialetan gertatzen diren fase-trantsizioetako mekanismoetan.
- Ingurune desordenatuetao banaketa erradialeko funtzioen neurketa eskala absolutuan. Funtzio horiek oso baliagarriak dira zenbait ingururen egitura mikroskopikoaren deskribapen kualitatiborako; esate baterako, likidoena, beirena eta kristal desordenatuena deskribatzeko.
- Ereduzko sistemetan eginiko esperimenduak. Esperimendu horiek ahalbidetu digute ulertzea dimentsio bakarreko eredu eta bi edo hiru dimentsioko eredu fisika estatistikoa, eta, halaber, Haldane-rren aierua egiaztatzea eta solitoien aurkikuntza egitea ere, azken hauek sistema oso ez-linealen oinarrizko kitzikapenak izanik.
- Elkarrekintza elektroahulari buruz dugun ezagutzari eginiko ekarpenak.
- Neutroi sortekin eginiko esperimenduetan, bereziki, neutroiaren desintegrazioari buruzko azterketa xehatuek agerian jarri dute paritatearen biolazioa; gainera, hirura mugatu dute leptoi-familien kopurua.
- Neutroi uhinen frogapen experimental grabitate-eremuan.
- Mikroelektronvoltaren ordenako energiako dun neutroiekin eginiko esperimendu arduratsuek frogatu dute, hain justu, grabitatearen eraginez neutroiek duten higidura kuantizatua dela.
- Erradioterapiari izan daitezkeen balizko aplikazioak. Tumore barruko boro-inplanteen bitartez gertatzen den neutroi termikoen xurgapenean oinarrizko terapia gero eta interes kliniko handiagoa sortzen ari da.

3.2. Nola sortzen dira neutroiak? Esperimentazioerreaktoretatik azeleragailuen bidez gobernatutako iturrietara

Neutroiak sortzeko modu asko ezagutzen diren arren, horietako gutxi batzuek baino ez dute interes praktikoa, preseski tartean honako prozesu hauek baliatzen dituztenak: fisio nuklearra, balaztatze-erradiazioa (bremsstrahlung) edota partikulek itu finkoekin eginiko talketan sorturiko energia handiagoetako erreakzioak. Dena den, gaur egun, esperimenduzko neutroi sorten ekoizpenerako nagusitzen ari den bidea da partikula azeleratuekin (protoiekin eta deuterioekin) itu metalikoak erasotzea. Metodo hori gero eta gehiago nagusitzen ari zaie erreaktore experimental txikiei, eta, gauzak horrela, orain azken mota horretako bat bakarria ari dira eraikitzen (PIK izenekoa Gatchina-n, San Petersburgotik hurbil, 100 MW inguruko potentzia termikoarekin); izan ere, duela gutxi eraikitako beste bi baino ez dira ari lanean (FRM-II izenekoa Garching-en, Bavieran, eta OPAL izenekoa Lucas Heights-en, Australian).

Bitxia bada ere, esan dezakegu Chadwick-ek 1936an eginiko esperimentua izan zela lehena neutroiak sortzen, horretarako partikula batek itu finko baten aurka talka eginez; alegia, esperimentu hori lehenago egin zen Lise Meitner-ek eta Otto Hahn-ek fisio nuklearrari buruz eginiko lan dokumentatuak baino [5]. Espalazio-erreakzioa 1938an dago dokumentaturik, Glen Seaborg-en doktoretza-tesia argitaratu zuenetik [6], nahiz eta teknika hori neutroiak ekoizteko bideragarria dela adierazten duen froga esperimentalak 1974koa den; izan ere, orduan abiatu zen ZING-P instalazioa Argonne-ko (IL, AEB) Laborategi Nazionalean, eta horrek ekarri zuen 1981ean IPNS neutroi-iturria, zeina kanpoko erabiltzaileek arrakastaz ustiatutako lehenengo iturria izan baitzen. Espalazio-erreakzioek nukleo barruko eta nukleo arteko hainbat prozesu oso denbora tarte laburrean gertatzen dira (10–18s 10–20s) eta bertan goi energiako fotoiak, neutroiak, protoiak eta pioiak sortzen dira, baita zatiki nuklearrak ere, talka jaso duen nukleoa baino txikiagoak direnak, uste izatekoa den bezala [2].

Naturan gertatzen den espalazio-erreakzioan eta bereziki goi atmosferan gertatzen dena, erradiazio kosmikoren eraginez, erradiazio kosmikoa % 85ean osaturik dagoelarik, protoi, muoi, neutrino, pioi, kaioi, elektroi eta gamma fotoien fluxu garrantzitsuak eragiten dira, lurrazalerraino. Jadanik 1977an, Chalk River-ko (Kanada) espezialistek Intense Neutron Generator (ING) programa garatu zuten [7], neutroi sorta intentsoak sortzeko; instalazio haietan, 1019 n/s inguruko neutroi-fluxuak lortu ziren 1 GeV-eko protoi sorta bat itu finko baten aurka talkaraziz, eta 60 MWeko potentzia utziz. Proiektu hark garapen nabarmena izan zuen arren, ez zen gero praktikara eramanez, zailtasun teknikoak eta aurrekontuetakoak tarteko. Nolanahi den, ekarpen oso garrantzitsuak egin zituen geroago eraiki ziren neutroi-iturriak diseinatzeko: Argonne-ko IPNS, Tsukuba-ko (Japonia) KENS eta KEK, Erresuma Batuko ISIS eta, gaur egun, Oak Ridge-ko (Tennessee) SNS eta eraiki berria den Ibaraki-ko (Japonia) J-Parc.

Lunden garatzen ari diren ESS proiektuan, neutroien sorkuntza wolframizko itu baten gaineko espalazio-erreakzioaren bidez lortu nahi da, ituaurren aurka 2 GeVeko protoi sorta jaurtiz, eta guztira 5 MW-eko potentzia uzteko. Egun, proiektua azterketa fasean dago, eta kostuen ebaluazioa eginen ari dira.

Neutroiak ekoizteko badira era berean bestelako erreakzioak, hala nola elektroi sorta bat itu batean frenatzean sortzen dena. Prozesu horri balaztatze-erradiazioa deritzo (bremsstrahlung), eta bertan gamma fotoiak ere sortzen dira; azken horiek, aldi berean, kitzikapen nuklearreko prozesuen bitartez, esperimentaziorako baliagarriak izan daitezkeen prozesuak eragin ditzakete [8]. Mota horretako iturriak operatiboak izan dira Erresuma Batuan. Adibidez, HELIOS izenekoak, ahalmena zuen 1.014 n/s-ko flu-

xuak sortzeko 45 kWeko potentziaz. Oak Ridge-ko Laborategi Nazionalan oraindik ere operatiboa da ORELA instalazioa, antzeko fluxua sortzen duena 60 kW-eko potentziaz. Bukatzeko, besteak beste, badira helburu berarekin erabiltzen diren elektroizazio-azeleragailuak Hokaido, Tokio eta Kiotoko unibertsitateetan, eta Bariloche-ko Zentro Atomikoan.

Horiez gain, badira berriki eginiko zenbait garapen, oinarritzat hartu direnak. Behe energiako erreakzioak 1017 n/s-ko sorta intentsoak ekoizteko erregimen jarraituan; horretarako, 40 MeV-eko deuterio atomoen bidezko erreakzioak eragiten dituzte litio likidozko itu batean (striping edo biluzte-erreakzioak), neutroi-sortaren potentzia 10 MWekoa izanik. Proiektu hori IFMIF siglaz ezagutzen da, eta izatez, materialak dosi handien eraginpeko (20 dpa/urte) irradiaziopean aztertzea du helburu, gero fusio-erreaktoreetan erabiltzeko. Dena den, etorkizunean proiektu horrek bide berriak ireki ditzake materialen azterketarako neutroiak ekoizteko, alegia milielektonvoltaren ordenako energiadunak ekoizteko, sorturiko neutroien energia-banaketa kontuan hartuta (40 MeV-eraino) batez ere, zeren metodo horrek sistema moderatzaile ez hain bortitzak eskatzen baititu, 2,5 GeV-eko neutroiak moderatzeko behar direnekin konparatuz gero.

Bilbon diseinatzen ari den instalazioan, lehenengo fase batean, neutroi sorten arazoizko fluxuak (1013 n/s) sortu nahi dira, 60 MeV arteko energiadun protoiak berilio birakari baten aurka talka egitera bideratuz. Neutroien sorkuntza-erreakzioetan zatitu egiten da berilioa, emaitza modura helioatomoak eta neutroi askeak sortuz; azken hauen energiabanaketa 20 MeV arterainokoa da.

4. BILBOKO ESS PARTZUERGOAK ERAIKITZEN DIHARDUEN PLANTA ESPERIMENTALAREN OINARRIZKO DISEINUA

Jarraian, gainera deskribatuko dugu egun Bilboko ESS Partzuergoa garatzen ari den proiektua. Kontuan hartu behar dugu hasiera berezia izan zuela —Lund-en garatzen ari den proiektuarekin loturik baitago, parte batean behintzat—, eta abiatzeko unean norabide espezifiko zehatzik gabea zela; hori dela-eta, proiektuaren espezifikazioa oinarri batzuen gainean eraikitzen ari da; haien artean, honako hauek nabarmendu daitezkeen:

- Funtzionamenduko oinarrizko parametroek ahalik eta hurbilen egon behar dute proiektu suediarrean aukeratutakoetatik. Azelerazio-elementuei dagokienez, LCHaren injektore berriaren eraikuntza da Suediako proiektuaren diseinuaren funtsezko osagaia —alegia, CERNeko Superconducting Proton Linar (SPL) delakoarena—, non giro-tenperaturan funtzionatzen duen atalaren eraikuntza oso aurreraturik dagoen. Beraz, Bilboko proiektua txertaturik dago Lund-

koarekiko lankidetzan, eta instrumentazioari dagokionez, garapen bateragarria du lanean diharduten beste neutroi-iturri batzuekin, hala nola Britainia Handiko ISIS-STFC delakoarekin eta Oak Ridge-ko SNS izenekoarekin (TN, AEB).

- Lortu beharreko azken energia finkatzeko — eta, ondorioz, instalazioaren dimentsio orokorrak zehazteko —, kontuan hartu da Estatuko Administrazio Orokorrak eta Eusko Jaurlaritzak adostutako aurrekontua. Nolanahi den, diseinurako irizpide orokor gisa, kontuan hartu da zabalkunderako aukera, etorkizunean bidea irekita egon dadin energia balio egokietaraino handiagotu ahal izateko, eta horrela neutroi azkarren sorten sorkuntza ahalbidetzeko. Izan ere, energia altu horietan fragmentazio/ebaporazio nuklearra (espazioa) nagusituko da, erreakzio zuzenetan oinarrituriko mekanismoen gaineratik.
- Proiektu hau Lundeko jarduerekin txertaturik egoteko prestatzen ari den arren, garatzen ari garen instalazioa ez da soilik pentsatua hango instalazioaren menpeko gisa. Aitzitik, gurearen aplikazio-eremua suediarrena baino askoz zabalagoa da, hangoa optimizaturik baitago Materia Kondentsatu Bigunaren azterketarako. Hemengo egitasmoan, zientzialarien eta teknologoek erkidegoari kokapen egokia eman nahi diogu jarduera hauetan aritzeko. Era berean, egungoak baino baldintza ekonomiko egokiagoak eskaini nahi dizkiegu eragile ekonomikoari. Horrela eragileen lehiakortasuna hobetu delarik, hain zuzen ere zientziaren industriarentzat interesgarriak diren kontratuak eta proiektuak lortuko dira azpiegitura zientifikoetan.
- Hortaz, garatzen ari garen proiektua gure oinarritzko azpiegitura teknologiko-industrialaren elementu bultzatzaile gisa gauzatu nahi da. Gauzak horrela, alde batetik, laguntza zuzena eman nahi zaie laborategiei eta instrumentazioaren garapenean diharduten eragile ekonomikoari, preseski instalazio handietarako eta beste esperimenezko zentroetarako tresneria prestatzen dihardutenei. Bereziki, gaur egun ESS-Bilbaoren menpekoa den gunea instalatzen ari da Jundizko Industriagunean. Gunea materialen biltze-prozedura berezien azterketan espezializatuko da, prozedura hauek behar-beharrezkoak direlarik azelerazio-sistema eta itu gehienak prestatzeko.
- Dokumentu honetan deskribatzen diren aplikazioen artean daude ESS proiekturako interes zuzenekoak direnak, hala nola espektrometria neutronikarako instrumentazioaren garapena, moderatzaile kriogenikotarako entsegu-banku baten eraikuntza, modelizazio neutronikoaren lanetan egin beharreko laguntza-lanak edota azeleragailuen teknologiak. Halaber, bestelako aplikazio interesgarriak ere badaude fusio nuklearrerako eta erradiobiologiarako materialen azterketarako, baita erradiazio ionizatzailearen eragipean dauden

osagai eta azpistema mikro- eta nano-elektronikoekin esperimentatzeko ere.

Goian esandakotik ondoriozta daitekeenez, eskuragarri dagoen aurrekontuaren arabera dimentsiona daiteke proiektu hau. Hain zuzen, proiektuaren behe muga neutroien sorkuntzarako azeleragailu trinko batean oinarriturik dagoen iturri bati dagokio. Preseski, horrelakoak daude zenbait unibertsitatetan —Indiana (AEB), Tshinghua (Beijing), Hokkaido (Japonia) eta Kyoto (Japonia)— eta honako laborategi hauetan: Neutron-Imaging Facility Laboratory (Beijing), KEK (Neutron Science Div., Japonia), ANL (AEB), INFN-Legnaro (Italia) eta Riken (Japonia). Nolanahi den, jarraian xehetasunez deskribatuko den proiektuak aukera zabala du garapenerako, bai energiari dagokionez eta bai sorta-korronteari dagokionez ere; horrela, etorkizunean egin daitezkeen zabalkundeak ahalbidetuko dira.

5. DISEINU OROKORRA ETA ERAGIKETA-PARAMETROEN HAUTAPENA

Lehenengo fasea, protoien eta H ioien azeleragailu bat eraiki eta puntuan jartzeari dagokio batez ere. Azeleragailu hau gai izango da 60 MeV-eko energiak lortzeko; funtsean, azeleragailu hori giro-tenperaturan lan egiten duten kobrezko erresonatzaileen teknologian oinarrituko da.

Azelerazio-elementu nagusiak geroago zehaztuko diren bi erreferentzia-diseinu hauek izango dute eredu: Irrati-frekuentzien Kuadropoloaren (RFQ) teknologian oinarrituriko erresonatzailea eta Alvarez motako deriba-hodien azeleragailuan (DTL). Hautapen hori eginda maximizatu egin nahi dira zenbait sinergia, bereziki ISIS-STFC erakundeko Front End Test Stand (FETS) berriaren proiektuarekin eta CERNekeo LINAC4 proiektuarekin sor daitezkeen energiak. 1. taulan ageri dira Instalazioaren oinarrizko parametroak.

Bateragarritasuna gorde behar da jadanik funtzionatzen ari diren espalaziozko neutroi pulsatuen sorkuntzako iturriekin (SNS, J- PARC edo ISIS), baita ESS proiektuarekin ere, eta beraz bi ioi-iturri mantentzen dira: batetik, gainazaleko Penning motakoa, H⁻ ioiak sortzeko, eta, bestetik, elektroien ziklotroi-erresonantzia (ECR) printzipioan oinarrituriko protoi sortak sortzeko.

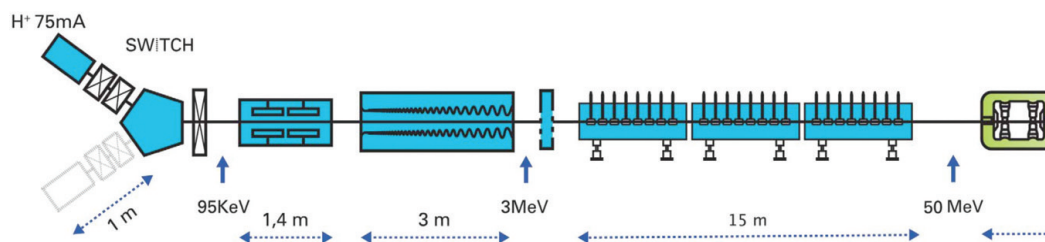
Egun, Penning iturria abian dago Zamudioko (Bizkaia) Parke Teknologikoan kokaturik dagoen esperimentaziorako eraikinean; horretan funtsezkoa izan da Rutherford Appleton Laboratory-ko ISIS iturriarekin izandako lankidetzak, 1995etik gaurdaino luzatu dena. Bestalde, osaturik dago ECR iturriaren instalazioa EHUKo Zientzia eta Teknologia Fakultatean (ZTF/FCT), Leioako campusean; instalazio hori, diseinu propioaren arabera eraiki da, INFN-Legnaro zentroarekiko lankidetzan.

1. taula. Instalazioaren oinarriko parametroak.

Sortaren energia zinetiko maximoa	60	MeV
Korrente maximoa	75	mA
Errepikapeneko maiztasun maximoa	50	Hz
Paketeen (<i>bunches</i>) maiztasuna	352.2	MHz
Pultsoaren iraupen maximoa	1.8	ms
Injektatu beharreko espezieak	H ⁺ eta H ⁻	
Azeleratze-osagaien luzera	29.5	m
Erauzketako emitantzia normalizatua (T)	0.34 π mm mrad	(norm.)
Erauzketako emitantzia normalizatua (L)	0.20 π° MeV	
	0.50 π mm mrad	(norm.)
Klistronen kopuru osoa	4	2.8 MW gailurrean
RFko efizientzia	0.85	
<i>Ituetarako garraioa</i>		
Sareta optikoa	FODO	7 m
Gelasken kopuru osoa	5	
Kuadrupoloaren sorta-garraioko gradu maximoa	2.08 T m ⁻¹	
Erauzketako disp.	kicker	dipoloa
<i>Neutroien sorkuntzarako itua</i>		
Materiala	Be metalikoa	100 % ⁹ Be, 1.848 g cm ⁻³
Egitura	Disko birakaria	92 cm O.D / 68 cm I.D.
Moderatzaile primarioa	CH ₄	12 cm × 4 cm × 12 cm
Fluxua 10 meV-an	[n/cm ² -eV-Sr-MW]	8.09 × 1.011
Moderatzaile trukagarria	p – H ₂	12 cm × 12 cm × 14 cm
Fluxua 10 meV-an	[n/cm ² -eV-Sr-MW]	1.63 × 1.012
Isolatzailea	Be metalikoa	Zilindroa 80 cm × 120 cm

ESS-Bilbaoko *linacaren* [9] azelerazio-osagai nagusiak honako hauek dira: RFQak («Radio Frequency Quadrupole»-ak), zeinak ioi-iturritik erauztean duten 75 keV-eko energiatik 3 MeV balioraino azeleratzen ditu protoiak. DTLak («Drift Tube Linac»-ak), zeinak 50 MeV-raino azeleratzen dituen.

Osagai horietaz gain, azeleratze-egituretan sekzio berezi bi daude: LEBT («Low Energy Beam Transport») deritzona eta ioi-iturritik erauzitako sorta prestatzeko eta RFQan egokia izateko beharrezkoa dena, eta RFQaren eta DTLaren bitartean dagoen MEBT («Medium Energy Beam Transport»). Kabitare supereroaleen prototipoak ere azeleratze-egituren parte dira.



1. irudia. ESS-Bilbaoko *linac*aren lehenengo fasearen eskema. Azeleragailua diseinaturik dago bai elektroi gehigarridun hidrogeno-ioiak (H⁻) azeleratzeko eta bai protoiak (H⁺) azeleratzeko ere. Bi ioi-iturriak akoplatu egingo zaizkio energia baxuko sortaren garraiorako segmentuari (LEBT), iman hautatzaile baten bitartez (SWITCH). Eraikuntzaren lehenengo fasearen asmoa da ioiak 50 MeV-eko energietaraino azeleratzea, giro-tenperaturan lan egiten duten egiturak erabiliz; geroagoko bigarren fasean, 150 MeV-eko energiak lortzea ahalbidetuko da, eta horretarako β baxuko hutsune erresonatzaile supereroaleetan oinarrituriko teknologiak erabiliko dira. Lehenengo fasean, asmoa dago mota horretako teknologien froga-azeleragailu bat eraiki eta sortaren energiak 60 MeV-eraino igoarazteko (ikus testua).

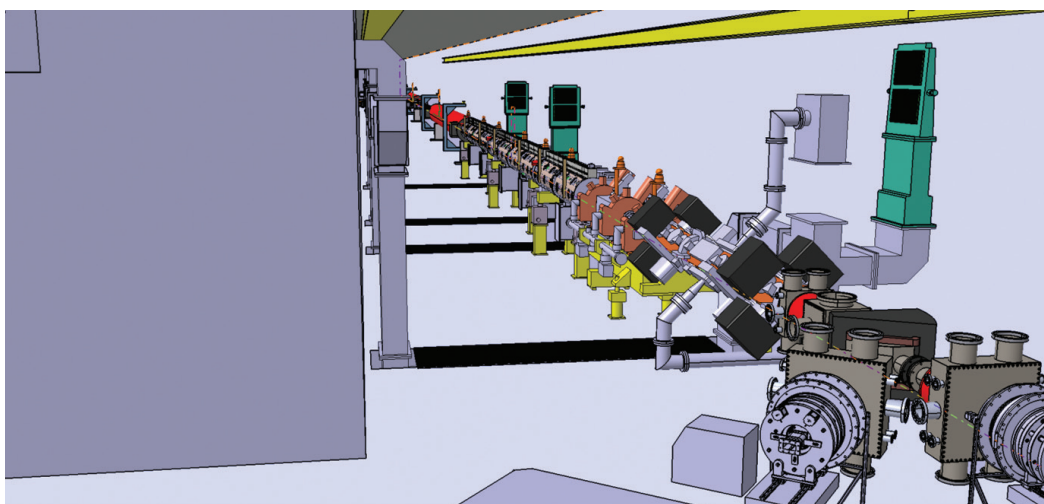
2. taulan zerrendatu dira ioien sorkuntzarako eta azeleraziorako katearen oinarritzko osagaiak. Funtsean, makinak bi azeleratze-osagai izango ditu, ioi-iturriaren erauzte-zutabeaz gain: lehenengo osagaian, bunche deitzen pakete txikietan zatitzen da erauzitako partikula sorta, ondoren banaka azeleratzeko; bigarren osagaia azeleragailu lineala da, jito-hodietan oinarritua. Interesaturik dagoen irakurleak eskura dauden bideoetan ikus dezake [10], [11], gutxi gorabehera, nolako forma eta erabilera izango duten

2. taula. Azeleragailuaren osagaien oinarritzko parametroak.

Osagaia Unitatea	Luzera m	Energia MeV	Hutsu- neak	Gapak	Pot. RF MW	Klystronak
Ioi-iturria	1.5	0.075	—	—	—	—
Sortaren garraioa behe energian (LEBT)	4					
Irrati-maiztasuneko kuadropoloa (RFQ)	3.9	0.075 - 3.0	1	560	1.2	1
Sortaren garraioa erdi-mailako energian (MEBT)	3	3	2	—		
Jito-hodien azeleragailua (DTL)	14.6	3 - 50	3	85	3.8	3
<i>Spoke</i> motako kabitare supereroaleen segmentua	3.5	50 - 60	2	4	0.8	1

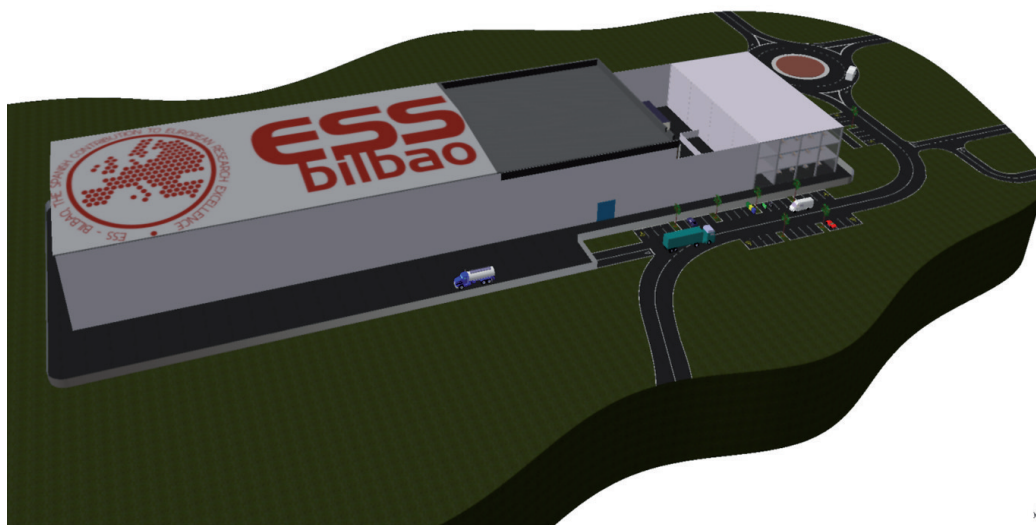
egitura horiek. Hain justu, 2. irudian adierazi da injekzio-sistema osatzen duten egituren ikuspegi orokorra. Bertan ikus daitezke ioien sorkuntzarako eta garraiorako egiturak eta erauzketako eta azelerazioko etapak, azeleratze-katearen hasieratik ikusita, alegia, ioi-iturritik ikusita.

Sortaren energiarako 60 MeV-eko balioa aukeratu da, alde batetik aurrekontuen mugagatik eta, bestetik, honako arrazoi hauengatik: a) energia hori optimoa da neutroiak sortzeko proiektuan proposaturiko (${}^9\text{Be}(p, n)$) erreakzio zuzenen bitartez; b) jito-hodidun azeleragailuko azken tangatik ateratako ioi sortak ahalbidetu egiten du horren ondoren are gehiago azeleratzea, egitura supereroaleetan oinarrituriko erresonatzailen bitartez, zeren energia hori optimotzat har baitaiteke erregimen supereroaleranzko trantsizioa egiteko; c) etorkizunean posible izango litzateke azpiegiturak zabaltea sekzio horiek luzaturik, azeleragailuaren beste ataletan funtsezko aldatarrik egin gabe.



2. irudia. Azeleratze-katearen ikuspegi orokorra.

Ondo definiturik daude egoitza izango den eraikinaren hiru alde nagusiak: bulegoak, instalazioak eta esperimentazio-gunea. Hain zuzen, 3. irudian ikus daitezke eraikinaren ikuspegi orokorra, oraindik zehaztapen fasean dagoena.



3. irudia. Eraikinaren ikuspegi orokorra, irispide nagusiak agerian direla.

6. NEUTROI- ETA PROTOI-SORTEN APLIKAZIOAK ZIENTZIAN ETA INGENIARITZAN

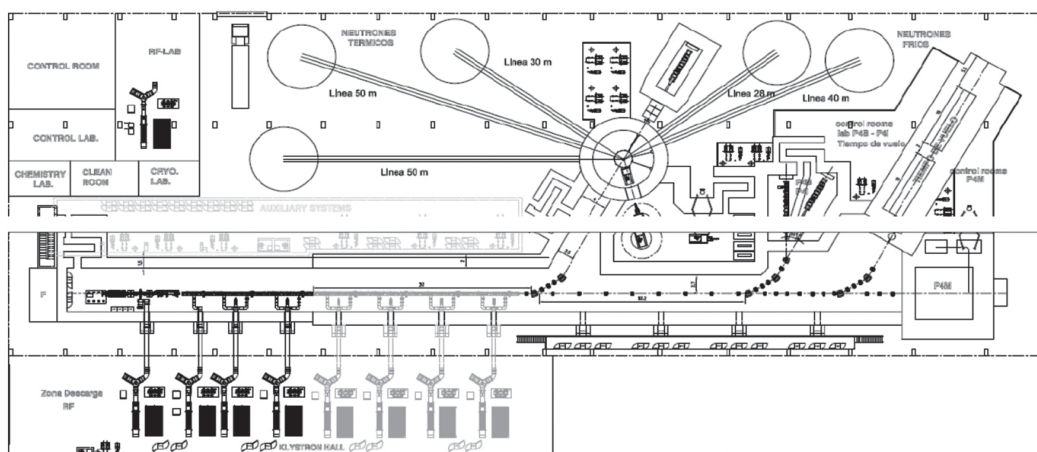
6.1. Oinarrizko zientzietako aplikazioak

Gehenez 60 MeV-ra azeleratuko diren protoi sortak hiru erataraz erabiltzeko dira, jarraian aipatzen diren hiru helburu hauek lortzeko asmoz:

- **Neutroi sortak sortzea.** Neutroi-iturria protoien eta berilio metalikoaren arteko elkarrekintzan oinarritzen da. Zenbait ikerketa-lerro garatuko dira, horien bitartez: a) goi eta behe energiako neutroiekin esperimentuak egiteko; b) neutroien bidezko esperimentazioan espezializaturiko teknikariak prestatzeko; c) neutroi-instalazio europar handietan erabiltzekoak diren osagaiak probatu ahal izateko.
- **Erradiazio Biologia ikerketak elikatzeko laborategi bat eraiki.** Asmoa dago erradiazio-biologiako laborategi bat eraikitzeko, bertan material biologikoek (zelulak, ehunak eta organoak) erradiazio ionizatzailearen eraginpean duten portaera aztertzeko; izan ere, gai hori oso garrantzitsua da ikerkuntza biomedikoaren arloan, protoien bidezko terapiaren diseinu eta optimizaziorako.
- **Materialen irradiazioaren arloko ikerketak elikatzeko laborategi bat eraiki.** Hain zuzen, 50 MeV-eko protoien bidezko irradiaziorako instalazioak simulatu egingo du materialek irradiaziopean jasan dezaketen kaltea, hori ezagutzeko funtsezkoa baita gerora begira eraiki daitezkeen energia-sorkuntzako dispositiboak prestatzeko.

6.2. Neutroi sortak erabiltzeko tresneria

4. irudian azaltzen da mota honetako ituetara elkarturiko laborategien antolakuntza orokorra. Bertan erakusten da ituaren konfigurazio orokorra, honako hauekin batera: gela bero gisa erreserbaturiko espazioa eta zenbait gune berezi, hala nola tresneriaren garapenerako gunea, materia kondentsatuaren arloko ikerketerako difrakziozko eta dispersio inelastikozko esperimentuak irakasteko eta prestatzeko gunea, hegaldi-denboraren lerroa (eskematikoa) sekzio eraginkorrak neurtzeko ekipamendua instalatzeko, eta baita irradiaziorako irispen-ataka bat ere, industria aeroespazialean interesekoak diren osagaiak neutroi lasterren bitartez irradiatzeko.



4. irudia. Esperimentazio-plantaren antolakuntza orokorra. Irudiaren erdigunean ageri den monolito zirkularrak neutroiak sortzeko itua adierazten du, eta bertatik zenbait lerro abiatzen dira luzera desberdineko sortak garraiatzeko, eta horrela zirkuluen bidez adierazita dauden instrumentazio-eskualdeak elikatzeko. Azeleratze-katea ezker-behealdean erakusten da, eta irrati-maiztasuneko (RF) lau transmisorek elikatzen dute, hutsune-hodien (*klystron*) teknologian oinarriturrituta. Itzalduraz adierazirik erakusten den parte balizko zabalkunde bati dagokio, inoiz eginez gero 100 MeV-eko sorta sortuko luke zabalkundeak. Irradiazioeko eta hegaldi-denborako laborategien multzo osoa irudiaren eskuin-behealdean erakusten da.

Laburki azalduta, gaur-gaurkoz helburu hauek hartu dira kontuan estazio esperimental bakoitzaren kasuan:

Neutroi lasterrentzako Hegaldi Denbora Lerroa

Diseinaturik dagoen instalazioaren izateko arrazoia CERNeke n-TOF instalazioa osatzea da; azken horrek lan egiten du energia handiagoko neutroi sortekin (gutxi gorabehera 20 GeV-koak), eta ez du ahalbidetzen egokiro

estaltzea energia baxuagoko neutroi lasterren espektroa. Gauzarik garrantzitsuena da zehatzago neur daitezkeela harrapatze-sekzio eraginkorrak, baita fisioko eta (n, xn) motako erreakzioen sekzio eraginkor diferentzial bikoi-tzak ere. Astropartikuleei buruzko Oinarrizko Fisikako azpiespezialitateetan lanean dihardutenak izango lirake lefro honen erabiltzaile nagusiak. Labo-rategi hau 4. irudiko eskuin-goialdean dago adierazita.

Hegaldi-denboraren bidezko difrakziorako estazio esperimentalak

Estazio hau eraikitzeke helburuak askotarikoak dira:

- Dispositibo esperimentalak garatzea eta probatzea, hala nola abiadura-aukeratzaileak (*chopper*), detektoreak eta lagin-inguruneke ekipamenduak.
- Erabiltzaile mailan arituko diren teknikariak prestatzea, gero materia kondentsatuaren arloan instrumentazio neutronikoa eraikitzeke eta ustiatzeke.
- ESS gisako instalazio handietan egin beharreke esperimentuen diseinua, prestakuntza eta bidergarritasun-probak egitea.

Tresna hau 50 m-ko neutroi-gida baten muturrean kokatuko litzateke, neutroi termikoak sortzen dituen moderatzailearen aurrez aurre. Sociedad Española de Técnicas Neutrónicas (SETN) erakundean elkarturik dauden erabiltzaile espainiarren erkidegoa nabarmenki handiagotu da azken hogeita hamar urteotan, eta horrek ahalbidetu du egokiro aprobetxatzea eskura ditugun baliabideak, bai iturri estatikoetan (ILL) eta bai iturri pulsatuetan (ISIS) ere. Muturreke kontserbadurismotik dator egungo erronka, zeina ohiko teknika esperimentalen inguruan sorturiko taldeen autosorkuntzatik datorren. Helburutzat harturik erabiltzaileak etorkizun handiagoko tekniketara erakartzea (esate baterako, spin-oihartzuna iturri pulsatuetan, errelektometria likido eta material magnetikoetan, makromolekulen egituren determinazioa, espektrometria kimikoa, angelu ultra-baxuetako dispersioa, bereizmen handike eta energiaren transferentzia handike espektrometria, etab.), beharrezkoa da SETNren bitartez ahalegin berezia egitea, bilerak eta eskolak antolatzeaz gain, eskola praktikoak ere antolatzeke, eta bertan lagin-inguruneen tresnen eta sistemen diseinua, muntaketa eta eragiketa burutzeke.

Estazio esperimentalak dispersio inelastikorako eta erretrordispersiozko espektrometriarako

Tresna hauek, funtsean, aurreke estaziokoaren helburu berberak dituzte, baina, horrez gain, bultzatu egin nahi dute denborarekike menpekotasuna duten propietateen azterketarako teknikak gure erabiltzaileen erkidegoan,

horretarako ikastaroak antolatuz eta esperimentazio zuzena eginez; horretarako, kontuan hartzen da etorkizuneko ESS ezin egokiagoa izango dela horretarako. Gure asmo nagusia da neutroi-sorten erabiltzaileen erkidegoa inplikatzeko estazio esperimental horien garapenean, Sociedad Española de Técnicas Neutrónicas erakundeak horiek guztiak elkartzeko eta biltzeko duen ahalmenaz baliatuz. Hain zuzen, gaur egungo diseinuak ahalbidetu egiten du mota honetako bi tresna jartzea neutroi hotz eta termikoen giden bukaeran (30 metro luze dira gutxi gorabehera).

ESS-BILBAOKO INSTALAZIOAK ERABILTZEA ESSn, BERTAN ETA BESTELAKO
NEUTROI-ITURRI INTENTSOETAN ESPERIMENTUAK DISENATU ETA PRESTATZECO

Hemengo iturriak balioko du, gainera, bestelako esperimentuak egiteko eta helburuak betetzeko, haien gauzaketa ez baita optimotzat hartzen ESSkoa bezalako iturrietan; honelakoak ditugu adibidez:

- ESSren antzeko instalazioek hornitzen dituzten intentsitateak bezain altuak behar ez dituzten esperimentuak egiteko, hala nola egiturak ezaugarritzeko neurri gehienak.
- Esperimentu berritzaileak prestatzeko; zeren, horrelako esperimentuetan neurketen bideragarritasunaren proba esperimental bat eskatzen baita gehienetan, instalazio handi batean sorta-denbora jakina esleitu aurretik.
- Erabiltzaileen irakaskuntza eta teknikarien trebakuntza lantzeko; zeren, lanerako presio handiren ondorioz, instalazio handietan aukera gutxi egoten baitira neutroi sortak era emankorrean usiatzeko.
- Material berriekin edo metodo berritzaileekin testak egiteko.

Gai honi dagokionez, merezi du hona ekartzea European Neutron Scattering Association (ENSA) erakundeak ateratako azken txosteneko zenbait ondorio, bereziki bere azken konklusioan dioena [12]:

*«Neutron experiments are planned at appropriate sources. Top-tier sources are extremely important for **demanding** experiments, while a large portion of **ordinary** research projects can be done at medium flux or sometimes even at low flux sources with an appropriate instrument suite».*

Gainera, konklusio hori bat dator *ESFRI Working Group on Neutron Facilities* taldeak 2003an ateratako txostenarekin [13], baita berriki argitaraturiko *Report from the ILL Associates' Working Group on Neutrons in Europe for 2025* [3] txostenean esaten denarekin ere, non hiru mailako (*three-tier*) egitura baten ikuspegia azaltzen den Europako zientzia neutronikoe-

tarako, eta non lehenengo mailako instalazioez gain (hots, ESS eta Institut Laue Langevin edo ISIS bezalakoez gain), kontuan hartzen diren halaber zenbait iturri trinkoren funtzionamendua nazioen/eskualdeen mailarako. Antzeko ikuspegia dute AEBko eta Itsaso Bareko instalazioetako ardura-dunek; toki horretan, egun garapenean dauden instalazio handiek (SNS, J-PARC) laguntza-laboregiak dauzkate, unibertsitateetako campusetan oinarriturik.

Gutzizko dispertsiorako estazio esperimentalak

Kasu honetan erabaki zen tresna jakin bat instalatzea: tresna-zientzialariak prestatuko zituen tresna; halaber, instalazioa lantoki esperimental modura erabili ahal izatea nahi da, laginen ezaugarritze orokorrerako transmisio-neurketen bitartez. Gainera, transmisio-espektroen kasuko Bragg ertzen azterketarako diseina daiteke tresna hori, etorkizunean egitura-materialetan hondar-tentsioen, ehunduren eta fase-ezaugarrien azterketa ez-deuseztatzailetan erabiltzeko, eta bereizmen denboral eta espazial oso altuko baldintzetan, horretarako plaka multikanaleko detektoreak erabiliz [14]. Helburu hori lortzeko tresna egokia neutroi termikoen lerro batean koka daiteke, 50 m-ko gida baten muturrean; horrek denbora-bereizmen onargarria emango luke, kontaktaren eraginkortasuna kaltetu gabe.

Tresneriaren garapenerako sortara iristeko ataka

Teknologiaren transferentziari dagokionez, zenbait ekimen aipagarri artikulatu dira industria-sektorerara eramateko aldatzeko, nahiz emaitza ez den konparagarria, ez Espainiako Gobernu Institut Laue Langevin erakundearen kide zientifiko gisa afiliatu zenetik pasaturiko denborarekin (1986tik gaur arte), ez eta erabiltzaileen erkidegoaren tamaina estimatuarekin ere. Horren adibidetzat har daiteke 2011ko martxoan ISIS espalazio-iturriari emandako *lehen tresna* osoa, materialak muturreko baldintzetan aztertu ahal izateko, *oso-osorik gure inguruko industrietan fabrikatu zena*. Beraz, benetako premia erreal eta larria dago sortara iristeko ataka bat eskura izateko, eta horrela tresneriaren garapenean interes zuzena duten sozio industrialen premiak asetzeko.

7. KLINIKAREN ARLOAN PROTOI SORTEN ERABILERA HOBETZEKO EKARPENA

Zelulak, ehunak edo animalia txikiak bezalako material biologikoen laboregi bat eraiki eta abian jartzea da helburua, zertarako-eta, material horiek erradiaziopean duten erantzuna bideratzen duten mekanismo bio-

logikoak protoien bitartez ikertzeko. Arestian eginiko berrikuspenaren arabera, Europan badira sorta mikrometikozen zenbait instalazio, erradiobiologiako azterketak egiteko. Instalazio horietan, oro har, korronte txikiko eta 10 MeV-etik beherako energiako azeleragailu elektrostatiakoak erabiltzen dira. Hori dela-eta, *in vitro*ko zelula-kultiboak irradiatzeko baliatzen dira; horrela, honelako erradiazio-dosi baxuen efektuak aztertzen dira: hipererradiosentikortasuna, erradioerresistentzia induzitua, erantzun adaptatiboa, ezegonkortasun genomikoa eta Bystander efektua. Nolanahi dela, partikula kargadunekin eginiko erradioterapiari buruzko berrikuspenean Goiteinek [18] adierazi duenez, beharrezkoa da erradiobiologiako esperimentu berriak egitea organismo osoen erantzuna aztertzeko.

Hauexek dira erradiazio-biologiako ikerkuntza bultzatu duten bi eragile nagusiak:

- **Babes erradiologikoa**, alegia, erradiazioak era seguruan erabili ahal izatea, horrelakoak baliatzen dituzten aplikazio mediko edo industrial guztietan.
- **Erradioterapia**, hau da, erradiazio ionizatzaileak erabili ahal izatea tumore-zelulak deuseztatzeko, ehun sanoak ahalik eta ondoen gordez.

Ioi sorten bidezko terapiak aukera ematen du dosiaren kokapen bikaina lortzeko tumoreen tratamenduaren kasuan, eta era horretan ehun normalari erradiazioaren erruz eginiko kaltea minimizatzen dira. Mota horretako lehenengo saiakuntza klinikoa protoien bitartez egin zen 1954an, Berkeleyko LBNL gunean (AEB). Europan orain ari dira irekitzen ioi sorten bidezko terapia darabilten lehenengo gune klinikoak. Dena den, terapia horrek duen benetako potentziala ulertzeko, lehenik hobeto ulertu behar dira —eskala espazial eta denboral desberdinetan— ioi-sorten eraginez zelulen heriotza eragiten duten mekanismo fisikoak (ionizazioa, fragmentazioa), kimikoak (hidrolisia, oxigenoaren efektua) eta biologikoak (DNAn eginiko kaltea, konponketak eta mutazioak).

Oro har, etapa fisikoa eta kimikoa nahikoa ondo ezaugarrituta eta modelizatuta daude. Hala ere, etapa biokimikoa —hau da, DNA molekulak jasandako kaltea eta horren konponketa— ikerketen aztegai nagusia da oraindik ere genetikan. Horrela, ioi sorten bidezko erradiobiologiako ikerkuntzaren parte handi bat zuzenduta dago *in vitro*ko erantzun zelular eta azpizelularra aztertzean, eta oso parte txikia da *in vivo*ko efektuak aztertzen ari dena ehunen kasuan edota organo osoen kasuan, animalia-ereduen bitartez.

Hainbat tumoreen tratamenduari dagokionez, hadroiterapia eraginkorragoa da fotoien edo elektroien bidezkoa baino, bereziki minbizidun ehu-

na organo bital batetik hurbil dagoenean. Gauzak horrelakoak dira, zeren protoi sorten bitartez doitasun handia lor baitaiteke partikula astunek materialian hedatzean dituzten propietateei esker, fotoiek eta elektroiek dituztenak baino egokiagoak baitira. Nolanahi ere, hasieran sorta horien ezaugarri erradiobiologikoak ezagutzen ez zirenez, eta irudi-sistema egokiak eta ordenagailu aski azkarrak ez zeudenez, lehenengo unean ioi sorten bidezko emaitzak ez ziren ohiko erradioterapiarekin lorturikoak baino askoz hobek; hain zuzen, horregatik ez zen pentsatu lehenago helburu mediko hutsarako azeleragailuak instalatzea.

Inguruko ehun osasuntsuetan sortzen diren efektu sekundario berantiarren gutxiagotze bortitzak garrantzi berezia du zenbait tumoreren kasuan, batez ere begietan, prostatan, burmuineko zenbait aldetan eta haurrengan sortzen direnetan eta, oro har, tumore solidoetan; izan ere, ohiko erradioterapia arriskutsua da baita horrelakoetan. Gainera, protoien ibilbideak ongi definiturik daude, eta utzitako aztarnak ez du energiarik uzten alboetan. Nolanahi den, nahiz eta minbizia tratatzeko asmoz protoiekin eta bestelako ioi arinekin (C, Li) eginiko terapia hadronikoa Robert Wilsonen jadanik duela hirurogei urte baino gehiago proposatu zuen 1946ko artikulua aitazindarian [19], horren inplementazio klinikoa oso astiro bideratu da, eta 1990etik aurrera baino ez dira prestatu ospitale gune egokiak, non terapia klinikorako sorta bertikalak eta sorten banaketa-sistema birakariak (*gantries*) erabiltzen diren. Gaur egun arte, protoiak eta karbonoioiak 55.000 eta 5.000 paziente tratatzeko erabili dira, hurrenez hurren, eta mundu osoan 30 bat ospitale ari dira funtzionatzen edo eraikitzen arlo horretan.

Hainbat ikerketa-talde ari dira protoien bidezko erradiazioaren efektu erradiobiologikoak aztertzen, baina AEB (nagusiki Berkeley eta Brookhaven) eta Japonia (nagusiki Chiba) dira gaur egungo ezagutzarako ekarpen gehien egin dituzten lurraldeak. European radiobiologiako gaitako talde aktiboena Alemaniako GIS zentroan dago. Bestalde, 2002tik aurrera, CERNEk koordinaturiko ENLIGHT (European Network for Light Hadron Therapy) sare europarrak biltzen ditu ioien bidezko terapiarako azeleragailuen eta detektoreen teknikak ikertzeko ahaleginak. Erakunde horren helburu espezifikoaren artean dago ioien eraginari ehunek emandako erantzunean parte hartzen duten mekanismo biologikoen ulermena. Sare horren babespean daude gaur egun garatzen ari diren lau proiektu europar hauek: PARTNER, ULICE, ENVISION eta ENTERVISION. Bestalde, 2009an eginiko berrikuspen baten arabera [17], European badira sorta mikrometrikoen zenbait instalazio erradiobiologiaren azterketetarako. Kasu gehienetan korrante txikiko eta 10 MeV-tik beherako energia lortzen duten azeleragailu elektrostatikoetan oinarrituriko instalazioak dira. Beraz, *in vitro*ko zelula-kultiboak irradiatzeko erabiltzen dira, erradiazio dosi txikien efektuak aztertzen dituztenak, hala nola hipersentikortasuna, erradioerresis-

tentzia induzitua, erresistentzia adaptatiboa, ezegonkortasun genomikoa eta Bystander efektua.

Material biologikoak (zelulak, ehunak eta organoak) erradiazio ionizatzaileen eraginpean duen portaera aztertzeke asmoz —portaera hori oso garrantzitsua baita ikerkuntza biomedikoan, protoien bidezko terapia diseinatzeke eta optimizatzeke—, proposatu da honelako erradiazio-biologiako instalazio bat eraikitzea: ESS-Bilbaoko azeleragailu linealeko protoi sortak erabiliko dituen Biologiarako Protoiak (P4B) izeneko laborategia. Hain zuzen, P4B laborategian honelako aztergaiak ikertuko dira:

- Bide berriak tratamenduaren eraginkortasuna areagotzeke, baina ehun osasuntsuak babestuz.
- Ioien eraginpeke ehun osasuntsuek jasandako kaltea.
- Organo osoen eta organismoen portaera ikertzea, animalia txikiak eredutzat harturik, biologian oinarrituriko tratamendu-estrategia desberdinak saiaturik (kimioterapiaren eta erradioterapiaren konbinazioa, frakzionamendua, intentsitatean modulaturiko ioien bidezko terapia).

8. PROIEKTUAK BIDERATZEN DITUEN TEKNOLOGIAKO ETA INDUSTRIAKO AUKERA. ERAGINARI BURUZ BERRIKI IZANDAKO ESPERIENZA

Orain arte hornituriko osagaiak eta azpisistemak gero eta teknologia maila altuagokoak eta konplexutasun handiagokoak izan dira, eta prozesu horrek ahalbidetu egin dio gure industriari gaitasunean gora egitea gradualki. Lorturiko mailak erakusten duenez, enpresak gai dira puntako teknologiako tresna konplexuak hornitzeko; tresna hauek balio erantsi oso handikoak izan dira, eta era lehiakorrean eraikiak. ESS-Bilbaoren helburu nagusietakoa da giltzarri izan daitezkeen teknologia eta ekipoak garatzea, gero ESSn inplementatu eta era horretan arriskua minimizatzeke.

Nolanahi den, jadanik abian diren instalazioekiko lankidetzen menpe dago gure gaitasuna, instalazio horietan baitago sustraiturik etorkizunean garatu beharreko teknologia.

Gauzak horrela daudela, gure nahitaezko erreferentziak ISIS eta berriko sorturiko SNS dira, zeren azken hogeita bost urteotan lehenengo gunean garaturiko teknologiak eta iturriaren eragiketean lorturiko esperientziak funtsezko garrantzia baitute etorkizuneko edozein proiektu berri ekiteko. Langintza hauetarako behar den maila teknologikoa oso altua da, eta horrek behartu egiten ditu enpresak beren lehiakortasun maila goratzera, halako moldez, non beharturik dauden langile teknikari oso kuali-

fikatuak izatera; horrek balio erantsi oso handia dakarkio enpresari. Aldi berean, gertaera horrek sarrerako langak jartzen dizkie balizko lehiakideei, eta bestetik, ahalbidetu egiten du garapen berritzaileak izatea beste sektore batzuetan ere; horrela, landu berri dituzten teknologiak bertara eramaten dira. Guztira, prozesu osoaren efektu netoak izan litezke merkatu kuota zabaltzea eta balio erantsia handiagotzea, horrela hazkunderako bide berriak irekirik.

8.1. Fabrikazioa laguntzeko instalazioa

Instalazio esperimentaletarako osagaietan eta azpisistemen soldadura-prozedura berezietan espezializaturik egongo den instalazio bat eraikitzeko arrazoia, besteak beste, oinarriturik dago «Zientziaren Industria» deritzon arloko hornitzaile industrialek fabrikazio-teknologia horietaz baliatzeko izan ohi dituzten zailtasunei erantzun egokia eman ahal izatean. Aurreko hamarkadetan, eskasia horren ondorio izan dira, batetik berme minimoekin parte hartzeko kide izan garen instalazioek sorturiko lizitazioetan (CERN edo ESRF erakundeen kasuan, adibidez) gure industrien lehiakortasun maila oso baxua izatea, eta, bestetik, jarduera-arlo batzuetan (batez ere instalazio esperimental handietan, astrofisika eta espazioarekin loturikoetan) baliatzen diren osagai askoren fabrikazioaren azken etapak beste herrialde batzuetako enpresetara eraman behar izatea.

Partzuergoan harturiko erabakia izan zen, alde batetik, osagaien fabrikazio-teknikak hornitzea, zeren horien erabilera —eta, beraz, justifikazio ekonomikoa— bermaturik baitago instalazioan; beste alde batetik, teknika horietaz jabetzeko bitarteko egokiak gure industrien esku jartzea izan zen erabakia; izan ere, bitarteko horien kostua eta merkatu potentzialaren tamaina kontuan izanik, hemengo industriariak trabak izan dituzte teknika horiek bere espezialitateko katalogoetan sartzeko. Jarduera horren artikulazioa INEUSTAREkin (Asociación Española de Industria de la Ciencia) batera egiten ari da, eta gainera, Corporación Tecnológica Tecnalia elkar-tearekiko lankidetzan, zeinak aldeaz aurreko esperientzia garrantzitsuan duen jarduera arlo honetan.

Txosten hau prestatzen ari garen egunean, Jundizko Industriaguneko (Araba) eraikinetan instalazio fasean daude jadanik elektroik sorten bidezko soldadura-sistema espezializatuak (Electron Beam Welding), baita tenperatura altuko biltze-teknikak hutseko labeetan ere («*brazing*» eta «*diffusion bonding*»).

Hain zuzen, 5. eta 6. irudiek elektroik sorten bidezko soldadurarako ekipoa erakusten dute; horien probak abiatzeko fasea 2012an hasi da.

Zer da eta zertarako balio du Bilboko ESS Partzuergoak eraikiko duen azpiegiturak?



5. irudia. Elektroi sorten bidezko soldadurarako ekipoen probak abiatzeko prestakuntza.



6. irudia. Elektroi sorten bidezko soldadurarako ekipoen kontrol-postua.

Bestalde, 7. irudian hutseko labearen osagaiak ikus daitezke. Tokiko enpresa espezializatu bat instalatzen ari da labea, eta abiatzeko probak hementik hilabeterako aurreikusita daude. Produkzio faseko probak 2012ko bukaera aldean hasiko dira, baina gaur egun oraindik lortu gabe daude behar den hartze elektrikorako lizitazioak.



7. irudia. Temperatura altuko biltze-prozedura espezializatuertarako hutseko labea.

Lantoki horren helburua da, epe laburrean, instalazio egokiz hornitzea eta teknikariak prestatzea, gero Partzuergoak eraiki beharreko osagaien fabrikazio faseei aurre egin ahal izateko, eta halaber, laguntza ezlehiakorra eman ahal izatea gorago aipaturiko industria-sektoreari.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ikus <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/HB2008/papers/wgd17.pdf>
- [2] FILGES D. eta GOLDENBAUM F. 2009. *Handbook of Spallation Research*, Wiley.
- [3] <http://goo.gl/VDgU3>
- [4] CHADWICK J. 1932, *Nature*, **129**, 312.
- [5] Ikus argitaratzailearen oharra aldizkari hauetan: *Nature* **143**, 251, (1939), MEITNER L., FRISTCH O.R. *Nature*, **143**, 239 (1939), MEITNER L., STRASSMANN L., HAHN O., *PHYS Z. Nature*, **109**, 538, (1938).

- [6] GRAHAME D. C. eta SEABORG G. T. 1938. «Elastic and Inelastic Scattering of Fast Neutrons». *Phys. Rev.* **53**, 795 etahan aipaturiko erreferentziak.
- [7] BARTOLOMEW G.A. 1966. *Intense Neutron Sources*, H.T. Motz eta G.R. Keepin, eds. U.S. At. Energy Comm. CONF-660925, p. 307.
- [8] BARBIER M. 1969. *Induced Radioactivity*, cap. V, North Holland, Amsterdam.
- [9] BERMEJO F.J. *et al.* 2009. *Baseline Design for the ESS-Bilbao Superconducting Proton Accelerator*, Proceedings of PAC09, Vancouver, BC, Canada.
- [10] Ikus <http://www.youtube.com/watch?v=mhsXf2C4AD8>, eta halaber beste hau: http://www.youtube.com/watchfeature=endscreen&v=_FtR8S5FAUw&NR=1
- [11] Ikus <http://www.youtube.com/watch?v=BDEJ5qECCdg>, eta halaber beste hau: <http://www.youtube.com/watch?v=teXeJl8ajE>
- [12] *The ESF / ENSA Survey 2005 of the Neutron Scattering Community in Europe*. Publ Dec. 2007. <http://neutron.neutron-eu.net/FILES/ENSA2005.pdf>.
- [13] <http://ess-scandinavia.eu/documents/infr-esfri-wg-neutrons-report.pdf>, 2003.
- [14] TREMSIN A.S. *et al.* 2011. «High resolution Bragg edge transmission spectroscopy at pulsed neutron sources: Proof of principle experiments with a neutron counting MCP detector», *Nucl. Instr. Methd.* **A633**, Suppl.1, S235.
- [15] Ikus *Development opportunities for small and medium scale accelerator driven neutron sources*, IAEA-TECDOC-1439, 2005 eta *Working paper on: Improved production and utilization of short pulsed, cold neutrons at low-medium energy spallation neutron sources* Report of the 2nd Research Coordination Meeting, IAEA, Vienna, 2009.
- [16] CIRRONE G. A. P. *et al.* 2005. *Implementation of a New Monte Carlo-GEANT4 Simulation Tool for the Development of a Proton Therapy Beam Line and Verification of the Related Dose Distributions*, IEEE Transaction on Nuclear Science, **52**,262, 2005.
- [17] GERARDI S. 2009. «Ionizing Radiation Microbeam Facilities for Radiobiological Studies in Europe». *Journal of Radiation Research* **50**.
- [18] GOITEIN M. 2010. «Trials and tribulations in charged particle radiotherapy», *Radiotherapy and Oncology* **95**, 23-31.
- [19] WILSON R. 1946. «Radiological use of fast protons», *Radiology*, **47**, 487.