

La font de llum de sincrotró ALBA

Gastón García López, Inmaculada Ramos Lerate

CELLS-ALBA, carretera BP-1413 km. 3.3, 08290 Cerdanyola del Valles, Barcelona

Aquest article descriu la font de llum de sincrotró ALBA, que al llarg de l'any 2012 va entrar gradualment en operació regular amb usuaris. L'ALBA és una aposta decidida de posicionament a un nivell competitiu, en el marc internacional. En les pàgines següents es fa un recorregut pels aspectes més rellevants d'aquesta gran infraestructura científica, amb particular atenció al seu estatus actual, culminació d'un llarg procés que ara comença a donar fruits.

1 Introducció

L'ALBA és una font de llum de sincrotró de tercera generació situada a Cerdanyola del Vallès, a uns vint quilòmetres del centre de Barcelona, que recentment ha entrat en funcionament regular. El disseny, la construcció i la posterior entrada en funcionament han suposat un repte sense precedents, que ha culminat amb bones perspectives d'èxit. Aquest article té com a finalitat oferir als lectors una visió de conjunt sobre l'ALBA, la història del projecte i el seu estatus actual, i fa un èmfasi particular en la recent arribada dels primers usuaris, les activitats dels quals han de començar a donar fruits científicotecnològics pròximament.

La secció 2 descriu la infraestructura ALBA, introdueix el concepte de font de llum de sincrotró i explica breument la implementació pràctica dels seus elements clau: sistemes d'infraestructura convencionals, acceleradors i línies de llum.

La secció 3 fa un breu recorregut per la història del projecte, començant per la seva fase de gestació, la posterior aprovació, el disseny, la construcció, la posada en marxa i l'entrada en operació amb usuaris.

La secció 4 analitza precisament l'arribada d'usuaris a l'ALBA, descriu les formes d'accés i algunes dades estadístiques sobre la utilització de l'ALBA per part de la comunitat científica i industrial.

Finalment, la secció 5 fa una reflexió final sobre el paper de l'ALBA i les perspectives de futur.

Queden fora de l'abast d'aquest article l'anàlisi detallada de les tècniques d'ús de la llum de sincrotró en diferents àrees d'aplicació, així com la descripció tècnica detallada de les línies de llum actualment en funcionament i qualsevol dels primers resultats científics que s'espera que es vagin produint de forma gradual.

2 Descripció de l'ALBA

2.1 Què és una font de llum de sincrotró?

Abans d'entrar en qualsevol discussió detallada sobre el projecte ALBA, s'imposa situar mínimament la qüestió. L'ALBA és, en efecte, una font de llum de sincrotró de tercera generació, equipada amb una sèrie de línies de llum (set, en la seva configuració inicial). Una font d'aquest tipus és un complex d'acceleradors dissenyats amb l'objectiu de produir i utilitzar com a eina analítica (principalment) la llum emesa per les partícules carregades accelerades [1].

Efectivament, les equacions de Maxwell prediuen que quan una partícula carregada pateix una acceleració per efecte de la seva interacció amb un camp electromagnètic, es produeix un fenomen de radiació les característiques d'intensitat i espectrals del qual es poden calcular en el sistema de referència del laboratori. Aquesta emissió, que sempre es produeix, és particularment intensa quan l'acceleració aplicada a les partícules és radial, és a dir, quan es produeix al llarg d'una direcció perpendicular al seu moment lineal, i dóna lloc a una emissió electromagnètica en un interval de freqüències ampli, la distribució espectral i angular de la qual depèn críticament de l'energia de la partícula accelerada. Una manera senzilla de visualitzar qualitativament aquesta dependència i les seves característiques bàsiques consisteix a calcular l'emissió en el sistema de referència on la partícula està en repòs, i, posteriorment, a aplicar una transformació de Lorentz que ens porti al sistema de referència del laboratori. L'efecte d'aquesta transformació produeix un corriment cap al blau de tot l'espectre i una concentració de l'emissió dins d'un estret con (anomenat con d'emissió) entorn de l'eix definit pel moment lineal de la partícula. Tots dos efectes es fan més intensos com més gran és l'energia de la partícula en el sistema del laboratori.

D'altra banda, la intensitat de l'emissió depèn també

de la massa de la partícula accelerada: masses elevades redueixen l'emissió, la qual cosa suposa una elecció òptima si l'objectiu és aconseguir la màxima energia possible minimitzant les pèrdues. Per aquesta raó, els col·lisionadors de partícules més avançats, que estan dissenyats per aconseguir energies molt elevades, com el gran col·lisionador d'hadrons (large hadron collider, LHC) que opera al CERN, utilitzen feixos de protons (és el cas del LHC) o anti-protons. Si, per contra, l'objectiu és optimitzar l'emissió de radiació electromagnètica, les partícules que s'utilitzen són electrons, la massa dels quals és aproximadament 2000 vegades inferior a la dels protons. Aquest és el cas de les fonts de llum de sincrotró, entre les quals hi ha l'ALBA.

Els electrons són produïts, accelerats, fins a una energia de treball adequada i posteriorment emmagatzemats en un nou accelerador anomenat anell d'emmagatzematge en el qual, volta rere volta, es produeix l'emissió de llum, amb la consegüent pèrdua d'energia. Aquesta energia perduda ha de ser subministrada de nou al sistema per mantenir una òrbita estable. Els electrons, produïts en paquets, són accelerats mitjançant camps electromagnètics de radiofreqüència, que es localitzen en cavitats ressonants (de gran precisió mecànica). Tots aquests elements funcionen amb un sistema de sincronització molt precís, de manera que el moment en què el paquet travessa la cavitat coincideix amb aquell en què l'ona electromagnètica té la fase adequada perquè el vector camp elèctric s'acobli al vector moment lineal dels electrons del paquet amb el signe correcte. D'aquesta manera, els paquets d'electrons reben una injecció d'energia en cada trànsit, a la manera d'una taula de surf que es munta correctament sobre l'onada.

La radiació de llum, com s'ha explicat més amunt, és particularment important en aquells punts de la trajectòria dels electrons on són sotmesos a una acceleració radial. Això passa en els punts de l'anell on travessa un camp magnètic al llarg de la direcció vertical, que força els electrons a descriure un arc de cercle contingut en el pla horitzontal. Aquests camps magnètics es produeixen mitjançant potents electroimants (dipolars), que precisament tenen l'objectiu primordial de corbar la trajectòria del feix d'electrons de manera que s'obtingui una òrbita tancada; així, l'emissió de llum de sincrotró, en cert sentit, és un efecte col·lateral que es pot o no aprofitar. Les fonts trucades de primera generació van ser dissenyades per fer experiments que no utilitzaven l'emissió de llum de sincrotró i l'aprofitaven, produïda en els imants dipolars, de forma genuïnament paràsita. Les fonts de segona generació funcionen d'acord amb el mateix principi, però ja han estat dissenyades i optimitzades per aconseguir una emissió tan adequada com sigui possible als experiments que utilitzen la llum com a eina: encara, en aquest segon cas, els imants dipolars juguen el doble paper de propor-

cionar una òrbita tancada i generar llum. Les fonts de tercera generació poden definir-se com aquelles fonts en què l'anell d'emmagatzematge disposa de nombroses seccions rectes per instal·lar dispositius d'inserció i amb un feix d'electrons l'emissió horitzontal del qual és d'uns quants nm-rad. Aquests conceptes s'expliquen a continuació.

Les seccions rectes són trams de l'anell d'emmagatzematge intercalats entre dos imants dipolars consecutius, on en principi els electrons es propaguen en línia recta, per inserir una sèrie d'elements magnètics, l'efecte dels quals és forçar els electrons a descriure una trajectòria en forma sinusoidal aproximadament, al cap de la qual recuperen la mateixa trajectòria rectilínia original. Aquestes trajectòries poden tenir o bé variacions angulars inferiors a l'amplada del con d'emissió de llum (en aquest cas es produeix una intensificació de l'emissió i el sistema es coneix com a ondulator), o bé superiors (en aquest cas l'emissió total és simplement la suma lineal de cadascuna de les corbes i el sistema s'anomena wiggler). D'aquesta manera, la inserció d'un d'aquests sistemes magnètics (coneguts precisament com a dispositius d'inserció) dóna lloc a una emissió on les seves característiques poden ser ajustades mitjançant la geometria i intensitat dels camps magnètics implicats, sense afectar, per definició, els paràmetres de l'òrbita. Això permet que cada dispositiu d'inserció (i, per tant, el seu espectre d'emissió) pugui ser configurat de manera individualitzada, a diferència del cas dels imants dipolars.

Les característiques més excel·lents de la llum emesa per una font de llum de sincrotró, aquelles que la fan una eina única per a un ampli ventall d'aplicacions, són les següents:

- Es tracta d'una llum extremadament intensa. El paràmetre clau aquí és la brillantor, que es defineix més endavant. Aquesta característica té una gran importància, ja que la qualitat de les dades que resulten d'observacions repetitives, molt en particular de processos amb seccions eficaces baixes, té com a factor limitant l'estadística de comptatge d'esdeveniments. Fixat un temps determinat per a l'observació, l'estadística que es pot obtenir depèn de la quantitat de fotons per unitat de temps que arriba a la zona de la mostra que es vol estudiar. Per aquesta raó, i particularment quan es volen analitzar zones de la mostra amb dimensions petites en comparació amb la mida del feix, és de gran utilitat disposar de feixos d'alt flux (nombre de fotons per unitat de temps i àrea).

- Es tracta d'una llum blanca, és a dir, amb una composició espectral que cobreix amplis rangs de longitud d'ona. Aquest espectre, en fonts amb paràmetres típics d'operació, va des de l'infraroig fins als raigs X durs; la longitud d'ona dels quals és comparable a les distàncies interatòmiques. Naturalment, la intensitat de cada part d'aquesta finestra pot variar àmpliament, depenent de la

configuració del camp magnètic en el punt d'emissió (bé sigui un imant dipolar o un dispositiu d'inserció). Aquest aspecte també és essencial, ja que un ventall tan ampli de longituds d'ona permet abordar aplicacions molt diverses, mitjançant una selecció adequada del rang de longituds d'ona idoni per a cada aplicació i de la longitud d'ona concreta per a cada moment de l'experiment.

- Es tracta d'una llum per pulsacions. Els electrons circulen en paquets, cadascun dels quals genera l'emissió de llum durant el seu trànsit per una regió amb camp magnètic (sigui un imant dipolar o un dispositiu d'inserció). Aquest trànsit passa típicament en fraccions de nanosegon, mentre que el temps transcorregut entre paquets successius pot variar entre l'ordre del microsegon i uns quants nanosegons.

- La llum emesa pel feix d'electrons en un element de trajectòria corba està polaritzada linealment dins del pla de la mateixa trajectòria. Això fa possible, mitjançant dispositius d'inserció especialment dissenyats, obtenir feixos de llum amb diferents característiques de polarització, i així poder fer experiments que utilitzen el contrast entre mesures preses amb diferents polaritzacions, amb sensibilitat selectiva a les propietats magnètiques de la mostra.

Alguns dels paràmetres clau que caracteritzen una font de llum de sincrotró de tercera generació són els següents: energia del feix d'electrons, emitància, nombre i longitud de les seccions rectes disponibles per instal·lar dispositius d'inserció i brillantor de les fonts associades a cada una de les seves línies. A continuació s'explica breument cadascun d'aquests aspectes.

L'energia del feix d'electrons, a partir d'uns valors raonables per als camps magnètics aplicats per modificar la trajectòria del feix en els punts d'emissió de llum, defineix el rang de longituds d'ona on l'espectre d'emissió té intensitats útils. L'energia de 3 GeV triada per a l'ALBA suposa una opció típica per a fonts de llum de sincrotró de tercera generació construïdes per països de mida mitjana, amb un bon compromís entre cost i rendiment, cosa que permet arribar a energies del feix de fotons en el rang dels 50 keV, amb dispositius d'inserció adequats.

La brillantor és un paràmetre que es correspon amb cada un dels focus emissors de llum de sincrotró, és a dir, amb cada imant dipolar o dispositiu d'inserció. La brillantor es defineix com el nombre de fotons emesos per unitat d'àrea, angle sòlid, longitud d'ona (ample de banda), temps i per unitat de corrent del feix d'electrons primari. La brillantor és una magnitud que depèn de la longitud d'ona. La figura 1 mostra els espectres corresponents als sis dispositius d'inserció actualment instal·lats a l'ALBA, així com d'un imant dipolar.

La brillantor depèn de la configuració del camp magnètic a la zona d'emissió, de l'energia del feix d'electrons primari i de la mida del feix d'electrons en l'espai de fases. Aquesta última magnitud es coneix com emitància i,

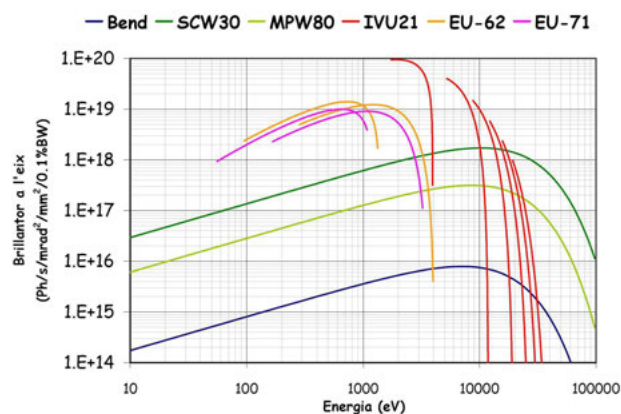


Figura 1: Brillantor en l'eix d'emissió com a funció de l'energia del fotó per un imant dipolar i els diferents dispositius d'inserció de les línies de fase-1 de l'ALBA

com a conseqüència del teorema de Liouville, és un invariant de l'òrbita. L'emitància s'utilitza freqüentment com a figura de mèrit d'una font de llum de sincrotró [2]. Efectivament, emitàncies baixes es corresponen amb brillantors altes. L'emitància té la particularitat de ser un paràmetre global de l'accelerador considerat, amb impacte directe en la brillantor de qualsevol focus d'emissió, sigui quina sigui la seva particular configuració de camp magnètic. Aquesta magnitud factoritza en un terme corresponent a l'eix vertical i un altre a l'horitzontal; aquest últim és el dominant. L'ALBA té una emitància de disseny en el pla horitzontal de 4,5 nm-rad, i es posiciona així amb un valor molt competitiu a escala internacional.

2.2 L'ALBA: infraestructures i acceleradors

Les dimensions transversals del feix d'electrons i, corresponentment, dels feixos de fotons emesos en els diferents punts de l'anell, estan en un rang inferior a 10 micres (eix vertical) en el cas de l'ALBA. Per això resulta essencial que tot el complex format pels acceleradors i les línies de llum mantingui una estabilitat mecànica a nivells netament inferiors a aquest valor, tant des del punt de vista de desplaçaments lents com pel que fa a vibracions. Tenint en compte els coeficients de dilatació dels materials típics utilitzats (acer inoxidable, formigó), es deriven també requisits estrictes pel que fa a l'estabilitat tèrmica de tot el sistema. Finalment, el funcionament correcte dels sofisticats equips implicats dóna lloc també a exigents requeriments relatius a la qualitat del subministrament elèctric. Tots aquests aspectes fan que les instal·lacions que coneixem com a convencionals tinguin, de fet, en el cas d'una font de llum de sincrotró, una complexitat i un grau de sofisticació notables. L'ALBA s'ubica en un conjunt d'edificis amb una superfície total propera als 30.000 m², en la configuració arquitectònica i en les instal·lacions s'han aplicat totes les restriccions necessàries per complir

els requeriments operatius esbossats en el paràgraf anterior. La figura 2 ofereix una perspectiva general de l'ALBA des de l'aire, mentre que la figura 3 mostra un plànol en planta de la instal·lació.



Figura 2: Vista aèria de l'ALBA amb indicació dels seus elements essencials

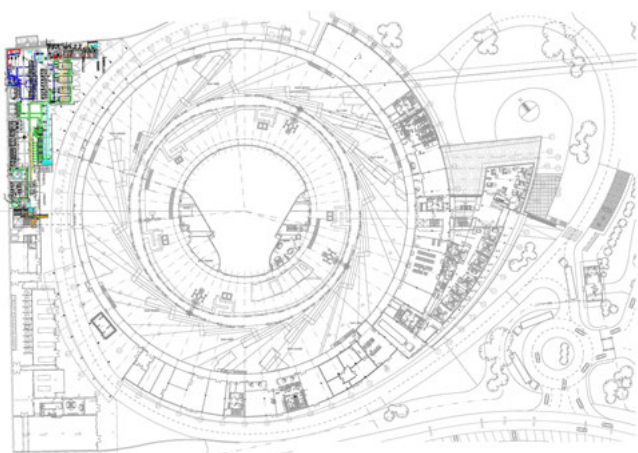


Figura 3: Plànol de l'ALBA. Acceleradors (ubicats a la corona circular, el perímetre exterior té forma de línia trencada), línies de llum (visibles al llarg d'adreces tangents a l'anell definit pels acceleradors) i instal·lacions convencionals (en l'edifici tècnic, adossat al principal al costat esquerre de la figura)

El complex d'acceleradors de l'ALBA [3], [4] consta de tres elements: l'accelerador lineal (LINAC), l'accelerador propulsor (booster) i l'anell d'emmagatzematge. L'anell d'emmagatzematge i el propulsor són dos acceleradors cíclics allotjats en un túnel comú de parets de formigó, amb un perímetre proper als 300 m, mentre que el LINAC té una longitud total una mica inferior als 30 m i està adossat al mur interior del túnel que allotja els altres dos acceleradors.

El LINAC és el primer accelerador d'ALBA. S'hi genera el feix d'electrons, que procedeix d'un metall incandescent, amb una estructura temporal polsada. Aquest feix s'accelera a través de la injecció d'energia electromagnètica en forma de radiofreqüència, de manera que s'obté, a la sortida del sistema complet, una energia de 100 MeV. Observeu, comparant amb l'energia en repòs d'un electró ($m_e c^2 \simeq 0,5 \text{ MeV}$), que aquest feix està ja en règim ultrarelativista. El LINAC genera un pols de pocs nC (és a dir, de l'ordre de 10^{10} electrons) amb una freqüència de repetició poques vegades per segon (típicament 3 Hz).

Cadascun dels paquets d'electrons generats pel LINAC entra al booster, on recorre una trajectòria formada per seccions rectes i arcs de cercle (aquests últims, en travessar entre les bobines de potents imants dipolars) que s'aproxima a una circumferència d'uns 250 m de perímetre. A cada volta el paquet d'electrons travessa un cop la cavitat de radiofreqüència, amb el resultat que l'energia del feix augmenta en cada revolució. Després d'un temps de vol total de l'ordre dels 150 ms (és a dir, aproximadament 150.000 voltes), els electrons han aconseguit una energia de 3 GeV (trenta vegades superior a la que tenien en el moment de la seva injecció al booster), que correspon amb el valor previst per a l'operació d'ALBA. Arribat en aquest punt el paquet d'electrons s'extreu del booster i s'injecta en l'anell d'emmagatzematge. Cal observar que durant aquest procés tan ràpid és necessari que els electroimants que regulen l'òrbita del feix vagin variant el seu camp magnètic de forma dinàmica, per adaptar-se a la variació contínua de l'energia del feix. D'altra banda, en el moment de la injecció i en el de l'extracció, cal que un element electrostàtic o magnètic (coneguts com a elements polsants) actuï sobre el paquet i es desviï en una volta concreta del seu períple, sense haver afectat en la volta anterior o següent, segons el cas.

L'anell d'emmagatzematge d'ALBA té un perímetre d'uns 270 m. S'hi mantenen emmagatzemats simultàniament diversos paquets d'electrons similars, que procedeixen successivament del booster. Cadascun d'aquests paquets s'injecta utilitzant de nou sistemes polsants que han de ser capaços de desviar el paquet entrant i, unes fraccions de μs després, mantenir en òrbita paquets injectats en cicles anteriors. Gradualment la quantitat d'electrons acumulada en l'anell va creixent, fins a un nivell de treball útil per a les línies de llum. Cada paquet d'electrons, al llarg de la seva trajectòria, va perdent energia, a causa de l'emissió de llum. Aquesta energia es reposa en tres punts de l'anell mitjançant parells de cavitats de radiofreqüència, amb el resultat net que l'energia mitjana del feix roman estacionària. La intensitat màxima de corrent que pot circular per l'anell és de 400 mA. Tenint en compte la longitud de la circumferència i que els electrons es mouen pràcticament a la velocitat de la llum, és fàcil concloure que això es correspon amb un nombre total de l'ordre de

10^{12} e^- . Aquests electrons, distribuïts al llarg del perímetre de l'anell i circulant de manera continuada al seu voltant, mentre emeten polsos de llum de sincrotró cada vegada que travessen una regió amb camp magnètic elevat, tenen una certa probabilitat per unitat de temps de patir una interacció que els faci abandonar el feix principal. Aquestes interaccions són normalment dominades per les col·lisions amb molècules de gas residual, raó per la qual resulta essencial que el complex d'acceleradors funcioni en condicions de buit ultraalt. El conjunt d'elements lligats a l'obtenció i monitoratge d'aquestes condicions (sistema de buit) és un dels components essencials del conjunt.

Tornant a les interaccions que fan que un fotó abandoni el feix, aquí estem davant d'una situació clàssica de procés estocàstic de tipus exponencial. El feix així emmagatzemat se'n va, per tant, atenuant la seva intensitat, amb una vida mitjana que ve determinada per la secció eficaç total d'interacció per unitat de longitud de trajectòria. Aquesta vida mitjana, si els sistemes funcionen correctament, ha d'estar ben per sobre de les 10 h. En aquestes condicions, és perfectament possible operar durant diverses hores sense tornar a injectar electrons i repetir el cicle quan el total de corrent emmagatzemat hagi disminuït sensiblement. No obstant això, malgrat que l'atenuació del corrent pugui semblar petita, és prou important perquè els elements òptics directament exposats al feix de fotons estiguin sotmesos a variacions rellevants en la càrrega tèrmica suportada. Aquestes variacions poden fer canviar la posició del feix i pertorbar l'experiment. Per això en les modernes fonts de tercera generació és habitual operar d'una manera diferent, coneguda com a top-up, que consisteix a reinjectar petites quantitats de càrrega en intervals típics de pocs minuts, de manera que el corrent emmagatzemat romangui pràcticament constant durant tota l'operació del sistema. Aquesta és la manera prevista per a l'operació de l'ALBA.

Tots els acceleradors de l'ALBA estan dotats d'un sofisticat sistema de control, que permet monitoritzar tots els elements rellevants i actuar sobre els diferents paràmetres lliures del sistema per assegurar-ne el correcte funcionament. D'altra banda, les energies d'operació fan necessari que els acceleradors quedin allotjats en estances confinades, amb un blindatge radiològic adequat, i els accessos estan dotats de sistemes d'enclavament i seguretat, d'acord amb estrictes regulacions supervisades pel Consell de Seguretat Nuclear.

En els punts de l'anell d'emmagatzematge on la trajectòria del feix d'electrons es corba d'una forma sensible, es produeix l'emissió de llum de sincrotró. En el perímetre exterior de l'anell hi ha un total de 34 sortides per a aquestes emissions de llum, cadascuna d'elles disponible, en principi, per equipar una línia de llum (beamline). La meitat d'aquestes sortides es corresponen amb imants dipolars i la resta amb seccions rectes, tres d'elles molt

llargues (ca. 8 m), on l'emissió de llum prové, si escau, de les trajectòries induïdes per dispositius d'inserció. Aquest número és raonablement elevat, per anar incorporant un ampli ventall d'aplicacions i tecnologies al llarg de la vida útil de la instal·lació, i havent aconseguit un aprofitament òptim de l'espai disponible. A partir del punt d'emissió es deriva una extensió rectilínia, al llarg de la tangent de l'anell, per transportar la llum emesa fins a la línia de llum. Aquesta connexió entre anell d'emmagatzematge i línia de llum es coneix com a terminació frontal (front end).

2.3 Línies de llum de l'ALBA

En la configuració inicial l'ALBA utilitza dues sortides de llum (corresponents a imants dipolars) com a diagnòstic del mateix feix d'electrons i set sortides (sis dispositius d'inserció i un dipol) per utilitzar la llum com a eina analítica de materials en diverses àrees d'aplicació. No és el propòsit d'aquest treball descriure amb més detalls les línies de llum, denominades de fase 1, de l'ALBA, ni explicar en profunditat les tècniques analítiques, és a dir, com s'utilitzen les diferents interaccions entre radiació i matèria per mesurar aspectes concrets de les propietats íntimes d'aquesta última. Ens limitarem, per contra, a fer un breu resum de les línies.

Les línies de l'ALBA [5] es poden classificar en tres grans grups, vistes des de l'angle de les aplicacions científiques: línies en què l'aplicació més rellevant és el camp de la biociència, entesa en sentit ampli; línies amb aplicacions en àrees molt avançades de la ciència de materials, en particular aspectes d'estructura magnètica i electrònica i nanociència; línies amb aplicacions en ciència de materials entesa en sentit molt ampli, amb ramificacions en química i diverses àrees de tipus multidisciplinari.

En el primer grup tenim les línies MISTRAL, NCD i XALOC. MISTRAL [6] és un microscopi de transmissió de raigs X de camp complet que permet registrar imatges bidimensionals d'una mostra amb resolucions espacials de fins a unes quantes desenes de nanòmetres. Optimitzada per operar a la finestra de l'aigua, és a dir, el rang espectral comprès entre la vora d'absorció del carboni i la de l'oxigen, és una eina òptima per obtenir mapes de material biològic, amb una profunditat de penetració molt interessant que permet abordar, sense necessitat de seccionar la mostra, problemes no accessibles a la microscòpia electrònica de transmissió. Naturalment, triant longituds d'ona específiques per al feix de raigs X, es pot obtenir sensibilitat selectiva a diferents elements químics. La superposició d'imatges bidimensionals de la mateixa mostra preses a diferents angles permet fer reconstruccions tomogràfiques. L'habitual és que les mostres es mantinguin en condicions criogèniques durant tot l'experiment.

La línia NCD [7] (sigla per a non crystalline diffraction) utilitza la detecció de la llum difractada a baix i alt angle, amb dos detectors bidimensionals diferents, per estudiar l'estructura de materials amb regularitats espacials

Línia	Tècnica	Aplicació
MSPD	Difracció de pols alta resolució, materials, pressió.	Estructura difracció resolució temporal.
MISTRAL	Microscòpia transmissió raigs X tous optimitzada finestra aigua.	Tomografia criogènica mostres resolució espacial. espectroscòpia biològiques,
NCD	Difracció baix i alt angle alta resolució.	Estructura i canvis fase fibres biològiques, polímers, dissolucions, resolució temporal.
XALOC	Difracció de raigs X, vidres a macromolècules orgàniques.	Cristal·lografia proteïnes.
CLAESS	Espectroscòpies vora absorció (EXAFS, XANES, QuickEXAFS)	Ciència materials, química, resolució temporal.
CIRCE	Microscòpia fotoemissió (PEEM). Fotoemissió pressió quasi-ambient (NAPP).	Nanociència, dominis magnètics (PEEM). Química superfícies (NAPP).
BOREAS	Dicroisme magnètic. Difracció magnètica ressonant.	Magnetisme, magnetisme superfícies, estructura magnètica.

Taula 1: Línies de fase 1 de l'ALBA

aproximadament periòdiques. Alguns dels exemples més rellevants es troben en aplicacions biològiques (estudi de teixits fibrosos i dissolucions), però també en altres àrees, com ara l'estudi de polímers. Un aspecte especialment atractiu d'aquesta línia és que incorpora detectors d'adquisició ràpida (en el rang del mil·lisegon), la qual cosa permet estudiar processos dinàmics a escales temporals de gran interès.

En les últimes dècades la determinació de l'estructura de proteïnes mitjançant cristal·lografia de raigs X ha estat l'àrea d'aplicació de la llum de sincrotró que més ha crescut. La línia XALOC [8] està especialitzada en aquest camp. És una línia de difracció de monocristalls capaç de mesurar mostres d'unes quantes micres, optimitzada per analitzar centenars d'espècimens en poques hores. Els elements clau són: una òptica de gran estabilitat, un goniòmetre ultraprecís, un braç robotitzat per fer el canvi de mostra de forma automatitzada i un detector ràpid i de gran rang dinàmic.

El segon grup de línies comprèn CIRCE i BOREAS. CIRCE [9] és una línia de raigs X tous ($h\nu \simeq 200 - 3000$ eV), generats en un ondulator que permet seleccionar diferents polaritzacions (horitzontal, vertical, circular dextrogira o levogira). D'aquesta manera, un feix de fotons polaritzats es fa incidir sobre la mostra en una de les dues branques de la línia. La primera branca (PEEM) incorpora un microscopi de fotoemissió, amb el qual es pot obtenir una imatge de la superfície de la mostra amb el flux local de fotoemissió d'electrons com a mesura de contrast. En variar l'energia del feix de raigs X incident s'obté informació sobre l'estructura electrònica de la mostra, mentre que en comparar dues imatges preses amb diferents polaritzacions del feix s'aconsegueix informació sobre les seves propietats magnètiques. En tot cas, la resolució lateral de les imatges es mou en el rang de les desenes de nanòmetres. Aquesta branca opera en condicions estrictes de buit ultraalt, i això és un aspecte essencial, ja que es tracta de la detecció d'electrons de baixa energia. L'altra branca de CIRCE (NAPP) utilitza també la tècnica de fotoemissió, en aquest cas sense resolució espacial més enllà de la que proporciona la mida del feix de raigs X. El sistema de detecció d'electrons està configurat de manera que, a través d'una sèrie de diafragmes adequats que formen part d'un sistema de bombament diferencial, la mostra pot mantenir-se en condicions properes a pressió ambient, sense per això perdre la possibilitat de detectar els electrons fotoemesos. Aquesta configuració té un gran potencial per estudiar les característiques superficials de mostres que es trobin en condicions reals, molt més properes a les eventuais aplicacions industrials que les que es poden aconseguir en un entorn estricte de buit ultraalt.

BOREAS [10] és una línia que utilitza feixos similars als de CIRCE (raigs X tous amb polarització sintonitzable) per estudiar mostres basant-se en l'absorció (en la seva

primera estació experimental) i dispersió elàstica (en una segona estació situada a continuació de la primera) dels mateixos raigs X. Adquirint espectres d'absorció o patrons de difracció a energies properes a la vora d'absorció d'una espècie atòmica determinada, es pot obtenir la contribució d'aquesta espècie al magnetisme total o a l'estructura magnètica de la mostra.

El tercer i últim grup de línies està format per MSPD i CLAESS. MSPD [11] és una línia clàssica de difracció de pols, és a dir, de material policristal·lí amb mida de gra molt més petit que el de les dimensions transversals del feix de raigs X. Consta de dues estacions, col·locades una a continuació de l'altra com en el cas de BOREAS. A la primera estació es disposa d'un sistema per sotmetre la mostra estudiada a condicions d'alta pressió, que permeten investigar com canvia la seva estructura per a diferents valors d'aquest paràmetre extern. En la segona estació, que funciona a pressió ambient, es disposa de detectors que permeten estudiar els anells de difracció generats per la mostra amb molt alta resolució espacial, cosa que possibilita accedir a detalls molt fins de la seva estructura.

CLAESS [12] és una línia d'absorció equipada amb un entorn de mostra que permet fer, opcionalment, experiments de catàlisi. D'altra banda està previst equipar la línia amb un espectròmetre de fluorescència de raigs X de molt alta resolució. Aquesta configuració experimental permet abordar problemes en camps d'aplicació molt variats mitjançant l'estudi de la composició atòmica de la mostra, el seu estat químic i l'entorn proper (és a dir, els aspectes estructurals locals) de cada espècie atòmica.

Els aspectes més rellevants de cadascuna de les línies es resumeixen a la taula 1.

3 Breu història del projecte ALBA

El projecte ALBA té com a antecedent remot una sèrie de moviments, al principi de la dècada de 1990, orientats cap a l'objectiu d'aconseguir que el sistema espanyol de ciència i tecnologia donés un salt qualitatiu i abordés el repte de construir i gestionar una gran infraestructura a un camp lligat a la física d'acceleradors.

Ja el 1992 la Generalitat de Catalunya va iniciar un estudi de viabilitat i, posteriorment, un programa de formació d'investigadors joves que, eventualment, poguessin incorporar-se al projecte si s'arribava a aprovar. Ambdues iniciatives, després d'un temps de maduració adequat, van tenir èxit.

Efectivament, el 2002 el Govern d'Espanya i la Generalitat de Catalunya van concloure un acord formal per cofinançar, al 50 %, la construcció i posterior operació de l'ALBA [13], [14]. A aquest efecte es va crear el consorci CELLS que, des de llavors, s'ocupa de la gestió del projecte. El consorci es va crear formalment el 2003 i va iniciar la seva activitat el 2004. Al llarg dels dos anys se-

güents l'activitat es va centrar en el disseny detallat dels diferents elements del projecte, en paral·lel amb un creixement gradual de la plantilla per anar escometent tots els reptes.

L'any 2006 es va iniciar la construcció dels edificis de l'ALBA, de nou en paral·lel amb una intensa activitat en el llançament de licitacions públiques per als nombrosos contractes que abordaven la fabricació dels diferents elements convencionals o d'instrumentació científica del projecte. La construcció dels edificis es va donar per finalitzada a principis de 2009, moment en què el personal de CELLS, fins llavors en edificis provisionals al proper campus de la Universitat Autònoma de Barcelona, es va traslladar a les noves instal·lacions de manera permanent. Mentrestant, ja el 2008, mentre progressava la construcció dels edificis, es va instal·lar i posar a punt el LINAC, es van preinstal·lar, ex situ, els equips electrònics en racks adequats per a la seva posterior instal·lació massiva a l'edifici principal de l'ALBA, i es van preinstal·lar i condicionar les cambres de buit de l'accelerador booster. Aquests treballs de preparació, curosament planificats, van permetre abordar amb gran eficiència la instal·lació completa del booster durant el 2009, any que va concloure amb un primer període de proves reeixit en aquest accelerador.

En paral·lel amb els treballs d'acabat en el booster, durant bona part del 2009 es va fer també gairebé tota la instal·lació mecànica de l'anell d'emmagatzematge. L'any 2010 es va dedicar a completar la instal·lació de l'anell, amb la seva complexa configuració de cablejat i serveis complementaris. L'any es va acabar amb un nou període de proves en el booster, que incloïa una primera injecció en l'anell d'emmagatzematge. A tall d'exemple amb referència al grau de complexitat de la instal·lació cal esmentar el nombre total de cables per a ús científic instal·lats a l'ALBA: ca. 19.000, amb una longitud total de ca. 170 km.

L'any 2011 es va dedicar a posar en marxa l'anell d'emmagatzematge, en períodes intercalats amb la instal·lació dels diferents dispositius d'inserció. Anteriorment, ja des de l'any 2008, es va adoptar d'una manera decidida l'estratègia d'avançar la instal·lació de les línies de llum de fase 1 compartint recursos amb els esforços en els sistemes convencionals i d'acceleradors. Els treballs d'infraestructura van donar pas esglaonadament, en les diferents línies, a la instal·lació d'elements òptics ja el 2009 i posteriorment a la de les diferents estacions experimentals. Així, ja en l'últim terç de 2011, quan l'anell d'emmagatzematge amb els seus sis dispositius d'inserció estava funcionant d'una manera raonablement estable, es van començar a assignar períodes de funcionament dels acceleradors i es va fer la posada a punt de les línies de llum.

Finalment, el 2012, s'ha dedicat un total de 4000 hores aproximadament d'operació dels sistemes d'acceleradors per completar-ne la posada a punt, fer la de les línies

de llum, dur a terme experiments de validació amb usuaris experts i anar obrint, gradualment, les diferents línies a la seva operació regular amb usuaris oficials. Havent planejat un calendari amb un total de 5000 hores d'operació, la previsió és que 2013 sigui el primer any complet d'operació regular.

4 Usuaris de l'ALBA

La primera convocatòria pública d'usuaris de l'ALBA es va obrir el novembre de 2011, i així es va tancar el termini d'admissió de propostes el gener de 2012. Se'n van rebre 203 propostes, de les quals el 18 % tenien procedència internacional, usant el centre d'adscripció de l'investigador principal com a criteri de classificació. Aquests números es poden considerar com un signe clar de les grans expectatives i l'interès que l'ALBA ha generat en la comunitat científica, tant espanyola com internacional, des del seu mateix inici. Després de verificar la viabilitat de les propostes en termes tècnics i de seguretat, les van avaluar un panel extern d'experts internacionals en les diferents àrees científiques. Aquest panel va establir un rànquing basat en criteris d'estricta mèrit científic. Finalment, d'acord amb el calendari particular de posada a punt de cada línia, es va establir, per a cadascuna d'elles, el nombre de torns d'operació disponibles per a experiments durant el període comprès entre maig de 2012 i març de 2013. Això va permetre aprovar 93 propostes (46 % del total de les presentades), que es van triar d'acord amb la seva prioritat dins del rànquing científic.

El 17 % de les 93 propostes aprovades corresponen a grups internacionals, una ràtio molt similar a la de les propostes presentades. Com a dada curiosa, a més de les propostes europees se'n va aprovar una procedent de Taiwan i una altra d'Estats Units. Dins de les propostes espanyoles aprovades cal destacar l'elevat nombre procedent de centres catalans (45 %), madrilenys (25 %) i valencians (12 %); en el 18 % restant hi ha una gran varietat de procedències.

És molt interessant estudiar la classificació de les propostes aprovades per àrea d'aplicació. Com es veu esquemàticament en la figura 4, una mica més de la meitat (55 %) correspon a l'àrea de la biociència, en sentit ampli, amb una contribució dominant dels experiments de cristal·lografia de macromolècules (38 %), ja que la línia XALOC, que fa nombrosos experiments de curta durada, es dedica gairebé exclusivament a aquesta àrea. En segon lloc, aproximadament un terç (35 %) de les propostes es podrien classificar com a ciència de materials, també en sentit ampli (la major part estudis d'estructura i una fracció molt rellevant dedicades a estudiar propietats magnètiques i electròniques). Això deixa un total del 10 % per a la resta d'àrees, amb un gran predomini d'aplicacions en química.

El cas de les aplicacions industrials mereix una explica-

ció a part, ja que tenen un tractament diferenciat a l'ALBA. En aquest tipus d'experiments, en què una indústria pot obtenir benefici comercial directe i els resultats no es posen en l'àmbit públic, l'accés a l'ALBA pot aconseguir-se d'una manera directa, sense passar per panels de selecció, a partir d'un estudi bàsic de viabilitat tècnica i de l'aplicació d'una tarifa d'accés. Aquest tipus de propostes que no segueixen, per tant, el cicle periòdic de les convocatòries científiques, sinó que apareixen més contínuament, ja en aquesta fase inicial de l'ALBA tenen una presència molt prometedora; un dels objectius estratègics és promoure-les fins a aconseguir una quota adequada, que, en tot cas, cal esperar que sigui clarament minoritària, com succeeix habitualment en altres fonts similars a l'ALBA. És important considerar que el més important d'aquests usuaris industrials no és tant el fet que generin un benefici econòmic per a l'ALBA (que, en tot cas, no es preveu que tingui un impacte elevat) com la possibilitat d'aportar aspectes innovadors que permetin millorar la competitivitat de les indústries implicades. L'ALBA és, en aquest sentit, una gran oportunitat per fomentar la cultura de la innovació en la indústria espanyola. Com s'explicarà més endavant, la interacció amb les indústries com a usuàries de la llum de sincrotró no és l'únic ni la manera més important en què una gran infraestructura d'aquest tipus pot afegir valor al teixit industrial.

L'octubre de 2012 es va obrir la segona convocatòria pública, amb l'objectiu de cobrir el temps de feix disponible a l'ALBA en el període abril-desembre de 2013. El nombre total de propostes ha estat pròxim al de la primera convocatòria i les dades estadístiques no mostren grans canvis (potser amb l'excepció que les propostes procedents de la Comunitat d'Aragó han superat en nombre, en aquesta segona convocatòria, les de la Comunitat Valenciana). L'objectiu és passar, a partir de gener de 2014, a una dinàmica regular de dues convocatòries per any, i assignar temps per a experiments durant cicles de sis mesos, seguint les pràctiques habituals en infraestructures científiques similars.

5 Paper i perspectives futures de l'ALBA

El primer pas en l'itinerari del projecte ALBA ha culminat amb èxit durant l'any 2012: construir i posar en funcionament un instrument amb un extraordinari potencial científic i tecnològic. Perquè aquest gran potencial es faci efectiu, cal treure rendiment a aquests instruments únics mitjançant la seva aplicació a un programa científicotecnològic presidit per estrictes criteris d'excel·lència. Una gran infraestructura científica com ara l'ALBA es pot entendre d'acord amb tres elements essencials: instrumentació única, no accessible, per raons de cost, al nivell de cadascuna de les institucions científiques usuàries; un equip humà capaç d'operar i explotar a fons les possibilitats d'aquesta instrumentació, per la qual cosa resul-

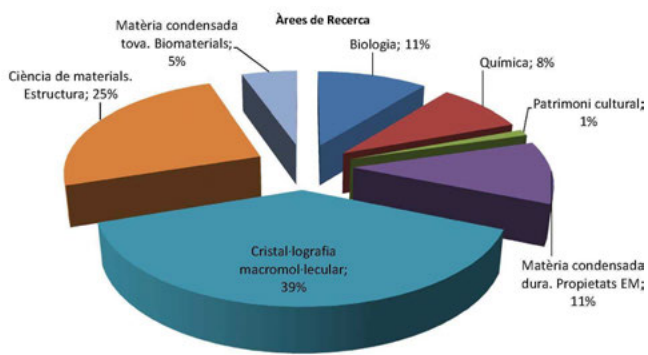


Figura 4: Distribució de les propostes científiques aprovades per l'ALBA en la seva primera convocatòria per àrees d'aplicació

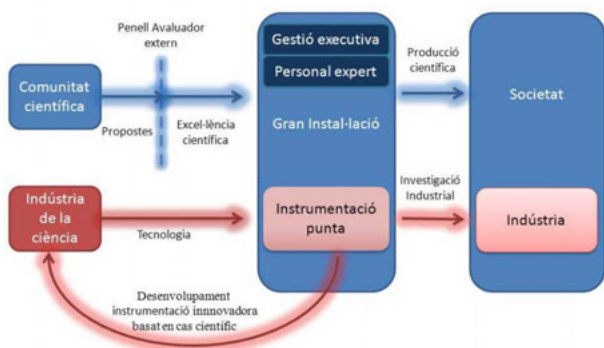


Figura 5: Esquema explicatiu del paradigma d'una infraestructura científica com l'ALBA

ta essencial disposar d'una activitat complementària de recerca pròpia molt competitiva, i un sistema de gestió específicament dissenyat per abordar adequadament els reptes d'un entorn científicotecnològic molt avançat amb les necessitats d'alta eficiència i disponibilitat derivats del seu caràcter d'infraestructura d'usuari. Exposada a la millor ciència -extrem que es garanteix a través de l'eina d'un filtratge de les propostes d'experiments amb criteris d'estricta mèrit científicotecnològic i la seva implementació a través de panells externs-, l'ALBA és un espectador privilegiat dels límits que la instrumentació científica en ús imposen a la resolució dels casos científics més innovadors. Això ha de produir, a llarg termini, un caldo de cultiu ideal per generar un llaç de sinergia en què les noves idees fructifiquin, a través de la col·laboració amb la indústria en el desenvolupament de solucions tecnològiques per a aquests reptes. Tot això reverteix a la societat, bé a través de l'increment global del coneixement, en àrees generalment no gaire allunyades d'aplicacions tecnolò-

giques concretes, bé a través de l'obtenció d'informació directament rellevant per millorar la productivitat de processos industrials, bé a través del desenvolupament de la indústria científicotecnològica, particularment en l'entorn geogràficament proper. La figura 5 tracta de plasmar, de manera esquemàtica, aquestes idees sobre el paradigma d'una gran infraestructura científica com l'ALBA.

En conclusió, l'ALBA es pot prendre com una mostra molt representativa del salt qualitatiu que el sistema espanyol de ciència i tecnologia està abordant des de l'any 2000, aproximadament. Un cop la xarxa de centres i investigadors arriba a un cert volum crític, resulta estratègic créixer no només per acumulació, sinó incorporar eines complementàries (és a dir, grans infraestructures científiques) que tinguin un efecte multiplicador sobre el rendiment de tot el sistema en conjunt. L'ALBA, amb les seves línies de fase 1 i amb un desenvolupament que cal esperar que sigui continuat al llarg dels propers anys, incorporant gradualment noves línies i infraestructures complementàries adequades per rendibilitzar al màxim la inversió inicial, té la vocació de contribuir a aquest esforç.

Bibliografia

- [1] H. Winick, *Synchrotron radiation sources: a primer*, World Scientific (1994).
- [2] H. Wiedemann, *Particle Accelerator Physics I, II*, Springer Verlag (1993).
- [3] J. Bordas et al., *Nucl. Instrum. Meth. A.*, **543**, (2005) 28-34.
- [4] M. Pont, *Proceedings of the 3rd International Particle Accelerator Conference*, (2012) 1659-1661.
- [5] I. Peral, S. Ferrer, in M. Suárez et al. (ed.), *Synchrotron Radiation in Mineralogy, Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía*, **6**, (2009) 7-28.
- [6] E. Pereiro et al., *Journal of Synchrotron Radiation*, **16**, (2009) 505-512; <http://www.cells.es/Beamlines/XM>.
- [7] <http://www.cells.es/Beamlines/NCD>
- [8] Juanhuix, J. and Ferrer, S., *AIP Conference Proceedings*, **879**, (2007) 824-827; <http://www.cells.es/Beamlines/XALOC>.
- [9] V. Pérez-Dieste et al., *Journal of Physics: Conference Series, in press*, **425**, (2013) 1742-6596; <http://www.cells.es/Beamlines/CIRCE>.
- [10] <http://www.cells.es/Beamlines/VP>
- [11] M. Knapp et al., *Kristallogr. Proc*, **1**, (2011) 137-142; <http://www.cells.es/Beamlines/MSPD>.
- [12] <http://www.cells.es/Beamlines/CLAESS>
- [13] R. Pascual de Sans, *Revista Coneixement i Societat*, **1**, (2003) 80-101.
- [14] J. García Montalvo, *Revista Coneixement i Societat*, **9**, (2005) 32-59.