

Sincrotró: viatge al fons de la matèria

Aquest mes de març es constitueix el consorci públic que ha de finançar la construcció d'una instal·lació de llum de sincrotró al Vallès Occidental, molt a prop de la Universitat Autònoma de Barcelona. Les obres han de començar enguany i han d'acabar al 2008. Si es compleixen els terminis, serà l'únic centre d'aquest tipus del sud-oest d'Europa. Empreses i científics de molts diversos àmbits se'n podran beneficiar.

L'any passat es va prendre la decisió de construir una font de llum de sincrotró al nostre país. La seva repercussió en l'entorn científic i industrial és d'una gran importància i, més encara, si tenim en compte que serà l'única instal·lació d'aquest gènere en un espai geogràfic extens que abraça tot el sud-oest d'Europa. Però, realment, què és la llum de sincrotró i per a què serveix?

Finalment, al març de l'any passat i després de més de deu anys de projectes, els científics catalans van aconseguir el vistiplau definitiu del consell de ministres del Govern espanyol per construir la que ha de ser una de les instal·lacions científiques més importants del país. La decisió, de fet, va ser un reconeixement a un intens i constant treball de fons d'un bon grapat de científics que ja havien començat a treballar des de l'inici dels anys noranta. Actualment hi ha unes quinze fonts de llum de sincrotró a Europa (vegeu la taula de la pàgina 52) comptant-hi tant les que ja s'han construït com les que estan en fase de projecte. Cal afegir que la instal·lació de sincrotró que s'ha de construir al Vallès és situada en una zona geogràfica d'Europa on hi ha una manca d'instal·lacions d'aquest tipus, de manera que podrà oferir serveis a científics d'una ampla regió. En els darrers mesos, els mitjans de comunicació han informat a bastament sobre el profund impacte que en l'entorn científic i tecnològic ha de tenir la construcció del nou sincrotró.

Més enllà dels raigs X. En el nostre entorn més immediat, quan volem estudiar la realitat macroscòpica, utilitzem directament la informació que el nostre cervell ha processat provinent de la radiació a la qual és sensible la nostra retina: la llum visible. Això ens és totalment insuficient quan volem anar més enllà, per exemple, quan volem estudiar les propietats físiques dels materials o de sistemes microbiològics. La

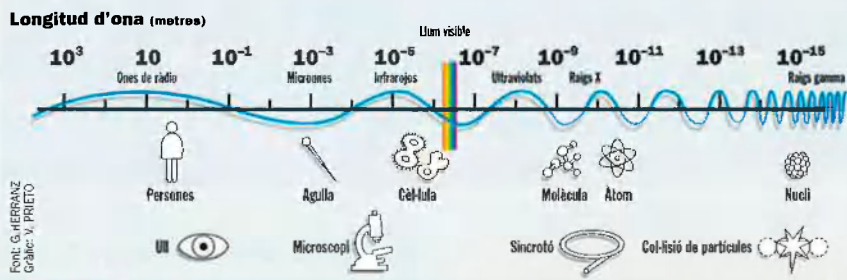


recerca en aquests àmbits requereix un coneixement precís dels detalls de l'estructura de la matèria i, per tant, ha calgut el desenvolupament d'eines que ens permetessin observar aquesta estructura a escales comparables a la mesura dels àtoms. Dit d'una altra manera, de la mateixa manera que el microscopi òptic ens va obrir el pas a l'estudi de les cèl·lules, ha calgut desenvolupar una mena de supermicroscopis a través dels quals els investigadors han estat capaços d'escatir l'estructura a escala atòmica dels materials.

Per a veure els àtoms, les dimensions dels quals voregen la desena part d'un nanòmetre (és a dir 10^{-10} m, una deu mil milionèsima part d'un metre) cal emprar una llum d'una altra mena, diferent de la que ens permet veure els objectes quotidians. Aquesta llum ha de tenir una longitud d'ona molt més petita que la llum visible, és a dir, cal que sigui, com a mínim, de l'ordre de la mida dels àtoms. Aquest tipus de llum són els raigs X, descoberts al 1895 per W. C. Röntgen quan aquest descobrí que una radiació misteriosa era capaç de passar a través del cos humà. A causa de la seva natura desconeguda es va batejar amb el nom que ja coneixem. En realitat, els raigs X no són més que ones electromagnètiques amb una longitud d'ona que es troba entre la dels raigs ultraviolats i els raigs gamma, tal com es pot observar sobre

Espectre electromagnètic

A cada longitud d'ona hi ha un límit de resolució representat per un objecte amb les dimensions característiques que es poden resoldre en cada cas. Per exemple, per a poder resoldre l'estructura atòmica cal emprar els raigs X.



aquestes ratlles. En aquesta mateixa il·lustració, hom pot distingir els diferents tipus de radiació electromagnètica en tot l'espectre energètic, i les escales dimensionals típiques que es poden resoldre amb cada longitud d'ona. Així, per exemple, amb els raigs gamma, un tipus de radiació electromagnètica molt energètica i amb una longitud d'ona molt curta, podem ser capaços d'escatir les propietats físiques dels nuclis atòmics —els quals tenen una mesura d'unes 100.000 vegades més petita que la dels àtoms!

Els raigs X, com és ben conegut, també són emprats en medicina. Però en recerca científica són especialment valorats, perquè en fer incidir un feix d'aquesta radiació en un determinat material, la radiació que en surt reflectida, captada per

A dalt, dues imatges del sincrotró APS dels Estats Units. A sota, l'espectre electromagnètic: a cada longitud d'ona hi ha un límit de resolució representat per un objecte amb les dimensions característiques que es poden resoldre en cada cas. Per exemple, per a poder resoldre l'estructura atòmica cal recórrer als raigs X.

Com funciona la llum de sincrotró?

Quan partícules amb càrrega elèctrica, en particular els electrons, són forçades a moure's en un òrbita circular, perden energia irradiant ones electromagnètiques. Quan les partícules atenyen velocitats relativistes —és a dir, es mouen a velocitats properes a la de la llum—, la radiació és emesa en una seqüència d'energies que abasten des de la part infraroja de l'espectre —les longituds d'ona més baixes— fins als més energètics raigs X —i, per tant, amb longituds d'ona més curtes— (vegeu el gràfic de la pàg. 47). Per tant, aquesta radiació —anomenada llum de sincrotró— no solament produeix radiació en forma de raigs X, sinó que es pot obtenir radiació en un ampli rang de longituds d'ona que inclou els infra-roigs i els ultraviolats.

Per produir llum de sincrotró cal forçar un corrent d'electrons a moure's en una òrbita circular. De primer, cal que hi hagi una producció d'electrons primaris, que és l'electró que, en col·lidir amb un àtom dóna lloc a l'emissió d'un altre electró.

Si ens fixem en les aplicacions tecnològiques més comunes, veurem que la producció d'electrons es pot fer de diverses maneres. Algunes aplicacions es basen en el principi físic que segueixen els canons d'electrons, els quals consisteixen en un filament d'un conductor metàl·lic que és sotmès a un escalfament tèrmic. L'energia tèrmica és cedida als electrons del metall perquè aquests puguin abandonar-lo i ser emesos cap a l'espai. De fet, els televisors convencionals disposen d'un canó d'electrons. En altres aplicacions l'emissió dels electrons primaris es fa a través de la irradiació d'un metall per llum d'una longitud d'ona prou energètica perquè els electrons del material puguin abandonar-lo.

Seguidament, els electrons produïts són accelerats en una cambra lineal (accelerador lineal) i posteriorment són transmesos a un accelerador circular —l'anomenat accelerador d'impuls, sincrotró impulsor o *booster accelerator*— on són accelerats fins a velocitats properes a la de la llum. Són, per tant, electrons d'alta energia, que posteriorment són injectats en un anell d'emmagatzematge de grans dimensions —típicament de l'ordre de centenars de metres de circumferència—, on circulen durant hores a una energia constant en un entorn on s'ha fet el buit. A la figura de la dreta podem observar l'estructura bàsica d'una instal·lació de sincrotró.

L'anell d'emmagatzematge disposa de diferents tipus d'imants que forcen els electrons a corbar la seva trajectòria. De la mateixa manera que un corrent elèctric crea un camp magnètic al seu voltant —per exemple, quan acostem una brúixola a un fil de corrent, veiem que l'agulla es desvia—, la interacció també es dóna a la inversa, és a dir, un corrent de partícules carregades elèctricament és desviat quan es mou dins un camp magnètic. Aquest fenomen físic és explotat en l'anell d'emmagatzematge a l'interior del qual hi ha instal·lats diversos tipus d'imants que creen els camps magnètics necessaris per fer que els electrons es moguin en una òrbita circular.

A l'angle superior dret del gràfic hi ha un esquema bàsic dels diferents tipus d'imants. Els imants de desviació (*bending magnets*) canvien la trajectòria dels electrons, per tant, fan que aquests emetin llum de sincrotró. En els trams rectilinis dels sincrotrons de tercera generació s'afegeixen dispositius d'inserció que augmenten fortament la brillantor de la llum de sin-

un detector sensible als raigs X, forma un patró característic de franges i de punts que ens permet resoldre no només la composició química del material, sinó també les distàncies que mantenen els àtoms entre si i la seva estructura geomètrica. Aquesta tècnica experimental és coneguda amb el nom de difracció de raigs X. Al 1912, dos científics, M. von Laue i P. Knipping, van obtenir el primer patró de difracció d'un cristall amb raigs X. I, de fet, l'any 1953, l'estructura del DNA va ser resolta per J. Watson, un biòleg, i F. Crick, un físic, mitjançant aquesta tècnica. Les seves investigacions van rebre el premi Nobel de Medicina l'any 1962.

Tanmateix, tot i aquests magnífics resultats, els tubs de raigs X emprats fins al moment eren limitats, perquè la llum era emesa a totes les direccions, sense possibilitat de reeixir a focalitzar la radiació o de fer els raigs paral·lels. A més, la llum

produïda era tan sols intensa en un cert interval de longituds d'ona, cosa que en restringia severament l'ús.

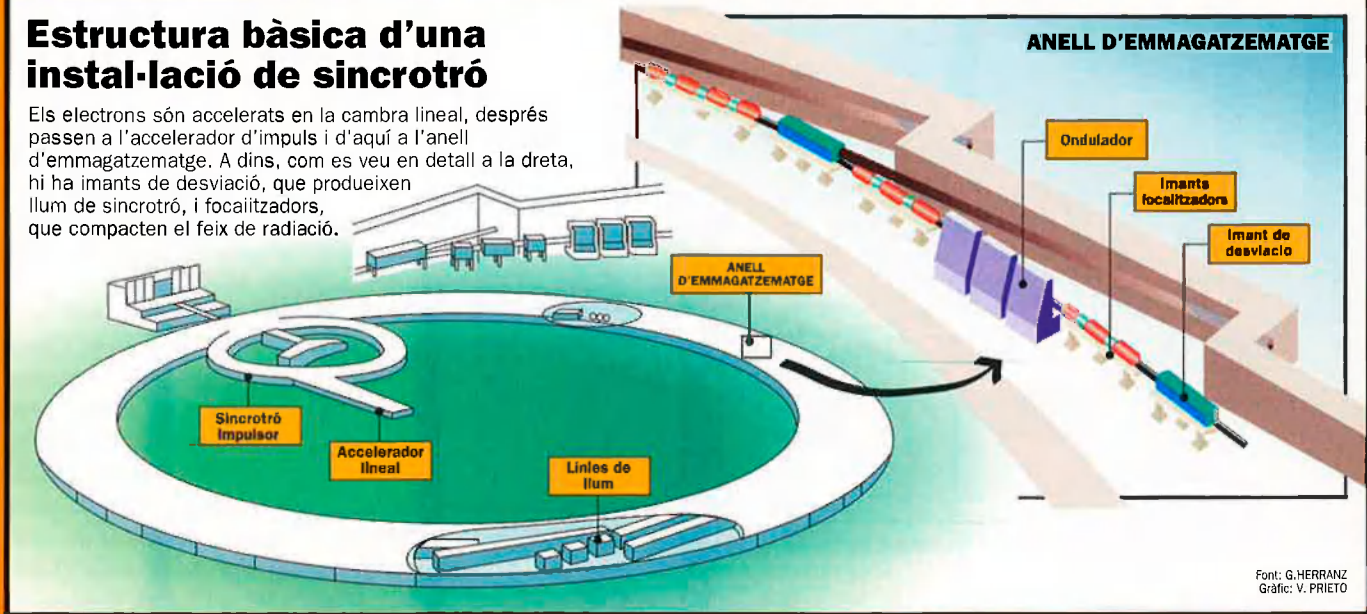
Aquests inconvenients poden ser superats amb escreix quan s'utilitza llum de sincrotró en lloc de la radiació convencional produïda als tubs de raigs X.

Les instal·lacions de sincrotró arreu del món.

Les primeres instal·lacions de sincrotró es van començar a construir fa aproximadament uns cinquanta anys. Aquestes primeres instal·lacions eren acceleradors d'alta energia, en els quals la llum de sincrotró emesa per les partícules en moviment era un producte residual del qual es treia profit per a determinats experiments. Més endavant es van construir instal·lacions expressament dissenyades per obtenir llum de sincrotró, els anomenats sincrotrons de segona generació. La tercera generació de sincrotrons permet d'obtenir fei-

Estructura bàsica d'una instal·lació de sincrotró

Els electrons són accelerats en la cambra lineal, després passen a l'accelerador d'impuls i d'aquí a l'anell d'emmagatzematge. A dins, com es veu en detall a la dreta, hi ha imants de desviació, que produeixen llum de sincrotró, i focalitzadors, que compacten el feix de radiació.



crotró emesa. Finalment, els imants focalitzadors (*focusing magnets*) són usats per compactar el feix de radiació, de manera que en resultin feixos ben focalitzats i intensos.

Acabem de veure que la llum de sincrotró és emesa a les seccions curvilínies de l'anell d'emmagatzematge per l'acció dels imants de desviació. La llum produïda és posteriorment dirigida cap a les línies de llum (*beamlines*) que envolten l'anell d'emmagatzematge. Cada línia de llum és dissenyada per a una tècnica específica o per a un tipus específic de recerca.

Normalment, els experiments es desenvolupen contínuament, dia i nit. A les línies de llum hi ha tot l'aparellatge final que ha de dur la llum de sincrotró a incidir sobre la mostra que es vol estudiar. S'hi inclouen tots els sistemes òptics finals que condicionen el senyal de llum amb què es vol treballar, així com els detectors que enregistren la informació produïda com a resultat de la interacció entre el feix de llum i la mostra.

Gervasi Herranz.

xos d'una intensitat elevada, uns 10.000 cops més intensa que en els sincrotrons de segona generació. Aquesta gran brillantor de la llum és obtinguda afegint en els trams rectilinis del sincrotró diversos dispositius d'inserció (com els imants ondulators del gràfic d'aquesta pàgina). El sincrotró que s'ha de construir al nostre país és d'aquesta darrera categoria.

Actualment, arreu del món hi ha unes setanta instal·lacions de sincrotró, repartides en uns disset estats, bàsicament als Estats Units, Europa i el Japó. Els centres més potents són l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) a Grenoble, l'APS (Advanced Photon Source) als Estats Units i l'Spring-8 del Japó (a la pàgina 52 trobem les instal·lacions de sincrotró ubicades o en fase de construcció a Europa).

El sincrotró català. Quan l'any passat es va prendre la decisió de tirar endavant

la construcció d'un sincrotró al Vallès, es va fixar l'any 2003 com la data d'inici de les obres. Es va fixar un finançament del projecte a parts iguals entre la Generalitat de Catalunya i el Ministeri de Ciència i Tecnologia del Govern espanyol, amb un cost inicial —comptant-hi els costos de construcció i de dotació d'equipaments— d'uns 120 milions d'euros (previsió de l'any 2002), mentre que el cost anual de manteniment seria al voltant dels 12 milions d'euros. Per dur a terme el projecte, es crearà un consorci públic, format equitativament per l'administració espanyola i la catalana, amb una presidència exercida de manera alterna per representants del Govern espanyol i del Govern català. La formació d'aquest consorci és una qüestió encara pendent, però en opinió del doctor Ramon Pascual, un dels màxims impulsors del projecte, hauria de formalitzar-se cap al mes de març d'enguany. De fet,



L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), situat a Grenoble (França), és la instal·lació d'aquesta mena més gran del món.

fa poc transcendia la notícia segons la qual les dues administracions consignaven als respectius pressupostos partides que sumen 5,2 milions d'euros per al projecte de sincrotró. La direcció científica del projecte hauria de recaure molt probablement en el doctor Joan Bordas, que ja hi ha treballat durant uns deu anys, mentre que el doctor Ramon Pascual també tindrà un paper destacat en la gestió del projecte.

Pel que fa a la seva ubicació final, aquesta seria probablement dins els terrenys del Centre Direccional a Cerdanyola, al costat de l'autopista A-7, en l'espera dels estudis geològics de la zona sobre l'impacte de les vibracions i de l'estabilitat del sòl. Segons un primer calendari, la construcció de l'edifici que hauria d'allotjar el sincrotró finalitzaria el 2005. Cap a l'any 2006 s'hi instal·laran els equips tècnics, i al 2007 es faria l'assemblatge definitiu de les peces. En la darrera fase, l'any 2008, es faria la posada en marxa de la maquinària.

El projecte de sincrotró ha de significar la consolidació de la recerca científica realitzada al nostre país. De fet, els estudis elaborats durant els darrers anys indiquen que la font de llum sincrotró podria ser utilitzada per més de 750 investigadors, d'uns 160 equips diferents, en camps de recerca com el de la biotecnologia i farmàcia —en anàlisi i desenvolupament de nous medicaments— o el de nous materials i nanotecnologies —en

l'estudi i fabricació de dispositius tecnològics extremadament petits—. En opinió de Ramon Pascual, cal fer un esforç perquè entre els futurs usuaris hi hagi empreses del sector industrial. Les empreses del nostre país no són usuàries habituals de la llum de sincrotró, però el fet de disposar d'una instal·lació de sincrotró a l'abast podria actuar com a estímul perquè els departaments de recerca d'algunes empreses se'n plantegin l'ús en algunes de les seves activitats. D'altra banda, engegar la construcció del sincrotró significa que tot un seguit d'empreses tecnològiques auxiliars se'n beneficien, entre les quals cal incloure enginyeries de disseny, de mecàniques de precisió, de components electrònics, de buit, d'òptica, de radiofreqüència o de sistemes de control. Per dur a terme el projecte de sincrotró cal un alt grau de sofisticació tecnològica, i les empreses involucrades han d'adaptar-se a les tecnologies més avançades, cosa que reverteix en un increment de la seva competitivitat.

En principi, hi ha prevista la construcció de cinc línies de llum mitjançant les quals es podran dur a terme els experiments. Normalment, quan un grup de recerca vol accedir a una d'aquestes línies, ha de justificar el tipus de mesura que vol realitzar, i segons la prioritat establerta, la disponibilitat de l'instrumental i l'interès científic de la proposta, s'assigna un determinat temps de mesura. El sincrotró del Vallès tindrà un perímetre d'uns 250 metres —ocuparà unes 5 hectàrees de terreny— i generarà electrons amb una energia de 2,5 gigaelectronvolts. Serà l'única instal·lació en una gran regió geogràfica que s'estén per tot el sud-oest europeu, perquè la resta de fonts de llum sincrotró s'ubiquen al nord-est de la línia que uneix París amb Trieste, llocs on trobem també sincrotrons.

Les aplicacions de la llum de sincrotró. La llum de sincrotró ha esdevingut una eina imprescindible en un rang ampli de camps de recerca científica, que són:

Física.

La física estudia un ampli espectre de fenòmens que van des de l'il·limitada-

LES PROPIETATS DE LA LLUM DE SINCROTRÓ

La llum de sincrotró posseeix un seguit de propietats interessants:

● **Una alta intensitat:** la llum de sincrotró és extremadament intensa (centenars de milers de cops més intensa que els convencionals tubs de raigs X) i està molt col·limada (recordem que la radiació és emesa dins un estret con i els raigs emesos són molt paral·lels).

● **Un espectre energètic molt ample:** la llum de sincrotró és emesa en un ampli rang d'energies, cosa que permet obtenir un feix de radiació de qualsevol energia –en clar contrast amb el que passa amb els tubs de raigs X, que només permeten d'escollir dins un determinat rang d'energies.

● **La llum de sincrotró és altament polaritzada.** Les ones electromagnètiques consisteixen en un camp elèctric i un camp magnètic que són oscil·lants en l'espai i en el temps. Doncs bé, en una radiació polaritzada l'orientació d'aquests camps elèctric i magnètic no és a l'atzar sinó que està ben determinada. Aquesta propietat és essencial en determinats experiments.

● **La llum de sincrotró és emesa en polsos molt curts,** típicament d'una durada per sota del nanosegon (és a dir, 10⁻⁹ segons, una mil·lionèsima de segon).

ment gran –l'astrofísica– fins a l'infinitesimal reialme dels quarks. La ciència de la nanofísica s'ocupa del món a escala atòmica. En aquesta branca de la física, els científics estudien les propietats electròniques i magnètiques dels materials a escala nanomètrica –és a dir, de l'ordre del nanòmetre–, que és un dels camps de recerca amb més perspectives d'impacte econòmic a causa de les potencials aplicacions tecnològiques en el camp de la microelectrònica. En aquests dispositius tan diminuts, les propietats físiques dels materials amb què estan fabricats poden diferir de les que presenten quan formen part d'objectes macroscòpics.

Com a exemple, esmentem l'estudi dels *quantum dots* (punts quàntics) que són petites agregacions d'àtoms, de material semiconductor –component habitual dels dispositius microelectrònics–, que es poden aplicar com a diminuts làsers que emeten llum amb longituds d'ona que no són disponibles en materials macroscòpics –per exemple, es pot obtenir d'aquesta manera un "làser blau"–. A llarg termini, aquesta recerca permetria desenvolupar pantalles ultraplans que estarien compostes de minúsculs làsers de diferents colors, i que permetrien assolir una gran resolució. La llum de sincrotró permet als científics determinar amb precisió l'estructura i composició dels *quantum dots*, que altrament seria impossible, i d'aquesta manera es poden ajustar a mesura les seves propietats físiques.

Ciència de materials.

Es refereix a l'estudi de les propietats d'una gran varietat de materials, entre els quals podem esmentar aliatges metàl·lics, semiconductors, cristalls líquids, polímers, col·loides, vidres, fibres òptiques, plàstics i materials biològics. L'estudi d'aquestes propietats permet obtenir informació essencial a escala atòmica amb vista a adaptar els materials a tasques específiques.

D'entre els materials d'interès científic podem esmentar els que es poden trobar a la natura, en particular, materials biològics, que poden representar una font d'inspiració per a materials aplicables en el futur. A tall d'exemple, els estudis que

es fan sobre les propietats de la seda de les aranyes forneixen els científics de dades valuoses sobre els orígens de les seves extraordinàries propietats mecàniques. L'aplicació d'aquests coneixements obriria la possibilitat de fabricar polímers tan forts com un filferro d'acer, però dos cops més elàstics que el niló, amb aplicacions tant en medicina com en la construcció o la indústria del tèxtil.

Biologia.

La seqüenciació i la identificació dels gens ha estat un dels focus principals de recerca en biologia molecular. La determinació de l'estructura i de la funció de les proteïnes, que són fabricades seguint la informació codificada genèticament, és un dels reptes actuals. En general, la funció de les macromolècules biològiques (proteïnes, virus, enzims...) està directament relacionada amb la seva estructura espacial i, per tant, la seva determinació és d'interès científic i tecnològic. Dit d'una altra manera, si coneixem quina és la disposició atòmica espacial de les molècules biològiques, podem conèixer millor quina és la seva funció en els sistemes biològics. La tècnica de cristal·lografia de raigs X permet d'obtenir aquesta informació, que és essencial per al desenvolupament de productes farmacèutics.

Química.

La llum de sincrotró permet d'estudiar reaccions químiques a temps real, és a dir, ens permet de copsar l'acció de les molècules durant els processos químics, anàlogament a la manera com la fotografia ens permet de captar els diversos instants d'una cursa esportiva. Imaginem per un instant que la tecnologia de les càmeres fotogràfiques requerís que els temps d'exposició fossin de l'ordre d'uns quants segons: les imatges que obtindríem d'una cursa esportiva sortirien del tot borroses, perquè el temps d'exposició seria clarament més llarg que el temps característic d'allò que volem fotografiar. De la mateixa manera, si volem observar l'evolució de les reaccions químiques, cal obtenir polsos de llum d'una durada extremadament curta, de l'ordre del nanosegon –o, fins i tot, del picosegon! (1 picosegon = 10⁻¹² se-

La construcció de l'edifici que ha d'allotjar el sincrotró s'hauria d'acabar el 2005. Cap al 2006 s'hi instal·larien els equips tècnics i el 2007 es faria el muntatge definitiu de peces que permetria endegar la maquinària el 2008. La ubicació més probable per a aquesta instal·lació és el Centre Direccional de Cerdanyola, al costat de l'A-7 i molt aprop de la Universitat Autònoma de Barcelona

INSTAL·LACIONS DE SINCROTRÓ A EUROPA

INSTAL·LACIÓ	LOCALITZACIÓ	ENERGIA	ANELL*	CORRENT INJECTAT	EMITÀNCIA**
		(GeV)	(m)	(mA)	(nm-rad)
ESRF	Grenoble (França)	6,00	844,0	200	4,0
DORIS III	Hamburg (Alemanya)	4,45	289,2	120	404,0
SRS	Daresbury (Regne Unit)	2,00	96,0	250	130,0
ELETTRA	Trieste (Itàlia)	2,00	259,2	300	7,0
LURE	Orsay (França)	1,85	—	200	15,0
MÅX II	Lund (Suecia)	1,50	90,0	200	8,8
BESSY I	Berlín (Alemanya)	0,80	62,4	500	50,0
ASTRID	Aarhus (Dinamarca)	0,58	—	200	140
EN CONSTRUCCIÓ					
Anka	Karlsruhe (Alemanya)	2,50	103	400	40-80
SLS	Villingen (Suïssa)	2,10	288	400	3,0
BESSY II	Berlín (Alemanya)	1,70	240	100	5,5
DELTA	Dortmund (Alemanya)	1,30	115	200	5,2
PLANEJADES					
DIAMOND	Chilton (Regne Unit)	30,00	345,0	300	14,0
SOLEIL	Dep. d'Essonne (França)	2,50	36,0	500	3,0
LLS	Cerdanyola (Catalunya)	2,50	251,8	250	8,0

* Circumferència de l'anell d'emmagatzematge

** Com més petita és l'emitància, més estret és el feix d'electrons i, en conseqüència, més estret és el feix de radiació i la intensitat és més alta.

gons)—, perquè aquesta és l'escala de temps en la qual es donen aquests processos. La producció de llum de sincrotró ens possibilita aquest estudi, ja que, com s'ha comentat anteriorment, és emesa en forma de polsos de llum de durada molt curta. La tècnica consisteix a llançar un pols de llum làser de només uns pocs centenars de femtosegons (1 femtosegon = 10⁻¹⁵ segons), per excitar el procés que es vol observar, i després s'envien polsos de raigs X que duren uns 200 picosegons, que són els que actuen com a sonda i forneixen d'informació sobre la dinàmica del procés. El seguit d'imatges produïdes formen la "pel·lícula" de la reacció estudiada.

Medicina.

Es poden obtenir imatges sincrotró del cor, dels pulmons i del cervell amb l'ús de dosis de radiació més petites i menys invasives que les utilitzades habitualment als hospitals.

L'alta precisió de les imatges es pot emprar en diferents estudis quantitius.

Aquesta informació, per exemple, es pot usar per combatre els tumors cancerígens.

Aplicacions industrials.

Les instal·lacions de sincrotró disposen d'equips experimentals que poden simular les condicions físiques que es donen en un entorn industrial, per exemple, camps elèctrics i magnètics, reaccions químiques, restriccions mecàniques, o valors determinats de temperatura, pressió i humitat. En aquest sentit, sectors industrials com el farmacèutic, el cosmètic, el de la construcció, microelectrònica, metal·lúrgia, etc. poden beneficiar-se de la recerca practicada en instal·lacions de sincrotró.

La llum de sincrotró també es pot utilitzar en processos de litografia, que permeten definir dispositius microelectrònics i petits dispositius micromecànics, és a dir, petites eines que actuen a escala del micròmetre (10⁻⁶ metres).

Gervasi Herranz