

El sincrotró de Barcelona

Josep Campmany*

Laboratori del sincrotró de Barcelona

Introducció

En aquesta mateixa revista ja es va publicar la notícia de la futura construcció d'un sincrotró a Catalunya que havia de tenir per objectiu la producció i utilització de la llum sincrotró (d'ara endavant, LS), tal com tenia en compte el primer Pla de recerca a Catalunya 1993-1996 (Ferrer, 1993). Dos anys després de la primera notícia, repassarem en aquest article l'estat del desenvolupament del projecte i mostrarem les característiques bàsiques que es perfilen per a aquest laboratori.

Anomenem LS a la llum que emeten les partícules carregades que es mouen a velocitats relativistes quan segueixen trajectòries corbes. Aquesta llum, d'alta energia i intensitat, altament focalitzada i que a més està linealment polaritzada, s'utilitza usualment per a l'estudi de la matèria, en aplicacions industrials o d'investigació de caràcter físic, químic, biològic, farmacèutic o mèdic. L'instrument bàsic per produir LS és un accelerador circular de partícules (electrons, en el cas del sincrotró de Barcelona).

Aquest article està dividit en dues parts ben diferenciades. Per començar, introduïrem breument la física dels acceleradors circulars. En una segona part, farem referència als motius i al suport que el món científic dona a aquesta iniciativa. Finalment, tot i que el projecte està obert encara en aspectes de detall, acabarem amb una petita relació d'avançaments d'algunes de les característiques d'aquest accelerador, el primer del seu gènere a la Mediterrània occidental.

La física dels acceleradors circulars de partícules

Acceleració circular de càrregues elèctriques, la força de Lorentz i la necessitat d'imants dipolars

Com és ben sabut, el moviment de les càrregues elèctriques en camps purament elèctrics pot determinar-se a partir de l'equació:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E}, \quad (1)$$

on q és la càrrega de la partícula, \vec{p} és el seu moment, i \vec{E} és el camp elèctric. El moment, \vec{p} , ve donat per $m\gamma\vec{v}$

*Josep Campmany (Gavà, 1966) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona, actualment està contractat com a investigador a l'LSB (IFAE)

on m és la massa de la partícula, \vec{v} la seva velocitat i $\gamma = (\sqrt{1 - v^2/c^2})^{-1}$. c és la velocitat de la llum en el buit. L'equació (1) ens indica que els camps elèctrics canvien el moment de les càrregues en la seva mateixa direcció. Més encara: un camp que tingui la mateixa direcció que la trajectòria de les partícules les accelerarà longitudinalment.

D'altra banda, el moviment de les càrregues elèctriques en camps purament magnètics es pot descriure amb l'expressió:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (2)$$

on \vec{B} és la inducció magnètica. Com es veu, la càrrega rep una força perpendicular a la direcció de la seva velocitat i a la direcció de la inducció magnètica. En definitiva, un camp purament magnètic provoca una acceleració transversal que corba la trajectòria de les càrregues en moviment. També observem que si la càrrega està aturada, l'acceleració serà nul·la.

Si ens proposem incrementar l'energia d'una partícula carregada, podem pensar en primer lloc de fer-ho mitjançant un potent camp elèctric. De fet, aquesta és la forma usual d'obtenir partícules energètiques, sempre que l'energia d'aquestes no superi unes poques desenes de megaelectrons volt (20, aproximadament) per unitat elemental de càrrega (1 electró volt és l'energia cinètica que adquireix un electró sotmès a un potencial d'1 volt). Els instruments que ho fan són els acceleradors de Cockroft-Walton, Van de Graaff, o tàndem Van de Graaff. Per fer-nos una idea del que aquestes energies signifiquen, 1 MeV d'energia cinètica equival a accelerar un electró des de l'estat de repòs fins a una velocitat de 0,86 vegades la velocitat de la llum, c , i 20 MeV equival a 0,9997 c .

Ara bé, si el que pretenem és donar més i més energia a les partícules accelerades, i davant la impossibilitat de generar camps elèctrics més intensos que uns 20 MV/m, aleshores caldrà enginyar un sistema que permeti una acceleració per etapes, tot fent passar la partícula que volem accelerar diverses vegades pel mateix camp elèctric. Això s'aconsegueix amb els acceleradors circulars. Vegeu-ne l'esquema a la figura 1.

A les zones ombrejades, en les quals es crea un camp elèctric (no necessàriament molt intens) en la mateixa

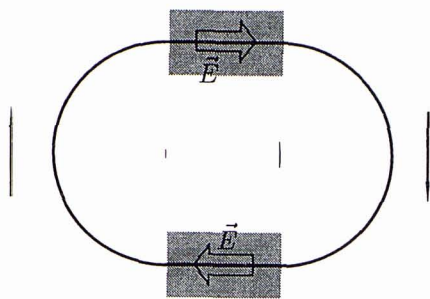


Figura 1: Esquema d'un accelerador circular

direcció que la trajectòria de les partícules, és on s'acceleren longitudinalment les partícules, que després de moltes voltes al circuit i de passar una i altra vegada per la zona del camp, poden assolir velocitats extremadament properes a la velocitat límit c .

Per aconseguir una trajectòria circular s'utilitzen preferentment camps magnètics, ja que per a velocitats elevades, la mateixa acceleració transversal que produiria un camp elèctric molt elevat es pot produir mitjançant un camp d'inducció magnètica relativament baix. Vet aquí perquè els imants són elements essencials dels acceleradors de partícules.

L'acceleració longitudinal de les partícules en màquines circulars exigeix un control del camp magnètic d'aquests imants, de manera que el valor del camp s'incrementi dinàmicament amb l'increment d'energia de les partícules. La raó prové de la relació que, en el moviment circular, existeix entre la velocitat longitudinal i l'acceleració centrípeta. Així tenim que, a partir de l'expressió (2), per a un camp magnètic perpendicular a la trajectòria, l'acceleració resultant serà sempre radial, segons l'expressió:

$$qvB = \frac{m\gamma v^2}{\rho} \quad (3)$$

Queda clar que si accelerem, incrementem la velocitat v de la partícula, i aleshores, per tal que el radi de curvatura ρ es mantingui constant, i la partícula segueixi una única trajectòria tancada, haurem d'augmentar igualment el camp B dels imants.

La llum sincrotró i les pèrdues energètiques de les partícules accelerades

Fins aquí, ens hem preocupat de com accelerar una càrrega, però sense tenir en compte que una càrrega accelerada radia, és a dir, perd energia. Aquesta radiació es dedueix a partir de les lleis de Maxwell, i condueix a expressions força complexes. En un article anterior d'aquesta mateixa *Revista de Física* (Aranda, 1992) es donaven les expressions per a aquestes pèrdues, que re-

cordarem:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q^2 \dot{v}^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}, \quad (4)$$

on dU/dt és la pèrdua d'energia per unitat de temps, q la càrrega de la partícula, \dot{v} és l'acceleració, i ϵ_0 , π i c són les constants habituals. Aquesta expressió es coneix amb el nom de llei de Larmor, i és vàlida per a partícules no relativistes. La distribució angular d'energia emesa per partícules accelerades transversalment obeeix la següent expressió:

$$\frac{dU}{d\theta d\varphi} = \frac{q^2 \dot{v}^2}{8\pi^2 \epsilon_0 c^3} \sin^3 \theta, \quad (5)$$

on θ i φ són els angles definits a la figura 2, referits a la direcció de l'acceleració, sia aquesta perpendicular o paral·lela a la direcció del moviment de la partícula. A la mateixa figura es representa aquesta potència irradiada en funció de l'angle per a ambdós casos.

Tanmateix, per a velocitats de les partícules properes a la de la llum, la llei de Larmor deixa de ser vàlida, i apareix un comportament diferent de l'emissió energètica segons la direcció de l'acceleració. Cal aclarir, abans de detallar aquest fenomen, que la velocitat de les partícules en els acceleradors circulars arriba a ser tan propera a la velocitat de la llum que només en difereix en parts per milió. Per al cas de l'accelerador que es dissenya per a Barcelona, la velocitat dels electrons serà de $0,99999998c$. Així doncs, sí que cal comptar amb les correccions relativistes.

Per a acceleracions longitudinals, com les produïdes, per exemple, per camps elèctrics paral·lels a les direccions de les partícules, la pèrdua d'energia de partícules relativistes per unitat de temps, o potència irradiada, obeeix l'expressió:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \dot{v}^2 \gamma^6. \quad (6)$$

Per a acceleracions transversals al moviment de les partícules, la potència emesa segueix l'expressió:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \dot{v}^2 \gamma^4. \quad (7)$$

Una ràpida ullada ens indica que l'energia irradiada és cada cop més alta com més elevada és la velocitat de les partícules, i que la potència emesa per partícules amb acceleracions i velocitats iguals és molt més gran per a acceleracions longitudinals que per a acceleracions transversals. Ara bé, per a partícules relativistes, les acceleracions longitudinals que a la pràctica es poden aplicar són sempre molt petites, comparades amb les elevades acceleracions transversals que es poden produir amb camps elèctrics o magnètics relativament baixos. Això és així perquè la relativitat imposa un límit al mòdul de \vec{v} , mentre que no hi ha límit per al radi de curvatura.

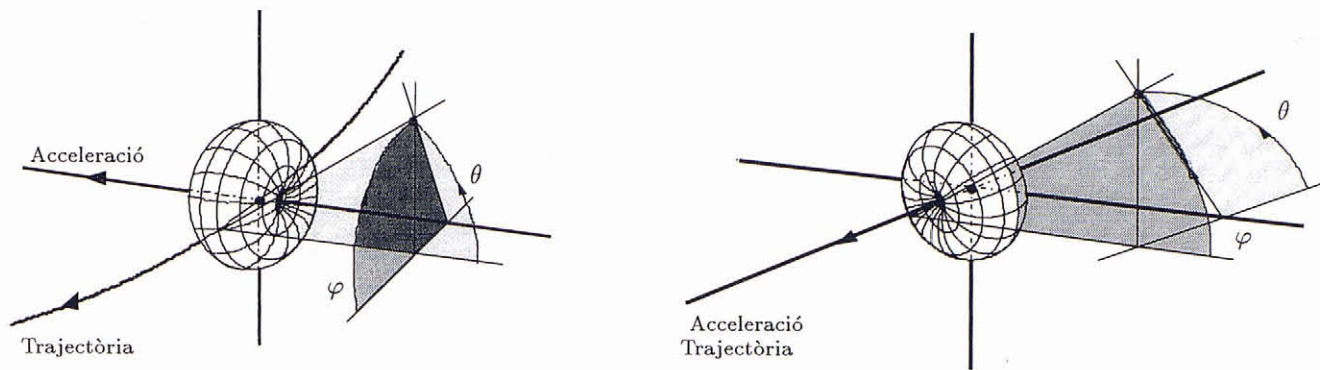


Figura 2: Distribució espacial de la potència emesa per una càrrega accelerada transversalment (esquerra) i longitudinalment (dreta) a velocitats no relativistes (lleï de Larmor)

Així, si expressem (6) i (7) en funció de la força aplicada, tenim, per a forces longitudinals:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{F^2}{m^2} \quad (8)$$

I per a forces transversals:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{q^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{F^2}{m^2} \gamma^2 \quad (9)$$

On hem utilitzat les expressions relativistes que relacionen força i acceleració:

$$\vec{F}_\perp = m\gamma \dot{\vec{v}}_\perp$$

per al cas transversal, i

$$F_\parallel = m\gamma^3 \dot{v}_\parallel$$

per al cas longitudinal.

En definitiva, l'energia radiada per una càrrega sotmesa a una força és molt més gran en cas que aquesta força s'apliqui transversalment que no pas longitudinalment. Per tant, a la pràctica, la major part de les pèrdues energètiques en partícules accelerades provindran de l'energia radiada per acceleracions transversals. A la figura 3 mostrem la distribució espacial de l'energia radiada en el cas d'una força transversal. Aquesta serà la distribució de la llum emesa per un sincrotró.

Se'ns planteja, doncs, una paradoxa: mentre que les energies altes semblen més senzilles d'assolir en màquines circulars, ja que aprofitem reiteradament un camp elèctric relativament petit, que accelera poc, fent-hi passar moltes vegades la partícula, en canvi patim pèrdues per radiació molt grans, a causa de l'elevada acceleració transversal que comporten, que cal anar compensant si volem mantenir la velocitat de les partícules. Un accelerador lineal, en canvi, resulta molt menys eficaç des del punt de vista d'aprofitament del camp elèctric,

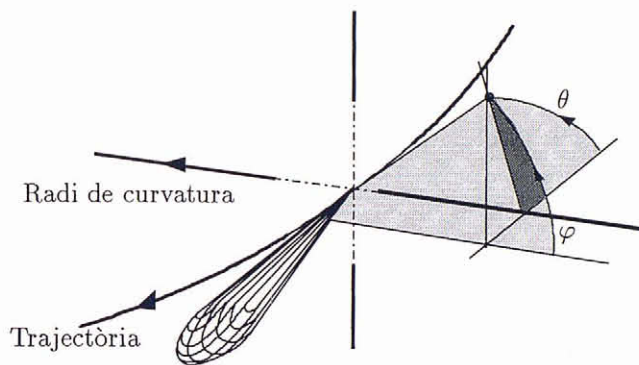


Figura 3: Distribució espacial de la potència emesa per una càrrega accelerada transversalment a velocitats relativistes

ja que les zones on hi ha camps elèctrics només s'utilitzen una sola vegada, però les pèrdues per emissió de radiació no són tan elevades. La solució a la paradoxa, si el que es vol és tenir velocitats properes a c o energies molt elevades, és la construcció de màquines circulars amb el radi de curvatura més gran possible. És la solució adoptada, per exemple, pel CERN, amb un anell (el LEP) de més de 4 km de radi.

Integrant les expressions anteriors per a una volta completa de la partícula a un accelerador circular de radi ρ , l'energia que es perd a cada volta per emissió de radiació, U_0 que:

$$U_0 = \frac{q^2}{3\epsilon_0 \rho} \frac{E^4}{(mc^2)^4}, \quad (10)$$

on E representa l'energia total de la partícula, q la seva càrrega i m la seva massa.

Aquestes pèrdues per radiació són les que s'anomenen llum de sincrotró, i, de fet, l'accelerador que s'està dissenyant per a Barcelona tindrà com a missió, no l'ac-

celeració de partícules com a finalitat en si mateixa, sinó l'optimització de l'aprofitament d'aquesta emissió de llum. Com que l'emissió de llum és molt més gran en màquines circulars que en màquines lineals, són les primeres les que s'utilitzen com a fonts de llum sincrotró.

Les cavitats de radiofreqüència en acceleradors de partícules

En un article anterior (Traveria, 1995), s'ha vist la necessitat dels imants. L'altre dels elements bàsics per als acceleradors circulars són les cavitats de radiofreqüència. Seguint l'esquema de la figura 1, les cavitats tindrien la funció de produir i aplicar el camp elèctric \vec{E} a la partícula en moviment.

Si ens fixem en el dibuix, veurem que, de fet, no cal que el camp elèctric \vec{E} hi estigui present de forma permanent: la partícula anirà donant voltes al circuit, i només passarà per les regions ombrejades durant un cert temps, amb una certa periodicitat. Esdevé raonable, aleshores, pensar que podem aplicar el camp elèctric de manera no contínua, sinó alterna, amb una freqüència igual o múltiple de la freqüència de rotació de la partícula a l'anell. Típicament, les freqüències de revolució són de l'ordre dels MHz, i els temps de revolució de l'ordre dels μs .

Si en comptes d'una partícula en volem accelerar moltes de cop, procedirem a repartir-les espacialment en una sèrie de paquets que, l'un darrere l'altre, van circulant pel camí marcat a la figura 1. De fet, el nombre màxim de paquets, n , que podran circular pel camí de la figura 1 dependrà de la freqüència d'aquest camp elèctric altern, $\nu_{\vec{E}}$, i de la freqüència de revolució entorn l'anell, ν_{rev} :

$$n = \frac{\nu_{\vec{E}}}{\nu_{rev}} \quad (11)$$

En el cas del sincrotró de Barcelona, es vol que circulin un màxim de 420 paquets, en un camí d'uns 250 m de perímetre, a una velocitat molt propera a c . La separació entre cada paquet serà d'uns 0,6 m, la freqüència que caldrà aplicar al camp elèctric serà de l'ordre dels 500 MHz, i el temps de revolució serà d'uns 0,8 μs .

Aconseguir un camp elèctric altern purament longitudinal pot semblar fàcil. De fet, en un condensador pla, el camp elèctric al centre de les armadures és gairebé purament longitudinal. Ara bé, en el nostre cas, cal foradar aquestes armadures per deixar passar les partícules, amb la qual cosa el camp elèctric queda destorbat. D'altra banda aquest sistema és inviable perquè significa carregar i descarregar un condensador a 500 MHz amb camps típics d'1 MV/m.

Com a alternativa tècnicament factible, s'utilitzen cavitats ressonants de radiofreqüència, en les quals és relativament fàcil mantenir emmagatzemat un camp elèctric oscil·lant amb una direcció i freqüència gairebé pures.

La secció transversal que acostumen a tenir aquestes cavitats és esquematitzada a la figura 5. Les partícules

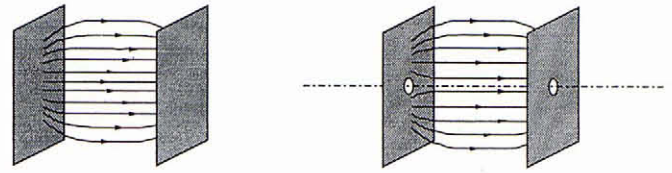


Figura 4: Aspecte del camp creat per un condensador pla sencer i foradat

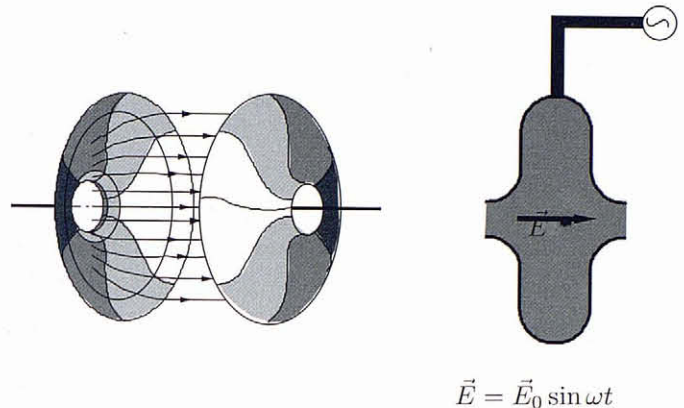


Figura 5: Aspecte d'una cavitat de radiofreqüència i la seva secció transversal

passen per on hi ha dibuixada la fletxa en el mateix moment en què el camp està a prop d'un màxim. El camp oscil·la amb un període que coincideix amb el temps d'espera entre dos paquets.

Amb cavitats com aquestes es pot resoldre el problema tècnic d'aplicar un camp longitudinal a un feix de partícules que circula per una trajectòria tancada.

D'altra banda, ja hem assenyalat que aquests camps seran oscil·lants, ja que d'aquesta manera empaquetarem les partícules en grups. L'emissió de llum sincrotró aleshores serà polsada, i no pas contínua com en el cas d'un feix no empaquetat. L'estructura polsada de la llum sincrotró és molt interessant per estudiar fenòmens temporals, com veurem més endavant.

Els sincrotrons

Hem vist que, segons l'expressió (3), un cop fixat el radi, el camp ha de mantenir-se proporcional al producte $m\gamma v$ de la partícula. Quan accelerem a velocitats relativistes, l'energia que guanyi la partícula no s'utilitzarà en augmentar la velocitat, sinó la massa. Trobem aleshores que, a partir de l'expressió relativista de la massa:

$$\vec{B}\vec{\rho} = \frac{1}{q} \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (12)$$

D'altra banda,

$$\nu_{\vec{E}} = n\nu_{rev} = n \frac{v}{2\pi\rho} \quad (13)$$

Quan les partícules en aquest sincrotró es vagin accelerant, la seva freqüència de revolució s'anirà incrementant (per a partícules ultrarelativistes, de fet, l'augment de la freqüència és pràcticament nul). Parallelament, en accelerar les partícules, alhora caldrà augmentar el camp dels imants per mantenir el radi de curvatura constant, i també incrementar la freqüència del camp elèctric aplicat. Aquests increments arribaran a ser nuls en el moment en què les partícules perdin per radiació sincrotró tanta energia com la que guanyin en passar per les cavitats a cada volta. L'energia màxima assolible a cada màquina dependrà, doncs, de l'energia perduda en llum sincrotró. Com que aquesta depèn del radi de curvatura (vegeu l'expressió 10), l'energia màxima assolible vindrà determinada pel radi del sincrotró.

Quan s'arribi a l'equilibri entre energia emesa en forma de llum i energia subministrada mitjançant les cavitats, el sincrotró deixarà de ser un anell accelerador, i passarà a ser un anell d'emmagatzematge, en el qual les partícules es mantindran girant, sempre a la mateixa energia, i amb el mateix radi de curvatura, mentre produeixen una determinada quantitat de llum sincrotró, sempre la mateixa a cada volta.

En el cas de les fonts de llum sincrotró modernes, se separen les dues funcions (acceleració i emmagatzematge) en dos anells diferents. És a dir, les partícules s'acceleraran en un anell fins a arribar al màxim d'energia, després s'extreuen de la màquina i s'injecten a un altre anell que les emmagatzema. En aquest anell d'emmagatzematge poden girar durant hores, o dies, depenent de la grandària transversal del tub per on circulen, les condicions de buit, la perfecció dels imants, i les mateixes tendències del feix a disgregar-se a causa de les interaccions electromagnètiques internes o amb l'entorn.

Per al sincrotró de Barcelona, com esquematitzem a la figura 6, es preveuen també dos anells: un d'acceleració, petit, d'uns 125 m de circumferència, i un d'emmagatzematge, més gran, de 250 m de circumferència. Aquest darrer està optimitzat per aprofitar al màxim la llum emesa per les partícules accelerades.

La xarxa d'imants en un anell de partícules

La trajectòria d'una partícula que es fes passar per una estructura formada a base de dipòls magnètics i de cavitats de radiofreqüència seria l'assenyalada a la figura 1 si la posició i el moment inicials fossin els adients amb una precisió extremada. Per "posició adient" entenem qualsevol punt de la trajectòria de disseny, mentre que per "moment adient" volem dir que només tingui component en la direcció de la trajectòria de disseny, i el mòdul corresponent a l'energia nominal de la màquina.

En les situacions reals, però, ni les partícules es poden introduir a l'òrbita amb l'exactitud desitjable, ni els imants dipolars tenen una construcció prou precisa com per assegurar que la partícula introduïda no es desviï. D'altra banda, usualment desitgem accelerar feixos for-

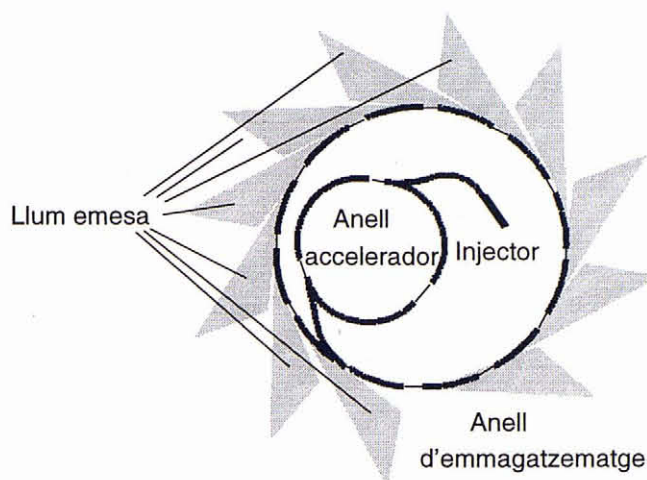


Figura 6: Pla esquemàtic del sincrotró de Barcelona. L'anell accelerador és a l'interior de l'anell d'emmagatzematge

mats per moltes partícules. Resulta llavors impossible col·locar-les totes en la posició i el moment de disseny. A més, les interaccions entre elles tendiran a disgregar el feix, tant transversalment com longitudinalment.

Per tot això, cal afegir als dipòls i a les cavitats algun instrument focalitzador. Aquests instruments són imants quadrupolars i sexpolars (Traveria, 1995). Els quadrupols focalitzen lateralment el feix. De fet, actuen sobre el feix de partícules de la mateixa manera que les lents actuen sobre feixos de llum. Per aquest motiu, l'estudi de la disposició òptima dels quadrupols al llarg de la màquina i la seva funció (focalitzant o antifocalitzant) rep el nom d'òptica magnètica. Els sextupols, d'altra banda, focalitzen el feix longitudinalment. Dit d'una altra manera: s'encarreguen que petites variacions d'energia de les partícules no disgreuin el feix. Tenen un paper semblant al dels dispositius de correcció cromàtica en l'òptica. Per aquest motiu, es diu que el sextupol corregeix la cromaticitat del feix.

La disposició dels dipòls i quadrupols en un esquema determinat que es repeteix periòdicament al llarg de la trajectòria de disseny fins a completar el cercle, s'anomena *xarxa òptica de la màquina*. Cada xarxa està formada per tantes cel·les com vegades es repeteixi l'estructura fonamental.

Aquesta estructura fonamental pot consistir en diverses combinacions de dipòls i quadrupols focalitzants i desfocalitzants. Les més utilitzades es poden veure a la figura 7, i són la FODO (focalitzant - desfocalitzant alternada), que agrupa dos dipòls i dos quadrupols, la DBA (acromàtica amb dos dipòls, *Double Bend Achromat*), que agrupa dos dipòls i vuit quadrupols, i la TBA (acromàtica amb tres dipòls), cada cel·la de la qual agrupa tres dipòls i vuit quadrupols.

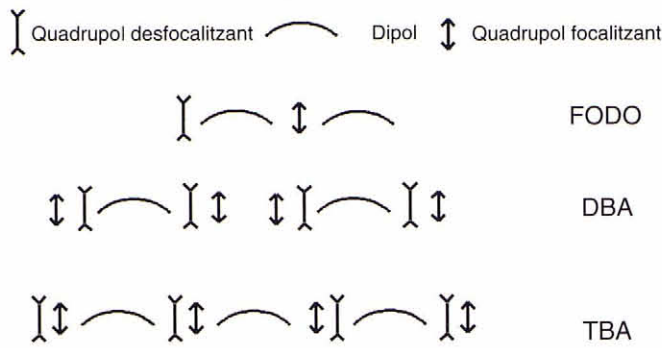


Figura 7: Cel·les corresponents a diverses xarxes òptiques de la màquina

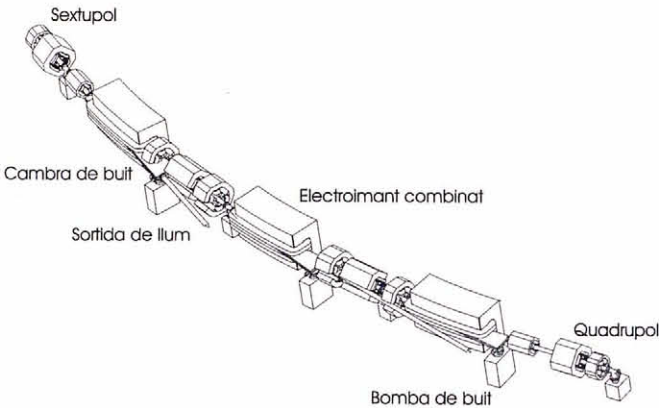


Figura 8: Disseny d'una cel·la de la xarxa d'imants del sincrotró de Barcelona

En el cas de la màquina dissenyada per a Barcelona, la xarxa és una TBA, amb 12 cel·les. Cada cel·la cobreix un angle de 30° . Cada dipol ha de girar, doncs, el feix 10° . La màquina de Barcelona conté 36 dipols i 72 quadrupols (més 36 més amagats als dipols). A la figura 8 es mostra el disseny d'aquesta cel·la.

Les característiques de la llum de sincrotró

Poc podem afegir en aquest capítol al que ja va deixar dit Jaume Aranda en un article d'aquesta mateixa *Revista de Física* (Aranda, 1992). Simplement, cal recordar que aquesta llum té una molt elevada col·limació, està polaritzada plana, és molt intensa, està formada per polsos temporals molt petits, i té un espectre continu.

A la figura 9 es presenta l'espectre típic de la LS que s'obté d'un imant dipolar. En aquest es marca la posició de l'energia crítica dels fotons emesos. Aquesta energia crítica, E_c , ve donada, en unitats de GeV i per al cas en què les partícules circulants siguin electrons, per

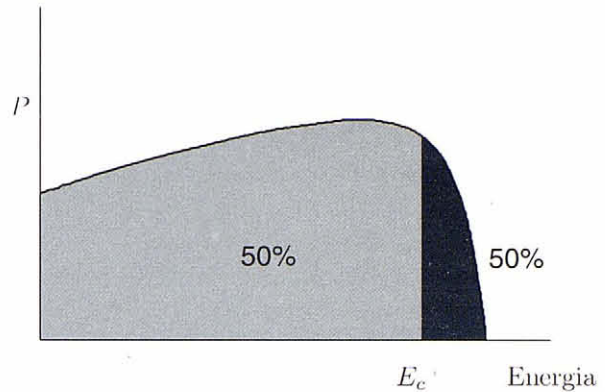


Figura 9: Espectre de la potència emesa per la llum sincrotró. Els dos eixos estan representats a escala logarítmica. E_c indica la posició de l'energia crítica

$E_c = 0,665BE^2$, sent B el camp magnètic dels imants dipolars (en Tesla) i E l'energia dels electrons (en GeV).

E_c és la mitjana de la potència lluminosa emesa; la llum té un espectre ampli i suau per a energies inferiors a E_c , i decau abruptament per a energies superiors. El rang òptim per utilitzar la llum arriba fins a $2,5 E_c$.

E_c determina, per tant, la màxima energia aprofitable en la pràctica, clau per saber si és possible implementar determinades tècniques d'aprofitament de la llum o no i ve a ser l'empremta dactilar del sincrotró. Per al LSB, es preveu una $E_c = 4,2$ keV.

La necessitat d'una font de llum sincrotró a Barcelona

La investigació de l'estat espanyol ha crescut de forma important en els darrers 15 anys. Tot i això, pel que fa a infraestructures, ens manquen encara instal·lacions a gran escala. En particular, ni Catalunya ni l'estat espanyol té cap instal·lació dedicada a l'obtenció de llum sincrotró.

La necessitat d'accés a la LS és actualment molt rellevant en el nostre entorn territorial. L'Estat espanyol és el membre de la Unió Europea amb major nombre d'usuaris de LS en instal·lacions estrangeres. Així, mentre que els científics postdoctorals que la utilitzaven el 1980 eren dos, el 1995 assolien ja uns 300, i actualment es calcula que la demanda potencial a curt termini abraça més de 80 grups i prop de 600 científics. A partir d'aquesta realitat, diversos grups de diferents universitats espanyoles es van plantejar el 1992 la necessitat de preveure la construcció d'una font de LS a l'Estat.

La idea de construir-la a Barcelona (a partir d'ara, Laboratori del Sincrotró de Barcelona, LSB) va adquirir rang oficial el 1993, i va ser inclosa al Pla de recerca de Catalunya de la Generalitat de Catalunya (*Revista de Física*, 1993). El març del 1995 es va firmar un conveni entre la Comissió Interdepartamental de Recerca i Inno-

vació Tecnològica (CIRIT) del Govern català i la Comissió Interministerial de Ciència y Tecnología (CICYT) del Govern espanyol per al finançament conjunt del disseny detallat i la seva explotació en cas de construcció. Actualment, un equip de 13 científics i tècnics està realitzant el disseny del LSB.

Per assegurar que les especificacions del LSB sintonitzen amb els objectius que inicialment es van plantejar, durant el 1995 es va fer una àmplia enquesta que avaluava les necessitats dels futurs usuaris. Junt amb aquesta aproximació, el desembre de 1995 va tenir lloc la I Reunió d'Usuaris de LS al campus de la Universitat Autònoma de Barcelona, a Bellaterra (Vallès Occidental), en el transcurs de la qual es va animar als assistents a detallar les característiques de la llum requerida per als seus experiments.

Localització	E	C
Catalunya	20 %	35 %
Madrid	23 %	19 %
País Valencià	8 %	14 %
Andalusia	18 %	9 %
Aragó	4 %	6 %
Castella i Lleó	5 %	4 %
Astúries	2 %	2 %
Cantàbria	2 %	2 %
Galícia	3 %	2 %
Múrcia	3 %	1 %
Euzkadi	4 %	1 %
Altres	7 %	-
Investigadors estatals a l'estranger (Europa i EUA)	1 %	5 %

Taula 1: Distribució de les enquestes i localització de les respostes. E és la proporció relativa d'enquestes enviades i C és la proporció relativa d'enquestes contestades

Per conèixer el perfil dels grups interessats en la construcció del LSB, es varen enviar 506 enquestes a departaments universitaris, instituts d'investigació i algunes empreses susceptibles d'estar interessats en LS, i es van rebre 87 respostes, que corresponen a 82 grups i més de 600 investigadors. Mostrem la seva localització geogràfica a la taula 1.

A continuació, presentem les principals conclusions sobre la LS que necessita la comunitat científica estatal.

Coneixem l'excel·lència investigadora dels grups que van contestar a partir dels projectes desenvolupats últimament. Els 82 grups (75 % universitaris, 22 % del CSIC, i la resta industrials o estrangers) han desenvolupat una mitjana d'1,7 projectes per grup i any. Les seves fonts de finançament són majoritàriament públiques (el 88 % dels projectes), estatals (51 %), autonòmiques (16 %) o europees (21 %), mentre que la resta prové

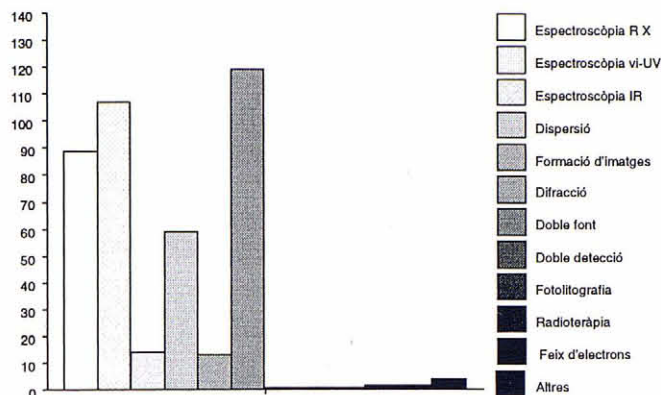


Figura 10: Grups de tècniques requerides pels futurs usuaris. L'eix vertical representa el nombre de sol·licituds per a cada grup de tècniques

d'empreses o fundacions. Les àrees d'investigació són: Ciència de Materials (35 % dels grups), Ciències Moleculares –química, bioquímica, farmàcia, medicina– (23 %), Ciències de les Superfícies i Interfícies (18 %), Biologia Estructural (10 %), Química Analítica (5 %), Estudi i Millora de Processos Industrials (4 %), Física Atòmica i Nuclear (3 %) i Instrumentació (1 %).

A l'enquesta es demanaven els requisits tècnics desitjats per al LSB. En funció d'aquests, per satisfer la major part possible d'usuaris, el grup de disseny està ajustant les característiques del sincrotró.

En primer lloc, demanàvem les tècniques d'anàlisi que els futurs usuaris desitjarien veure instal·lades al LSB. Les més demanades són la difracció i les espectroscòpies de raigs X (amb un 28 % i 25 % respectivament). Darrere, les espectroscòpies en el rang visible –raigs X tous– (21 %), les tècniques de dispersió (14 %), l'espectroscòpia infraroja (4 %), formació d'imatges (3 %), radioteràpia (0,5 %) i ús directe del feix d'electrons (0,5 %). Pràcticament totes les tècniques que utilitzen LS van ser sol·licitades per la comunitat científica, com resumeix la figura 10.

Per raons pressupostàries, el condicionant principal per a una font de LS és l'energia crítica (E_c) de la llum emesa. Com es pot apreciar a la figura 11, el principal grup d'usuaris potencials (21 %) sol·licita energies entre 4 i 10 keV, i el 70 % d'aquests està en el rang entre 0,1 i 30 keV. Una banda petita de sol·licituds (16 %) està centrada en el rang visible UV (1-10 eV). Finalment, només el 3,5 % de les respostes sol·licitaven energies superiors a 30 keV.

Quant a d'altres requeriments, pocs grups (15 %) planegen aprofitar l'estructura polsada de la LS. Pel que fa a les condicions experimentals, el 86 % de les respostes indica que les mostres serien majors que $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, mentre que la resta espera utilitzar mostres menors. La

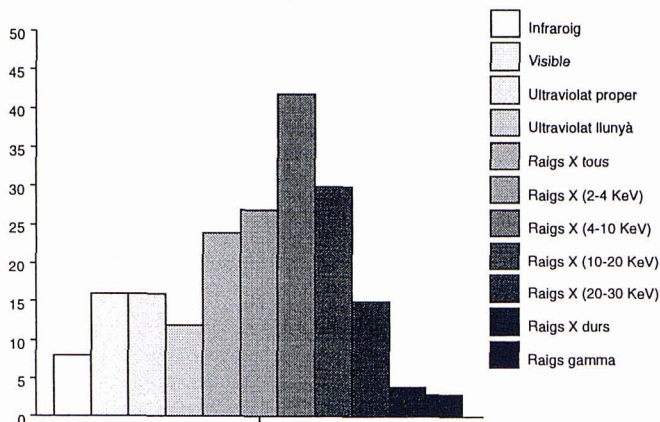


Figura 11: Distribució de les respostes en funció dels rangs energètics sol·licitats

majoria (28 %) requereix baixes temperatures, mentre que el 20 % necessita instrumentació per a alta temperatura. Alguns grups també requereixen medis d'alt o ultraalt buit per a les mostres (13 %).

A partir d'aquesta radiografia de les necessitats i demandes de la comunitat científica, podem efectuar una primera aproximació a la màquina, les principals característiques de la qual ja resten perfilades: ha de proporcionar llum amb E_c entre 4 i 10 keV, i les tècniques de caracterització que primerament haurem d'implementar són les de difracció de raigs X i les espectroscòpies de raigs X. També podem concloure que l'energia dels electrons al sincrotró haurà de ser de l'ordre dels 2,5 GeV, tal com es té en compte al disseny actual.

A la I Reunió d'Usuaris es van mostrar les principals línies de llum presentades: espectroscòpia en l'ultraviolat-ultraviolat llunyà, espectroscòpia de raigs X tous, espectroscòpia de superfícies EXAFS-NEXAFS, espectroscòpia de materials EXAFS-NEXAFS, difracció de mostres no cristallines, difracció de grans cristalls (macromolècules, polímers), i difracció de pols, magnètica i de superfície.

Les característiques del sincrotró de Barcelona

Les característiques principals del sincrotró que s'està

Bibliografia

- FERRER, S., El laboratori del sincrotró de Catalunya, *Revista de Física*, **1**, 16-17 (1993(2)).
 ARANDA, J., La radiació de sincrotró, *Revista de Física*, **1**, 4-10 (1992(1)).
 TRAVERIA, M., Bobines superconductores per a acceleradors de partícules, *Revista de Física*, **1**, 30-39 (1995(1)).
 BRYANT, P. J. i JOHNSON, K., *The principles of circular accelerators and Storage Rings*, Cambridge University Press, (Cambridge, 1993).

dissenyant per a Barcelona són les següents:

Perímetre de l'anell d'emmagatzematge: 250 m
 Energia d'emmagatzematge: 2,5 GeV
 Intensitat mitjana del feix d'electrons: 250 mA
 Tipus de xarxa magnètica: TBA
 Nombre de cel·les: 12
 Energia crítica de la llum emesa: 4,3 keV
 Màxim espectral d'energia aprofitable: 9,5 keV

Els imants que guien els electrons (dipòls per aconseguir la trajectòria circular, i quadrupols i sextupols per collimar i estabilitzar el feix) són convencionals (és a dir, no superconductors), a l'abast de la tecnologia actualment disponible en empreses de l'entorn.

Entre les seccions amb imants, hi ha 12 seccions recetes d'uns 7 m. En 11 d'aquests s'intercalaran uns dispositius (dispositius d'inserció) que produeixen LS amb característiques específiques per a determinats experiments.

Respecte a la llum que emet el feix d'electrons, produeix un flux mitjà, sobre les mostres, d'entre 10^9 i 10^{13} fotons per segon, cosa que representa 10^5 vegades més del que es pot obtenir amb qualsevol altre tipus de font convencional, allà on n'hi hagi.

Conclusió

Hem intentat donar una visió introductòria dels acceleradors de partícules dedicats a la producció de llum sincrotró, i hem justificat la necessitat d'una instal·lació com aquestes a Barcelona, a partir de la demanda de la comunitat científica estatal.

De tota manera, el disseny de la font de llum sincrotró de Barcelona no està acabat. Agrairíem qualsevol suggeriment pel que fa a necessitats científiques futures de grups d'investigació concrets. Per a qualsevol informació, o si desitgen ampliar la informació que exposem aquí, no dubtin a contactar amb nosaltres.

Agraïments

L'autor agraeix als seus col·legues del laboratori les informacions que han permès elaborar aquest article i molt especialment a Joan Rabadà el dibuix de la figura 8.