

Bobines superconductores per a acceleradors de partícules

Miquel Traveria*

Laboratori de Llum Sincrotró. Universitat Autònoma de Barcelona

Introducció: què és un sincrotró?

Un sincrotró és una màquina que accelera les partícules amb càrrega, un torus buit, a la manera d'un *donut* (a l'interior del qual viatgen les partícules en grups separats), que està envoltat d'imants i cavitats acceleradores. Aquestes últimes són cavitats de radiofreqüència que proporcionen un camp elèctric altern en la direcció del feix. El sentit del camp elèctric al llarg de la cavitat va canviant sinusoidalment. Quan passa un paquet de partícules (*bunch*, en l'argot dels especialistes) el camp elèctric és tal que accelera les partícules. Quan el camp elèctric canvia de sentit, no hi passa cap paquet. Els imants estan disposats de tal manera que el camp magnètic que creen manté la trajectòria de les partícules dins del torus o canal de buit (figura 1). Amb aquesta filosofia s'utilitzen molts imants petits en lloc d'un de gros com s'havia fet inicialment (en aparells anomenats *ciclotrons*).

Les partícules s'introdueixen en l'anell accelerador provinents d'un accelerador lineal o d'un accelerador circular més petit.

Els imants que corben la trajectòria del feix de partícules són dipols, és a dir, creen un camp uniforme que va d'un pol a l'altre perpendicular a la velocitat de les partícules (figura 2).

Però en un sincrotró es vol, alhora que accelerar i mantenir una trajectòria circular, focalitzar el feix perquè no es dispersi, i per això s'utilitzen quadrupols (figura 3).

Sextupols i octupols són utilitzats com a elements correctors en els sincrotrons moderns. De fet, el conjunt d'elements magnètics es pot mirar com un sistema òptic convencional, on el feix de llum seria el feix de partícules. Els dipols serien prismes que desvien la direcció del feix, els quadrupols serien lents que focalitzen el feix. Com en tot sistema òptic, hi ha aberracions (cromàtiques, de focalització ..., i això mateix passa amb els feixos de partícules) que es poden eliminar amb elements correctors. Aquesta és la funció dels sextupols, octupols i decapols en els sincrotrons.

A mesura que les partícules s'acceleren cal augmen-

tar la intensitat dels camps magnètics i sintonitzar la freqüència de ressonància de les cavitats acceleradores amb la velocitat de les partícules. Tot això requereix un gran coneixement en física i tecnologia d'imants i cavitats acceleradores, amb tota la seva corresponent electrònica. Però la construcció d'un accelerador comporta, a més, una gran i complexa combinació d'altres diferents tècniques com ara enginyeria civil (ja que solen ser màquines que poden tenir des de 10 m fins a 5 km de radi), les tècniques de buit, la criogènia en el cas que s'utilitzin materials superconductors, i una electrònica i informàtica sofisticades per als sistemes de control.

Al CERN (*Centre Europeu de Recerca Nuclear*, situat a Ginebra) hi ha l'accelerador sincrotró més gran del món, el LEP (*Large Electron Positron collider*), de 27 km de circumferència. Actualment, en el mateix túnel del LEP es vol instal·lar l'LHC (*Large Hadron Collider*), un collisionador de tipus sincrotró, també amb imants acceleradors, i que portarà els protons a energies de 7 TeV (7×10^{12} eV). Als EUA el projecte SSC (*Superconducting Super Collider*), un collisionador sincrotró de protons, de 80 km de circumferència, va ser cancel·lat pel Congrés després de 12 anys de treballar en el projecte.

Actualment els sincrotrons s'utilitzen per a una gran varietat d'aplicacions, i per a cada una d'elles cal dissenyar una xarxa d'imants diferent, que dependrà dels objectius de la màquina. En aquest article parlarem dels imants superconductors per a sincrotrons, que són bàsicament utilitzats en els grans collisionadors de protons, on dos feixos accelerats en sentits diferents es fan entrar en col·lisió en punts controlats on hi ha sofisticats detectors per captar els esdeveniments. Alguns exemples són el TEVATRON de Chicago (on fa pocs mesos es va observar el quark Top, que era l'últim per trobar de la família de quarks descrita pel model estàndard), l'HERA d'Hamburg (collisionador de protons i electrons), l'RHIC (*Relativistic Heavy Ions Collider*) i l'LHC, en estat molt avançat de disseny al CERN de Ginebra.

Per què bobines superconductores?

La finalitat bàsica dels imants superconductors és la de crear camps magnètics intensos per poder controlar amb més facilitat la trajectòria de les partícules i es-

*Miquel Traveria (Barcelona, 1968) és llicenciat en Ciències Físiques per la UB. Incorporat al projecte del sincrotró de Catalunya, actualment està fent la tesi doctoral al CERN sobre imants superconductors per al LHC.

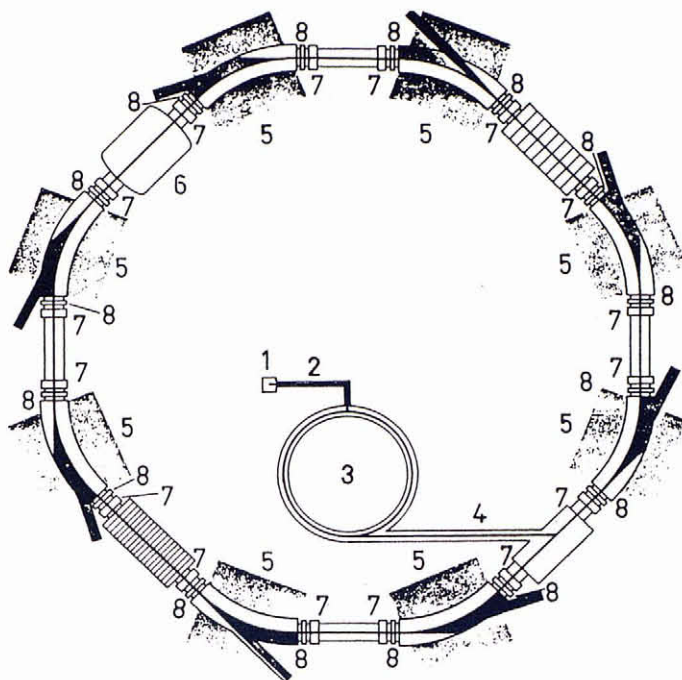


Figura 1: Esquema bàsic d'un sincrotró. (1) Font de partícules. (2) Accelerador linial injector. (3) Preaccelerador (booster). (4) Línia de transferència al sincrotró acumulador. (5) Imants dipolars de curvatura. (6) Cavitat acceleradora de radiofreqüència. (7, 8) Imants de correcció com a quadrupols i sextupols. Un sincrotró d'aquest tipus s'està dissenyant actualment per a Barcelona, dins del Pla de Recerca de Catalunya

pecialment els protons, que són partícules relativament massives (com més massa té un objecte més difícil és canviar-ne la trajectòria).

L'expressió de la força de Lorentz sobre una partícula és

$$\vec{F} = e \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right).$$

Quan les partícules viatgen a la velocitat de la llum (cas habitual en tots els sincrotrons actuals), la força per corbar-ne la trajectòria només pot venir d'un intens camp magnètic, ja que la força que pot produir un camp elèctric és de bastants ordres de magnitud inferior.

Des de principi dels anys vuitanta s'ha començat a utilitzar bobines superconductores en els acceleradors de partícules, i especialment en els acceleradors d'hadrons. El CERN va ser un dels primers laboratoris a introduir en l'anell SPS (*Super Proton Synchrotron*) alguns imants superconductors, la qual cosa va ajudar l'equip de Carlo Rubbia al descobriment dels bosons intermedis portadors de la força nuclear feble W i Z , que els reportà l'obtenció del premi Nobel de física de 1984.

Actualment tots els acceleradors d'hadrons en funcionament o en construcció contenen imants superconductors. El TEVATRON va ser el primer collisionador amb la majoria dels seus imants superconductors. Els seus dipols produeixen un camp de 4 T a una tempe-

ratura de 4,2 K. L'LHC tindrà tots els imants superconductors, que ocuparan fins a 24 km dels 27 km de circumferència del túnel! El camp d'aquests dipols serà de 8,65 T a temperatura d'heli superfluid.

Molts altres acceleradors, com ara fonts de radiació de sincrotró, formats bàsicament per imants convencionals, usen també imants superconductors per a certes aplicacions específiques (inclòs el projecte del sincrotró de Catalunya).

Bobines convencionals versus bobines superconductores

Amb les bobines convencionals, la forma del camp magnètic dins de l'obertura entre els pols de l'imant ve definida per la forma del pol de ferro (figura 3). Però el pol de ferro queda saturat per a camps superiors a 1,8 T (figura 4). Llavors les línies de camp ja no són perpendiculars al pol, i es perd la qualitat de camp requerida.

Per tant, si volem augmentar el camp magnètic i mantenir-ne la qualitat, hem de prescindir del pol de ferro i definir la distribució de camp a partir de la geometria de la distribució de corrent (un exemple de les geometries de corrent que creen diferents camps magnètics es mostrarà més endavant a la figura 6). El camp

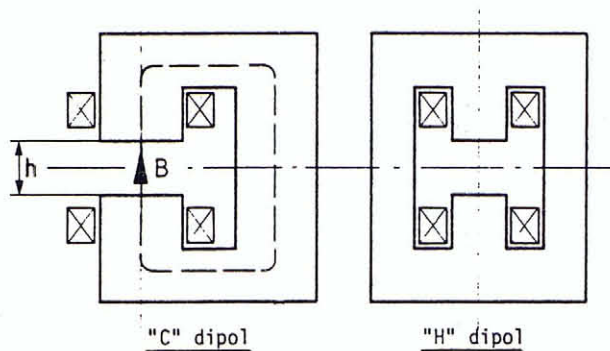


Figura 2: Secció transversal d'un dipol convencional on la forma del camp ve determinada per la forma plana dels pols de ferro. El seu camp magnètic accelera circularment les partícules que hi passen entremig

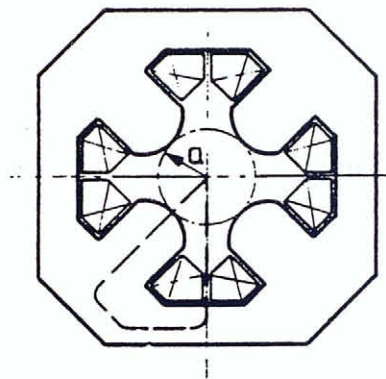


Figura 3: Secció transversal d'un quadrupol. Hi ha quatre pols alternant polaritat. El seu camp magnètic manté les partícules agrupades en el pla vertical o horitzontal, segons el sentit del corrent a les bobines

magnètic en l'obertura de l'imant vindrà donat per la llei de Biot i Savart. Com se sap, aquesta llei dona el valor del camp magnètic a l'espai produït per una distribució de corrent \vec{J} en un volum v :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\vec{J} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} d^3v,$$

on \vec{R} és el vector posició del punt de l'espai on es vol calcular el camp respecte a l'element de volum per on circula el corrent. Per tant, per imposar un camp dipolar, o quadrupolar, sextupolar, etc., hem de conèixer quines distribucions de corrent caldrà dissenyar. Això es veurà a la secció següent.

El fet d'utilitzar material superconductor per fer bobines presenta una sèrie d'avantatges i inconvenients. Els avantatges són:

- Es poden obtenir camps magnètics molt més intensos.

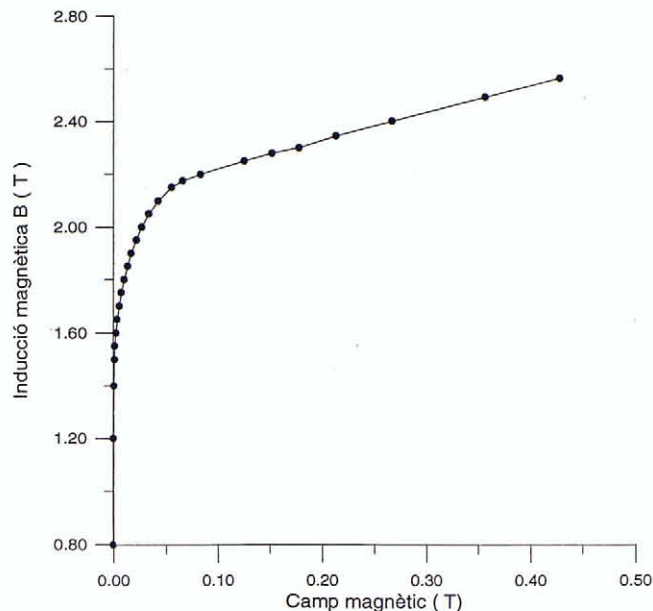


Figura 4: Característica camp-inducció magnètica ($B-H$) del ferro. La corba satura aproximadament a $B = 2$ T

- La grandària dels imants és molt més reduïda.
- El consum d'energia és molt més baix, ja que no hi ha pèrdues per l'efecte Joule.

Els inconvenients són:

- La possibilitat d'extinció de l'estat superconductor, fenomen conegut com a *bloctatge* (*quench*, en l'argot tècnic).
- La necessitat d'un fort ancoratge dels conductors per evitar moviments i deformacions causats per les intenses forces magnètiques que apareixen.
- El cost del material superconductor i de la instal·lació criogènica.

Distribucions de corrent per obtenir distribucions de camp magnètic

Com hem dit anteriorment, un sincrotró necessita imants dipolars, quadrupolars, sextupolars, etc. per al perfecte control de la trajectòria i les propietats del feix. Quina distribució de corrent al voltant de l'obertura circular de la cambra de buit cal tenir per produir un camp purament dipolar, o purament quadrupolar, o més generalment purament $2n$ -polar? Per estudiar aquest problema calculem primer el camp magnètic en un punt (r, θ) en l'obertura que produeix una línia de corrent I paral·lela a l'eix z (paral·lela al feix) situada en el punt (a, θ) amb $a > r$ (figura 5).

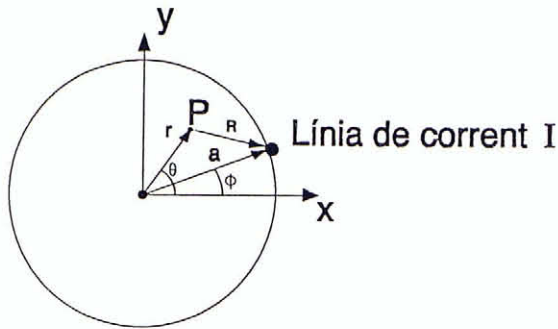
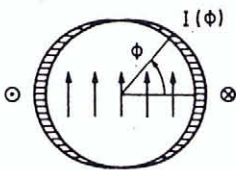
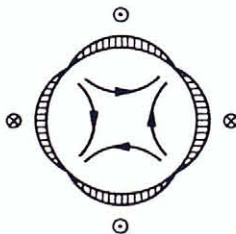


Figura 5: Línia de corrent desplaçada de l'origen que produeix un camp magnètic en el punt P

Dipol $I(\phi) = I_0 \cos \phi$



Quadrupol $I(\phi) = I_0 \cos 2\phi$



Sextupol $I(\phi) = I_0 \cos 3\phi$

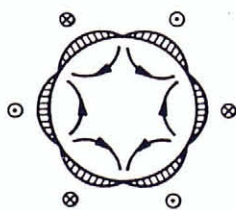


Figura 6: Secció transversal de diferents distribucions de corrent per crear camps dipolars, quadrupolars o sextupolars

Comencem per calcular el potencial vector magnètic, que per la situació descrita a la figura 5 només tindrà component z (per raons de simetria):

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\left(\frac{r}{a}\right),$$

per $r < a$ es pot expandir el logaritme en sèrie:

$$A_z(r, \theta) = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{r}{a}\right)^n \cos[n(\phi - \theta)].$$

I les components del camp en coordenades cilíndriques s'obtenen a partir de la definició del potencial magnètic:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A},$$

per tant:

$$B_\theta = -\frac{\partial A_z}{\partial r} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \cos[n(\phi - \theta)]$$

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \theta} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \sin[n(\phi - \theta)].$$

$$B_z = 0$$

Veiem que una línia de corrent desplaçada de l'origen produeix dins de l'obertura (és a dir, a la regió interior del cercle) un camp que és la suma d'un infinit nombre de termes. Si el que volem és que el nostre camp dins de l'obertura de l'imant tingui un sol harmònic (o component), que és el que nosaltres desitgem, hem de buscar una distribució de corrent "adiant" al voltant de l'obertura circular. Suposem que la distribució azimuthal de línies de corrent és de la forma

$$I(\phi) = I_0 \cos(m\phi),$$

on $I(\phi)d(\phi)$ és el corrent que tindrem entre ϕ i $\phi + d\phi$. Llavors es pot veure fàcilment per integració de 0 a 2π que aquesta distribució de corrent produeix un camp purament $2m$ -polar. Efectivament, si substituïm:

$$B_\theta = -\frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \int_0^{2\pi} I_0 \cos m\phi \cos[n(\phi - \theta)] d\phi$$

$$B_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \int_0^{2\pi} I_0 \cos m\phi \sin[n(\phi - \theta)] d\phi$$

$$B_z = 0.$$

De tota la suma només sobreviurà el terme on $n = m$:

$$B_\theta = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \cos[m\phi]$$

$$B_r = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi a} \left(\frac{r}{a}\right)^{m-1} \sin[m\phi].$$

$$B_z = 0$$

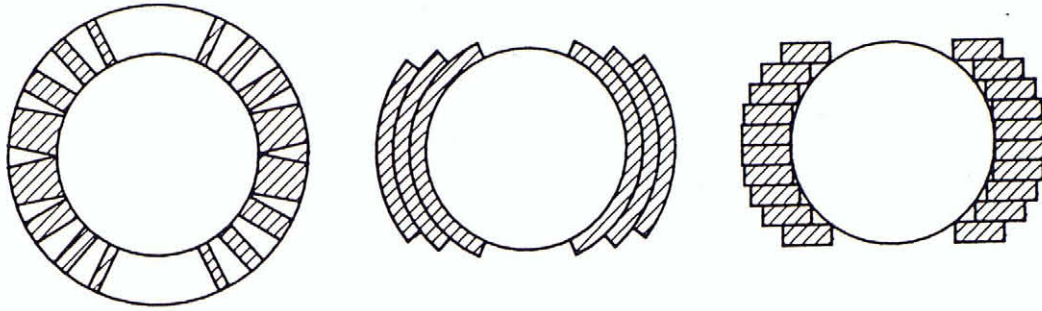


Figura 7: Creació de camps dipolars a partir de conductors. Veiem que la secció transversal intenta simular la distribució del dipol ideal de la figura 6

Quan $m = 1$ tindrem un camp purament dipolar; quan $m = 2$, un camp quadrupolar; quan $m = 3$ un de sextupolar, etc. (figura 6).

A la pràctica, però, no es poden crear distribucions de corrent com les que acabem de descriure i, per tant, es fan aproximacions. La millor manera d'aconseguir aquestes distribucions de corrent en la secció transversal de l'imant és amb bobinatges de cable superconductor, de la manera en què es pot veure a la figura 7.

El camp dins de l'obertura mai serà purament $2m$ -polar a causa dels errors pràctics, i sempre presentarà altres harmònics paràsits sobre l'harmònic principal m . Per jutjar la qualitat del camp obtingut, aquest se sol expressar de la següent manera:

$$B_{\theta}(r, \theta) = B_{\text{ref}}(r_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} [b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta)]$$

$$B_r(r, \theta) = B_{\text{ref}}(r_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} [-a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)],$$

on $B_{\text{ref}}(r_0)$ és el camp corresponent a l'harmònic principal a un radi de referència r_0 . Els termes b_n són els coeficients "normals" (component vertical) i els a_n , els coeficients "torçats" (*skew*, en anglès, fent referència a les components horitzontals). Direm que tenim un bon camp dipolar quan $b_1 = 1$ i tots els altres menors de 10^{-4} (que és el màxim error en la qualitat de camp que se sol requerir en els sincrotrons). Per a un quadrupol només voldrem la presència del terme $b_2 = 1$, per a un sextupol, la presència del b_3 , i així en tots els altres imants. Els coeficients a_n, b_n només depenen de la geometria de la secció transversal de l'imant. Per tant, gran part de l'"art" del disseny i la construcció d'imants per a acceleradors de partícules resideix a realitzar les geometries que redueixin al màxim els coeficients paràsits. És clar que hi ha altres objectius en el disseny que de vegades

poden entrar en conflicte amb aquest últim i que veurem tot seguit a les seccions que vénen.

Extrem de bobina

Fins ara només ens hem fixat en la secció transversal del que són els imants superconductors per a acceleradors de partícules, suposant que eren infinitament llargs i que, per tant, el camp es podia expressar només en dues dimensions. Però les bobines no són infinitament llargues i els cables han de donar la volta en algun lloc: els extrems de bobina (figura 8).

Aquí el camp deixa de ser bidimensional i pren certa component en la direcció z , i a més es perd certa qualitat de camp. Els extrems de bobina són una part delicada en el disseny d'imants superconductors si volem mantenir una bona qualitat de camp integrat tot al llarg de l'imant. Veurem també més endavant que és en els extrems on és més difícil ancorar els conductors a l'estructura mecànica i són més susceptibles de moure's sota les grans forces magnètiques a què estan sotmesos.

Cable superconductor

El cable utilitzat en les bobines és una de les peces clau per al bon funcionament de l'imant, i actualment hi ha una gran recerca en aquest camp. Per a cada imant i per a cada aplicació, es requerirà un tipus diferent de cable. La gran majoria de cables per a bobines superconductores es basen en filaments d'aliatge NbTi (50 % en pes de Ti) embotits en una matriu cilíndrica de coure. Aquestes matrius cilíndriques tenen uns diàmetres variables, i es disposen en forma laminar de manera que les més gruixudes estiguin a la part de dalt i les més primes a la part de baix. Les làmines així formades s'envolten d'una cinta de *kapton* i una altra de fibra de vidre que les manté rígides (figura 9). El nombre de filaments embotits en cada matriu cilíndrica de coure pot arribar a 20.000, per a seccions transversals de les matrius d'aproximadament 1 mm^2 . El diàmetre dels filaments, per tant, pot arribar a ser de $5 \mu\text{m}$ (la grandària d'una cèl·lula de la pell). Les característiques que s'exigeixen als cables són les següents:

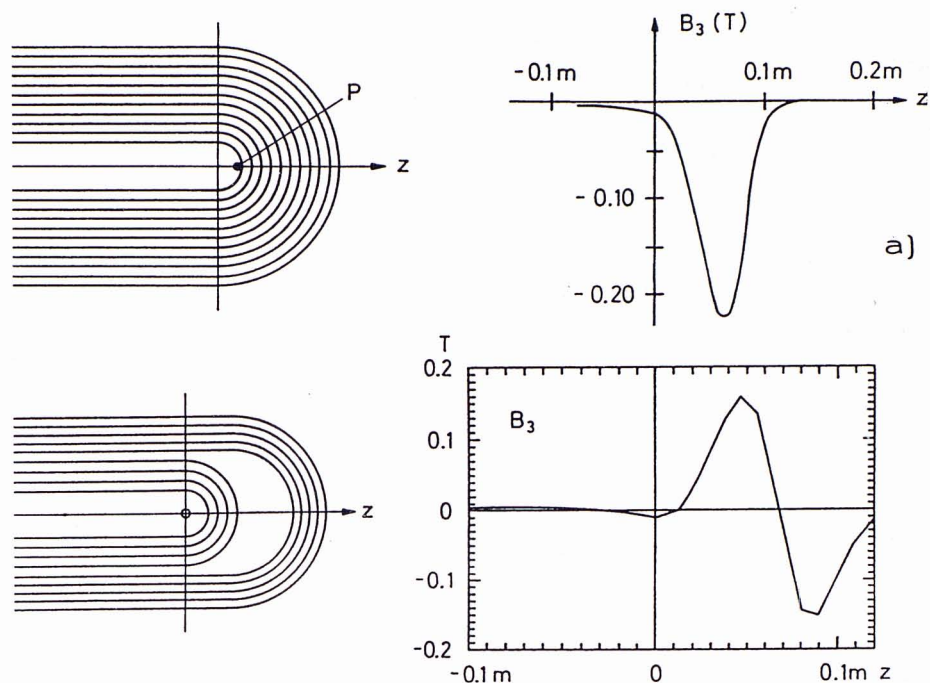


Figura 8: Extrem de bobina i distorsió del camp calculada en els dipòls de l'HERA. Si no hi ha espai entre els cables en la corba (a) la integral del camp en l'extrem és no nul·la. Si es disposen separadors en els extrems es pot aconseguir que la integral del camp en els extrems sigui nul·la

- Alta temperatura crítica, T_c .
- Alt camp crític, B_{c2} .
- Alta densitat de corrent crític, J_c .
- Bona estabilitat, que eviti transicions imprevistes a l'estat normal.
- Poques pèrdues provocades per corrents alterns o corrents romanents.
- Bones característiques mecàniques, com ara ductilitat i resistència.
- Mètodes de producció que minimitzin la desviació de les propietats entre cables elaborats en moments diferents.
- Donar estabilitat al conjunt de microfilaments.
- Fer de pas alternatiu (*bypass*) per al corrent en cas d'extinció de l'estat superconductor dels filaments.
- Actuar com a conductor tèrmic entre el refrigerant (He líquid, normalment) i els filaments superconductors.

Pel que fa al material, el NbTi té l'avantatge que és molt malleable enfront d'altres materials amb millors propietats superconductores però més fràgils, com el Nb₃Sn. La tecnologia de cables amb material superconductor a alta temperatura no està prou desenvolupada per a les necessitats dels grans imants, sobretot a l'hora d'aconseguir grans densitats de corrent a causa del caràcter ceràmic del material. La matriu de coure on estan embotits els filaments de NbTi té bàsicament tres funcions:

Actualment s'ha arribat a valors del corrent crític de $J_c = 2.700 \text{ A/mm}^2$ (recordem que per a un cable de coure a temperatura ambient poden passar només unes poques centenes d'ampers per mm^2 , i encara amb grans pèrdues per a efecte Joule; comparat amb el material superconductor, on les pèrdues són nul·les; els avantatges són clars) amb $B = 5 \text{ T}$ i $T = 4,2 \text{ K}$ per a cables amb 10.000 filaments de $5 \mu\text{m}$ de diàmetre i produïts en quantitats i amb mètodes industrials.

Suposem que, bobinant cable superconductor, hem aconseguit construir un imant dipolar (les cintes descrites ara fa un moment), amb una perfecta geometria i uns perfectes extrems de bobina que no introdueixen grans errors i que ens produirà un camp netament dipolar, tal com hauríem fet amb un cable de coure normal. Ara refredem l'imant a $1,8 \text{ K}$. Podem fer passar tant corrent elèctric a través del cable superconductor sense cap pèrdua fins al moment en què aquest arribi a la transició. Cal recordar que, en augmentar la intensitat del corrent

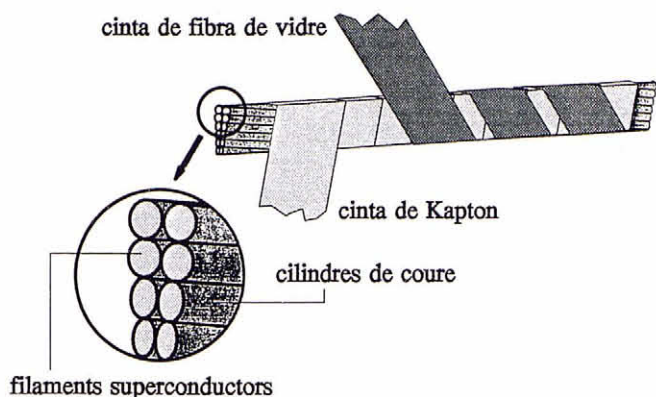


Figura 9: Figura esquemàtica del cable utilitzat per a la construcció d'imants superconductors per a acceleradors de partícules

que circula per un superconductor, arriba un moment en què apareix una transició de fase, i aquest deixa de ser-ho. Aquesta transició condueix al blocatge (*quench*) dels superconductors. Els filaments de NbTi suporten un corrent i estan sotmesos al propi camp magnètic de l'imant, i en algun moment en un punt de l'imant el superconductor arribarà a la transició (figura 10).

En principi, aquest seria el límit de funcionament teòric de l'imant. Però l'experiència mostra que no és tan fàcil arribar a aquest límit teòric, i aquestes són algunes de les coses que poden passar-li al nostre imant naïf:

Qualsevol fregament entre cables pot dissipar calor suficient per fer transitar el material superconductor a l'estat normal (no oblidem que a baixes temperatures la capacitat calorífica dels metalls es fa molt petita, i poca calor pot fer augmentar molt la temperatura).

Canvis de corrent en el temps poden produir inestabilitats en el material superconductor que el facin transitar a l'estat normal.

Aquests van ser alguns dels primers problemes que es van trobar els pioners dels imants superconductors. Actualment, el bobinage es fa amb un cable de grans qualitats mecàniques sobre una rígida estructura mecànica de material metàl·lic no magnètic (Al, Cu o acer inoxidable). Les bobines s'impregnen de resina epoxi per donar-los compacitat, i s'envolten amb anells d'Al amb una certa pretensió que augmentarà encara més quan es refredi tot el conjunt per la diferència de coeficients de contracció tèrmics. Al voltant de tot aquest conjunt es col·loca un cilindre de ferro laminat de tal manera que les línies d'inducció magnètica quedin atrapades i no puguin escapar-se a l'exterior del conjunt que forma l'imant (figura 11), que també serveix per reflectir el camp i fer que n'augmenti el valor dins de la cavitat entre un 5 % i un 20 %.

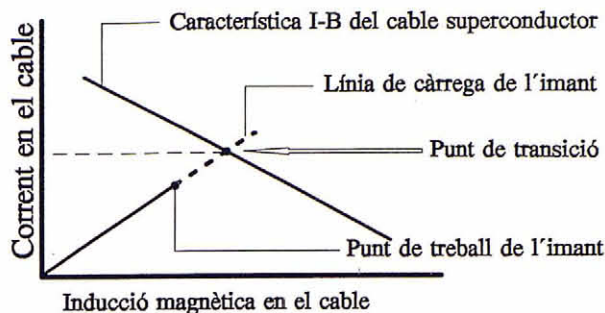


Figura 10: Corba de càrrega de l'imant. El punt de treball de l'imant hauria de ser allí on es talla amb la corba crítica del material superconductor, però l'imant sol tenir blocatges molt abans d'arribar-hi. Els bons imants actuals s'apropen molt al límit imposat per la transició del superconductor

El ferro és laminat per evitar corrents de Foucault en cas de corrents alterns que podrien alterar el camp dins de l'obertura. Al llarg de l'estructura es dissenya tota una canalització per fer fluir el refrigerant (He líquid).

Actualment els prototipus de dipòls per a l'LHC (d'uns 14 m de llarg) ja han arribat a camps de 10 T, i el problema més important que presenten són les increïbles forces magnètiques que s'arriben a produir, que poden ser de 8 MN per metre d'imant (800 tones per metre d'imant!). L'energia emmagatzemada en forma de camp magnètic és de 4 MJ, proporcionada per un corrent d'uns 12.000 A. Les forces magnètiques tendeixen a obrir l'imant, i és per això que cal envoltar-lo bé, però les forces també tenen tendència a estirar-lo longitudinalment i allargar-lo alguns mil·límetres com ja s'ha observat en els assajos previs. Crec que amb aquest exemple el lector es pot adonar del problema que, des del punt de vista de la tecnologia mecànica representa la construcció d'aquests imants.

Blocatges, entrenaments i prevenció

Un bon imant és aquell que pot apropar-se molt (un 90 %) al corrent límit determinat per les característiques superconductores del seu cable sense blocar-se. En la majoria dels casos, quan s'energitzava l'imant, aquest presenta algun blocatge abans del límit teòric. Ara bé, l'experiència demostra que el funcionament de l'imant millora amb el nombre de blocatges que ha passat. Aquest fenomen, que encara no es comprèn del tot, s'anomena *entrenament*, i sembla com si l'imant "aprenqués" a no ensopagar dues vegades amb la mateixa pedra. S'interpreta en el sentit que els conductors s'assenten cada cop més bé en el seu lloc després de cada blocatge.

Cal desitjar que els imants que han de formar part

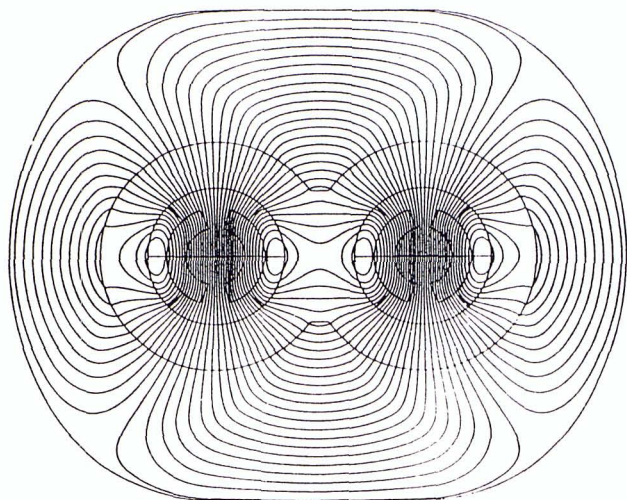


Figura 11: Línies d'inducció magnètica en la secció transversal d'un dipol (twin-aperture) de l'LHC. Les línies queden confinades dintre del ferro, del qual dibuixem la superfície interior

d'un sincrotró no presentin un llarg entrenament i tinguin un risc de blocatge baix, per garantir el funcionament normal de la màquina. Com a exemple direm que l'LHC disposarà de 1.296 dipols i 510 quadrupols regulars, a més de molts altres imants correctors, i que per tant s'ha d'imposar que la probabilitat que un imant tingui un blocatge sigui molt baixa, perquè tots els imants funcionin correctament al mateix temps.

Vegem una mica de més a prop el fenomen del blocatge.

Suposem que en un punt determinat, un filament superconductor, per qualsevol raó, transita a l'estat no superconductor. El corrent hi continua passant (12.000 A! en un dipol LHC), i per tant la zona s'escalfa a causa de l'efecte Joule. Aquesta calor es dissipa i indueix la transició als filaments superconductors dels voltants, s'oposa encara més resistència i es dissipa més calor. En qüestió de dècimes de segon, tot el bobinatge de l'imant haurà transitat a l'estat normal. Però l'energia emmagatzemada en forma de camp magnètic era tan gran que probablementment haurà malmès (fonent-lo) el punt on s'ha produït el blocatge. És per aquesta raó que s'han dissenyat sistemes de protecció contra blocatges.

La idea està basada en la instal·lació de detectors de blocatges a cada imant. Bàsicament, aquests detectors són voltímetres que interconnecten trossos de circuit superconductor idèntic dins mateix de l'imant. Per simetria, el voltatge entre ambdós trossos és nul. Quan en un d'ells es comença a produir el blocatge, desapareix la simetria i apareix una diferència de potencial (uns pocs milivolts en pocs mil·lisegons), que el voltímetre detecta i transmet a un sistema electrònic ultrarràpid, que desac-

tiva l'alimentació global de la bobina i engega gairebé instantàniament tota una sèrie de *productors de blocatges* instal·lats per tot l'imant. Aquests generadors artificials de blocatges aconseguen que l'energia no sigui dissipada totalment en un sol punt del cable, sinó al més repartida possible al llarg de tot l'imant. L'energia és extreta fora de l'imant tan ràpid com es pugui per preservar-lo al màxim. La bobina superconductora es descarrega a través d'unes resistències exteriors.

Els blocatges es generen artificialment fent passar corrent per unes bandes resistives exteriors a l'imant, que escalfen homogèniament tots els cables superconductors. L'escalfament és molt ràpid i uniforme, ja que el corrent prové de la descàrrega d'un condensador prèviament carregat.

Com ja hem dit, no es coneixen totes les causes dels blocatges, ni tampoc gaire el fenomen de l'aprenentatge. Els blocatges poden ser causats per moviments dels cables de les bobines (sobretot als extrems, on l'ancoratge no és tan rígid). D'altra banda, el blocatge és més probable observar-lo sota corrents alterns, especialment si hi ha algun curt circuit entre bobines, però no hi ha una llei o teoria que pugui explicar totes les situacions. Per tant, el millor contra el blocatge és una bona prevenció amb bon ancoratge mecànic i bon sistema de refrigeració, un sistema ràpid de detecció i, per últim, bons mètodes de protecció de l'imant.

Magnetització romanent

En el moment de la injecció de partícules dins de l'anell accelerador els imants no treballen a la màxima intensitat, i aquesta seguirà un cicle de variacions predeterminat pel programa de la màquina. Per exemple, els imants de l'LHC treballaran al 20 % del seu camp durant la injecció de les partícules des del pre accelerador a l'anell collisionador. El moment de la injecció és delicat ja que es produeix quan el feix és més inestable i perilla de perdre's contra les parets de la cambra de buit. A més, la fase d'injecció pren un temps relativament llarg.

El NbTi és un material superconductor de tipus II. Aquests materials presenten una magnetització romanent quan són sotmesos a un camp magnètic superior al seu B_{c1} (camp crític inferior), com es veu a la figura 12.

Si s'energitzava l'imant fins al seu corrent nominal i després s'abaixa el corrent a zero, en els filaments de NbTi hi queda magnetització atrapada que crearà un camp magnètic en l'obertura de l'imant. Per tant el camp no serà zero quan haurem apagat l'imant. La magnitud del camp degut a la magnetització romanent és proporcional al moment magnètic de cada filament per la quantitat de filaments en tota la secció transversal de l'imant, o el que és el mateix, la quantitat de material superconductor per la seva magnetització. El que no podem canviar és la quantitat de material superconductor sense canviar les característiques de l'imant. Per tant, el que podem canviar és la magnetització dels

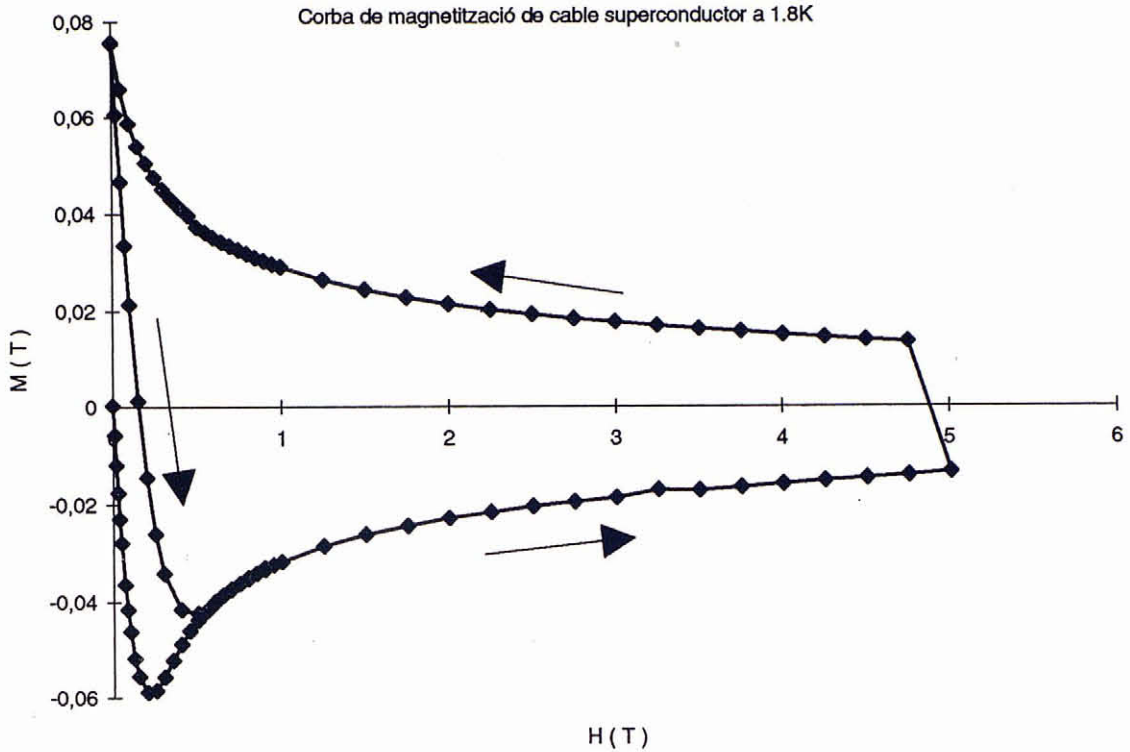


Figura 12: Corba de magnetització d'un cable de NbTi per a un prototipus de quadrupol de l'LHC. La magnetització presenta un cicle d'histeresi típic dels superconductors de tipus II

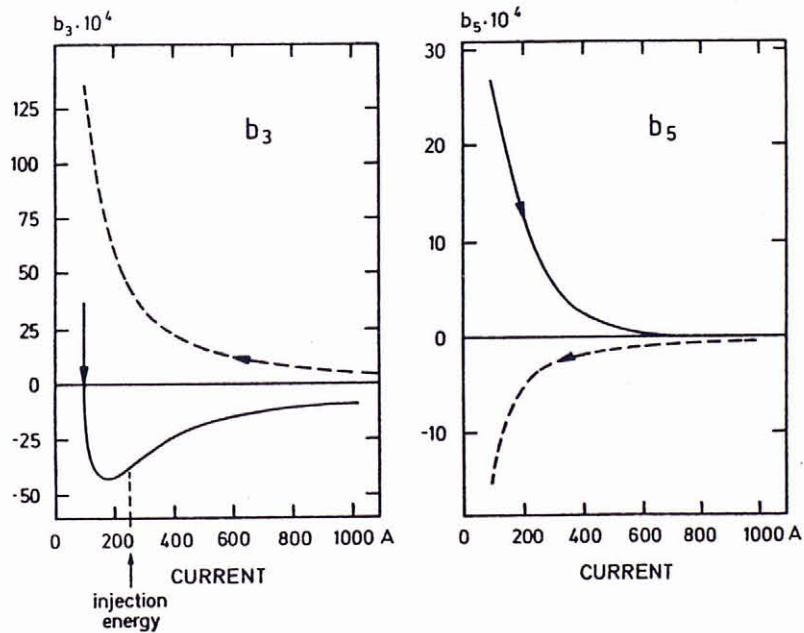


Figura 13: Comportament del sextupol i decapol paràsits en els dipòls superconductors de l'HERA degut a la magnetització romanent en els seus conductors. S'observa el comportament diferent segons augmenti o disminueixi el corrent, reflex del cicle d'histeresi de la magnetització en el cable superconductor (figura 12)

filaments. El model de Bean ens dona una expressió per a la magnetització d'un filament:

$$|\vec{M}| = \frac{2}{3\pi} \mu_0 \phi J_c.$$

Si volem tenir poca magnetització subdividirem el material superconductor en filaments fins de fins a $5 \mu\text{m}$ de diàmetre, ja que no seria raonable disminuir el corrent crític J_c , que volem que sigui al més alt possible. Actualment es té la capacitat tecnològica de fer cables amb filaments més prims encara i més junts, però això aportaria un problema d'acoblament Josephson (pas de parells d'electrons de Cooper a través d'una secció de material no superconductor: un efecte túnel per a parelles de superconductors) entre els filaments i seria contraproduent, ja que cada filament ja no seria independent i la magnetització es donaria entre grups de filaments amb moments magnètics grans.

El fenomen de la magnetització romanent té un efecte important sobre el funcionament de l'imant a camps baixos i ara per ara no hi ha altra solució millor que l'exposada aquí dalt.

Codis d'ordinador per al disseny i el càlcul

L'experiència en el disseny de bobines per a acceleradors, de molts anys acumulada, dona les primeres bases per al disseny. Però el càlcul precís del funcionament esperat de l'imant està fortament sustentat en complexos programes de simulació per ordinador. El mètode més utilitzat en el càlcul del camp magnètic en la regió d'interès són els programes d'elements finits, àmpliament coneguts actualment. Són programes potents capaços de calcular el camp magnètic i/o els esforços en una regió de l'espai determinada un cop especificades la geometria, les propietats dels materials i les fonts de corrent. El problema d'aquests programes és la seva poca agilitat (a favor de la seva potència), i la relativa imprecisió en el resultat a causa de la discretització de l'espai en elements finits.

Per als imants superconductors s'han començat a utilitzar programes de càlcul analític (a partir de la simple llei de Biot-Savart), molt més ràpids i precisos, però que no saben calcular l'efecte de materials magnètics. (Sabria el lector calcular mitjançant la llei de Biot-Savart el camp creat per un tros de ferro magnetitzat de geometria no simple? Ben segur que no!).

La varietat de codis d'ordinador és gran i cal saber quin cal utilitzar en cada necessitat, i quina informació extreure de cada un d'ells.

Referències

- BRIANTI, G. i TORTSCHANOFF, T., *Advances of accelerator physics and technologies. Superconducting magnets for accelerators*, Herwig Schopper Editor, 1993.
- SCHMÜSER, P., *Superconducting magnets for particle accelerators*, CAS 89-04. CERN, Ginebra 1989.
- FONTCUBERTA, J., Els superconductors d'alta temperatura, *Revista de Física*, 1, 5, (1992).
- ARANDA, J., La radiació sincrotró, *Revista de Física*, 2, 4, (1992).

Mesura dels imants

Un cop un primer prototipus de l'imant està construït cal posar a prova el seu bon funcionament. Es disposa l'imant dins del criòstat i se n'enregistra l'entrenament. Posteriorment es mesura la qualitat de camp que produeix. El camp magnètic dins de l'obertura se sol mesurar pel mètode de la bobina giratòria: es fa rotar una bobina de geometria coneguda en l'eix de l'imant. La variació de flux que es produeix en la bobina que gira genera un corrent que s'enregistra d'acord amb l'angle de gir. A partir d'aquí es pot conèixer la distribució de camp en l'obertura com la suma de Fourier de diferents harmònics. El mètode pot tenir precisions relatives de 10^{-4} .

La cosa canvia quan es tenen uns quants centenars d'imants per mesurar un per un. Aquí es requereix un extens programa en instal·lacions a gran escala i qualitat. Per al collisionador HERA (Hamburg) havien de mesurar en sèrie uns 700 imants superconductors i varen aconseguir un ritme de 70 hores per imant mesurat. Tot plegat els va prendre un temps d'un any ja que utilitzaven diversos criòstats al mateix temps.

Un cop tots els imants han passat pel banc de proves i són acceptats, cal instal·lar-los per formar el sincrotró, alineant-los amb precisions de dècimes de mil·límetre.

Final

Actualment es té bon control sobre les tècniques de fabricació de bobines superconductores i en particular de les utilitzades en els acceleradors de partícules. Dos grans laboratoris tenen acceleradors amb la majoria d'imants superconductors: HERA a Desy (Hamburg) i TEVATRON al Fermilab (Xicago). A més, hi ha l'LHC al CERN (Ginebra) en fase de desenvolupament. És important destacar la gran participació de la indústria en la construcció dels imants per a aquests laboratoris, la qual cosa permet d'adquirir uns coneixements que poden ser aplicats després en altres camps en vies de desenvolupament, com ara la producció, el transport i l'emmagatzematge d'energia, el transport per trens levitants i la propulsió de vaixells, entre molts altres.

Gràcies a la nova generació de superacceleradors el coneixement humà en sortirà beneficiat, ja que s'arribaran a comprendre una mica millor les lleis que regeixen el món subatòmic, la qual cosa serà un important llegat per a la riquesa cultural de la humanitat.