

YBaCuO:  
UN MATERIAL  
SUPERCONDUCTOR  
AMB FUTUR

SERGI CABANILLAS

15 DE GENER DE 2015

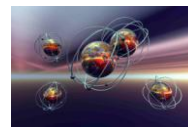
FÍSICA

JOAN RAMÍREZ

*Vull agrair a tota aquella persona que ha fet possible aquest treball, en especial a la Dra. Anna Palau, en Ferran Vallès i l'equip de l'ICMAB, per proporcionar-me tota ajuda que pogués necessitar, i també al meu tutor d'aquest treball de recerca, Joan Ramírez.*

## Índex

0. Introducció .....	2
1. Evolució Històrica del magnetisme.....	4
2. Evolució històrica de l'electromagnetisme .....	7
3. Classificació magnètica de la matèria .....	12
4. Evolució històrica de la superconductivitat .....	14
5. Superconductivitat .....	19
5.1 Fonaments de la Superconductivitat .....	19
5.2 Tipus de materials superconductors.....	20
5.3 Estructura dels superconductors: .....	23
5.4 El superconductor YBaCuO .....	25
6. Recerca experimental a l'ICMAB .....	26
6.1 Preparació prèvia.....	26
6.2 Estudi de l'YBaCuO.....	29
7. Present i futur de la superconductivitat .....	34
7.1 Actualitat .....	34
7.2 Aplicacions de futur .....	36
7.3 Superconductors del futur .....	37
8. Conclusions .....	39
Webgrafia i Bibliografia .....	40
Annex 1 .....	43
Annex 2 .....	48



## 0. Introducció

I arriba un moment a la vida de qualsevol alumne de Batxillerat on t'has de plantejar una qüestió important: "Quina serà la tria del meu treball de recerca? Serà una bona tria? Me'n sortiré? "

I són uns dubtes difícils on et pares a pensar i a fer voltes a qüestions i respostes al teu cap. Preguntes a amics, familiars... Però no te'n surts. La decisió ha de partir d'un tema del teu interès, i de sobte, se't planta davant. I no ho havies pas pensat per res del món, però aquest tema t'agrada i pots treure-li profit.

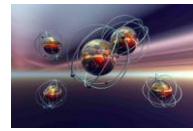
I així seria com jo descriuria la meva tria del tema per aquest treball de recerca. Sense esperar-m'ho, el magnetisme va aparèixer a ma vida. Semblava un fet descabellat, però què seria de la vida si no de prendre riscos i decisions? El fet és que vaig començar a interessar-me pel tema, i aprofundint en sorgeix un de nou, relacionat amb el magnetisme, i encara més estrany, enrevessat i atractiu: la superconductivitat.

I no és pas una bajanada. La superconductivitat, una cosa que sembla del futur i és que, clarament ho és i ho serà. "Com funciona? Per què i com es dóna la superconductivitat? En què es diferencia de la conductivitat normal? Quant fa que és present a la història i no ens en n'havíem adonat? Què ens depara la superconductivitat?"

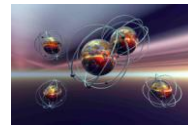
Totes aquestes són un seguit de preguntes que van sortir a la superfície i van començar a rascar la meva curiositat.

Per a sort meva, una excursió a l'Institut de Ciències Materials de Barcelona (ICMAB) ens portà a mi i al meu tutor d'aquest treball a un tast del magnetisme, i un conjunt de contactes que derivarien a conèixer la Dra. Anna Palau, qui va accedir a orientar i ajudar-me a descobrir tot aquest nou món per a mi. I així em presentà l'YBaCuO, un dels compostos més estudiats actualment. Jo també vaig poder observar-lo, estudiar-lo i treballar-lo en un seguit de pràctiques que vaig realitzar gràcies a Anna Palau i a l'ajuda d'en Ferran Vallès, qui em va proporcionar molta informació i guia.

Mica a mica, també sorgeixen nous dubtes i reptes que et porten a una recerca major, però alhora a un saber major.



Amb aquest treball de recerca vull aprendre dels superconductors encara que sigui un petit tast en aquest apassionant món, saber com es donen, quan es donen, en quines condicions, quins tipus n'hi ha, i què en depara el futur per a tota aquesta investigació i tecnologia futurista, què hi té a veure l'YBaCuO, la seva importància, i comparar-lo amb d'altres materials superconductors, conèixer els seus beneficis, aplicacions...



## 1. Evolució Històrica del magnetisme

L'evolució històrica en el coneixement del magnetisme es divideix en petits descobriments i fets, que són els que sumen tot el que en sabem avui dia del magnetisme.

Indicis sobre l'origen de l'electromagnetisme es basen en el fet que els antics grecs van començar a observar els fenòmens elèctrics i magnètics sobre l'any 700 aC. En aquells moments van descobrir que un tros d'ambre fregat s'electricava i era capaç d'atreure fils de palla .

La vertadera existència de la força magnètica es va conèixer en observar que fragments d'una roca natural anomenada magnetita ( $Fe_3O_4$ ) atreïa el ferro. El nom de la pedra ve del nom del districte de Grècia on es va descobrir, Magnèsia.

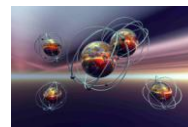
Molts han estat els investigadors que van anar observant fets i curiositats del magnetisme. Al llarg d'aquest apartat se'n farà una breu descripció:

Otto von Guericke, més conegut pels seus experiments amb el buit, va treballar al final de la seva carrera en electricitat estàtica i al 1663 va idear la primera màquina electrostàtica i amb ella va descobrir que dos cossos electricats del mateix tipus es repel·lien (fins llavors només es coneixia l'atracció electrostàtica). També li va permetre observar com sortien espurnes d'una bola de sofre mentre la carregava, efecte conegut com a electroluminescència.

Stephen Gray, l'any 1729, va descobrir la conductivitat elèctrica utilitzant tubs de vidre electricats per fregament i va estendre els seus experiments a altres materials arribant a diferenciar entre conductors i aïllants.

Charles François de Cisternay du Fay, al 1733, va experimentar amb diferents materials i va trobar que només hi havia dos tipus d'electricitat estàtica: per fregament de vidre o de l'ambre, i les va anomenar com a càrrega vítria i càrrega resinosa; i que els objectes carregats amb la d'un tipus es repel·lien mentre que amb els de l'altre tipus s'atreïen. És el que avui considerem com a càrregues positives i negatives.

Durant la segona meitat del segle XVIII els experiments elèctrics es van posar de moda com a entreteniment. Als salons de l'alta societat i davant el gran públic s'utilitzaven màquines electrostàtiques per a electricar les persones.



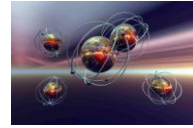
Benjamin Franklin al 1751 va publicar els seus experiments elèctrics, on aprofitava el principi de conservació de la càrrega, que fou descobert pel físic anglès William Watson. Ell va ser el primer a utilitzar el terme positiu i negatiu per a denominar els dos tipus d'electricitat (llavors anomenat fluid elèctric). Franklin va postular que només hi havia un únic tipus d'electricitat i que un cos contenia la mateixa quantitat d'electricitat positiva que d'electricitat negativa, de manera que l'una anul·lava l'altra i, per tant, l'electrificació no era altra cosa que la presència d'un dels dos tipus en major proporció. El 1752 Franklin va conjeturar que els llamps eren una descàrrega elèctrica i proposà d'utilitzar un estel durant una tempesta per carregar una ampolla de Leiden com a demostració.

El 1752 Thomas-François Dalibard va portar a terme l'experiment amb èxit. Uns mesos després ho faria el mateix Franklin.

Alessandro Volta es va dedicar a l'estudi de l'electricitat i, intentant mesurar la càrrega elèctrica, va arribar a construir un aparell que molt més tard s'anomenaria voltímetre. En conèixer els treballs de Galvani va reproduir els seus experiments però va arribar a la conclusió que la granota no era un dipòsit d'electricitat sinó que es limitava a detectar la seva presència, és a dir, actuava com un electròmetre. Experimentant amb les granotes i els arcs de metall de Galvani va trobar que dos metalls en contacte adquirien potencials diferents, fenomen que rebria el nom d'efecte Volta. Basant-se en aquesta descoberta, el 1800 va inventar la pila voltaica. Les piles voltaiques van suposar un abans i un després en la història de l'electricitat.

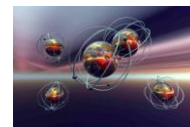
L'electricitat i el magnetisme es van desenvolupar com a ciències independentment l'una de l'altra fins al 1820, quan el físic i químic danès Hans Christian Ørsted va observar una relació entre els dos fenòmens: experimentant amb una pila voltaica, Ørsted va veure que el corrent elèctric que passava per un filferro podia afectar a l'agulla magnètica d'una brúixola. Poc després va comprovar que tot fenomen magnètic era produït per corrents elèctrics i s'unificaren de manera definitiva el magnetisme i l'electricitat, originant la branca de física coneguda com a electromagnetisme.

Entre 1823 i 1826, Francesc Joan Domènec Aragó, va presenciar l'experiment d'Ørsted a Ginebra i el va repetir a París animant a André-Marie Ampère a investigar



sobre el fenomen. Va descobrir la imantació de ferro per un corrent elèctric i, de manera independent a Ampère, va construir el primer electroimant.





## 2. Evolució històrica de l'electromagnetisme

El 1736, Charles-Agustin de Coulomb, físic i enginyer francès, va realitzar moltes investigacions sobre magnetisme, fricció i electricitat, i va arribar a descriure de manera matemàtica la llei d'atracció entre càrregues elèctriques. En honor a ell, la unitat de la càrrega elèctrica és anomenada Coulomb (C).

$$F = k \frac{qq'}{d^2}$$

Figura 1: Llei de Coulomb

Cap al 1780, Luigi Galvani, metge, fisiòleg i físic italià, va establir els fonaments del bioelectromagnetisme, en estudiar l'aplicació de l'electricitat a la mèdula espinal d'una granota morta.

A les mateixes dates, Alessandro Volta, físic italià, va inventar el generador electrostàtic o pila voltaica.

El 1820, Jean-Baptiste Biot i Félix Savart van formular una llei fonamental de la magnetostàtica, la llei de Biot-Savart, que descriu el camp magnètic induït per un corrent elèctric. Van observar que la força del camp magnètic generat entorn d'un fil conductor pel qual passava un corrent continu era inversament proporcional a la distància respecte al conductor.

$$dB = K_m \frac{Id\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

on

$$K_m = \frac{\mu_0}{4\pi}, \text{ on } \mu_0 \text{ és la constant magnètica.}$$

$I$  és el corrent, mesurat en ampere

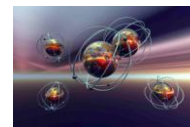
$d\mathbf{l}$  és el vector diferencial de longitud de l'element de corrent

$\hat{\mathbf{r}}$  és el vector unitari de desplaçament de l'element de corrent a un punt del camp

$r$  és la distància de l'element de corrent al punt del camp

Figura 2: Llei de Biot-Savart

André-Marie Ampère va tenir un gran interès sobre el tema i al poc temps, presentà un fet nou: la interacció de dos corrents sense la intervenció de cap imant. Ampère va continuar treballant amb els corrents elèctrics durant els anys següents, i va publicar els resultats del seu treball, finalment el 1827 "*Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*" (Tesi sobre la teoria matemàtica dels fenòmens electrodinàmics únicament deduïts de l'experiència) on va exposar els seus experiments i els fonaments dels fenòmens observats (el que avui coneixem com a llei d'Ampère): "Dos conductors paral·lels a través dels quals passa un corrent en el mateix sentit



s'atreuen i es repel·leixen si els corrents van en sentit oposat; l'efecte magnètic d'un conductor a través del que passa un corrent elèctric és idèntic al d'un imant; la magnetització és l'alineament de les molècules a causa d'un camp magnètic extern”.

Durant el 1827, Georg Simon Ohm, físic i matemàtic alemany, conegut principalment per la seva investigació sobre els corrents elèctrics, va estudiar la relació que hi ha entre la intensitat d'un corrent elèctric, la seva força electromotriu<sup>1</sup> i la resistència elèctrica, i va establir la coneguda Llei d'Ohm. La unitat de resistència elèctrica, l'ohm ( $\Omega$ ), fou anomenada així en honor seu.

$$I = \frac{V}{R}$$

Figura 3: Llei d'Ohm

Del 1831 i fins al 1835, Michael Faraday, físic i químic anglès, va realitzar importants contribucions als camps de l'electroquímica i l'electromagnetisme. Va establir la llei de Faraday o llei de l'inducció magnètica, que estableix que la força electromotriu induïda a una espira a l'espai és igual a la taxa de canvi del flux magnètic al llarg d'una bobina. Amb aquesta, s'estableixen els principis fonamentals del funcionament d'alternadors, dinamos i transformadors. Alhora, Joseph Henry, va ser el primer en utilitzar el principi del transformador. Els seus descobriments sobre l'autoinducció i els seus treballs en conductors d'espiral utilitzant una bobina de coure es van fer públics al 1835, just abans que els de Faraday.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \qquad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

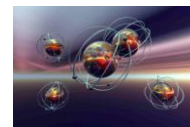
on

- $\mathbf{E}$  és el camp elèctric
- $d\mathbf{l}$  és un element **infinitesimal** del contorn
- $C$  i  $\mathbf{B}$  són la densitat de flux magnètic.

Figura 4: Llei de Faraday

L'any 1833, Heinrich Emil Lenz, formula la Llei de Lenz: “El sentit dels corrents o força electromotriu induïda és tal que s'oposa sempre a la causa que la produeix, és a dir, a la variació del flux”. Així relaciona els canvis produïts en el camp elèctric en un conductor amb la variació de flux magnètic en aquest conductor, i afirma que les

<sup>1</sup> Força electromotriu: treball que el dispositiu elèctric realitza per fer passar pel seu interior una unitat de càrrega positiva, del pol negatiu al pol positiu, dividit pel valor d'aquesta càrrega



tensions o voltatges induïts sobre un conductor i els camps elèctrics associats són d'un sentit tal que s'oposen a la variació del flux magnètic que les indueix

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

on

- $\mathcal{E}$  és la força electromotriu (fem) induïda
- $d\Phi/dt$  és la taxa de canvi al llarg del temps del flux magnètic  $\Phi$ .

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS \cos \alpha,$$

donde:

- $\Phi$  = Flujo magnético. La unidad en el SI es el **weber** (Wb).
- $\mathbf{B}$  = Inducción magnética. La unidad en el SI es el **tesla** (T).
- $S$  = Superficie definida por el conductor.
- $\alpha$  = Ángulo que forman el vector  $S$  perpendicular a la superficie definida por el conductor y la dirección del **campo**.

Figura 5: Llei de Lenz

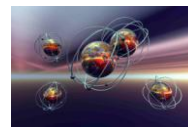
Figura 6: Llei del flux magnètic

L'existència d'ones electromagnètiques ja van ser predites per James Clerk Maxwell el 1864 a les seves famoses equacions, que eren una recopilació de lleis com la de Ampère, Faraday... per unificar totes aquestes lleis en una descripció coherent de l'electromagnetisme. La formulació original de Maxwell prové de 1865 i contenia vint equacions amb vint variables. Gràcies a elles, Maxwell va poder afirmar que es poden transmetre ones electromagnètiques per l'aire:

Denominación	Nombre	Ecuación
A	Ley de corrientes totales	$\vec{J}_{\text{tot}} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
B	Definición de <b>vector potencial magnético</b>	$\mu \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$
C	Ley circuital de Ampère	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_{\text{tot}}$
D	Fuerza de Lorentz	$\vec{E} = \mu \vec{v} \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi$
E	Ecuación de electricidad elástica	$\vec{E} = \frac{1}{\epsilon} \vec{D}$
F	<b>Ley de Ohm</b>	$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J}$
G	<b>Ley de Gauss</b>	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
H	Ecuación de continuidad de <b>carga</b>	$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$

Taula 1: Equacions originals de Maxwell

La formulació moderna de les equacions de Maxwell és deguda a Oliver Heaviside i Josiah Willard Gibbs, que el 1884 van reformular les equacions originals de Maxwell en un sistema abreujat utilitzant notació vectorial.



Nom	Forma diferencial	Forma integral
Llei de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_i$
Llei de Gauss per al magnetisme	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$
Llei de Faraday:	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$
Llei d'Ampère-Maxwell:	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$

Taula 2: Equacions modificades de Maxwell

- $Q$  és la càrrega elèctrica (unitat SI: coulomb).
- $\rho$  és la densitat de càrrega elèctrica (unitat SI: coulomb per metre cúbic), sense incloure càrregues dipolars lligades a un material
- $\mathbf{B}$  és la inducció magnètica (unitat SI: tesla, volt  $\times$  segon per metre quadrat)  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ .
- $\mathbf{D}$  és el desplaçament elèctric (unitat SI: coulomb per metre quadrat)  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ .
- $S$  és l'àrea de la superfície gaussiana d'integració.
- $\mathbf{E}$  és el camp elèctric (unitat SI: volt per metre).
- $\mathbf{H}$  és el camp magnètic (unitat SI: ampere per metre).
- $\mathbf{J}$  és la densitat de corrent elèctric (unitat SI: ampere per metre quadrat)
- $\nabla \cdot$  és l'operador divergència (unitat del SI: 1 per metre)
- $\nabla \times$  és l'operador rotacional (unitat del SI: 1 per metre)

En 1888, Rudolf Hertz va ser el primer a demostrar l'existència d'aquestes ones electromagnètiques mitjançant la construcció d'un aparell per a produir ones de ràdio.

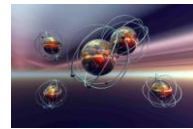
Cap al 1890, Hendrik Lorentz, físic i matemàtic neerlandès, gràcies a la seva investigació en camps com el magnetisme i l'electricitat, va estudiar i va descobrir la força exercida sobre una partícula carregada que es mou en un camp electromagnètic, és a dir, una de les lleis fonamentals de l'electromagnetisme: la Força de Lorentz.

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$\mathbf{F}$  és la força (en newtons)  
 $\mathbf{E}$  és el camp elèctric (en volts per metre)  
 $\mathbf{B}$  és el camp magnètic (en webers per metre quadrat, o en tesles)  
 $q$  és la càrrega elèctrica de la partícula (en coulombs)  
 $\mathbf{v}$  és la velocitat instantània de la partícula (en metres per segon)  
 $\times$  és el producte vectorial.

Figura 7: Llei de la Força de Lorentz

L'any 1891, Nikola Tesla, inventor, enginyer mecànic, enginyer electricista i físic d'origen serbi i el promotor més important del naixement de l'electricitat comercial, va realitzar notables aportacions als coneixements dels fenòmens electromagnètics a



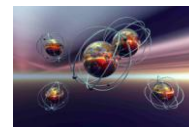
alta freqüència i alt potencial. En podem destacar: el corrent altern, la transferència inalàmbrica d'energia elèctrica mitjançant ones electromagnètiques, la bobina de Tesla, els sistemes de propulsió per mitjans electromagnètics...

Al 1906, Lee De Forest, inventor provinent dels Estats Units, va inventar el tríode, amb el qual es van poder amplificar les ones electromagnètiques d'aparells com la ràdio, la televisió...

D'acord amb la teoria electromagnètica actual, les forces electromagnètiques es produeixen mitjançant la transferència de fotons<sup>2</sup> virtuals, donada quan els fotons transmeten la interacció electromagnètica entre partícules amb càrrega elèctrica, que a diferència dels fotons reals, es donen en el cas que els observem en qualsevol tipus de radiació electromagnètica, com la llum o els raigs X.

---

<sup>2</sup> Fotó: partícula elemental responsable de les manifestacions quàntiques del fenomen electromagnètic. És la partícula portadora de totes les formes de radiació electromagnètica.



### 3. Classificació magnètica de la matèria

Podem classificar les substàncies segons el seu comportament magnètic:

**Substàncies diamagnètiques:** són materials dèbilment magnètics que repel·leixen els imants. Quan els introduïm en un camp magnètic extern s'indueix un altre camp al seu interior que té sentit contrari al de l'exterior, per això es creen forces de repulsió. Algunes substàncies diamagnètiques són el bismut, l'hidrogen, el coure, el silici...

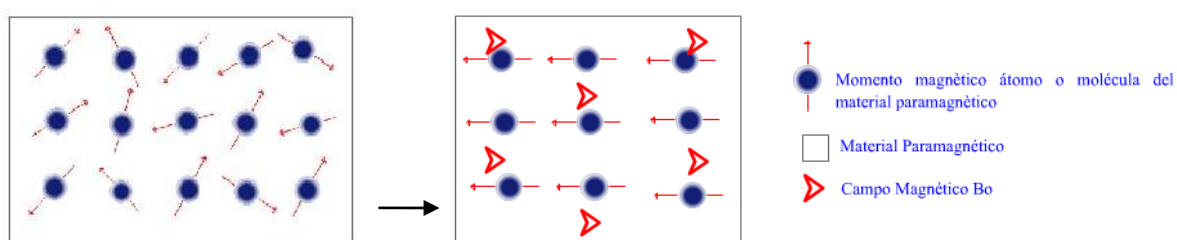


Figura 8: Comportament diamagnètic

**Substàncies paramagnètiques:** són les substàncies que tenen la propietat de magnetitzar-se al ser sotmeses a l'acció d'un camp magnètic extern, de tal manera que s'imanten en el mateix sentit que aquest, ja que el camp magnètic que es crea a l'interior adquireix el mateix sentit a l'exterior. Per tant, el camp magnètic extern que travessa una substància paramagnètica es veu lleugerament reforçat. Alguns exemples de substàncies paramagnètiques són l'alumini, el bari, l'oxigen...

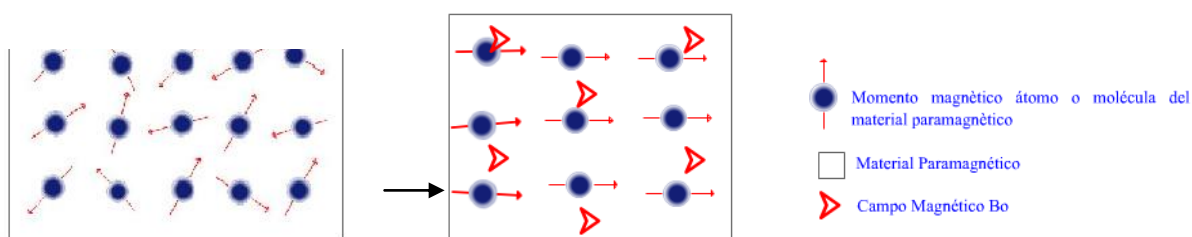
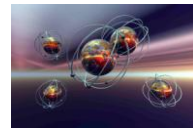


Figura 9: Comportament paramagnètic

**Substàncies ferromagnètiques:** són substàncies que es magnetitzen quan s'exposen a l'acció d'un camp magnètic i continuen magnetitzades durant un cert temps quan ja no hi ha la influència del camp. Com a les substàncies



diamagnètiques, en aplicar un camp extern, el camp que es crea a l'interior és de la mateixa direcció i sentit contrari. Alguns exemples d'aquest tipus de substàncies són el ferro, el níquel, el cobalt...

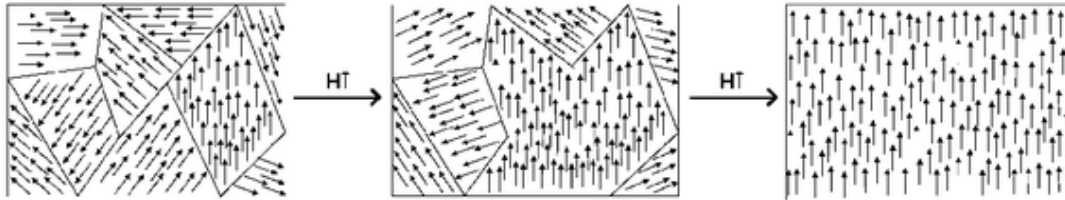
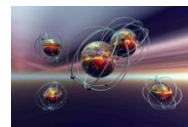


Figura 10: Comportament ferromagnètic



#### 4. Evolució històrica de la superconductivitat

La superconductivitat és aquell fenomen que consisteix en una pèrdua total de la resistència elèctrica de certs materials, aliatges o compostos. La majoria d'ells són metàl·lics o ceràmics i absolutament tots són sòlids.

A principis del segle XX molts físics estaven capficats en la recerca sobre les baixes temperatures, atesos els seus usos (com la conservació dels aliments...). William Thompson va demostrar que les molècules de tota substància, ja sigui gasosa, líquida o sòlida, perden energia a un ritme constant quan la temperatura disminueix. Aleshores va calcular que un cos, en arribar als  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , ha perdut tota l'energia. Aquest fet va ser anomenat zero absolut de temperatures, i es va crear una escala nova, l'escala Kelvin, que precisament partia d'aquesta temperatura del zero absolut coneguda com 0 K. El zero absolut és un límit, és a dir, que ens podem apropar a ell però mai hi arribarem.

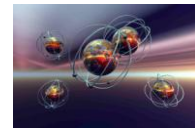
A partir d'aquest moment, Thompson va ser anomenat com el primer baró de Kelvin. Tot això va desencadenar una gran rivalitat en el món científic per apropar-se cada cop més al zero absolut. El mètode més utilitzat fou la liquació de gasos, fins aquell moment permanents, és a dir, gasos que fins aquell moment no s'havien pogut liquar.

El primer gas que va ser liquat fou l'oxigen. Dos físics, Cailletet i Pictet van aconseguir-ne unes gotes després de condensar oxigen refredat mitjançant la "tècnica de les cascades". Aquesta tècnica consisteix en liquar un gas, i amb la temperatura assolida per aquest gas a més pressió, liquar-ne un altre, i així successivament.

Més tard, James Dewar va crear un mètode de conservació del fred que va revolucionar l'època. Exposava que el millor mètode aïllant és el buit, ja que és la manera amb la qual el calor no es pot transmetre per les molècules d'aire, ja que no al buit no hi ha aire. Va ser el mateix Dewar qui va aconseguir liquar l'hidrogen per primer cop utilitzant la "descompressió Joule-Thompson".

Heike Kammerling Onnes, físic neerlandès, és realment el gran protagonista del fenomen de la superconductivitat ja que va aconseguir la liquació de l'heli.





Després d'haver estudiat el treball de James Dewar i d'equipar-se amb unes infraestructures realment adequades, Onnes es va dedicar intensament a la líquidació de l'heli. Aviat construeix un líquidor, que aconsegueix líquar molta més quantitat d'Hidrogen.

Després de dos anys més de preparació, Onnes líquica fins a 75 litres d'hidrogen, quantitat suficient com per llançar-se a l'obtenció de l'heli líquid. Després de l'esforç i la dedicació, la quantitat d'hidrogen semblava esgotar-se i Onnes creia haver fracassat, però es va adonar que el recipient estava quasi totalment ple de líquid. Havia triomfat, havia aconseguit per fi, líquar l'heli, l'últim dels gasos permanents.

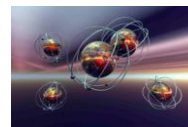
Aquest fet va possibilitar l'estudi de l'heli amb més facilitat, i es va poder observar que l'heli presenta un estat de superfluïdesa. Aquesta característica força interessant que permet a un líquid tenir una viscositat nul·la, és a dir, sense fregament amb superfícies.

Onnes ja havia estudiat curiosament l'evolució de la resistència elèctrica d'un metall amb la temperatura, i va observar com la resistència disminuïa regularment a mesura que la temperatura també ho feia.

Amb aquesta idea al cap, Onnes va demanar a Gilles Holst, un ajudant seu, que experimentés en aquest camp. Després de fer diverses proves, Holst va fabricar un fil de mercuri pur (ja que en aquelles èpoques era l'únic metall pur) i el va posar al criostat. En arribar al punt d'ebullició de l'heli de 4,2 K (268,8 °C sota zero), Holst va constatar que la resistència elèctrica del seu fil de mercuri havia estat dividida per 500 vegades des de la seva primera anàlisi. Una centèsima de grau després, la resistència era ja un milió de vegades inferior al seu valor inicial, fins que finalment va trobar que la resistència es tornava quasi bé nul·la. Si es deixés un corrent en un anell superconductor durant 2 anys, no es notaria cap pèrdua elèctrica.

Així, l'any 1913 Gilles Holst es va convertir en la primera persona que observava el fenomen de la superconductivitat i també serà el seu descobridor, però Kammerling Onnes, s'atribuirà la paternitat del seu descobriment sense compartir-lo.

Aviat el mateix Kammerling Onnes va fer diferents proves amb més metalls. Es van adonar que era una propietat que només es donava en certs materials i en unes



condicions força peculiars, i descobreix la resistència nul·la del mercuri a 4,2 K. A aquesta temperatura, se li anomenarà temperatura crítica ( $T_c$ ), que és la temperatura a la qual un material té resistència elèctrica nul·la. És dóna a partir d'aquí el fenomen de la superconductivitat. Aquell mateix any, Onnes va observar que aplicant un camp magnètic de valor creixent, el material acaba tornant al seu estat normal.

Al 1916, Gilsbee, descobreix que una densitat de corrent elèctric suficientment alta a través d'un material fa que aquest torni a tenir resistència. A aquesta se li va denominar densitat de corrent crítica ( $J_c^3$ ).

Més tard, Wilhelm Meissner i el seu ajudant Ochsenfeld van fabricar un cilindre metàl·lic massís (de plom i estany) i el van tornar superconductor. Van instal·lar al costat un electroimant i a la superfície del cilindre van aparèixer corrents superconductors per compensar l'augment del camp magnètic. Va ser aleshores quan es van adonar que els materials superconductors també tenen aquesta propietat, i la van "batejar" com a *efecte Meissner*. A l'annex 1 es pot llegir una descripció més precisa del fenomen.

Al 1933 Meissner i Ochsenfeld observen que els superconductors, per sota de cert valor del camp magnètic aplicat, són diamagnètics perfectes<sup>4</sup>.

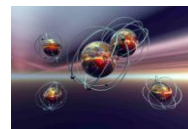
La superconductivitat també va ser un de les principals causes d'un gran interès durant aquella època en l'estudi de la mecànica quàntica. Molts dels físics d'aquella època pensaven que amb l'estudi atòmic podrien resoldre i trobar respostes a fenòmens com la superconductivitat, i així poder proposar teories que els expliquessin.

Casimir i el seu ajudant Gorter van intentar raonar teories sobre la conductivitat, centrades en l'estudi termodinàmic de l'estat de transició, i en sorgeix la teoria dels dos fluïds. D'aquest estudi van concloure que es diferenciaven dos tipus de fluïds: quan un fluid està en estat normal, aquest presenta una resistència elèctrica i entropia; en canvi, quan és superconductor no té ni resistència elèctrica ni entropia.

---

<sup>3</sup>  $J_c$ : màxima densitat de corrent que podem fer passar per la mostra sense moure els vòrtex.

<sup>4</sup> Diamagnets perfectes: Característica dels superconductors de la impermeabilitat de camps magnètics, és a dir, el camp magnètic a l'interior és anul·lat.



L'any 1935, London crea el model teòric de la densitat dels electrons superconductors. Més tard, al 1941, Aschermann descobreix el NbN (Nitrur de Niobi), amb una temperatura crítica de 15 K. Uns anys després, al 1950, Reynolds i Maxwell descobreixen l'efecte isotòpic, que és la dependència de la temperatura crítica amb la massa dels ions de la xarxa.

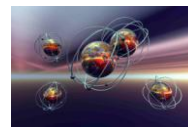
No va ser fins a mitjans del segle XX, al 1950, que es va realitzar la primera teoria fenomenològica de la superconductivitat, anomenada teoria de Ginzburg-Landau, que foren els seus creadors. Aquests dos teòrics varen parlar sobre el paràmetre d'ordre, que és un paràmetre que quantifica la densitat d'electrons superconductors. D'aquesta manera es poden definir els canvis de transició d'una posició d'ordre a una de desordre i a la inversa.. Amb aquest punt de partida, Landau i Ginzburg van explicar que existeixen dos tipus de superconductors (I i II) que a la vegada tenen comportaments diferents davant un camp magnètic. Més endavant hi ha una explicació més extensa.

Més tard aquell mateix any, Fröhlich destaca la importància teòrica de les vibracions de la xarxa cristal·lina, és a dir, de la interacció entre electró i fonó<sup>5</sup>. Anys després, el 1956, Cooper observa la inestabilitat del gas Fermi davant una interacció atractiva entre electrons, també denominat com a Parells de Cooper. A l'Annex 1 es pot llegir una descripció més detallada del fenomen.

Cooper, Bardeen i Schrieffer, al 1963, estableixen la teoria BCS, que explica perfectament les característiques dels materials superconductors habituals de baixa temperatura crítica. Es basa en què dos electrons poden ser atrets tots dos per un mateix ió positiu i així ajuntar-se per parelles d'electrons (parells de Cooper) quan la temperatura és suficientment baixa. Aquesta teoria està considerada com la teoria més important en el camp de la superconductivitat des del punt de vista microscòpic (és a dir, tracta d'explicar les propietats dels superconductors a partir de primers principis). No obstant, gran part dels superconductors segueixen sense comptar amb una explicació satisfactòria. Aquesta teoria BCS els va proporcionar el Premi Nobel en 1972.

---

<sup>5</sup> Fonó: Un fonó és una cuasi partícula o manera quantitzada vibratoria que té lloc en xarxes cristal·lines. L'estudi dels fonons és una part important en la Física de l'estat sòlid a causa de que tenen una funció molt important en moltes de les seves propietats físiques, incloses les conductivitats tèrmica i elèctrica.



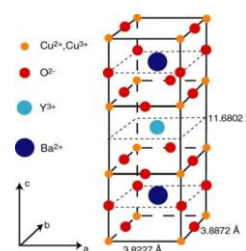
Cap al 1959, Gorkov observa i demostra l'equivalència entre la teoria microscòpica del BCS i la macroscòpica de Ginzburg-Landau, per temperatures pròximes a la  $T_c$ . Al 1961, Faribanks i Deaver troben la quantificació del flux magnètic a través d'un superconductor i les seves primeres aplicacions. Aquell mateix any, Giaver descobreix un efecte anòmal entre un superconductor i un conductor normal anomenat efecte Túnel. A l'Annex 1 hi ha una descripció del fenomen.

Al 1962, Brian David Josephson va predir l'efecte que després portarà el seu nom, l'efecte Josephson i és l'aparició de corrent espontàni superconductor entre dos superconductors (basat en l'efecte túnel). Aquest descobriment també el va proporcionar el Premi Nobel l'any 1973.

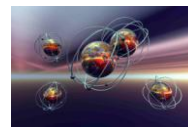
Al 1963, Saphiro realitza la comprovació experimental de l'efecte Josephson. L'any següent, al 1964, Zimmerman crea el dispositiu SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), que és un magnetòmetre molt sensible utilitzat per mesurar camps magnètics extremadament subtils, basats en bucles superconductors que contenen unions Josephson. A l'Annex 1 s'expliquen aquests efectes.

L'any 1986 és força important per la història de la superconductivitat, ja que C. Bednorz i K. A. Müller, dos científics dels laboratoris d'IBM, descobreixen un nou material ceràmic, el BaLaCuO (bari, lantani, coure i oxigen) que es torna superconductor als 30 K. Encara era massa baixa per arribar-hi amb nitrogen líquid (77 K). Però aquest fet va representar que hi havia altres tipus de materials amb  $T_c$  més altes. Van descobrir la superconductivitat d'alta temperatura.

Al febrer del 1987, Chu i un antic alumne, Wu, substitueixen el lantani per l'itri, sorgint el compost YBaCuO, i descobreixen que es torna superconductor als 98 K, 16 graus per sobre de la temperatura de líquidació del Nitrogen. I aquest compost YBaCuO el que jo he estat estudiant en aquest treball de recerca junt amb científics de l'ICMAB.



**Figura 11: Estructura cristal·lina de l'YBaCuO**



## 5. Superconductivitat

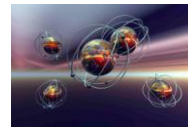
### 5.1 Fonaments de la Superconductivitat

La superconductivitat és una propietat que s'observa a temperatures exageradament baixes i varia segons el material. Aquesta temperatura anomenada valor crític ( $T_c$ ) és la temperatura necessària per assolir l'estat de superconductor. La temperatura més alta que s'ha trobat com a valor crític ha estat de 138 K ( $-135^\circ\text{C}$ ), en un compost format per tali, bari, calci, coure i oxigen; i en contraposició, la més baixa ha estat de  $\sim 0.01$  K amb el platí, ben bé tocant el zero absolut. El millor mètode en altres temps i també ara, per aconseguir aquestes temperatures tant extremes, és la líquidació de gasos. El primer fou l'heli, a 4.22 K, i més endavant amb nitrogen, a 77 K, sobretot quan ja s'havien trobat els primers materials de temperatures no tan baixes amb estat superconductor, que és el que s'anomena com a superconductivitat d'alta temperatura.

La resistència d'un material és deguda a la col·lisió dels electrons amb els àtoms i altres impureses. En aquestes condicions, la causa més directa de la resistència nul·la és que aquests materials tenen la capacitat de transportar l'energia elèctrica sense pèrdua energètica. En estat superconductor, els electrons formen parells i no col·lionen amb les impureses del material. Es generen els Parells de Cooper .

La principal característica per la qual definim la superconductivitat és que aquells materials en aquest estat condueixen electricitat sense que es produeixi cap pèrdua elèctrica ja que no hi ha resistència. Aquesta resistència s'obté a partir de la reducció a temperatures molt baixes, properes als 0 K en el cas dels superconductors de baixa temperatura. En arribar a una determinada temperatura anomenada temperatura crítica el material transita a l'estat superconductor.

Des del punt de vista magnètic, els superconductors es caracteritzen per l'efecte Meissner, segons el qual el camp magnètic s'anul·la a l'interior del superconductor. Aquest efecte permet caracteritzar els superconductors com a diamagnètics perfectes. Com la quantitat d'electrons superconductors és finita, la quantitat de corrent que pot suportar el material és limitada. Per tant, hi ha un corrent crític ( $J_c$ ) a partir del qual el material deixa de ser superconductor i comença a dissipar energia.



## 5.2 Tipus de materials superconductors

Els materials superconductors es poden classificar segons la seva composició en:

- **Metalls purs:** són aquells elements químics, que tenen les propietats de ser opacs, sòlids a temperatura ambient i normalment bons conductors. Els metalls purs pertanyen als superconductors de tipus I.
- **Aliatges:** són mesclades de dos o més metalls elementals íntimament units. Per tant, tenen les mateixes característiques que un metall. Solen tenir una  $T_c$  de 10 K, i un  $H_c^6$  elevat.
- **Compostos químics:** són substàncies formades per un o més elements, amb una relació determinada. Els ceràmics formen part d'aquest grup, basats en òxids mixtos de coure i altres elements. El més conegut és l'YBaCuO.

Distingim entre superconductors a baixes temperatures (com a 4 K) i a altes temperatures (com a 138 K). El major desavantatge d'aquests materials superconductors a altes temperatures és la seva composició ceràmica. Aquest fet els fa poc apropiats per fabricar cables amb deformació plàstica, que seria l'ús més usual d'aquest tipus de materials.

També podem classificar els materials superconductors segons les seves característiques fenomenològiques:

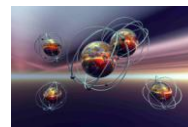
**Superconductors tipus I.** Són aquells que en presència d'un camp magnètic extern estableixen uns corrents superficials que impedeixen que aquest camp penetri el material, efecte anomenat com efecte Meissner. Foren els primers en ser descoberts, i el seu comportament s'explica amb la teoria BCS.

Tenen les següents característiques:

- Estan formats únicament per elements purs, com alumini o mercuri.
- A diferència dels superconductors tipus II, només tenen una temperatura crítica. Per sobre d'aquesta, deixen de produir aquest comportament i comencen a tenir resistència elèctrica.

---

<sup>6</sup>  $H_c$ : Punt crític en la aplicació del camp magnètic a un material superconductor. Sobrepasar aquest límit vol dir que el material tornarà a l'estat normal, i deixarà de ser superconductor.



- Tenen unes  $T_c$  molt baixes, que no superen els 7 K.
- Només tenen un únic camp magnètic crític,  $H_c$ .
- La magnetització d'aquestes espècies augmenta segons augmenta el camp magnètic extern per contrarestar-lo. Quan se supera el camp magnètic crític, la magnetització cau directament a 0.
- Tots aquests superconductors poden ser explicats mitjançant la teoria BCS.
- Són poc útils a l'hora de transportar el corrent elèctric, ja que la densitat de corrent que poden transportar en l'estat superconductor és molt baixa. El camp crític superior és molt baix i per tant no poden treballar sota camp magnètic.

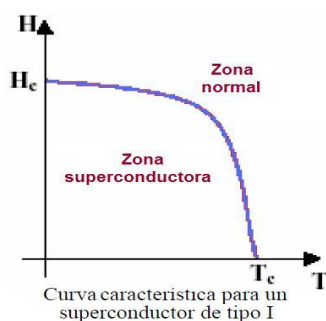
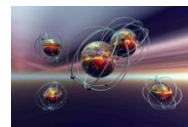


Figura 12: Gràfic  $H_c$ - $T_c$  de un superconductor tipus I

La figura 12 representa una corba característica H-T que mostra la transició de l'estat superconductor al normal dels superconductors tipus I. A diferència dels gràfics dels superconductors tipus II, que veurem més endavant, aquests no tenen una zona mixta, ni s'hi produeix l'efecte Meissner per exemple.

**Superconductors tipus II.** Són aquells materials que realitzen un canvi gradual de l'estat superconductor al normal, al contrari del canvi bruscat que fan els superconductors de tipus I.

- Estan formats per aliatges, ceràmiques o només quatre elements purs (carbó, niobi, tecneci i vanadi).
- Tenen dos camps magnètics crítics. En aplicar una temperatura constant en estat superconductor i apliquem un camp magnètic observem que a partir de un cert punt  $H_{c1}$ , el camp comença a penetrar el material (estat mixt) fins a  $H_{c2}$ , on l'ha penetrat en la seva totalitat i l'estat superconductor desapareix.



- Si el camp magnètic aplicat es troba entre  $H_{c1}$  i  $H_{c2}$  (a l'estat mixt), el corrent pot ser transportat per l'interior del conductor en filaments, anomenats vòrtexs. A l'Annex 1 es troba una descripció detallada del concepte.
- La magnetització de la mostra augmenta segons augmenta el camp magnètic extern per contrarestar-lo. En arribar a  $H_{c1}$ , la magnetització es redueix gradualment fins a desaparèixer en arribar a  $H_{c2}$ .
- No existeix una teoria convencional que els pugui explicar. La teoria BCS no els explica en la seva totalitat. La majoria d'aquests compostos són no convencionals.

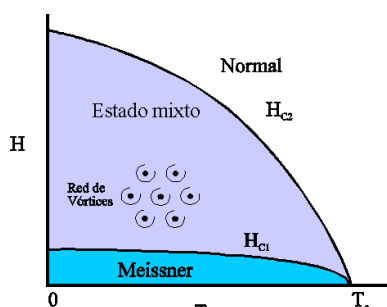


Figura 13: Gràfic Hc-Tc d'un superconductor tipus II

A la figura 13 observem una corba característica del diagrama H-T corresponent a un material superconductor tipus II. A simple vista es poden reconèixer dues zones on el superconductor té estats diferents. A la zona de color blau clar trobem l'estat mixt, i a la zona de color blau fosc trobem l'estat superconductor normal.

A la figura 13 també observem la diferència entre les reaccions davant d'un camp magnètic extern d'un superconductor de tipus I (en vermell) i un superconductor de tipus II (en blau). Aquest gràfic mostra el canvi bruscat que fan els superconductors tipus I quan arriben al  $H_c$ , contrastat amb un descens en forma cònca dels superconductors tipus II al arribar a l' $H_{c1}$ , el primer camp magnètic crític. A partir d'aquí, el material entra en una zona mixta, on els vòrtexs, fixes encara, aniran penetrant el material fins a l' $H_{c2}$  on es mouran i l'estat superconductor s'esvairà.

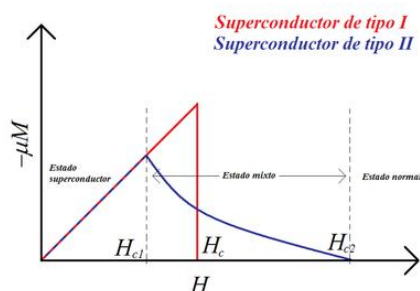
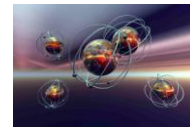


Figura 14: Comportament dels superconductors sotmesos a camp magnètic





### 5.3 Estructura dels superconductors:

A diferència dels materials superconductors clàssics o de baixa temperatura crítica (gairebé tots ells són metalls purs, aliatges o compostos), tots els superconductors d'alta temperatura que tenen base de coure (Cuprats), pertanyen a la família de les perovskites. És a dir, estan formats per cristalls constituïts per l'apilament en totes les direccions de l'espai d'octàedres que contenen en el seu centre un àtom metàl·lic (en aquest cas coure) amb àtoms d'oxigen en els vèrtexs i un altre àtom metàl·lic ocupant els espais entre els octàedres. Aquesta estructura cristal·lina, condueix a la formació de plans  $\text{CuO}_2$ , responsables de les propietats dels superconductors d'alta temperatura crítica (HTS).

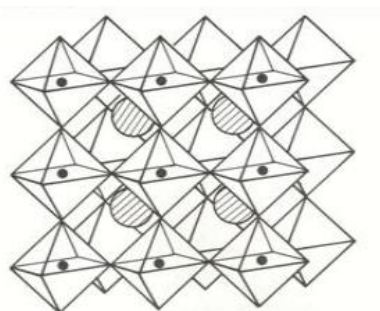


Figura 15: Estructura de les perovskites

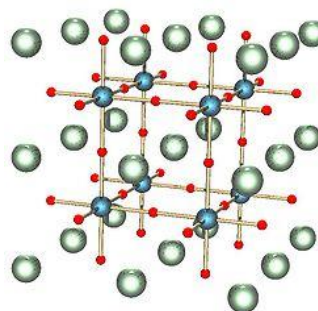
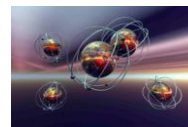


Figura 16: Estructura de les perovskites

L'estat superconductor presenta un sistema molt més ordenat que no pas el normal, ja que el segon té menys entropia que no pas el primer. Però com que l'estructura atòmica cristal·lina dels sòlids que passen a ser superconductors no canvia, l'únic canvi estructural es realitza en l'organització dels electrons. A més a més, no tots els metalls són superconductors. Fins i tot alguns materials conductors a temperatura ambient, com l'or, no són superconductors. En canvi, alguns mal conductors sí ho són, com també passa en aliatges constituïts per un aïllant elèctric i un no-superconductor. Això demostra que la superconductivitat no és deguda únicament a l'estructura molecular.

Bardeen (un dels tres físics creadors de la teoria BCS) va dur a terme un experiment (anomenat l'"efecte isòtop"), que consistia en substituir un àtom per un isòtop (de mateixa càrrega però de massa diferent) i comprovar si el material seguia essent superconductor. Aviat va constatar que continuava superconductor i que, per tant,



l'estat de superconductor no depenia de la massa sinó de la interacció electrons-ions. D'aquí sorgeix la teoria BCS sobre els superconductors.

Encara que en forma una mica arbitrària, els superconductors d'alta  $T_c$  coneguts avui en dia amb  $T_c \geq 35$  K, han estat classificats en tres classes segons la quantitat de plans de  $\text{CuO}_2$  que tenen en la seva estructura:

A la primera classe pertanyen els compostos del tipus  $(\text{La-Sr})_2\text{CuO}_4$  caracteritzats per un únic pla  $\text{CuO}_2$  i  $T_c$  30 K. El prototip de la segona classe és el compost  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  descobert per Chu, amb una  $T_c \sim 95$  K i dos plans de  $\text{CuO}_2$ . Representants de la tercera classe són els compostos de  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_{1+n}\text{O}_{6+2n}$  ( $n = 0, 1, 2$ ), és a dir, compostos del tipus  $\text{Bi}2201$ ,  $\text{Bi}2212$  i  $\text{Bi}2223$ ... amb  $T_c \sim 20$  K, 85 K i 110 K respectivament descoberts per Maeda el 1988; els compostos estructuralment gairebé idèntics de  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_n\text{Cu}_{1+n}\text{O}_{10+n}$  amb  $T_c$  d'uns 125 K (com per exemple  $\text{Tl}2223$ ) descoberts per Hermann i col·laboradors en 1988 i els compostos de la sèrie homòloga del mercuri  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n}$  descoberts en 1993 per Schilling-Ott, amb el rècord de temperatura crítica d'aproximadament 136 K. Com van observar, incrementant el nombre de plans de coure s'incrementa la  $T_c$ . Aquest comportament a portar a la conclusió: "més plans adjacents de  $\text{CuO}_2$  produeixen major  $T_c$ ", però la idea de fabricar compostos superconductors amb més plans de coure va resultar sorprenentment difícil ja que les estructures es tornaven inestables.

El compost  $\text{YBaCuO}$  pertany a la segona classe. A la figura 17 podem observar la distribució dels plans de  $\text{CuO}_2$  del compost  $\text{YBaCuO}$

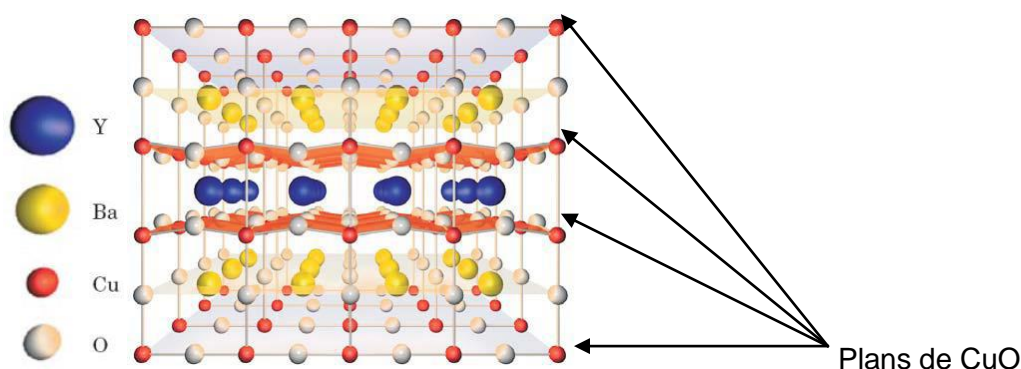
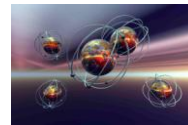


Figura 17: Estructura del superconductor d'alta temperatura  $\text{YBaCuO}$



#### 5.4 El superconductor YBaCuO

L'YBaCuO és un material ceràmic superconductor d'alta temperatura, per tant, superconductor de tipus II, compost d'òxid d'itri, bari i coure. Les seves propietats superconductores s'estableixen a partir dels 95 K.

La seva composició química és  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  i va ser descobert per C.W. Chu al 1987. La seva descoberta va ser un fet revolucionari en la història de la superconductivitat ja que fou el primer superconductor d'alta temperatura en ser descobert. Això va permetre d'ençà moltes aplicacions, i encara avui dia, és un dels més estudiats.

L'YBaCuO té la mateixa estructura cristal·lina que la perovskita, raó per la qual es diu que té estructura de perovskita. Cal tenir en compte que, no obstant això, la perovskita és un òxid de titani i calci, pel la qual cosa la seva composició és ben diferent de la del YBaCuO: l'única cosa que comparteixen tots dos és la mateixa estructura cristal·lina, és a dir, la posició relativa en què estan col·locats els àtoms dels que estan compostos.

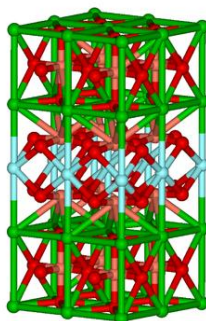
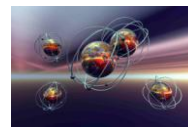


Figura 18: Estructura de perovskita de l'YBaCuO

Avui en dia encara no té unes aplicacions funcionals però s'està realitzant un gran estudi per a futurs usos.



## 6. Recerca experimental a l'ICMAB

### 6.1 Preparació prèvia

En la meua recerca sobre la superconductivitat, i els materials superconductors, he pogut treballar més profundament en el compost superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  (YBaCuO o YBCO), gràcies a l'ajuda de la Dra. Anna Palau de l'ICMAB.

L'YBaCuO és un material ceràmic i, per tant, és difícil de fabricar en forma de cablejat. La solució és fer créixer capes molt fines de material ceràmic sobre un substrat metàl·lic en forma de cable.

Hi ha dues maneres de fer créixer les mostres: la primera és partir d'un *spinner*<sup>7</sup>, que és utilitzat per a mostres més petites (d'uns quants mil·límetres de grandària) i primes, fins a 300 nanòmetres de gruix. Les mostres obtenen certa viscositat i certa molaritat. La segona manera és partir de l'injector, per a mostres més grans (fins a metres de grandària), i gruixudes, de fins a 1-2 micres de gruix. Se sol utilitzar per a mostres escalables i en major quantitat, com cables superconductors. Les mostres solen ser aquí més diluïdes.

Abans de dipositar la dissolució a la mostra, haurem de procedir a netejar el substrat curosament.

La funció de l'injector és dipositar la dissolució "gota a gota". Consta d'una pipeta, d'un piezo elèctric que es deforma a partir d'impulsos elèctrics, i amb aquesta deformació es contrau i crea el moviment del líquid. Compta amb un sistema de

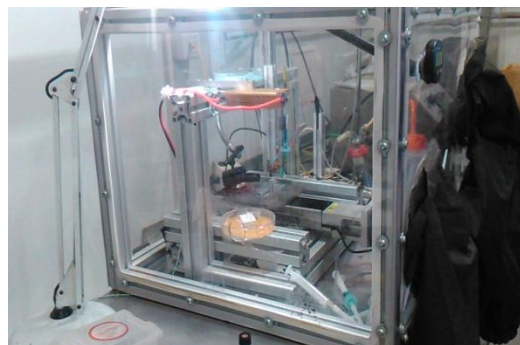
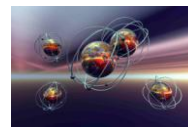


Figura 19: Injector

pressió que aplica un buit per a que la dissolució no caigui pel seu propi pes, sinó per l'impuls elèctric. El sistema està connectat a un ordinador amb un monitor, que té un programari propi per a poder controlar els impulsos elèctrics i la freqüència amb que cau cada gota. Al monitor podem observar una gota en l'aire quieta, però realment és la càmera implantada que realitza un *flashejat* a la mateixa freqüència a

<sup>7</sup> Spinner: Màquina utilitzada per a fer créixer les mostres. El seu funcionament per a fer-les créixer és girant a altes velocitats,



la qual cau la gota. Aquest "gota a gota" està controlat per a què vagi fent línies paral·leles durant tota la mostra, de manera que quedi la mateixa quantitat de dissolució a la mostra en gotes separades molt ínfimament, per tal que la dissolució quedi separada equitativament.

La funció de l'*spinner* és dipositar una gota de dissolució a la mostra. La mostra es centra al mig de l'*spinner*. Quan és posat en funcionament girarà a una velocitat de 6000 rev/min. Així, la gota de dissolució es dispersarà homogèniament per la mostra. Durant 1 minut es realitza aquest procés i seguidament es deixa assecar la mostra.



Figura 20: Spinner

Després d'un d'aquest dos processos per obtenir la mostra amb la dissolució, es posa la mostra al forn de piròlisi, que permetrà cremar la part orgànica de la mostra deixant els metalls que volem créixer per formar l'YBCO. Aquest forn està compost també per uns tubs de quars, per on farem passar oxigen, entre d'altres gasos.



Figura 21: Forn de piròlisi

L'últim pas és introduir-la al forn de creixement. Allà, el que

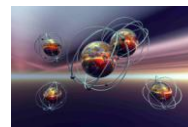
realitzarem serà ajuntar els òxids per formar la fase que volem i afegim oxigen i nitrogen "plus" a uns 800°-820 °C per obtenir la mostra crescuda amb bones propietats superconductores.



Figura 22: Forn de creixement

A partir dels processos anteriors, ja es poden estudiar les propietats superconductores de la mostra crescuda. Abans, però, l'hauré de contactar, és a dir, col·locarem fils de plata molt prims per on circularà el corrent a la mostra.

A la mostra, en ampliar-la, podem observar que conté quatre contactes de plata o "tracks". Els tracks són les zones definides on posarem els fils de plata i per on més



tard, farem passar corrent elèctric, i en calcularem el voltatge màxim, intensitat màxima... que la mostra suporta (per determinar la corrent crítica). Els fils de plata seran enganxats amb pintura de plata que haurem de col·locar molt cuidadosament. Una característica curiosa d'aquestes mostres és que fem passar el corrent per un pont d'una superfície conductora ínfima, per a que l'obtenció de la densitat i corrent màximes siguin fàcils d'obtenir, ja que la maquinària no pot proporcionar un corrent exageradament alt.

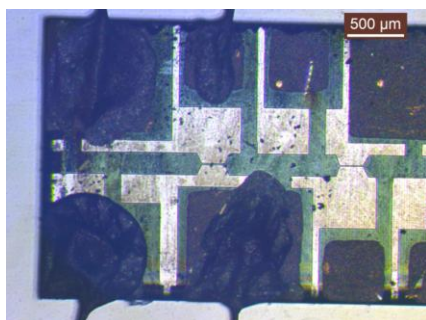


Figura 23: Mostra pirolejada i contactada

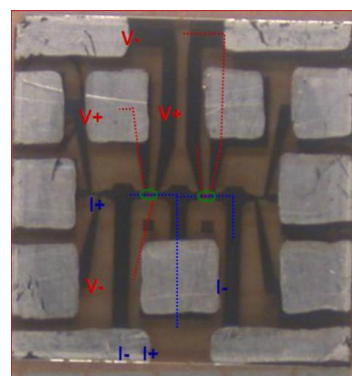
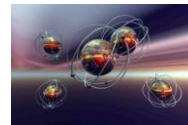


Figura 24: Mostra on veiem per on estudiem el voltatge i fem passar corrent

Una vegada preparada la mostra, ja es poden realitzar les mesures.

Ja sigui per mesurar la seva  $T_c$  o  $J_c$ , introduïrem la mostra en el PPMS, on connectarem els quatre fils de plata per a que passi el corrent a través dels fils. Aquest aparell consta d'una bobina superconductora i heli líquid en el buit, amb un espai on introduïm la mostra. Amb l'heli líquid tornem la bobina superconductora, i així a la mostra li podrem aplicar un camp magnètic extern, i podrem fer-li passar corrent. Així es poden estudiar les seves característiques.

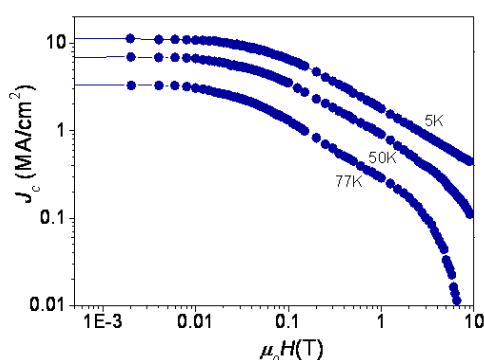
En la mesura de la resistivitat de la mostra, en estar ja dins del PPMS i en el buit, hi aplicarem un camp magnètic de cert valor que anirà en augment, des de 0 T i sense sobrepassar el punt d' $H_c$ . Seguidament, enviarem corrent en forma de senyals sinusoidals. I amb el programa que controla del PPMS, anirem disminuint la temperatura i farem una mesura de la temperatura cada 2 Kelvin, fins a arribar a la  $T_c$ , que és a prop dels 80 o 90 K. A partir d'aquí, el programa alitzarà mesures més exactes, és a dir, cada -0.5 K fins al final del procés.



## 6.2 Estudi de l'YBaCuO

Després d'haver realitzat tot el procés anterior de pirolejatge d'una mostra (impregnar-la de la dissolució del material superconductor i tenir-la contactada), podem estudiar les seves propietats superconductores, fet realitzat, quan varem introduir la mostra al PPMS.

En estudiar el comportament magnètic d'aquesta mostra impregnada d'YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> s'obté el gràfic 1.

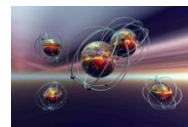


Gràfic 1: Densitat de corrent en front al camp magnètic aplicat

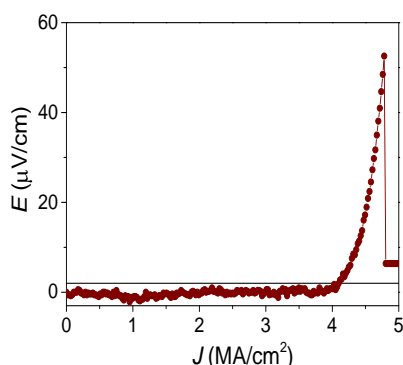
(\*On: Jc – Densitat de corrent crítica; H – Camp magnètic; E – Voltatge)

Al gràfic 1 (Jc en funció de H) podem veure l'evolució de la densitat de corrent crítica mesurada per la mostra a diferents camps magnètics i temperatures. Veiem que aquesta disminueix tant en augmentar el camp magnètic com la temperatura.

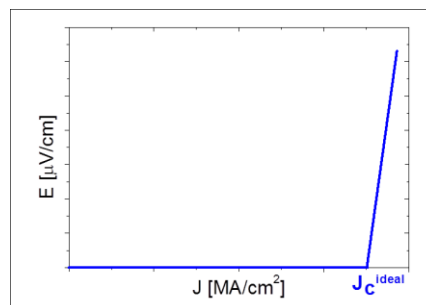
Al gràfic 2 (E en funció J) podem observar que el voltatge es manté estable a 0  $\mu$ /cm dins de l'error fins a arribar a 4 MA/cm<sup>2</sup>, aquestes variacions no són més que soroll de fons produït pel voltatge ja present a l'ambient. Les màquines de l'ICMAB són molt precises. A partir d'aquest valor, es comença a elevar de manera que la mostra comença a presentar voltatge creixent (dissipació) a més densitat de corrent. Això significa que la força de Pinning (Fp), és a dir, la força de l'ancoratge de vòrtexs, comença a ser inferior a la força de Lorentz. Per tant, els vòrtexs que es mantenen estables i per on passava el camp magnètic, deixen d'estar tan arrelats, es comencen a moure, i consegüentment, la mostra comença a tenir resistència elèctrica i voltatge de nou.



En aquest moment definim el corrent màxim que pot passar per la mostra sense dissipar com a densitat de corrent crítica ( $J_c$ ).



Gràfic 2: Comportament del voltatge en front a la densitat de corrent



Gràfic 3: Comportament i densitat de corrent ideals.

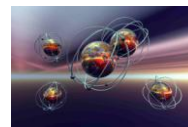
El gràfic 3 E-J mostra el comportament d'una mostra ideal. És fàcilment observable que el gràfic real obtingut E-J (gràfic 2) conté diferències front al gràfic ideal 3 ja que un augment de J condueix a un augment de la resistència elèctrica, i la força de Pinning dels vòrtexs disminueix. Per tant començarien a moure's, provocant variacions a l'hora d'assumir el  $J_c$  ideal, i creant dissipacions d'electricitat, seguit de l'aparició i augment de nou de la seva resistència elèctrica.

També podem comparar el gràfic obtingut en l'estada a l'ICMAB feta amb una mostra pura de YBaCuO amb d'altres que contenen en la seva estructura nanocompòsits<sup>8</sup>. Tal i com ja hem dit anteriorment, aquests nanocompòsits ajuden al material a obtenir uns majors valors de  $J_c$ , a la mateixa temperatura i camp magnètic, que són millors que un  $YBa_2Cu_3O_7$  sense nanocompòsits.

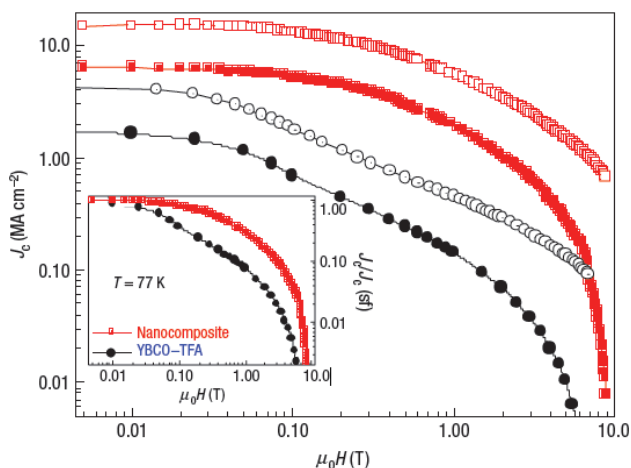
Als gràfic 4 i 5 és observable la diferència entre un  $YBa_2Cu_3O_7$  amb nanocompòsits i d'un model estàndard sense, ambdós a 77 i 65 K. En negre podem veure el material YBCO - TFA estàndard, el material que hem mesurat durant l'estada a l'ICMAB, amb la seva densitat de corrent que decau més ràpidament amb el camp magnètic aplicat, començant a 2  $MA/cm^2$  a 77 K fins a arribar a 0  $\mu V/cm$ , quan el camp magnètic aplicat és de casi 10 T. En diferents colors és observable una corba del YBCO amb nanocompòsits. Aquest cop, el material té un major valor de la seva densitat de corrent front al camp magnètic i temperatura. La densitat de corrent

<sup>8</sup> Nanocompòsits: Diferents components que s'afegeixen a un material per tal de millorar-lo i millorar els seus punts crítics.

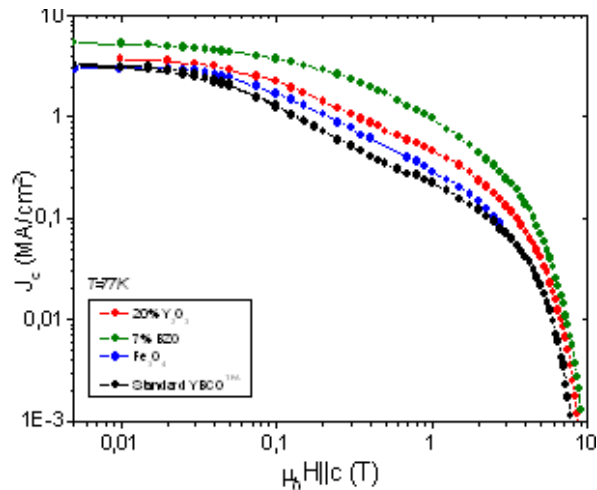




màxima és de quasi 10 MAcm<sup>-2</sup> a 77 K i arriba a 0 μV/cm quan el camp magnètic aplicat és de 10 T.



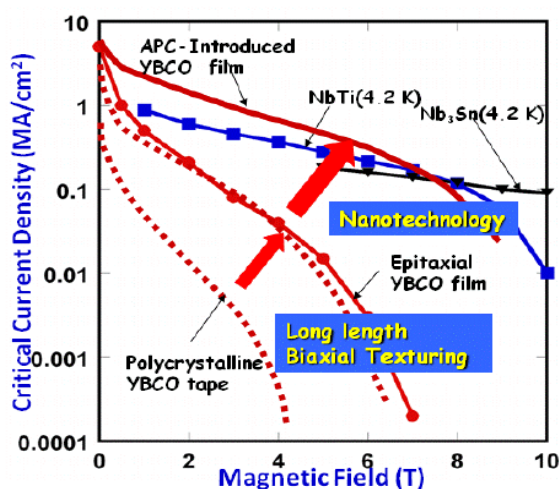
Gràfic 4: Comparació del model standard i model amb nanocompòstis d'un gràfic Jc-H



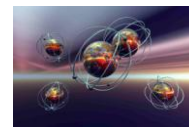
Gràfic 5: Comparació del model standard i model amb nanocompòstis d'un gràfic Jc-H

Si comparem el gràfic 1 (obtingut en les mesures del ICMAB) amb les corbes de color negre dels gràfics 4 i 5 podem reconèixer que són molt semblant entre sí i a la corba YBCO-TFA, sense nanocompòstis.

Per altrabanda, també el podem comparar amb altres materials i variacions del YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> amb i sense nanocompòstis (gràfic 6). En són mostrats diferents materials: l'YBCO en forma cristal·lina o standard, una fina pel·lícula epitaxial d'YBCO, i els que contenen qualsevol variació de nanocompòstis amb centres d'ancoratge artificials (APC). També hi apareixen comparats els valors de corrent per dos superconductors de baixa temperatura, el NbTi (a una temperatura de 4,2 K) i Nb<sub>3</sub>Sn també a 4,2 K. L'YBCO modificat amb nanocompòstis a 77 K té característiques semblants al NbTi i Nb<sub>3</sub>Sn, a molt més baixa temperatura si ens fixem en els valors de la densitat de corrent quan s'hi



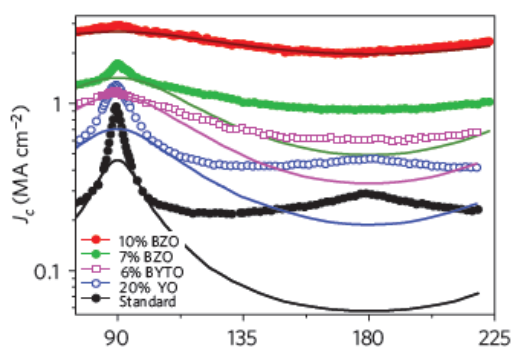
Gràfic 6: YBaCuO i altres materials amb i sense nano-compòstis, comparats en un gràfic J-H



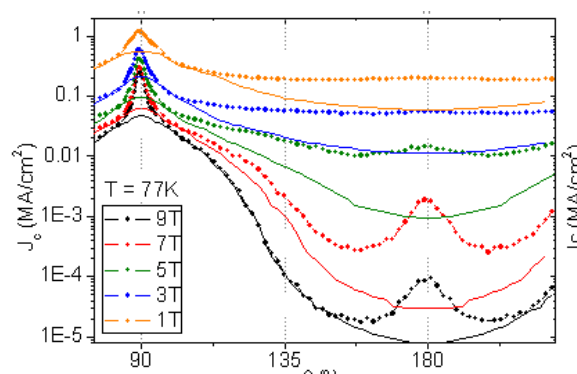
aplica un camp magnètic.

Cal destacar que l'YBaCuO sense nanocompòsits no té comparació amb les característiques de materials a baixa temperatura, però el que si te nanocompòsits sobrepassa les característiques superconductores dels materials com NbTi, entre d'altres. Això ens pot estalviar una despesa econòmica a l'hora de no haver de disminuir a temperatures tan baixes.

Al gràfic 7 es pot observar i comparar la densitat de corrent front a l'angle d'incisió dels vòrtexs als materials, siguin per la mostra l'YBaCuO estàndard amb nanocompòsits diferents.



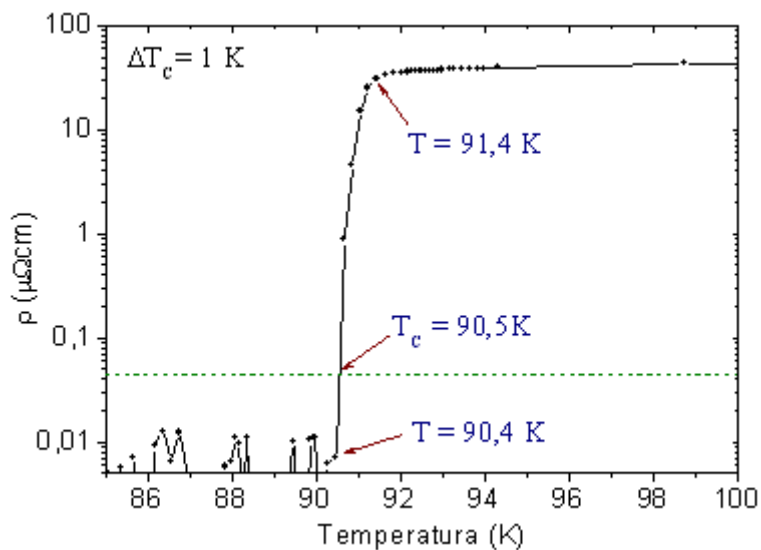
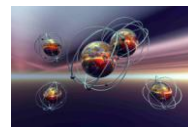
Gràfic 7: Gràfic corba  $J_c$  en front a a l'angle d'incisió dels vòrtexs



Gràfic 8: Gràfic corba  $J_c$  en front a a l'angle d'incisió dels vòrtexs

Podem veure que als 90° d'incisió dels vòrtexs, què és el lloc on entren a ancorar els plans de  $\text{CuO}_2$  definits anteriorment, als materials esmentats a la llegenda la densitat de corrent es la major a la que arriben tots els materials, ja sigui l'estàndard o els materials amb diferents nanocompòsits, ja que els 90° són la forma d'incisió buscada per a una major densitat de corrent. Observem una disminució de la màxima  $J_c$  en un YBaCuO estàndard i amb certs nanocompòsits. També es pot veure que en tots els angles la introducció de nanopartícules en el material fa que tingui majors valors de corrent crítica. En aquest gràfic busquem aquell nanocompòsit que proporcioni una màxima  $J_c$  a qualsevol angle d'incisió.

Per últim, ressenyar l'estudi de la variació de la  $T_c$  de l'YBaCuO fins a trobar la seva  $T_c$  (gràfic 9)



Gràfic 9: Gràfic de la disminució de la temperatura de l'YBaCuO

Com a cloenda, podem observar a la figura 25 les diferents temperatures crítiques de diversos materials i en quin any foren descoberts:

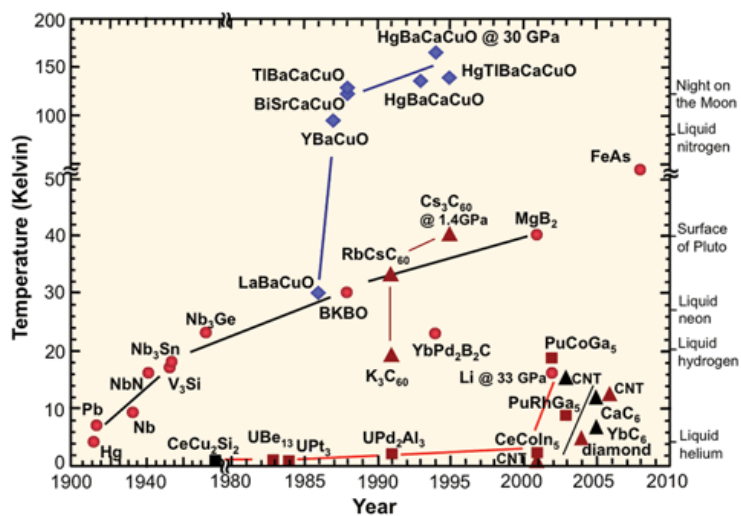
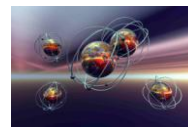


Figura 25: Taula gràfica on es mostra la descoberta de diferents Tc de diferents materials i l'any que van ser descoberts.



## 7. Present i futur de la superconductivitat

### 7.1 Actualitat

Des del seu descobriment fins avui en dia, la superconductivitat ha estat cada cop més present a les nostres vides. Actualment els coneixements sobre aquesta són molt amplis, i encara se segueix estudiant per a l'obtenció de millores d'aquests materials superconductors per al nostre benefici. Avui en dia les aplicacions no en són molt variades però ja comencen sorgir: medicina, electricitat, transport...

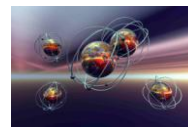
El cablejat per al transport d'electricitat és l'ús més obvi. Els cables superconductors transporten l'electricitat sense cap mena de pèrdua energètica atesa la falta de resistència del cablejat. Conseqüentment transporten unes densitats de corrents superiors al cablejat de coure. El problema que presenta però, és que no poden estar a les torres metàl·liques, ja que el cable no és suficientment fort per aguantar suspès en l'aire. La solució restant és fer passar el cablejat per sota terra.

En el cas de la medicina, per exemple, gràcies a l'efecte Josephson, els superconductors poden utilitzar-se per mesurar camps magnètics. Això s'aconsegueix mitjançant un dispositiu anomenat SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). De fet els SQUIDs són els detectors més sensibles de camps magnètics. El seu ús és de gran importància en els laboratoris científics i en medicina.

Els magnetoencefalogrames registren l'activitat cerebral mitjançant la detecció dels camps magnètics del cervell. Aquesta activitat es veu alterada per determinades malalties com l'Alzheimer. Els camps magnètics generats són molt febles pel que és necessari disposar de sensors extremadament sensibles i precisos. Gràcies als SQUIDs es poden fer mapes funcionals de gran precisió.

D'altra banda, els aparells de ressonància magnètica que s'utilitzen en proves mèdiques d'imatge, funcionen gràcies a imants creats amb superconductors.

Al Japó, Amèrica i Alemanya existeixen i funcionen els tan desitjats trens que leviten, els maglevs. Circulen suspesos per damunt dels rails per forces magnètiques. Utilitzen imants superconductors de baixa temperatura. El tren maglev té tres components bàsics: una font de poder elèctric de grans dimensions, espirals de



metall alineant les vies i imants sota del tren. La major diferència amb un tren comú és que no té motor. L'energia utilitzada pel tren maglev és l'electricitat en els espirals de metall que crea un camp magnètic per moure el tren.

Aquest camp magnètic repel·leix els magnetos sota del tren generant que leviti d'1 a 10 centímetres. El corrent elèctric canvia la polaritat dels espirals magnetitzats constantment, generant que el camp magnètic al davant del tren l'empenyi cap endavant.

Com a inconvenient destaca l'alt cost de les línies, cosa que ha limitat el seu ús comercial. Aquest alt cost es deriva de diversos factors: el primer i principal és l'alt cost de la infraestructura per a la via i el sistema elèctric, i un altre no menys rellevant és l'alt consum energètic. A causa de que en la força electromagnètica el principal factor limitant pel que fa al disseny i al consum és el pes del tren, aquesta tecnologia no és aplicable actualment al transport de mercaderies, la qual cosa limita enormement les possibilitats d'aquest sistema.



Figura 25: Tren maglev:

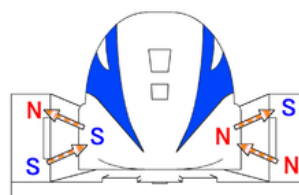
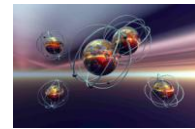


Figura 26: el seu funcionament per imants

Empreses han fabricat imants superconductors amb precisió de posicionament de centèsimes de mil·límetres. Gràcies a aquests avenços, s'han pogut fer imants per Acceleradors de Partícules (com al CERN), fabricació de bobines solenoïdals d'alt camp magnètic i alta homogeneïtat de camp per a l'experimentació física i emmagatzemadors d'energia superconductors. Entre d'altres, amb superconductors d'alta temperatura, s'han desenvolupat una sèrie d'alimentadors de 600 A de corrent superconductors ceràmics, prototips per al LHC<sup>9</sup> del CERN, com també han provat amb el desenvolupament de limitador de corrent superconductor com a transformador de corrent amb elements de YBaCuO.

<sup>9</sup> LHC: és un accelerador i col·lisionador de partícules ubicat a l'Organització Europea per a la Investigació Nuclear (CERN)



## 7.2 Aplicacions de futur

Els plans de futur per a l'ús de la superconductivitat són molt a prop i ja s'estan portant a terme estudis. Per exemple:

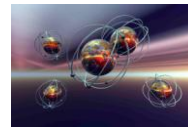
**La generació d'energia.** Utilització d'imants superconductors per aconseguir "ampolles magnètiques" que serveixin per a la generació d'energia nuclear per fusió que no presenta problemes de deixalles radioactives.

**La separació magnètica.** Aquesta s'aplica comercialment per separar materials paramagnètics i materials ferromagnètics: en la indústria del caolí, per separar substàncies magnètiques de l'argila; per a la neteja magnètica selectiva del carbó, és a dir, separar substàncies minerals de substàncies orgàniques.

**La neteja d'aigües contaminades.** Per mitjà de camps magnètics es poden separar les impureses que, en estar dissoltes en aigua, queden ionitzades i al fluir a través d'un camp magnètic poden ser desviades per aquest i ser apartades de l'aigua.

**Acceleradors de molta energia.** S'han pogut desenvolupar electroimants dipolars i quadrupolars oscil·lants de materials superconductors, capaços de generar els camps magnètics més intensos de la història per la seva utilització en acceleradors de partícules d'energia.

**Investigació espacial.** A l'espai, protegits de la llum solar, és fàcil aconseguir temperatures dins del rang funcional dels superconductors d'alta temperatura. En aquest aspecte la NASA ha finançat diferents estudis sobre sensors i elements d'actuació electromecànics amb vista a la seva utilització en naus espacials.



### 7.3 Superconductors del futur

El futur dels materials superconductors és cada cop més i més a prop. Totes les investigacions que es duen a terme ens apropen a una millora d'aquest coneixement i que sigui més eficient. Sotadament, s'estan investigant els que podrien ser els materials superconductors revolucionaris: el grafè i l'estanyè.

El grafè promet proporcionar molt del que necessitem avui en dia: energies netes i tecnologies adequades per netejar els gasos d'efecte hivernacle, així també com els residus tòxics. I de fet, aquest, prové del grafit, encara que té unes propietats molt diferents. Aquest material, estructuralment, és una capa plana d'àtoms de carboni empaquetats en una xarxa cristal·lina en forma de bresca. Enrotllada, formant fullerenes (reben sovint el nom de buckyesferes), donant lloc als nanotubs de carboni; si s'apila en capes és el grafit dels nostres llapis.

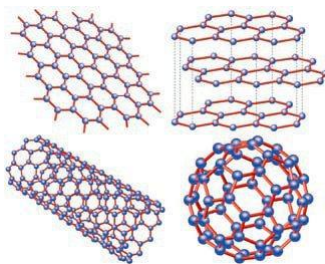
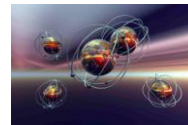


Figura 27: Estructura del grafè

Els físics d'origen rus Andre Geim i Konstantin Novoselov, el van obtenir per primera vegada al 2004. Els investigadors van aïllar el grafè a partir del grafit amb una cinta adhesiva.

En electrònica, el grafè és un superconductor, fins i tot a temperatura ambient. El grafè condueix la calor a un valor superior a 5000 W/metre Kelvin, molt millor que la resta d'estructures de carboni, com ara els nanotubs de carboni, el grafit i el diamant. Això fa del grafè un material ideal per al transport de calor en els processadors superràpids dels ordinadors. També és el material més transparent de tots, això el fa molt apropiat per a les pantalles tàctils i la fabricació d'elèctrodes en els panells solars. Per tant, podem dir que el grafè està creant una febre mundial revolucionària.

L'altre material esmentat, l'estanyè és un material d'una fina pel·lícula d'un únic àtom de gruíx, provinent de l'estany. El estanyè podria augmentar la velocitat i reduir el



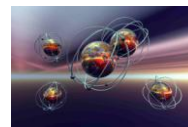
consum d'energia de la propera generació de processadors. Ha estat descobert per un equip d'investigadors del SLAC National Accelerator Laboratory (EUA). Aquest material, que de moment només és un model teòric, és el que els científics anomenen un 'aïllant topològic'. Aquests són elements que, per la seva configuració, només condueixen l'electricitat en la seva capa més externa. En el cas de l'estanyè, com és d'un únic àtom de gruix, és en si mateix la seva capa externa. Mentre estiguin a la superfície, els electrons viatjaran sense cap resistència.

Un cas en procés d'investigació és també l'YBaCuO a temperatura ambient. Al 2013, un equip d'investigadors va aconseguir que el YBaCuO es tornés superconductor a temperatura ambient, per un breu període de temps, en ser irradiat per polsos de làser infrarojos. Un canvi estructural gairebé imperceptible és suficient perquè el YBaCuO es transformi en superconductor a temperatura ambient durant uns breus picosegons.

Tot va ser possible gràcies a un experiment amb el làser d'electrons lliures de la Universitat de Stanford, la màquina de raigs-X més potent del món. L'experiment de Mankowsky va revelar que el pols infraroig augmenten temporalment el gruix de la capa doble d'òxid de coure uns dos picòmetres, alhora que la capa interior es fa més prima en la mateixa proporció. Aquest canvi gairebé imperceptible és suficient perquè el YBaCuO es transformi en superconductor a temperatura ambient durant uns breus picosegons.

Si s'aconseguís tenir superconductors a temperatura ambient de forma estable s'evitaria haver de refredar-los. D'aquesta manera, moltes de les seves aplicacions estarien un pas més prop de ser realitat.





## 8. Conclusions

M'omple d'orgull i satisfacció haver realitzat aquest treball de recerca. Gràcies al fet d'haver-lo realitzat he provat un petit tast dels fascinant món de la superconductivitat, i ara que he acabat, el meu cos té ganes d'aprendre més sobre ella.

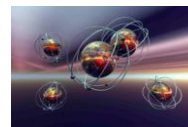
He arribat al meu objectiu, que es trobava definit per: saber què és la superconductivitat, quan i com es dona, quines són les seves característiques, quins tipus de superconductors hi han, l'enteniment de com s'estructura a nivell atòmic, una mica d'història del magnetisme i l'electromagnetisme, que són les matèries que acabaran per descobrir la superconductivitat, què és l'YBaCuO, la seva importància en aquest món, les característiques d'aquest compost superconductor, quins beneficis aporta; què depara el futur pròxim per als superconductors.

Ha sigut una experiència molt enriquidora el fet d'haver pogut accedir a les instal·lacions de l'ICMAB, d'haver pogut accedir a l'ajuda de la Dra. Anna Palau entre d'altres i que em proporcionés l'ajuda que necessités per completar aquesta investigació, ja que no cada dia tothom té una oportunitat tan única com aquesta.

El fenomen de la superconductivitat ja forma part integrant de les nostres vides.

El que aconseguirà o no esdevenir un producte de gran consum depèn exclusivament dels resultats de la investigació sobre superconductors a temperatura ambient. En qualsevol cas, és evident que aquests materials suposaran en un futur immediat un element absolutament important en la nostra civilització: l'era de les tecnologies més enllà de la resistència elèctrica sembla trobar-se, en aquests moments, a la volta de la cantonada i nosaltres els qui estem immersos en la cursa del saber amb l'activitat més propera a aquest tema.

Com a millores d'aquest treball, es pot proposar la comparació de l'YBaCuO amb l'estudi d'un altre material, avantatges i desavantatges; beneficis actuals de l'YBaCuO, realitzar la busca del millor material o compost superconductor, possibilitats de millora de la superconductivitat d'alta temperatura o l'influència de la superconductivitat al món present.



## Webgrafia i Bibliografia

R. WEST, Anthony. *Solid State Chemistry and its applications*. 1990

L. Smart ; E. Moore. *Solid State Chemistry: An introduction*. 1992

M.A. Alario, J.L. Vicent. Ed. Eudema. *Superconductividad*. 1991

PÚBLIC. *Institut d'estudis catalans. Els premis nobel de l'any 2003*. 2003.

FONTCUBERTA I GRIÑÓ, Josep. Els superconductors d'alta temperatura. ICMAB-CSIC

· WIKIPEDIA. *Superconductivitat*. [en línia]

<<http://ca.wikipedia.org/wiki/Superconductivitat>> [27/6/14]

· BLOGSPOT. *La superconductivitat i les seves aplicacions*. [en línia]

<<http://superconductivitat.blogspot.com.es/2007/05/treball-de-recerca-superconductivitat.html>> [15/5/14]

· TEXTOS CIENTÍFICOS. *Superconductores*. [en línia]

<<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-metales/superconductores>> [15/5/14]

· BLOGSPOT. *Superconductors i levitació magnètica*. [en línia]

<<http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/enlace-metales/superconductores>> [30/6/14]

· WIKIPEDIA. *Superconductividad*. Las teorías principales. [en línia]

<[http://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad#Las\\_teor.C3.ADas\\_principales](http://es.wikipedia.org/wiki/Superconductividad#Las_teor.C3.ADas_principales)> [25/7/14]

· WIKIPEDIA. *Stephen gray*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Stephen\\_Gray](http://es.wikipedia.org/wiki/Stephen_Gray)>

[25/7/14]

· WIKIPEDIA. *Michael Faraday*. [en línia]

<[http://ca.wikipedia.org/wiki/Michael\\_Faraday](http://ca.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday)> [25/7/14]

· WIKIPEDIA. *Francesc Joan Domènec Aragó*. [en línia]

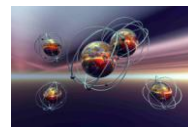
<[http://ca.wikipedia.org/wiki/Francesc\\_Joan\\_Dom%C3%A8nec\\_Arag%C3%B3#Electromagnetisme](http://ca.wikipedia.org/wiki/Francesc_Joan_Dom%C3%A8nec_Arag%C3%B3#Electromagnetisme)> [25/7/14]

· WIKIPEDIA. *Charles-Augustin de Coulomb*. [en línia]

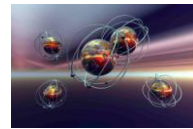
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin\\_de\\_Coulomb](http://es.wikipedia.org/wiki/Charles-Augustin_de_Coulomb)> [25/7/14]

· WIKIPEDIA. *Heinrich Lenz*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Lenz](http://es.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Lenz)>

[8/9/14]

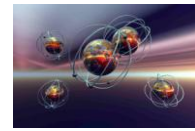


- WIKIPEDIA. *Joseph Henry*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Henry](http://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Henry)> [8/9/14]
- WIKIPEDIA. *Llei de Biot-Savart*. [en línia] <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Llei\\_de\\_Biot-Savart](http://ca.wikipedia.org/wiki/Llei_de_Biot-Savart)> [8/9/14]
- WIKIPEDIA. *Teoria BCS*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_BCS](http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_BCS)> [8/9/14]
- EL RINCÓN DEL VAGO. *Electromagnetismo*. [en línia] <[http://html.rincondelvago.com/electromagnetismo\\_2.html](http://html.rincondelvago.com/electromagnetismo_2.html)> [27/6/14]
- WIKIPEDIA. *Lee De Forest*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Lee\\_De\\_Forest](http://es.wikipedia.org/wiki/Lee_De_Forest)> [8/9/14]
- WIKIPEDIA. *Ecuaciones de Maxwell*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones\\_de\\_Maxwell](http://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Maxwell)> [17/11/14]
- WIKIPEDIA. *Equacions de Maxwell*. [en línia] <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Equacions\\_de\\_Maxwell](http://ca.wikipedia.org/wiki/Equacions_de_Maxwell)> [17/11/14]
- WIKIPEDIA. *Georg Simon Ohm*. [en línia] <[http://es.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Simon\\_Ohm](http://es.wikipedia.org/wiki/Georg_Simon_Ohm)> [17/11/14]
- WIKIPEDIA. *Efecte Meissner*. [en línia] <[http://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte\\_Meissner](http://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_Meissner)> [27/6/14]
- WIKIPEDIA. *Llei de Lorentz*. [en línia] <[http://ca.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a\\_de\\_Lorentz](http://ca.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7a_de_Lorentz)> [17/11/14]
- UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE MADRID. *Materiales superconductores: tecnología clave en el siglo XXI*. [en línia] <[http://www.uam.es/ss/Satellite/es/1234886344485/1242662445968/notcientifica/notCientific/Materiales\\_superconductores:\\_tecnologia\\_clave\\_en\\_el\\_siglo\\_XXI.htm](http://www.uam.es/ss/Satellite/es/1234886344485/1242662445968/notcientifica/notCientific/Materiales_superconductores:_tecnologia_clave_en_el_siglo_XXI.htm)> [2/12/14]
- BIBLIOTECA DIGITAL. IV. *Algunas aplicaciones de la superconductividad*. [en línia] <[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/064/htm/sec\\_11.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/064/htm/sec_11.htm)> [2/12/14]
- 4UPRESS. *Electromagnetismo: Aplicaciones en la vida real*. [en línia] <<http://www.4upress.com/index.php/ciencia-y-tecnologia/ciencia/item/432-electromagnetismo-y-3-aplicaciones-en-la-vida-real#.VLb6ttKG9OJ>> <<<< 2/12/14]
- TARINGA. *Superconducotres: el futuro presente*. [en línia] <<http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/6029641/Superconductores-el-futuro-presente.html>> [2/12/14]



- BLOGSPOT. *La superconductividad en la medicina*. [en línia]  
<<http://deividorozco.blogspot.com.es/2010/07/la-superconductividad-en-la-medicina.html>> [2/12/14]
- EL CONFIDENCIAL. *Los superconductores a temperatura ambiente, un paso más cerca*. [en línia] <[http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-12-24/los-superconductores-a-temperatura-ambiente-un-paso-mas-cerca\\_600241/](http://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-12-24/los-superconductores-a-temperatura-ambiente-un-paso-mas-cerca_600241/)> [27/12/14]
- ELCORREO.COM. *El estaño podría ser el primer superconductor a temperatura ambiente*. [en línia]  
<<http://www.elcorreo.com/innova/investigacion/20131125/estaneno-superconductor-201311251750-rc.html>> [2/12/14]
- EL DE ABAJO. *El grafeno y la nueva era del carbono*. [en línia]  
<<https://noticiasdeabajo.wordpress.com/2013/07/07/el-grafeno-y-la-nueva-era-del-carbono/>> [2/12/14]
- WIKIPEDIA. *Partícula virtual*. [en línia]  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula\\_virtual](http://es.wikipedia.org/wiki/Part%C3%ADcula_virtual)>. [2/12/14]

ANNEX 1: Efectes principals  
de la superconductivitat



### Efecte Joule:

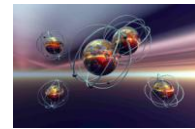
Es coneix com a efecte Joule al fenomen irreversible pel qual si en un conductor circula corrent elèctric, part de l'energia cinètica dels electrons es transforma en calor a causa dels xocs que sofreixen amb els àtoms del material conductor pel qual circulen, elevant la temperatura del mateix. El nom és en honor al seu descobridor, el físic britànic James Prescott Joule. Aquest efecte es produeix quan el material deixa de ser superconductor i comença a dissipar.

### Efecte Meissner:

És un efecte propi i gairebé únic dels superconductors. Quan apropem un imant que indueix corrent en el material superconductor, aquest corrent crea una força magnètica oposada a la de l'imat que provoca la repulsió de tots dos materials. (conegut amb el nom de diamagnetisme).

Va ser descobert per Walter Meissner i Robert Ochsenfeld el 1933, mesurant la distribució de flux a l'exterior de mostres de plom i estany, refredades per sota de la seva temperatura crítica en presència d'un camp magnètic. Walter Meissner va establir que un superconductor es converteix en un diamagnètic perfecte quan aquest sobrepassa la temperatura crítica, de manera que el camp magnètic en el seu interior s'anul·la completament, és a dir, que no permet que cap camp magnètic entri al seu interior mitjançant una força de repulsió. És com si el superconductor fos un mirall ja que de fet el superconductor crea una imatge de l'imat. Atès que el camp és solenoïdal (totes les línies del camp són tancades), el camp es corba fins l'exterior del material, de manera que el camp magnètic generat per l'imat no pot penetrar el cos superconductor. Aquest fet es pot donar quan els cossos estiguin estàtics o en moviment, ja que la imatge creada pel superconductor és immediata i permet a l'imat flotar.

Aquest efecte crea una de les curiositats de la superconductivitat més conegudes: l'imat flotant. De fet, aquesta ha estat la principal característica per diferenciar els materials superconductors dels materials conductors perfectes, que no presenten



l'efecte Meissner. A més a més, l'estat de magnetització d'un conductor perfecte depèn de les condicions en què li ha arribat el camp magnètic. En canvi, l'estat de magnetització d'un superconductor només depèn de les condicions instantànies del camp aplicat i la temperatura.

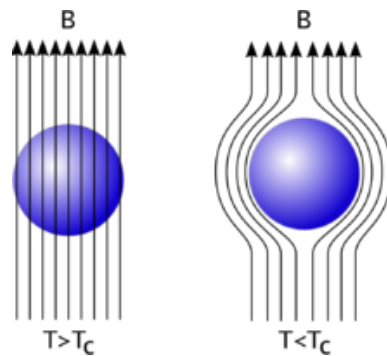


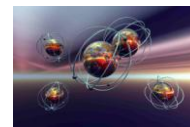
Figura 1: Efecte meissner explicat gràficament

## Efecte túnel

És conegut com a efecte de Penetració de barrera i fou descobert pel físic Giaver. Aquest és un efecte impossible des del punt de vista de la física clàssica. Els electrons es poden representar com funcions d'ona, de tal manera que existeix una certa probabilitat que un electró pugui anar des d'un metall a un altre entravessant una barrera aïllant estreta, que pot ser el buit o un òxid.

Si situem un metall al costat d'un altre, separats només per una simple barrera, com podria ser, per exemple, l'òxid d'una superfície, existeix certa possibilitat (molt petita) que l' electró travessi aquell "túnel" i aparegui a l'altre costat, en l'altre metall.

Per a que és pugui dur a terme l'efecte túnel fan falta dues condicions: la primera és que els electrons només poden anar d'una òrbita ocupada de l'àtom a una desocupada. I la segona és que han de conservar l'energia, és a dir que només és dóna l'efecte túnel en el cas que hi hagi desigualtat d'energies entre un metall i l'altre.



## Parell de Cooper

Cooper, Bardeen i Schrieffer estableixen la teoria BCS, basada en què dos electrons poden ser atrets tots dos per un mateix ió positiu i així ajuntar-se per parelles d'electrons (parells de Cooper). Aquests es poden considerar quasipartícules, i estan lligats per un fonó, és a dir, per una vibració de la xarxa cristal·lina d'un material. Quan un parell d'electrons es mou a través de la xarxa cristal·lina, deixa anar una estela que és aprofitada pels següents parells com a camí a través de la xarxa, evitant col·lisions amb altres partícules. També cal remarcar, que la temperatura és propera al zero absolut, i per tant, l'activitat molecular es molt reduïda.

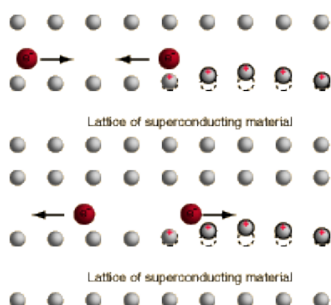


Figura 2: Descripció dels parells de Cooper

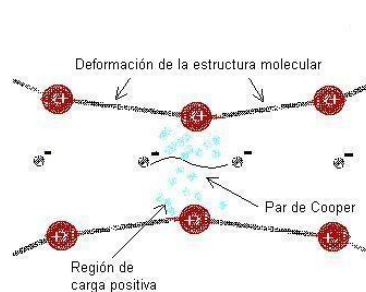


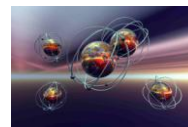
Figura 3: Descripció dels parells de Cooper

## Efecte Josephson

És bàsic en les tècniques actuals per tal de crear circuits amb superconductors, i d'aquesta manera poder aprofitar la seva gran característica.

L'efecte Josephson és descobert quan Brian D. Josephson, amb 22 anys, suggereix que pot existir l'efecte túnel entre dos superconductors. Després de realitzar els càlculs necessaris, va esbrinar moltes diferències entre l'efecte túnel normal descobert per Giaver i l'efecte Josephson. La primera de totes és que en l'efecte Josephson hi ha corrent túnel de parells de Cooper, en canvi en el cas anterior el túnel era d'electrons individuals. A més a més, en l'efecte Josephson, les barreres són de menor espessor que en l'altre cas, ja que són més estretes, menors que la longitud de coherència (mida dels parells de Cooper). D'aquesta manera es pot demostrar que hi ha una corrent continu a través de la barrera, fins al moment en que les energies s'igualen. No obstant, es pot implicar una corrent extern que ho desiguali, i que per tant, el corrent que passa per les unions Josephson (nom amb





que es coneix les partícules d'aquest efecte) no s'aturi, sense que tingui caiguda de potencial. La unió entre els dos superconductors, que és alhora la barrera, no cal que sigui un aïllant i un òxid en el cas de l'efecte Josephson, ja que també es pot obtenir el mateix tipus d'unions dèbils mitjançant contactes com una agulla o bé separant els superconductors, per una capa fina d'un metall en estat normal. La mida dels parells de Cooper és una bona indicació per trobar una bona magnitud d'aquesta unió dèbil.

Una altra característica important és que per a que no existeixi pèrdua de potencial és important que la intensitat del corrent no pot superar una certa intensitat crítica ( $I_0$ ), valor que depèn de la temperatura i de les característiques de la barrera

## Vòrtexs

Els vòrtex són els fils de camp magnètic que trenquen l'efecte Meissner i permeten la penetració del camp magnètic a l'interior del superconductor de forma quantitzada, a l'estat mixt dels superconductors de tipus II.

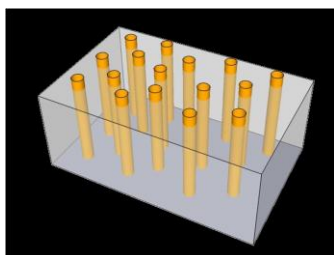
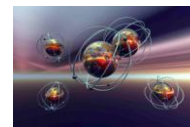


Figura 4: Manera d'incisió dels vòrtexs al material superconductor



Figura 5: Forma dels vòrtexs

Els vòrtex són una part molt important d'aquests superconductors, ja que es mantenen fixos dins del material fins a cert punt, quan. Quan apliquem un camp magnètic  $H$  molt gran o una corrent  $J$  molt gran els vòrtex es comencen a moure. A partir d'aquí, al moure's creen dissipació elèctrica i per tant l'element superconductor torna a començar a tenir resistència. Quan la Força de Pinning ( $F_p$ ), és a dir, la força que ancora als vòrtexs, es inferior a l'anomenada força de Lorentz ( $F_L$ ), que depèn del camp magnètic i el corrent aplicats, la mostra comença a dissipar. La dissipació es produirà si la força de Lorentz és igual o superior a la força de Pinning.



L'ancoratge dels vòrtexs es produeix en uns zones de superconductivitat reduïda dins del material. Per exemple són bons centres d'ancoratge els plans de CuO (Coure i Oxigen), que son plans superconductors i favorables.

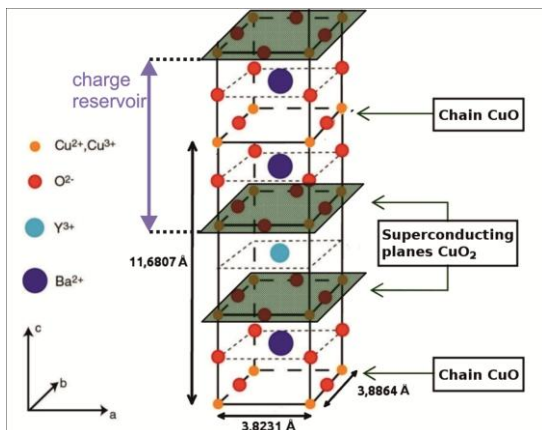


Figura 6: Plans per on s'ancoren els vòrtexs

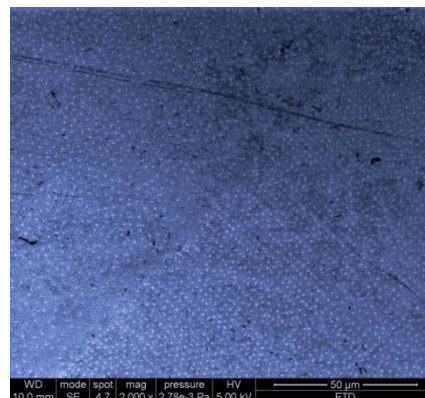


Figura 7: Fotografia d'una mostra travessada per milers de vòrtexs d'ínfim tamany

Per a evitar el moviment dels vòrtexs, a més dels centres d'ancoratge naturals dins del material, necessitem aplicar "nano-trampes" amb l'ajuda de l'enginyeria de defectes, que ens permet controlar l'ancoratge dels vòrtexs i millora les seves propietats. Una possibilitat és la d'introduir nanopartícules que milloren les propietats del material.

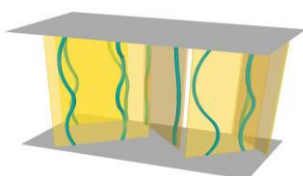


Figura 8: Anclatge de vòrtexs amb diferents nanocompòsits

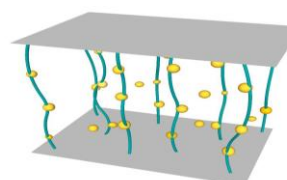
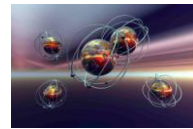


Figura 9: Anclatge de vòrtexs amb diferents nanocompòsits

Les propietats que es poden millorar són la zona on s'ancoren els vòrtexs o la força amb què s'ancoren, ja que podem controlar la quantitat i eficàcia de zona no superconductora en la que els vòrtex es podran ancorar. D'aquesta manera, amb un bon control de les nanopartícules es pot augmentar la quantitat de camp magnètic aplicat i la quantitat de corrent que pot transportar.

ANNEX 2: Fotografies de la meva  
estada a l'ICMAB

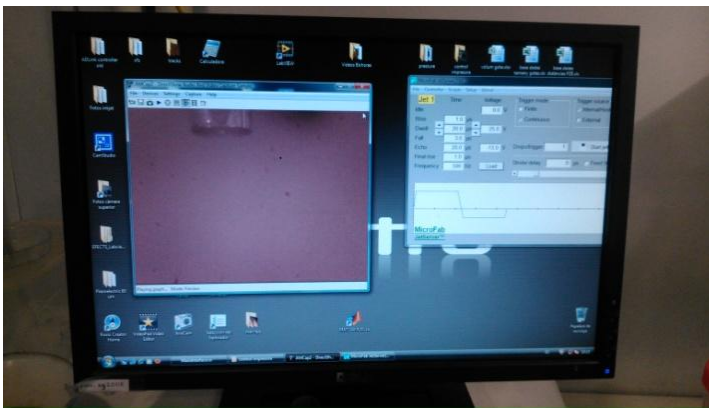
# YBaCuO: un material superconductor amb futur



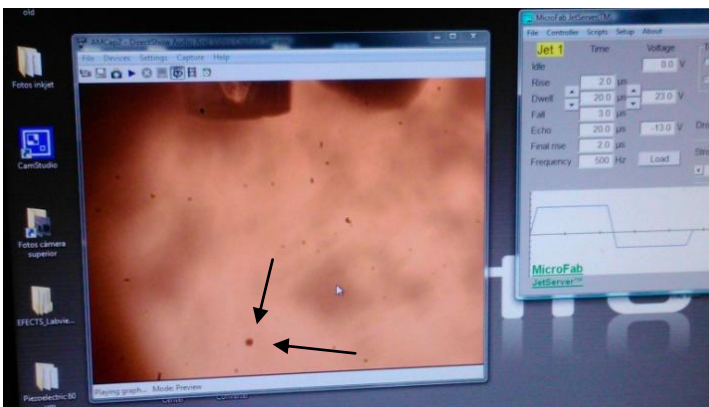
Imatge 1: Mostra pirolejada



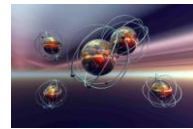
Imatge 2: Equip de l'ICMAB fent créixer les mostres



Imatge 3: Programa controlador de l'injector



Imatge 4: Gota a gota de l'injector



Imatge 5: Procés per a contactar una mostra pirolejada



Imatge 6: Procés per a contactar una mostra pirolejada



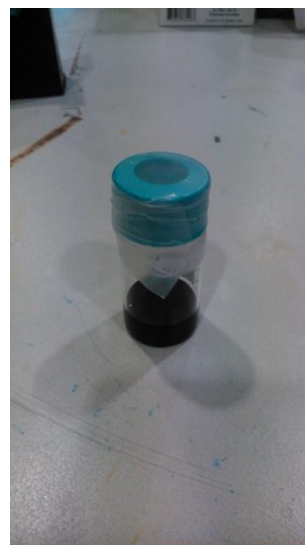
Imatge 7: Grans forns de creixement



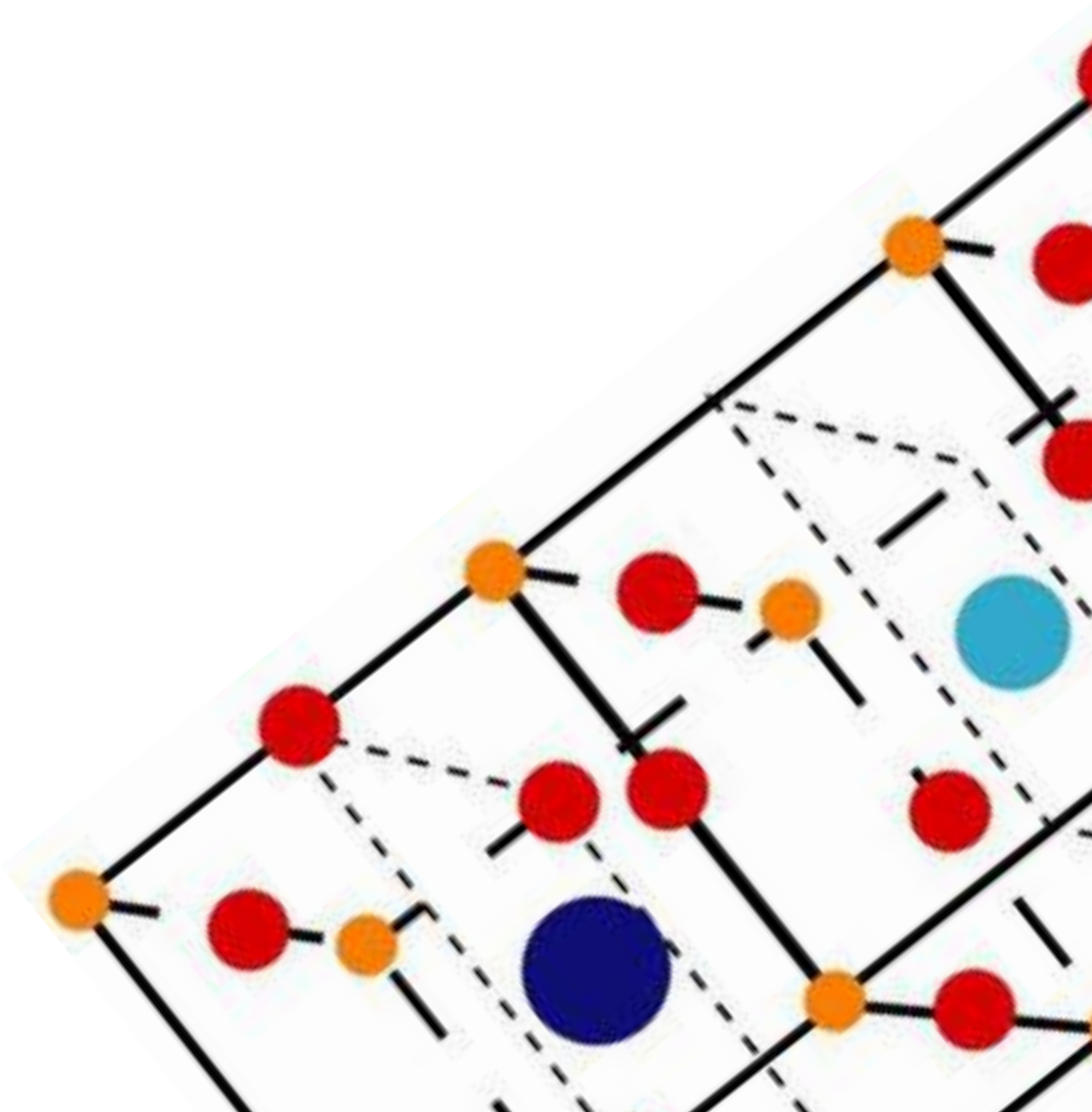
Imatge 8: PPMS



Imatge 9: Sala on es troba el PPMS i el seu controlador



Imatge 10: Mostra de dissolució d'YBaCuO



YBaCuO:

UN MATERIAL

SUPERCONDUCTOR

AMB FUTUR