



**LARGA VIDA A LA
SUPERCONDUCTIVIDAD**

**POR AGUSTÍN CAMÓN,
JUAN JOSÉ MAZO Y DAVID ZUECO**

Larga vida a la superconductividad

En 2011 hemos celebrado el centenario del descubrimiento de la superconductividad. Se han organizado numerosos actos conmemorativos, exposiciones, charlas y se han publicado cientos de artículos históricos. Pero, ¿qué nos deparará la superconductividad en los próximos años?

La historia de la superconductividad está llena de sorpresas y lo que nadie duda es que seguirá dándonos. Para empezar, su descubrimiento por Onnes en la primavera de 1911. El objetivo fundamental de Kamerling Onnes era licuar el Helio. Una vez que lo hubo logrado se dedicó a estudiar las propiedades de los materiales a bajas temperaturas. Eligió el mercurio por ser fácil de purificar y lo que encontró, al medir su resistencia eléctrica en función de la temperatura,

no fue lo esperado. Ni se hacía infinita como pensaba Lord Kelvin, ni constante como decía Matthiessen, ni tendía a cero al hacerlo la temperatura, como postulaba Dewar. Lo que Kamerling Onnes descubrió fue que la resistencia eléctrica del mercurio se hacía cero a 4.2 K. Inesperado y sorprendente.

Hasta 1957 no hubo una teoría microscópica de la superconductividad. La teoría BCS nos enseñó que en un superconductor la corriente se transporta mediante los llamados pares de Cooper, parejas de electrones que se mantienen ligados gracias a su interacción con las vibraciones de la red cristalina. Esta teoría explicaba todos los superconductores que se conocían hasta la fecha y predecía una temperatura crítica (T_c) máxima entorno a 30 K. Pero en 1986, Müller y Bednorz descubrieron un nue-

“Lo que Kamerling Onnes descubrió es que la resistencia eléctrica del mercurio se hacía cero a 4.2 K. Inesperado y sorprendente.”

vo tipo de superconductores basados en materiales cerámicos con una T_c de 35 K que pronto se incrementaría hasta los 93 K. La sorpresa fue que, en estos materiales, no podían ser las vibraciones de la red las que mantenían ligados a los electrones. Aun hoy en día, no se sabe cuál es el mecanismo que los mantiene unidos. La superconductividad de alta temperatura sigue desafiando a la física teórica 25 años después.

Pero la superconductividad ha seguido deparando sorpresas. En 2001, Jun Akimitsu descubrió que el MgB_2 se volvía superconductor a 39 K. Y esto era sorprendente por dos motivos. En primer lugar, porque era un material que llevaba muchos años en las estanterías de los laboratorios, sin que nadie hubiera imaginado que podía ser superconductor. En segundo lugar, porque a pesar de su T_c tan alta, por encima de la que pronosticaba la teoría BCS, en este material los electrones sí que están ligados por las vibraciones de la red. Podríamos decir que es un superconductor “clásico” pero con una T_c sorprendentemente alta. Al contrario de lo que ocurrió con los superconductores cerámicos, todos los intentos para aumentar la T_c del MgB_2 han resultado ser infructuosos.

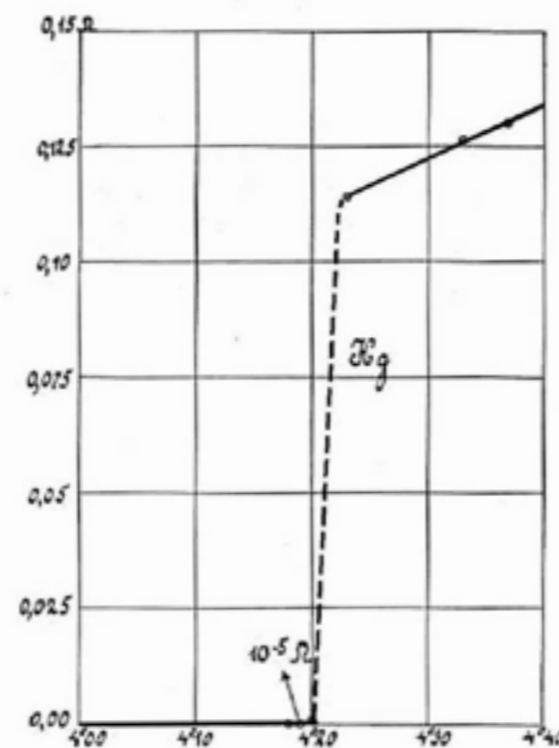
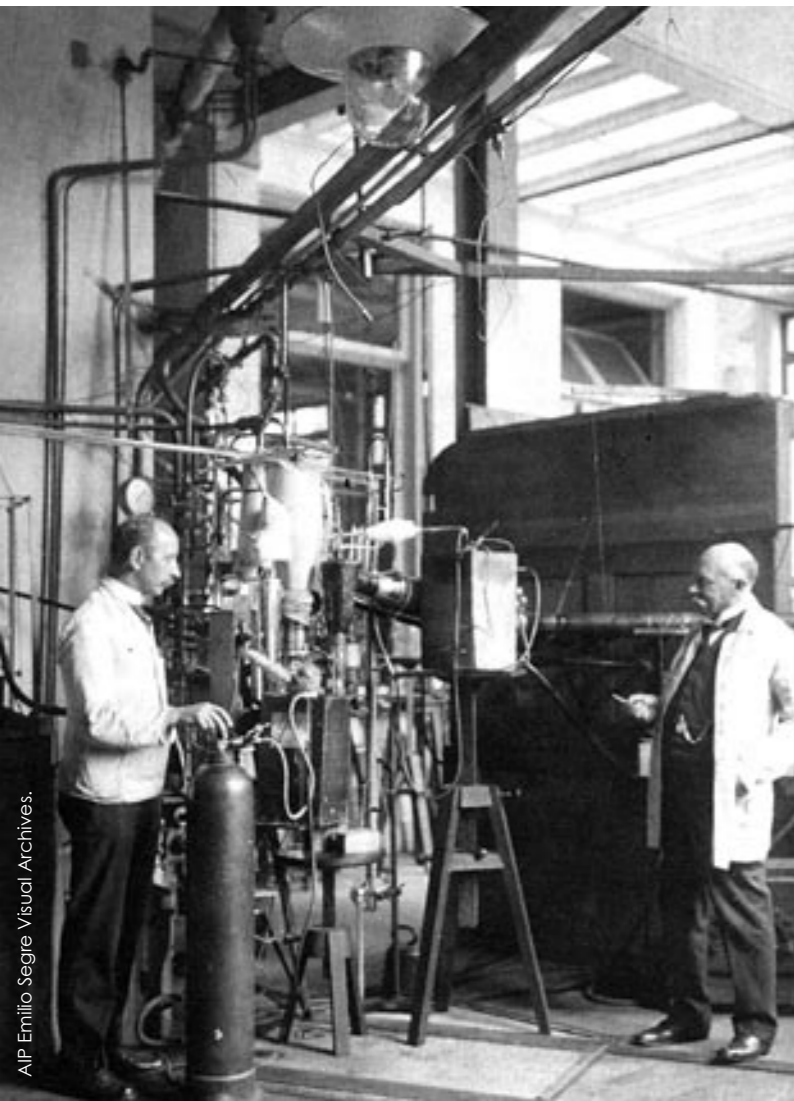
La última sorpresa tuvo lugar en 2006, cuando Ideo Hosono, del Instituto de Tecnología de Tokio, buscando un semiconductor transparente para hacer pantallas planas, descubrió una segunda familia de superconductores de alta temperatura basados en el hierro. Lo sorprendente es que el hierro es magnético y el magnetismo suele inhibir la superconductividad. El enigma sigue sin resolverse. En la actualidad se han conseguido superconductores de esta fa-

milia con una T_c de hasta 56 K y sus propiedades mecánicas hacen de ellos posibles candidatos para su futura aplicación tecnológica.

Además de las numerosas incógnitas que existen entorno al fenómeno de la superconductividad, actualmente aún no tenemos una teoría que nos permita predecir cuándo un nuevo material va a ser superconductor ni cuál será la máxima T_c que podremos alcanzar. El record actual está en un compuesto cerámico con mercurio que, bajo una presión de 23 GPa, alcanza una T_c de 166 K, pero...¿seremos capaces de encontrar superconductores a temperatura ambiente? Hay quien opina que no tendrían aplicaciones prácticas al no ser capaces de transportar altas densidades de corriente. Lo seguro es que la superconductividad nos va a seguir deparando sorpresas, a pesar de los intentos de hacer cada vez más predecibles y menos fortuitos los descubrimientos.

EFFECTO MEISSNER

La resistencia cero no es la única propiedad fascinante de los superconductores. En 1933, Walter Meissner y Robert Ochsenfeld observaron que un campo magnético en el interior de un material superconductor era expulsado completamente, una vez que éste se enfriaba por debajo de T_c , comportándose como un material diamagnético perfecto. Es lo que se llamó efecto Meissner, y es una de las propiedades que definen la superconductividad. Pronto se vio que la respuesta de los superconductores a los campos magnéticos iba a suponer una limitación a la hora de las aplicaciones: pequeños campos magnéticos destruían la superconductividad. Pero en la misma década, Lev Shubnikov descubrió que en ciertas aleaciones metálicas podía existir un estado intermedio, llamado de vórtices, donde el campo magnético penetra en ciertas regiones de la muestra, mientras que el resto de la muestra continúa siendo superconductora



Kamerling Onnes y su ayudante Gerrit Flim frente al licuador de helio en el laboratorio de bajas temperaturas de Leiden (Holanda) y gráfica original de Onnes mostrando la transición superconductora del mercurio a 4.2 K.

Larga vida a la superconductividad

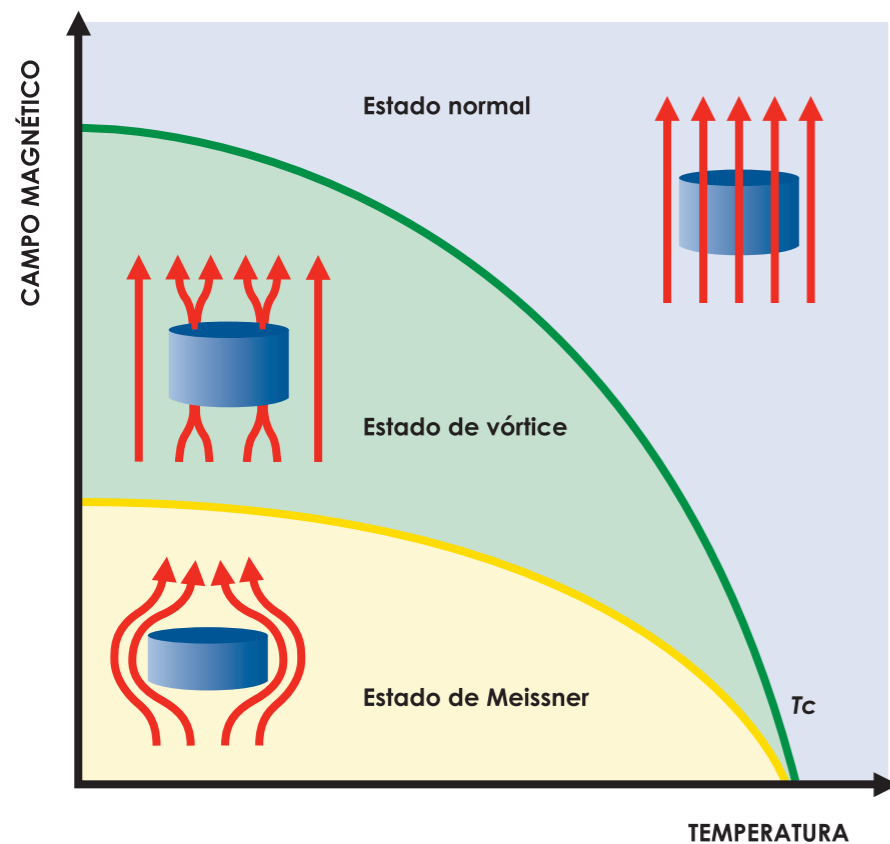
hasta campos magnéticos mucho más intensos. Son los llamados superconductores Tipo II, que han abierto la puerta de las aplicaciones.

EFFECTO JOSEPHSON

No solo de resistencia cero y efecto Meissner vive la superconductividad. En 1962, el joven galés Brian Josephson contaba 22 años y era un brillante estudiante de doctorado de la Universidad de Cambridge. Posiblemente inspirado por las clases de Philip Anderson (premio Nobel de Física en 1977), se propuso estudiar el paso de corriente entre dos superconductores separados por una fina barrera de aislante. Sus cálculos predijeron que dicha corriente era suficientemente grande para ser observada con facilidad, y que mostraba unas propiedades sorprendentes: corriente continua con voltaje cero, pero corriente alterna bajo la aplicación de un pequeño voltaje constante. La predicción de Josephson pronto fue confirmada ex-

perimentalmente en 1963 y reconocida como un avance fundamental con grandes aplicaciones tecnológicas. Su trabajo mereció el premio Nobel de Física de 1973.

El efecto Josephson nos proporciona el método habitual de medir el cociente e/h , donde e es la carga del electrón y h la constante de Planck, dos de las constantes fundamentales de la física. Esa propiedad, conjugada con la posibilidad de medir tiempo con gran precisión, es la base del actual estándar de voltaje. En el voltio patrón miles de uniones Josephson, dispuestas en serie, evolucionan de modo sincronizado bajo la acción de una corriente externa. Y es que, según la teoría de Josephson, cada unión es como un minúsculo péndulo y una red de uniones Josephson un conjunto de péndulos acoplados entre sí y, por lo tanto, es un sistema experimental ideal para probar y aprovechar las predicciones de la física no lineal (caos, localización, coherencia, sincronización...).



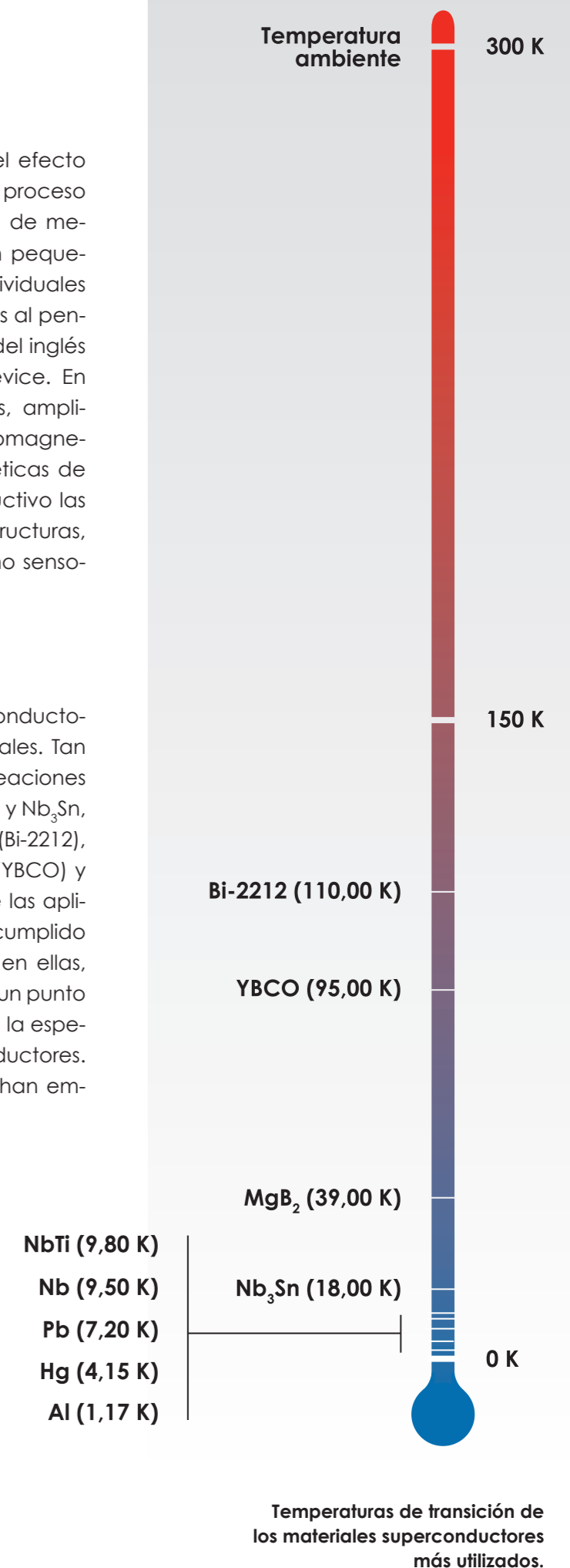
¿Qué ocurre cuando aplicamos un campo magnético a un superconductor? A altas temperaturas y campos magnéticos (región azul) este atraviesa el material y no hay estado superconductor. Cuando se enfría por debajo de la temperatura de transición, el campo es expulsado de su interior (efecto Meissner, región amarilla). Algunos superconductores, los llamados Tipo II, presentan un estado mixto llamado de vórtices (región verde) donde coexisten regiones resistivas con regiones superconductoras. El campo magnético puede penetrar en su interior pero está confinado en vórtices de flujo. El tipo II es el que tiene aplicaciones comerciales ya que presenta las corrientes y campos críticos más elevados.

La segunda de las grandes aplicaciones del efecto Josephson también tiene que ver con un proceso de medida. En particular, con la posibilidad de medir campos magnéticos muy pequeños. Tan pequeños como los generados por moléculas individuales o por las corrientes eléctricas que generamos al pensar. Para ello se utilizan los llamados SQUIDS, del inglés Superconducting Quantum Interference Device. En la actualidad son usados como voltímetros, amplificadores, para estudiar problemas de biomagnetismo, para evaluar las propiedades magnéticas de la materia, para analizar de modo no destructivo las propiedades mecánicas de materiales y estructuras, para realizar exploraciones geofísicas y como sensores de movimiento gravitacionales.

EL FUTURO DE LAS APLICACIONES

A pesar de que se conocen miles de superconductores, muy pocos tienen aplicaciones comerciales. Tan solo seis se utilizan para hacer cables: dos aleaciones metálicas de baja temperatura crítica, el NbTi y Nb₃Sn, tres compuestos cerámicos, el Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+y} (Bi-2212), el Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+y} (Bi-2223) y el YBa₂Cu₃O_{7-y} (YBCO) y por último el MgB₂. Mucha gente piensa que las aplicaciones de la superconductividad no han cumplido las expectativas que se habían depositado en ellas, pero puede ser que actualmente estemos en un punto de inflexión, y que asistamos en pocos años a la esperada generalización del uso de los superconductores. Podemos decir que, hasta la fecha, solo se han empleado donde eran la única alternativa.

A la hora de analizar el presente y futuro de las aplicaciones podríamos hacer dos grupos. En un primer grupo podríamos colocar todas aquellas que son una realidad. Sin duda, la generación de altos campos magnéticos es la más importante. Por un lado, los imanes para resonancia magnética nuclear, tanto para imagen médica como para análisis, son en la actualidad el mayor mercado de los superconductores. Por otro lado, los aceleradores de partículas han visto crecer su energía gracias a los imanes superconductores. El máximo



Temperaturas de transición de los materiales superconductores más utilizados.

Larga vida a la superconductividad

exponente es el Large Hadron Collider (LHC), en el CERN, con casi 20 Km de imanes. En la actualidad se está construyendo el ITER, el futuro reactor de fusión por confinamiento magnético, que constará de 43 bobinas de hasta 13 Tesla. En Japón han empezado la construcción de un tren superconductor entre Tokyo y Nagoya que estará terminado en 2027. A pequeña escala los SQUID, el patrón de voltaje, los sensores de radiación y algunos dispositivos de microondas

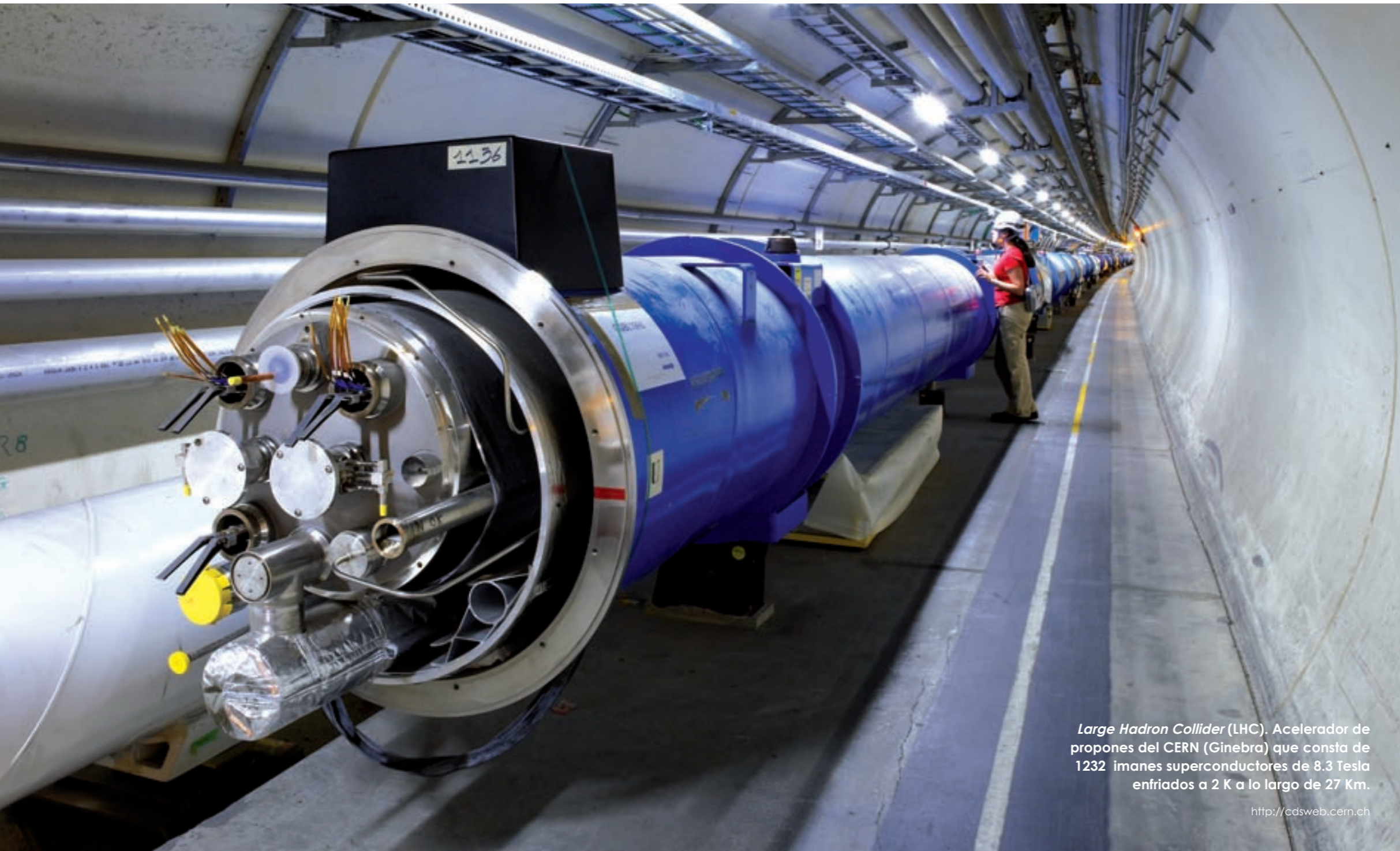
son también una realidad. En un segundo grupo estarían todas aquellas aplicaciones cuya viabilidad tecnológica está demostrada y que ya existen prototipos funcionando. Ejemplos a gran escala son los cables de alta potencia, transformadores, limitadores de corriente, generadores eléctricos, motores y almacenadores de energía. A pequeña escala tenemos los dispositivos de electrónica digital. Todas estas aplicaciones están esperando su oportunidad.

¿A LAS PUERTAS DE UNA NUEVA REVOLUCIÓN TECNOLÓGICA?

La humanidad avanza de la mano de revoluciones tecnológicas. Aprendimos a utilizar primero la piedra, después los metales, inventamos curiosos ingenios mecánicos, diseñamos motores térmicos, eléctricos, circuitos de semiconductores, llegó Internet... Hoy en día, en los laboratorios del mundo se cocinan las futuras revolucio-

nes: nanotecnología, biotecnología, metamateriales o computación cuántica son palabras que excitan nuestra imaginación. En la actualidad, es posible diseñar y manipular circuitos eléctricos hechos con superconductores que funcionan en el ámbito de la mecánica cuántica. Se trata de una nueva electrónica basada en la superconductividad y las bajas temperaturas. En dichos circuitos las ondas electromagnéticas, fotones, se propagan a través de líneas

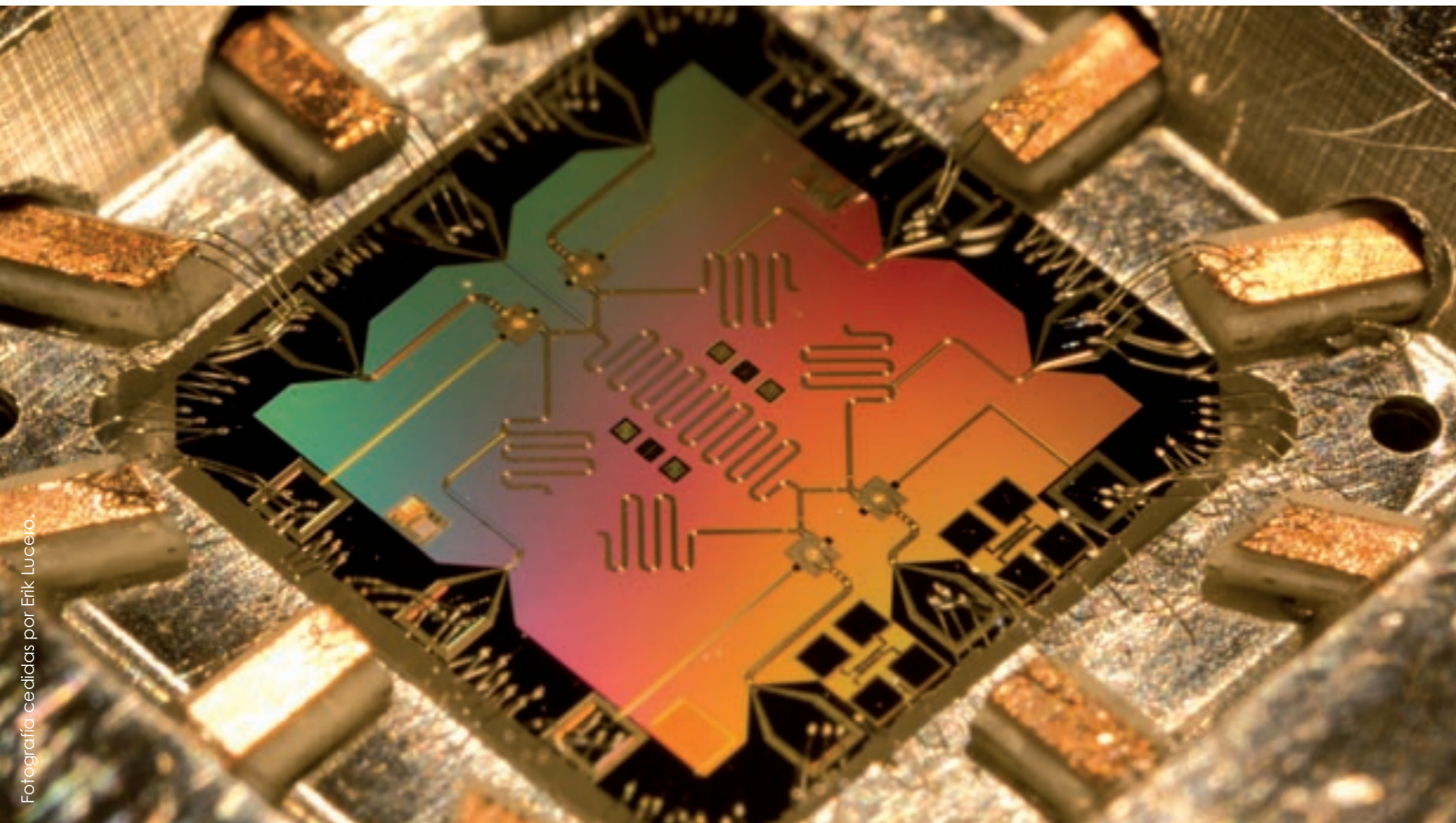
de transmisión superconductoras e interactúan con átomos artificiales y qubits realizados en base a uniones Josephson. El control experimental es fabuloso y es posible realizar experimentos que involucran un solo fotón y un átomo artificial integrados en un dispositivo de estado sólido. Algo asombroso si comparamos, por ejemplo, con el número de fotones utilizados en una transmisión inalámbrica, unos 10^{23} fotones por segundo. El principal impulsor de este espectacular desarrollo es la posibilidad de construir ordenadores cuánticos basados en circuitos superconductores. Una tarea por la que han apostado decididamente empresas como IBM (en este proyecto trabaja un ex alumno de nuestra facultad), Microsoft y Google. El día que dispongamos de ordenadores cuánticos podremos realizar en pocos minutos cálculos que, a día de hoy, son ina-



Large Hadron Collider (LHC). Acelerador de protones del CERN (Ginebra) que consta de 1232 imanes superconductores de 8.3 Tesla enfriados a 2 K a lo largo de 27 Km.

<http://cdsweb.cern.ch>

“Los aceleradores de partículas han visto crecer su energía gracias a los imanes superconductores. El máximo exponente es el *Large Hadron Collider (LHC)*, en el CERN, con casi 20 Km de imanes.”



Circuito cuántico para factorizar el número 15 (= 5 x 3). El material es Aluminio y está formado por líneas de transmisión (esas líneas curvadas) y cuatro qubits (la versión cuántica de los bits). El chip ha sido fabricado en la Universidad de California en Santa Barbara.

bordables con ordenadores clásicos y asistiremos, de la mano de la física computacional, a una revolución que afectará a todos los campos del conocimiento científico. Podemos pensar que estamos hablando de ciencia ficción, pero grupos de las universidades de Yale y California en Santa Bárbara han creado sus primeros prototipos, y una empresa canadiense D-wave ya vende ordenadores cuánticos con 128 qubits basados en dispositivos superconductores.

¿ QUÉ HACEMOS AQUÍ?

Los miembros del ICMA tenemos una amplia experiencia en el estudio y aplicación de los superconductores. A finales de los años 80 desarrollamos un patrón de voltaje basado en el efecto Josephson, que en la actualidad es el patrón nacional de voltaje. Posteriormente, en colaboración con empresas nacionales, fabricamos la primera bobina de alto campo (9 Tesla) y un com-

“Hoy en día en los laboratorios del mundo se cocinan las futuras revoluciones: nanotecnología, biotecnología, metamateriales o computación cuántica son palabras que excitan nuestra imaginación.”

parador criogénico de corriente para el patrón de resistencia basado en el efecto Hall cuántico. En la actualidad, estamos trabajando en detectores de radiación para futuras misiones espaciales y en nuevas aplicaciones de los SQUID. También hacemos nuestros propios conductores. Se han realizado barras de Bi-2212 orientadas por fusión zonal mediante láser, con las que se han diseñado y construido barras de alimentación. Mediante el método de polvo en tubo, se han fabricado hilos de Bi-2223 y de MgB_2 . En la actualidad, se está trabajando, junto con empresas nacionales, en un proyecto para desarrollar aerogeneradores basados en superconductores que, en un futuro, irán instalados en el mar. Por último, miembros del departamento de teoría y simulación participaron en la propuesta del qubit superconductor, que hoy utiliza la de D-wave, y es considerado como uno de los mejores candidatos a formar

parte de los ordenadores cuánticos del futuro. Además, en la actualidad realizamos estudios sobre acoplamiento luz-materia en líneas de transmisión y el diseño de circuitos cuánticos y metamateriales con superconductores.

Creemos que, por todo ello, podemos augurarle una larga vida a la superconductividad.

Agustín Camón, Juan José Mazo
y David Zueco

Instituto de Ciencias de Materiales de Aragón

Dpto. de Física de la Materia Condensada
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza



Sensor de rayos X para un telescopio de la Agencia Espacial Europea fabricado y diseñado en el ICMA.

Fotografía cedida por los autores.