

Superconductividad

Mariona Coll y Anna Palau

La magia de la superconductividad

Sin lugar a dudas la superconductividad representa uno de los descubrimientos más sorprendentes y apasionantes de la física moderna. Este excepcional fenómeno fue descubierto de manera completamente inesperada en 1911 por Kamerlingh Onnes, cuando vio que el mercurio perdía totalmente su resistencia eléctrica por debajo de una cierta temperatura, llamada temperatura crítica, próxima al cero absoluto (4K). En el estado normal, la resistencia eléctrica se produce por el choque de los electrones con iones e impurezas. En el estado superconductor, la resistencia cero se obtiene gracias al apareamiento de los electrones formando pares de Cooper que condensan a un estado cuántico colectivo, descrito por una única función de onda, que les permite moverse de manera coherente, sin colisiones, a través del material (Figura 1(a)). En 1933, Walther Meissner y Robert Ochsenfeld, descubrieron que la transición al estado superconductor tenía implicaciones más allá de la pérdida de resistencia eléctrica. Así se encontró la segunda característica fundamental de los materiales superconductores: el efecto Meissner, que se basa en la expulsión del campo magnético de su interior, comportándose como un material diamagnético perfecto. La teoría microscópica de la superconductividad (BCS)[1], que describe los superconductores convencionales de baja temperatura, explica fielmente la formación de los pares de Cooper por medio de fonones. Así la superconductividad representa una extraordinaria manifestación del comportamiento cuántico de la materia a escala macroscópica. Entre los fenómenos cuánticos del estado superconductor destaca el efecto Josephson, que describe el paso de pares de Cooper a través de dos superconductores separados por una fina barrera no superconductora por efecto túnel (Figura 1 (b)).

Durante más de un siglo, la superconductividad ha dado lugar a grandes descubrimientos, con muchas sorpresas y misterios aún sin resolver. Un punto clave en su historia fue el descubrimiento de los materiales superconductores tipo II y la aparición de los vórtices. Los superconductores tipo II presentan estado Meissner hasta un cierto campo crítico inferior, por encima del cual permiten que el campo magnético pueda penetrar en su interior en forma de líneas de campo cuantizadas, llamadas vórtices. De esta forma, pueden mantener el estado superconductor hasta altos campos magnéticos, aumentando enormemente su interés tecnológico. Cada vórtice lleva asociado un solo cuanto de flujo y se compone de un núcleo formado por electrones normales, rodeado por supercorrientes cilíndricas en torbellino. El tamaño del vórtice viene dado por dos escalas de longitud características de los superconductores, la longitud de coherencia, ξ (separación promedio entre los electrones del par de Cooper), que determina el diámetro del núcleo, y la longitud de penetración, λ , que delimita la extensión de las supercorrientes. La densidad de corriente crítica, máxima corriente que puede circular por el supercon-

ductor sin disipación, depende de la capacidad de anclar los vórtices en el material, cuyo desplazamiento está asociado al movimiento de electrones normales, que entraña disipación. Así, la red de vórtices debe estar bien anclada en cualquier aplicación que requiera el uso de grandes corrientes o altos campos magnéticos. Por otro lado, el movimiento controlado de vórtices, que recordemos, son líneas de campo magnético cuantizado, permite pensar en el desarrollo de novedosos dispositivos electrónicos con distintas funcionalidades. Puesto que las longitudes características superconductoras tienen escala nanométrica, el control y manipulación de la materia de vórtices requiere el uso de la nanotecnología. Así, mediante la nanoestructuración del material, es posible generar centros de anclaje a voluntad creando defectos nanométricos (zonas no superconductoras) en las que el núcleo del vórtice preferirá colocarse para minimizar su energía (Figura 1(c)).

Una sorpresa especialmente relevante en la historia de la superconductividad sobrevino a finales de los años 80 con el descubrimiento de los materiales superconductores de alta temperatura (SAT)[2]. Estos nuevos materiales cerámicos, basados en compuestos de óxido de cobre, generaron grandes expectativas a una posible revolución tecnológica, ya que presentaban temperaturas de transición por encima del nitrógeno líquido (77K), reduciendo enormemente el coste de refrigeración. Aunque con gran potencial tecnológico, el estudio de los SAT representa un gran reto para la ciencia de materiales ya que presentan una estructura cristalina muy compleja, formada por capas, de manera que la superconductividad muestra un carácter anisótropo casi bidimensional. Además, están caracterizados por una longitud de coherencia extremadamente pequeña, del orden de 1-5 nanómetros, de manera que su comportamiento superconductor es extremadamente sensible a su estructura nanométrica. Así mismo, después de muchos años de estudio, el mecanismo responsable de la superconductividad en los SAT aún no se puede explicar y sigue siendo uno de los mayores misterios de la física moderna.

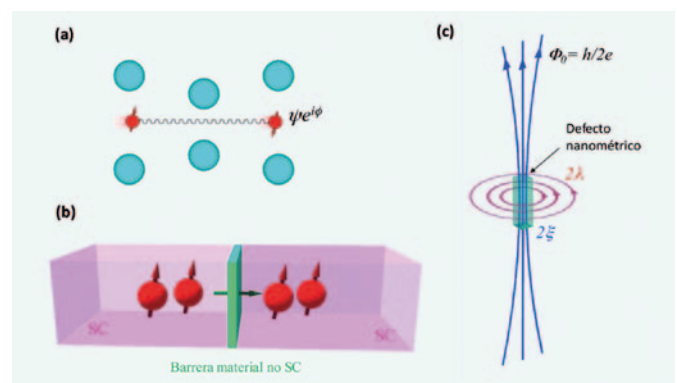


Fig. 1. Representación esquemática de (a) pares de Cooper, (b) efecto Josephson (c) vórtice anclado en un defecto.

Desde el descubrimiento de los cupratos, se han encontrado nuevas familias de superconductores no convencionales, el estudio de las cuales abre nuevas perspectivas para entender este fenómeno, pero a la vez genera nuevas incógnitas por resolver.

Del sueño a la realidad

La gran variedad de aplicaciones tecnológicas de los materiales superconductores va ligada a la explotación de una o varias de sus excepcionales propiedades físicas. Hasta el momento, la implementación de estos sorprendentes materiales está limitada a aplicaciones muy concretas, con necesidad de características únicas, que solo se pueden resolver usando el fenómeno de la superconductividad. Los avances realizados en sistemas de criogenia altamente eficientes, la posibilidad de utilizar superconductores de alta temperatura y el gran avance en el estudio y optimización de la estructura y propiedades de dichos materiales, van a permitir en un futuro próximo demostrar su fiabilidad, sostenibilidad y aceptación para reemplazar tecnologías existentes en muchos otros campos (Figura 2).

Mediante este exótico fenómeno se pueden generar los campos magnéticos más intensos existentes en la tierra y detectar los valores de campo magnético más pequeños. La principal característica de los superconductores, la posibilidad de conducir altas densidades de corriente sin disipación, proporciona un impacto directo en la transmisión eficiente de potencia eléctrica y la generación de imanes muy compactos, capaces de generar campos magnéticos intensos de manera muy estable. Los fenómenos cuánticos de la superconductividad han permitido crear dispositivos con funcionalidades radicalmente diferentes de los que se pueden obtener con las tecnologías tradicionales. La cuantización de flujo magnético combinada con el efecto Josephson ha dado lugar al desarrollo de dispositivos SQUID “*Superconducting Quantum Interference Device*”, que constituyen la base de sensores ultra-sensibles de campo magnético, con resolución muy por encima de la conseguida con siste-

mas convencionales. Así mismo, mediante uniones Josephson, y considerando la rápida transmisión de señal de los superconductores, se han desarrollado los circuitos electrónicos RSFQ “*Rapid Single Flux Quantum*”, con prestaciones muy superiores a los límites teóricos calculados con tecnología convencional y bajo consumo de potencia. Además de resistencia cero en corriente continua, los superconductores presentan muy baja resistencia a altas frecuencias y extremadamente baja dispersión de señal. Estas propiedades son parámetros clave en componentes para la tecnología de la información y comunicación. Finalmente, la expulsión de campo magnético proporciona el mecanismo esencial para la levitación magnética.

Actualmente, prácticamente todas las aplicaciones comerciales de los materiales superconductores se basan en superconductores de baja temperatura. Entre las de mayor impacto encontramos el uso de bobinas superconductoras para generar campos magnéticos intensos en centros de diagnóstico médica (para imágenes de resonancia magnética), centros de investigación (equipos de resonancia magnética nuclear, aceleradores, reactores de fusión) y procesos industriales (separación magnética). En el otro límite encontramos el uso de la tecnología SQUID para medir campos magnéticos muy débiles en aplicaciones de medicina (magnetoencefalografía, magnetocardiografía), centros de investigación, o geología, entre otros. En la industria electrónica cabe destacar también el uso de filtros, en sistemas de telecomunicación que hasta el momento representan la mayor contribución de SAT en el mercado.

El salto cualitativo de los materiales superconductores en el impacto social va a ser posible cuando se implanten muchas de las aplicaciones que actualmente están en fase final de desarrollo, tal y como se muestra en la figura 2. La investigación y optimización en esta dirección va a ser clave para superar los obstáculos aún existentes y llegar a aprovechar las múltiples oportunidades que nos ofrece el fenómeno de la superconductividad.



Fig. 2. Esquema de las distintas aplicaciones de los materiales superconductores.

Retos y oportunidades

La superconductividad a temperatura ambiente sigue siendo un sueño y un gran reto para los científicos. Más de 30 años después del descubrimiento de los primeros superconductores de alta temperatura, estos materiales son reacios a renunciar a sus secretos. Para avanzar en el estudio del mecanismo responsable de los SAT es de gran importancia conocer los factores que controlan su temperatura crítica, T_c . Este conocimiento podría incluso permitir la predicción y modelización de nuevos superconductores con mayores valores de T_c hasta llegar a la deseada temperatura ambiente. La investigación de las dos familias de SAT conocidas hasta ahora, los cupratos (basados en compuestos de óxido de cobre) y los basados en hierro (pnicturos y calcogenuros), es de gran interés tanto desde un punto de vista teórico como experimental, con el fin de encontrar una teoría que explique la superconductividad no convencional. Cada nuevo compuesto que se descubre presenta características distintas a los identificados anteriormente, sin embargo, todos ellos tienen en común una estructura formada por capas en la que la fase superconductora aparece dopando un compuesto originalmente anti-ferromagnético y en todos ellos el apareamiento de los pares de Cooper no se puede explicar mediante vibraciones de la red. No obstante, también presentan ciertas diferencias como el hecho de que los cupratos en su fase no superconductora son aislantes de Mott (materiales que deberían ser metálicos, pero presentan un comportamiento aislante debido a la fuerte correlación entre electrones) mientras que los basados en hierro son metálicos. Así mismo, encontrar superconductividad en compuestos de hierro fue una gran sorpresa dado que la superconductividad y el magnetismo son propiedades antagónicas. En los materiales magnéticos, los espines se ordenan de forma paralela mientras que los pares de Cooper presentan espines opuestos. Por esta razón el estudio de esta familia de superconductores es de gran relevancia [3].

Dado el carácter laminar de los SAT, uno de los campos de mayor actividad actual es el estudio de superconductividad en el límite bidimensional (2D), incluyendo materiales como el grafeno, interfaces artificiales generadas espontáneamente en bicapas tipo $\text{SrTiO}_3/\text{LaAlO}_3$ o mediante dopaje electrostático de compuestos aislantes con electrolitos tipo líquido iónico. La superconductividad 2D puede incluso dar lugar a temperaturas de ordenación superconductoras y densidades de corriente crítica superiores a las del material masivo. Esto no sólo sugiere la posibilidad de manipular las propiedades superconductoras a través de la ingeniería de interfaces, sino que también allana el camino para el desarrollo de una nueva generación de dispositivos electrónicos con funcionalidades excepcionales. Avances importantes en la síntesis de heteroestructuras atómicamente perfectas e

interfaces artificiales ha despertado una intensa actividad enfocada a estudiar la combinación de superconductores de alta temperatura con otros materiales con propiedades físicas de interés (magnéticos, semiconductores, dieléctricos o ferroeléctricos) para crear materiales híbridos [4]. Los resultados son prometedores: se ha demostrado, por ejemplo, que el orden superconductor puede mejorar en gran medida efectos esenciales para la espintrónica tales como la inyección de espín o la magnetorresistencia. Una sinergia completa entre los órdenes superconductores y magnéticos resulta posible a través de la creación de pares de Cooper “*spin-triplet*”, que se generan en interfaces superconductoras cuidadosamente diseñadas con materiales ferromagnéticos [5]. Otro ejemplo lo tenemos con la combinación híbrida de cupratos con ferro-eléctricos en los que se ha demostrado la posibilidad de generar una transición reversible, no volátil, entre el estado superconductor y el estado aislante, modulando el dopaje mediante el efecto del campo eléctrico. Con este efecto, se pueden fabricar transistores superconductores ultradensos de efecto de campo [6]. Desde otro punto de vista, el avance en técnicas de nanotecnología ha permitido el estudio de efectos mesoscópicos en sistemas nanoestructurados de superconductores convencionales y de alta temperatura, con distintas geometrías o defectos del orden de las longitudes características superconductoras. Estos sistemas son especialmente relevantes para entender los mecanismos de anclaje y movimiento de vórtices y tienen una implicación directa en el desarrollo de la fluxtrónica, tecnología basada en el confinamiento, guía y manipulación de cuantos de flujo [7].

Desde el punto de vista de aplicaciones, el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura y con ello la posibilidad de utilizar temperaturas de refrigeración superiores a la de licuefacción del nitrógeno y reducir dramáticamente el coste, generó grandes expectativas en el campo de la energía: en aplicaciones de generación de potencia eléctrica, almacenamiento, transmisión, transporte y medicina. El uso de la tecnología superconductora en estas aplicaciones va a permitir diseñar dispositivos mucho más eficientes, ligeros y compactos, haciendo un uso sostenible de la energía, reduciendo así el impacto económico y medioambiental [8]. El mayor reto para introducir en el mercado las nuevas aplicaciones de los SAT es la viabilidad de fabricar cables y bobinas superconductoras de gran eficiencia, a precios competitivos. Actualmente, una de las tecnologías más prometedoras para fabricar cintas superconductoras con altas densidades de corriente crítica a altos campos magnéticos es la fabricación de los conductores epitaxiales o 2G basados en cupratos. Además, el progreso conseguido para preparar los conductores 2G mediante métodos de fabricación simples y tecnológicamente poco exigentes, como

los métodos por soluciones químicas, ha dado un impulso muy importante en la reducción de la figura de mérito coste/prestación [9]. No obstante, para conseguir la madurez tecno-económica y acelerar su implementación en los mercados, hay que poner más esfuerzo en reducir la complejidad del proceso y el coste que dependerán, en gran medida, de su particular aplicación. Otro aspecto importante es la mejora del rendimiento en campo magnético de los SAT mediante el uso de centros de anclaje artificiales de tamaño nanométrico. Estudiar los límites en la incorporación de estructuras nanométricas con un control exhaustivo y cómo éstas modifican la microestructura para mejorar las prestaciones superconductoras expandirá su implantación dando lugar incluso a nuevas e inesperadas tecnologías [10].

Así mismo, la superconductividad promete grandes avances en la industria electrónica. A parte de las aplicaciones en dispositivos de alta frecuencia, como sensores y detectores electromagnéticos ultra-precisos, el uso de la tecnología superconductor, en virtud a su inherente eficiencia energética, representa un enfoque muy prometedor para cerrar la distancia creciente entre el rendimiento requerido y la sostenibilidad en el almacenamiento y manipulación de datos. La potencia requerida en los centros de datos a gran escala y super-ordenadores será totalmente insostenible en menos de una década utilizando la tecnología actual, incluso considerando innovaciones en los sistemas de procesado y el uso de energías renovables. La lógica RSFQ, basada en la manipulación de cuantos de flujo magnético es actualmente una de las tecnologías más prometedoras y viables para reemplazar la de los semiconductores, superando ampliamente sus prestaciones, con una reducción radical del consumo de potencia. La previsión de potencia disipada en un super-ordenador superconductor promete sistemas con prestaciones 10 veces superiores a los límites teóricos calculados con tecnología convencional consumiendo 100 veces menor energía, incluso incluyendo el sistema de refrigeración [8]. Así mismo, estamos en un momento sumamente emocionante para la tecnología de procesamiento de información mediante tecnologías cuánticas. Los avances en la computación cuántica entrevén procesadores basados en qubits, que van a aportar un cambio revolucionario en el proceso y la computación de datos de manera extraordinariamente más potente y rápida que la obtenida con computación tradicional. En la carrera para construir el primer ordenador cuántico los qubits generados con corrientes superconductoras representan una de las tecnologías más avanzadas [11].

El futuro de la superconductividad es más indiscutible que nunca y desempeñará un papel importante para hacer frente de manera sostenible a nuevos retos de la sociedad en tecnologías de la co-

municación, información, energía, transporte y salud. Conocer los secretos de la superconductividad de alta temperatura, avanzar hacia la fabricación de nuevos materiales y dispositivos con un control de los parámetros superconductores sin precedentes, así como acumular conocimiento en sistemas superconductores no convencionales y sistemas híbridos con funcionalidades innovadoras, son todavía grandes retos científicos en estos materiales fascinantes.

Referencias

- [1] J. BARDEEN, L. N. COOPER y J. R. SCHRIEFFER, "Theory of Superconductivity", *Phys. Rev.* 108, 1175, 1957.
- [2] J. G. BEDNORZ y K. A. MÜLLER, "Possible high TC superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", *Zeitschrift für Physik B* 64 189 (1986).
- [3] "Iron-based superconductors" *C. R. Physique* 17, 1-2 (2016).
- [4] M. BIBES, J. E. VILLEGAS y A. BARTHELEMY, "Ultrathin oxide films and interfaces for electronics and spintronics" *Advances in Physics* 60, 5 (2011).
- [5] J. LINDER y J. W. A. ROBINSON, "Superconducting spintronics" *Nature Physics* 11, 307 (2015).
- [6] C. H. AHN, K. M. RABE y J. M. TRISCONE, "Ferroelectricity at the Nanoscale: Local Polarization in Oxide Thin Films and Heterostructures" *Science* 203, 488 (2004).
- [7] C. REICHHARDT, "High-temperature superconductors: Vortices wiggled and dragged" *Nature Physics* 5, 15 (2009).
- [8] S. NISHIJIMA *et al.*, "Superconductivity and the environment: a Roadmap" *Superconductor Science and Technology* 26, 113001 (2013).
- [9] X. OBRADORS, T. PUIG, S. RICARD, M. COLL, J. GAZQUEZ, A. PALAU y X. GRANADOS, "Growth, nanostructure and vortex pinning in superconducting YBa₂Cu₃O₇ thin films based on trifluoroacetate solutions" *Superconductor Science and Technology*, 25, 123001 (2012).
- [10] W. KWOK, U. WELP, A. GLATZ, A. E. KOSHELEV, K. J. KIHLMSTROM y G. W. CRABTREE, "Vortices in high-performance high-temperature superconductors" *Reports on Progress in Physics*, 79, 116501 (2016).
- [11] Fernando González-Zalba. *Revista Española de Física*, volumen 31, número 3 (2017).

Mariona Coll

Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas



Anna Palau

Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, Consejo Superior de Investigaciones Científicas

