

# TOPOLOGÍA QUE SE MIDE: de los materiales cuánticos a la metrología

**Palabras clave:** topología, metrología, materiales cuánticos.

**Keywords:** topology, metrology, quantum materials.

**Resumen:** En las últimas décadas, distintas nociones de topología han pasado de la matemática al laboratorio, transformando nuestra comprensión de los electrones en sólidos y llegando a impactar la manera en que medimos magnitudes eléctricas. En este artículo presentamos cómo ciertos materiales cuánticos —superconductores, aisladores topológicos, semimetales de Weyl— exhiben propiedades robustas frente a perturbaciones que se capturan mediante invariantes topológicos. Estas propiedades no sólo son de interés fundamental: habilitan patrones de voltaje y resistencia de precisión cuántica, basados en el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, que hoy sustentan al Sistema Internacional de Unidades. Explicamos cómo estos avances han hecho posible calibraciones con incertidumbres de partes en  $10^{10}$ – $10^{11}$ . Asimismo, discutimos el impacto de estas ideas en la exploración y el diseño de nuevos materiales. Por último, delineamos líneas de desarrollo tecnológico —como fuentes Josephson programables y arbitrarias, y comparadores criogénicos de corriente— y señalamos perspectivas en las que Argentina participa activamente, desde la implementación de patrones cuánticos hasta la investigación en materiales. La topología, lejos de ser una abstracción, se ha convertido en una herramienta concreta para concebir materiales y dispositivos cuánticos de próxima generación.

**Measuring topology: from quantum materials to metrology**

**Abstract:** In recent decades, various topological concepts have moved from mathematics to the laboratory, transforming our understanding of electrons in solids and impacting how we measure electrical quantities. In this article, we present how certain quantum materials—superconductors, topological insulators, and Weyl semimetals—exhibit robust properties against perturbations captured by topological invariants. These properties are not only of fundamental interest: they enable quantum-precision voltage and resistance standards, based on the Josephson and quantum Hall effects, which underpin the International System of Units. We explain how these advances enabled calibrations having uncertainties of parts in  $10^{10}$  –  $10^{11}$  possible. We also discuss the impact of these ideas on the exploration and design of new materials. Finally, we outline lines of technological development—such as programmable and arbitrary Josephson sources and cryogenic current comparators—and highlight areas in which Argentina is actively involved, from the implementation of quantum standards to materials research. Topology, far from being an abstraction, has become a concrete tool for conceiving next-generation quantum materials and devices.

## ■ INTRODUCCIÓN

Comenzamos presentando dos definiciones: qué es la topología y qué es la metrología. En el presente artículo presentamos la evolución de un puente que se viene construyendo desde hace algunos años conectando estos dos conceptos: los materiales cuánticos. El resultado de esta unión juega un rol fundamental en el desarrollo de las nuevas tecnologías cuánticas.

La **topología** es una rama de la matemática que se enfoca en la ca-

racterización de propiedades de los cuerpos que no se ven modificadas frente a deformaciones continuas de los mismos. El ejemplo paradigmático es clasificar a los cuerpos según el número de agujeros. Esto permite identificar una taza a una rosca como cuerpos topológicamente equivalentes debido a que ambos tienen un agujero, de la misma manera que una esfera es topológicamente equivalente a un huevo, una manzana o una copa, como se ilustra en la **Figura 1**.

La **metrología** es la ciencia dedicada a las mediciones. Incluye las definiciones de las unidades de medida para las diversas propiedades físicas, así como la calibración de los instrumentos de medición tomando como base patrones de referencia confiables.

## ■ EL PUENTE: MATERIALES CUÁNTICOS

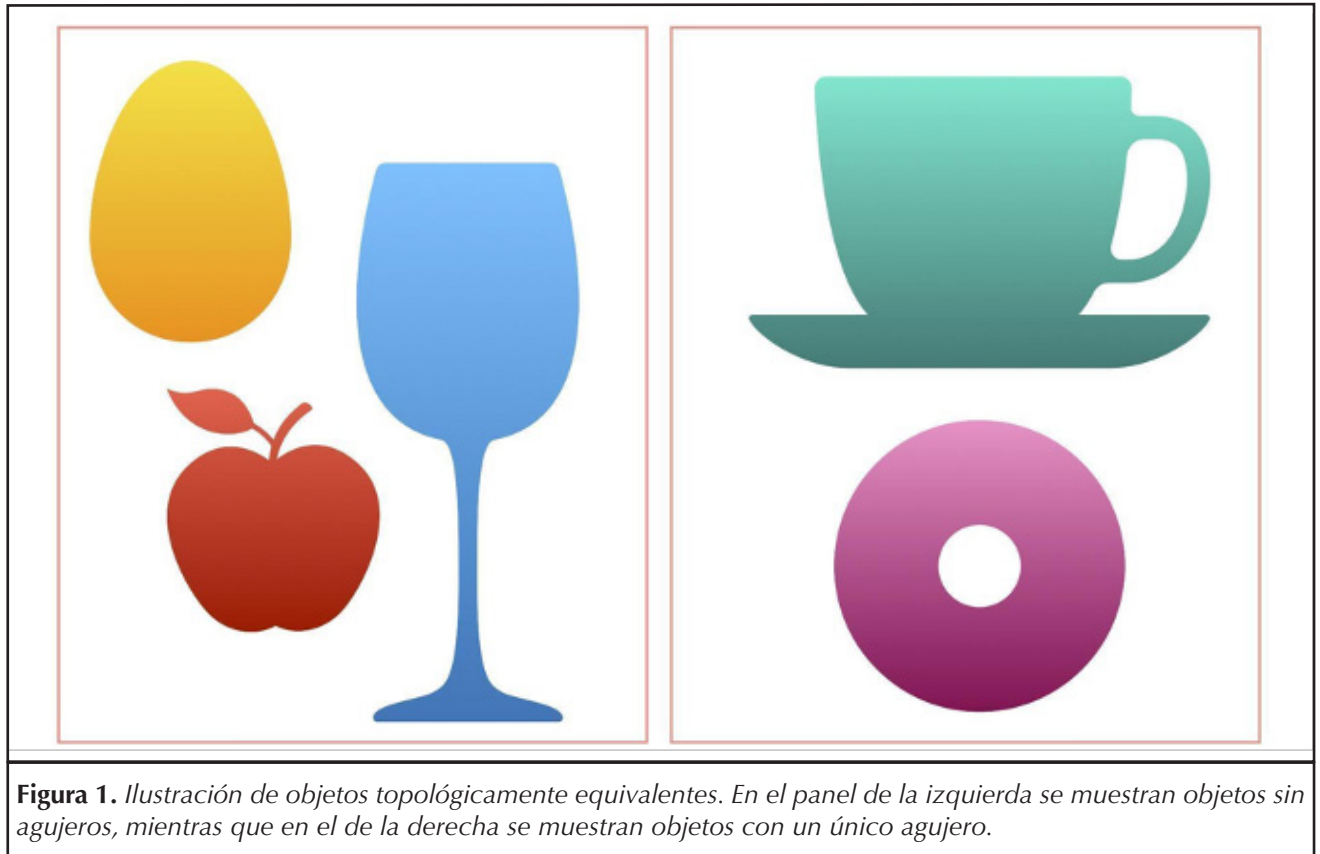
Este término se acuñó recientemente para identificar estructuras de estado sólido cuyas propiedades ma-

■ **Real, Mariano<sup>1</sup>; Facio, Jorge J<sup>2</sup>; Arrachea, Liliana<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Metrología Cuántica, INTI, Gral. San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> División de Materiales Cuánticos y Sistemas Desordenados, Centro Atómico Bariloche, Instituto de Nanociencias y Nanotecnología e Instituto Balseiro, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

\*E-mail: liliana.arrachea@ib.edu.ar



**Figura 1.** Ilustración de objetos topológicamente equivalentes. En el panel de la izquierda se muestran objetos sin agujeros, mientras que en el de la derecha se muestran objetos con un único agujero.

croscópicas derivan directamente de aspectos cuánticos tales como la **coherencia de fase**, el **entrelazamiento** y la **topología electrónica**. Describimos a continuación algunos de ellos:

**Superconductores:** Se caracterizan por conducir la electricidad sin resistencia y así generar super-corrientes capaces de producir campos magnéticos muy intensos. La existencia de este fenómeno a muy bajas temperaturas (de unos pocos K) fue observada por primera vez por H. K. Onnes en 1911 en Hg y luego en varios metales como Li, Ti, Cd, Al, Nb, entre otros. Su explicación teórica se consolidó en los años '50, primero en la teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau y luego en la teoría microscópica presentada por Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS) en 1957<sup>1</sup>. En 1986 Bednorz y Müller observaron superconductividad en

una familia de materiales cerámicos que contiene  $\text{CuO}_2$  a temperaturas más altas (cercasas a los 100 K) y recibieron el Premio Nobel de Física al año siguiente. Dichos materiales se denominan “superconductores de alta temperatura crítica ( $T_c$ )”. Luego se observaron otros compuestos de esta familia. Presentan una fenomenología muy diferente a la de otros superconductores y, al día de la fecha, la explicación teórica de la superconductividad de alta  $T_c$  es uno de los grandes problemas abiertos de la física.

La superconductividad es un estado cuántico macroscópico, descrito por una función de onda de electrones entrelazados formando “pares de Cooper” que se mueven de forma coherente. Esto explica la ausencia de colisiones entre partículas y, por lo tanto, la ausencia de resistencia. La posibilidad de indu-

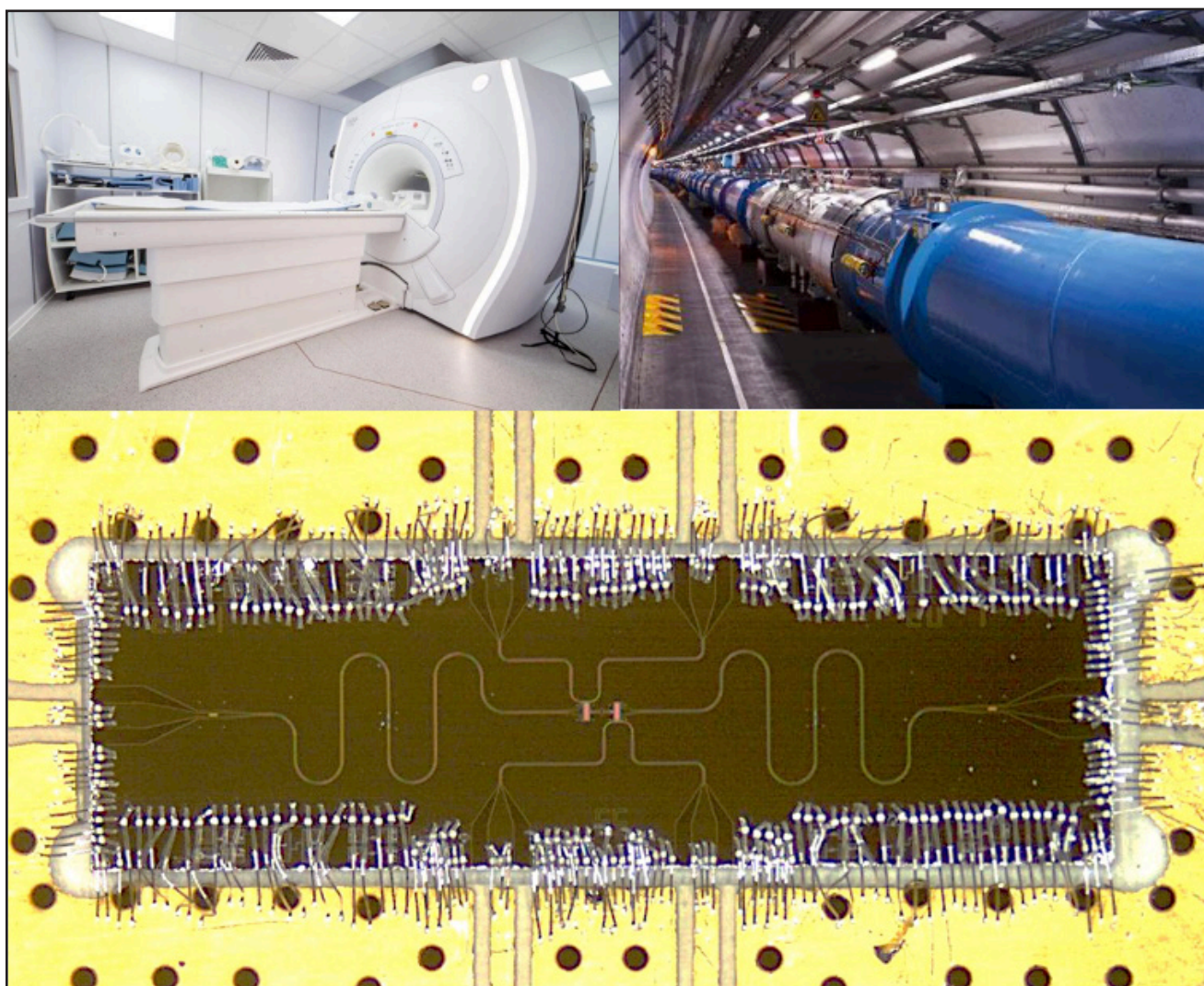
cir corrientes muy intensas permite generar altos campos magnéticos, que en la actualidad se utilizan en escenarios diversos. Por ejemplo, en los equipos de resonancia magnética nuclear (RMN, ver en este mismo volumen el artículo de los autores Ana Karina Chattah y Gonzalo A. Álvarez, “Resonancia Magnética: de la versatilidad en el control cuántico al sentido y las nuevas tecnologías cuánticas”) utilizados en medicina y en los aceleradores de partículas como el LHC, ver la **Figura 2**. Las teorías de Ginzburg-Landau y BCS de la superconductividad también han jugado un rol conceptual importante en la comprensión del mecanismo que explica la existencia del bosón de Higgs<sup>2</sup>.

Los superconductores juegan un rol fundamental en el desarrollo de las nuevas tecnologías cuánticas. Por un lado, son la base de una de

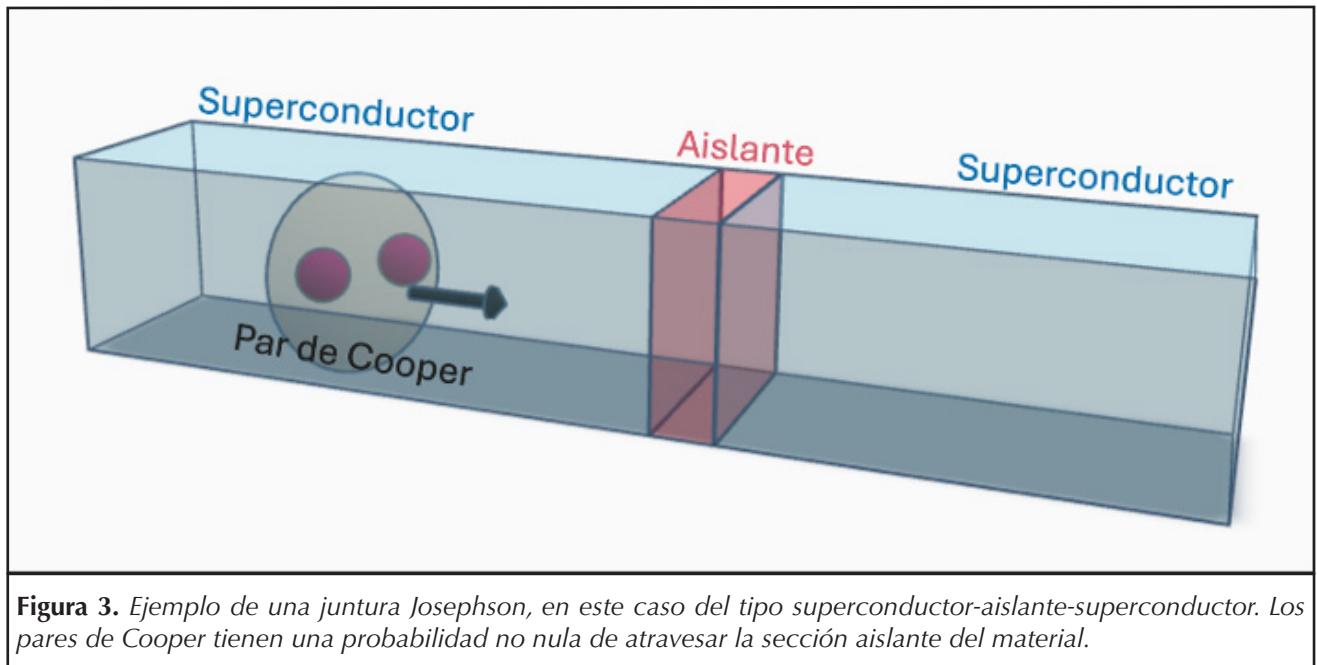
las realizaciones más prominentes de qubits, tal como se discute en este mismo volumen en el artículo de C. Schmiegelow, C. Cormick y L. Tosi, "El hardware cuántico: qubits naturales y artificiales". Por otro lado, son centrales en metrología eléctrica, para definir el patrón del voltaje eléctrico o realizar mediciones de precisión de resistencia eléctrica utilizando SQUIDS, como se detalla más adelante. La propiedad clave de los superconductores en

estas aplicaciones es el "efecto Josephson", por cuyo descubrimiento B. Josephson ganó el Premio Nobel de Física en 1973 (Brian D. Josephson, 1973). En su versión continua (DC) el efecto Josephson consiste en la generación de super-corrientes de equilibrio a través de un anillo superconductor con juntura superconductor-aislante-superconductor SIS (**Figura 3**) cuando un campo magnético atraviesa el agujero del anillo. La contraparte alterna (AC)

corresponde a la inducción de una corriente alterna cuando se aplica una diferencia de voltaje  $V$  a través de la juntura. En este último caso, la peculiaridad es la frecuencia  $\nu = eV/h$  en la oscilación de dicha corriente, donde  $e$  representa la carga del electrón y  $h$  es la constante de Planck. Debido a esta característica, el efecto Josephson AC es de fundamental importancia en metrología, como se discutirá más adelante.



**Figura 2.** Usos de la superconductividad. Arriba (izquierda): resonador magnético nuclear (RMN) utilizado en medicina. Arriba (derecha): acelerador de partículas large hadron collider (LHC). Ambos funcionan con altos campos magnéticos generados por superconductores. Abajo: imagen de un qubit superconductor. Cortesía Quantronics (ver en este volumen el artículo de los autores Schmiegelow, Christian T; Cormick, Cecilia; Tosi, Leandro: "El hardware cuántico: qubits naturales y artificiales").



**Figura 3.** Ejemplo de una juntura Josephson, en este caso del tipo superconductor-aislante-superconductor. Los pares de Cooper tienen una probabilidad no nula de atravesar la sección aislante del material.

**Gases bidimensionales de electrones y el efecto Hall cuántico:** El efecto Hall clásico consiste en la generación de un voltaje transversal  $V_H$  en respuesta a una corriente  $I$  aplicada longitudinalmente en la muestra, en presencia de un campo magnético perpendicular a la misma. El cociente  $R_H = V_H / I$  se denomina resistencia Hall.

El efecto Hall cuántico se observa en nano-heteroestructuras de dos semiconductores, por ejemplo GaAs y AlGaAs, fabricadas de manera tal que confinan en su interfase un gas bidimensional de electrones (ver **Figura 4**). Los dispositivos suelen fabricarse en la geometría conocida como barra Hall. La **Figura 4** muestra dispositivos procesados en laboratorios nacionales. El efecto Hall cuántico se observa a temperaturas inferiores a 1 K cuando se aplican altos campos magnéticos (entre 1 y 8 Tesla) perpendiculares al gas bidimensional. En el caso clásico la resistencia Hall observa un comportamiento lineal como función del campo magnético. En el caso cuántico, esta resistencia

está cuantizada y presenta valores  $R_H = (h/e^2) / \nu$ , donde en el “efecto Hall cuántico entero” (ver **Figura 4**) y  $\nu = 1/3, 2/5, 3/7, 2/3, 3/5, 1/5, \dots$  en el caso del “efecto Hall cuántico fraccionario”.

El efecto Hall cuántico entero fue observado por primera vez en 1980 por K. von Klitzing en muestras fabricadas con *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) por M. Pepper y G. Dorda. Estos tres investigadores recibieron el Premio Nobel de Física en 1985. Luego, H. Störmer y D. Tsui observaron el efecto Hall cuántico fraccionario, Laughlin propuso su explicación teórica y los tres compartieron el Premio Nobel de Física de 1998.

**El efecto Hall cuántico de spin y los aisladores topológicos:** Poco tiempo después del descubrimiento del efecto Hall cuántico, se comprendió que este sistema físico es un aislador topológico. Esto significa, por un lado, que el gas bidimensional de electrones en presencia de campos magnéticos intensos se comporta como un aislador eléctrico. Lo mismo se explica por el espectro

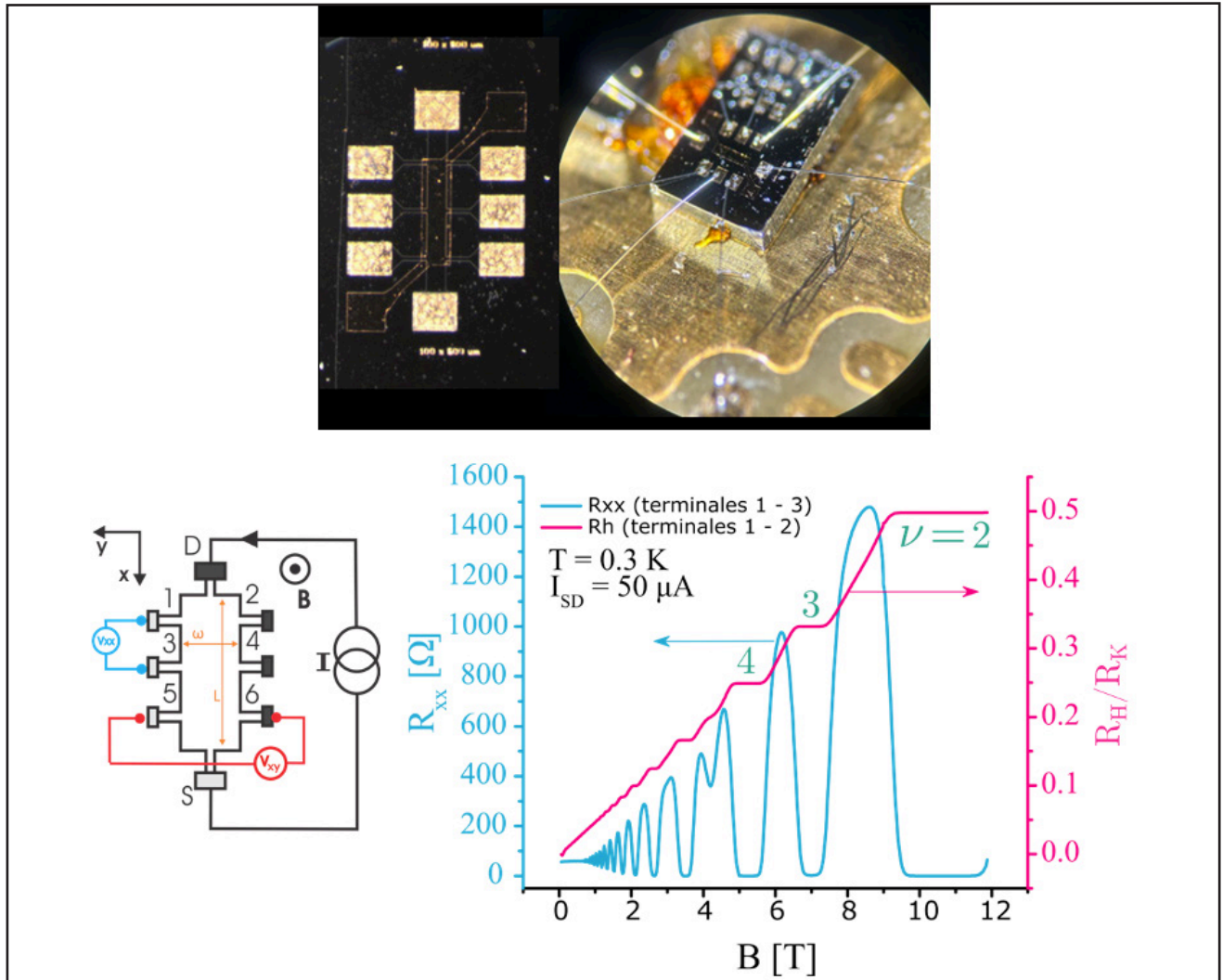
de energías organizadas en “niveles de Landau”, separados por *gaps* (brechas) de energía de valor  $heB / (2\pi m)$ , siendo  $e$  y  $m$ , respectivamente, la carga y la masa del electrón y  $B$  el campo magnético aplicado. Por otro lado, el mismo puede caracterizarse por un invariante topológico llamado “número de Chern”, de manera análoga a la empleada en geometría cuando se caracterizan objetos por el número de agujeros, tal como fue demostrado por Thouless, Kohmoto, Nightingale y den Nijs (Thouless, David J., 1982). La consecuencia física de esta propiedad es la existencia de “estados de borde quirales topológicamente protegidos”, que constituyen canales perfectos de conducción confinados en el borde de la muestra. A través de los mismos, los electrones pueden moverse en una única dirección sin resistencia, tal como se indica en los esquemas de la **Figura 5**.

Todo esto resulta en una característica única y sorprendente del efecto Hall cuántico: la combinación de ser aislador en su volumen y, a la vez, un conductor quiral perfecto a través

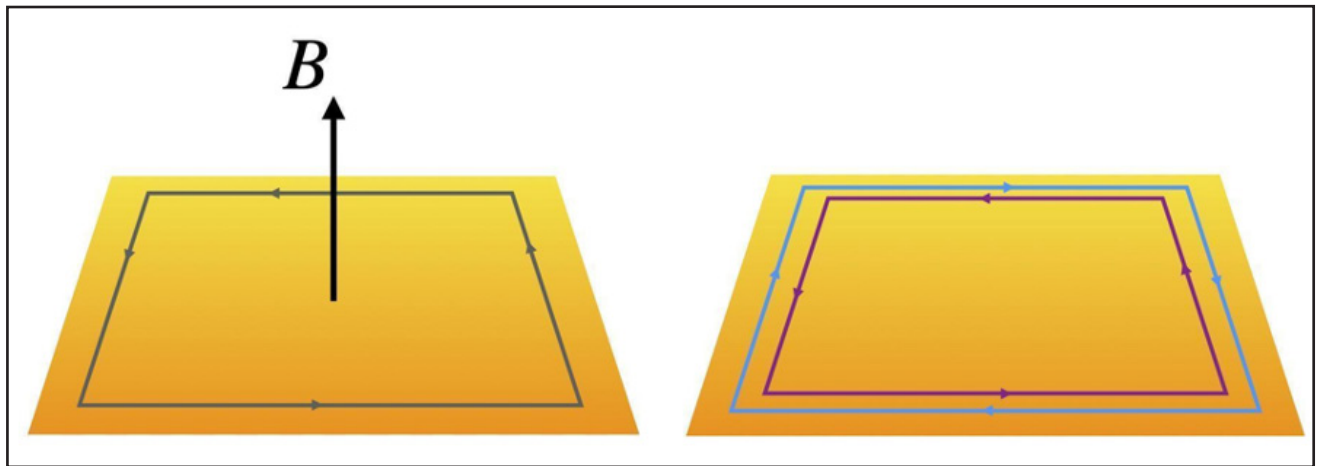
de canales localizados en los bordes. La dirección de circulación de la corriente está definida por el campo magnético (ver Fig. 5, izquierda) y cada uno de estos canales soporta un cuanto de conductancia de valor

$e^2/h$ . El número de canales cambia cada vez que el campo magnético es consistente con un cambio en el número de niveles de Landau intervinientes, lo cual explica los saltos en  $e^2/h$  de la conductancia Hall.

En 1988 Haldane propuso un modelo “de juguete” (puramente matemático pero inspirado en una red de grafeno) (Haldane, F. Duncan, 1988), a partir del cual demostró que las mismas propiedades del



**Figura 4.** (panel superior) Imagen de un dispositivo micro-procesado. En este caso posee 8 contactos eléctricos y también una estructura superior para controlar por tensión el dispositivo. A la derecha se muestra una imagen del dispositivo montado en un zócalo con los cables de interconexión realizados. (panel inferior) A la izquierda se muestra el esquema de un dispositivo típico para calibración de resistencias como el de la imagen. En celeste se indica la medición de la respuesta longitudinal  $V_{xx}$ , mientras que transversalmente al dispositivo (en rojo) se indica la medición de la respuesta Hall ( $V_{xy}$ ). A la derecha el resultado de medición de un dispositivo: en celeste la resistencia longitudinal y en rosa la resistencia normalizada Hall (transversal), en este caso a una temperatura de 300 mK y con una corriente de 50  $\mu$ A. El eje de la derecha (rosa) está normalizado a la constante de von Klitzing  $R_K = h / e^2 \approx 25\,812,807\,45... \Omega$ . Los picos que se ven en la curva celeste ( $R_{xx}$ ) son el resultado de la existencia de los niveles de Landau, entre ellos y a medida que aumenta el campo magnético, tienden a anularse, se dice entonces que el sistema está en estado Hall cuántico. La cuantización del sistema se manifiesta también en la existencia de los plateaux (mesetas donde la resistencia no cambia) de la curva rosa. Se indican órdenes de estos plateaux, por ejemplo el plateau que corresponde a  $\nu = 2$ , donde la resistencia transversal resulta ser la mitad de la constante de von Klitzing.



**Figura 5.** A la izquierda el esquema de los estados de borde quirales de un gas de electrones bidimensional atravesado por un campo magnético intenso  $B$  en el estado de Hall cuántico. A la derecha: Esquema de los estados de borde helicoidales de un aislador topológico en el estado de spin Hall cuántico

efecto Hall cuántico pueden generarse sin necesidad de aplicar un campo magnético. Esto constituye un salto conceptual importante, en el que se demuestra la existencia de una familia de aisladores topológicos mucho más amplia. En 2005 Kane y Mele (Kane, Charles L., 2005) propusieron una variante del modelo de Haldane que respeta la simetría de inversión temporal. El aislador topológico que resulta contiene estados de borde que existen de a pares “helicoidales”, de manera que las componentes del par tienen quiralidades y polarizaciones magnéticas opuestas (ver **Figura 5**, derecha). A este nuevo aislador topológico se lo identificó bajo el nombre “spin-Hall cuántico”. En 2006 Bernevig, Hughes y S-C. Zhang (Bernevig, B. Andrei, Taylor L. Hughes, 2006) propusieron un modelo realista de un aislador topológico para generar el estado de spin-Hall cuántico en un material susceptible de ser fabricado y medido en experimentos. En 2007, el grupo de Molenkamp fabrica dicho aislador con Molecular Beam Epitaxy en un compuesto que combina HgTe y Cd y lo caracteriza experimentalmente, demostrando la existencia de los estados de borde

topológicamente protegidos (Konig, Markus, 2007). Desde entonces, se registra una proliferación de aisladores topológicos en sistemas tridimensionales que son aisladores en el volumen pero conductores perfectos en las paredes. En 2016 Kosterlitz, Thouless y Haldane recibieron el Premio Nobel de Física (The Nobel Prize, 2016), en reconocimiento por haber dado los primeros pasos de esta revolución topológica.

#### Los superconductores topológicos:

Otro campo sumamente activo en la actualidad es la búsqueda de materiales superconductores topológicos. Los superconductores se caracterizan por la existencia de un gap de energía entre el estado fundamental, consistente en una superposición coherente de pares de Cooper, y las excitaciones fermiónicas correspondientes a la ruptura de dichos pares. Los superconductores topológicos tienen asociado un invariante topológico y contienen excitaciones de baja energía adicionales, que corresponden a estados espacialmente localizados en el borde del material. La peculiaridad de estos estados de borde es que se describen en términos de fermiones de Majorana. Los

mismos fueron originalmente propuestos por E. Majorana en el contexto de la teoría cuántica relativista y se caracterizan por describir simultáneamente partícula y antipartícula. Tienen características especiales que los hace muy promisorios para implementar qubits topológicamente protegidos sumamente robustos. La evidencia experimental de la superconductividad topológica está aún en discusión. Se han reportado observaciones consistentes con la existencia de fermiones de Majorana en cables superconductores fabricados con AlInAs, aunque no existe consenso sobre la naturaleza de las mismas.

**El grafeno:** El grafeno es un material puramente bidimensional y consiste en una monocapa de átomos de carbono dispuestos en una red en forma de panal de abejas. Fue sintetizado por Geim y Novoselov en el año 2004, quienes recibieron el Premio Nobel de Física en 2010 por este descubrimiento (The Nobel Prize, 2010). Su estructura electrónica corresponde a la de un “semimetal”, caracterizada por la presencia de conos de Dirac en los llamados puntos K de la zona de Brillouin, lo

que hace que los electrones se comporten como fermiones de Dirac sin masa. Desde el punto de vista fundamental, el grafeno exhibe una serie de propiedades notables. Entre ellas se destacan la altísima movilidad electrónica (Novoselov, Kostya, 2005), la resistencia mecánica excepcional (Lee, Changgu, 2008) o el efecto Hall cuántico a temperatura ambiente (Novoselov, Konstantin S., 2007).

Más allá de su interés fundamental, el grafeno se consolidó como un material paradigmático para múltiples áreas de investigación. Su versatilidad ha inspirado la exploración de familias de materiales que también admiten un límite bidimensional, como los dicalcogenuros de metales de transición. Más recientemente, ha generado renovado interés la ingeniería de fases cuánticas mediante el apilamiento controlado de capas con diferentes ángulos de giro (“twistrónica”). En este sentido, el grafeno no solo inauguró un nuevo campo de investigación, sino que también transformó la manera en que se conciben y diseñan fases cuánticas de la materia en dos dimensiones.

**Otros materiales cuánticos:** Si bien la noción de fase topológica en la materia condensada emergió en sistemas bidimensionales, como en el caso del efecto Hall cuántico, pronto se comprendió que estos conceptos ofrecían un marco generalizable a materiales tridimensionales. La primera generalización en este sentido fue la predicción y posterior verificación de los aisladores topológicos tridimensionales (Fu, Liang, Charles L. Kane, 2007 // Moore, Joel E., 2007), caracterizados por un volumen eléctricamente aislante y superficies metálicas con estados protegidos por la simetría de inversión temporal. Ejemplos paradigmáticos incluyen los compuestos de la fami-

lia  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , en los que se observaron experimentalmente conos de Dirac en la superficie mediante espectroscopía de fotoemisión (Xia, Yuqi, 2009 // Hsieh, David, 2009).

Poco después, se identificó que simetrías cristalinas puntuales también podían proteger estados electrónicos topológicos de superficie. Este hallazgo condujo a la definición de los aisladores topológicos cristalinos (Fu, Liang, 2011), cuya topología no depende de la simetría ante inversión temporal, sino de simetrías espaciales como reflexiones o rotaciones. Materiales como  $\text{SnTe}$  se convirtieron en ejemplos representativos de esta clase (Tanaka, Y., 2012), ampliando de manera significativa el conjunto de sistemas susceptibles de albergar fases topológicas.

Otra extensión relevante surgió del estudio de las transiciones entre fases aislantes topológicas y triviales. En este contexto, en 2007 Murakami (Murakami, Shuichi, 2007) demostró que al analizar la evolución continua entre un aislante trivial y un aislante topológico tridimensional, podían aparecer fases intermedias caracterizadas por la existencia de cruces de bandas en el nivel de Fermi. Estos cruces, en general posibles en ausencia de inversión espacial y/o temporal, son denominados nodos de Weyl pues corresponden a excitaciones electrónicas efectivas que se identifican con las propiedades de los fermiones de Weyl, concebidos en la física de altas energías. En particular, se entendió en base a argumentos muy generales asociados a las características del espectro de energía de un sistema cuando la degeneración de espín se rompe, que los materiales aisladores topológicos sin simetría de inversión espacial podían naturalmente encontrarse experimentalmente cerca de la fase de semimetal de Weyl.

Los semimetales de Weyl constituyen un ejemplo de una fase topológica *gapless* en la que la robustez ante perturbaciones no surge de las propiedades topológicas del conjunto total de estados ocupados en un aislante, sino de la estabilidad intrínseca asociada a cruces de dos bandas en tres dimensiones. Una consecuencia distintiva de estos materiales es la aparición de arcos de Fermi en la superficie, que conectan proyecciones de nodos de Weyl de carga topológica opuesta. Estos estados fueron confirmados experimentalmente en 2015 en compuestos como TaAs (Lv, B. Q., 2015 // Xu, Su-Yang, 2015).

La generalización de la topología a tres dimensiones no solo permitió comprender mejor los aisladores topológicos, sino que también abrió el camino hacia nuevas familias de materiales cuánticos. Entre ellas se incluyen los semimetales de líneas nodales (Burkov, A. A., M. D. Hook, 2011), en los que los puntos degenerados forman líneas cerradas en el espacio recíproco; y los llamados fermiones múltiplemente degenerados, donde la simetría cristalina estabiliza cruces de bandas con multiplicidades mayores que dos (Bradlyn, Barry, 2016). Estas fases, hoy intensamente estudiadas, refuerzan la idea de que la topología y la geometría se han convertido en un principio organizador de las propiedades electrónicas de los materiales, en un sentido amplio.

Esta extensión de los conceptos topológicos al vasto conjunto formado por materiales cristalinos en tres dimensiones naturalmente se ve aún más enriquecida al considerar las posibilidades que surgen en **presencia de orden magnético de largo alcance**. Por ejemplo, en los semimetales de Weyl magnéticos, la ruptura espontánea de la simetría de inversión temporal por el orden magné-

tico permite el control de nodos de Weyl vía el acoplamiento de los grados de libertad magnéticos con un campo magnético externo. Además, aquellas propiedades que efectivamente estén asociadas con el orden son pasibles de ser controladas con la temperatura. Un caso interesante en este sentido lo ofrecen sistemas basados en aislantes topológicos en 3D donde existe orden de largo alcance antiferromagnético. En este caso, la combinación de simetrías cristalinas y de inversión temporal protege fases topológicas que tienen consecuencias diferentes en distintas superficies del material de acuerdo a cómo se disponen estas respecto del vector de Néel que caracteriza el orden magnético. Ejemplos notables son los compuestos de la familia  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  (Otrokov, Mikhail M., 2019). Estos desarrollos no solo amplían el panorama de materiales cuánticos, sino que también establecen un puente con la física de fases magnéticas correlacionadas, abriendo nuevas posibilidades tanto para aplicaciones en espintrónica como para la exploración de respuestas topológicas controladas por el orden magnético.

Un aspecto crucial en el desarrollo del campo ha sido el papel de los cálculos de primeros principios en la predicción y caracterización de fases topológicas. Estos son cálculos que bajo ciertas aproximaciones permiten estudiar teóricamente la estructura electrónica de un material a partir de su estructura cristalina. En particular, a partir de la teoría funcional de la densidad (DFT por la sigla en inglés de *Density Functional Theory*) ha sido posible identificar de manera sistemática materiales candidatos y predecir características específicas asociadas a los estados de superficie en un dado material. Este tipo de cálculo detallado no solo ha guiado la selección de compuestos a estudiar sino que

se ha vuelto una herramienta esencial para establecer en los distintos experimentos la observación de los estados topológicos de superficie. La estrecha interacción entre experimentos y cálculos de DFT ha sido, por lo tanto, un factor determinante en la rápida expansión del campo de los materiales topológicos.

Más recientemente, desarrollos teóricos como la teoría de *Topological Quantum Chemistry* (TQC) (Bradlyn, Barry, et al., 2017 // Vergniory, M. G., 2019) han contribuido a forjar un marco unificado para clasificar las fases electrónicas no interactuantes a partir de las representaciones de simetría de las bandas en el espacio recíproco. Esta estrategia permite establecer de forma algorítmica si una estructura de bandas corresponde a una combinación

trivial de representaciones atómicas o si, por el contrario, presenta una obstrucción topológica. Este enfoque, aplicado de modo sistemático en base a cálculos de DFT a grandes bases de datos cristalográficos, ha llevado a la conclusión de que una fracción significativa de los materiales en tres dimensiones alberga propiedades geométricas y topológicas de interés, tales como aisladores topológicos o semimetales protegidos por simetrías. Todos estos hallazgos han contribuido, en relativamente pocos años, a pasar de un proceso de descubrimiento caso por caso, guiado por intuiciones teóricas en modelos simplificados, a un esquema de exploración sistemática a escala de cientos de compuestos, en fuerte comunión con distintas disciplinas de la ciencia de materiales.

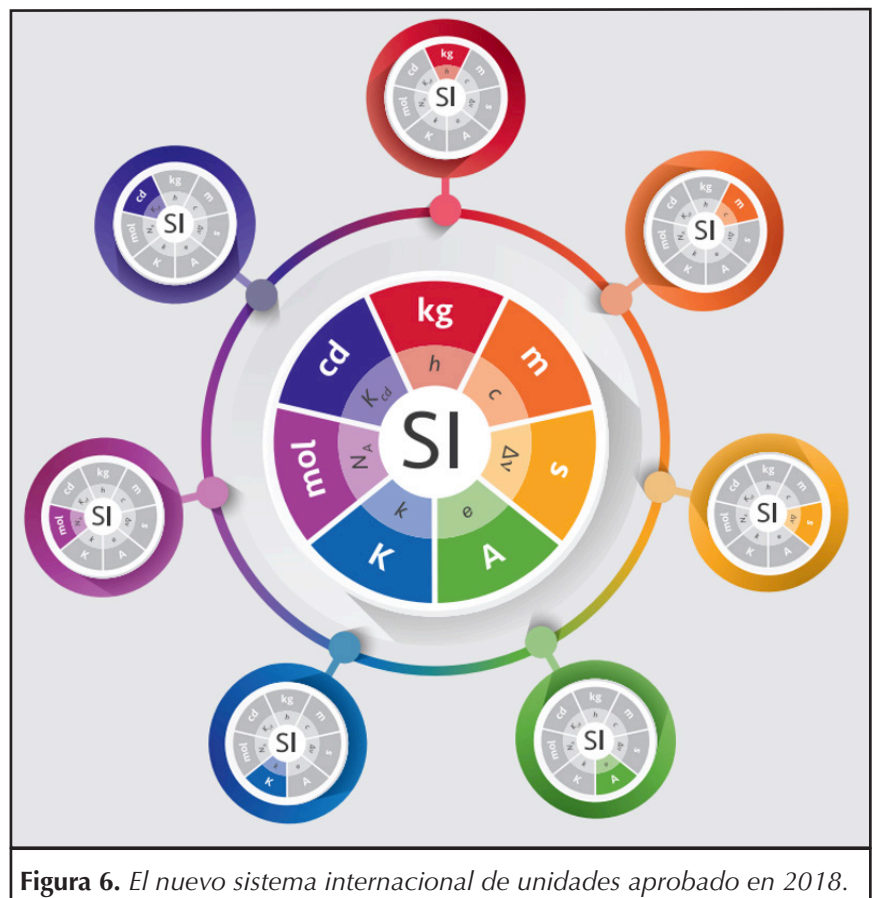


Figura 6. El nuevo sistema internacional de unidades aprobado en 2018.

## ■ EL NUEVO SISTEMA DE UNIDADES Y METROLOGÍA ELÉCTRICA

Los avances que se describieron —y muchos otros no abarcados en este artículo— permitieron acordar una modificación profunda del Sistema Internacional de Unidades (SI), que finalmente se implementó en 2019 (Göbel, Ernst O., and Uwe Siegner, 2019). En el nuevo sistema, las siete unidades básicas se definieron a partir de siete constantes de referencia (constantes universales con valores numéricos fijados). En Argentina el INTI es el organismo que, por ley, debe llevar a cabo la tarea de realizar estas unidades bajo un sistema nacional de calidad (Ley 19511 junto a su reglamentación y Decreto 1066/2018)

La estructura de todas las definiciones es análoga, por ejemplo, la definición del ampere establece: “El ampere, cuyo símbolo es A, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se define fijando el valor numérico de la carga elemental,  $e = 1,602176634 \times 10^{-19}$ , cuando se expresa en la unidad C, equivalente a A-s, donde el segundo se define a partir de la frecuencia de transición hiperfina del cesio  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ”. De este modo, basta con seleccionar experimentos que relacionen dichas constantes con mediciones para realizar (materializar) la unidad correspondiente.

En el caso del ampere, la realización práctica de la unidad no se efectúa, por el momento, contando cargas por unidad de tiempo, sino a partir de la realización de otras dos unidades: el volt y el ohm. Esto se logra mediante el efecto Hall cuántico y el efecto Josephson, aplicando la ley de Ohm ( $V = R I$ ) para relacionar la caída de voltaje  $V$  con la resistencia eléctrica  $R$  y la corriente  $I$  (SI Brochure, 2019). Actualmente, la incertidumbre alcanzada median-

te estos efectos es varios órdenes de magnitud menor que la obtenida por otros métodos, llegando a valores del orden de  $10^{-11}$  V/V y  $10^{-10}$   $\Omega/\Omega$  (Götz, Martin, 2018 // Janssen, T. J. B. M., 2012 // Hartland, A., 2007).

Uno de los aspectos más complejos en la redefinición del SI fue alcanzar un acuerdo internacional y un funcionamiento confiable en dos tipos de experimentos fundamentales: las balanzas de Kibble (antes llamadas balanzas de watt) y los experimentos de densidad cristalina por rayos X. Ambos permitieron redefinir el kilogramo vinculándolo a la constante de Planck  $h$ . La balanza de Kibble permite comparar potencias mecánica y eléctrica, siendo esta última determinada mediante los efectos cuánticos eléctricos. Los experimentos cuánticos mesoscópicos desempeñaron un papel central tanto en la medición de masa como en la de magnitudes eléctricas. La fabricación de esferas de silicio representa una síntesis de las capacidades técnicas alcanzadas, no solo en los sistemas de medición, sino también en el desarrollo de la tecnología de semiconductores durante el último siglo. Las exigencias técnicas necesarias para su elaboración y la posterior determinación de la constante de Avogadro implicaron el uso de tecnología de vanguardia. Un ejemplo notable fue la determinación precisa de la capa más externa de la esfera, uno de los aspectos críticos que permitió avanzar en el cambio del Sistema Internacional. El desarrollo de la balanza de Kibble llevó varios años y generó una intensa cooperación internacional durante la década de 2010. El objetivo fue optimizar su desempeño hasta lograr que las realizaciones en distintos laboratorios del mundo convergieran en resultados consistentes. En este proceso, los patrones eléctricos cuánticos mesoscópicos fueron fundamentales, ya que per-

mitieron determinar con precisión las variables eléctricas involucradas en la balanza.

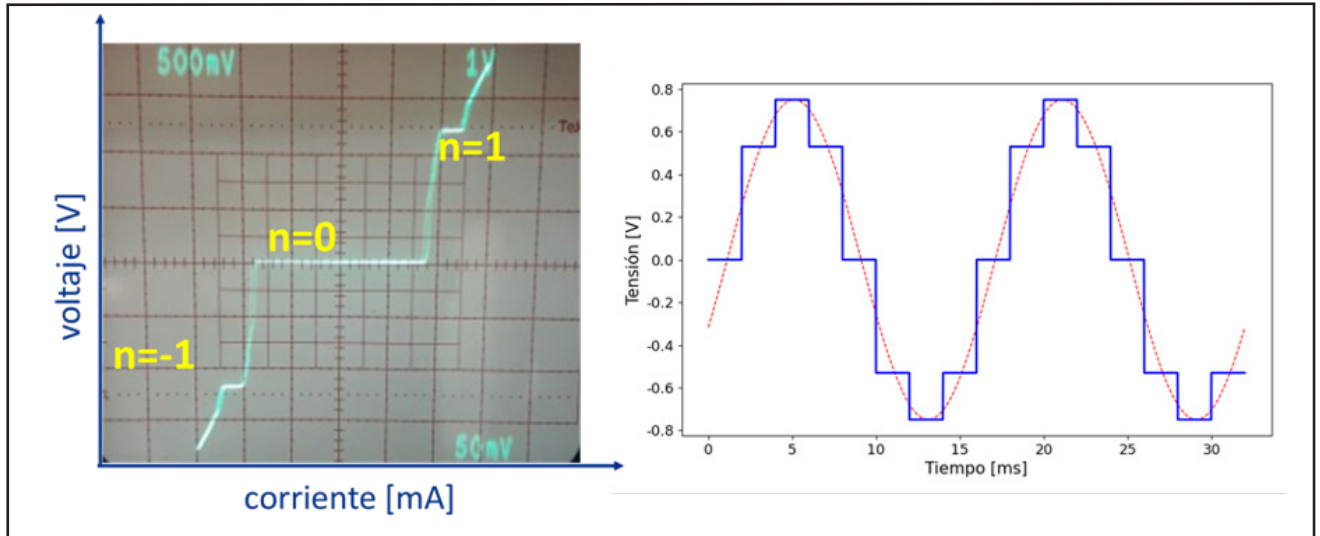
## ■ EL PATRÓN DE VOLTAJE Y EL EFECTO JOSEPHSON

El efecto Josephson se utiliza desde hace varias décadas como patrón de voltaje o tensión eléctrica. Los primeros trabajos que utilizaban algunas juntas solo permitían reproducir diferencias de potencial de algunos milivolt. El voltaje Josephson responde a

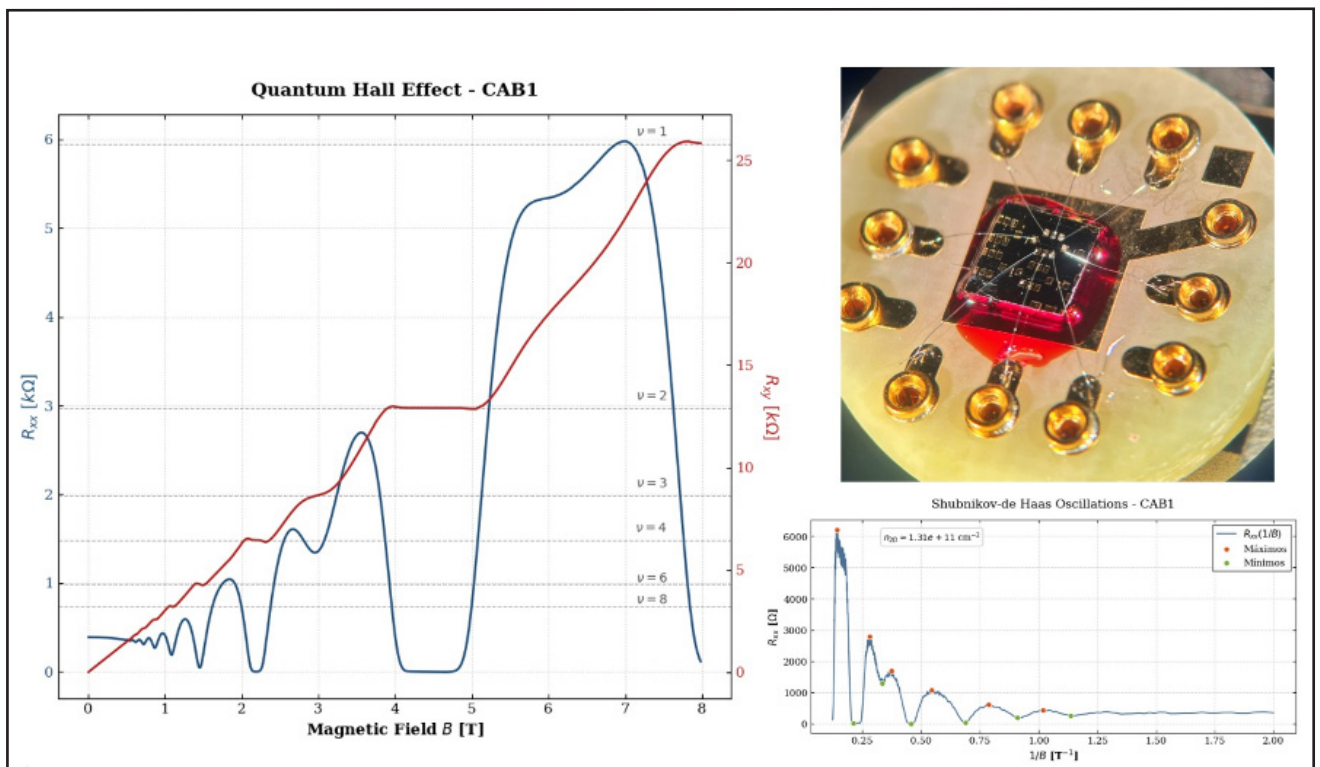
$$V_J = n \frac{h}{2e} f = n \Phi_0 f = n f / K_J$$

Una frecuencia típica de trabajo de dispositivos Josephson es 70 GHz, que resulta en diferencia de potencial eléctrico de unos 145  $\mu$ V por junta. Los avances en el desarrollo de juntas y técnicas electrónicas permitieron obtener hacia 1990 dispositivos de unas 69.000 juntas que logran alcanzar hasta 10 V DC, voltajes típicos deseables para caracterizar instrumental. En este caso los dispositivos utilizados suelen ser tipo superconductor-aislante-superconductor, juntas de efecto túnel, y cuyas curvas de corriente y potencial son como las mostradas en la **Figura 7**.

Los avances en técnicas de microelectrónica basada en superconductores y de sistemas de control alcanzaron un desarrollo lo suficientemente maduro para dar un salto cualitativo a los denominados sistemas Josephson programables (PJVS) y pulsados (JAWS). En el caso de los PJVS los dispositivos utilizan alrededor de 20000 juntas tipo superconductor-barrera metálica-superconductor, arregladas en segmentos binarios de juntas. A diferencia del caso anterior, el estado cuántico de estas juntas depende de la corriente aplicada, dando un método para controlar el estado del



**Figura 7.** A la izquierda se muestra la respuesta de un dispositivo en un típico gráfico de tensión-corriente. En este caso corresponde a un dispositivo sin histéresis, que permite establecer el estado cuántico ( $n$ ) por medio de la corriente aplicada. Utilizando un arreglo de este tipo de juntas y controlando temporalmente la corriente es posible programar señales como la que se muestra en el gráfico de la derecha, donde cada escalón azul corresponde a un estado cuántico del sistema. Esto permite aproximar la señal deseada (punteada roja) por medio de una serie de escalones que solo dependen de constantes universales y de una frecuencia.



**Figura 8.** Hacia un patrón Hall "Hecho en Argentina": un gas bidimensional crecido en el MBE del Centro Atómico Bariloche (CAB), una barra Hall fabricada en el Centro Atómico Constituyentes (CAC), mediciones realizadas en el Grupo de Circuitos Cuánticos de Bariloche por investigadores de INTI, CAC y CAB. Plateaus del Efecto Hall Cuántico de gran calidad.

sistema en el tiempo. Se utilizan fuentes sincrónicas que seleccionan el estado del sistema en cada instante. Realizando un control preciso de estas corrientes es posible generar diferentes formas de onda aproximadas por escalones, cuyo valor depende nuevamente solo del flujo  $(h/2e)$ , de un número entero y de la frecuencia de microondas aplicada al dispositivo, como se muestra en la **Figura 7**. Con estos sistemas es posible calibrar fuentes y medir señales periódicas incluso multitonos.

Finalmente los sistemas de sintetización Josephson arbitrarios (JAWS) son fuentes programables que generan señales arbitrarias cuyo valor eficaz (RMS) está definido cuánticamente. En este esquema, la señal deseada se obtiene modulando las microondas que se aplican al dispositivo por medio de pulsos, programados de forma tal que el dispositivo los integra a la señal que se desee generar. El inconveniente por el momento son los voltajes de salida, que para un único dispositivo no superan los 200 mV. Estos sistemas ya se han utilizado en la generación de fuentes de referencia aplicadas a puentes de medición, así como en dispositivos superconductores sensibles como los SQUID, empleados en detección de partículas y magnetometría de ultra-alta sensibilidad.

Argentina cuenta con las tres versiones de los sistemas descritos, al momento de escribir estas líneas, el sistema PJVS es utilizado para calibraciones DC, pero resta finalizar su aplicación a dispositivos y fuentes AC. Respecto al JAWS, aún se encuentra en desarrollo, habiendo realizado los primeros ensayos de generación y medición.

### ■ EL PATRÓN DE RESISTENCIA Y EL EFECTO HALL CUÁNTICO

Desde su descubrimiento los sistemas basados en el efecto Hall

cuántico se han extendido como referencias absolutas de resistencia en numerosos institutos de metrología en el mundo. En América Latina, Argentina (ver **Figura 8**), Brasil y México disponen de este tipo de sistemas, mientras que otros países como Colombia están en proceso de incorporarlos. La cuantización de resistencia ya mencionada permitió extender este sistema como realización de la unidad de resistencia utilizando principalmente dispositivos basados en heteroestructuras de GaAs/AlGaAs.

Si bien el grafeno despertó un gran interés para estas aplicaciones, su utilización como patrón de resistencia presenta desafíos. En particular, estabilizar el sistema demostró ser un problema complejo y ha limitado su despliegue generalizado. Diversos institutos investigan técnicas para superar estas limitaciones con el fin de obtener sistemas “de mesa”, basados en criogeneradores e imanes superconductores de menor porte.

Como se discutió, en la última década el auge del desarrollo de aislantes topológicos abrió la posibilidad de pensarlos como posibles candidatos para patrones de resistencia, pensando en este caso en su capacidad de cuantización de resistencia sin la necesidad de grandes campos magnéticos. Por ejemplo, mediciones de precisión en compuestos basados en V-dopado  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , alcanzando partes en  $10^9$  (Patel, D. K., 2024), demostraron la universalidad del efecto Hall cuántico en este tipo de sistemas, consolidando el potencial de esta nueva clase de materiales.

Un punto no menor es cómo vincular la resistencia cuántica a los patrones secundarios que se emplean en laboratorios de calibración. La técnica más precisa disponible es el uso de comparadores criogénicos

de corriente (CCC). Estos dispositivos realizan comparaciones en corriente continua entre el patrón Hall cuántico y resistores de trabajo, para lo cual utilizan el efecto Meissner para medir la diferencia de corriente entre dos ramas de un puente de medición. Estas diferencias se miden mediante una bobina de pick-up acoplada a un SQUID, un dispositivo basado en dos junturas superconductoras con la capacidad de medir cuantos de flujo magnético.

### ■ LOS MATERIALES CUÁNTICOS Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS DE SEGUNDA GENERACIÓN

Si el entendimiento de la estructura electrónica de los sólidos permitió el desarrollo de la primera generación de tecnologías cuánticas —asociadas, por ejemplo, al transistor y a la electrónica basada en semiconductores— muchas de las líneas de investigación actuales en materiales cuánticos y fenómenos topológicos se perfilan como parte de una posible segunda generación de tecnologías cuánticas.

En este contexto, aquí presentamos un breve resumen y comentamos algunas perspectivas futuras. Entre ellas se encuentran: el uso del efecto Hall cuántico anómalo en aisladores topológicos dopados magnéticamente para aplicaciones metrológicas, lo que permitiría definir estándares de resistencia sin necesidad de emplear campos magnéticos intensos; la utilización del efecto Hall cuántico en grafeno para establecer estándares de resistencia operables a temperaturas más elevadas; el aprovechamiento de fenómenos mesoscópicos como la reflexión de Andreev para implementar qubits superconductores híbridos; el estudio de qubits topológicos basados en estados de borde de Majorana, con el objetivo de explotar la robustez de los estados topológicos; y el desarrollo de dispositivos basa-

dos en materiales topológicos para computación cuántica, sensado y metrología, incluyendo la fabricación de chips capaces de integrar en un único dispositivo la medición de distintas magnitudes físicas como frecuencias, voltajes, corrientes y temperaturas.

Cabe destacar que en Argentina ya se desarrollan varias líneas de investigación relacionadas con estos temas, tanto en grupos teóricos como experimentales. En particular, ver **Figura 8**, existen esfuerzos vinculados al estudio de sistemas bidimensionales de electrones y fenómenos de transporte cuántico, incluyendo colaboraciones entre el INTI y centros atómicos de la CNEA, el crecimiento de heteroestructuras mediante técnicas de epitaxia de haces moleculares, la fabricación de geometrías tipo Corbino, y la caracterización de nuevos materiales cuánticos en distintos laboratorios del país, entre otros.

## ■ GLOSARIO

**Aislador topológico:** Material que se comporta como un aislante eléctrico en su interior (volumen), pero que conduce la electricidad de manera perfecta y sin resistencia en su superficie o bordes, cualidad que está protegida por propiedades topológicas de la estructura electrónica.

**Balanza de Kibble (antes balanza de Watt):** Instrumento electromecánico que mide el peso de una masa con altísima precisión comparando la potencia mecánica con la potencia eléctrica. Fue fundamental para la redefinición del kilogramo en el Sistema Internacional de Unidades.

**Conos de Dirac / Nodos de Weyl:** Estados electrónicos de ciertos materiales (como el grafeno o los semimetales de Weyl) donde las bandas de conducción y valencia se tocan

en un punto. En estos nodos, los electrones se comportan como partículas sin masa que viajan a velocidades cercanas a la de la luz en el material.

**Efecto Hall cuántico:** Fenómeno físico que ocurre en gases de electrones bidimensionales sometidos a muy bajas temperaturas y altos campos magnéticos. Su característica principal es que la resistencia transversal se cuantiza en escalones exactos, proporcionales a constantes fundamentales de la naturaleza ( $h/e^2$ ).

**Efecto Josephson:** Fenómeno cuántico macroscópico que ocurre cuando dos superconductores están separados por una barrera aislante extremadamente delgada (juntura Josephson). Permite el paso de supercorrientes sin aplicar voltaje o genera oscilaciones de alta frecuencia si se aplica un voltaje, siendo esta última propiedad la base del patrón de voltaje actual.

**Estados de borde quirales / helicoidales:** Canales de conducción en los límites de ciertos materiales topológicos por donde los electrones viajan en una sola dirección (quirales) o con direcciones acopladas a su espín (helicoidales). Esta "restricción de tránsito" evita que choquen y retrocedan, permitiendo una conducción sin resistencia.

**Fermiones de Majorana:** Partículas que son simultáneamente su propia antipartícula. En materia condensada, hay distintos escenarios teóricos donde emergen como cuasipartículas en los bordes de superconductores topológicos y son altamente codiciadas para el diseño de computadoras cuánticas tolerantes a fallos.

**Materiales cuánticos:** Sistemas de estado sólido cuyas propiedades macroscópicas y funcionalidades no

pueden explicarse con la física clásica, sino que derivan directamente de efectos cuánticos como el entrelazamiento, la coherencia de fase o la topología.

**Metrología:** Ciencia dedicada al estudio de las mediciones, la definición de las unidades de medida (como el volt, el ohm o el kilogramo) y la calibración de instrumentos para garantizar precisión y trazabilidad a nivel mundial.

**Pares de Cooper:** Parejas de electrones que, a temperaturas muy bajas, vencen su repulsión eléctrica natural y se atraen mutuamente gracias a su interacción con la red atómica del material. Son los portadores de carga responsables de la superconductividad.

**SQUID (Superconducting Quantum Interference Device):** Dispositivo superconductor de interferencia cuántica. Es un magnetómetro extremadamente sensible, basado en anillos con juntas Josephson, capaz de medir cambios minúsculos en campos magnéticos.

**Superconductor:** Material que, al ser enfriado por debajo de una temperatura crítica ( $T_c$ ), pierde totalmente su resistencia eléctrica y expulsa perfectamente los campos magnéticos de su interior (efecto Meissner).

**Topología (en física de la materia condensada):** Propiedad matemática de la estructura electrónica de ciertos materiales que permanece invariable ante deformaciones, defectos o perturbaciones continuas. Funciona como un "escudo" matemático que garantiza la robustez de fenómenos en bordes del sistema, como la conducción perfecta o la presencia de ciertas excitaciones electrónicas.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Asianometry 2024, "The first transistors" [https://youtu.be/Pzy\\_KOBddRA?si=9aTpKdz7mbBjMsYE](https://youtu.be/Pzy_KOBddRA?si=9aTpKdz7mbBjMsYE)
- Bernevig, B. Andrei, Taylor L. Hughes, and Shou-Cheng Zhang. "Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells." *Science* 314.5806 (2006): 1757-1761.
- Bradlyn, Barry, et al. "Beyond Dirac and Weyl fermions: Unconventional quasiparticles in conventional crystals." *Science* 353.6299 (2016): aaf5037.
- Bradlyn, Barry, et al. "Topological quantum chemistry." *Nature* 547.7663 (2017): 298-305.
- Brian D. Josephson – Nobel Lecture, 1973. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1973/josephson/lecture/>
- Burkov, A. A., M. D. Hook, and Leon Balents. "Topological nodal semimetals." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 84.23 (2011): 235126.
- Fu, Liang, Charles L. Kane, and Eugene J. Mele. "Topological insulators in three dimensions." *Physical Review Letters* 98.10 (2007): 106803.
- Fu, Liang. "Topological crystalline insulators." *Physical Review Letters* 106.10 (2011): 106802.
- Göbel, Ernst O., and Uwe Siegrner. *The New International System of Units (SI): quantum metrology and quantum standards*. John Wiley & Sons, 2019.
- Götz, Martin, et al. "Precision measurement of the quantized anomalous Hall resistance at zero magnetic field." *Applied Physics Letters* 112.7 (2018).
- Haldane, F. Duncan M. "Model for a quantum Hall effect without Landau levels: Condensed-matter realization of the 'parity anomaly'." *Physical Review Letters* 61.18 (1988): 2015.
- Hartland, A., et al. "An international direct comparison of two Josephson-effect voltage standards." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 27.4 (2007): 470-474.
- Higgs, Peter, Nobel Lecture 2013. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/higgs/lecture/>
- Hsieh, David, et al. "Observation of unconventional quantum spin textures in topological insulators." *Science* 323.5916 (2009): 919-922.
- Janssen, T. J. B. M., et al. "Precision comparison of the quantum Hall effect in graphene and gallium arsenide." *Metrologia* 49.3 (2012): 294.
- Kane, Charles L., and Eugene J. Mele. " $Z_2$  topological order and the quantum spin Hall effect." *Physical Review Letters* 95.14 (2005): 146802.
- Konig, Markus, et al. "Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells." *Science* 318.5851 (2007): 766-770.
- Lee, Changgu, et al. "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene." *Science* 321.5887 (2008): 385-388.
- Lu, B. Q., et al. "Observation of Weyl nodes in TaAs." *Nature Physics* 11.9 (2015): 724-727.
- Moore, Joel E., and Leon Balents. "Topological invariants of time-reversal-invariant band structures." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 75.12 (2007): 121306.
- Murakami, Shuichi. "Phase transition between the quantum spin Hall and insulator phases in 3D: emergence of a topological gapless phase." *New Journal of Physics* 9.9 (2007): 356.
- Novoselov, Konstantin S., et al. "Room-temperature quantum Hall effect in graphene." *Science* 315.5817 (2007): 1379-1379.
- Novoselov, Kostya S., et al. "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene." *Nature* 438.7065 (2005): 197-200.
- Otrokov, Mikhail M., et al. "Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator." *Nature* 576.7787 (2019): 416-422.
- Patel, D. K., Fijalkowski, K. M., Kruskopf, M., Liu, N., Götz, M., Pesel, E., Jaime, M., Klement, M., Schreyeck, S., Brunner, K., Gould, C., Molenkamp, L. W. y Scherer, H. (2024). "A zero external magnetic field quantum standard of resistance at the  $10^{-9}$  level". *Nature Electronics*, 7, 1111–1116. <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01295-w>
- SI Brochure, 9th edition (2019), Appendix 2 <https://www.bipm.org/documents/20126/41489676/SI-App2-ampere.pdf>

Tanaka, Y., et al. "Experimental realization of a topological crystalline insulator in SnTe." *Nature Physics* 8.11 (2012): 800-803.

The Nobel Prize in Physics 2016. NobelPrize.org., <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2016/summary/>

The Nobel Prize in Physics 2010. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>

Thouless, David J., et al. "Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential."

*Physical Review Letters* 49.6 (1982): 405.

Vergniory, M. G., et al. "A complete catalogue of high-quality topological materials." *Nature* 566.7745 (2019): 480-485.

Xia, Yuqi, et al. "Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface." *Nature Physics* 5.6 (2009): 398-402.

Xu, Su-Yang, et al. "Experimental discovery of a topological Weyl semimetal state in TaP." *Science Advances* 1.10 (2015): e1501092.

## ■ NOTAS

1 Bardeen es el único doble Premio Nobel de Física, en 1956 por el transistor (*Asianometry*, 2024) y en 1972 por la teoría BCS.

2 En su conferencia Nobel, P. Higgs reconoce haberse basado en el análisis de P.W. Anderson de superconductores (P. Higgs, 2013).