



Un nuevo orden cuántico: materiales inteligentes con propiedades topológicas¹

A. Martín Ruiz²

Resumen. En los últimos años, una nueva clase de materiales ha comenzado a cambiar nuestra comprensión de cómo se comporta la materia en el mundo cuántico. Se trata de los *materiales cuánticos topológicos*, sistemas que combinan las leyes de la mecánica cuántica con propiedades

geométricas y que podemos describir en términos de topología. Este artículo ofrece un panorama general de este campo emergente y explica, de forma breve, nuestras contribuciones recientes derivadas del proyecto de investigación.

Palabras clave: materiales topológicos, anomalías cuánticas, transporte electrónico, magnetoelectricidad

Cuando pensamos en los estados de la materia, solemos imaginar los clásicos: sólido, líquido y gaseoso; sin embargo, desde el punto de vista de la física, las fases de la materia se distinguen no solo por su forma o densidad, sino también por las simetrías que poseen. A lo largo del siglo XX, los físicos desarrollaron una poderosa herramienta para clasificar estas fases: el concepto de *rompimiento de simetría*. Por ejemplo, cuando un material pasa de líquido a sólido, se rompe la simetría de traslación, pues los átomos dejan de estar distribuidos de manera uniforme y adoptan un orden fijo en un cristal. Este enfoque ha permitido entender muchas de las transiciones entre distintas fases, desde los imanes hasta los superconductores convencionales.

¹ Proyecto PAPIIT IA102722: “Materiales cuánticos topológicos: transporte electrónico y magnetoelectricidad inducidos por anomalías”.

² Instituto de Ciencias Nucleares. alberto.martin@nucleares.unam.mx



Uno de los descubrimientos que puso en aprietos la clasificación tradicional basada en simetrías fue el efecto Hall. Cuando un material conductor se somete a un campo magnético perpendicular a la corriente, los electrones se desvían lateralmente y aparece una tensión transversal: eso es el voltaje Hall que Edwin Hall midió en 1879. Durante décadas se pensó que se trataba de un fenómeno relativamente ordinario, hasta que en 1980, Klaus von Klitzing encontró algo asombroso: al enfriar un gas bidimensional de electrones confinado en una lámina de silicio-germanio, a temperaturas cercanas al cero absoluto y bajo campos magnéticos muy intensos, la conductividad transversal (σ_{xy}) no se comportaba como una variable continua, sino que saltaba en escalones perfectamente definidos, valores que eran múltiplos enteros de una constante fundamental ($\frac{e^2}{h}$). Decimos que la conductividad está *cuantizada* cuando, por más que cambiemos la intensidad del campo magnético o la densidad de electrones, σ_{xy} solo puede tomar esos valores permitidos, igual que las teclas de un piano que no aceptan notas intermedias.

Este comportamiento rompía el molde: no implicaba que alguna simetría se estuviera perdiendo (el cristal ni siquiera cambiaba de estructura). Entonces, ¿cómo explicar esos niveles discretos tan robustos? La pista vino de una rama matemática llamada topología, que estudia propiedades que permanecen invariantes cuando un objeto se deforma suavemente (estirar, torcer o aplastar) sin cortarlo ni pegarlo. El ejemplo clásico es la comparación entre una dona y una taza de café: ambos tienen un único agujero y, topológicamente, son equivalentes; no importa cuánto moldee la masa de la dona o la cerámica de la taza, mientras el agujero siga ahí, pertenecen a la misma *clase topológica*. En el efecto Hall cuántico, la cuantización de la conductividad está dictada por un número topológico (el número de Chern) que cuenta cuántas “vueltas” dan los electrones en un espacio abstracto llamado espacio de momentos. Igual que el agujero distingue a la dona de una esfera, este número distingue fases electrónicas que, aunque tengan la misma simetría cristalina, poseen propiedades de transporte radicalmente diferentes. En consecuencia, la topología amplió el marco teórico disponible para entender los estados de la materia, al permitir distinguir entre fases que no pueden diferenciarse mediante criterios convencionales de simetría.

La lección principal del efecto Hall cuántico fue que una propiedad de transporte, la conductividad transversal cuantizada, podía fijarse mediante un número topológico robusto, insensible a las impurezas del material. En 2006, un grupo de científicos teóricos de la Universidad de Pensilvania se preguntó si algo similar podría lograrse sin recurrir a campos magnéticos extremos. La clave

resultó ser la interacción espín-órbita, un *campo magnético interno* que los electrones experimentan al moverse en materiales con átomos pesados; se trata de un efecto relativista. Al reforzar este acoplamiento en una lámina bidimensional, mostraron que el sistema podía permanecer aislante en el interior y, al mismo tiempo, forzar la aparición de canales conductores en su contorno.

Estos bordes, donde los electrones con espines opuestos se mueven en direcciones contrarias, no pueden eliminarse fácilmente, porque están protegidos por una propiedad fundamental del sistema: su simetría bajo inversión temporal (es decir, el hecho de que las leyes físicas no cambian si se invierte el sentido del tiempo). Este comportamiento se puede describir mediante un número especial que solo puede tomar dos valores posibles y que indica si el material es trivial o topológico (invariante Z_2). En 2007 aparecieron los primeros ejemplos experimentales en pozos cuánticos de HgTe/CdTe y un año más tarde en tres dimensiones, en compuestos de bismuto y selenio. Nacieron así los *aislantes topológicos*, materiales que combinan un interior aislante con canales electrónicos en su superficie, lo que amplían el catálogo de fases de la materia más allá de lo permitido por la simple ruptura de simetrías.

Los aislantes topológicos demostraron que un material puede ser eléctricamente inactivo en su interior, pero muy conductor en su superficie, gracias a propiedades profundamente ligadas a la topología del sistema cuántico. El campo dio un nuevo giro con el descubrimiento de los *semimetales topológicos*. Para visualizar la diferencia, imaginemos que los niveles de energía disponibles para los electrones son como dos islas: en un aislante, las islas están separadas por un amplio canal de agua (la brecha energética) que impide a los electrones saltar de una a otra. En un semimetal topológico, ese canal se estrecha tanto que las islas apenas se tocan en unos pocos puntos o a lo largo de delgadas franjas de arena que emergen cuando baja la marea. En esos “puntos de contacto” los electrones pueden moverse libremente y se comportan como si no tuvieran masa, desplazándose con gran rapidez y reaccionando con extraordinaria sensibilidad a campos externos. Lo fascinante es que estas regiones de contacto están protegidas por la topología: pequeñas impurezas o deformaciones no pueden hacerlas desaparecer, igual que no se puede borrar el agujero de una dona sin romperla. Existen varios tipos de semimetales topológicos: Dirac, Weyl o de línea nodal, cada uno con su propia firma experimental. Estos materiales amplían nuestro catálogo de fases de la materia y abren perspectivas en electrónica ultrarrápida, espintrónica y sensores cuánticos de nueva generación.

Cuando los físicos hablan de *propiedades de transporte*, se refieren a la manera en que algo, carga eléctrica, calor o incluso momento magnético, se desplaza a través de un material. Comprender este tráfico interno es crucial por dos razones. Primero, nos dice cuán eficazmente el material puede desempeñar funciones tecnológicas: conducir corriente sin pérdidas, disipar o retener calor o convertir un flujo de electrones en una señal magnética y viceversa. Segundo, en los semimetales y aislantes topológicos, las reglas del transporte son extraordinarias: los electrones fluyen por canales ultradelgados en la superficie o a lo largo de nodos protegidos, inmunes a la mayoría de los defectos. Estudiar estas corrientes nos permite detectar la firma topológica del material y optimizarla para aplicaciones concretas, desde transistores que funcionen a velocidades récord hasta sensores lo bastante sensibles para registrar campos magnéticos diminutos o detectar calor con precisión quirúrgica. En pocas palabras, el transporte es el puente entre la belleza teórica de la topología y los dispositivos que podrían transformar la electrónica, la computación y la energía en los próximos años.

Otra propiedad distintiva de los materiales topológicos es la *magnetoelectricidad*, que consiste en la capacidad de un material para generar una respuesta eléctrica ante un campo magnético, o una respuesta magnética ante un campo eléctrico. En las fases topológicas, esta respuesta no solo existe, sino que puede adquirir una forma extremadamente precisa y estable, determinada por la estructura cuántica del sistema. Esta versión *topológicamente protegida* de la magnetoelectricidad no solo permite explorar nuevas formas de acoplar electricidad y magnetismo, sino que también promete aplicaciones en dispositivos avanzados, como memorias energéticamente eficientes, actuadores de alta precisión y sensores ultrasensibles.

Después de describir los elementos básicos de las fases topológicas de la materia, es importante destacar que el objetivo del proyecto IA102722 “Materiales cuánticos topológicos: transporte electrónico y magnetoelectricidad inducidos por anomalías” fue precisamente estudiar las propiedades de transporte y la magnetoelectricidad en estos sistemas. La intención fue comprender mejor sus comportamientos únicos y explorar las posibles aplicaciones tecnológicas que podrían surgir, como dispositivos electrónicos ultrarrápidos, memorias de bajo consumo, sensores altamente sensibles y nuevas plataformas para tecnologías cuánticas. Aunque este proyecto es altamente técnico y requiere herramientas matemáticas y físicas avanzadas, en esta nota nos esforzaremos por presentar sus resultados de la manera más accesible posible, acercando al público general a este fascinante campo de la ciencia.

En el primer trabajo, resultado del proyecto, se analizó una lámina de grafeo posicionada cerca de la superficie de un aislante topológico.³ El objetivo fue explorar cómo la magnetoelectricidad topológica puede influir en el comportamiento del grafeo, un material conocido por su alta movilidad electrónica. El estudio mostró que el acoplamiento con el aislante permite modificar el flujo de electrones en la lámina de forma controlada, lo que sugiere nuevas formas de manipular señales eléctricas a través de efectos magnéticos.

En el segundo trabajo se investigó el transporte electroquímico en un semimetal de línea nodal, un tipo de material en el que los estados electrónicos se conectan a lo largo de líneas en lugar de puntos.⁴ El análisis reveló una manifestación de la anomalía de paridad, un efecto cuántico que da lugar a corrientes inesperadas y que se creía era exclusivo de los fermiones en dos dimensiones. Este resultado no solo confirma predicciones teóricas en un nuevo contexto, sino que también plantea posibles aplicaciones en dispositivos sensibles a la dirección de los estímulos externos.

El tercer estudio se centró en el efecto Hall planar en semimetales de Weyl, donde los electrones se comportan como partículas relativistas que se organizan alrededor de puntos singulares en el espacio de momentos.⁵ A diferencia del efecto Hall convencional, aquí la desviación en la trayectoria de los electrones ocurre incluso cuando el campo magnético es paralelo a la corriente. Esta respuesta direccional, típica de los semimetales de Weyl, podría utilizarse para detectar y controlar propiedades internas del material de forma más eficiente.

En el cuarto trabajo, se analizó el blindaje electromagnético de un circuito bifilar, un tipo de sistema compuesto por dos conductores paralelos que transportan corrientes opuestas, comúnmente utilizado en electrónica por su estabilidad y baja interferencia. La idea fue estudiar cómo se ve afectado este circuito cuando se coloca cerca de un aislante topológico. Los resultados mostraron que la respuesta magnetoeléctrica del material induce campos secundarios que modifican el entorno electromagnético del circuito, generando un efecto de *blindaje*

3 Daniel A. Bonilla, Jorge David Castaño-Yepes, A. Martín-Ruiz and Enrique Muñoz, "Electromagnetic coupling and transport in a topological insulator-graphene hetero-structure." *Physical Review B* 107 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.107.245103>

4 Rafael Flores-Calderón, Leonardo Medel y Alberto Martín-Ruiz, "Electrochemical transport in Dirac nodal-line semimetals". *Europhysics Letters* 143 (2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.17439>.

5 Leonardo Medel y Alberto Martín-Ruiz, "Planar Hall effect in Weyl semimetals induced by pseudoelectromagnetic fields". *Physical Review B* 108 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.155132>.

topológico.⁶ Esta interacción sutil podría aprovecharse en el diseño de dispositivos electrónicos con mayor control sobre el ruido y las interferencias, lo cual es crucial en tecnologías de precisión. En el quinto artículo, se examinó el espectro de energía de un átomo de hidrógeno ubicado en las cercanías de la superficie de un aislante topológico.⁷ El átomo de hidrógeno es uno de los sistemas más simples y bien entendidos en física, por lo que cualquier desviación en su comportamiento puede revelar efectos físicos nuevos. En este caso, se encontró que la presencia del aislante topológico modifica los niveles de energía del átomo de manera detectable, como resultado directo de la respuesta magnetoelectrónica. Este efecto sugiere una forma novedosa de detectar experimentalmente las propiedades topológicas, sin necesidad de medir corrientes eléctricas, sino observando con precisión espectros atómicos. Finalmente, el sexto artículo exploró un sistema híbrido compuesto por un punto cuántico y una nanoesfera de aislante topológico.⁸ Los puntos cuánticos son estructuras diminutas que confinan electrones en un espacio tan pequeño que sus niveles de energía se vuelven discretos, como en los átomos. Al interactuar con una nanoesfera topológica, se observó la formación de enredamiento cuántico entre ambos sistemas, inducido por la respuesta magnetoelectrónica. Este tipo de correlación, que no puede explicarse clásicamente, es fundamental en tecnologías cuánticas emergentes. El estudio sugiere que este tipo de plataformas híbridas podrían utilizarse en el desarrollo de sensores avanzados, dispositivos de control cuántico y nuevas arquitecturas para computación cuántica.

Los estudios desarrollados en el marco del proyecto 1A102722 muestran cómo las fases topológicas de la materia, aunque profundamente complejas desde el punto de vista teórico, pueden dar lugar a fenómenos físicos con un enorme potencial tecnológico. A través del análisis de transporte, magnetoelectricidad y sistemas híbridos, se ha revelado una rica variedad de efectos cuánticos que podrían impulsar nuevas generaciones de dispositivos. Este esfuerzo busca no solo avanzar en el conocimiento fundamental, sino también acercar estas ideas al público, mostrando que incluso los conceptos más abstractos de la física pueden tener un impacto tangible en el futuro de la tecnología.

6 L. Medel Onofre, A. Martín-Ruiz y L. F. Urrutia, “Electromagnetic shielding induced by topological surface states.” *European Physical Journal Plus* 138 (2023). <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-03598-3>

7 Jorge David Castaño-Yepes, D. J. Nader, y A. Martín-Ruiz, “Ground state and polarization of an hydrogenlike atom near a Weyl semimetal.” *Physical Review A* 107 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.107.032814>

8 Castro-Enriquez y Cambiaso. “Topological signatures in the entanglement of a topological insulator-quantum dot hybrid.” *Scientific Reports* 12, (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24939-3>