

FÍSICA DEL EFECTO KONDO

# DEL ENIGMA A LA NANOESCALA

**El efecto Kondo explica el comportamiento extraño de los electrones en metales con impurezas magnéticas a bajas temperaturas. Este fenómeno ha impulsado tanto desarrollos teóricos como aplicaciones en nanotecnología.**

Cuando pensamos en física, es común relacionarla con agujeros negros, galaxias distantes y partículas subatómicas viajando casi a la velocidad de la luz en gigantescos aceleradores como el famoso perteneciente a la Organización Europea para la Investigación Nuclear que conserva sus siglas originales del francés: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN). Pero la física también se ocupa de algo mucho más cercano: la materia tal como la encontramos todos los días, en sólidos y líquidos, en metales, plásticos, imanes, cristales y dispositivos electrónicos.

Esta rama de la física se llama materia condensada y es, a nivel mundial, el área en la que trabajan la mayor cantidad de físicos. La materia condensada se ocupa, en términos generales, de estados de la materia donde los átomos están densamente agrupados. Pero lo interesante no es solo la estructura de estos materiales, sino las propiedades colectivas que emergen cuando un número muy grande de partículas interactúan. En general, estas son propiedades difíciles de predecir si uno observa solo una partícula a la vez.

Un ejemplo simple es la sal: una molécula de cloruro de sodio no es ni dura, ni blanca, ni cúbica. Pero al agruparse en un cristal, esas propiedades aparecen.

**Palabras clave:** bajas temperaturas, efecto Kondo, materia condensada, punto cuántico, resistencia eléctrica.

## Diego Pérez Daroca<sup>1,3</sup>

Dr. en Ciencias Físicas

dperezdaroca@conicet.gov.ar

## Pablo Roura-Bas<sup>2,3</sup>

Dr. en Ciencias Físicas

<sup>1</sup> Departamento de Física de la Materia Condensada, GlyA, GAIDI, CNEA

<sup>2</sup> Centro Atómico Bariloche (CAB) GAIDI, CNEA

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Otros materiales, más complejos, exhiben fenómenos aún más extraños, comportamientos que parecen sacados de la ciencia ficción y que, sin embargo, se estudian en laboratorios de todo el mundo.

A lo largo del último siglo, el estudio de la materia condensada ha generado enormes avances tecnológicos. El transistor, piedra fundamental de toda la electrónica moderna, nació gracias a la comprensión de los materiales semiconductores (ver Glosario). Las pantallas de los celulares, las memorias magnéticas, los paneles solares y las luces LED, por mencionar solo algunos, tienen su origen en descubrimientos hechos por físicos de esta área.

En este artículo nos ocuparemos de uno de los fenómenos asombrosos que estudia la física de la materia condensada, el efecto Kondo.

## El enigma

A fines del siglo XIX, el hidrógeno y el helio eran los únicos gases que aún no se había logrado licuar. La licuefacción de gases estaba motivada por el deseo de comprender mejor los estados de la materia y poner a prueba las teorías emergentes de la termodinámica. Las investigaciones de la época querían explorar cómo se comportaban los gases a temperaturas extremas, cercanas al cero absoluto (ver Glosario) y observar fenómenos nuevos en ese régimen de temperaturas, como posibles transiciones de fase o cambios en las propiedades moleculares. Desde el punto de vista tecnológico y práctico, licuar gases ofrecía nuevas posibilidades para el desarrollo de técnicas de refrigeración, conservación de alimentos y aplicaciones industriales.

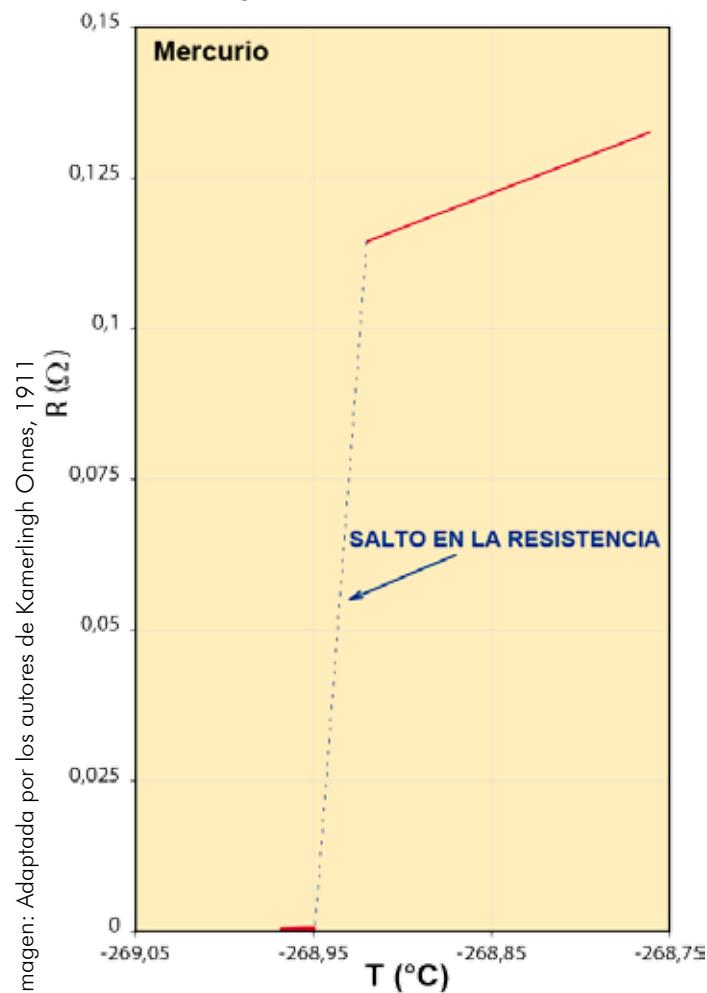
Sin embargo, para licuar un gas es necesario reducir su temperatura por debajo de cierto valor crítico, y en el caso del hidrógeno y el helio, eso implicaba alcanzar temperaturas extremadamente bajas, cercanas al cero absoluto, un desafío tecnológico formidable para la época.

Fue en este contexto que el físico escocés James Dewar diseñó un recipiente de doble pared con vacío en el medio, que aislabía térmicamente el contenido

y minimizaba las pérdidas de calor. Ese invento, que hoy conocemos simplemente como termo, nació como una herramienta de investigación científica.

Gracias a este diseño y a métodos de enfriamiento en cascada, Dewar logró licuar hidrógeno en 1898. Pero el gran hito llegó en 1908, cuando Heike Kamerlingh Onnes, en los Países Bajos, logró licuar helio, bajando la temperatura hasta unos pocos grados por encima del cero absoluto,  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Por ese logro fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1913.

Una vez que se logró licuar el helio comenzó un programa de estudio sobre la resistencia eléctrica de diversos metales a muy bajas temperaturas. La resistencia eléctrica es la propiedad que tienen los materiales de oponerse al paso de la corriente eléctrica, generando una pérdida de energía en forma de calor. Esta resistencia surge porque los electrones que se desplazan bajo un campo eléctrico chocan con los átomos y defectos del material, lo que reduce su velocidad neta y dificulta el flujo de corriente. Además de su interés como ciencia básica, estos estudios se motivaban también porque, conociendo cómo cambia la resistencia de un metal con la temperatura y con una calibración adecuada, es posible usarla como termómetro criogénicos.



**Figura 1. Resistencia eléctrica del mercurio en función de la temperatura, mostrando la transición superconductora, se ve como la resistencia cae a cero.**

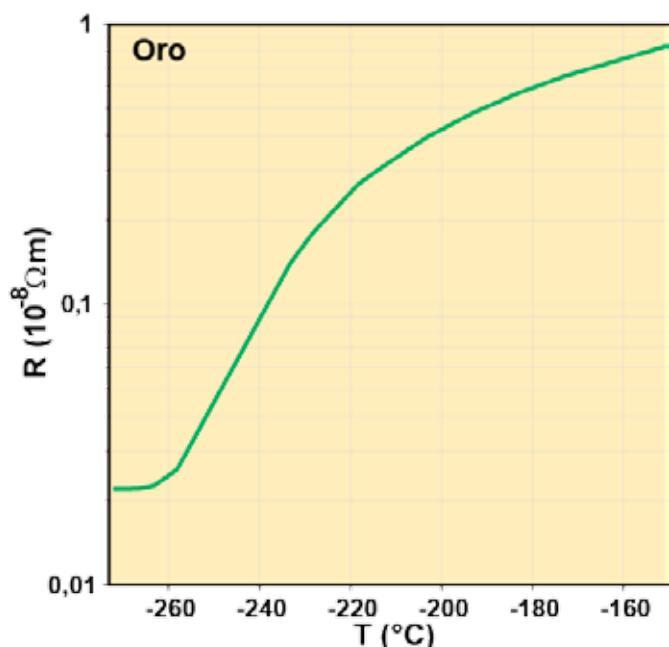


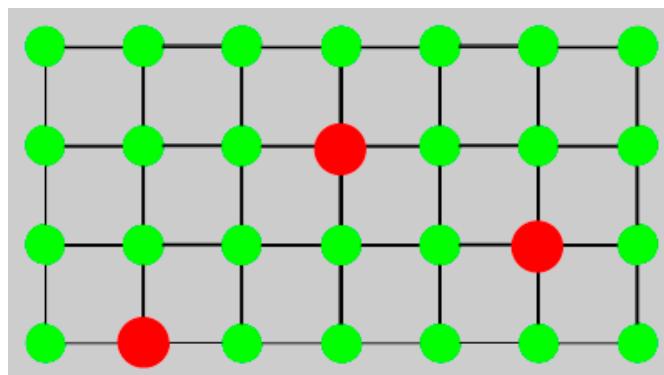
Imagen: Gentileza de los autores, con datos de Matuta, 1979.

**Figura 2. Resistividad del oro en función de la temperatura, mostrando el *plateau* al que se llega a bajas temperaturas debido a la presencia de defectos en el material. A diferencia de la resistencia, la resistividad es una propiedad propia del material, independiente de su tamaño o forma.**

En 1911, Heike Kamerlingh Onnes y colaboradores midieron la resistencia del mercurio a temperaturas muy bajas y observaron una abrupta caída a cero al descender por debajo de los  $-268,95^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 1). Este hallazgo marcó el sorprendente descubrimiento de la superconductividad, un estado en el que la electricidad fluye sin ninguna resistencia.

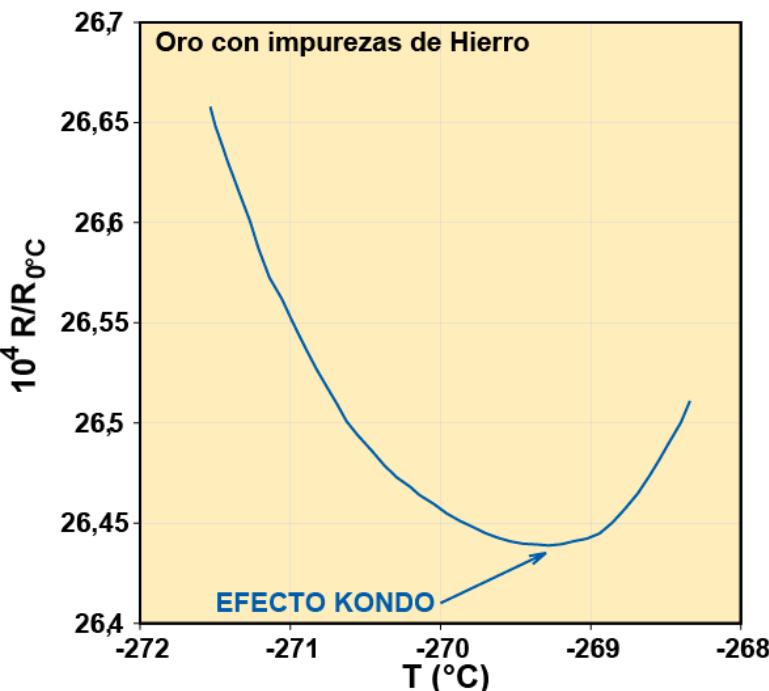
Sin embargo, en otros metales como el oro o el cobre, la resistencia no desaparecía por completo. En su lugar, se estabilizaba en un valor constante llamado resistencia residual (ver Figura 2), determinado por impurezas y defectos.

En estado sólido, la mayoría de los elementos se organizan en estructuras cristalinas, es decir, en arreglos periódicos y ordenados de átomos. Sin embargo, los materiales reales no son perfectos: presentan irregularidades en su estructura llamadas defectos cristalinos (ver Figura 3). Entre ellos se encuentran las



**Figura 3. Esquema de estructura cristalina periódica con impurezas (círculos rojos).**

Imagen: Adaptada por los autores de De Haas *et al.*, 1934.



**Figura 4. Resistencia eléctrica, normalizada al valor a temperatura 0 °C, del oro en función de la temperatura, mostrando el mínimo debido a las impurezas magnéticas.**

impurezas, que aparecen cuando átomos de otros elementos se incorporan a la red del material, las vacancias, que corresponden a la ausencia de átomos, y también desplazamientos o desalineaciones entre los planos atómicos.

En 1934, otro resultado obtenido en el laboratorio de Kamerlingh Onnes desconcertó a los físicos. Un grupo liderado por Wander de Haas observó que, al enfriar una muestra de oro con impurezas, la resistencia no se estabilizaba en un valor residual, sino que dejaba de disminuir y comenzaba a aumentar (ver Figura 4). Contra toda lógica, el material ofrecía más oposición al paso de la corriente cuanto más frío estaba. Este comportamiento no encajaba en ninguna teoría existente. A este fenómeno posteriormente se lo llamó efecto Kondo.

### Pistas iniciales

Hacia los años '50 si bien aún no se contaba con una explicación de este singular efecto, se habían logrado avances experimentales notables. Después de muchos y variados experimentos se comprendió que el efecto Kondo se manifestaba únicamente en presencia de impurezas magnéticas en metales. Es decir, las impurezas se comportan como pequeños imanes. Ejemplos típicos de elementos con estas características son el hierro o el cobalto. Estas impurezas se insertan en la red cristalina de un metal no magnético, como el oro o el cobre, generando efectos inusuales en la resistencia. También, se descubrió que el fenómeno se manifestaba cuando las impurezas estaban muy diluidas. De ahí que se hable de impureza única y que la resistencia adicional observada sea proporcional al

número de impurezas (ver Figura 5). Esta figura muestra el comportamiento típico en el régimen diluido, donde el efecto depende de la concentración de impurezas, pero sin interacción entre ellas.

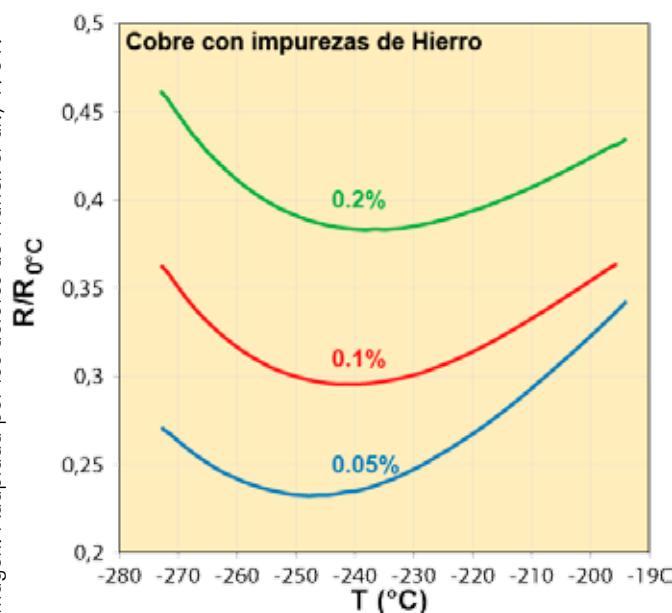
A comienzos de los años '50, el físico francés Jacques Friedel en la universidad de Bristol aportó una de las primeras pistas desde el lado teórico para comenzar a entender el efecto Kondo.

En los metales, la red cristalina de átomos deja a algunos electrones libres para moverse por todo el material. En lugar de pertenecer a un átomo en particular, forman lo que se suele llamar un mar de electrones que rodea a la estructura periódica y les da a los metales sus propiedades más características. A los electrones que forman este mar se los llama electrones de conducción.

Friedel descubrió que una impureza no pasa desapercibida para los electrones del metal: alrededor de ella el mar de electrones se reorganiza, generando pequeñas ondas en la distribución de electrones alrededor de la impureza, que reflejan cómo el metal se adapta a su presencia. No es que los electrones queden atrapados, sino que el metal responde y se adapta a la presencia de algo extraño, mostrando que incluso una sola impureza puede alterar el comportamiento colectivo de los electrones de conducción del metal, como si todo el sistema notara su presencia.

Otro paso significativo lo dio el físico Philip Anderson en los laboratorios de la empresa norteamericana Bell en 1961 al profundizar la idea de Friedel. Anderson introdujo un modelo que se utiliza para entender qué ocurre cuando se introduce una impureza en un metal, y fue más allá de la descripción de Friedel, que se

Imagen: Adaptada por los autores de Franck et al., 1961.



**Figura 5. Resistencia eléctrica del cobre, normalizada al valor a temperatura 0 °C, en función de la temperatura mostrando la dependencia del mínimo con el porcentaje de impurezas magnéticas de hierro.**

había limitado a mostrar cómo el mar de electrones se acomoda frente a ella. La impureza aporta un nivel de energía (ver Glosario) local, un lugar donde un electrón puede quedar “atrapado”. Si dos electrones intentan ocupar ese mismo nivel, se repelen fuertemente debido a su carga eléctrica. Por eso, normalmente, el nivel termina teniendo uno o ningún electrón, y un único electrón puede comportarse como un imán muy pequeño.

Un electrón en el nivel de la impureza se comporta como un pequeño imán, porque su espín (ver Glosario) no tiene con quién cancelarse. Si el nivel estuviera ocupado por dos electrones, sus espines se orientan en direcciones opuestas y sus efectos magnéticos se anulan, por lo que no habría un imán neto. Por eso, el comportamiento magnético de la impureza aparece principalmente cuando hay un solo electrón en el nivel local.

Cuando la impureza tiene un solo electrón desapareado en su último nivel de energía, el modelo de Anderson permite describir el comportamiento de una impureza magnética dentro del metal. Sin embargo, en los años '60, aunque el modelo de Anderson capturaba la idea del espín local (es decir, un espín confinado en la impureza y no distribuido por todo el metal) y su interacción con los electrones del metal, no podía explicar por qué la resistencia del metal aumentaba al enfriarlo, como se observaba en el efecto Kondo. Esto se debía a que los fenómenos que producen este aumento surgen de interacciones muy complejas entre muchos electrones, difíciles de calcular con los métodos disponibles en esa época. En otras palabras, el modelo contenía la física correcta, pero

faltaban herramientas matemáticas para resolverlo completamente y predecir el comportamiento a bajas temperaturas.

Por estas y otras contribuciones a la física de materiales con desorden e impurezas, Anderson recibió el Premio Nobel de Física en 1977. Su modelo fue una de las piedras fundamentales para lo que vendría después.

### Jun Kondo

En 1964, el físico japonés Jun Kondo (ver Figura 6), en lo que hoy es el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzadas, en Tokio, tomó un enfoque más sencillo para entender el mismo fenómeno. En lugar de considerar cómo estaban organizados los niveles de energía de la impureza, como hacía Anderson, Kondo se enfocó solo en la interacción entre el espín local de la impureza y los electrones del metal, describiéndola con lo que hoy se conoce como modelo de Kondo, una versión simplificada donde el protagonista es el espín de la impureza, que corresponde al electrón desapareado de valencia del átomo de impureza. Este espín queda rodeado por los espines de los electrones del metal, que se orientan en la dirección opuesta para neutralizarlo.

Gracias a esta simplificación, Kondo pudo usar técnicas matemáticas perturbativas, un tipo de cálculo matemático que funciona cuando la interacción entre



Imagen: The Japan Academy, Wikimedia Commons.

**Figura 6. Fotografía de Jun Kondo.**

el espín de la impureza y los electrones del metal es relativamente débil, para calcular cómo esta interacción afectaba la resistencia del metal a bajas temperaturas. Su trabajo mostró claramente que la resistencia aumenta al enfriar el metal, reproduciendo el comportamiento observado experimentalmente.

Sin embargo, el modelo de Kondo tiene una limitación importante: cuando la interacción se vuelve muy fuerte a bajas temperaturas, las aproximaciones perturbativas dejan de ser válidas. Por eso, aunque reproduce correctamente el aumento inicial de la resistencia, no describe completamente el estado final de la impureza ni la formación completa del efecto Kondo.

### Casi completando el rompecabezas

Décadas después de los trabajos de Kondo, los físicos lograron entender con mayor profundidad lo que ocurre a muy bajas temperaturas en un metal con una impureza magnética.

El espín de la impureza tiene la misma magnitud que el de un electrón del metal, pero está mucho más localizado y actúa como un imán puntual bien definido. Para neutralizarlo, no alcanza con un solo electrón itinerante, sino que hace falta la cooperación de muchísimos electrones del metal, que se organizan colectivamente y forman junto con la impureza un estado cuántico compartido, llamado singlete (ver Glosario) de Kondo.

En este estado, una nube de electrones apantalla el espín de la impureza, cambiando radicalmente su influencia sobre los electrones circundantes. Esto tiene un efecto directo sobre la conducción: los electrones involucrados en la correlación no pueden moverse libremente, lo que aumenta la resistencia. A medida que la temperatura baja, la nube se refuerza, incorporando más electrones, hasta que llega un punto en que el apantallamiento se satura y la resistencia deja de crecer, reflejando que el espín de la impureza ha quedado neutralizado.

Para comprender estos fenómenos se desarrollaron nuevas técnicas teóricas: El Poor Man's Scaling de Anderson y colaboradores en 1970 proporcionó una forma intuitiva de ver cómo la interacción entre el espín de la impureza y los electrones del metal se fortalece progresivamente al bajar la temperatura, explicando cómo se forma la nube de apantallamiento. La idea detrás del método Poor Man's Scaling es sencilla pero poderosa: si el problema completo es demasiado difícil, avancemos paso a paso. Se eliminan gradualmente de la descripción los electrones más energéticos, que a bajas temperaturas ya casi no participan, y se analiza cómo va cambiando la interacción entre el espín de la impureza y los electrones del metal. Al hacerlo, se descubrió que esta interacción se vuelve cada vez más intensa a medida que el sistema se enfria.

Más tarde, en 1975, el método de grupo de renormalización numérica (conocido por sus siglas en inglés como NRG) de Wilson permitió resolver el problema de manera extremadamente precisa, aunque numérica. Este método permite calcular de forma controlada el comportamiento de la impureza y la resistencia en todo el rango de temperaturas, sin depender de aproximaciones perturbativas que dejan de ser válidas cuando el sistema se acerca al cero absoluto. Es una técnica sistemática que permite seguir el problema paso a paso con la ayuda de computadoras. La idea es dividir el sistema en escalas de energía cada vez más finas (como ir aumentando el zoom) y resolver lo que ocurre en cada una, lo que permite identificar la escala de energía característica del sistema, conocida como temperatura de Kondo ( $T_K$ ), que marca el régimen donde los efectos de acoplamiento fuerte se vuelven dominantes y se forma el singlete entre el espín del electrón y la impureza. De esta forma se pudo ver la formación completa del singlete, la neutralización total del espín y el comportamiento detallado de la conductancia eléctrica (ver Glosario). La importancia de este avance fue tal que Wilson recibió el Premio Nobel de Física en 1982 por su contribución a la teoría de la renormalización, que transformó la comprensión de muchos sistemas físicos, incluido el efecto Kondo.

### Solución exacta

Pocos años después, a principios de los años '80, ocurrió otro hito: se resolvió exactamente el modelo de Kondo, sin necesidad de aproximaciones ni simulaciones. Una solución exacta no solo permite calcular el comportamiento de un sistema sin aproximaciones, sino que también muestra de manera directa cómo se relacionan entre sí las distintas cantidades físicas: al estar todo en una única expresión matemática, es más fácil ver qué depende de qué y entender por qué el sistema se comporta como lo hace. Una solución numérica muy precisa, como la del método NRG, ofrece resultados igualmente confiables, pero funciona como un procedimiento computacional y no siempre deja tan explícitas esas relaciones. Por eso, aunque ambas describen el fenómeno con gran fidelidad, la solución exacta aporta una comprensión más transparente, mientras que la numérica ofrece una herramienta versátil para estudiar casos donde no existe una fórmula de ese tipo.

La solución exacta fue desarrollada, de forma independiente, por los físicos Natan Andrei (en Estados Unidos) y Paul Wiegmann (en la entonces Unión Soviética). Para lograrlo usaron una técnica matemática llamada Bethe ansatz, que ya había sido exitosa en el estudio de ciertos sistemas cuánticos con muchas partículas. Este método permite pasar el problema inabordable de muchos electrones y sus interacciones a un conjunto de ecuaciones algebraicas

acopladas que, si bien es muy grande, es manejable y permite calcular una gran cantidad de propiedades del sistema: la energía, la entropía, la capacidad calorífica, la susceptibilidad magnética, y por supuesto, la resistencia eléctrica en función de la temperatura.

¿Qué se descubrió? Que efectivamente, a medida que baja la temperatura, la resistencia eléctrica primero disminuye, alcanza un mínimo, y luego vuelve a subir, estabilizándose en una meseta. Este patrón, que parecía tan extraño al principio, se entendió por completo. En resumen, este comportamiento es el resultado de la interacción cuántica entre el espín del electrón de la impureza y los electrones de conducción del metal, lo que lleva a su apantallamiento y a la formación de un singlete de Kondo. La teoría reproducía con precisión los experimentos.

Pero el impacto fue aún mayor. Esta solución exacta mostró que, aunque el modelo de Kondo trata con muchas partículas interactuando, es matemáticamente tratable. Fue una victoria para la física teórica: un problema real, con un origen experimental claro, podía resolverse de forma exacta y elegante. Y como si fuera poco, esta solución sirvió como punto de partida para estudiar modelos aún más complejos, como el de Anderson, o sistemas con múltiples impurezas.

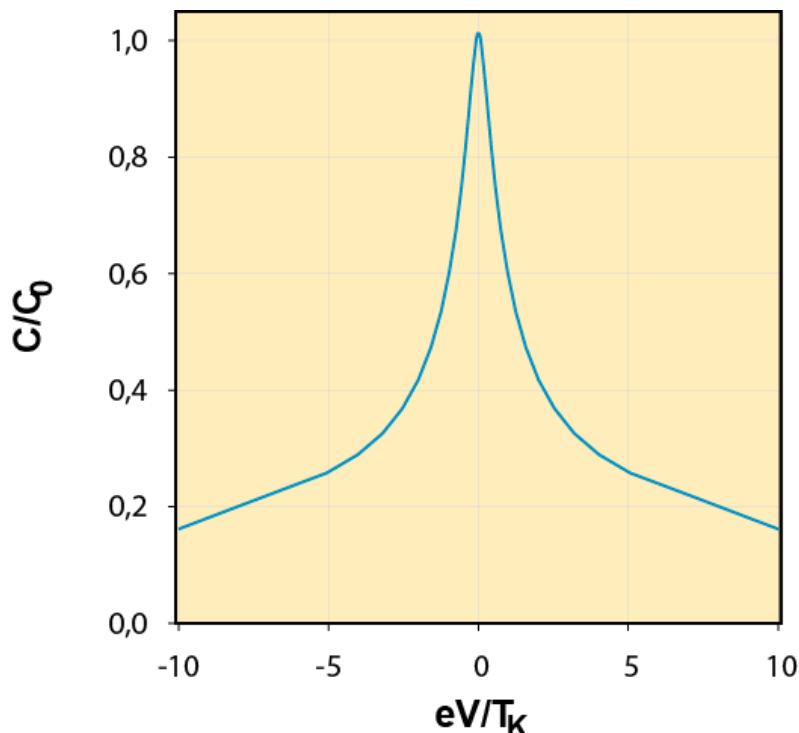
### Nanoescala

Durante años se pensó que el efecto Kondo era exclusivo de sistemas macroscópicos, es decir, sistemas visibles a simple vista, como cables metálicos

con impurezas magnéticas diluidas. Sin embargo, en la década de 1990, mediciones de conductancia eléctrica en puntos cuánticos (ver Glosario) realizadas de manera independiente por Sara M. Cronenwett y colaboradores, y por D. Goldhaber-Gordon y colaboradores desafilaron esta idea. Las mediciones en puntos cuánticos son las que nos permiten hablar de nanoescala, es decir, del dominio de los nanómetros (millonésimas de milímetro), donde los sistemas están formados por muy pocos átomos.

Estos experimentos fueron realizados en un punto cuántico que se conecta mediante dos electrodos, formando un circuito simple. Al ajustar cuidadosamente el número de electrones en el punto cuántico de modo que sea impar, los físicos observaron un pico de conductancia eléctrica a voltaje cero (ver Figura 7).

¿Cómo se relaciona este resultado con el efecto Kondo? Originalmente, el efecto Kondo surge de los estudios realizados en metales con impurezas magnéticas: el espín de un átomo aislado interactúa con los electrones circundantes, formando un estado colectivo a bajas temperaturas. En un punto cuántico con un número impar de electrones ocurre algo análogo: el espín del electrón atrapado actúa como una impureza artificial y se apantalla gracias a la cooperación de los electrones de los electrodos. Esto permite una conducción muy eficiente, que se manifiesta como un pico de conductancia exactamente cuando no se aplica voltaje. Así, la física del efecto Kondo es la misma en ambos casos, aunque se observe de



**Figura 7. Conductancia normalizada ( $C/C_0$ ) vs voltaje normalizado ( $eV/T_K$ ), mostrando el pico en cero debido al efecto Kondo;  $T_K$  es la temperatura de Kondo, escala de energía característica, y  $C_0=2e/h$  ( $e$ , carga del electrón y  $h$  constante de Planck) es la unidad cuántica de conductancia. Resultado de una simulación de transporte eléctrico en un punto cuántico realizada por los autores.**

forma distinta: en metales aparece como un mínimo de resistividad, mientras que en puntos cuánticos se manifiesta como un máximo de conductancia.

Este descubrimiento no solo confirmó la universalidad del efecto Kondo, sino que también abrió un campo entero de investigación en nanotecnología, espintrónica y dispositivos cuánticos. Hoy, los puntos cuánticos son herramientas de laboratorio y también plataformas para estudiar la física de muchos cuerpos y probar nuevas teorías. Además, permiten investigar aplicaciones prometedoras, como la computación cuántica basada en espín, donde el espín de los electrones funciona como qubit (ver Glosario) para almacenar y procesar información, así como el desarrollo de sensores y dispositivos nanoelectrónicos que exploran propiedades cuánticas de los electrones.

## ¿Final?

Del texto sí; del efecto Kondo, no por el momento. Desde su misteriosa aparición en metales con impurezas en los años 1930 hasta su inesperado resurgimiento

en la nanoescala en los años '90, el efecto Kondo ha desafiado y enriquecido nuestra comprensión de los sistemas cuánticos.

La explicación teórica del efecto, iniciada en los años '50, continuada por el aporte clave de Jun Kondo, refinada luego por técnicas como el grupo de renormalización numérica de Wilson y culminada finalmente en la solución exacta de Andrei y Wiegmann, constituye uno de los logros más notables de la física del estado sólido del siglo XX.

El recorrido del efecto Kondo ilustra cómo avanza la ciencia: a veces, una anomalía pequeña y desconcertante puede tardar décadas en entenderse por completo, pero una vez que se hace, abre puertas que nadie había imaginado en el momento de su descubrimiento. Lo que empezó como un detalle extraño en la resistividad de un metal terminó inspirando nuevas teorías, revelando fenómenos cuánticos profundos y encontrando aplicaciones en materiales exóticos, dispositivos nanoscópicos e incluso en tecnologías que aún se están desarrollando.

## ¿Qué aportamos?

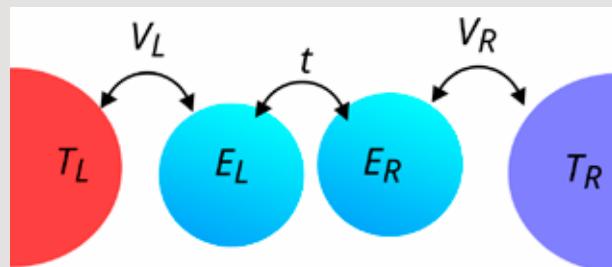
Una de nuestras líneas de investigación está enfocada en estudiar cómo el efecto Kondo influye en el transporte de calor y electricidad en dispositivos formados por dos puntos cuánticos acoplados. Estas estructuras no solo permiten explorar los fundamentos de la física de muchos cuerpos, sino que también abren la puerta al desarrollo de tecnologías para convertir calor en electricidad y controlar el flujo de energía a escala cuántica.

En particular, analizamos el comportamiento termoeléctrico de sistemas formados por dos puntos cuánticos conectados en serie entre dos electrodos metálicos (ver Figura 8). En este tipo de configuraciones, el efecto Kondo puede manifestarse en su forma habitual, vinculada al espín del electrón, pero también en variantes más exóticas, como el denominado Kondo orbital, en el que la fluctuación ocurre entre los estados de ocupación de los dos puntos cuánticos.

Utilizando métodos numéricos avanzados y cálculos computacionales estudiamos cómo el calor y la electricidad fluyen en estos sistemas fuera del equilibrio. Como ejemplo, la Figura 7 muestra la curva típica de conductancia en función del voltaje asociada al efecto Kondo. Descubrimos que, si los puntos están acoplados de forma asimétrica o tienen niveles de energía distintos, se pueden obtener valores inusualmente altos de la eficiencia termoeléctrica. Cuanto mayores son estos valores, mayor es la cantidad de energía útil que puede extraerse del calor, superando ampliamente lo que se obtiene en un punto cuántico aislado.

Otro hallazgo interesante es que observamos rectificación térmica en el sistema. Esto abre la posibilidad de construir un diodo térmico, esto es un dispositivo que deja pasar el calor en una dirección, pero lo bloquea en la otra.

Así, estos dispositivos nos permiten estudiar cómo el efecto Kondo modifica el transporte cuántico en presencia de interacciones fuertes y también ofrecen ideas para nuevas tecnologías de conversión energética, refrigeración local o sensores térmicos cuánticos.



**Figura 8. Esquema de la configuración de dos puntos cuánticos de energías  $E_L$  y  $E_R$  conectados en serie con dos reservorios de cargas con temperaturas  $T_L$  y  $T_R$ . Las flechas indican el orden de las conexiones entre puntos cuánticos y estos con los reservorios.  $t$ ,  $V_L$  y  $V_R$  son las energías de estas conexiones.**

## Glosario

**Semiconductor:** material cuya capacidad para conducir electricidad se encuentra a mitad de camino entre la de un conductor (como los metales) y un aislante (como el plástico). Su característica más importante es que su conductividad puede controlarse fácilmente mediante temperatura, luz o pequeñas cantidades de impurezas añadidas (un proceso llamado dopaje). Ejemplo: silicio, usado en chips y dispositivos electrónicos.

**Cero absoluto:** temperatura más baja posible según las leyes de la física, correspondiente a 0 kelvin (-273,15 °C). En este punto, las partículas tienen la mínima energía térmica posible, por lo que su movimiento se vuelve prácticamente nulo.

**Nivel de energía:** posición que puede ocupar un electrón dentro de un material, asociada a una cierta cantidad de energía. En los sólidos, los electrones se distribuyen en bandas de energía: la banda de valencia, donde normalmente se encuentran los electrones, y la banda de conducción, donde los electrones pueden moverse libremente y transportar carga.

**Espín:** propiedad de las partículas subatómicas, como los electrones, que se puede imaginar como una especie de "rotación" interna, aunque no es una rotación física en el espacio. El espín influye en cómo las partículas interactúan con campos magnéticos y otras partículas. Por ejemplo, los electrones pueden tener espín hacia arriba o hacia abajo, lo que afecta su comportamiento, especialmente en procesos como la electricidad y el magnetismo.

**Singlete:** par de electrones de espines opuestos en el mismo nivel de energía, que dan lugar a un espín total cero.

**Conductancia eléctrica:** cantidad física que mide cuán fácilmente fluye la corriente a través de un material. Está relacionada de manera inversa con la resistencia: cuanto mayor es la conductancia, menor es la oposición que ofrece el material al paso de la corriente.

**Punto cuántico:** estructura extremadamente pequeña, del orden de unos pocos nanómetros, formada por entre cientos y miles de átomos. Allí, los electrones no pueden moverse libremente, sino que quedan confinados y solo pueden ocupar ciertos niveles de energía. Estas restricciones dan lugar a propiedades electrónicas y ópticas únicas. Esto puede lograrse mediante heteroestructuras, que son materiales formados por capas de distintos semiconductores. La diferencia entre las capas crea una especie de trampa que mantiene a los electrones dentro de una región muy pequeña, de tamaño nanométrico, permitiendo observar los efectos cuánticos característicos de estos sistemas.

**Qubit:** (abreviatura de *quantum bit*) unidad básica de información en computación cuántica. A diferencia del bit clásico, que solo puede tomar los valores 0 o 1, un qubit puede estar en una superposición de ambos estados al mismo tiempo. Esto significa que puede comportarse como 0, como 1, o como una mezcla de ambos en distintas proporciones.

## Resumen

El efecto Kondo describe el aumento inesperado de la resistencia eléctrica en metales con impurezas magnéticas a bajas temperaturas. Descubierto en los años '30, fue explicado parcialmente en los '60 por Jun Kondo y más tarde comprendido por técnicas como el grupo de renormalización de Wilson y soluciones exactas. En los años '90, resurgió en nanoestructuras como puntos cuánticos, revelando su vigencia en la física contemporánea. El efecto Kondo ejemplifica cómo una anomalía experimental puede terminar dando lugar a interacciones cuánticas profundas y continuar inspirando avances científicos y tecnológicos muchos años después de su descubrimiento.

## Para ampliar este tema

Pérez Daroca, D., Roura-Bas, P., and Aligia, A. A. (2018). Enhancing of nonlinear thermoelectric response of a correlated quantum dot in the Kondo regime by asymmetrically coupling to the leads. *Physical Review B*, 97(16): 165433. [Disponible en Internet]

Jeong, H., Chang, A. M., and Melloch, M. R. (2001). The Kondo effect in an artificial quantum dot molecule. *Science*, 293(5538): 2221–2223. [Disponible en Internet]

Hewson, A. C., and Kondo, J. (2009). Kondo effect. *Scholarpedia*, 4(3), 7529. [Disponible en Internet]

Fainstein, A. y Hallberg, K. (2005). La física de alambres moleculares, átomos artificiales y cavidades nanoscópicas. *Ciencia Hoy*, 14(84): 16-23. [Disponible en Internet]