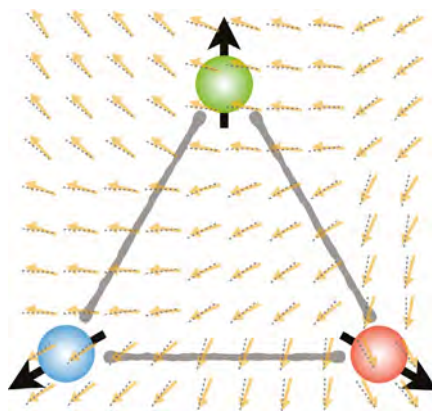


La teoría de Ginzburg-Landau para superconductores es un caso particular de una teoría (gauge) de Yang-Mills, cuya construcción está basada en la invariancia gauge local bajo el grupo especial unitario  $SU(n)$ . Las (cuasi) partículas descritas por esta clase de teorías poseen un grado de libertad interno, el comúnmente llamado *isoespín*, cuyas variaciones locales están parametrizadas por los correspondientes campos gauge. En la materia condensada, el isoespín suele tener una interpretación geométrica concreta, como la pertenencia a distintas subredes magnéticas en el espacio real o a distintos valles en el espacio recíproco.

Teorías de Yang-Mills con simetría  $SU(2)$  aparecen en la materia condensada de forma natural, las cuales permiten describir la dinámica de ciertos sistemas de interés actual como por ejemplo electrones itinerantes sujetos a interacción espín-orbita, o acoplados por intercambio a texturas magnéticas. No obstante, extender este marco a la simetría  $SU(3)$  sigue representando todo un desafío. Esta simetría, que es clave en la descripción de la interacción fuerte dentro de la Cromodinámica cuántica (CDC), ha resultado ser difícil de realizar en sistemas de estado sólido y/o magnéticos a pesar de su interés conceptual.

Los investigadores Ricardo Zarzuela, de la Universidad de Mainz, y Se Kwon Kim, del KAIST Daejeon, han mostrado en una reciente publicación de la revista *Physical Review Letters* (<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.186701>) que **las fluctuaciones térmicas (magnones) del orden magnético en sistemas frustrados** —definidos estos últimos como sistemas con interacciones frustradas que están dominados por la interacción de canje isótropa— **se agrupan en forma de triplete con isoespín  $I=1$  y se describen mediante una teoría de Yang-Mills con simetría  $SO(3) \subset SU(3)$ , la cual es reminiscente de la CDC**. Además, los campos gauge de la teoría surgen por la presencia de texturas topológicas en el parámetro de orden del sistema magnéticamente frustrado y, debido a su naturaleza no Abeliana, **el electromagnetismo emergente induce una respuesta dinámica de los magnones sin precedentes**. Por ejemplo, una de las predicciones de esta teoría es que la inyección de corriente



eléctrica en el sistema genera una corriente magnónica polarizada debido al efecto Hall topológico, cuya dirección de deflexión depende del vector de polarización de los magnones, el cual puede estar orientado en una dirección arbitraria del espacio.

Este estudio abre nuevas posibilidades para la implementación efectiva de teorías gauge con simetría  $SU(3)$  en el campo de la Materia Condensada, las cuales poseen un enorme potencial para revelar nuevos tipos de orden emergente.

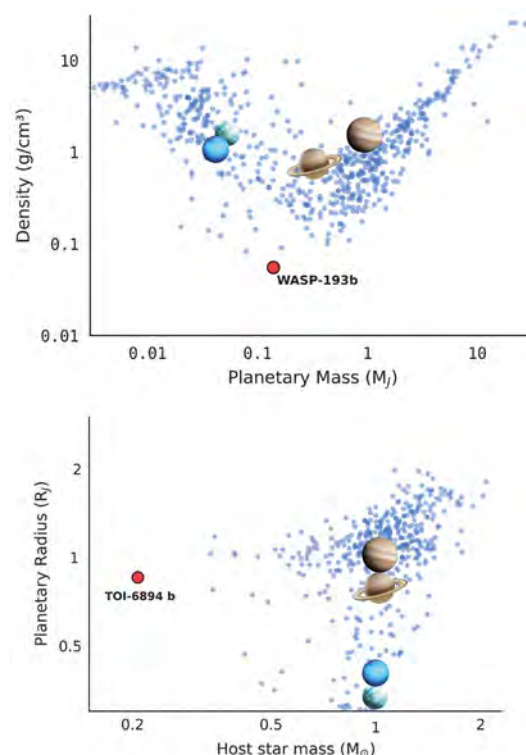
## PLANETAS GIGANTES, PROBLEMAS GIGANTES

Desde que en 1995 se detectara el primer exoplaneta, es decir, un planeta fuera de nuestro sistema solar, el ritmo de descubrimientos de estos nuevos mundos no ha hecho más que crecer. Hoy conocemos casi 6000 exoplanetas, tantos que podemos empezar a vislumbrar tendencias y patrones que nos permitan construir modelos sobre cómo se forman los sistemas planetarios. En esta búsqueda desenfrenada hemos encontrado mundos de lo más exóticos, y algunos de ellos están forzando a reescribir lo que creíamos saber.

En este contexto, **los planetas gigantes más desconcertantes viven en los márgenes de lo que creíamos posible**. Dos descubrimientos con fuerte participación española han puesto a prueba nuestros modelos más avanzados: WASP-193b, **tan ligero como el algodón de azúcar**, y TOI-6894 b, **un gigante alrededor de una estrella diminuta**.

WASP-193b es una bestia “hinchara”: su radio es aproximadamente un 50 % mayor que el de nuestro Júpiter, pero su masa es apenas una décima parte, lo que se traduce en una **densidad extraordinariamente baja ( $\sim 0,059 \text{ g/cm}^3$ )**, similar a la del algodón de azúcar. Orbita una estrella tipo F, más caliente y grande que el Sol, y alcanza temperaturas de equilibrio en torno a 1250 K. En el otro extremo está TOI-6894b, **un gigante gaseoso frío ( $410\text{-}420 \text{ K}$ )** que gira en solo 3,37 días alrededor de **una enana roja de aproximadamente 0,2 masas solares**, la estrella más pequeña conocida con un planeta gigante en tránsito. “Estos planetas ofrecen una oportunidad única para explorar procesos de formación y evolución poco convencionales”, señala Francisco J. Pozuelos, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), colíder del estudio sobre WASP-193b y coautor del estudio sobre TOI-6894b, ambos publicados recientemente en *Nature Astronomy* (<https://doi.org/10.1038/s41550-024-02259-y>, <https://doi.org/10.1038/s41550-025-02552-4>).

¿Qué tienen en común estos dos colosos? Ambos tensan los modelos de formación y evolución planetaria: **inflación extrema** en WASP-193b, difícil de explicar con solo calentamiento estelar, y **existencia de gigantes nacidos en discos protoplanetarios pobres en mate-**



rial alrededor de estrellas muy poco masivas en el caso de TOI-6894 b. **Dos caminos distintos, un mismo mensaje: si nuestros modelos no acomodan estos casos límites, algo fundamental se nos está escapando sobre cómo se forman y evolucionan los planetas.**

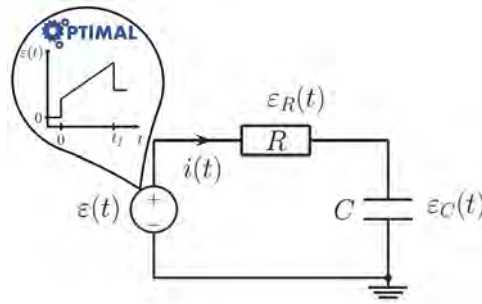
En la nueva era del estudio de atmósferas exoplanetarias, estos dos planetas destacan como objetivos perfectos para la espectroscopía de transmisión: WASP-193b por su señal transmisiva gigantesca, TOI-6894b por su accesibilidad y química “templada” rica en  $\text{CH}_4$  y, quizá,  $\text{NH}_3$ . Ambos mundos ya están programados para ser observados con el telescopio espacial James Webb.

Como comenta el equipo español implicado del IAA-CSIC, **“estos hallazgos no son anécdotas: son faros que nos indican por dónde ajustar los modelos”**. En conjunto, **los gigantes en los extremos nos ayudan a establecer la hoja de ruta:** medir atmósferas con precisión, cuantificar metales en el interior y entender cómo el entorno (masa estelar, flujo de radiación, historia de migración) esculpe mundos tan diferentes.

## AÚN SE PUEDE HACER MEJOR: CONTROL ÓPTIMO DE SISTEMAS FÍSICOS

Los principios variacionales han tenido un papel fundamental en la formalización y el desarrollo de las leyes físicas, tal y como las entendemos hoy día. Hallamos ejemplos paradigmáticos en el principio de Fermat en óptica y el principio de mínima acción en mecánica clásica, trasladable también a mecánica relativista y mecánica cuántica. Más allá de su relevancia fundacional, **el cálculo de variaciones y la teoría de control óptimo son herramientas matemáticas extremadamente versátiles para afrontar y resolver problemas físicos de muy diversa índole.**

Un artículo publicado recientemente en *American Journal of Physics* (<https://doi.org/10.1119/5.0217194>), revista centrada en investigaciones útiles dentro de la enseñanza de la física, pone de manifiesto el poder de la teoría de control óptimo para la resolución de un problema físico de in-



terés. El problema en cuestión no parece haber sido planteado con anterioridad a pesar de su sencillez, se trata del **estudio de los protocolos óptimos de carga y descarga de un circuito RC en un tiempo finito**. Más concretamente, se deduce cuál es el voltaje de entrada que debe aplicarse a un circuito RC para **minimizar la disipación por efecto Joule tanto en su carga como en su descarga controlada**.

La solución del problema, aunque novedosa, es sencilla y ejemplifica a la perfección las **relaciones de balance entre coste y velocidad del protocolo empleado**: a mayor velocidad (menor tiempo de carga o descarga), el coste óptimo (disipación) para cargar (o descargar) el circuito es mayor. Además, la simplicidad del sistema permitió su implementación en el laboratorio, mostrando en el artículo un acuerdo total entre predicciones teóricas y experimentos.

El artículo es fruto de una **colaboración internacional entre un equipo de la Universidad de Sevilla** (formado por Carlos A. Plata y Antonio Prados) **y un equipo de la Universidad Paul Sabatier (Toulouse)**. Ambos grupos de investigación han colaborado ya en el pasado en el contexto del uso de técnicas de control óptimo en problemas físicos, específicamente en mecánica estadística, destacando un artículo de revisión reciente publicado en *Reports on Progress in Physics* (<https://doi.org/10.1088/1361-6633/acac4d>). El artículo reseñado señala, de hecho, ciertos paralelismos con problemas de transporte óptimo en una partícula browniana confinada armónicamente. No deja de ser sorprendente que sistemas físicos tan diversos admitan una descripción matemática análoga, ni que siga habiendo tanta física “simple” aún por descubrir. **Con las preguntas adecuadas y las herramientas de la teoría de control óptimo, podrá encontrarse la mejor respuesta.**

## MOTORES COLOIDALES MAGNÉTICOS: EXPLORANDO LA EFICIENCIA DESDE LO FUNDAMENTAL

En su célebre conferencia “Hay sitio al fondo”, considerada por muchos como el origen de la nanotecnología, **Richard Feynman** anticipaba el interés tecnológico y fundamental de manipular la materia a escala nanométrica. Uno de los mayores retos es **controlar el movimiento de nanopartículas en suspensión**, donde las **fluctuaciones térmicas dominan** y promueven trayectorias erráticas. Como han señalado algunos autores, esta dificultad se asemeja a conducir un coche en medio de un huracán.

La naturaleza ha resuelto este peliagudo desafío mediante el uso de **motores moleculares**, macromoléculas capaces de transformar parte del ruido térmico en movimiento dirigido, para transportar vesículas lipídicas y moléculas dentro de la célula. Estas enzimas catalizan la hidrólisis del ATP para alternar entre estados de unión y difusión sobre **microtúbulos polares autoensamblados**, generando un desplazamiento **precesivo**, es decir, sostenido durante varios pasos, antes de desacoplarse del microtúbulo. Para ello, se requieren **fluctuaciones térmicas relevantes**, que el sistema esté **fuera del equilibrio** y la existencia de una superficie polar periódica capaz de generar un **potencial asimétrico y periódico**, en la escala del tamaño de

