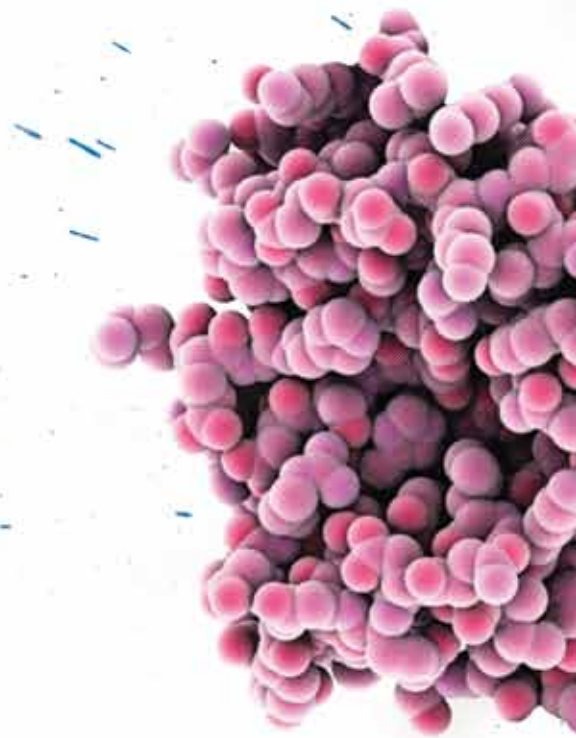


Máquinas de espines

Brasileños descubren cómo medir variaciones de energía en núcleos atómicos

PUBLICADO EN DICIEMBRE DE 2014



En un experimento que hasta el año pasado se consideraba imposible, un equipo coordinado por el físico Roberto Serra, de la Universidad Federal del ABC (Ufabc), determinó cuánta energía puede ganar o perder un núcleo atómico cuando incide sobre el mismo un pulso de ondas de radio. La mayoría de los científicos estaban convencidos de que el comportamiento del núcleo sería imprevisible. Jamás se conocerían las probabilidades de que el núcleo absorbiera la energía de las ondas, tornándose más caliente, o de enfriarse al transmitir parte de su energía a ellas.

Los nuevos experimentos realizados en el Centro Brasileño de Investigaciones Físicas (CBPF), en Río de Janeiro, demuestran que ese intercambio de energía obedece a leyes de la física que nunca antes fueron testeadas en el mundo subatómico. Esas leyes podrían ayudar a comprender mejor ciertas reacciones químicas tales como la fotosíntesis de las plantas y determinar cuánta energía necesitarían las computadoras cuánticas para su funcionamiento. “Este es el primer experimento en una nueva área de la física, la termodinámica cuántica”, dice Serra.

Las computadoras cuánticas contemplan la utilización de las leyes de la mecánica cuántica para superar ex-

ponencialmente el poder de cálculo de las computadoras convencionales. Pero ¿cuánta energía consumirá en la práctica ese nuevo tipo de computadoras? ¿Cuánto calor producirán con su funcionamiento? ¿Necesitarán refrigeración? La respuesta a esos temas es una de las metas de la termodinámica cuántica.

Durante el siglo XIX, otras preguntas similares quedaban en suspenso. ¿Cuál sería el mínimo de carbón que consumirían los hornos y qué temperatura deberían alcanzar las calderas para que las máquinas de vapor lograran su eficiencia máxima? Los científicos de la época percibieron que tanto el calor como la capacidad de trabajo de las máquinas son formas diferentes de una misma magnitud física, la energía, que nunca se genera a partir de la nada ni puede destruirse, sino tan sólo transformarse. Al investigar la conversión de una forma de energía en otra, ellos descubrieron las leyes de la termodinámica clásica.

Según esas leyes, la energía fluye espontáneamente desde un volumen con temperatura caliente hacia otro más frío. Y una máquina, aunque fuera ideal, sólo puede convertir parte de esa energía disponible en forma de calor en energía capaz de realizar movimientos mecánicos, es decir, realizar lo que en física se conoce como trabajo. “La termodinámica

le impone límites a cualquier tecnología”, dice Serra.

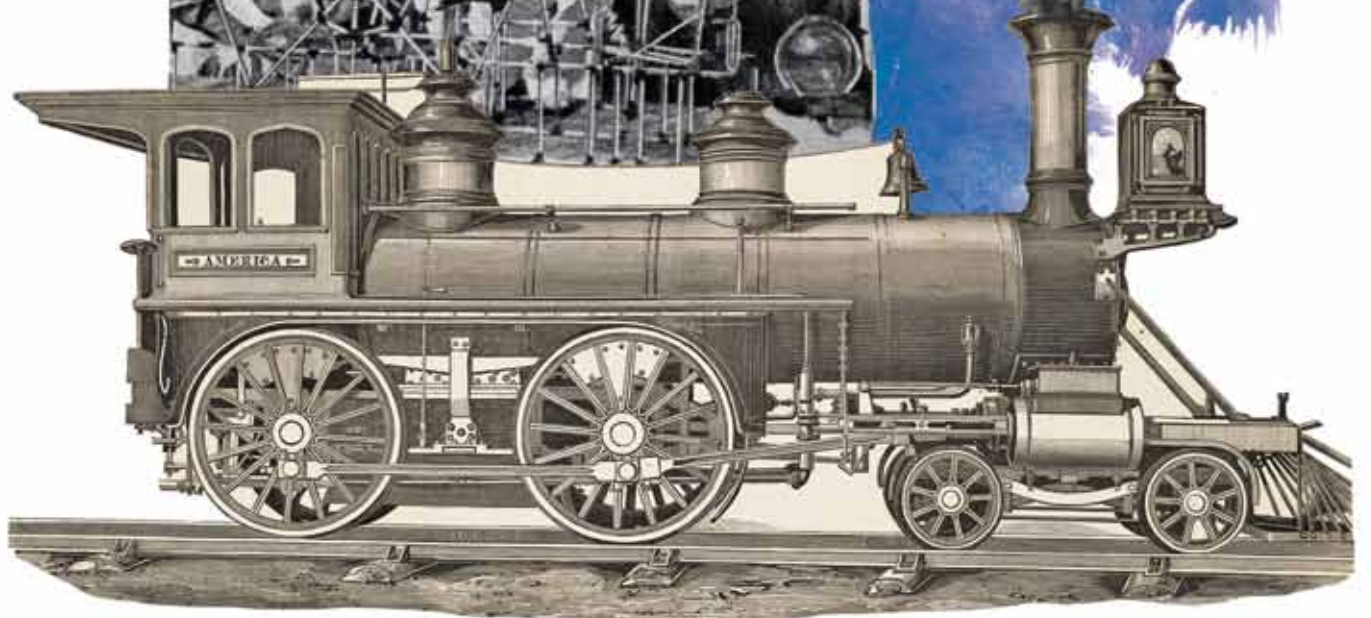
Los ingenieros victorianos resolvieron sus problemas, pero a costa de un pequeño truco. Sus cálculos sólo funcionaban cuando se consideraba que las máquinas se hallaban aisladas térmicamente del resto del entorno, intercambiando escaso calor con el ambiente. Era necesario además que esos procesos fueran lentos. Pero esas aproximaciones no sirven en la mayoría de las situaciones que ocurren en la naturaleza, como por ejemplo, en muchas reacciones químicas. Cuando resulta imposible aislar térmicamente de su ambiente a un objeto durante mucho tiempo, la temperatura aumenta y disminuye aparentemente de manera imprevisible, al contrario de lo que ocurre en los sistemas aislados, donde todo tiende a un equilibrio.

Recién en 1997, el fisicoquímico Christopher Jarzynski descubrió una expresión matemática para calcular las variaciones de energía y del trabajo mecánico que ocurren fuera de equilibrio. “La ecuación de Jarzynski y otros teoremas de fluctuación les permiten a los químicos la medición en laboratorio de la variación de energía de una molécula antes y después de una reacción”, explica Serra.

El propio Jarzynski, en colaboración con un equipo de California, verificó su

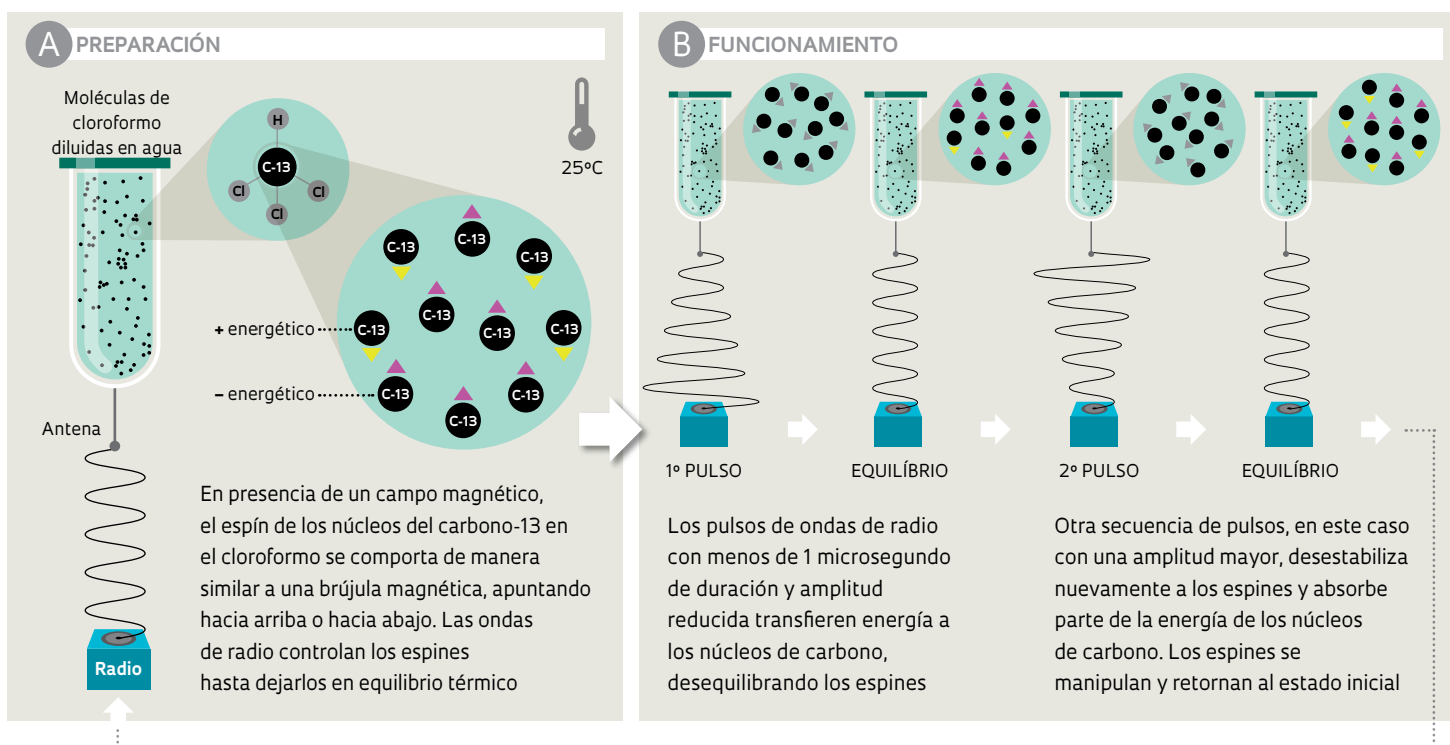


$$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} = \frac{p^2}{2m} - \frac{Ze^2}{r}$$
$$\alpha = \frac{\hbar}{ec}$$



La máquina cuántica

Un experimento extrae energía de las moléculas de cloroformo



ecuación en 2005, observando el trabajo mecánico de una molécula de ARN, estirada y comprimida como un muelle. Serra percibe, sin embargo, que, pese a ser microscópico, el movimiento de la célula de ARN era lo suficientemente grande como para poder calcularlo empleando la famosa fórmula derivada de las leyes de la mecánica de Newton: “El trabajo es igual a la fuerza empleada para el desplazamiento por la distancia recorrida”.

Las ecuaciones de la termodinámica, ya sea dentro o fuera del equilibrio, se dedujeron empleando la mecánica de Newton. Pero las leyes de Newton pierden sentido para varios procesos que ocurren en las moléculas y para todos los que suceden en el interior de los átomos, porque allí no es posible medir fuerzas y desplazamientos con precisión. A esas escalas valen otras leyes, las de la mecánica cuántica. Serra quería saber si ecuaciones como la de Jarzynski aún regirían en este mundo subatómico. Ese conocimiento ayudaría a comprender reacciones químicas tales como la fotosíntesis. En la fotosíntesis, las moléculas en las células de las hojas funcionan como máquinas cuánticas que absorben energía de las partículas de luz y la almacenan bajo

En la fotosíntesis, las moléculas en el interior de las células de las hojas funcionan como máquinas cuánticas

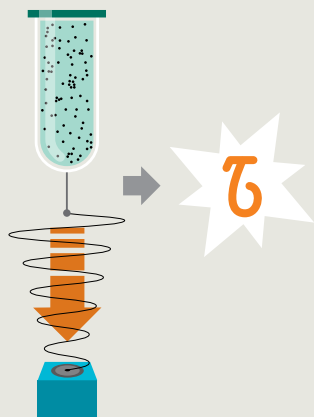
la forma de moléculas de azúcar. “Ese proceso es muy eficiente, porque casi no genera calor”, dice Serra. “Los estudios sugieren que es un proceso cuántico”.

Hace algún tiempo, Serra, sus alumnos y colegas en la UFABC intentaban estudiar la termodinámica cuántica en laboratorio, junto con el equipo de los físicos Alexandre Souza, Ruben Auccauise, Roberto Sarthour e Ivan Oliveira, quienes trabajan con la técnica de resonancia magnética nuclear en el CBPF. Ambos grupos mantienen una colaboración que ya ha redunado en varios descubrimientos.

En el centro del equipamiento del laboratorio del CBPF hay un pequeño tubo de ensayo que contiene una solución purísima de cloroformo diluido en agua. Cada una de las alrededor de un billón de moléculas de cloroformo de la solución posee un átomo de carbono-13. El núcleo de ese tipo de carbono posee una propiedad cuántica denominada espín, que recuerda un poco a la aguja de una brújula magnética y puede representarse mediante una flecha. Bajo el influjo de un fuerte campo magnético paralelo al tubo, dispuesto de abajo hacia arriba, las flechas de esos espines tienden a alinearse con el campo, la mitad de ellas apuntando hacia abajo y la mitad hacia arriba. El campo magnético también determina que los espines que apuntan hacia abajo posean mayor energía que los que apuntan hacia arriba.

Los físicos manipulan los espines por medio de campos electromagnéticos, que oscilan con una frecuencia de 125 megahercios (el dispositivo debe estar aislado para que no capte las estaciones de radio de FM que transmiten en esa frecuencia). Tales manipulaciones se realizan por medio de pulsos de onda y no duran más de algunos microsegun-

C RESULTADO



La energía que transfieren los núcleos de carbono a la onda de radio es mayor a la que reciben de ella, lo que genera un saldo positivo de energía. La energía extra puede utilizarse para realizar trabajo

FUENTE ROBERTO SERRA/ UFABC

El experimento registró variaciones de milmillonésimas de grado en la temperatura de los espines del carbono

tentaron medir directamente cuántas veces emitían o absorbían energía los espines. “El error acumulado en esas mediciones era tan grande que finalmente no lograban determinar nada”, explica.

UNA MEDICIÓN INTELIGENTE

La solución llegó muy pronto para Serra, en febrero de 2013, cuando el físico Mauro Paternostro, de la Queen’s University, en Belfast, Irlanda, presentó un seminario en la UFABC sobre propuestas inéditas para observar el trabajo producido por partículas de luz en forma indirecta. A continuación, Paternostro, actualmente profesor visitante en la UFABC, y Laura Mazzola, su colega en Belfast, comenzaron a discutir con Serra, Aucauisse y el estudiante de doctorado en la UFABC, Tiago Batalhão, cómo adaptar esas técnicas para observar el trabajo de los espines de carbono en forma indirecta. Junto a John Good, de la Universidad de Oxford, en Inglaterra, el equipo descubrió un modo sutil de hacerlo utilizando los espines de los núcleos de hidrógeno de las moléculas del cloroformo para espiar lo que ocurre con los espines de los átomos de carbono mientras realizan el trabajo, sin interferir en el proceso.

La precisión del experimento fue suficiente para registrar variaciones de temperatura en los espines de carbono del orden de milmillonésimas de grado y verificar que la ecuación de Jarzynski se cumple a escala subatómica. Otro resultado interesante: los espines de carbono poseen una tendencia mayor a extraer energía de las ondas de radio cuando la amplitud del pulso de onda se reduce. Esa tendencia se invierte cuando la amplitud de onda aumenta: los espines tienden a transferir energía a las ondas, es decir, realizan trabajo sobre las ondas.

“Podemos aprovechar esa diferencia para crear una máquina térmica cuántica”, dice Serra. El dispositivo funcionaría alternando pulsos de amplitud reducida y aumentada entre dos estados de equilibrio térmico, cada uno con una temperatura diferente (*obsérvese la infografía*). Esa máquina funcionaría de manera parecida a un motor de combustión, que realiza trabajo mecánico con parte de la energía química transformada en calor mediante la explosión del combustible.

La máquina de espines tendría escasa utilidad: el trabajo producido le aportaría una energía ínfima a las ondas de radio, apenas suficiente como para movilizar el espín de un núcleo atómico cualquiera. Serra está más interesado en medir cuánta energía consume y cuánto calor disipa durante su funcionamiento.

“La técnica aplicada en ese experimento posee un gran potencial”, dice el físico Lucas Céleri, de la Universidad Federal de Goiás, quien estudia la posibilidad de observar la termodinámica de una única partícula de luz en colaboración con los físicos Paulo Souto Ribeiro y Stephen Walborn, de la Universidad Federal de Río de Janeiro, para el inicio del año que viene. “Los avances experimentales son muy raros en la termodinámica cuántica, debido a la necesidad de controlar el sistema cuántico y su aislamiento del ambiente”. ■ Igor Zolnerkevic

Proyecto

Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología de la Información Cuántica (n° 2008/ 57856-6); Modalidad Proyecto Temático; Investigador responsable Amir Caldeira (Unicamp); Inversión R\$ 1.384.811,24 (FAPESP) y R\$ 5.700.000,00 (CNPq).

Artículo científico

BATALHÃO, T. B. *et al.* Experimental reconstruction of work distribution and study of fluctuation relations in a closed quantum system. *Physical Review Letters*, v. 113 (14), 3 oct. 2014.

dos. El experimento ocurre tan rápidamente que es como si, durante escasos instantes, cada átomo de carbono en el tubo de ensayo se encontrara aislado del resto del universo, sometido a una temperatura muy cercana al cero absoluto (-273 °C). Los investigadores logran disminuir o aumentar la diferencia de energía entre los espines hacia abajo o hacia arriba cuando reducen o incrementan la amplitud de sus ondas de radio. Cuando este cambio de amplitud es muy rápido, los espines salen de su aislamiento térmico y comienzan tanto a absorber energía de las ondas de radio –en un contexto en el que las ondas realizan trabajo sobre los espines– como a transmitir parte de su energía a las ondas, realizando trabajo sobre ellas. “Eso es algo muy difícil de medir, ya que los espines de los átomos de carbono pueden intercambiar energía de cuatro maneras diferentes, que suceden todas simultáneamente, siguiendo un patrón de probabilidades”, explica Serra. “Conocí un grupo en Alemania que intentó realizar ese mismo experimento durante cinco años sin tener éxito”.

Lo que impidió el éxito del grupo alemán, según Serra, fue que los físicos in-