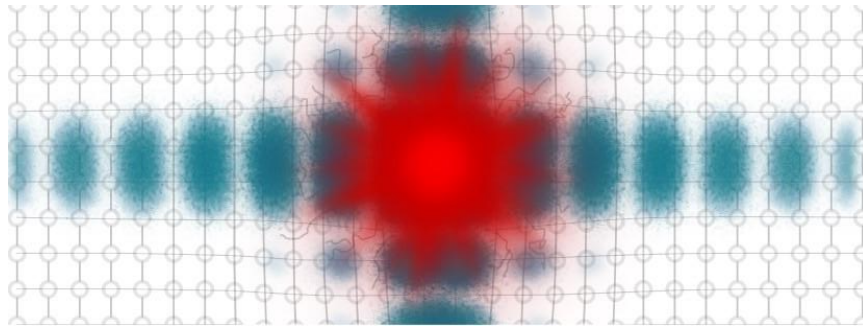




## Efficiency boost: Dual light pulses minimize energy for phase transitions



Visualisation of a laser beam melting a crystal. Credit: Allan Johnson.

- **Researchers led by Allan Johnson (IMDEA Nanociencia) elucidate the mechanisms behind the energy barrier reduction of a phase transition induced by multiple laser light pulses.**
- **Modifying atomic structure locally is relevant for material control in many technological approaches.**
- **Seeding inhomogeneous structural fluctuations presents a more energy efficient alternative for controlling materials used in data and energy storage devices.**

*Madrid, April 11<sup>th</sup>, 2024.* Phase transitions physically transform substances and uniformly change their properties. The typical example is boiling water which transforms liquid into a gas phase, resulting in an abrupt change in volume. There are other phase transitions with high relevance for technologies, such as data storage in compact or Blu-ray discs. During an optical data storage process, laser pulses change the structural phase of the surface material. The recording marks in discs are created by first melting the material with the laser and then rapidly cooling the molten material below its crystallization temperature; the process changes the reflectivity of the molten areas. This is known as phase-change recording.

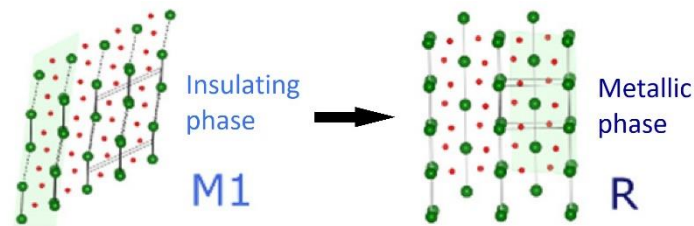
In recent years the idea of using not one, but multiple laser pulses to control phase transitions has captured attention ever since it was realized that light could drive transitions coherently. Coherent phase transitions are interesting because they smoothly change the material between two phases. However, coherent control requires such a smooth connection between the crystal structures of two phases, and excludes many technologically relevant transitions such as crystalline-to-amorphous transitions in chalcogenide glasses for data storage.

A team of researchers led by Dr. Allan Johnson have demonstrated an alternative, incoherent route for material control that improves the energy efficiency of the phase transition in a material of



reference, vanadium oxide ( $\text{VO}_2$ ). They found that the phase transition between the metallic and insulating phases when triggered by two pulses, instead of a single pulse, can require less energy.

The material studied – vanadium oxide – is a prototypical system for understanding phase transitions in quantum materials. It lies between charge density wave systems (transformed by a few long-wavelength modes, showing coherence) and crystalline-amorphous phase transitions (local uncorrelated distortions drive the transition, showing disorder). At high temperatures the vanadium oxide is in a metallic phase (rutile), but below  $60^\circ$  is in an insulating phase (monoclinic).



Typically, the excitation of the insulating phase with a pulse of light drives a vanadium dioxide crystal to the metallic phase. Allan Johnson and his team used an alternative strategy. They used a weak pulse to prepare a coherently vibrating state, to further excite the sample with a second light pulse after a small delay (in the range of picoseconds). To their amazement, they found that the energy threshold, at which the material begins to transform to the metallic phase, depends on the delay between the two pulses and that the **energy needed to complete the phase transition is reduced in the double-pulse scheme**, in comparison to the single pulse scheme.

The remarkable results indicate that multiple excitations can lower the energy needed to drive the phase transition in vanadium oxide up to 6%. When asked about the improvement, Allan Johnson says: “This may not seem much of an energy saving, but the process still remains to be optimised and at the moment we don’t know how much we can gain. Furthermore, this method can potentially be applied to many materials, and this is very promising”.

The most interesting feature of their discovery is that the process could easily be transferred to existing devices that work with ultrafast pulsed laser beams, simply by dividing the pulse into two and delaying the time between pulses. Contrary to the limited range of materials that show structural coherence, correlated disorder can, in principle, be induced in any solid. Consequently, the inhomogeneous seeding strategy might be applicable to a broad range of solids, including those used in energy and data storage applications.

The *eureka* moment for Dr. Johnson was realising that their X-ray data – acquired non-stop during 3 long days and nights at X-ray laser facility in Japan - matched the multiple pulse experiments from their own lab. They explained that the mechanism of control involves the formation of polarons, quasiparticles that form due to the coupling of excess electrons or holes with ionic vibrations.

Notably, while other scientists have observed similar phenomena in their laboratory data, the mechanisms behind these observations remained elusive until now. Allan Johnson and his collaborators have elucidated the underlying processes, highlighting the formation of polarons and their ordering in specific directions as a key factor in reducing the energy penalty to the metallic phase. **Driving the phase transition by exciting this disordered state of motion can be achieved with less energy.** Furthermore, the *dynamic* barrier lowering means that scientists are able to selectively reduce



the energy required for the laser driven phase transition without increasing the probability of thermal switching, in contrast to other methods for improving the efficiency.

The results have been published in Nature Physics. The implications of this research extend beyond fundamental science, offering new avenues for precise material control and technological innovation. As the team continues to optimise the method and explore new materials, the potential for transformative advancements in material science and optical control remains high.

This work is a collaboration between researchers at IMDEA Nanociencia, Institut de Ciències Fotoniques (ICFO), Institut de Physique de Rennes (CNRS), Institute of Chemical Research (ICIQ), SLAC National Accelerator Laboratory (Stanford, USA) and Pohang Accelerator Laboratory (Korea). The X-ray measurements were performed at BL3 of SACLA (Japan Synchrotron Radiation Research Institute). It has been cofunded by the seal Excellence Severo Ochoa awarded to IMDEA Nanociencia in 2017 and renovated in 2021.

Keywords (words that should be mentioned in communications): phase transitions, ultrafast pulses, light, lasers, energy barrier, quantum materials, data storage, efficient electronics, x-rays

---

## Reference

Allan S. Johnson et al. All- optical seeding of a light-induced phase transition with correlated disorder. Nature Physics (2024). <https://www.nature.com/articles/s41567-024-02474-4>  
<https://hdl.handle.net/20.500.12614/3601>

### Contact

Dr. Allan Johnson

[allan.johnson@imdea.org](mailto:allan.johnson@imdea.org)

<https://nanociencia.imdea.org/ultrafast-science-of-quantum-materials/home>

Social media/ linkedin: <https://www.linkedin.com/in/allan-johnson-232b4133/>

IMDEA Nanociencia Outreach Office

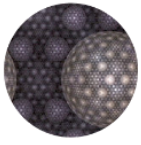
[divulgacion.nanociencia@imdea.org](mailto:divulgacion.nanociencia@imdea.org)

+34 91 299 87 12

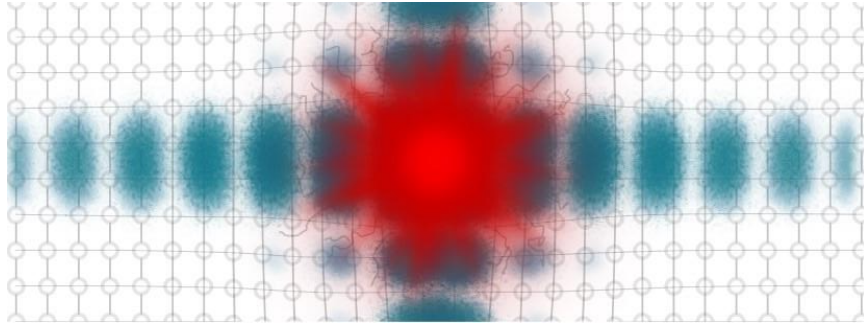
Twitter: @imdea\_nano

Facebook & Instagram: @imdeananociencia

Source: IMDEA Nanociencia



## Más es menos: Los pulsos duales de luz minimizan la energía para iniciar transiciones de fase



Visualización de un rayo láser fundiendo un cristal. Imagen: Allan Johnson.

- **Investigadores liderados por Allan Johnson (IMDEA Nanociencia) explican los mecanismos tras este fenómeno antintuitivo: hacer efectiva una transición de fase requiere menos energía si se inicia mediante dos pulsos de luz en lugar de uno solo.**
- **La energía necesaria para completar la transición de fase se ha reducido un 6%, y podría optimizarse aún más.**
- **Las transiciones de fase locales son relevantes para el control de materiales en muchos aspectos tecnológicos, incluyendo almacenamiento de datos y energía.**

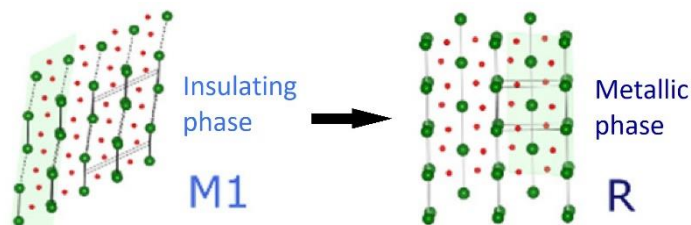
*Madrid, 11 de abril, 2024.* Las transiciones de fase transforman físicamente las sustancias y cambian uniformemente sus propiedades. El ejemplo más típico es el agua hirviendo, que transforma el líquido en una fase gaseosa, lo que resulta en un cambio brusco de volumen. Existen otras transiciones de fase de gran relevancia tecnológica, como el almacenamiento de datos en discos compactos y Blu-ray. Durante un proceso de almacenamiento de datos de este tipo, los pulsos láser cambian la fase estructural del material de la superficie. Las marcas de grabación en los discos se crean fundiendo el material con un pulso de luz láser y luego enfriándolo rápidamente por debajo de su temperatura de cristalización. Mediante este proceso se ha cambiado la reflectividad de las áreas fundidas, que posteriormente serán leídas por un cabezal láser.

En los últimos años, la idea de utilizar no uno, sino **múltiples pulsos láser para controlar las transiciones de fase** ha captado la atención desde que los investigadores se dieron cuenta de que la luz podía impulsar las transiciones de forma coherente. Las **transiciones de fase coherentes** son interesantes porque cambian suavemente el material entre dos fases. Sin embargo, el control coherente requiere una conexión extremadamente suave entre las estructuras cristalinas de dos fases, y excluye muchas transiciones tecnológicamente relevantes, como las transiciones cristalinas a amorfas en vidrios de calcogenuro para el almacenamiento de datos.



Un equipo de investigadores dirigido por el Dr. Allan Johnson ha demostrado que **una ruta alternativa para el control de materiales mejora la eficiencia energética de la transición de fase**. El estudio se ha hecho sobre un material de referencia, el óxido de vanadio ( $\text{VO}_2$ ). Han descubierto que la transición de fase entre las fases metálica y aislante de óxido de vanadio puede requerir menos energía cuando se activa por dos pulsos de luz, en lugar de un solo pulso.

El material estudiado, el óxido de vanadio, es un sistema prototípico para comprender las transiciones de fase en materiales cuánticos. Se encuentra entre los sistemas de ondas de densidad de carga (transformados por unos pocos modos, de longitud de onda larga y que muestran coherencia) y las transiciones de fase cristalina-amorfa (en este caso las distorsiones locales no correlacionadas impulsan la transición, mostrando desorden). A altas temperaturas, el óxido de vanadio se encuentra en una fase metálica (rutilo), pero por debajo de  $60^\circ$  se encuentra en una fase aislante (monoclínica).

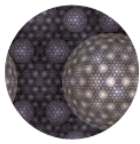


Normalmente, la excitación de la fase aislante con un pulso de luz empuja el cristal de dióxido de vanadio a la fase metálica. Allan Johnson y su equipo utilizaron una estrategia alternativa. Utilizaron un pulso débil para preparar un estado de vibración coherente, para excitar aún más la muestra con un segundo pulso de luz después de un pequeño retraso (en el rango de picosegundos). Para su sorpresa, descubrieron que el umbral de energía, en el que el material comienza a transformarse a la fase metálica, depende del retraso entre los dos pulsos y que **la energía necesaria para completar la transición de fase se reduce** en el esquema de doble pulso, en comparación con el esquema de pulso único.

Los resultados indican que el esquema de las excitaciones múltiples puede reducir la energía necesaria para impulsar la transición de fase en el óxido de vanadio hasta en un 6%. Cuando se le pregunta sobre el dato, el investigador Allan Johnson dice: "Puede que esto no parezca un gran ahorro de energía, pero el proceso aún debe optimizarse y, por el momento, no sabemos cuánto más se puede ganar. Además, este método se puede aplicar potencialmente a muchos materiales, y esto sí que es muy prometedor".

La característica más interesante de su descubrimiento es que el proceso podría transferirse fácilmente a los dispositivos existentes que ya funcionan con rayos láser pulsados ultrarrápidos: simplemente dividiendo el pulso en dos y retrasando el tiempo entre estos dos pulsos. Contrariamente a la limitada gama de materiales que muestran coherencia estructural, el mecanismo de desorden correlacionado puede, en principio, ser inducido en cualquier sólido. En consecuencia, la estrategia de siembra no homogénea de fluctuaciones podría ser aplicable a una amplia gama de sólidos, incluidos los utilizados en aplicaciones de almacenamiento de energía y datos.

El momento *eureka* para el Dr. Johnson fue cuando se dio cuenta de que sus datos -tomados en las instalaciones de rayos X durante 3 días y noches sin pausa- coincidían con los experimentos de su propio laboratorio. El equipo de investigación explica el mecanismo, que implica la formación de



polarones, cuasipartículas que se forman en el material debido al acoplamiento de electrones sobrantes o huecos con vibraciones iónicas.

Mientras que otros científicos también han observado fenómenos similares en sus datos de laboratorio, los mecanismos detrás de estas observaciones seguían sin explicarse, hasta ahora. **Allan Johnson y sus colaboradores han dilucidado los procesos subyacentes** a esta transformación de fase, destacando la formación de polarones y su ordenamiento en direcciones específicas como un factor clave en la reducción de la penalización de energía a la fase metálica. Impulsar la transición de fase excitando este estado de movimiento desordenado se puede lograr con menos energía. Además, la reducción dinámica de la barrera significa que los científicos pueden reducir selectivamente la energía requerida para la transición de fase impulsada por láser sin aumentar la probabilidad de conmutación térmica, en contraste con otros métodos para mejorar la eficiencia.

Los resultados se han publicado en la revista [Nature Physics](#). Las implicaciones de esta investigación se extienden más allá de la ciencia fundamental, ofreciendo nuevas vías para el control preciso de materiales y la innovación tecnológica. A medida que el equipo continúa optimizando el método y explorando nuevos materiales, el potencial de avances transformadores en la ciencia de los materiales y el control óptico sigue siendo vigente.

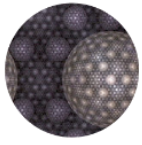
Este trabajo es una colaboración entre investigadores de IMDEA Nanociencia, el Institut de Ciències Fotoniques (ICFO), el Institut de Physique de Rennes (CNRS), el Institute of Chemical Research (ICIQ), el SLAC National Accelerator Laboratory (Stanford, EE.UU.) y el Pohang Accelerator Laboratory (Corea). Las mediciones de rayos X se realizaron en el BL3 del SACLA (Instituto de Investigación de Radiación Síncrotrón de Japón). Ha sido cofinanciado por el sello de Excelencia Severo Ochoa otorgado a IMDEA Nanociencia en 2017 y renovado en 2021.

---

## Referencia

Allan S. Johnson et al. All- optical seeding of a light-induced phase transition with correlated disorder. Nature Physics (2024). <https://www.nature.com/articles/s41567-024-02474-4>  
<https://hdl.handle.net/20.500.12614/3601>





### Contacto

Dr. Allan Johnson

[allan.johnson@imdea.org](mailto:allan.johnson@imdea.org)

<https://nanociencia.imdea.org/ultrafast-science-of-quantum-materials/home>

Linkedin: <https://www.linkedin.com/in/allan-johnson-232b4133/>

IMDEA Nanociencia Outreach Office

[divulgacion.nanociencia@imdea.org](mailto:divulgacion.nanociencia@imdea.org)

+34 91 299 87 12

Twitter: @imdea\_nano

Facebook & Instagram: @imdeananociencia

**Fuente:** IMDEA Nanociencia