

NOBEL DE FÍSICA 2018

Herramientas hechas de luz

Los idescubrimientos distinguidos este año han revolucionado la física láser. Objetos extremadamente pequeños y procesos increíblemente rápidos aparecen ahora bajo una nueva luz. No solo la física, sino también la química, la biología y la medicina han obtenido instrumentos de precisión para su uso en investigación básica y aplicaciones prácticas.

Arthur Ashkin desarrolló unas pinzas ópticas que atrapan partículas, átomos y moléculas con sus dedos láser. Los virus, las bacterias y otras células vivas también pueden ser retenidos, examinados y manipulados sin sufrir daños. Las pinzas ópticas de Ashkin han creado oportunidades completamente nuevas para observar y controlar la maquinaria de la vida.

Gérard Mourou y Donna Strickland abrieron el camino hacia los pulsos láser más cortos e intensos creados. La técnica que desarrollaron ha abierto nuevas áreas de investigación y ha llevado a amplias aplicaciones industriales y médicas; por ejemplo, cada año se realizan millones de operaciones oculares gracias a rayos láser cada vez más precisos.

Viajando en haces de luz

Arthur Ashkin tenía un sueño: lograr mover objetos con rayos de luz. En la serie de culto que comenzó a mediados de la década de 1960, *Star Trek*, se usaba un rayo tractor para recuperar objetos en el espacio, incluso asteroides, sin tocarlos. Por supuesto, esto suena a pura ciencia ficción. Podemos sentir que los rayos de sol transportan energía (nos calentamos al sol), aunque la presión del rayo es demasiado pequeña para que podamos sentir el más leve empujón. Pero ¿podría su fuerza ser suficiente para empujar partículas y átomos extremadamente pequeños?

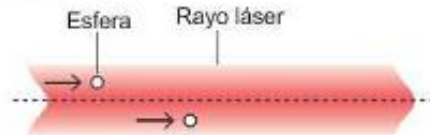
Inmediatamente después de la invención del primer láser en 1960, Ashkin comenzó a experimentar con el nuevo instrumento en los Laboratorios Bell en las afueras de Nueva York. En un láser, las ondas de luz se mueven coherentemente, a diferencia de la luz blanca ordinaria en la que los rayos se mezclan en todos los colores del arco iris y se dispersan en todas direcciones.

Ashkin se dio cuenta de que un láser sería la herramienta perfecta para obtener rayos de luz con los que mover pequeñas partículas. Iluminó esferas transparentes de tamaño micrométrico y, efectivamente, consiguió que las esferas se movieran de inmediato. Al mismo tiempo Ashkin se sorprendió de cómo las esferas se dirigían hacia el centro del rayo, donde era más intenso. La explicación es que, por más delgado que sea un rayo láser, su intensidad disminuye desde el centro hacia los lados. Por lo tanto, la presión de radiación que la luz del láser ejerce sobre las partículas también varía, dirigiéndolas hacia el interior del haz y manteniéndolas en su centro.

Para mantener las partículas en la dirección del haz, Ashkin agregó una potente lente para enfocar la luz láser. Las partículas fueron dirigidas hacia el punto que tenía la mayor intensidad de luz. Se había logrado una trampa de luz que pronto sería conocida como “pinzas ópticas”.

Ashkin crea sus trampas de luz

1. Pequeñas esferas transparentes se ponen en movimiento cuando se iluminan con luz láser. Su velocidad corresponde a la estimación teórica de Ashkin, lo que demuestra que realmente es la presión de la radiación lo que las empuja.



2. Un efecto inesperado fue que había un gradiente de fuerza que empuja las esferas hacia el centro del rayo donde la luz es más intensa. Esto se debe a que la intensidad del haz disminuye hacia el exterior y la fuerza resultante empuja las esferas hacia su centro.



3. Ashkin consigue que las esferas leviten apuntando el rayo láser hacia arriba. La presión de radiación contrarresta la gravedad.



4. El rayo láser se enfoca con una lente. La luz captura partículas e incluso bacterias y células vivas en estas pinzas ópticas.

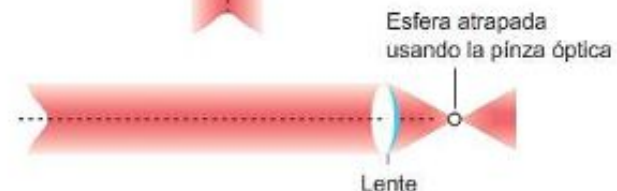


Figura 1. Ashkin crea una trampa de luz conocida posteriormente como “pinzas ópticas”.

Bacterias vivas capturadas por la luz.

Después de varios años y muchos contratiempos los átomos individuales también podrían ser atrapados. Había muchas dificultades: una era que se necesitaban mayores fuerzas para que las pinzas ópticas pudieran agarrar los átomos, y otra era la vibración de los átomos debida a la temperatura. Era necesario encontrar una forma de reducir la velocidad de los átomos y empaquetarlos en un área más pequeña que la del punto que finaliza esta oración. Todo encajó en 1986 cuando las pinzas ópticas se combinaron con otros métodos para detener los átomos y atraparlos.

Mientras que el frenado de los átomos se convirtió en un área de investigación en sí misma, Arthur Ashkin descubrió un uso completamente nuevo para sus pinzas ópticas: los estudios de sistemas biológicos. Fue una auténtica casualidad. En sus intentos por capturar partículas cada vez más pequeñas, usó muestras de pequeños virus del mosaico. Después de dejarlos abiertos durante la noche, las muestras se llenaron de partículas más grandes que se movían de aquí para allá. Usando un microscopio, descubrió que estas partículas eran bacterias que nadaban libremente y que quedaban atrapadas en la trampa de luz cuando se acercaban al rayo láser. Sin embargo, su rayo láser verde mató a las bacterias, por lo que era necesario usar un rayo más débil para que sobrevivieran. Utilizando luz infrarroja las bacterias no sufrieron daño alguno y pudieron reproducirse en la trampa.

En consecuencia los estudios de Ashkin se centraron en diferentes bacterias, virus y células vivas.

Incluso demostró que era posible observar su interior sin destruir la membrana celular.

Ashkin abrió todo un mundo de nuevas aplicaciones con sus pinzas ópticas. Un avance importante fue la capacidad de investigar las propiedades mecánicas de los motores moleculares, moléculas grandes que realizan un trabajo vital dentro de las células. El primero en ser mapeado en detalle usando pinzas ópticas fue una proteína, la kinesina, y su movimiento a lo largo de los microtúbulos, que forman parte del esqueleto de la célula.

Un motor molecular se mueve en el interior de una trampa de luz

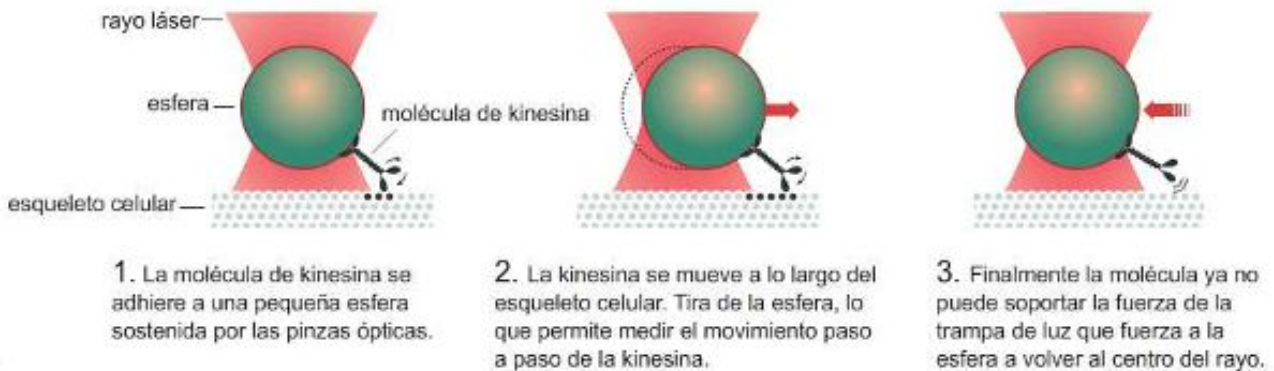


Figura 2. Las pinzas ópticas mapean la proteína kinesina (motor molecular) cuando se desplaza a lo largo del esqueleto celular.

De la ciencia ficción a las aplicaciones prácticas.

En los últimos años muchos otros investigadores se han inspirado para adoptar los métodos de Ashkin y refinarlos aún más. El desarrollo de innumerables aplicaciones actuales está impulsado por pinzas ópticas que permiten observar, girar, cortar, empujar y tirar, sin tocar los objetos que se están investigando. En muchos laboratorios las pinzas láser son, por lo tanto, equipos estándar para estudiar procesos biológicos, como proteínas individuales, motores moleculares, ADN o la vida interna de las células. La holografía óptica está entre los desarrollos más recientes, en los que se pueden usar miles de pinzas simultáneamente para separar las células sanguíneas sanas de las infectadas, algo que podría aplicarse ampliamente en la lucha contra la malaria, por ejemplo.

Arthur Ashkin nunca deja de sorprenderse por el desarrollo de sus pinzas ópticas, ciencia ficción que se ha transformado en realidad.

La segunda parte del premio de este año, la obtención de pulsos láser ultracortos y súper fuertes, también pertenecen a lo que hasta hace poco se podía considerar ciencia del futuro.

Nueva tecnología para rayos ultracortos de alta intensidad.

La inspiración vino de un artículo de ciencia popular que describía el radar y sus largas ondas de radio. Sin embargo transferir esta idea a las ondas de luz más cortas fue difícil, tanto en teoría como en la práctica. El avance se describió en un artículo publicado en diciembre de 1985, la primera publicación científica de **Donna Strickland**.

Donna se había mudado de Canadá a la Universidad de Rochester en los Estados Unidos, donde se sintió atraída por la física de los rayos láser verdes y rojos que iluminaban el laboratorio como un árbol de Navidad y, no menos importante, por las futuristas expectativas de su supervisor, **Gérard Mourou**. Uno de ellas se había hecho realidad: la idea de amplificar pulsos de láser cortos a niveles sin precedentes.

La luz láser se crea a través de una reacción en cadena en la que las partículas de luz, los fotones, generan más fotones. Estos pueden ser emitidos en pulsos. Desde que se inventaron los láseres, hace casi 60 años, los investigadores se han esforzado por crear pulsos más intensos. Sin embargo, a mediados de la década de 1980, todo indicaba que se había llegado al final del camino. Para pulsos cortos ya no era prácticamente posible aumentar la intensidad de la luz sin destruir el material.

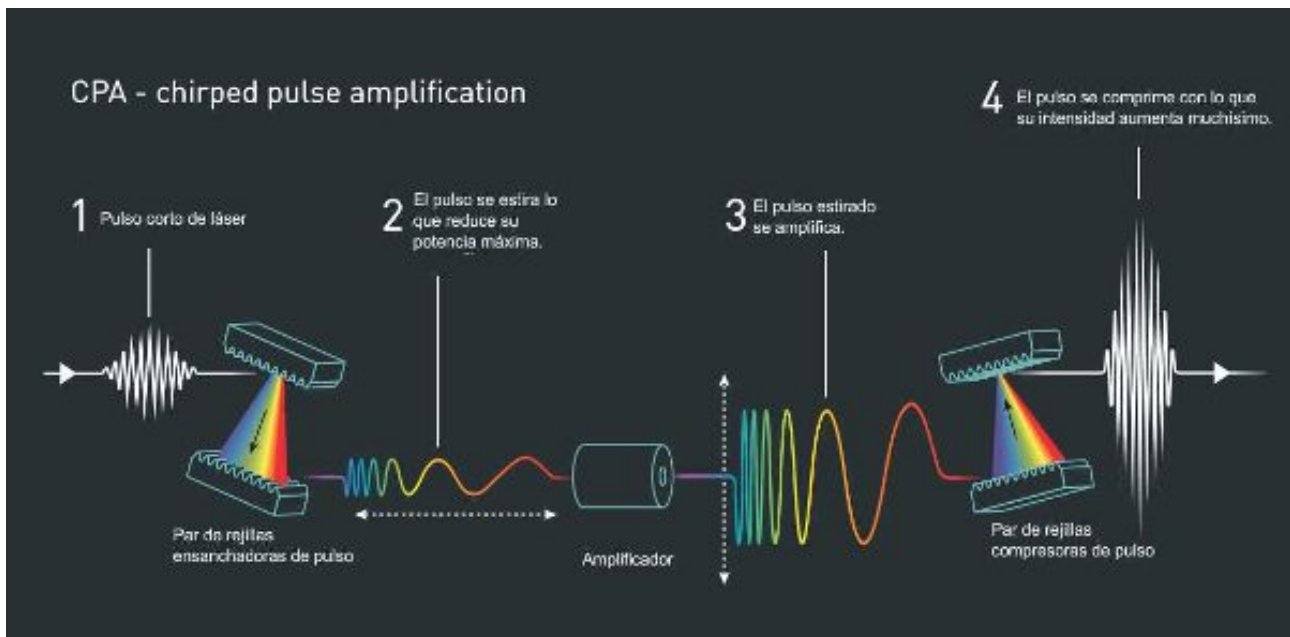


Figura 3. La técnica CPA revolucionó la tecnología láser. Permitted la emisión de pulsos de luz muy intensos y cortos utilizando un sofisticado método para evitar el riesgo de destruir el material de amplificación. En lugar de amplificar directamente el pulso de luz se estira primero, reduciendo su potencia máxima. Luego el pulso se amplifica y, cuando se comprime nuevamente, el pulso de luz se vuelve extremadamente intenso.

La nueva técnica de Strickland y Mourou, conocida CPA, era simple y elegante. Tome un pulso láser corto, estírelo, amplifíquelo y vuelva a apretarlo. Cuando un pulso se estira, su potencia máxima es mucho menor, por lo que puede amplificarse enormemente sin dañar el amplificador. Luego, el pulso se comprime, lo que significa que se empaqueta más luz en un área pequeña del espacio, y la intensidad del pulso aumenta extraordinariamente.

Strickland y Mourou tardaron unos años en combinar todo con éxito. Como de costumbre, una gran cantidad de detalles prácticos y conceptuales causó dificultades. Por ejemplo, el pulso se iba a estirar con un cable óptico de fibra de 2,5 km recientemente adquirido. Pero no salió ninguna luz, el cable se había roto en algún punto intermedio. Después de muchos problemas, 1,4 km deberían de ser suficiente. Un desafío importante fue la sincronización de las distintas etapas del equipo. Esto también se resolvió y, en 1985, Strickland y Mourou pudieron demostrar por primera vez que su elegante visión también funcionaba en la práctica.

La técnica de CPA inventada por Strickland y Mourou revolucionó la física del láser. Se convirtió en estándar para todos los láseres de alta intensidad posteriores y una puerta de entrada a áreas y aplicaciones completamente nuevas en física, química y medicina. Los pulsos de láser muy cortos e intensos podían ahora ser creados en el laboratorio.

La cámara de cine más rápida del mundo.

¿Cómo se utilizan estos pulsos ultracortos e intensos? Una de las primeras áreas donde fueron utilizados fue para ver lo que sucede entre las moléculas y los átomos en un micromundo en constante cambio. Ahí las cosas suceden rápidamente, pero con pulsos tan cortos (de un femtosegundo, una millonésima de mil millonésima de segundo, 10^{-15} s), es posible ver eventos que antes parecían ser instantáneos.

La intensidad extremadamente alta del láser convierte su luz en una herramienta para cambiar las propiedades de la materia: los aislantes eléctricos se pueden convertir en conductores y los rayos láser ultra afilados permiten cortar o taladrar agujeros en varios materiales de forma extremadamente precisa, incluso en la materia viva.

Por ejemplo, los láseres se pueden usar para crear un almacenamiento de datos más eficiente, ya que el almacenamiento no solo se realiza en la superficie del material, sino también en los pequeños orificios perforados en el medio de almacenamiento. Esta tecnología también se utiliza para fabricar "stents" quirúrgicos,

cilindros de metal estirado de tamaño micrométrico que ensanchan y refuerzan los vasos sanguíneos, el tracto urinario y otros conductos.

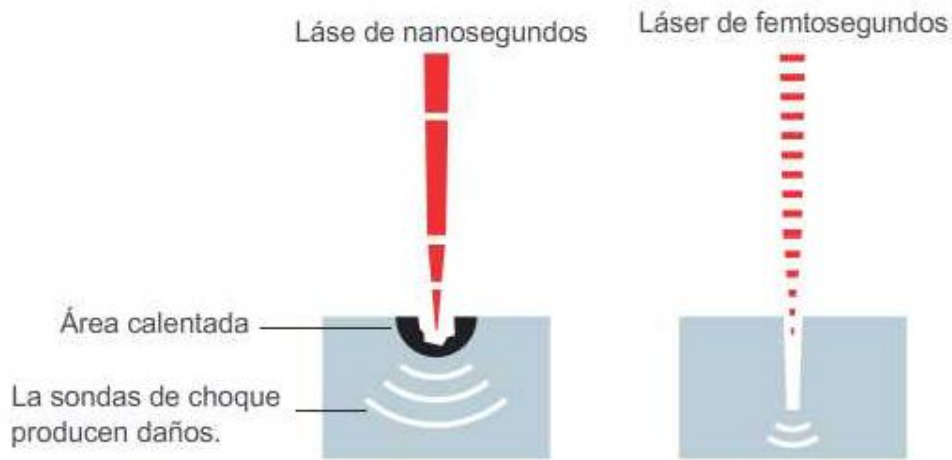


Figura 4. Los pulsos cortos de un láser de femtosegundo (derecha) causan menos daño en el material que los pulsos un millón de veces más largos de un láser de nanosegundos (izquierda). Pulsos de láser ultra cortos e intensos se utilizan en la cirugía ocular, el almacenamiento de datos y la fabricación de “stents” médicos.

Existen innumerables áreas de aplicación que aún no se han explorado completamente. Cada paso adelante permite a los investigadores obtener información sobre nuevos mundos, cambiando tanto la investigación básica como las aplicaciones prácticas.

Una de las nuevas áreas de investigación que ha surgido en los últimos años es la física de los attosegundos. Los pulsos de láser más cortos que cien attosegundos (un attosegundo es una mil millonésima parte de una mil millonésima parte de un segundo, 10^{-18} s) nos permiten observar el extraño mundo de los electrones. Los electrones son los caballos de batalla de la química. Son responsables de las propiedades ópticas y eléctricas de toda la materia y de los enlaces químicos. Ahora no solo son observables, sino que también pueden ser controlados.

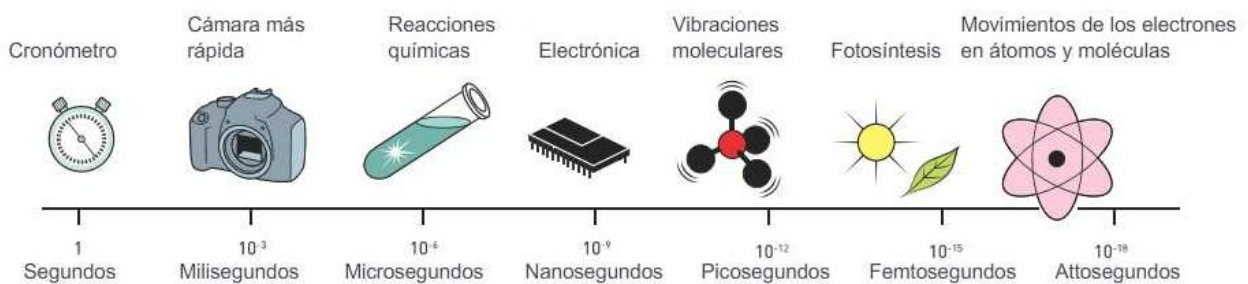


Figura 5. Cuanto más rápidos son los pulsos de luz, más rápidos son los movimientos que se pueden observar. Los pulsos de láser inconcebibles rápidos (del orden de los femtosegundos, 10^{-15} s) e incluso mil veces más rápidos (del orden de los attosegundos, 10^{-18} s), permitirán observar secuencias de eventos nunca antes filmados; el movimiento de electrones alrededor de un núcleo atómico puede ahora ser observado con una cámara de attosegundos.

Hacia una luz aún más extrema.

Muchas aplicaciones para estas nuevas técnicas de láser están a la vuelta de la esquina: electrónica más rápida, células solares más efectivas, mejores catalizadores, aceleradores más potentes, nuevas fuentes de energía o productos farmacéuticos de diseño. No es de extrañar que haya una dura competencia en la física láser.

Donna Strickland continúa ahora su carrera de investigación en Canadá, mientras que Gérard Mourou ha regresado a Francia y está involucrado en una iniciativa paneuropea de tecnología láser, entre otros proyectos. Él inició y dirigió el desarrollo inicial de la **Extreme Light Infrastructure (ELI)**. Tres nuevas sedes: en la República Checa, Hungría y Rumania, serán realidad en pocos años. La potencia máxima planificada es de 10 petawatts ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$), lo que equivale a un flash increíblemente corto producido por cien billones de bombillas.

Las nuevas sedes se especializarán en diferentes áreas: investigación de attosegundos en Hungría, física nuclear en Rumania y haces de partículas de alta energía en la República Checa. Se están planificando nuevas e incluso más potentes instalaciones en China, Japón, Estados Unidos y Rusia.

Ya hay especulaciones sobre el próximo paso: un aumento de diez veces en la potencia, a 100 petawatts. Las visiones para el futuro de la tecnología láser no se detienen ahí. ¿Por qué no el poder de un zettawatt (10^{21} W) o pulsos inferiores a los zeptosegundos, equivalentes al inconcebiblemente corto periodo de tiempo de 10^{-21} segundos? Se están abriendo nuevos horizontes, desde los estudios de física cuántica en el vacío hasta la producción de rayos de protones intensos que pueden usarse para erradicar las células cancerosas en el cuerpo. Sin embargo, incluso ahora, estos fantásticos avances nos permiten manipular en el micromundo con el mejor espíritu de Alfred Nobel, para el mayor beneficio para la humanidad.

Hacia intensidades cada vez mayores



Figura 6. El desarrollo del pulso láser de alta intensidad. La técnica de CPA que se premia este año es la base para el explosivo desarrollo de pulsos láser cada vez más fuertes.

LINKS AND FURTHER READING

Additional information on this year's prizes, including a scientific background in English, is available on the website of the Royal Swedish Academy of Sciences, www.kva.se, and at <http://nobelprize.org>. There you can watch video footage of the press conferences, the Nobel Lectures and more. Information on exhibitions and activities related to the Nobel Prizes and the Prize in Economic Sciences is available at www.nobelcenter.se.

Articles

Ashkin, A. (1997) Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 94, pp. 4853–4860

Strickland, D. and Mourou, G. (1985) Compression of Amplified Chirped Optical Pulses, Optics Communications, Vol. 56, Nr 3

Videos

Ashkin, A. and Gordon, J. P. (2014) Symposium 2014, Optical Society, San Jose, California, www.youtube.com/watch?v=Lx4sZKY0YGY

Ashkin, A. (2004) Harvey Prize 2004, Technion, Israel, www.youtube.com/watch?v=KmlVNA2nJOQ

Strickland, D. (June 2014) 'From Ultrafast to Extreme Light': Celebrating Gérard Mourou (Part 2), Ann Arbor, Michigan, USA, www.youtube.com/watch?v=5ucw-T2EX-8, starts at 26:00

Mourou, G. (June 2014) 'From Ultrafast to Extreme Light': Celebrating Gérard Mourou (Part 8), Ann Arbor, Michigan, USA, www.youtube.com/watch?time_continue=2&v=iaFpuwbu4wl, starts at 28:00

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel prize in Physics 2018

“for groundbreaking inventions in the field of laser physics”

with one half to	and the other half jointly to	
<p>ARTHUR ASHKIN</p> <p>Born 1922 in New York, USA. Ph.D. 1952 from Cornell University, Ithaca, USA. https://uwaterloo.ca/physics-astronomy/people-profiles/donna-strickland https://history.aip.org/phn/11409018.html</p>	<p>GÉRARD MOUROU</p> <p>Born 1944 in Albertville, France. Ph.D. 1973. www.polytechnique.edu/annuaire/en/users/gerard.mourou</p>	<p>DONNA STRICKLAND</p> <p>Born 1959 in Guelph, Canada. Ph.D. 1989 from University of Rochester, USA. https://uwaterloo.ca/physics-astronomy/people-profiles/donna-strickland</p>
<p>“for the optical tweezers and their application to biological systems”</p>	<p>“for their method of generating high-intensity, ultra-short optical pulses”</p>	

Science Editors: Olga Botner, Gunnar Ingelman, Anders Irbäck and Mats Larsson, the Nobel Committee for Physics

Text: Joanna Rose

Translation (al inglés): Clare Barnes

Illustrations: ©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

Editor: Sara Gustavsson

©The Royal Swedish Academy of Sciences