

En un r...atto, ahoritita, el premio Nobel de Física

W. Luis Mochán

Luis Mochán es físico e investiga sobre propiedades ópticas de metamateriales en el Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. El Dr. Mochán es miembro activo de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

¿Qué tan rápido podemos prender y apagar la luz?

Para ver hay que prender la luz. Para ver un fenómeno ultrarrápido hay que prenderla y apagarla de inmediato, para que, en nuestros ojos, o más bien, en nuestros instrumentos, queden congeladas las etapas sucesivas del fenómeno. ¿Qué tan rápido podemos prender y apagar la luz? ¿Cuáles son los pulsos más cortos de luz que podemos producir? Hace unos días se otorgó el Premio Nobel de Física a Pierre Agostini, Ferenc Krausz y Anne L'Huillier por haber desarrollado técnicas experimentales que permiten generar pulsos de luz con una duración de apenas algunos attosegundos, lo cual permite el estudio de la dinámica de los electrones en la materia. Unos cuantos attosegundos, millonésimas de millonésimas de millonésimas de segundo, es el tiempo que tardan los electrones en dar la vuelta a los núcleos atómicos. Con estos pulsos se podrán observar y controlar los movimientos de los electrones en los átomos, sus desplazamientos durante las reacciones químicas y colocar moléculas unas frente a otras para producir reacciones químicas específicas. Seguramente, próximamente veremos múltiples aplicaciones de esta nueva física de los fenómenos ultrarrápidos.

Viendo lo "transiente"

¿Ha visto cómo mueve las alas un mosquito mientras vuela? Probablemente no; los mosquitos baten sus alas miles de veces por segundo [ref. 1] y el ojo humano no es lo suficientemente rápido para ver ese veloz movimiento. Para poder estudiarlo es necesario usar instrumentos especiales, cámaras ultrarrápidas que abran y cierren su obturador en menos de la milésima parte de un segundo. Como éste, hay un sinnúmero de fenómenos interesantes demasiado rápidos para que los perciban nuestros sentidos, pero que pueden estudiarse, caracterizarse, medirse con instrumentos especializados. ¿Cómo vibra la cuerda de un violín? ¿Cómo se deforma una pelota al rebotar? ¿Cómo se rompe y salpica una gota de agua al golpear el piso? ¿Cómo se propaga una fractura al estrellarse un vidrio? ¿Cómo penetra un proyectil una placa sólida? Una alternativa a

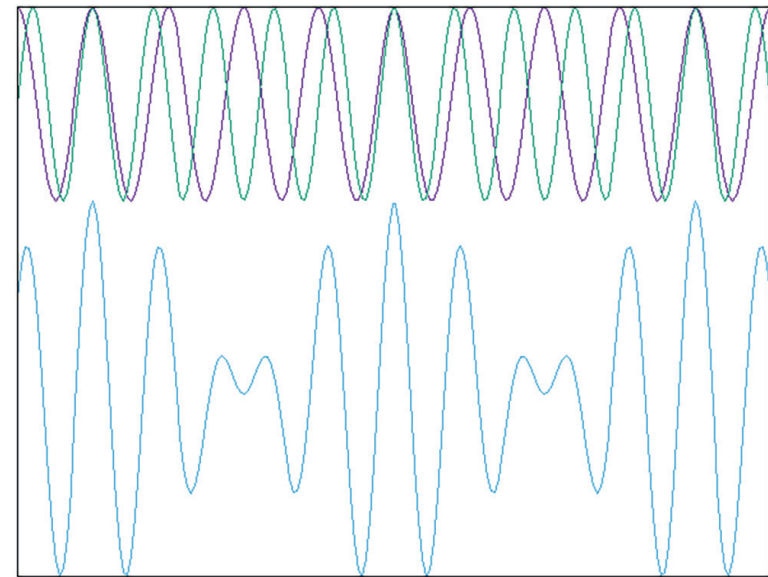


FIGURA 2. INTERFERENCIA entre dos ondas, una de las cuales oscila con una frecuencia 5/4 veces más alta que la otra. Notamos crestas altas y valles profundos cuando ambas ondas tienen fases cercanas.

abrir y cerrar obturadores es dejar abierto el obturador de una cámara en un cuarto oscuro excepto por un pequeño momento en que se prende y apaga una luz intensa. Por ejemplo, en la figura 1 se empleó esta técnica para fotografiar un filamento de leche rompiéndose en gotitas después de que una gota cayó sobre la superficie de un plato con leche.

Femtosegundos

Mientras más rápido es el fenómeno por fotografiar, más corto debe ser el pulso luminoso por emplear. ¿Qué tan corto lo podemos hacer? Usando un interruptor eléctrico manual, podremos generar pulsos de alrededor de un segundo (y quemar tras pocos pulsos nuestra instalación eléctrica). Usando interruptores electrónicos, transistores, podríamos generar pulsos de quizás poco menos de millonésimas de segundo. Pero, ¿son suficientemente cortos? Depende de qué queramos observar. Tomemos, por ejemplo, la ro-

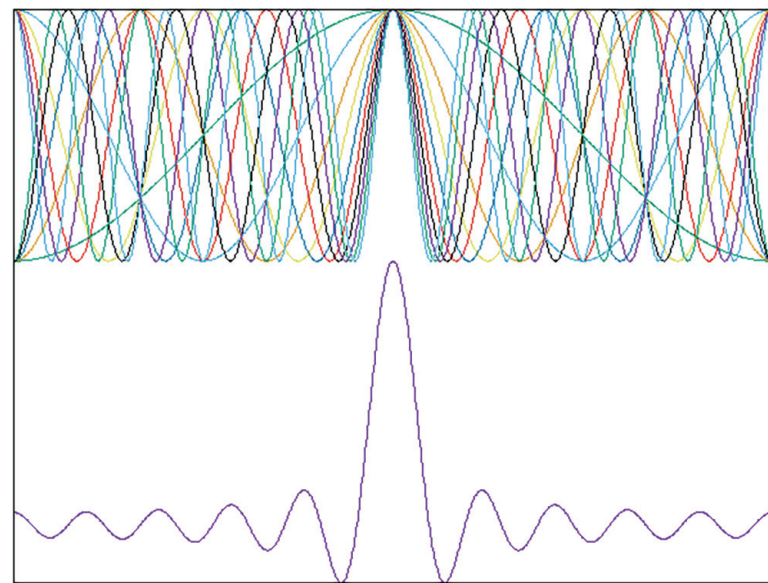


FIGURA 3. INTERFERENCIA entre diez ondas iguales, salvo por su frecuencia. Una onda tiene la frecuencia fundamental y las otras tienen frecuencias que son el doble, el triple, el cuádruple, etc. Notamos una resultante grande cuando todas las ondas se hallan en fase, y chica cuando algunas están fuera de fase respecto a otras.

tación de una molécula de agua. Ésta tarda poco menos de dos décimas de un picosegundo (de una millonésima de una millonésima de segundo, 10^{-12} s). Los núcleos del hidrógeno, (la H en H_2O) en la misma molécula vibran alejándose y acercándose al otro ion de hidrógeno en un tiempo unas diez veces menor, 2×10^{-14} s. ¿Podremos fotografiar estos fenómenos? Fotografiarlos es un decir, pero sí podemos generar pulsos de luz suficientemente cortos para obtener información sobre las partes de estos procesos, **interrogándolos** con pulsos de luz que duren mucho menos que el proceso completo y observando cómo el sistema responde. Para producir estos pulsos se suele emplear el fenómeno de interferencia. Así como una misma cuerda de guitarra puede generar muchos tonos distintos [ref. 3], la nota fundamental y sus armónicos (pida a un amigo guitarrista que se los muestre) con frecuencias que multiplican por 2, 3, 4, ... a la frecuencia fundamental,

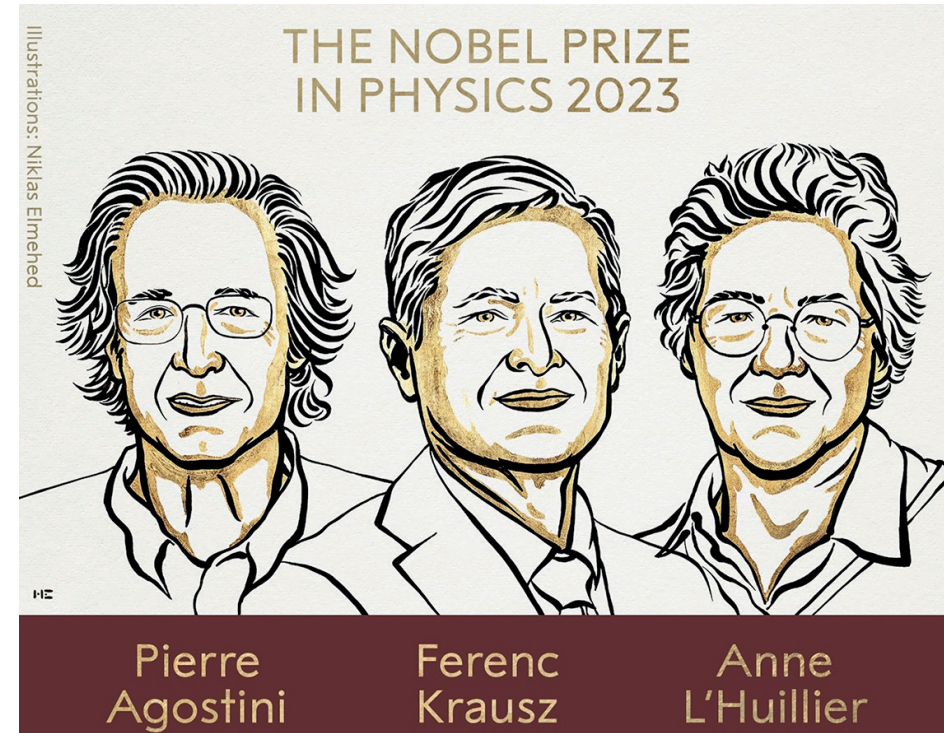


FIGURA 4. EL Premio Nobel de Física, 2023, se otorgó a Pierre Agostini (Universidad Estatal de Ohio, EEUU), Ferenc Krausz (Instituto Max Planck de Óptica Cuántica, Universidad de Múnich, Alemania) y Anne L'Huillier (Universidad de Lund, Suecia), por su gran contribución al estudio de la dinámica de los electrones. Es importante resaltar que la Dra, L'Huillier es apenas la quinta mujer que recibe este prestigioso premio en Física. La primera fue María Curie en 1903.

en la cavidad de un láser, formada por dos espejos que atrapan la luz, se podrían generar *muchos modos propios* [ref. 4]. La figura 2 muestra la interferencia entre dos de éstos. En algunas regiones las oscilaciones se suman y en otras se restan formando una serie de pulsos con máximos donde ambas ondas están en fase.

Si sumáramos más modos en lugar sólo dos, podríamos generar pulsos mucho más cortos, como muestra la figura 3.

Aquí sumamos solamente 10 modos, pero en los láseres de *modos armados* se han sumado del orden de 30 modos, generando pulsos con duraciones de centenas o decenas de femtosegundos (un femtosegundo (fs) es una milésima de millonésima de millonésima de segundo, 1×10^{-15} s). Notamos que el pulso no puede ser mucho más angosto que el tiempo que dura una sola oscilación de la onda más rápida.

Attosegundos

¿Podemos observar fenómenos aún más rápidos? ¿Podemos generar pulsos más cortos? El tiempo que tarda un electrón en darle una vuelta a un núcleo en un átomo es del orden de apenas unas decenas de *attosegundos*. Cada attosegundo (as) es una milésima de femtosegundo, una millonésima de millonésima de millonésima de segundo, $1as = 1 \times 10^{-18}s = 1 \times 10^{-18}s$.

Suecia otorgó el premio Nobel en Física 2023 a Pierre Agostini, Ferenc Krausz y Anne L'Huillier (figura 4) por haber desarrollado técnicas experimentales que permiten generar pulsos de luz con una duración de apenas algunos attosegundos, lo cual permite el estudio de la dinámica de los electrones en la materia.

Para lograrlo recurrieron a varios fenómenos. Primero, usaron láseres muy potentes para iluminar átomos de gases nobles. La luz es una onda electromagnética y emplearon láseres tan potentes que la fuerza eléctrica prácticamente le arrancó electrones a los átomos usando el principio de "tuneo" cuántico, para luego empujarlos de regreso y azotarlos contra el núcleo. En este proceso los electrones radian ondas de luz con frecuencias más altas que las de la onda original mediante un proceso llamado generación de armónicos altos. Tunelamiento cuántico La figura 5 muestra esquemáticamente cómo un electrón en un átomo interactúa con el campo eléctrico de una onda luminosa muy intensa.

Curiosamente, el prefijo *atto* viene del danés, lengua en que significa 18, y no viene del griego o latín como la mayoría de los prefijos como micro (10^{-6}), mili (10^{-3}), kilo (10^3), mega (10^6), giga (10^9), tera (10^{12}), peta (10^{15}). El prefijo femto (10^{-15}) también viene del danés (15) y pico (10^{-12}) viene ¡del español! [ref. 5]. La edad del universo es casi de catorce mil millones de años. En cada año hay 365 días, en cada día hay 24 horas, en cada hora hay 60 minutos y en cada minuto hay 60 segundos, así que la edad del universo es $\approx 14 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 s = 4.4 \times 10^{17} s$, casi de medio millón de millones de millones de segundos. Así que un attosegundo es a un segundo más o menos como un segundo es ¡a la edad del universo [ref. 6]! Premio Nobel La Academia Real de Ciencias de

La figura 5 muestra la energía potencial (línea roja sólida) de un electrón (disco azul) atrapado por el núcleo de un átomo en ausencia de un campo externo (línea a trazos roja). Se muestra la energía total (línea negra gruesa sólida y a trazos). El electrón no puede escapar pues *está prohibido* que su energía total (cinética más potencial) esté por debajo de su energía potencial; su energía cinética, un medio de su masa por su velocidad al cuadrado, debe ser positiva pues el cuadrado de todo número real es positivo. Por tanto, el electrón queda dando vueltas alrededor del núcleo (proceso 1, doble flecha a trazos cortos). Un campo eléctrico óptico intenso añade una rampa (línea a trazos azul) a la energía potencial (conduciendo a la línea sólida azul) lo cual permite que el

electrón se escape violando momentáneamente la prohibición, *tuneando* a través de la región prohibida para posteriormente acelerar y ganar energía cinética (proceso 2). Este proceso, llamado efecto túnel, es de origen *cuántico* y es muy improbable a menos que la región a través de la cual se tunea, en la que la velocidad toma valores imaginarios, sea muy angosta, lo cual es el caso cuando el campo eléctrico del haz luminoso es muy grande y la rampa correspondiente muy inclinada. Cuando media oscilación después cambia el signo del campo, cambia la inclinación de la rampa (línea a trazos amarilla, dando origen a la línea sólida amarilla) y el electrón frena, pero gana mucha energía potencial (proceso 3). Entonces se acelera en la dirección opuesta (proceso 4) ganando mucha energía cinética, pero chocando eventualmente con el núcleo. En el choque pierde su energía cinética (proceso 5) emitiéndola en forma de fotones, cuantos de radiación electromagnética, de alta frecuencia y de alta energía.

La generación de luz de alta frecuencia ante los repetidos choques de los electrones con el núcleo se puede entender mediante la generación de armónicos. La luz que vemos todos los días tiene un campo electromagnético muy pequeño, comparado con el campo con que los núcleos atómicos mantienen ligados a los electrones. Por ejemplo, el campo electromagnético asociado a la luz del Sol que ilumina nuestros días es alrededor de mil millones de veces más chico que el campo eléctrico con que el núcleo de un átomo atrapa a sus electrones. Si tomamos un número muy pequeño, mucho menor que 1, y lo multiplicamos por sí mismo dos, tres o más veces, el resultado es cada vez más chico. Por ello, al iluminar un material, el efecto que la luz tiene sobre sus electrones es aproximadamente *lineal* en el cociente del campo óptico dividido entre el campo interno, con correcciones cuadráticas, cúbicas, etc. que suelen ser tan pequeñas que pueden ignorarse. Lo mismo podemos decir del campo producido por los electrones excitados, el cual tendría la misma frecuencia, el mismo color, que la luz incidente. Sin embargo, cuando la luz es muy intensa, aparecen efectos no lineales, proporcionales al cuadrado, al cubo y a otras potencias del campo original, proporcionales al producto de la onda incidente consigo misma una y otra vez. La multiplicación de ondas es un fenómeno muy curioso como ilustra la figura 6.

Generación de armónicos

En la figura 6 mostramos dos ondas idénticas que se multiplican para dar origen a una nueva onda. Cada onda tiene máximos, en que el campo eléctrico es positivo, y mínimos en que es negativo. Sin embargo, menos por menos da más, de manera que su producto tiene el doble de máximos, es decir, oscila con el doble de la frecuencia.

En la figura 6 mostramos dos ondas idénticas que se multiplican para dar origen a una nueva onda. Cada onda tiene máximos, en que el campo eléctrico es positivo, y mínimos en que es negativo. Sin embargo, menos por menos da más, de manera que su producto tiene el doble de máximos, es decir, oscila con el doble de la frecuencia.

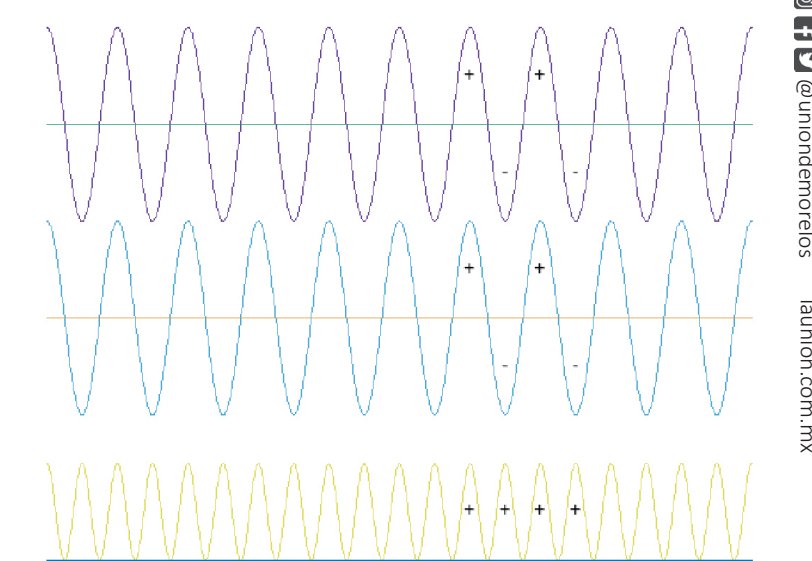


FIGURA 6. MULTIPLICACIÓN de una onda consigo misma. Al multiplicar una cresta por otra, ambas positivas (+), el resultado es una cresta, positiva. Al multiplicar un valle por otro valle, ambos negativos (-), el resultado es de nuevo, una cresta, positiva. Así, el producto tiene el doble de crestas que las de las ondas que se multiplicaron, es decir, su frecuencia es el doble.

Al multiplicar más campos se pueden generar frecuencias más altas, de manera que, empezando con luz infrarroja, luz invisible al ojo humano con frecuencias menores a la de la luz roja, se han llegado a generar ondas de luz ultravioleta lejano, con frecuencias mucho más altas que las que pueden ver nuestros ojos. Haciendo interferir muchas de estas ondas, los ahora premiados lograron generar pulsos de luz, campos electromagnéticos con duraciones de apenas unos cuantos attosegundos.

Excitación-muestreo

Con estos pulsos se pueden hacer *películas* que muestren cómo responde un sistema electrónico a una excitación. Para ello se emplea la técnica de *excitación-muestreo* (pump-probe en inglés). Imagine que asiste a un teatro muy peculiar. Se ve un destello luminoso, suena la tercera llamada, se levanta el telón y empieza la acción, pero el escenario se halla en total obscuridad. Pasados unos minutos, alguien toma una fotografía con *flash*, un pulso luminoso que dura un instante. Luego, obscuridad de nuevo hasta el final de la obra. Intrigado, regresa Ud. a la siguiente función. De nuevo, obscuridad. Pasado un tiempo producido por los electrones excitados, el cual tendría la misma frecuencia, el mismo color, que la luz incidente. Sin embargo, cuando la luz es muy intensa, aparecen efectos no lineales, proporcionales al cuadrado, al cubo y a otras potencias del campo original, proporcionales al producto de la onda incidente consigo misma una y otra vez. La multiplicación de ondas es un fenómeno muy curioso como ilustra la figura 6.

Este trabajo contó con el apoyo de DGAPA-UNAM, mediante el proyecto IN109822. Agradezco las sugerencias recibidas de parte de Margarita Bernal.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

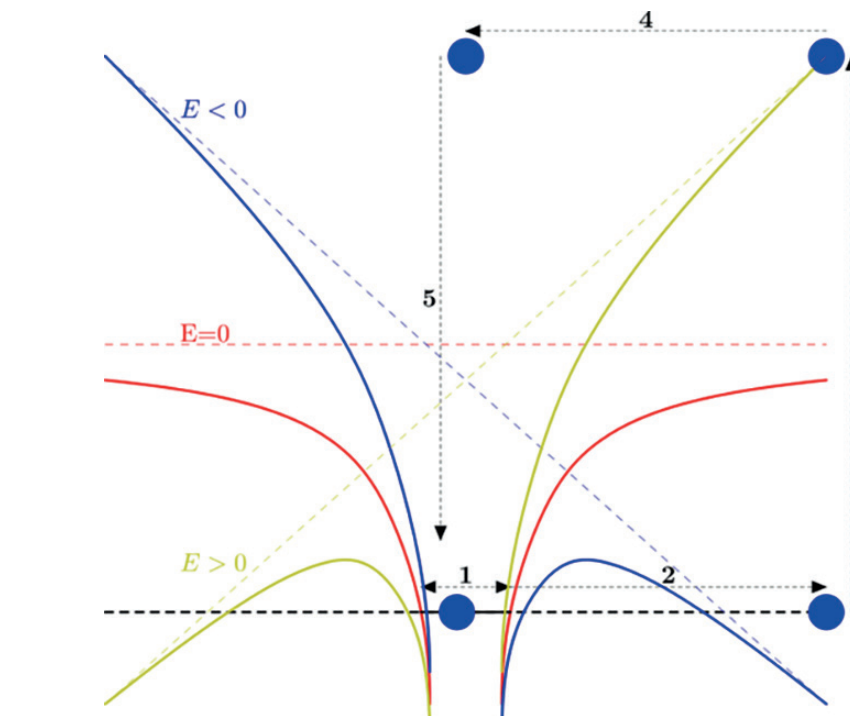


FIGURA 5. INTERACCIÓN de un electrón en un átomo con el campo de un haz luminoso muy intenso (descripción en el texto).

BIBLIOGRAFÍA

1. W. Luis Mochán, Los Zumbidos y las Ciencias Exactas, Diario La Unión de Morelos, 18 de agosto de 2008, pgs. 30-31 y 25 de agosto de 2008, pgs. 34 y 35. <https://bit.ly/3tnkt9t>
2. Tom Fy, Just add milk, <https://bit.ly/48ECvEe>, CC BY-NC-SA 2.0.
3. W. Luis Mochán, Usted es Desafiado, diario La Unión de Morelos, 5 de septiembre de 2011, pag. 31, 12 de septiembre de 2011, pag. 33 y 13

4. de septiembre de 2011, pags. 22 y 23, <https://bit.ly/3F7pjE> y <https://bit.ly/3RJaQWn>
4. W. Luis Mochán, Las guitarras, los espejos, las fluctuaciones cuánticas y las matemáticas del infinito: El efecto Casimir, Diario La Unión de Morelos, noviembre 26, 2007, p. 26, <https://bit.ly/3rEkyVA>
5. US Metric Association, SI prefixes and their etymologies, <https://bit.ly/3rGfwlc>
6. The Conversation, What is an attosecond? A physical chemist explains the tiny time scale behind Nobel Prize-winning research <https://bit.ly/3ZRg3n1>

7. The Conversation, Making 'movies' at the attosecond scale helps researchers better understand electrons – and could one day lead to super-fast electronics (October 4, 2023), <https://bit.ly/3ZJoOjb>
8. Advances in Pulses of Light, <https://bit.ly/3RQ65R8>
9. Advanced information. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2023. Fri. 6 Oct 2023. <https://bit.ly/3RNbX8T>

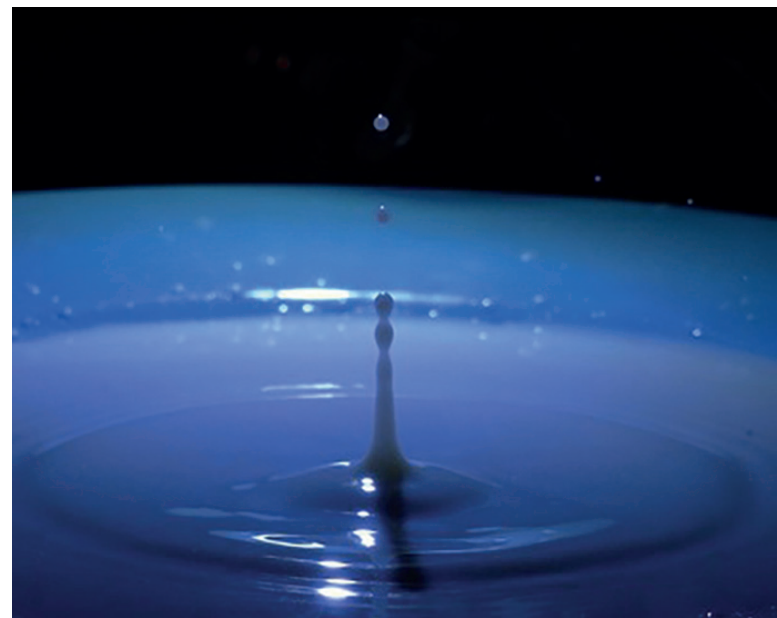


FIGURA 1. FILAMENTO de leche poco después de que una gota impactó a un plato con leche. El delgado filamento es inestable y se rompe dando origen a una hilera de gotas individuales. Foto tomada de la [ref. 2].



ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

PARA ACTIVIDADES RECIENTES DE LA ACADEMIA Y ARTÍCULOS ANTERIORES PUEDE CONSULTAR: WWW.ACMOR.ORG.MX
¿COMENTARIOS Y SUGERENCIAS?, ¿PREGUNTAS SOBRE TEMAS CIENTÍFICOS? CONTÁCTANOS: EDITORIAL@ACMOR.ORG.MX