

# El tiempo

TODO LO QUE CONOCEMOS Y COMO LO CONOCEMOS ES EL RESULTADO DE REACCIONES QUÍMICAS. EXTRAORDINARIAMENTE RÁPIDAS UNAS, MUY LENTAS OTRAS, EN TODAS EL TIEMPO DESEMPEÑA UN PAPEL FUNDAMENTAL.

EN ESTE PRECISO momento puedes leer esto porque, entre otras cosas, está entrando luz a tus ojos. Esa luz que entra al ojo a través de la pupila es concentrada por la córnea y el cristalino (de manera semejante a como lo hacen los lentes) para formar una imagen en la parte posterior de nuestro ojos, donde se encuentra la retina. Allí hay millones de células sensibles a la luz llamadas conos y bastones, las cuales convierten la imagen en impulsos nerviosos que se transmiten a lo largo del nervio óptico hasta el cerebro. Los conos y los bastones nos permiten no sólo ver (como le ocurre a la mayoría de los animales), sino ver en colores.

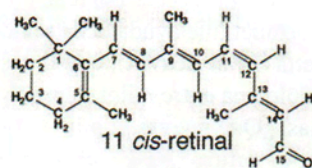
En los bastones se encuentra la molécula de la rodopsina, integrada por la proteína opsina (que como toda proteína contiene una enorme cantidad de átomos) y una molécula no muy grande, el 11 *cis*-retinal. Esta última es la responsable de absorber la luz.

En la oscuridad, el 11 *cis*-retinal es una molécula estable que se acomoda con facilidad sobre la opsina. Sin embargo, en contacto con la luz se isomeriza (cambia la manera en que están acomodados sus átomos), formando el *trans*-retinal. Este isómero no se acopla a la superficie de la

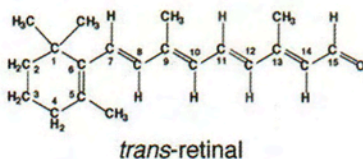
opsina y se desprende de ella (véase figura). La opsina cambia entonces de forma y genera con ello un impulso nervioso que es transmitido al cerebro. Este proceso, que no es otra cosa que una reacción química, dura aproximadamente 200 femtosegundos ( $200 \times 10^{-15}$ s) así que, por ejemplo, cuando vemos esta secuencia de letras de colores: **A B C D E F G H I J K L M N** la reacción se ha repetido unas ¡cinco mil billones de veces! Ese es el tiempo de muchas de las reacciones químicas, el tiempo de la transformación de la materia, el tiempo de la química.

## Todo lo que conocemos

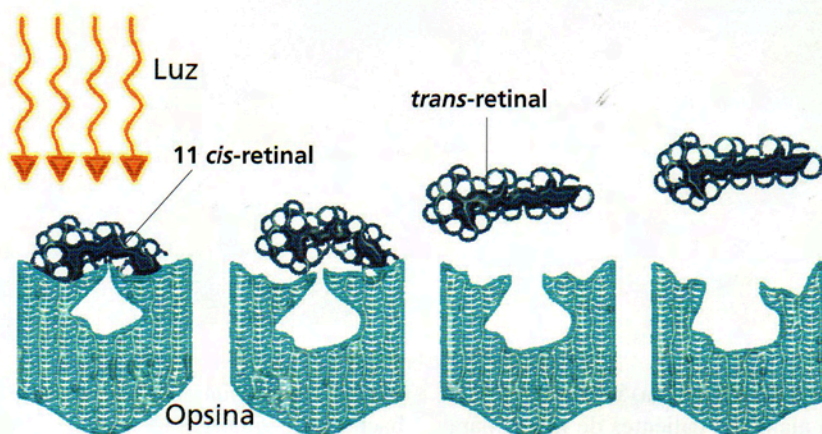
Pero, ¿qué es una reacción química? He aquí una respuesta, escrita en 1995, de uno de los más importantes divulgadores de la química, el inglés P.W. Atkins: "En su forma más rudimentaria, una reacción química es una nueva ordenación de átomos. Los átomos en un determinado orden constituyen una especie determinada de moléculas, y los átomos en otro orden, con adiciones quizás o supresiones, constituyen otra. En unas reacciones una molécula sólo cambia su configuración; en otras, una molécula se apropia los átomos que otra le suministra, los incorpora y logra una estructura más compleja. En otras



Luz visible







Representación esquemática de los cambios de geometría molecular en el proceso de la visión.

más, una molécula compleja es engullida, bien en su totalidad, bien en parte, y se convierte en fuente de átomos para otra molécula”.

Así, siguiendo a Atkins en la reacción química hay una modificación ya sea de los átomos que configuran una molécula, o de la geometría que ésta tiene, lo cual puede suceder a velocidades extraordinariamente lentas o rápidas. Hay reacciones químicas que requieren de años para llevarse a cabo, por ejemplo el hidrógeno y el oxígeno gaseosos pueden estar en contacto durante este tiempo sin apenas reaccionar para producir agua. Por otro lado las hay tan extraordinariamente rápidas que no podemos siquiera imaginarlas (véase tabla). Lo que sí se puede decir, sin lugar a dudas, es que todo lo que conocemos y como lo conocemos es resultado de reacciones químicas.

En la historia de la química el estudio del tiempo no ha sido una de las preocupaciones más importantes, a pesar de ser fundamental en el entendimiento de las reacciones químicas. Cuando los químicos identificaron a los átomos como los constituyentes últimos de la materia que formaba parte de las reacciones químicas, a principios del siglo XIX, la mesa estaba puesta para iniciar el estudio sistemático

del cambio de la materia. Sin embargo, rápidamente los químicos decimonónicos no sólo estudiaron esto, sino el más interesante campo de la creación de nuevas formas de materia. Las ideas dominantes

eran la electroquímica, donde la aplicación de corriente eléctrica a través de diferentes compuestos permitió el descubrimiento de nuevos elementos, y la síntesis orgánica, en la cual se creaban nuevas sustancias mediante la combinación de diversos compuestos de carbono.

### Los constructores de la química

Entre los muchos que trabajaron en el crecimiento de la química en esos años sólo unos cuantos hicieron alguna aportación en este terreno. Así, en 1836, el sueco Jöns Jacob Berzelius, considerado el constructor de la química, introdujo el término catálisis para aquellas sustancias que en cantidades muy pequeñas daban lugar a cambios químicos sin que ellas mismas cambiasen. Muchos años después, a finales del mismo siglo, el letón (nacido en

### Tiempo asociado a sucesos... rápidos

Intervalo de tiempo en segundos	Suceso asociado
$10^0$	Tiempo entre los latidos consecutivos del corazón.
$10^{-1}$	Tiempo que una bala tarda en atravesar la longitud de un campo de fútbol (100m).
$10^{-2}$	Tiempo que tarda un ventilador eléctrico en dar una vuelta.
$10^{-3}$	Tiempo que tarda una mosca en batir sus alas una vez.
$10^{-4}$	Tiempo de una vibración del sonido más agudo perceptible.
$10^{-5}$	Tiempo de explosión de un cohete (por lo tanto de una reacción química explosiva).
$10^{-7}$	Tiempo que tarda el haz electrónico en ir de su generador a la pantalla de televisión.
$10^{-9}$	Tiempo durante el cual un átomo excitado emite luz visible.
$10^{-10}$	Tiempo en el que un protón se transfiere a una molécula o átomo que contenga un par de electrones solitarios, es decir una reacción ácido-base.
$10^{-11}$	Tiempo que tarda la luz en atravesar el vidrio de una ventana.
$10^{-13}$	Tiempo que tarda la molécula de retina en cambiar de su configuración <i>cis</i> a la <i>trans</i> ... es decir el tiempo necesario para ver.
$10^{-15}$	Tiempo que tarda un electrón en dar una vuelta en torno al protón en el átomo de hidrógeno de acuerdo al modelo atómico de Bohr.



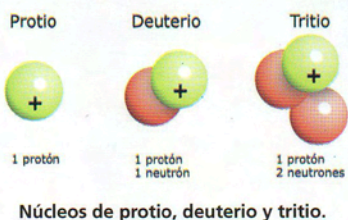
## Los isótopos

Los átomos están constituidos por partículas más pequeñas con características propias. Los protones, con carga positiva, se localizan en el centro del átomo, lo que llamamos núcleo. El neutrón, que no posee carga eléctrica, también se localiza en el núcleo. Los electrones, con carga negativa y una masa cerca de 2 000 veces menor que la de protones o neutrones, se mueven alrededor del núcleo. Cómo se mueven o qué dirección toman es algo que desconocemos.

El número de protones define a los elementos. Todos los átomos con un protón en su núcleo son de hidrógeno; sin embargo, algunos de éstos tienen además uno o dos neutrones. Así, aunque son de hidrógeno tienen núcleos con masa diferente, a los que se conoce como isótopos. Hay tres isótopos del hidrógeno: protio, deuterio y tritio.

En la Tierra, el isótopo predominante es el protio. El tritio es inestable y su núcleo se rompe en el fenómeno que conocemos como radiactividad. Una muestra de material radiactivo, no importa de qué tamaño sea, o lo que es lo mismo, más allá del número de átomos que contenga, siempre presenta una velocidad constante de decaimiento (es decir, aquella o aquellas reacciones a través de las cuales un núcleo atómico inestable se rompe para formar uno estable). Al tiempo en el cual la mitad de los átomos radiactivos iniciales se han transformado, se le conoce como "tiempo de vida media". El tiempo de vida media del tritio es de 12,4 años, lo que indica que si hoy se tiene un kilogramo de tritio, aislado de cualquier otra sustancia, en el año 2014 sólo habrá medio kilogramo, en el 2026 un cuarto de kilogramo, en el 2037 un octavo de kilogramo y así sucesivamente.

El húngaro George de Hevesy utilizó agua deuterada (HDO, donde D representa al deuterio) para estudiar el intercambio de agua en los seres vivos. Posteriormente, con la preparación artificial del isótopo radiactivo de fósforo 32 a través del bombardeo con neutrones de azufre, pudo estudiar el metabolismo del fósforo en plantas animales y tejidos humanos. Con otro isótopo radiactivo, el carbono 14 (el que se utiliza actualmente en la investigación de restos arqueológicos y cuyo tiempo de vida media es de 5 730 años) estudió la incorporación de la adenina en la macromolécula de ADN y con el hierro 59 investigó los mecanismos de absorción y excreción del hierro en los glóbulos rojos de la sangre. Por su trabajo en el uso de isótopos para el estudio de las reacciones químicas Hevesy recibió el Premio Nobel de Química en 1943.

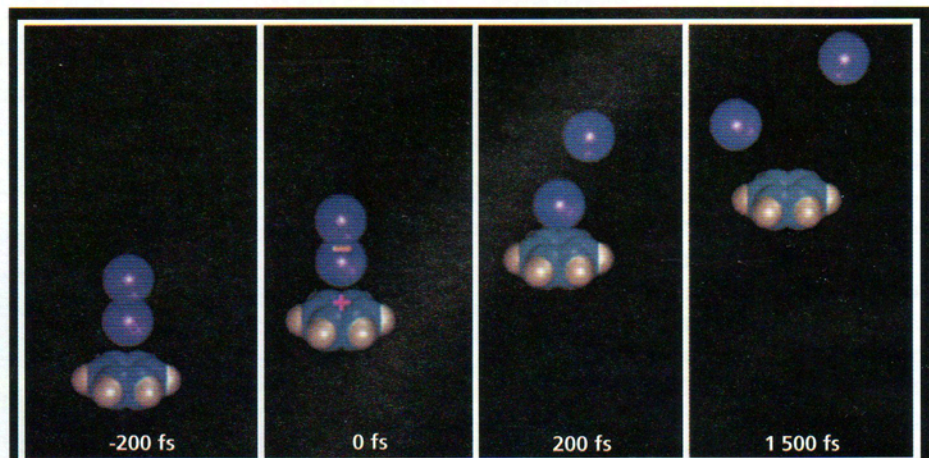


Fotografía estroboscópica.

Riga, capital de Letonia) Wilhem Ostwald utilizó alambres calientes de hierro para catalizar la reacción de oxidación del amoníaco a ácido nítrico. La importancia comercial de este descubrimiento —el ácido nítrico se usa ampliamente en la fabricación de fertilizantes, explosivos, colorantes y plásticos—, así como su posterior trabajo en el tema de la catálisis lo llevaron a recibir el Premio Nobel de Química en 1909.

En las siguientes décadas otros investigadores también obtuvieron el Nobel por sus trabajos en el campo de las reacciones químicas, entre ellos el alemán Manfred Eigen y los ingleses Ronald Norrish y George Porter, en 1967, por su estudio de reacciones muy rápidas; en

1986 los estadounidenses Dudley Hersbach, John Polanyi y Yuan Lee por sus contribuciones a la dinámica de procesos químicos elementales, y en 1992 el canadiense Rudolph Marcus por su contribución a la teoría de la transferencia de electrones en las reacciones químicas. Llegamos así a 1999, año en que el Nobel de Química fue otorgado al egipcio Ahmed Zewail por su estudio de las reacciones químicas empleando una técnica denominada *femtoespectroscopía*. Antes de la aparición de esta técnica no era posible observar los movimientos de los átomos de una reacción química en tiempo real. La velocidad de los movimientos atómicos es de aproximadamente 1 km/s (o lo que es lo mismo 100 000 cm/s), por lo que



Reacción de intercambio de un electrón entre la molécula de benceno (el anillo de  $C_6H_6$ ) y el  $I_2$ , en el que este último se rompe. (Imagen de computadora obtenida a partir de femtoespectroscopía).

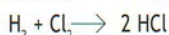


## Explosiones

Las explosiones son reacciones químicas particularmente rápidas. Su estudio detallado fue realizado por el inglés Sir Cyril Norman Hinshelwood y el soviético Nicolay Semenov, quienes ganaron el Premio Nobel de Química en 1956. La velocidad no es su única característica ya que prácticamente en toda explosión se libera calor, así como gases que al calentarse incrementan dramáticamente su volumen y esto hace que el recipiente que los contiene, dependiendo del material con el que esté fabricado, ¡estalle!

Semenov explicó los mecanismos de varias reacciones químicas explosivas a través de la formación de radicales libres, es decir, átomos o moléculas que provenientes de la ruptura de un enlace químico tienen un número non de electrones. Estos radicales libres fácilmente daban lugar a reacciones en cadena, como la que se muestra a continuación, para la formación del cloruro de hidrógeno cuando la molécula de cloro absorbe luz de una longitud de onda de 493 nanómetros.

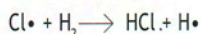
La reacción es



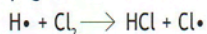
en la que las moléculas de  $\text{H}_2$  y  $\text{Cl}_2$  son los reactivos y el HCl el producto.



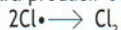
Inicio de la reacción en cadena con la formación del radical libre  $\text{Cl}\cdot$



Propagación de la reacción en cadena



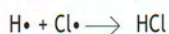
En este momento se forman una gran cantidad de radicales libres que reaccionan con los reactivos para producir otros radicales libres



Terminación de la reacción en cadena



Los radicales libres reaccionan entre sí. La reacción se detiene.



para observarlos cuando se mueven las distancias atómicas (0.000 000 01 cm) el tiempo promedio requerido es de aproximadamente 100 femtosegundos.

La femtoespectroscopía utiliza el mismo principio que la fotografía estroboscópica. Una fuente de luz se prende y se apaga a tal velocidad que un objeto en movimiento puede ser fotografiado varias veces a lo largo de su trayectoria.

En la femtoespectroscopía se utilizan pulsos de rayos láser separados por sólo cuatro femtosegundos y con ellos es posible identificar las estructuras moleculares cambiantes involucradas en una reacción química, las que modificadas a través de una computadora se muestran en la página anterior.

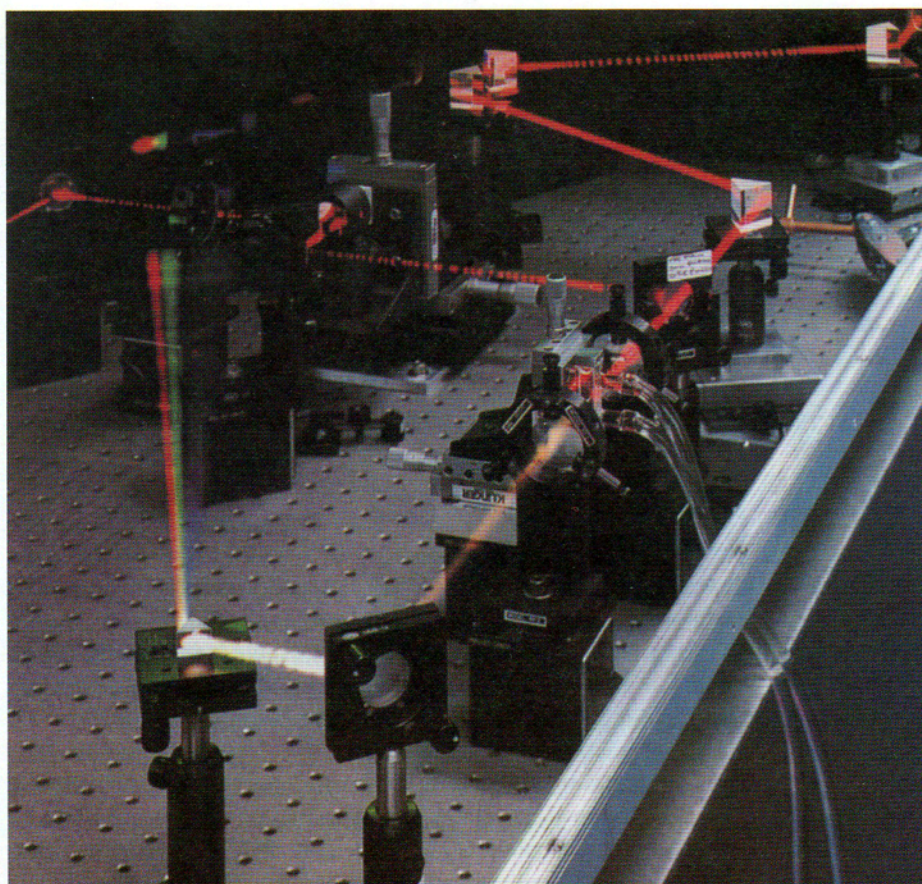
### La necesidad del tiempo

Zewail inició estos experimentos con pulsos de rayos láser en 1987, en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena, y con ello pudo responder, simbólicamente, a lo que había dicho el químico A. Williamson más de un siglo antes (1851):

“Todos estamos de acuerdo en que la química se refiere a los procesos de transformación de la materia y que el estudio de la materia en sí, en la medida en que ésta no cambie, pertenece a la física... cuando estudiamos una molécula por sí misma la estudiamos físicamente. La química considera el cambio que le sucede cuando reacciona y se convierte en otra molécula, y debe describir el proceso por el cual ese cambio se lleva a cabo... hay muchas evidencias de que el tiempo es necesario para la acción química pero de hecho, hasta ahora, no se ha incorporado en la explicación de los fenómenos”.

Así estamos llegando hasta el límite conocido del tiempo, del tiempo de la química, caracterizado, como nos lo recuerda la escritora francesa Marguerite Yourcenar, por “esa descomposición sin agonía, esa pérdida sin muerte, esa supervivencia sin resurrección que es la de la materia entregada a sus propias leyes” ¿Cómo ves?... ¡tan rápido! 🗨️

José Antonio Chamizo es doctor en química y se ha dedicado a la investigación, la docencia y la divulgación. Autor de varios libros de texto y de divulgación, así como de numerosos artículos, actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en la Facultad de Química de la UNAM y es consejero editorial de ¿Cómo ves?



Aparato de Zewail.