

JULIO CASADO LINAREJOS

Química y ciencias de la vida

28 DE FEBRERO DE 2008

JULIO CASADO LINAREJOS

CATEDRÁTICO DE QUÍMICA FÍSICA EN LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.

PREMIO EXTRAORDINARIO DE DOCTORADO EN LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

EX-VICERRECTOR DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.

MEDALLA DE INVESTIGACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE QUÍMICA EN 1992.

PREMIO DE INVESTIGACIÓN «ALDRICH QUÍMICA».

EX-MIEMBRO DE LA JUNTA DE GOBIERNO DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE QUÍMICA. DIRECTOR DE LA AGENCIA NACIONAL DE EVALUACIÓN Y PROSPECTIVA, ANEP (1996-2000) Y MIEMBRO DE LA COMISIÓN NACIONAL EVALUADORA DE LA ACTIVIDAD INVESTIGADORA, CNEAI.

ES REFEREE DE VARIAS REVISTAS DE INVESTIGACIÓN DE RECONOCIDO PRESTIGIO INTERNACIONAL.



«Es la vida un proceso químico en cadena, cada una de cuyas reacciones dispara inevitablemente la sucesiva hasta recorrer la serie predeterminada y fatal. Desde el primer momento, como un móvil en su trayectoria, va la vida lanzada a su consumación: tanto vale decir que se vive como que se desvive. El fenómeno del morir se va produciendo desde la concepción. No cabe variar el proceso inexorable: sólo es posible artificialmente frenarlo, hacer que cada reacción tarde más en producirse. Una vida de ritmo lento será más larga que una vida en *prestissimo*; pero, en definitiva, no hay más vida –químicamente hablando– en una que en otra. El repertorio de reacciones es idéntico, como hay las mismas fotografías en una película cuando se proyecta de prisa y despacio. Las emociones y el pensamiento son los más formidables aceleradores del quimismo vital, lo llevan a latigazos en frenética carrera y son, como Gracián diría, ‘postillones de la vida que sobre el común correr del tiempo añaden su apresuramiento genial’».

José Ortega y Gasset: «*El espectador*»

Sobre el origen de la *palabra Química* se ha escrito mucho. Según parece, procede del árabe *al-kimiya*, proveniente del griego *khemia*: magia negra, del egipcio *khem*, negro.

Desde los tiempos de nuestros remotos predecesores, los alquimistas, la Química ha evolucionado, ciertamente, renovándose sus contenidos. Pero yo quiero reflexionar hoy ante Vds., no tanto sobre cómo han evolucionado esos *contenidos* de la Química como sobre *el espíritu* de esta ciencia.

CAMBIOS, TENDENCIAS,...

...modas; en todos los ámbitos, incluso los científicos. A ello se refiere con agudeza John W. Gardner, antiguo Secretario de Estado para la Sanidad, Educación y Bienestar de Estados Unidos, en su libro *«Excellence»*:

«On the other hand, if one looks at a group of mature scientists –in their fifties, let us say– one finds that those who are respected have arrived to their high station by a remarkable variety of routes. A small proportion of the very bright ones have the special dimension of creativity that brings historic advances in their field. Others are honored for their extraordinary gifts as teachers: their students are their great contribution to the world. Others are respected –though perhaps not loved– for their devastating critical faculties. And so the list goes. Some are specialists by nature, some generalists; some creative, some plodding; some gifted in action, some in expression».

«At any given time in a particular society, the idea of what constitutes excellence tends to be limited –but the conception changes as we move from one society to another or one century to another. Baltasar Gracián said: ‘It is not everyone that finds the age he deserves... Some men have been worthy of a better century, for every species of good does not triumph. Things have their period; even excellences are subject to fashion».

El carácter de la Química como *Ciencia Frontera* no ha dejado de crecer desde que el llamado padre de la Química, Lavoisier afirmó: *«Peut-être un jour la précision des données sera-t-elle amenée au point que le géomètre pourra calculer, dans son cabinet, les phénomènes d’une combinaison chimique pour ainsi dire de la même manière qu’il calcule le mouvement des corps célestes».*

En los últimos años del siglo XX los químicos nos hemos encontrado con lo que Yosikawa, con lenguaje poético, definió como tiempos de «apertura del abanico». ¿Qué quiere decir esto? Sencillamente, que su papel transversal entre la Física y la Biología le está abriendo a la Química un horizonte ilimitado.

A fines del siglo pasado XIX Comte estableció la *«Escala de las Ciencias»*. En la cima coloca a la Psicología, ciencia nueva en esa época, que se apoya (él estaba convencido) sobre la Biología. Pero la Biología se sustenta en la Química, que a su vez se basa en la Física, y la Física se funda sobre la Matemática.

La escala de Comte, al resumir dos mil años de investigación científica, confirma –escribe Reeves– la intuición de Pitágoras: eterna y todopoderosa, la Matemática es la verdadera realidad.

Tras la arrolladora irrupción en el campo de la Física de los modelos de complejidad desorganizada (Mecánica Estadística) y de la Mecánica Cuántica, hasta poco

antes de la segunda Gran Guerra, la Química miraba más hacia abajo que hacia arriba, en la escala de Comte.

Sin embargo, pronto y sin que esos modelos perdieran un ápice de su valor, la Ciencia Natural se vio enriquecida con la entrada en el terreno de juego de modelos de complejidad organizada, desplazando el centro de gravedad desde la pura Física hacia las Ciencias de la Vida (aunque actualmente puede suscitar de nuevo, como en el tiempo en que Boltzmann se suicidó, significativa polémica porque ¿el orden nace del caos, como afirma Prigogine, o, por el contrario, la ciencia del caos no existe, como asegura René Thom, ganador a los 35 años de la Medalla Fields, el Nobel de la Matemática?).

La Química, sin dejar de apoyarse en el escalón de abajo, empezó a mirar al peldaño de arriba.

Las organizaciones vivas son fluidas y cambiantes. Todo intento de inmovilizarlas para su estudio en el laboratorio o en nuestra misma representación, las hace caer en forma de muerte, oscilando ‘entre el fantasma y el cadáver’ (*between the ghost and the corpse*). Así contemplaba el biólogo Mazia la organización de una célula viva, tratando de aislar una estructura celular participante en mecanismos de reproducción. No había forma de fijarla. Y, si conseguía hacerlo, moría: «Igual que la llama, a medio camino entre la rigidez de lo inerte y la descomposición en humo».

No es difícil columbrar el espíritu de Heisenberg entre las volutas de ese humo.

Desde 1982, la *Rutgers University*, bajo los auspicios de la *American Chemical Society*, viene celebrando su *One-day Symposium ‘Chemistry as a Life Science’*. Su título refleja claramente las tendencias de la Química desde finales del siglo XX. Estos simposios vienen reflejando, sin solución de continuidad, la progresiva integración de la Química en el ámbito de las Ciencias de la Vida. Lugar de confluencia de saberes teóricos, metodológicos y técnicos para ‘la mejor comprensión de lo que el hombre tiene delante’. Que no otra cosa es la inteligencia, enseña Zubiri.

Este desplazamiento de la Química hacia el terreno de la complejidad organizada, hacia las Ciencias de la Vida, es consecuencia del carácter molecular que, cada vez más, poseen estas últimas.

En principio fue el empirismo.

Aún me parece escuchar a un profesor universitario, excelente experimentador: «*La Química es registrar hechos*».

Los orígenes de la Química hay que buscarlos, ciertamente, en la observación. El hombre conoció bien pronto el fuego (una reacción química) y experimentó sus efectos.

Ortega nos dice que, cuando el hombre primitivo aseguró que ‘El fuego quema’, estaba ya haciendo ciencia (sobre todo si había decidido quemarse varias veces, comenta con ironía el catedrático de metafísica).

Seguramente, la mayoría de las primeras reacciones químicas conocidas lo fueron de manera accidental. Es probable que así ocurriera con el jabón y los primeros

vidrios fabricados por el hombre hace miles de años; el jabón aparecería al mezclarse sebo animal con cenizas de madera, y el vidrio de la unión de arena, algas y sal en las cenizas de las hogueras encendidas en las playas. Pero sin saber, ni remotamente, cómo tenían lugar los cambios de un cuerpo a otro.

Cuando los griegos se interesaron por la naturaleza del mundo, en la encrucijada se desviaron de camino, como tantas veces ha sucedido en el ámbito de la Ciencia. Demócrito concibió la materia constituida por átomos indivisibles. Pero esta intuición fue arrinconada por otros pensadores, principalmente Aristóteles, quienes imaginaban la materia constituida por cuatro elementos: fuego, tierra, aire y agua.

Más tarde, en la Edad Media, los alquimistas siguieron la línea aristotélica y se esforzaron en convertir unos metales en otros (oro a partir del plomo). Fracasaron; pero su trabajo no fue baldío, pues les permitió conocer técnicas como la filtración, cristalización, destilación, y dar los primeros pasos en el estudio de auténticas reacciones químicas.

Se seguían registrando hechos.

Así hasta otro hito en el camino, donde encontramos a Lavoisier. Con él la naturaleza del fuego primitivo llegó a conocerse: la combustión no es otra cosa que la reacción con el oxígeno del aire.

Se seguían registrando hechos, pero se iban conociendo sus causas.

Y, sobre todo, esa *nueva vía* de pensamiento, coincidió con el principio de la revolución industrial.

Los batanes que salpicaron las campiñas inglesas supusieron un poderoso estímulo de la creatividad química para permitir, primero, y mejorar después el proceso de fabricación de tejidos (que, hay que decirlo, fue uno de los motores del Imperio Británico para forzar sus exportaciones y disponer de materia prima y mano de obra barata en las colonias).

La fabricación de jabones alcanzó gran expansión. Y, sobre todo, requirió crear una auténtica industria química.

Consecuencia de ese desarrollo industrial fue la creciente demanda de productos químicos, imposible de satisfacer con los métodos de trabajo tradicionales. La industria textil precisaba de grandes cantidades de ácido sulfúrico, y así surgió el método de las cámaras de plomo.

El blanqueado de tejidos trajo consigo la aparición de los polvos de gas.

En plena Revolución Francesa, Leblanc preparó carbonato sódico (esencial en las industrias jabonera y vidriera) que hasta entonces se obtenía por combustión de una planta, la barrilla. El método de Leblanc suponía un primer paso de conversión de la sal común en sulfato que, a su vez, se convertía en sosa con carbón vegetal y yeso.

Tales eran los límites de la Química a finales del siglo XVIII.

El gran despegue tuvo lugar en el siglo XIX. «La Química necesita una reforma» dijo Wilhelm Ostwald en 1877, a los 23 años, en su trabajo de Grado en la

Universidad de Dorpat, remoto enclave de formación germánica en las provincias bálticas de Rusia. Diez años después obtuvo la cátedra de Química física en Leipzig y en 1909 recibió el Nobel de Química. «El hombre más brillante que he conocido» dijo de él Ramsay.

Las Tablas de la Ley de la Química, el Sistema Periódico, fue traído por Mendeléiev (el centenario de cuya muerte hemos conmemorado en 2007) y permitió ya prever la existencia de elementos que fueron descubiertos más tarde.

Otro hito en la historia de la Química fue la síntesis de la urea por Whöler, no tanto por la preparación en sí de una nueva molécula, como por lo que supuso para desterrar la idea de una fuerza misteriosa, vital, que se venía considerando imprescindible para producir materia orgánica (recordemos su carta a Berzelius: «Debo decirle que puedo preparar urea sin emplear riñones ni siquiera animales enteros, sean hombres o animales»).

Los químicos se percataron de que el carbono era el principal constituyente de la materia orgánica y que el átomo C muy frecuentemente se encuentra rodeado de otros cuatro átomos en conformación tetraédrica.

Uno de los descubrimientos más importantes de la química del siglo XIX fue el de la estructura del benceno por Augusto Kekulé.

Tras ese hallazgo ‘teórico’ de Kekulé se desarrolló la industria de los colorantes. Cuando, a veces, se plantean disyuntivas como ¿ciencia básica o aplicada? (olvidando que, como afirmaba Ortega, ‘La técnica es consubstancialmente ciencia’) me vienen a la memoria las palabras pronunciadas por Sieburg en el centenario de la *Bayer*:

«El triunfo de Perkin –el descubridor del primer colorante sintético de anilina– fue para todo el mundo como una señal para no dejar exclusivamente a los sabios abstraídos el país de Jauja de lo invisible. Por todas partes se construyeron fábricas de productos químicos. Muchas de estas empresas no tenían, como los buscadores de oro y tesoros, más que una finalidad: enriquecerse lo antes posible...

Pero, al aumentar la oferta, los precios bajaron a la décima parte en unos meses. También se defendieron, como es lógico, los fabricantes de colorantes naturales, y se desencadenó una lucha feroz y sin cuartel por los colorantes.

El vencedor de esa lucha fue un país que en 1862 no estuvo representado en la Exposición Internacional de Londres ni siquiera con una fábrica de colorantes: Alemania. Sin embargo, trece años después, en 1875, las fábricas alemanas producían colorantes de anilina por valor de 30 millones de marcos, las inglesas por valor de nueve millones y las francesas y suizas siete millones cada una. La delantera alemana se convirtió casi en monopolio. En 1913 el 88,3% del mercado mundial era atendido por las factorías del Rin y del Meno. Los colo-

rantes alemanes adquirieron tal prestigio que la predilección que se tenía por ellos en la misma patria de Perkin, Gran Bretaña, casi provocó una crisis ministerial en plena Primera Gran Guerra: El gobierno inglés había encargado a la *Syndicate Publishing Co* de Nueva York 100.000 banderas inglesas para sus buques de guerra, con la expresa condición de que tenían que estar teñidas ‘con los buenos y sólidos colorantes alemanes’. Y, cuando los americanos enviaron las banderas teñidas ‘con colorantes americanos tan buenos y tan sólidos’ porque a causa del bloqueo de los barcos de guerra ingleses, no recibían colorantes alemanes, se les devolvió inmediatamente el envío. El escándalo fue mayúsculo. ¿A qué se debe que precisamente Alemania se convirtiese en la primera potencia química del mundo? Se debió a unos hombres a quienes, en el fondo, les era indiferente que una materia colorease de verde o de rojo, que fuera explosiva o no. Lo que de veras les interesaba era el porqué y el cómo se transformaba la materia ¿qué ley presidía ese comportamiento? ¿cómo podía comprobarse? Esa actitud hacia la investigación pura, que responde a la antigua tradición científica alemana, no sólo es noble, sino también necesaria. La industria alemana nunca ha considerado a la teoría y a la técnica hostiles entre sí. Ahí está la clave de su éxito».

Recordemos también que a Maiman, el inventor del láser de rubí, le fue rechazado un manuscrito en *Phys. Rev. Lett.* Carece de interés, le dijeron.

No es de extrañar, pues, que, cuando la *American Chemical Society* cumplió cien años de existencia, en 1976, se refiriera a la Química como la ciencia de «*Taking Things Apart & Putting Things Together*».

La Química ha pasado de ser disciplina de *stamp collecting*, del coleccionista de sellos, a una ciencia que, al inquirir porqués, es capaz de trascender de ‘lo seguro’ (lo que se toca y se ve’) a ‘lo inseguro’, es decir, a una teoría.

Para ejercer su papel de encrucijada de saberes, la ciencia química de nuestro tiempo se centra en:

1. El estudio de las moléculas.
2. El estudio de las estructuras.
3. El estudio de los mecanismos.

La Química actual es la ciencia de las moléculas, de las estructuras y de los mecanismos. Pero, atención, el concepto de molécula ya no es visto exclusivamente como sinónimo de substancia.

Weaver dice: «Como entidad compleja, la idea de molécula es radicalmente distinta, por ejemplo, para la Termodinámica que para la Mecánica Cuántica, hasta el extremo de que mientras para algunos autores la molécula puede no ser otra cosa que

una ecuación diferencial en un espacio de Hilbert, otros (los termodinámicos), han escrito rigurosos tratados sin que aparezca la complejidad estructural de eso que unos y otros llaman molécula».

Con claridad meridiana lo ha expuesto Rosen en su «*Hierarchical Structures*»: «la complejidad no es algo objetivo sino que, por el contrario, es concepto perhenchido de subjetividad; surge del número de vías por las que nosotros podemos interaccionar con un sistema...» Un sistema como una piedra es visto habitualmente como algo simple porque nuestra interacción con ella transcurre por pocos cauces. En cambio, un geólogo, quien dispone de muchos y muy sutiles caminos de acercamiento, la ve como algo enormemente complejo.

Paradójicamente, la complejidad de la Química de nuestro tiempo la ha impregnado, así, de subjetivismo.

La complejidad, producto de las formas de ver las moléculas. Hace muchos años, en 1854, Laurent definió la Química como «la Ciencia de las cosas que no existen». En su excelente obra «*Tableaux et langages de la chimie*» Dagognet muestra lo premonitorio de esta definición.

Mucho después, desde otra perspectiva, la Mecánica Cuántica nos ha permitido ver esas cosas virtuales. ¿Qué es, si no, la molécula de benceno, vista como combinación lineal de formas límite, inexistentes, que configuran la realidad ‘substancia benceno’.

Unamuno nos asegura que Cervantes no existió; quien lo hizo, e intensamente, fue Don Quijote, como Don Juan o la Celestina, arquetipos geniales cuyos rasgos nos ayudan a configurar la personalidad de hombres y mujeres de carne y hueso con quienes nos relacionamos («lo esencial es invisible», afirmaba Saint Exuperie).

En una encuesta muy realista, hecha entre químicos de la Gran Bretaña, se les preguntó: ¿Qué es la Química para Vd?, Como mejor respuesta fue seleccionada ésta: «La Química es la Ciencia de las hipótesis. Cuando la estudiamos no solemos ver aquello de que hablamos. Cuando lo que vemos coincide con los resultados de nuestras dudas, decimos que las conclusiones son buenas; de momento».

MOLÉCULAS...

... tantas, que la publicación donde figuran sus datos de identidad, el registro civil de la colectividad molecular, donde se inscriben las más de 500 que cada día nacen, el *Chemical Abstracts*, ha merecido figurar en el libro Guinness de los records.

Harold Kroto, Nobel de Química en 1996, dice en el epílogo del libro «*The age of the molecule*»:

«La Química, sin la moderna visión de átomos y moléculas y de conceptos como curvas de potencial, parece imposible y me admira el genio de los precursores en este campo. Resulta difícil entender las posibilidades de la Química sin técnicas como la espectroscopia, espectrometría de masas, cristalografía de rayos X y resonancia magnética. Mi técnica favorita es la espectroscopia de microondas que estudia las transiciones entre niveles de rotación molecular. El análisis de los espectrogramas de RRM permite conocer los momentos de inercia moleculares y, con ellos, parámetros estructurales como longitudes y ángulos de enlace, momentos dipolares, momentos de cuadrupolo y barreras de rotación interna. La espectroscopia de microondas ha permitido, en radioastronomía, descubrir moléculas como el etanol, dióxido de azufre y largas cadenas carbonadas en las nubes oscuras del polvo interestelar. Así hemos sabido que gran parte de la Química del Universo transcurre en el espacio entre las estrellas y, desde luego, mucho más que en nuestro entorno planetario».

Cuando el químico trabaja en su laboratorio con muestras gaseosas a presión bajísima en un espectrómetro de microondas, observa saltos de energía. Las energías absorbidas o emitidas corresponden a transiciones entre distintos estados de rotación molecular de modo que, midiéndolas, el químico puede conocer los momentos de inercia del rotor molecular y, con ellos, las coordenadas de los átomos que configuran la molécula. Ello significa que, con la única condición de que los rotores posean momento dipolar permanente, puede conocerse la geometría molecular.

Como el espectro de rotación es específico de cada molécula (e incluso de una misma cuando uno de sus átomos se substituye por un isótopo) ello significa que el análisis de las líneas del espectro de emisión de moléculas procedentes del espacio exterior van a permitir conocer cuáles son las moléculas emisoras de esas energías.

Ahora bien, ninguna señal puede viajar a velocidad superior a la de la luz. Por tanto, aquí y ahora no podemos recibir señales de lo que pasó hace menos de un año en un lugar alejado de nosotros más de un año luz, ni de lo que pasó hace menos de dos años en un lugar alejado más de dos años luz, etc. Sólo pueden llegarnos señales de acontecimientos ocurridos a distancias (medidas en tiempo luz) menores que el tiempo transcurrido desde entonces.

Cuando en 1987 se observaron en la Tierra las primeras señales de la supernova 1987A, lo que se estaba *viendo* era una explosión que tuvo lugar en la Gran Nube de Magallanes hacía 170.000 años. Qué esté pasando allí ahora es imposible saberlo. La Gran Nube de Magallanes podría haber desaparecido por completo hace 100.000 años sin que nadie se hubiese enterado. De hecho, nadie podría enterarse de ello en las siguientes mil generaciones de humanos.

El universo observable es siempre un universo pretérito; el actual es inobservable. No podemos saber cómo es el universo hoy; sólo cómo era hace mucho tiempo. El universo entero (excepto nuestro grupo local) podría haber desaparecido hace un millón de años, cuando el *Homo Antecessor* buscaba abrigo en la cueva de la Sima del Elefante. Nosotros no nos habríamos enterado. No hay manera de enterarse. Sólo podemos saber que existían galaxias más allá de nuestro grupo local hace varios millones de años; pero no podemos observar si existen ahora. Esas posibles galaxias actuales están más allá del horizonte del universo observable.

Otra limitación es que no podemos intervenir, tenemos que limitarnos a observar, a recibir pasivamente y a procesar la información transmitida por los objetos cósmicos observados.

Esto es, tristemente, una limitación insuperable. Pero puede sacarse partido de ello.

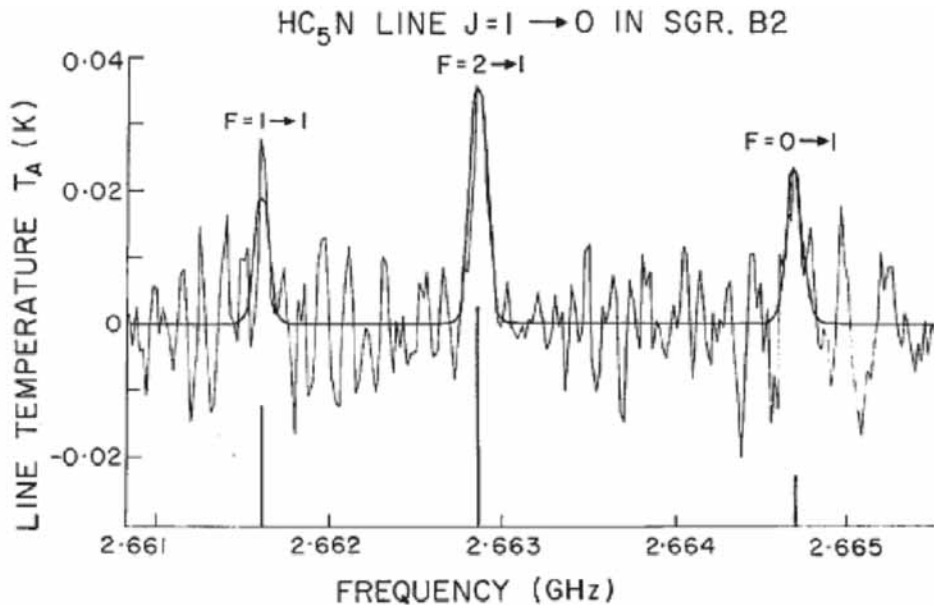
Precisamente porque el universo observable es un universo pasado, la radiación que captamos del espacio exterior y analicemos con nuestros espectrómetros nos va a informar sobre las moléculas que hubo en tiempos remotos del mismo modo (mejor aún) que los fósiles de una especie extinguida le permiten al paleontólogo conocer cómo eran los individuos de la misma.

Las regiones del espacio donde se han detectado esas moléculas del pasado son las nebulosas, no sólo las de nuestra propia galaxia, sino también de otras. De nuestra galaxia se han recibido señales de nebulosas de la Vía Láctea que aparece como una calinosa banda de luz procedente de millones de estrellas.

Puesto que las nuevas estrellas se forman por colapso gravitacional en la región de las nebulosas que contienen el material primigenio, la detección de moléculas en esas regiones es de gran importancia. Se han detectado numerosas moléculas; la gran nube de gas y polvo Sagitario B2, próxima al centro de nuestra galaxia, a una distancia de 26.000 años luz, ha sido pródiga en resultados. La radiación procedente de Sagitario B2 ha permitido saber que allí hay (hubo) un aminoácido tan simple como la glicina.

La primera molécula poliatómica se detectó en 1968, en *Hat Creek* (California) en la región de las ondas milimétricas. Se encontraron señales de la molécula de amoníaco y de vapor de agua. Este hallazgo fue un hito en Astroquímica ya que hasta entonces las teorías dominantes no admitían la presencia interestelar de moléculas poliatómicas. A partir de esa fecha nuevas detecciones se sucedieron sin solución de continuidad, de modo que en la actualidad son cerca de 150 las especies identificadas en nuestra propia galaxia. Es interesante el hecho de que algunas de ellas, como las triatómicas lineales C_2H , HCO^+ , N_2H^+ , y HNC se encontraron en el medio interestelar antes que en la Tierra.

La Figura muestra la transición $1 \leftarrow 0 = J$ en la molécula lineal cianodiacetileno ($H-C \equiv C-C \equiv C-N$) observada en la radiación emitida desde Sagitario B2.



El hallazgo de moléculas como cianodiacetileno (y aún mayores, como los cianopoliacetilenos) en el medio interestelar causó gran sorpresa. Los químicos pensaban que la intensa radiación ultravioleta intergaláctica debería romper la mayoría de las moléculas, sobre todo las más grandes. La detección en 1996 del ion H_3^+ ha apoyado la predicción de que, por reacción con la molécula CO, debería explicar la abundancia de otro ion, esta vez poliatómico, el HCO^+ .

Aunque la radiación de una especie existente en el espacio interestelar sea, en principio, conocida si esa especie ha sido previamente aislada y estudiada, su identificación no es inmediata por comparación directa de los espectros de una y otra. Las frecuencias medidas en el laboratorio deben ser corregidas como consecuencia del efecto Doppler producido por el movimiento de las nubes interestelares. Así, en Sagitario B2, las moléculas se mueven a una velocidad media de 60 km/s, lo que exige una corrección apreciable de las frecuencias observadas en un laboratorio terrestre.

En 2006 McCarthy *et al.* han detectado el anión hexatriino en esas nubes interestelares. Hasta ahora, las especies encontradas se limitaban a moléculas neutras y cationes; ningún anión. Este hallazgo entra en contradicción con la idea generalizada de que la radiación interestelar despoja a los aniones de su electrón extra para formar radicales. Al mismo tiempo, la identificación de la molécula C_6H^- ha resuelto el rompecabezas del enigmático origen de unas líneas de rotación encontradas hace diez años en la radiación de una nube interestelar. El descubrimiento de este anión supone una nueva etapa en el conocimiento de la Química interestelar.

En mayo de 2007, un grupo español (Cernicharo *et al.*) ha identificado un segundo anión, C_4H^- , mediante análisis de su espectro de microondas.

Hasta 2001, en la creciente lista de especies químicas detectadas en el espacio interestelar no figuraba ninguna molécula de estructura cíclica. Ese año el grupo de Cernicharo detectó por vez primera la molécula de benceno. Estos compuestos dejan sus *huellas dactilares* en las denominadas *Bandas infrarrojas no identificadas*. Los descubridores piensan que esta molécula se genera en una fase específica de la evolución estelar, probablemente esencial en algunos mecanismos de formación de especies más complejas.

Moléculas como el benceno se buscan en el entorno de estrellas viejas, ricas en carbono. Cuando estrellas de masa intermedia (hasta tres masas solares, aproximadamente) envejecen y alcanzan la fase de roja gigante, comienzan a emitir enormes cantidades de gas y polvo. Como el carbono se produce en reacciones que transcurren en el núcleo de la estrella, muchos compuestos de este elemento se encuentran en el polvo expelido por la roja gigante.

La intensa radiación existente en el espacio interestelar puede romper moléculas sencillas fijadas en las partículas de polvo y desencadenar reacciones de formación de nuevos compuestos. «Creemos que el benceno podría formarse de esta forma, mediante un mecanismo que podríamos llamar de polimerización del acetileno» explica Cernicharo.

Cuando se estudió la radiación procedente de una típica estrella roja gigante, se detectaron sólo moléculas lineales, pero ninguna de estructura cerrada. Tampoco presentaba bandas infrarrojas no identificadas. Por eso, los astrónomos pasaron a otra estrella aún más vieja: una nebulosa protoplanetaria, estrella moribunda a punto de convertirse en enana blanca rodeada por una hermosa nube de polvo y gases. Se concentraron en la nebulosa protoplanetaria CRL618.

Esta vez la idea resultó acertada. Los autores estiman que podría haber varias moléculas de benceno por centímetro cúbico, un valor que se considera elevado pese a que la concentración de moléculas de cualquier tipo en la zona observada es de diez millones por centímetro cúbico.

«Las nebulosas protoplanetarias ricas en carbono son las mejores factorías de Química orgánica en el espacio» comenta Cernicharo.

El hallazgo de estructuras cíclicas es de gran trascendencia. No se trata sólo del descubrimiento de una nueva molécula, sino que puede dar valiosas pistas sobre el origen de la vida.

ESTRUCTURAS

Uno de los logros más impresionantes de la mente humana ha sido ese ‘conocer lo que no vemos’. Tanto en el ámbito de lo infinitamente pequeño como de lo infinitamente grande.

En el dintorno de la Química las dificultades para conocer esas estructuras han sido grandes, porque las moléculas y sus constituyentes, los átomos y partículas subatómicas, no son proclives a dejarse ver.

En el mito de Psique y Eros hay una enigmática paradoja: Psique, la inteligencia, recibe la amorosa visita nocturna de Eros, la intuición, la sensibilidad, quien le pide a aquélla que lo reciba siempre a oscuras. Y cuando Psique quiere ver a Eros y enciende la luz, es decir, cuando quiere aplicar el análisis racional, la intuición desaparece.

El espíritu de Heisenberg flota tanto en la alcoba de Psique como en el gabinete de trabajo del científico (que eso significa alcoba, *al-qubba*, la bóveda, el gabinete).

Y, sin embargo, el químico ha podido medir distancias y ángulos de enlace de aquello que no ve con los ojos de la cara, con una precisión muy superior a aquella con la que yo podría decir las dimensiones del folio que tengo ante mis ojos si dispusiera de una regla milimetrada; ¿gracias a qué? a su capacidad de teorizar, es decir, de interpretar lo problemático.

MECANISMOS...

... ¿de qué?

De cómo transcurre el acto químico, es decir, de la primigenia pregunta de la Química.

En *Epitome Naturalis Scientiae (De actione, passione et mistione Elementorum, 1633)* Daniel Sennert escribió: «Ahora bien, por cuanto que los elementos, a menos que estén alterados no pueden constituir cuerpos mixtos, ni pueden alterarse a menos que actúen y soporten uno al otro, ni pueden actuar ni soportar a menos que se toquen uno a otro, debemos hablar primero un poco respecto al contacto mutuo. Acción, Pasión, Reacción».

En 1992, el Nobel George Porter escribió: «*Chemistry, like most things, has static and dynamic aspects, dealing respectively with the structure of things and with how those structures change one into another. We may think of them as, respectively, chemistry in space, and chemistry in time. My assignment is with time*»

Trescientos cincuenta años después las palabras de Sennert pueden parecernos pintorescas pero, en esos tres actos: Acción, Pasión, Reacción, están, agazapados, los fundamentos de la Cinética química.

Tras el análisis y la síntesis –afirma Roald Hoffmann– la actividad química más característica es *el estudio de los mecanismos*. ¿Cómo transcurre una reacción en nuestro laboratorio? ¿cómo transcurrió, hace miles de años luz, lo que reflejan las señales espectrales que ahora nos llegan? La búsqueda de respuesta a estas preguntas –continúa Hoffmann– el descubrimiento del mecanismo por el que una reacción química transcurre desde reactivos a productos, es paradigma del método científico.

¿Cómo averigua el químico ese camino entre reactivos y productos de una reacción?

Desde que nuestros antepasados prehistóricos decidieron quemarse varias veces, el hombre no ha cesado de preguntarse por qué. La Química de nuestro tiempo está ahí, entre el *homo habilis* aprendiendo a fabricar vidrio y jabón, y el *homo quarens* (más que *sapiens*) que pregunta a la Física y responde a la Biología.

Mosterín escribe: «Cada animal tiene su mundo. De la inmensa cantidad de información objetiva presente en su medio, cada animal detecta sólo una parte, aquella que está genéticamente programado para detectar, interpretar y experimentar. El zorro percibe la trayectoria que ha seguido el conejo, detectando con su fino olfato las moléculas que el conejo ha dejado a su paso prendidas en los matorrales. El murciélago se orienta sin dificultad alguna en la oscura caverna o en la penumbra del bosque, localizando sus presas o los obstáculos a su vuelo mediante la detección del eco rebotado de sus propios ultrasonidos. Las abejas ven los colores ultravioleta de las flores. Algunas serpientes detectan direccionalmente el infrarrojo. Algunos peces perciben las variaciones del campo magnético. Todas estas percepciones producen en los animales que las tienen experiencias y vivencias que los que no las tenemos no podemos imaginar siquiera, pues caen fuera de nuestro mundo perceptible».

Las principales limitaciones u horizontes de nuestro mundo perceptible se deben a nuestro aparato neurosensorial que sólo detecta cierto tipo de señales. Aunque el sentido del oído es muy importante en nuestra vida social, su alcance cosmológico es nulo, pues las señales acústicas que detecta sólo se producen y transmiten en el interior de la atmósfera. De hecho, toda la información perceptiva que recibimos de fuera de nuestro planeta nos llega por el sentido de la vista. Por esta ventana nuestro mundo perceptible se asoma al universo extraterrestre.

Por eso, para conocer cómo transcurre una reacción química, el químico ha tenido que imitar al zorro, al murciélago, a la serpiente, al pez,... Y, aún más, ha tenido que hacerlo ajustándose a la escala de tiempos en que transcurren las reacciones observadas, a intervalos temporales cada vez más cortos, hasta llegar a la intimidad de los movimientos moleculares.

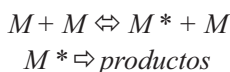
Los primeros intentos de la Química en tal sentido tienen lugar a principios del siglo XX. El primer Premio Nobel de Química le fue concedido, en 1901, a Jacobus van't Hoff «en reconocimiento a su extraordinaria contribución del descubrimiento de las leyes de la dinámica química...» Van't Hoff había propuesto algunas ecuaciones

para la velocidad de una reacción química pocos años antes de que Svante Arrhenius, tercer Nobel de Química (1903), propusiera su célebre ecuación $k = A \cdot \exp(-E/RT)$.

La ecuación de Arrhenius, empírica, fue interpretada posteriormente en el marco de la teoría de colisiones, sobre la base de la teoría cinética de Maxwell y Boltzmann, admitiendo que la velocidad de reacción, k , es igual al número de choques por unidad de tiempo que tienen una energía superior a la de la barrera a remontar.

La verificación experimental de las teorías cinéticas se vio frustrada una y otra vez por la complejidad de las reacciones que, aparentemente, debían ser muy simples. La mayor parte de estas reacciones transcurrían en fase gaseosa; muchas de ellas fueron estudiadas por las escuelas de Nernst (quien identificó la primera reacción en cadena entre Cl_2 y H_2) y Bodenstein. Además, y sobre todo, no podía explicarse cómo podría transcurrir la activación por choque en reacciones de orden uno. Durante unos años se aceptó la teoría de Perrin: la activación se produciría por absorción de energía radiante.

En 1921-22, Frederick Lindemann y el danés Jens Christiansen –en su Tesis doctoral– trabajando por separado, llegaron con diferencia de semanas a una misma conclusión: las reacciones unimoleculares deben transcurrir en dos etapas, una de activación y otra de reacción:



Este modelo y los resultados de Nernst con reacciones en cadena fueron los primeros indicios de que las reacciones químicas transcurren por etapas sucesivas y de la importancia de las especies intermedias entre reactivos y productos.

En 1935, Eyring, por un lado y Evans y Polanyi por otro, trabajando independientemente, desarrollaron la *Teoría del estado de transición* ó *Teoría del complejo activado* que conduce a una ecuación donde la E de la ecuación de Arrhenius adquiría sentido a escala molecular.

Tiene interés –por encima de lo meramente histórico– recordar que el artículo que Henry Eyring envió a publicar a *J. Chem. Phys.* fue rechazado inicialmente por un *referee* que opinó: «*I enclose the paper by Dr. Eyring entitled 'The Activated Complex in Chemical Reactions'. I have given considerable thought to the problems involved, and although I have nevertheless become convinced that the method of treatment is unsound and the result incorrect.*».

Fueron Eyring y Polanyi quienes, con una concepción microscópica de la reacción química, llevaron a los químicos a una *escala de tiempos* asociada a la vibración molecular.

El problema era cómo medir, en tiempo real, procesos tan rápidos.

Los primeros experimentos que permitieron seguir reacciones químicas en tiempos inferiores a 1 segundo fueron un ejemplo de imaginación. Los reactivos se mezclan en un estrecho tubo por el que van fluyendo. Como la velocidad de flujo se conoce fácilmente, la medida de la concentración de productos en distintos puntos del tubo permite calcular la velocidad de reacciones que transcurren en milisegundos. El perfeccionamiento, gracias a la electrónica, de las técnicas de flujo ha permitido disponer de equipos de flujo detenido, extraordinariamente útiles en Química, Bioquímica y Biología.

En la década de los cincuenta los químicos llegaron a estudiar reacciones en tiempos de microsegundos. Pocos años después de la segunda Gran Guerra, con equipos electrónicos desarrollados durante el conflicto, Norrish y Porter desarrollaron el método de fotólisis por destello. Con destellos rapidísimos inducían la aparición de radicales en la muestra y con una segunda lámpara registraban el espectro de la especie radical formada.

El paso siguiente lo dio Manfred Eigen en Alemania con las técnicas de relajación que permitieron acercarse a la escala de los nanosegundos. Mediante bruscos saltos de temperatura (*T-jump*), presión (*P-jump*) ó campo eléctrico (*E-jump*) se altera el equilibrio de la disolución que se investiga. Inmediatamente el sistema se relaja, para recobrar el equilibrio y es esta relajación lo que se observa cinéticamente. En su discurso Nobel (1967) Eigen calificó a estas reacciones como *Immeasurably fast*. Se pensaba entonces que se había alcanzado el límite de velocidades de reacción susceptibles de medida.

El advenimiento del láser abrió a la Química nuevos horizontes. Pronto se pudo generar pulsos de nanosegundo y a principios de los setenta se trabajaba ya con técnicas de picosegundo (del italiano *piccolo*; 10^{-12} s) para estudiar algunas de esas *reacciones inconmesurables*. Ejemplos de resultados pocos años antes unimaginables fueron los estudios de mecanismos de conversión interna (Rentzpis), transferencia electrónica (Eisensthal), conversión intersistema (Hochstrasser) y relajación de vibración (Kaiser) en disolución.

En la década de los ochenta comenzó la *era de los femtosegundos* (del danés *femten* = quince; 10^{-15} s) gracias al desarrollo del láser. Se consiguieron pulsos de 6 fs. Ello ha permitido seguir en tiempo real el cruce de la barrera de potencial.

En 1987 el egipcio Ahmed Zewail (California Institute of Technology) publicó su primer trabajo *-Real-Time Femtosecond Probing of Transition States in Chemical Reactions* al que siguió, en el mismo año, una publicación sobre el nacimiento de OH en la reacción $H+CO_2$.

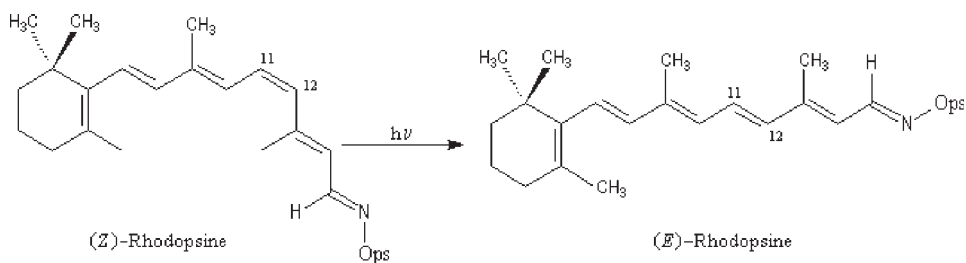
Ejemplo fascinante de los resultados obtenidos por Zewail lo tenemos en la reacción que transcurre cuando se disuelve yodo en benceno. Un electrón salta del benceno al yodo. Se tiene entonces I_2^- sobre un benceno⁺. Mediante espectroscopia de femtosegundo se pudo seguir el movimiento de los núcleos, encontrándose algo total-

mente inesperado: una vez formada la especie I_2^- , se abren dos vías cinéticas: una por la que el electrón arrancado retorna al benceno⁺, atraído por su carga positiva. Como consecuencia se vuelve a formar I_2 , pero ahora con muy alta energía, lo que ocasiona su rotura en dos átomos de yodo. Todo ello en 300 fs. Mediante la otra vía, la especie I_2^- , vibra sobre la molécula de benceno⁺, expulsa un átomo de yodo y da lugar a la formación de I-benceno⁺. Se han podido separar las dos vías, medir las energías cinéticas de los átomos de yodo formados en cada una de ellas y conocer la geometría del estado de transición.

Análogamente, estudios de femtocinética han permitido *ver* en tiempo real mecanismos de transferencia protónica intra- e intermolecular.

El progreso en los últimos años ha sido, es, tan impresionante que, si desde un punto de vista químico conocer qué ocurre al disolver yodo en benceno supone abrir horizontes mecanísticos insospechados, la Biología está pudiendo entrever mecanismos como el de la visión o el de la fotosíntesis.

Al estudiar la dinámica de la molécula de rodopsina se ha observado que en el proceso primario de la visión se produce, en 200 fs, un giro en torno al enlace flanqueado por los carbonos C11 y C12. A pesar de ser la rodopsina una enorme molécula, el rendimiento cuántico de este fenómeno es, aproximadamente, del 80%. Ello sugiere que la naturaleza no hizo esta molécula para almacenar energía, redistribuirla entre todos los enlaces hasta llegar a uno crítico y provocar el giro con la energía sobrante (aprox. un 5%). En el proceso primario de la visión, los directos protagonistas son los dos átomos que flanquean a ese enlace crítico. Se trata de un *mecanismo coherente*. La Química –dice Zewail– ha ido ahora por delante de la Física, al conseguir un estado en el que «*the molecules know of each other's existence, phase, and orientation*».



Otro ejemplo relevante es el mecanismo de la fotosíntesis.

En 1999 le fue concedido el Nobel de Química a Ahmed Zewail «por sus estudios sobre los estados de transición de las reacciones químicas mediante espectroscopia de femtosegundos».

Así ¿hasta dónde? ¿podrá llegarse a la atoquímica (del danés *atten* = 18; 10^{-18} s)?

Por debajo de los femtosegundos, se abre la posibilidad de *ver* el movimiento de los electrones en moléculas como el benceno. Al llegar aquí, dice Zewail, la Física se hace más importante que la Química. Porque, de acuerdo con el Principio de la indeterminación, la incertidumbre en el valor de la energía ya es igual o superior a la energía de un enlace químico.

El químico dispone hoy de técnicas experimentales y modelos teóricos que le permiten adentrarse en los mecanismos de reacciones complejas: fenómenos en la interfaz, modo de actuar los catalizadores y, en consecuencia, modos de preparar catalizadores polifuncionales, o concebir técnicas como la espectroscopia fotoelectrónica o espectroscopia Auger que les permiten a los químicos «ver» las moléculas cuando reaccionan sobre las superficies catalíticas...

No sólo en el ámbito de lo experimental. La Química computacional se ha desarrollado vertiginosamente, hasta el extremo de que, vistos los ordenadores de hace treinta años desde la perspectiva de hoy, han sido calificados de ‘ábacos gigantes’.

Hoy, los químicos calculan de forma rutinaria estructuras electrónicas de grandes moléculas, parámetros termodinámicos y diseñan simulaciones complejas.

La Química sigue mirando hacia el escalón de arriba de la Escala de Comte.

Roald Hoffmann nos dice que el químico vive la «metáfora del descubrimiento». Por ello, este geómetra de la Química (quien, conjuntamente con otro «poeta de la Ciencia», el japonés, Kenichi Fukui, recibió en 1981 el Nobel de Química), afirma que mientras hace cien años o menos los químicos hablaban de sustancias o compuestos, ahora hablan de moléculas y estructuras.

El químico, entre la geometría y la vida, crea, diseña nuevas moléculas en busca de propiedades entrevistas ó soñadas.

Es el propio Hoffmann quien nos dice que la Química está muy próxima a las Bellas Artes. Los químicos, como los artistas, continúa este egregio profesor (a quien pude oír que le encanta explicar la Química General a los estudiantes de primer año de Biología) crean como los músicos, escritores o artistas. «Creo –dice– que la capacidad creativa es excepcionalmente valiosa en Química».

Esa capacidad creativa intuitiva, próxima al pensamiento artístico, pero construida sobre la base del método científico ha permitido que hoy sean más de diez millones los compuestos químicos perfectamente caracterizados. Muchos, muchísimos de ellos no existían en la Tierra hasta que los químicos los han preparado. Y no lo hacen ya por simple *tanteo y error*.

Es también Hoffmann quien nos dice que ello ha sido posible porque su conformación, estructura y propiedades obedecen a ciertas leyes y reglas que, poco a poco, van siendo conocidas por los químicos (Lavoisier de nuevo).

En estas vías de aprehensión de la realidad Roald Hoffmann ve las concomitancias entre pensar científico y pensar artístico. Nos dice literalmente: «Así es como trabajan los escritores, los compositores, pintores y escultores, quizá más próximos

aún al alma». Y añade: «Así trabajan los químicos y algunas especialidades de la ingeniería».

Arte y Ciencia coinciden en el cerebro y pueden coincidir en el resultado: sólo se separan a lo largo del proceso que va del uno al otro.

En el Arte, como en Ciencia, cuando se introduce una metáfora o teoría previa nueva, se da el acto creativo. En ello se distinguen los periodos de «ciencia normal» de las revoluciones científicas, nos dejó dicho Khun. Pensemos en Heisenberg, en Einstein o en Dirac.

Quizá por eso también, en unas declaraciones a los medios de comunicación, Christian de Duve, bioquímico belga, Premio Nobel y experto en el origen de la vida, ha afirmado:

«Hasta ahora hemos hablado sólo de inteligencia, de racionalidad. Pero hay otras formas de captar la realidad. El arte, por ejemplo es una manera de ver el Universo de un modo que el científico no ve, a través de la emoción. Escuchar una sonata de Mozart provoca un tipo de emoción que acerca más al misterio del Universo que hacer ciencia. Lo mismo ocurre con la religión, que permite ver otra faceta del Universo que está fuera del alcance de la ciencia. Los místicos tienen una relación con el Universo distinta de la de los científicos. Yo creo que podemos llamar Dios al misterio del Universo».

Cuando leía estas palabras me acordaba de otras de Octavio Paz, Premio Nobel «del otro lado del conocimiento» quien afirmaba que a la verdad sólo se puede llegar con el lenguaje de la Física o de la Poesía.

Empezaba, y con ello termino, refiriéndome a la encrucijada en que nos encontramos los químicos entre la complejidad desorganizada y la complejidad organizada.

Situación ambigua, pero fascinante que ha hecho pensar a algunos psicólogos que, si hay tantos químicos a lo largo y ancho del mundo, en tareas de responsabilidad ajenas a su propio campo, es porque ‘el modo de pensar químico es polivalente y flexible’.

No sé. Lo que sí está claro es que, de la mano de la Química, apoyada en la Física y apoyando a la Biología, el hombre, en la actual encrucijada, alberga, si no terrores, como los de los antiguos habitantes de esta tierra, si perplejidades.

Entre ellas, una tremenda, según nos describe el físico John Maddox quien durante 21 años ha sido director de *Nature*. Se pregunta ¿es la vida una aberración? Reflexiona así: Incluso si los primeros seres vivos no fueron consecuencia de un acontecimiento improbable, su subsistencia exige una explicación.

Se cita a menudo la frase del economista Keynes: «A largo plazo, todos estaremos muertos», pero bien habría podido añadir: «... e incluso a corto plazo, deberíamos estar muertos». Porque la situación más estable de los componentes de nuestro

organismo (carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, etc.) no es el estado en que aparecen en los seres vivos. Las formas más estables del carbono son el dióxido de carbono y las rocas del grupo de los carbonatos. El hidrógeno y oxígeno son más estables formando la molécula de agua. Metales como el Fe son más estables combinados con el oxígeno, como componentes de las rocas...

¿Cómo evitan los seres vivos la degradación de sus tejidos en gases o rocas?

Sería un error suponer que la fotosíntesis ha sido la base energética de la vida desde el principio. Hay evidencias de lo contrario.

Además, muchos organismos sólo dependen de la fotosíntesis de un modo muy indirecto. Por ejemplo, a los organismos que forman la exuberante flora bacteriana del intestino humano jamás les llega la luz solar. Lo mismo ocurre con las colonias de bacterias y pequeños invertebrados que se han encontrado en los fondos marinos más profundos. Allí no pueden existir verdaderas plantas, no hay luz. Las comunidades más prósperas se encuentran cerca de fisuras de las profundidades marinas por las que emergen grandes cantidades de agua caliente cargada de muy diversas especies inorgánicas: sulfatos, nitratos y fosfatos, disulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, metano,... algunas de ellas tóxicas.

Las bacterias son los transformadores primarios de energía; los invertebrados se alimentan de ellas. La fuente última de energía es el calor de la corteza terrestre, que eleva la temperatura del agua y aporta la variada solución de sustancias de las que viven esas comunidades. Lo que aún no se sabe es cómo se formaron y establecieron estas comunidades, sobre todo teniendo en cuenta que esas grietas y chimeneas de las profundidades suelen durar poco tiempo.

La idea de que las sustancias fundamentales para los primeros replicadores prebióticos se formaran mediante reacciones químicas en la superficie de la Tierra o en sus profundidades, y no sólo en la atmósfera, presenta atractivos cada vez más tenidos en cuenta. Las reacciones químicas entre el agua y las rocas calientes son fuentes potencialmente prolíficas de sustancias energéticas que se pueden producir en grandes cantidades y altas concentraciones. En principio, sería posible una vida estrictamente geoquímica.

Sea como fuere, en la atmósfera, en la superficie de la Tierra o de astros comparables, como Europa, satélite de Júpiter que parece poseer abundante agua y metales, ahí está la Química para ayudar a descifrar el enigma: entre la Física y la Biología.

¿En qué sentido, pues, la vida es una aberración? se pregunta Maddox en su obra *«Lo que queda por descubrir»*.

La ocupación por seres vivos de todos los nichos concebibles de la superficie de la Tierra donde existe una fuente de energía y nutrientes adecuados parece sugerir lo contrario. Sin embargo, técnicamente, todos los seres vivos están en desequilibrio con su entorno; sin un suministro constante de sustancias químicas del medio ambiente y una capacidad de producir energía a partir de ellas, retornarían al «polvo y

cenizas» (*pulvis es et in pulverem reverteris*, nos recuerda el Genesis). Acordémonos también de la *wärmetod* de Clausius.

Todos los seres vivos deben su existencia a su condición de *especies intermedias* en la transformación de energía de alta temperatura (la radiación solar o la energía geotérmica, según los casos) en energía de baja temperatura, la que se irradia desde la superficie de la Tierra. Sólo este flujo de energía ha garantizado la continua existencia de la biosfera, es decir, la totalidad de los seres vivos.

Los efectos de un flujo de energía pueden ser espectaculares. El descubrimiento de que las enormes nubes de gas y polvo del interior de nuestra galaxia contienen cantidades sorprendentemente grandes de moléculas orgánicas sencillas es una señal de que un flujo de radiación (en este caso, procedente de las estrellas) puede transformar materiales como hidrógeno y carbono en moléculas más complejas. Cuando las estrellas agoten su energía, estas especies complejas se degradarán hasta sus componentes originales.

Parece una regla general que allí donde exista un flujo de energía externa que mantenga algún sistema complejo en *estado estacionario*, el sistema adquiere una estructura, o un grado de orden, que no tendría si estuviera aislado: Moléculas, Estructuras, Mecanismos... Química... Vida.

RESEÑAS BIBLIOGRÁFICAS

BACHRACH, S. M., Ed., *The Internet, A Guide for Chemists*, American Chemical Society, Washington, 1996.

BARGELLINI, A., *Chimica Società Ambiente*, Carlo Signorelli Ed., Milán, 1998.

CASADO, J., *Química y creatividad: del helio a la femtoquímica*, Univ. de Salamanca, 2007.

CERCIGNANI, C., *Ludwig Boltzmann The Man Who Trusted Atoms*, Oxford Univ. Press, 1998.

CERNICARO, J.; HERAS, A. M.; TIELENS, A. G. G. M.; PARDO, J. R.; HERPIN, F.; GUÉLIN, M.; WATERS, L. B. F. M., *Astrophys. J.* 2001, 546, L123.

CERNICARO, J.; GUÉLIN, M.; AGÚNDEZ, M.; KAWAGUCHI, K.; MCCARTHY, M.; THADDEUS, P., *Astron. Astrophys.* 2007, 467, L37.

DAGOINET, F., *Tableaux et langages de la chimie*, Éditions du Seuil, París, 1969.

DAVIES, G., *Forensic Science*, ACS Symposium Series 13, American Chemical Society, Washington, 1975.

DEBRÉ, P., *Louis Pasteur, una biografía*, Debate, Madrid, 1995.

EIGEN, M.; WINKLER-OSWATITSCH, R., *Steps Towards Life*, Oxford Univ. Press, 1992.

- EIGEN, M., *Immeasurable fast reactions*, Nobel Lecture, 11 dic. 1967, *Nobel Lectures*, 1963-1979, Chemistry, Elsevier, Amsterdam, 1972.
- GARDNER, J. W. *Excellence*, W. W. Norton, N. Y., 1984.
- GRIBBIN, J., *Biografía del Universo*, Crítica, Barcelona, 2007.
- KAUFFMAN, G. B.; CHOOLJIAN, S. H., Friedrich Wöhler (1800-1882), on the Bicentennial of His Birth, *The Chemical Educator*. 2001, 6, 121.
- KHUNDAR, L. R.; ZEWEIL, A. H. Ultrafast molecular reaction dynamics in real-time: Progress over a decade, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 1990, 41, 15.
- KROTO, H., *Chemistry-architecture of the microcosmos*, en *The age of the molecule*, Royal Society of Chemistry, Londres, 1999.
- MADDOX, J., *Lo que queda por descubrir, una incursión en los problemas aún no resueltos por la ciencia, desde el origen de la vida hasta el futuro de la humanidad*, Debate, Madrid, 1999.
- MCCARTHY, M.; GOTTLIEB, C. A.; GUPTA, H.; THADDEUS, P., *Astrophys. J.* 2006, 652, L141.
- MOSTERÍN, J., *Ciencia viva. Reflexiones sobre la aventura intelectual de nuestro tiempo*, Espasa, 2006, Madrid.
- MOSTERÍN, J., *Límites del conocimiento cosmológico*, en *Filosofía de la Ciencia hoy*, Fundació Vidal i Barraquer, 1992.
- OSTWALD, W., *Volumchemische Studien über Affinität* (Dopart, 1877); *OKEW*, No 250, Leipzig, 1966.
- PORTER, G. *Chemistry in Microtime*, en *The Chemical Bond. Structure and Dynamics*, Ed. A. H. Zewail, Academic Press, Boston, 1992.
- REEVES, H., *Malicorne, Reflexiones de un observador de la naturaleza*, Emecé, Barcelona, 1992.
- ROSEN, R., *Hierarchical organization in automata theoretic models of biological systems*. En «*Hierarchical Structures*», L. L. WHYTE, A. G. WILSON, AND D. WILSON, eds., pp. 179-199. Am. Elsevier, N. Y., 1969.
- SÁNCHEZ RON, J. M., *El poder de la ciencia*, Crítica, Barcelona, 2007.
- SERRATOSA, F., *Khymós*, Alhambra, Madrid, 1969.
- SHAIK, S., CHEMISTRY: A Central Pillar of Human Culture, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2003, 42, 3208.
- SHANK, C. W., Investigation of ultrafast phenomena, *Science*. 1986, 233, 1276.
- STRELOW, H.; KNOCHÉ, W., *Fundamentals of Chemical Relaxation*, Verlag Chemie, Weinheim, Nueva York, 1977.
- WHITESIDES, G. M., Assumptions: Taking Chemistry in New Directions, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2004, 43, 3632.

- WHITESIDES, G. M., What Will Chemistry Do in the Next Twenty Years? *Angew. Chem. Int. Ed.* 1990, 29, 1209.
- WILSON, E., First Molecular Anion Identified in Space. Discovery of C_6H^- Overturns Conventional Wisdom in the Field, *Chem. Eng. News.* 2006, 84, 5.
- WOODBURN, J. H., *Taking Things Apart & Putting Things Together*, American Chemical Society, Washington, 1976.
- ZEWAIL, A. H. *Femtochemistry: Ultrafast Dynamics of the Chemical Bond*, World Scientific, Hackensack, NJ, 1994.
- ZEWAIL, A. H., La formación de las moléculas, *Investigación y Ciencia*, 1991, 173, 42.
- ZEWAIL, A. H., *Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond Using Ultrafast Lasers*, Nobel Lecture, 8 dic. 1999, *Nobel Lectures*, 1996-2000, Chemistry, World Sci. Pub. Singapur, 2003.
- ZEWAIL, A. H., Femtochemistry: The role of alignment and orientation, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.2.* 1989, 85, 1221.
- ZEWAIL, A. H., Laser femtochemistry, *Science*, 1988, 242, 1645.
- ZEWAIL, A. H.; Bernstein, R., *Real-Time Laser Femtochemistry. Viewing the Transition from Reagent to Products*, en *The Chemical Bond. Structure and Dynamics*, Ed. A. H. Zewail, Academic Press, Boston, 1992.
- ZEWAIL, A. H., *Voyage Through Time: Walks of Life to the Nobel Prize*, World Scientific, Hackensack, NJ, 2003.