

JULIO CASADO LINAREJOS

QUÍMICA Y CREATIVIDAD: DEL HELIO A LA FEMTOQUÍMICA



VNIVERSIDAD D SALAMANCA
Secretaría General

**Química y creatividad:
del helio a la femtoquímica**

Lección Inaugural del Curso Académico 2007-2008,
pronunciada por el Profesor Dr. D. Julio Casado Linarejos,
Catedrático de Química Física
de la Universidad de Salamanca,
en el solemne Acto Académico celebrado
el día 21 de septiembre de 2007
presidido por el Sr. Rector Magnífico
D. José Ramón Alonso Peña.

JULIO CASADO LINAREJOS

**Química y creatividad:
del helio a la
femtoquímica**



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

© Universidad de Salamanca
Autor

Depósito Legal: S. 1.401-2007

Impreso en España - Printed in Spain

GRÁFICAS LOPE

C/ Laguna Grande, 79. Polígono «El Montalvo II»
Teléf. 923 19 41 31 - Salamanca (España)

*Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este libro
puede reproducirse ni transmitirse sin permiso escrito
de la Universidad de Salamanca.*

*Sr. Rector Magnífico,
Excmos. e Ilmos. Señores,
Miembros de la comunidad universitaria,
Queridos amigos,
Señoras y Señores:*

En el bachillerato de mi adolescencia manejábamos el texto *Lengua española: nociones de gramática histórica y preceptiva literaria* de Alonso Cortés. Fue entonces cuando me encontré, creo que por primera vez, con la palabra *Paraninfo*, seguramente entre algunos de los ejemplos que el Dr. Rodríguez Salcedo ponía con frecuencia para familiarizarnos con el origen de las palabras.

Aquel excelente profesor practicaba el método educativo al que se refiere Coleridge cuando dice que en la lengua inglesa «donde tantas palabras se derivan de otros idiomas, existen pocos sistemas de instrucción más útiles o divertidos que el de acostumar a la gente más joven a buscar

la etimología, o el sentido primitivo de las palabras que emplean».

Quizá por eso, cuando mis compañeros y el Consejo de Gobierno de nuestra Universidad me hicieron el honor de proponerme para impartir esta lección, junto al sincero agradecimiento hacia ellos, rebrotó en mi memoria la palabra *Paraninfo*, llevándome al Diccionario de la R.A.E. En su primera acepción define:

1. m. En algunas universidades, salón de actos.

La segunda acepción me inquietó:

2. m. En las universidades, persona que anunciaba la entrada del curso, estimulando al estudio con una oración retórica.

¿Tendría yo que estimular al estudio con una oración retórica? No me considero capacitado para «dar al lenguaje escrito o hablado eficacia bastante para deleitar, persuadir o conmover» (D.R.A.E.)

Preocupado, acudí al Corominas: *Paraninfo* es el «lugar donde se pronuncia el discurso solemne de principio del curso

universitario, S XIX, antes el profesor que lo pronuncia, 1734».

Aliviado ya, por no tener que estimular al estudio con una oración retórica, se me planteó la elección del tema.

Esta vez no fue el diccionario, sino el calendario lo que vino en mi ayuda.

Un sello de la serie Ciencia

El día 2 de febrero de 1907 moría en San Petersburgo Dimitri Ivánovich Mendeléiev. Cien años después, el 2 de febrero de 2007, Correos de España ha emitido un sello conmemorativo, *Tabla periódica de elementos de Mendeléiev*.



Diseñado por el joven químico Javier García Martínez, investigador del Programa Ramón y Cajal, el sello es un icono de la Tabla Periódica. Según su autor, los colores planos, llamativos (rojo, azul, verde, amarillo), en bloques separados por líneas gruesas, recuerdan las pinturas del holandés Piet Mondrian. La sencillez del dibujo realza el motivo principal, con cuatro llamativas casillas en blanco. Muestran el genio de Mendeléiev.

Del empirismo a la Ciencia química

Sobre la creatividad de la Química he reflexionado alguna vez. Agradeciéndoles de antemano su paciencia, me gustaría compartir con Vds. alguna de esas reflexiones.

Como hilo conductor de mis palabras voy a tomar no tanto la evolución de los contenidos de la Química como su creatividad en diversas situaciones.

Quien ha sido llamado padre de la Química, Lavoisier, escribió: *«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»*.

A finales del siglo XIX Augusto Comte estableció la *Escala de las Ciencias*. En su nivel más alto está la Psicología, ciencia nueva en su época, que se apoya sobre la Biología; pero ésta se sustenta en la Química que, a su vez, se basa en la Física y ésta en la Matemática.

Hasta poco antes de la segunda Gran Guerra, tras la arrolladora irrupción en el campo de la Física de los modelos de complejidad desorganizada (Mecánica estadística) y de la Mecánica cuántica, la Química miraba hacia abajo en la escala de Comte.

Sin embargo, bien pronto la Ciencia Natural se vio enriquecida con la entrada de modelos de complejidad organizada

que han ido acercando la Química a las Ciencias de la Vida.

La Química, sin dejar de apoyarse en el escalón de abajo, empezó a mirar al peldaño de arriba o, quizá mejor, a sentirse mirada desde ese nivel.

Voy a fijarme en esa evolución a través de tres épocas:

1ª Época: la Química hasta Mendeléiev.

2ª Época: La Tabla Periódica encuentra explicación racional con ayuda de la Física.

3ª Época: Química y Ciencias de la Vida.

Ortega dice que, cuando el hombre primitivo afirmó: «El fuego quema», estaba ya haciendo ciencia (sobre todo si había decidido quemarse varias veces, ironiza el profesor de Metafísica).

Seguramente la mayor parte 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

milenios; 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.

Cuando los griegos se interesaron por la naturaleza del mundo, surgió una polémica intelectual rediviva dos mil años después.

Mientras Demócrito hablaba de átomos indivisibles, otros —principalmente Aristóteles— imaginaban la materia constituida por cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra.

En la Edad Media los alquimistas siguieron la línea aristotélica y se esforzaron en convertir unos metales en otros (oro a partir de plomo). Fracasaron; mas su trabajo no fue baldío, pues 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 Lavoisier. Con él la naturaleza del fuego llegó a conocerse: la combustión no es otra cosa que la reacción con el oxígeno del aire.

La *nueva vía* coincidió con el principio de la Revolución Industrial.

Los batanes que salpicaron las campiñas inglesas supusieron un poderoso estímulo de la inventiva química para desarrollar los procesos de fabricación de tejidos.

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.

En plena Revolución Francesa, Leblanc preparó carbonato sódico (esencial en las industrias jabonera y vidriera) que hasta entonces se venía obteniendo por combustión de una planta, la barrilla.

Este era el horizonte 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.

El lenguaje de los espectros, música atómica de las esferas

En el ámbito de la Ciencia ocurre con frecuencia que la *invención* de una herramienta de observación abre el intelecto a nuevas formas de pensamiento («El puro pensar a priori de la mecánica racional y el

puro mirar las cosas con los ojos de la cara: análisis y experimento» de Ortega).

Tal ocurrió con la invención por un físico, Gustav Kirchhoff, y un químico, Robert Bunsen, de una herramienta que manejamos en el bachillerato, el mechero Bunsen. El espectroscopio que construyeron en 1859 era muy simple: el propio mechero, un hilo de platino impregnado con la muestra, un prisma para descomponer la luz y un elemental sistema óptico de observación.

Quizá no sea casual que al laboratorio de Bunsen en la Universidad de Heidelberg —donde ejerció la docencia hasta los 78 años— habían acudido investigadores que más tarde serían eminentes científicos; entre ellos Mendeléiev.

Así se encontró una correspondencia biunívoca entre elemento químico y su espectro, de forma que este último empezó a verse como la tarjeta de visita de aquel.

Con este instrumento Bunsen y Kirchhoff descubrieron dos nuevos elementos,

denominados Cesio (*Caesius*) y Rubidio (*Rubidus*) en alusión a las líneas azules y rojas de sus respectivos espectros.

Antes de finalizar el siglo XIX el método espectroscópico había enriquecido la Tabla Periódica con diez nuevos elementos. La Química acreció su acervo tan rápidamente que, cuando Bohr entra en escena, Kayser había publicado ya los seis primeros volúmenes de su monumental *Handbuch der Spectroscopie*, con más de 5.000 páginas.

El 18 de agosto de 1868, se produjo un eclipse total de Sol. Visible en la India, muchos científicos viajaron allí. Entre quienes analizaron las fotografías de los espectros obtenidos estaba Joseph Lockyer quien, trabajando en la *War Office* británica, en su tiempo libre se dedicaba a la espectroscopia. El interés de lo que vio lo llevó a Frankland, un distinguido químico orgánico, quien le cedió espacio en sus laboratorios para que pudiera trabajar.

A Lockyer le llamó la atención una tercera línea (D_3) que observó en la región amarilla del espectro solar. Se sabía entonces que la línea D del espectro del sodio, estaba constituida por dos muy juntas (D_1 y D_2); pero la tercera no se observaba con ninguno de los elementos químicos conocidos. Con extraordinaria intuición y no poca osadía, Lockyer sugirió que debería atribuirse a un elemento químico existente en el Sol, pero no en la Tierra. Por eso le dio el nombre de helio.

Frankland, quien seguía muy de cerca el trabajo de Lockyer, rechazó la hipótesis del helio. Ello dio lugar a una manifiesta tensión personal cuando, en 1871, Kelvin —entonces Presidente de la *Royal Society*— anunció que Frankland y Lockyer habían descubierto un nuevo elemento. Frankland no consideró pertinente polemizar públicamente sobre el tema, pero escribió una carta personal a Lockyer —que se conserva— manifestándole de forma explícita su desacuerdo con la hipótesis del nuevo elemento helio. Debido a la *auctoritas* de

Frankland, el propio Lockyer apenas volvió a hacer alusión al tema de modo que, incluso en su libro *Chemistry of the Sun* (1887), ni lo mencionó.

En aquellos años el geólogo norteamericano Hillebrand, al tratar una pechblenda con ácido sulfúrico, observó desprendimiento de un gas insoluble en el agua, inodoro, incoloro e incombustible.

En 1894, William Ramsay (quien había descubierto el argón) dispone del mineral cleveíta, que también desprende ese gas. El 22 de marzo de ese año posee cantidad suficiente de gas puro para estudiar su espectro que compara con el del argón y el del sodio. La tercera raya amarilla surgía patente. Era un nuevo elemento. Lo llamó kriptón, por estar escondido en el mineral.

Ramsay envió una muestra a Crookes y otra a Lockyer. Al día siguiente recibe un telegrama de Crookes: «Su kriptón es el helio; venga y véalo». Reaparecía la raya D₃; era el helio pero, ahora, en la Tierra.

Ramsay publicó el descubrimiento en la revista que dirigía Crookes, la *Chemical News*, en marzo de 1895. Un año antes el astrónomo Kayser lo había identificado en la atmósfera terrestre, mas la descripción de este hecho en una revista química alemana había pasado desapercibida.

En 1904 Ramsay recibió el Nobel de Química «en reconocimiento a su descubrimiento de gases inertes en la atmósfera y de su lugar en la Tabla Periódica».

Lockyer —fundador de la revista *Nature* en 1869— continuó haciendo importantes contribuciones a la espectroscopia, pero debió conformarse con la dedicatoria del gran Maxwell:

And Lockyer, and Lockyer,
Gets cockier and cockier,
For the thinks he's owner
Of the solar corona.

Con el descubrimiento del helio, antes en el Sol que en la Tierra, se estaban abriendo las puertas a campos de investi-

gación fascinantes: Astroquímica y Astrobiología.

Mendeléiev: Las Tablas de la Ley de la Química

El Sistema Periódico de Mendeléiev fue, seguramente, la primera piedra miliaria de ese camino emprendido cuando la Química comenzó a ser Ciencia, trascendiendo de lo seguro (lo que se ve y se toca) a lo inseguro, es decir, a una teoría.

El Nobel de Química y excepcional profesor Roald Hoffmann compara la creatividad de Mendeléiev con la de un poeta. Dice: «Sólo conozco a un gran poeta que no necesitó un segundo borrador». Se refiere al único borrador que Blake escribió del poema «*The Tyger*».

En 1869, setenta y cinco años después de Blake, Dimitri Mendeléiev, también en único borrador, ordenó los elementos químicos conocidos en términos de su masa

atómica con un criterio que resultaría revelador: con un rimerero de naipes blancos como material de trabajo, iba escribiendo en cada una de las cartas de esa baraja química los nombres de los elementos con sus masas y propiedades significativas, agrupándolos según sus masas atómicas y propiedades. Tras numerosos solitarios, observó que las mismas propiedades reaparecían para ciertos valores de masas atómicas, resultando una especie de ley periódica.

En esos juegos de naipes Mendeléiev, como Blake, dejaba hablar a los números (las masas atómicas de los elementos) de los que renacía —con otro lenguaje, con otra forma— la *maravilla del tigre*; mas no se dejaba tiranizar por ellos. Se creía entonces que la masa atómica del telurio era mayor que la del yodo. Pero los resultados de sus solitarios le hacían intuir que algunas de las masas atómicas tenidas por correctas no deberían serlo. Cuando las propiedades de un elemento eran causa de que no conservara el orden establecido en

función de su masa atómica, alteraba resueltamente ese orden, intuyendo que las propiedades eran más importantes que la masa del átomo. Tuvo el valor de postularlo.

Dimitri Mendeléiev fue aún más lejos. Describió los elementos virtuales previstos con su ley periódica, dejando en la Tabla los correspondientes espacios vacíos.

La sencillez de diseño del sello de Correos de España destaca la intuición de Mendeléiev al dejar blancos en su tabla, en espera de los correspondientes huéspedes. Así, en cuatro de los huecos predijo las propiedades de los elementos que habrían de ocuparlos, denominándolos ekaaluminio, ekaboro, ekasilicio y ekamanganeso (*eka* = 'uno' en sánscrito).

Hallazgos experimentales confirmaron pronto la intuición de Mendeléiev quien pudo ver en vida el triunfo de su concepción periódica: en 1875, el químico francés Lecoq de Boisbaudran descubrió el primero de aquellos elementos (ekaaluminio) al que denominó galio (de *Gallia*, Francia,

según unos; del nombre latinizado del descubridor, 'coq', según otros). En 1879, el sueco Lars Fredrik Nilson descubrió el segundo elemento previsto por Mendeléiev (ekaboro) y lo llamó escandio (*Scandia*, Escandinavia). En 1886, el alemán Clemens Alexander Winkler aisló el ekasilicio, al que denominó germanio. Finalmente, el ekamanganeso fue el primer elemento químico preparado artificialmente; recibió, por eso, el nombre de tecnecio.

«El único borrador de la Tabla Periódica de Mendeléiev nos muestra el acto de crear, y ese acto es humano [...] Todos podemos aspirar a él [...] La *terrible simetría* de los elementos fue articulada por un químico ruso» exclama Hoffmann, entusiasmado.

Mendeléiev concibió su imagen de la Química sin justificación alguna. Él mismo dice: «Se desarrolló independientemente de la naturaleza de los elementos químicos. No se apoya en la idea de una

materia unitaria ni conecta históricamente con el pensamiento clásico».

Estaba aludiendo al platonismo. Al químico ruso no le entusiasmaba la filosofía clásica, llegando a afirmar que lo que Rusia precisaba era, más que un Platón, dos Newton.

Para entender ese porqué hubo que esperar casi medio siglo. Cuarenta y cuatro años más tarde —seis después de su muerte— cuando el danés Niels Henrik David Bohr concibió el *modelo planetario* del átomo.

¿Cuánta química de calidad se habría perdido de haber esperado, inmóviles, a entender ese porqué? pregunta Hoffmann; responde: «*As much as would have been lost in some fancied reductionist universe where the composition of poems prior to total scientific understanding were forbidden*».

Octavio Paz, desde el otro lado del conocimiento, pensaba que a la verdad sólo se puede llegar con el lenguaje de la Física o el de la Poesía.

A primera vista pudiera parecer que Mendeléiev estaba todavía anclado en la química del simple ‘registrar hechos’. No es así. Aunque él no lo pensara, estaba rozando el platonismo. Su clasificación periódica ya no es *porfiriana*, sino *ondulante*, es una clasificación dialéctica, musical. Las inspiraciones primeras de esa Tabla Química fueron las octavas de Newlands, y las tríadas de Döbereiner. Es decir, es una *clasificación* completamente nueva con respecto a la *clasificación burocrática* de un simple coleccionar hechos.

Para no caer en la ‘aporía del estadio’ de Zenón, Bueno introduce su *postulado de finitud*. El ejemplo que propone es la Tabla de Mendeléiev. El zinc, visto por la Química clásica parece estar incluido en el campo ‘cerrado’ de la Tabla Periódica. Contemplado desde la posterior interpretación de Copenhague, parece como si el ‘cierre’ se deshiciera. Y no es así, ya que «ese cierre permanece en la misma medida en la que permanecen los eslabones de la

cadena, los elementos químicos». En la explicación de Bueno tenemos «que el átomo de zinc haya de resolverse en una configuración orbital electrónica determinada no significa que deba ser borrado como mera apariencia fenoménica, reabsorbida en la *esencia o estructura* de la configuración $[\text{Ar}] 3d^{10}4s^2$. El átomo de zinc en la Tabla Periódica desempeña ya el papel de una configuración esencial (por su concatenación con los otros elementos de la Tabla) puesto que lo que llamamos ‘esencias’ o ‘estructuras’ del eje semántico no tienen porqué entenderse metafísicamente como entidades absolutas, sino como círculos que se constituyen precisamente a una escala fenoménica».

La *invención* de la Tabla periódica por Mendeléiev es un ejemplo claro de ‘iluminación’, fruto de un largo proceso de trabajo previo, inconsciente o subliminal. En este nivel subliminal las elecciones decisivas tienen lugar entre muchas combinaciones posibles, aunque regidas por reglas aún desconocidas.

«El verdadero trabajo de inventar consiste en elegir entre esas combinaciones» dice Poincaré. «Crear es, precisamente, no hacer combinaciones inútiles y sí, en cambio, aquellas que son útiles, que son muy pocas. La invención es discernimiento, elección».

Actos de creación como estos son frecuentes en el ámbito de la ciencia. ¿Tienen algo en común? El ‘deslizamiento hacia la estética’, responde Steiner en *Gramáticas de la creación*. Las combinaciones útiles — donde *útil* designa la fuerza generadora que conducirá a nuevas proposiciones, a teoremas y leyes generales relacionados con ellas— son las más bellas.

En este contexto, la belleza no es una vaga analogía tomada de las artes. Equivale rigurosamente a verdad, como en la ecuación de Keats. La prueba es verdadera porque es bella y es bella porque es verdadera.

La Tabla Periódica de Mendeléiev es bella. Posee economía en el encadenamiento y ciertas posibilidades de ramificación que confieren a la belleza un

significado substantivo, aunque intraducible, como en la música.

Hoffmann dice que, en pocos siglos, la Química ha pasado de ser arte a convertirse en ciencia. Los químicos, como los artistas —afirma— crean como los músicos, escritores o artistas.

Alguna vez me he preguntado si las vías de llegar a esa ecuación verdad/belleza son comparables en el ámbito de las Ciencias y en el de las Artes.

Aunque las grandes creaciones científicas o artísticas surgen con frecuencia de ese resplandor que ilumina a artistas y científicos, hay (o suele haber) algo esencial que las diferencia.

En las Ciencias, como en las Artes —escribe Steiner— el descubrimiento, la proposición teórica, los experimentos cruciales, se nutren —desde luego— del talento o genio individuales. Pero en la evolución científica también existe un movimiento inercial colectivo y anónimo: si este individuo no hubiera hecho el

descubrimiento, otro científico o equipo lo habrían descubierto, posiblemente casi al mismo tiempo.

Así ocurrió en el caso de Mendeléiev.

A lo largo del siglo XIX, a medida que iba creciendo la lista de los elementos, los químicos se veían atrapados en una intrincada maleza. Cada elemento tenía propiedades distintas, y no se encontraba forma de ordenarlos. En 1862, después de haber establecido Cannizzaro la masa atómica como una de las referencias más significativas del trabajo químico, el geólogo francés Beguyer de Chancourtois comprobó que los elementos se podían disponer en orden creciente de masa atómica, de modo que los de propiedades semejantes se hallaran en una misma columna. Dos años más tarde, el químico John Newlands, independientemente de Chancourtois, concibió una disposición análoga. De él son estas palabras: «*The eight elements, starting from a given one, is a kind of repetition of the first, like the eight note of an octave in music*».

Los dos científicos fueron ignorados.

En 1869, Mendeléiev y Lothar Mayer siguieron la estela de sus predecesores. El primero ha pasado a la historia porque supo llegar más allá. Pero, realmente, era *la circunstancia* de su tiempo lo que exigía ese descubrimiento.

La invención del cálculo infinitesimal en Matemáticas, la espectrografía de RMN y la teoría de las reacciones unimoleculares en Química son otros ejemplos ilustrativos.

En 2005, Año Mundial de la Física, Simon Jenkins, ex director del diario británico *The Times* y uno de los más prestigiosos columnistas de su país, comparaba a Einstein con Cristóbal Colón, descubridor de un mundo que estaba ahí, recostado, esperando ser descubierto por un genio, si no por éste, por otro, escribía.

«No ocurre lo mismo con Miguel de Cervantes», continuaba Jenkins. «Exploró el paisaje de la Europa postmedieval y se preguntó: ¿Dónde está el hombre? Atrapó el

valor, el amor, la lealtad, el triunfo y la mortificación y, como su contemporáneo Shakespeare, los comprimió a escala humana. Contó una historia que nadie más habría podido contar. Si Cervantes no hubiera existido, nadie habría inventado a Alonso Quijano. El tapiz europeo tendría un agujero».

A veces, quizá por eso, el genio artístico parece estar fuera de su tiempo. «Yo dije que el genio era suyo y que los defectos eran de su siglo» escribió Voltaire, refiriéndose a Shakespeare.

Aquí encontramos una diferencia entre las ciencias y las artes, escribe Steiner. Porque, a pesar de que las posibilidades materiales, las circunstancias sociales y económicas y los cambios históricos influyen sobre la creación estética, escribir un poema, pintar un cuadro o componer una sonata son hechos contingentes. En cada caso podría no haber sido.

Aunque al final —escribe Enzensberger— Poesía y Ciencia busquen lo mismo: el vacío, lo intangible, lo invisible, es decir, respuestas a las propias preguntas.

La Química mira a la Física: Bohr y el espíritu de Copenhague

Al acto de creación mendeleviano, a la armonía de su Tabla Periódica, le faltaba un porqué.

En 1910 el físico austriaco Arthur Haas, como aportación científica para su habilitación como *Privatdozent* en la Universidad de Viena, presentó un trabajo sobre el átomo de hidrógeno que —otra vez— muestra que en el ámbito de la Ciencia los nuevos hallazgos van casi siempre asociados a un esfuerzo colectivo. Haas introducía ya la cuantización de niveles electrónicos en el átomo; en algunos aspectos se anticipaba al tratamiento más general que, tres años más tarde, postuló Bohr. Fue rechazado por los examinadores (sólo dos años después obtuvo plaza con un trabajo de investigación distinto).

En la década 1901-1910 cinco estudiantes de la Universidad de Copenhague alcanzaron el grado de *magister scientiarum* en Matemáticas, y siete en Física. El 2

de diciembre de 1909 Niels Bohr defendió el trabajo que le había asignado su profesor Christian Christiansen sobre el tema «Estado actual de la aplicación de la teoría electrónica a la interpretación de las propiedades físicas de los metales». El trabajo, manuscrito por su madre, se encuentra en el *Archivo Niels Bohr* de Copenhague creado en el centenario de su nacimiento (1985).

Para escribir su Tesis —sobre el mismo tema que el trabajo de Grado— Bohr se retiró al campo. A diferencia de Mendeléiev, redactó una y otra vez el manuscrito. En carta a su hermano Harald le decía: «Ya he escrito hasta catorce borradores más o menos parecidos». Este perfeccionismo fue tan característico de su personalidad que, después de haber defendido su Tesis, hizo una copia personal con hojas en blanco intercaladas en las que iba señalando errores y correcciones al texto original.

El 12 de abril de 1911 la Tesis Doctoral —escrita en danés— fue aceptada en la Facultad, teniendo lugar su defensa públi-

ca el 13 de mayo. El acto comenzó con las palabras de rigor: «Altamente honorables y doctos (*højtærede og høj lærde*) profesores y doctores, señoras y señores». Al día siguiente los diarios daneses dieron cuenta de la noticia en estos términos: «El Dr. Bohr, un pálido y tímido joven, apenas tuvo ocasión de entrar en el debate cuya corta duración (hora y media) fue todo un récord». El Prof. Christiansen (Oponente *ex officio*) lamentó que el texto no se hubiera publicado en alguna lengua extranjera. Christiansen hizo notar al público asistente que, desde los tiempos de Ørsted, nadie había trabajado sobre este tema en Dinamarca, manifestando su alegría porque «este vacío haya sido llenado por Niels Bohr».

Se conservan registros de los científicos extranjeros a quienes se había enviado una copia de la Tesis. Entre ellos estaban Lorenz, Planck, Poincaré y Rayleigh a quienes Bohr había hecho referencia en su Tesis. Según parece, muy pocos respondieron, probablemente por la dificultad de

entender danés (algunos de quienes lo hicieron confesaron haber tenido dificultades idiomáticas). En 1911, Bohr, con ayuda de un amigo poco familiarizado con la Física, hizo una traducción al inglés que dejaba algo que desear. Sólo después de su muerte se publicó una versión correcta en este idioma.

En 1911, con una beca de la Fundación Carlsberg para realizar estudios en el extranjero durante un año, Niels Bohr, con 27 años, cruza el Gran Belt camino de Cambridge, para un trabajo postdoctoral bajo la dirección de J. J. Thomson quien cinco años antes había recibido el Premio Nobel por el descubrimiento del electrón. Con él llevaba la pobre traducción de su Tesis y una gran ilusión: «*Jeg rejser ud med alt mit dumme vilde Mod*» (Parto con toda mi tonta y animosa valentía) escribió a su novia, Margrethe Nørlund a quien había conocido dos años antes.

Desde el primer momento, la relación con Thomson no fue fácil. Uno de los colaboradores de éste relata que, aunque las

opiniones del Nobel eran siempre bien recibidas y respetadas «todos teníamos cierto miedo a que pusiera sus manos en nuestros aparatos de trabajo». «A veces el material de vidrio del laboratorio parecía embrujado» refiere otro (en sus tiempos de estudiante Thomson estuvo a punto de perder la vista al provocar una explosión en el laboratorio). «Su increíble capacidad de intuir cómo funcionaba un complicado aparato sin necesidad de poner las manos en él parecía milagrosa».

Bohr conocía las ideas de Thomson sobre la estructura atómica, porque había manejado alguno de sus libros. Cuando, andando el tiempo, le preguntaron por qué había ido a Cambridge, contestó: «Pensaba que Cambridge... era el centro de la Física y Thomson el hombre más maravilloso». Realmente lo que Niels Bohr quería era que Thomson leyera su Tesis y la comentara con él.

Por el testimonio de varios físicos se sabe cómo transcurrió el primer encuentro de Bohr con Thomson. Aquel entró en

el despacho del Nobel llevando en la mano uno de los últimos libros del físico británico. Lo abrió por cierta página y dijo cortésmente: «*This is wrong*». Para entender la escena —comenta un biógrafo— hay que tener en cuenta dos cosas: 1. Bohr fue siempre un hombre muy cortés, y 2. Cuando el encuentro con Thomson, su inglés dejaba bastante que desear. Su conocimiento de este idioma mejoró mucho con los años, aunque siempre lo habló con exótica pronunciación. Es su esposa Margrethe quien dice: «Su pronunciación no era siempre buena, aunque sí el vocabulario». Respecto a escribir en un idioma extranjero, el propio Bohr dijo en una ocasión: «Es más difícil escribir en el idioma propio, pues uno conoce exactamente el significado de cada palabra. En una lengua extraña uno no lo sabe tan bien y por eso lo dice con las palabras justas para hacerse entender».

Su primera entrevista con Thomson no resultó tan bien como el joven Niels había imaginado. En octubre de 1911 escribió a

su hermano: «Tratar con Thomson no es tan fácil como yo pensaba. Es una excelente persona, increíblemente inteligente y con una imaginación fabulosa,... muy amistoso, pero... es muy difícil hablar con él. Aún no ha tenido tiempo de leer mi Tesis y no sé si aceptará mis críticas».

Probablemente en estas últimas palabras resida la razón de su marcha de Cambridge. Algunos biógrafos piensan que Thomson no llegó a aceptar las críticas bienintencionadas de Bohr sobre su teoría atómica según la cual el átomo sería como un *plum-cake* en donde los electrones estarían embebidos en un medio cargado positivamente.

Thomson comentó a Bohr que seguramente progresaría más yéndose a otra parte. Así lo hizo, dirigiéndose a Mánchester, para trabajar con Ernest Rutherford.

Rutherford había nacido en Nueva Zelanda; viajó a la metrópoli con una beca y en 1908, a los 37 años, había recibido el Nobel de Física «por sus investigaciones sobre los elementos radiactivos y la quími-

ca de las sustancias radiactivas». Uno de sus más próximos colaboradores lo describió, tras su muerte, como hombre de volcánica energía, enorme entusiasmo, inmensa capacidad de trabajo y gran sentido común «*who had no cleverness-just greatness*». En *Nature*, su biógrafo A. S. Eve, escribió: «Era siempre una encantadora mezcla de muchacho, hombre y genio».

He transcrito estas palabras sobre la personalidad de Rutherford porque, *mutatis mutandis*, reflejan también el perfil humano de Niels Bohr. Me parece algo arquetípico, descrito con elegancia suma en *El Espectador* orteguiano: «Todo el que ha conocido algún grande hombre se ha sorprendido de hallar que su alma poseía un halo de puerilidad»; porque «la actitud más perfecta consiste en que el hombre maduro mantenga pervivente en su persona cierto manantial de juventud y aun de niñez».

La relación entre Rutherford y el joven Bohr fue muy cordial y fructífera. Aquel

no era un teórico puro y al principio miró al estudiante danés con cautela. Pero debido, entre otras cosas, a que Bohr era un buen jugador de fútbol, pronto surgió una simpatía recíproca (Rutherford había sido jugador de rugby en su lejana tierra natal).

Cuando Bohr llegó a Mánchester en marzo de 1912 lo hizo con la intención de adquirir alguna experiencia sobre radiactividad... y así ocurrió unas pocas semanas. En Cambridge ya había tomado contacto con el modelo atómico de Rutherford («Thomson no creía en él... era reluctante hacia Rutherford», afirmó, años más tarde, en una entrevista) y, pese a ello, no era su intención trabajar en este tema. Eso no es de extrañar ya que, por entonces, el modelo de Rutherford no era tomando en serio por la comunidad científica (en este científico se dio el caso, no sé si único, de que hizo su mayor descubrimiento después de recibir el Nobel).

El cuaderno de laboratorio de Niels Bohr en Mánchester tiene su primer registro de datos el 16 de marzo y termina el 3

de mayo. Durante ese breve periodo trabajó en el tema que Rutherford le había encomendado: estudiar la absorción de partículas α por aluminio. En carta de 27 de mayo a Harald le decía: «Estoy en el laboratorio todo el día, es absolutamente necesario... Rutherford viene de vez en cuando a preguntarnos cómo van las cosas».

Ese trabajo duró poco. No veía con claridad qué podía resultar de él. Acudió a Rutherford y le dijo que prefería abandonar el laboratorio y recluírse para meditar sobre cuestiones que lo tenían preocupado.

Niels Bohr recordó hasta el fin de su vida cómo Rutherford trató de disuadirlo de entrar en la Física del átomo y del núcleo atómico. Afortunadamente no fue así y, en sus últimos meses en Mánchester, escribió una carta a Harald en la que le decía: «Creo haber encontrado algo sobre la estructura del átomo. No se lo digas a nadie... La idea se me ha ocurrido a partir

de resultados sobre la absorción de partículas α ».

En julio de 1912 Bohr dejó Mánchester donde había permanecido tres meses. Su trabajo postdoctoral había concluido.

Al comienzo de 1913 el pensamiento de Bohr no se centraba aún en los espectros atómicos. En febrero se fijó en una vieja fórmula, puramente empírica y desconocida por él hasta entonces, a pesar de haber sido propuesta veintiocho años antes por el matemático suizo Johann Jakob Balmer.

Balmer no era ni un inspirado matemático ni un fino experimentalista. Para él el mundo todo, naturaleza y arte, no era sino una unitaria armonía y su solo objetivo era la búsqueda numérica de esas relaciones armónicas. En su vida publicó tres trabajos, los dos primeros —que lo llevaron a la fama— cuando contaba 60 años; el tercero a los 72.

Lo que había hecho Balmer era increíble. Con tan sólo las cuatro líneas del espectro del hidrógeno atómico medidas

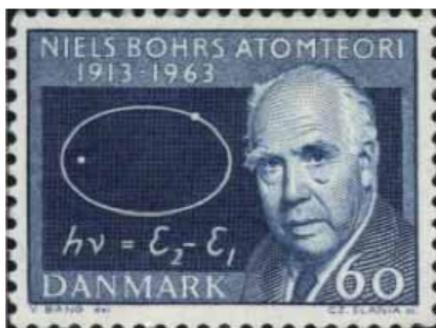
por Ångström, las ajustó a una muy simple ecuación matemática capaz de predecir infinidad de líneas. Como en el caso de la Tabla Periódica de Mendeléiev, la fórmula de Balmer permitía hacer predicciones verificables, pero permaneció treinta años sin poder ser explicada. Hasta Bohr.

El 6 de marzo de 1913 Bohr escribió a Rutherford para enviarle «*the first chapter on the constitution of atoms*». Le pedía su publicación en *Philosophical Magazine*. Hasta entonces, Niels Bohr había publicado tres artículos, uno de su Tesis y dos más. El que enviaba ahora lo situó no sólo a la cabeza de la creación científica, sino que lo ha elevado como paradigma en la historia del pensamiento.

Se ha especulado mucho sobre cómo, en unas pocas semanas, Bohr concibió su modelo atómico. Lo que sí parece claro es que, en línea con su carácter perfeccionista y tenaz, ensayó, uno tras otro, nuevos postulados ajenos a la dinámica clásica guiado siempre por la ecuación de Balmer.

El manuscrito que lo llevó a la fama refleja sus vacilaciones.

Ensayos, dudas; pero todos contruidos sobre un postulado común: en el átomo de hidrógeno su único electrón sólo puede moverse en órbitas discretas que él denominó *estados estacionarios*. Se ha dicho que éste es uno de los más audaces postulados introducidos en el ámbito de la Ciencia, ya que entraba en contradicción con la idea clásica de que el electrón orbitando en torno al núcleo debería ir perdiendo energía de forma continua hasta precipitarse sobre este último.



El sello conmemorativo emitido por Dinamarca muestra el postulado de Bohr:

cuando el electrón salta de un estado estacionario de energía E_2 a otro de energía menor, E_1 , emite un cuanto de energía $h\nu$.

Las líneas espectrales observadas hasta entonces encontraron explicación. Las transiciones entre esos estados estacionarios son la *única* forma en que un átomo absorbe (o emite) energía. Frente al clásico *Natura non facit saltum*, las rayas espectrales, ahora comprendidas, muestran claramente que *Natura facit saltum*.

El artículo en que Bohr expuso su modelo atómico apareció publicado en julio de 1913. Fue seguido de otros dos, uno en septiembre del mismo año, sobre la estructura de los átomos más pesados que el hidrógeno y la Tabla Periódica y otro, en noviembre, sobre la estructura molecular.

No es posible ni oportuno entrar ahora en detalles sobre el modelo atómico de Bohr ni sobre las limitaciones del mismo que, como ocurre siempre, surgieron prontamente. Como en el caso de Mendeléiev y Poincaré, el proceso creativo es un regreso de la mente a lo indiferenciado, a lo mag-

mático de la situación onírica, al Nagual de Castañeda. Concluida esa fase de intuición creativa, la mente vuelve a la conciencia aportando una síntesis nueva de elementos antes inconexos.

Otra vez la ‘terrible simetría’ de Blake.

El misterio de las tierras raras y el hafnio

La primera respuesta a la concepción atómica de Bohr le llegó antes de que su artículo apareciese publicado. Provenía de Rutherford, quien había leído el manuscrito. Escribió a Bohr diciéndole: «Encuentro una gran dificultad en su hipótesis de la que, estoy seguro Vd. es consciente, a saber ¿cómo decide un electrón la frecuencia y cuándo va a pasar de un estado estacionario a otro?» Preguntas que permanecieron sin explicación hasta que la Mecánica cuántica les dio una respuesta sorprendente: no tienen sentido.

En el verano de 1914 Bohr participó en algunos seminarios en Gotinga y Munich. Nunca se había reunido con físicos alemanes y estaba muy excitado. Cincuenta años después Alfred Landé describió así el encuentro en Gotinga: «Él [Bohr] se expresaba con voz suave en un alemán pobre. En la primera fila estaban las grandes eminencias de su tiempo. Alguno opinó: ‘Si no es una tontería, no parece tener mucho sentido’. Después de la conferencia hablé con Max Born y me dijo: ‘Parece extraño e increíble, pero creo que este danés es un genio tan original que me resisto a pensar que ahí no haya algo interesante’...»

La génesis de tan heterodoxas ideas la encontramos en una carta de Niels a su hermano: «Aparte de una base matemática, hidrodinámica, etc... no encuentro un fundamento concreto y definido... y aún es peor con las cosas en las que ahora trabajo —cuyos fundamentos no son conocidos— que claramente dependen de nuevos resultados experimentales... todo depende de la intuición y de la experiencia».

En la década de los 20 algunos elementos químicos, con semejanzas químicas y espectroscópicas entre ellos, parecían contradecir el esquema mendeleviano. Se los llamó *tierras raras* y también *lantánidos* (de *lanthánō*, ‘yo estoy oculto’). Sus propiedades hicieron temer a algunos que la idea toda de la Tabla periódica podría ser errónea.

En 1922 Bohr impartió en Gotinga un ciclo de conferencias. Allí dijo: «En contra de lo que habitualmente se admite... si nuestro modo de pensar es correcto, debe haber un elemento, todavía no descubierto, de número atómico 72, con propiedades análogas a las del zirconio y no a las de las tierras raras».

La conjetura de Bohr estaba en abierta contradicción con los resultados del químico francés Urbain quien, tras años de intenso trabajo, había concluido que el elemento $Z = 72$ era una tierra rara que denominó *celtium*. Posteriores estudios con rayos X hechos en París parecían confirmar la conclusión de Urbain, hasta el extremo de ser mencionada así en un informe del propio Rutherford publicado

en *Nature* («*Now that the missing element of number 72 has been identified...*»). Bohr leyó este informe a su regreso de Gotinga, pero estaba tan convencido de que su hipótesis era correcta que quiso repetir los experimentos. Con un nuevo equipo de rayos X que adquirió e instaló en el sótano de su Instituto de Copenhague y con ayuda de dos colegas (von Hevesy y Coster) los tres se dedicaron a buscar minerales ricos en zirconio. Los encontraron en el Museo de Mineralogía de la Capital danesa. Hevesy purificaba las muestras y Coster hacía los análisis de rayos X. Comenzaron a trabajar en noviembre de 1922; en diciembre ya estaban seguros de haber identificado el nuevo elemento $Z = 72$ en todas las muestras. No sólo no era una tierra rara, sino que era tan común como el estaño y miles de veces más abundante que el oro.

Mientras que Hevesy y el propio Bohr preferían el nombre de *danium* para el nuevo elemento, Coster sugería el de *hafnium* (*Hafnia* = Copenhague). Hevesy envió una nota a *Nature*, que no le publicaron. Como consecuencia de esta ambigüe-

dad puramente nominal, surgieron errores como el de una conocida publicación científica inglesa que se dirigió a Bohr diciéndole que habían tenido noticias de que «*you have discovered two new elements called Danium and Hafnium*».

La ‘partida de bautismo’ del nuevo elemento la publicaron Coster y Hevesy en *Nature* (10 de enero de 1923) con estas palabras: «*For the new element we propose the name Hafnium*». El 2 de febrero de 1923, *The Times* de Londres publicaba la noticia de que el hafnio había sido descubierto por el director científico del *British Museum*. Urbain seguía insistiendo en el nombre *celtium*. Desde Canadá se sugirió abandonar esos nombres en favor de *Jargonium*. Al fin, prevaleció hafnio.

Bohr estaba ausente de Copenhague el día en que Coster y Hevesy estaban seguros de su hallazgo. Mientras el primero trataba de telefonar a Bohr, Hevesy tomaba el primer tren hacia Estocolmo: Niels Bohr pronunciaba su *Discurso Nobel* el 11 de diciembre de 1922.

Veinte años después, en 1943, otro de los tres amigos, von Hevesy recibió el Nobel de Química. Se había puesto orden racional en *la selva de los elementos químicos*.

En discurso pronunciado en la *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab* (Real Academia Danesa de Ciencias y Letras) Bohr afirmó: «Los recientes avances de la Física han creado unas conexiones entre esta ciencia y la Química como nunca se había imaginado».

Interpretación de resultados experimentales, intuición y experiencia fueron las claves del pensamiento científico de Niels Bohr. Su creatividad era asombrosa. Tan grande como su humildad. De él dijo Einstein: «Defiende sus opiniones como alguien en perpetua duda, nunca como quien se siente en posesión de la verdad». James Frank recuerda al respecto: «Cuando en una de nuestras reuniones científicas le correspondió hablar a Wigner, Niels me dijo: 'No he entendido nada. Realmente soy un aficionado. Cuando entran en la alta matemática no puedo seguirlos'». Pro-

bablemente, el mayor elogio que pudo recibir provino de Einstein: «Que esta insegura y contradictoria base (se refería a la Física cuántica de aquel tiempo) le sea suficiente a Bohr para interpretar las líneas espectrales y la estructura de los átomos junto a su interpretación química, me parece milagroso incluso hoy (1949). Es la más alta forma de musicalidad en la esfera del pensamiento».

«Nunca habló con el aplomo de quienes ignoran la duda» habría dicho Borges de Niels Bohr. Cuando en 1947 recibió la más alta distinción del Reino de Dinamarca y debió elegir escudo de armas, inscribió en él la divisa '*Contraria sunt complementa*'.



Años atrás, cerca de Copenhague, en Elsinor, a orillas del Øresund, por los fríos corredores del legendario castillo de Kronborg, el Príncipe Hamlet había encarnado la duda...

Aunque pronto surgieron dificultades para generalizar el modelo de Bohr a átomos con más de un electrón o a las moléculas más simples, su valor reside en que, por vez primera, logró una interpretación general de la estructura atómica y de los espectros que, hasta entonces, parecía incomprendible. Sólo se necesitaba una nueva mecánica en la que las restricciones cuánticas surgieran no como una intuición, sino como una necesidad matemática.

Otra efeméride en 2007: Miguel Catalán, descubridor de los multipletes

En 1907, hace cien años, murió Mendeleiev. Cincuenta años después fallecía en Madrid el químico Miguel Ángel Catalán

cuya contribución (1922) al conocimiento de la estructura de los átomos polielectrónicos fue valorada por Harnwell y Livingood con estas palabras: «*The first grasp of the general principles underlying the description of spectra came from the work of Catalán on the highly complex multiplets of the manganese spectrum rather than from the simple spectra which might at first sight have been considered to afford better possibilities for the observation of broad generalities*».

La contribución de Catalán al conocimiento de la estructura atómica fue reconocida por la Unión Astrofísica Internacional en 1970, dando su nombre a un cráter lunar. Según comunicación de la NASA, «El Dr. Catalán descubrió los multipletes en el espectro del manganeso, iniciando una aproximación al estudio de los espectros complejos».

La prematura muerte de Catalán no le permitió leer su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físi-

cas y Naturales que iba a versar, precisamente, sobre el Sistema Periódico.

En 1994, centenario de su nacimiento, Correos de España emitió un sello conmemorativo.



Natura facit saltum: la Química abre camino a la Astroquímica

En un corto espacio de tiempo, mentes egregias (de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Zeeman, Stark, Sommerfeld, Born, Pauli,...) avanzaron más y más en el conocimiento de la estructura atómica.

Fue una época de oro para la Física y también para la Química que cada vez se iba apoyando más en aquella.

El helio fue descubierto en el Sol antes que en la Tierra. Gracias a que la famosa raya D_3 aparece en la zona visible del espectro, Lockyer pudo aventurar que en nuestra estrella *hay* helio. En tiempo presente, porque el Sol está muy próximo.

Desde el hallazgo de Lockyer las técnicas espectroscópicas han progresado de forma espectacular. Algunas lo han hecho como consecuencia del esfuerzo bélico. Así sucedió con la espectroscopia de IR durante la Primera Gran Guerra y con la de microondas durante la Segunda (desarrollo del radar).

Cuando el químico trabaja en su laboratorio con muestras gaseosas a presión bajísima en las cubetas tapizadas de oro de un espectrómetro de microondas, observa también saltos de energía, como en el caso del helio, pero no en la región visible del espectro electromagnético, sino en la de las ondas centimétricas y milimétricas. Las

energías absorbidas o emitidas corresponden a transiciones entre distintos estados de rotación molecular de modo que, midiéndolas, pueden conocerse los momentos de inercia del rotor y, con ellos, las coordenadas de los átomos que configuran la molécula.

Como el espectro de rotación es específico de cada molécula (e incluso de una misma cuando alguno de sus átomos se substituye por un isótopo) el análisis de las líneas del espectro de emisión de moléculas del espacio exterior va a permitir conocer cuáles son esas moléculas.

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 menores (medidas en tiempo-luz) 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 Antecesor* 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 emitida por los objetos cósmicos observados.

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

Precisamente porque el universo observable es un cosmos pasado, la radiación captada del espacio exterior 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.

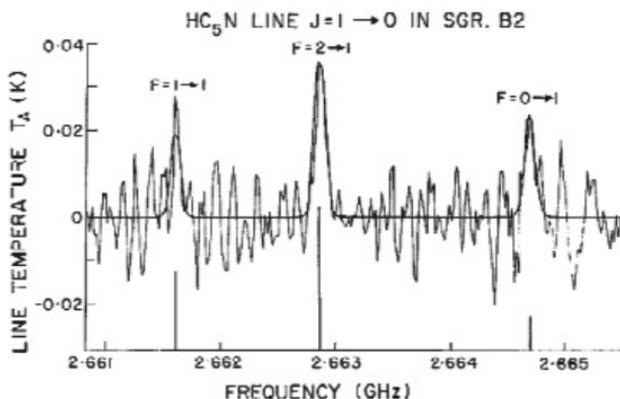
Como las nuevas estrellas se forman por colapso gravitacional en la región de las nebulosas que contienen el material primigenio, la detección de moléculas en esas regiones es de gran importancia. Se han detectado numerosas moléculas; la gran nube de gas y polvo Sagitario B2, próxima al centro de nuestra 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 emisión de las moléculas de amoníaco y 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 sucedie-

ron sin solución de continuidad, de modo que en la actualidad son cerca de 150 las especies químicas identificadas en nuestra propia galaxia. 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 vieja aventura del helio se ha vuelto a repetir.

La Figura muestra un espectrograma de la molécula $H-C\equiv C-C\equiv C-C\equiv N$ procedente de Sagitario B2.



La detección de moléculas como ciano-diacetileno (y aún mayores, como los cia-

nopoliacetilenos) 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 hipótesis de que su reacción con la molécula CO podría explicar la abundancia de otro ion, esta vez poliatómico, el HCO^+ .

Aunque la radiación emitida por una especie química existente en el espacio sea conocida —si antes ha sido 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, C_6H^- , 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 esa molécula 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*. 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, como acetileno, 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, una estrella moribunda a punto de convertirse en enana blanca rodeada por una 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.

Es tan vasto el cielo...

La mayor parte de la materia expelida por las estrellas es de naturaleza atómica. Alrededor del 99%, en peso, son átomos y sólo el 1% es polvo estelar (silicatos metálicos y compuestos de carbono). El hidrógeno es, con mucho, el elemento más abundante. Oxígeno y nitrógeno también están presentes, pero en concentraciones cuatro órdenes de magnitud más pequeñas.

Las zonas del espacio con mayor concentración de polvo son las más frías, debido a que las partículas absorben en las regiones visible y ultravioleta del espectro y reemiten energía, en forma de calor, en la zona del infrarrojo.

Sorprendentemente es en estas gélidas regiones, en las que la temperatura es sólo

de unos 10 K, donde la química trabaja con más eficacia. Ello se debe a que, al absorber la radiación, las partículas de polvo protegen de la destrucción a las moléculas recién formadas, abriendo la posibilidad de nuevas reacciones que conducirán a moléculas más complejas. Además, las partículas, con gran relación superficie/volumen, pueden actuar como catalizadores de mecanismos inviábiles en fase gaseosa.

En «*Crepusculario*» leemos: «es tan vasto el cielo y rueda el tiempo, sin embargo».

El factor clave de los procesos que transcurren en esas nubes de polvo es el tiempo.

En esa inaccesible lejanía espacio-temporal se producen choques, encuentros; nacen moléculas. Hay evidencia espectroscópica de su presencia, tanto en estado gaseoso como en forma de heladas películas que prenden en la superficie de las partículas de polvo cósmico.

En 2000 se detectó en Sagitario B2 la molécula de glicolaldehído. Se la encontró en la zona caliente de la nube. Cuatro años después, mediante análisis de débiles señales de su espectro de rotación, se identificó este azúcar en una zona muy fría.

Este ‘azúcar frío’ de dos carbonos puede reaccionar con otro de tres para formar ribosa, columna vertebral de la molécula de ARN. La Química explora así el camino de la vida; al estudiar las reverberaciones del pasado nos acerca a la *madre materia*, al *agua madre* del «*Canto general*».

El que esas moléculas puedan formarse en regiones frías suscita nuevas hipótesis. Condiciones análogas podrían darse en las regiones externas de un joven sistema solar que podrían albergar a esas moléculas prebióticas. Se ha sugerido, incluso, que la colisión con un cometa o el simple encuentro con la cola del mismo podrían *sembrar* el joven planeta con moléculas prebióticas.

Sobre la trascendencia de las técnicas de trabajo de que dispone el químico son

ilustrativas las palabras de Harold Kroto, Nobel de Química en 1996: «Resulta difícil entender las posibilidades de la Química sin técnicas como la espectroscopia, espectrometría de masas, cromatografía y, en particular, 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 microondas 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».

Átomos, moléculas, mecanismos...

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, che-*

mistry in space, and chemistry in time. My assignment is with time»

Trescientos setenta y cinco años después, las palabras de Sennert pueden parecer pintorescas, pero en esos tres actos de metáfora, Acción, Pasión, Reacción, está representado el curso de las reacciones químicas.

Tras el análisis y la síntesis —afirma Roald Hoffmann— la actividad química más característica es *el estudio de los mecanismos*. ¿Cómo transcurrió una reacción en nuestro laboratorio? ¿cómo transcurrió en lugares alejados 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 éste 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, 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, desde que Lockyer se preguntó el origen de la raya D_3 , para conocer cómo transcurre una reacción química el quími-

co 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.

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, propusiera su célebre ecuación empírica. La ecuación de Arrhenius fue interpretada luego en el marco de la teoría de colisiones.

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 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 Jens Christiansen —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.

Fueron Henry Eyring y Michael Polanyi quienes, en la década de los 30, con la teoría del Estado de Transición y una concep-

ción 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 ejemplo de creatividad. 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 (10^{-6} s). Pocos años después de la segunda Gran Guerra, con equipos electrónicos desarrollados duran-

te el conflicto, Norrish y Porter desarrollaron el método de fotólisis por destello. El paso siguiente lo dio Manfred Eigen en Alemania con las técnicas de relajación que permitieron acercarse a la escala de los nanosegundos (10^{-9} s). Mediante bruscos saltos de temperatura, presión o campo eléctrico 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 susceptibles de medida.

El láser abrió a la Química nuevos horizontes. Se pudieron generar pulsos de nanosegundo y a principios de los setenta se empezó a trabajar con técnicas de picosegundo (del italiano *piccolo*; 10^{-12} s) para estudiar algunas de esas reacciones inconmensurables pocos años antes. Ejemplos significativos fueron los estudios de mecanismos de conversión interna, transferen-

cia electrónica, conversión intersistema y relajación de vibración.

En los años ochenta comenzó la *era de los femtosegundos* (del danés *femten* = quince; 10^{-15} s). En 1987 el egipcio Ahmed Zewail publicó su primer trabajo «*Real-Time Femtosecond Probing of Transition States in Chemical Reactions*». En 1999 le fue concedido el Nobel de Química «por sus estudios sobre los estados de transición de las reacciones químicas mediante espectroscopia de femtosegundos». Con esta técnica se han podido estudiar mecanismos tan complejos como el de la visión o la función clorofílica.



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.

«La Química, como ciencia susceptible de medida, termina aquí» afirma George Porter. Pretender afinar más y más es tan sinsentido como preguntarse por el color del cabello del rey de los Estados Unidos, comenta con ironía Kompaneyetz.

La naturaleza democrática de la Química

El hombre es el animal que sueña, dice Kierkegaard.

¡Qué grandes soñadores ha dado la Química! Recordemos a Kekulé cuya concepción onírica de la molécula de benceno es, según Koestler, el sueño más importante de la Historia de la humanidad, después del de José de las vacas flacas y las vacas gordas.

Sobre ensoñaciones se han concebido técnicas como las espectroscopias fotoelectrónicas, que permiten *ver* las moléculas cuando reaccionan sobre las superficies catalíticas...

La Química es capaz de preparar organometálicos con especificidad estérica y reactividad cuasiprogramadas. En el prometedor capítulo de la Ciencia de Materiales los químicos estudian líquidos de conformación cuasirregular, sólidos autoorganizados... El papel de los químicos es clave en el diseño de materiales con memoria.

No sólo en el ámbito de lo experimental. La Química computacional se ha desarrollado vertiginosamente. Los ordenadores

de hace treinta años son vistos hoy como ábacos gigantes.

Ejemplo de integración de la Química y las Ciencias de la Vida lo ofrece la molécula de óxido nítrico. Hace quince años era escasamente conocida por su presencia en los gases de la combustión en motores de explosión. El descubrimiento de su actividad como *mensajero químico* en los tejidos ha abierto nuevos horizontes a la Biología y a la Medicina.

Ilustración fascinante de ese acercamiento es el hallazgo (2007) de los efectos del alcohol homovanílico en el cerebro de las abejas melíferas, mediante mecanismos aún desconocidos. La abeja reina controla a la colmena segregando este alcohol que bloquea el *aprendizaje aversivo* de las obreras hacia ella. Se trata de un auténtico ‘lavado de cerebro’ mediante inducción de un estado de ‘felicidad química’.

La Química es mirada desde el escalón de arriba de la Escala de Comte...

Roald Hoffmann 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 o soñadas.

Esa capacidad creativa, intuitiva, cercana al pensamiento artístico pero construida sobre el método científico, ha conseguido que hoy sean más de diez millones los compuestos químicos perfectamente caracterizados. Muchos no existían en la Tierra hasta que los químicos los han preparado.

Entre la belleza de la cosmología y de las Ciencias de la Vida está la Química. «*Bella e potente*», exclama Cerruti. Con un espléndido presente y un prometedor futuro.

No quiero caer en la tentación de predecir el futuro de la Química al que magistralmente se ha referido Whitesides en las páginas de *Angewandte Chemie* («*The Temptations and Hazards of Predicting the Future*»). Pero sí quiero decir que no veo gran riesgo en la presunta opinión quimiófoba de la sociedad de nuestro tiempo.

Estoy convencido de que la imagen social de la Química y de los químicos es ahora mucho mejor conocida y valorada que tiempo atrás.

En *Passion et vertue*, Gustave Flaubert se refiere a uno de sus personajes con estas palabras: «...era un hombre imperturbable, con estrechez de miras y, además, químico...».

Años más tarde, Wilkie Collins, inseparable amigo de Dickens, en su novela de terror *El hotel encantado* describe así a un protervo asesino: «Comenzó su vida con una devoción obsesiva a la Química experimental, lo que es sorprendente en un joven apuesto con un brillante futuro a su alcance».

Sin duda, la imagen de la Química ha mejorado.

Bajo el título «*La naturaleza democratizadora de la Química*» Hoffmann evoca hechos evidentes: la humanidad ha doblado su esperanza de vida, se ha liberado de numerosas infecciones, dispone de alimentos más variados y mejor conservados, el dolor se alivia...

Verdad es que ciencia y técnica han servido también —en ocasiones— al lado malo del ser humano: dominación, propaganda e incluso tortura y muerte (la conservación de un bosquecillo amado por Goethe dentro de un campo de concentración...).

«A pesar de todo, creo —escribe Hoffmann— que el efecto global de la ciencia es inexorablemente democratizador, en el más profundo sentido de la palabra, pues pone a disposición de más y más variados estratos sociales bienes y comodidades que en tiempos pasados estaban reservados a minorías selectas».

Acudo, para terminar, a la cuarta acepción de *Paraninfo*:

4. m. p. us. Anunciador de una felicidad

Quiero entrar en el nuevo Curso Académico acompañado por las palabras de un universitario egregio que habló en este lugar hace cinco años al ser investido como doctor *Honoris Causa*; quien, en un libro admirable, *Lecciones de los Maestros*, ha escrito:

«La *libido sciendi*, el deseo de conocimiento, el ansia de comprender, está grabada en los mejores hombres y mujeres. También lo está la vocación de enseñar. No hay oficio más privilegiado. Despertar en otros seres humanos poderes, sueños que están más allá de los nuestros; inducir en otros el amor por lo que nosotros amamos; hacer de nuestro presente interior el futuro de ellos: ésta es una triple aventura que no se parece a ninguna otra. Conforme se amplía, la familia compuesta por nuestros antiguos alumnos se asemeja al echar nuevas ramas, al verde de un tronco que envejece. Es una satisfacción incomparable ser

el servidor, el correo de lo esencial, sabiendo perfectamente que muy pocos pueden ser creadores o descubridores de primera categoría. Hasta en un nivel humilde —el de maestro de escuela— enseñar, enseñar bien, es ser cómplice de una posibilidad trascendente. Si lo despertamos, ese niño exasperante de la última fila tal vez escriba versos, tal vez conjeture el teorema que mantendrá ocupados a los siglos».

Me siento honrado de ser anunciador de una nueva jornada en ese caminar invocado por el Profesor George Steiner. Movidos por una *libido sciendi* tan antigua y, a la vez, tan joven.

Bibliografía

- ALPER, J., Astrochemistry, *Chemistry*, Winter 2003, *Am. Chem. Soc.*, Washington, 2003.
- ÅNGSTRÖM, A., *Recherches sur le spectre solaire*, Uppsala Univ. Press, Uppsala, 1868.
- BECKETT, M. A.; PLATT, W. G., *The Periodic Table at a Glance*, Blackwell Publ., Oxford, 2006.
- BOHR, N., Carta a su hermano Harald, 28 de julio de 1910, *Collected works*, North-Holland, Amsterdam, 1972.
- , *La teoría atómica y la descripción de la Naturaleza*, Alianza Editorial, Madrid, 1988.
- BUENO, G., *Materia*, Pentalfa, Oviedo, 1990.
- , *Teoría del cierre categorial*, Pentalfa, Oviedo, 1992.
- CERNICHARO, J.; HERAS, A. M.; TIELENS, A. G. G. M.; PARDO, J. R.; HERPIN, F.; GUÉLIN, M.; WATERS, L. B. F. M., Infrared Space Observatory's Discovery of C₄H, C₆H₂, and Benzene in CRL 618, *Astrophys. J.* **2001**, 546, L123.
- CERNICHARO, J.; GUÉLIN, M.; AGÚNDEZ, M.; KAWAGUCHI, K.; MCCARTHY, M.; THADDEUS, P., Astronomical detection of C₄H⁻, the second interstellar anion, *Astron. Astrophys.* **2007**, 467, L37.

- CERRUTI, L., *Bella e potente, La chimica del Novecento fra scienza e società*, Ed. Riuniti, Roma, 2003.
- CRISWELL, B., Mistake of Having Students Be Mendeleev for Just a Day, *J. Chem. Educ.* **2007**, *84*, 1140.
- DAGOGNET, F., *Tableaux et langages de la chimie*, Éditions du Seuil, París, 1969.
- EIGEN, M., *Immeasurably fast reactions*, Nobel Lecture, 11.12.1967, *Nobel Lectures, 1963-1979, Chemistry*, Elsevier, Amsterdam, 1972.
- , *Steps Toward Life*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1993.
- EMSLEY, J., The Development of the Periodic Table, <http://www.chemsoc.org/viselements/pages/history.html>
- ENZENSBERGER, H. M., *Los elixires de la Ciencia*, Anagrama, Barcelona, 2002.
- GLAMANN, K., *Carlsbergfondet*, Rhodos, Copenhagen, 1976.
- GLASER, R.; HODGEN, B.; FARRELLY, D.; MCKEE, E., Adenine Synthesis in Interstellar Space: Mechanisms of Prebiotic Pyrimidine-Ring Formation of Monocyclic HCN-Pentamers, *Astrobiology* **2007**, *7*, 455.

- GRIBBIN, J., *Biografía del Universo*, Crítica, Barcelona, 2007.
- HARNWELL, G. P.; LIVINGOOD, J. J., *Experimental Atomic Physics*, McGraw Hill, Nueva York, 1933.
- HOFFMANN, R.; TORRENCE, V., *Chemistry Imagined*, Smithsonian Inst. Press, Washington, 1993.
- KAISER, D., De las partículas a la cosmología, *Investigación y Ciencia* **2007**, 371, 40.
- KHUNDAR, L. R.; ZEWAİL, A. H., Ultrafast molecular reaction dynamics in real-time: Progress over a decade, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **1990**, 41, 15.
- KRAGH, H., *Generaciones cuánticas*, Akal, Madrid, 2007.
- MCCARTHY, M.; GOTTLIEB, C. A.; GUPTA, H.; THADDEUS, P., Laboratory and Astronomical Identification of the Negative Molecular Ion C_6H^- , *Astrophys. J.* **2006**, 652, L141.
- MEISEN, V., Ed., *Prominent Danish scientists through the ages*, Levin & Munksgaard, Copenhagen, 1932.
- Mendeleev noted patterns in the combining ratios of elements, <http://periodic.lanl.gov/mendeleev.htm>
- MOSTERÍN, J., *Ciencia viva. Reflexiones sobre la aventura intelectual de nuestro tiempo*, Espasa, Madrid, 2006.

- , *Límites del conocimiento cosmológico*, en *Filosofía de la Ciencia hoy*, Fundació Vidal i Barraquer, Barcelona, 1992.
- OSTWALD, W., *Volumchemische Studien über Affinität* (Dopart, 1877); *OKEW*, No 250, Leipzig, 1966.
- PAIS, A., *Niels Bohr's Times*, Clarendon Press, Oxford, 1991.
- PORTER, G., *Chemistry in Microtime*, en *The Chemical Bond. Structure and Dynamics*, Ed. A. H. Zewail, Academic Press, Boston, 1992.
- ROZENTAL, S., *Erindringer om Niels Bohr*, Glyldendal, Copenhagen, 1985.
- SÁNCHEZ RON, J. M., *El poder de la ciencia*, Crítica, Barcelona, 2007.
- , *Miguel Catalán; su obra y su mundo*, CSIC, Madrid, 1986.
- SCERRI, R., La evolución del Sistema Periódico, *Investigación y Ciencia* **1998**, 266, 54.
- SENNERT, D., *Epitome Naturalis Scientiae*, Editio Tertia, Impensis Johannis Helwigii Bibl.; Typis Ambrosii Rothii, Wittebergae, 1633.
- 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.

- STEINER, G., *Presencias reales ¿Hay algo en lo que decimos?* Destino, Barcelona, 2007.
- , *Gramáticas de la creación*, Siruela, Madrid, 2001.
- , *Lecciones de los maestros*, Siruela, Madrid, 2004.
- STRATHERN, P., *Mendeleev's Dream: The Quest for the Elements*, St. Martin's Press, Nueva York, 2000.
- STRELOW, H.; KNOCHE, W., *Fundamentals of Chemical Relaxation*, Werlag Chemie, Weinheim, 1977.
- The Periodic Table of Elements, <http://www.aip.org/history/exhibits/curie/periodic.htm>
- VAN SPRONSEN, J. W., *The periodic table of chemical elements*, Elsevier, Nueva York, 1969.
- VERGOZ, V.; SCHREURS, H. A.; MERCER, A. R., Queen Pheromone Blocks Aversive Learning in Young Workers Bees, *Science* **2007**, 317, 384.
- 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^- Overturms Conventional Wisdom in the Field, *Chem. Eng. News* **2006**, 84, 5.

XUAN THUAN, T., *La melodía secreta*, Buridán, Barcelona, 2007.

ZEWAIL, A. H., *Femtochemistry: Ultrafast Dynamics of the Chemical Bond*, World Scientific, Hackensack, NJ, 1994.

—, La formación de las moléculas, *Investigación y Ciencia* **1991**, 173, 42.

—, *Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond Using Ultrafast Lasers*, Nobel Lecture, 8.12.1999, *Nobel Lectures, 1996-2000*, Chemistry, World Sci. Pub. Singapur, 2003.

—, Femtochemistry: The role of alignment and orientation, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.2* **1989**, 85, 1221.

—, 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.

ESTA *ORATIO INAUGURALIS* SE ACABÓ DE REDACTAR
EL 14 DE AGOSTO DE 2007
DÍA DE SAN MAXIMILIANO KOLBE
MURIÓ EN AUSCHWITZ

