

# LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

“La idea de que todo lo que se encuentra en la Naturaleza es una combinación de cuatro “Elementos fundamentales” aparece ya antes de los griegos”.

**POR LUIS JOAQUÍN BOYA**

3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
Li Lithium 3s <sup>1</sup>	Be Beryllium 2s <sup>2</sup>	B Boron 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>	C Carbon 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	N Nitrogen 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	O Oxygen 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	F Fluorine 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	Ne Neon 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>	Na Sodium 3s <sup>1</sup>	Mg Magnesium 3s <sup>2</sup>	Al Aluminum 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	Si Silicon 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	P Phosphorus 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	S Sulfur 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	Cl Chlorine 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	Ar Argon 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>		
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K Potassium 4s <sup>1</sup>	Ca Calcium 4s <sup>2</sup>	Sc Scandium 3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	Ti Titanium 3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	V Vanadium 3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	Cr Chromium 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	Mn Manganese 3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	Fe Iron 3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	Co Cobalt 3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	Ni Nickel 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	Cu Copper 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	Zn Zinc 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	Ga Gallium 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	Ge Germanium 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	As Arsenic 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	Se Selenium 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	Br Bromine 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	Kr Krypton 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb Rubidium 5s <sup>1</sup>	Sr Strontium 5s <sup>2</sup>	Y Yttrium 4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	Zr Zirconium 4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	Nb Niobium 4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>	Mo Molybdenum 4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	Tc Technetium 4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	Ru Ruthenium 4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	Rh Rhodium 4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>	Pd Palladium 4d <sup>10</sup> 5s <sup>0</sup>	Ag Silver 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	Cd Cadmium 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	In Indium 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	Sn Tin 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	Sb Antimony 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	Te Tellurium 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	I Iodine 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	Xe Xenon 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>
55	56	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
Cs Cesium 6s <sup>1</sup>	Ba Barium 6s <sup>2</sup>	Hf Hafnium 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>	Ta Tantalum 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	W Tungsten 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	Re Rhenium 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	Os Osmium 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	Ir Iridium 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	Pt Platinum 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	Au Gold 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	Hg Mercury 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	Tl Thallium 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup>	Pb Lead 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	Bi Bismuth 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup>	Po Polonium 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup>	At Astatine 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup>	Rn Radon 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>	
87	88	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
Fr Francium 7s <sup>1</sup>	Ra Radium 7s <sup>2</sup>	Rf Rutherfordium 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	Db Dubnium 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	Sg Seaborgium 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>	Bh Bohrium 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup>	Hs Hassium 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	Mt Meitnerium 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	Ds Darmstadtium 6d <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup>	Rg Roentgenium 6d <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	Cn Copernicium 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	113	114	115	116	117	118	
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
La Lanthanum 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Ce Cerium 4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Pr Praseodymium 4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	Nd Neodymium 4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	Pm Promethium 4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	Sm Samarium 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	Eu Europium 4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	Gd Gadolinium 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	Tb Terbium 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	Dy Dysprosium 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	Ho Holmium 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	Er Erbium 4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	Tm Thulium 4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	Yb Ytterbium 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	Lu Lutetium 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Ac Actinium 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Th Thorium 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	Pa Protactinium 5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	U Uranium 5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Np Neptunium 5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Pu Plutonium 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	Am Americium 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	Cm Curium 5f <sup>7</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	Bk Berkelium 5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	Cf Californium 5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	Es Einsteinium 5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup>	Fm Fermium 5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup>	Md Mendelevium 5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup>	No Nobelium 5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup>	Lr Lawrencium 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>			

## Los elementos químicos

### E LA ANTIGÜEDAD

Entender los Elementos Químicos (por ejemplo, su orden y su número, la periodicidad de sus propiedades, etc.) se presenta hoy día como una pregunta fundamental a la Naturaleza, totalmente resuelta por la Ciencia moderna (Química y Física Cuántica) y cuya solución, muy satisfactoria e inteligible, queremos exponer en este escrito.

La idea de que todo lo que se encuentra en la Naturaleza es una combinación de cuatro "Elementos fundamentales" aparece ya antes de los griegos, y hasta cierto punto es independiente de la hipótesis "atómica" de Demócrito y Leucipo, pero compatible con ella. Es sabido que hasta bien entrada la Ciencia moderna se suponía que todos los constituyentes que ofrece la Naturaleza estaban compuestos por cuatro elementos fundamentales: aire, agua, fuego, y tierra, elegidos en virtud de su aspecto exterior, muy diferenciado y específico. En particular, hay diversos intentos de relacionar los cuatro elementos con cuatro de los cinco

sólidos platónicos, también encontrados por los griegos: (Tetraedro T, cubo o hexaedro H, octaedro O, dodecaedro D e icosaedro I, bien estudiados por Euclides). El quinto "elemento" podría ser el éter.

La hipótesis atómica, de origen griego como insinuamos, persistió como tal hipótesis hasta bien entrado el siglo XIX, aunque la Química de todo el s. XIX ya trabajó científicamente con átomos y moléculas; la hipótesis atómica fue mucho más aceptada científicamente que la Tesis opuesta, defendida por Aristóteles, y a la que se adhirió el pensamiento religioso cristiano, sobre todo en la Edad Media.

Se fue viendo que el aspecto exterior de la materia no indicaba la estructura y/o la naturaleza de la misma: sustancias que parecían simples, como el agua, se vio ya en el s. XVIII (Cavendish, 1785) estar compuesta de los dos elementos más "primitivos", hidrógeno y oxígeno; el fuego se vio también originado por la oxigenación o combustión intensa (el "arder" de las cosas), y luego se vio también que los estados de agregación (sólido, líquido o gaseoso)

de los diversos compuestos eran un efecto de la temperatura; el agua, en particular, se entendió pronto en sus tres estados (hielo o nieve, agua líquida y vapor de agua), siendo químicamente la misma agua.

La Química del siglo XVIII recupera la hipótesis atómica griega, ampliándola con el concepto de *molécula*. Se establece primero el concepto de *elemento químico*, si no puede descomponerse más: así se definió el hidrógeno H y el oxígeno O como constituyentes del agua; las *moléculas* más elementales que aparecen en la naturaleza, aparte del agua, son, por ejemplo, la sal común (cloruro de sodio, NaCl), algunos carbonatos como la calcita (carbonato de calcio, CaCO<sub>3</sub>), etc. y ciertos minerales del hierro (se encontró también hierro en estado natural, nativo, pero parece ser que era de origen meteorítico). Hidrógeno, generador del agua; oxígeno, equivocadamente, generador de lo "ácido".

Ciertos elementos aparecen en estado natural, en la Naturaleza, como el oro y la plata; aparte de ellos y del mercurio Hg (de "*Hidrargirium*", o plata líquida), el estaño Sn, etc.; y a partir de entonces se habla de átomos y moléculas con toda propiedad, a lo largo de todo el siglo XVIII, que es el verdadero inicio de la Química como tal ciencia. Fue precedida por la *Alquimia*, de uso frecuente en la Edad Media.

La hipótesis atómica fue fuertemente contestada por Ernest Mach, en el cambio de los siglos XIX/XX precisamente por ser hipotética, no habiéndose observado directamente los átomos (que no lo fueron hasta, digamos, 1950). E. Mach murió en 1915, todavía sin creer en los átomos.

### EL SIGLO XIX EN LA QUÍMICA

Se descubren pronto, empíricamente, las leyes de las proporciones múltiples y constantes, que favorecen claramente la hipótesis atómico-molecular. Dalton es la gran figura de la época.

El s. XIX, científicamente, es el siglo de las grandes síntesis: por ejemplo, en Física, de las ecuaciones de Maxwell (1865) se concluye que la luz es la propagación en el es-



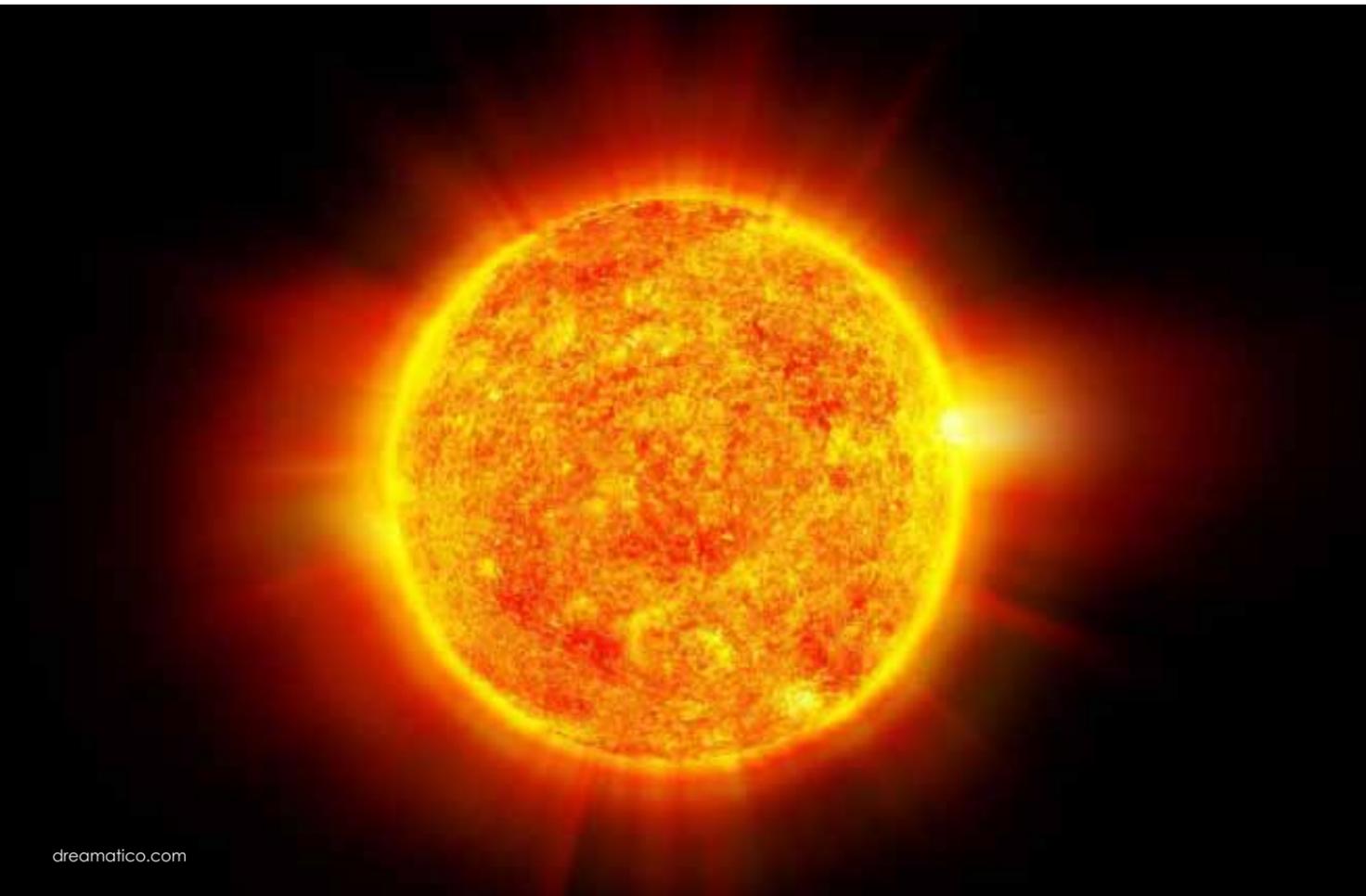
www.euclidlibrary.org

**"Sustancias que parecían simples, como el agua, se vio ya en el s. XVIII estar compuesta de los dos elementos más "primitivos", hidrógeno y oxígeno".**



Acrópolis de Atenas (Grecia).  
www.history.com

# Los elementos químicos



dreamatico.com

pacio de un campo electromagnético, con lo cual se puede decir, con un cierto fundamento, que la ciencia de la Óptica pasa a ser un caso (restringido) de la Teoría de la Electricidad.

Pero más importancia para la Química, creo, tiene la identificación del calor como agitación térmica, en vez de creer en el "fluido calórico" como se creía hasta Joule, a mediados del s. XIX (Ver referencia 5 de la bibliografía para un estudio histórico reciente). Hoy día estamos tan acostumbrados a ello, que nos cuesta trabajo pensar que no fue siempre así... y, de hecho, la doctrina del "fluido calórico" gozó de gran predicamento hasta mediados del s. XIX. Con ello, la Termodinámica, aun conservando su identidad como ciencia (y como tal, compleja), se

convierte, en cierto sentido, en parte de la Mecánica. El principio fundamental era la Ley de la Conservación de la Energía.

Los químicos ya habían observado una cierta "periodicidad" en los elementos químicos; por ejemplo, existían las "triadas" de Döbereiner (químico alemán, 1780-1849), hacia 1817, como flúor, cloro y bromo, o calcio, estroncio y bario, o litio, sodio y potasio, o hierro, cobalto y níquel; los elementos de cada triada exhibían propiedades químicas semejantes. Las "triadas" se convertirán, eventualmente, en "octavas".

Los gases nobles se descubren, causando una gran sorpresa, hacia 1870, y se ve en seguida que los tres primeros (helio, neón y argón) son

muy parecidos (por ejemplo, aparte de presentarse en estado gaseoso a temperatura ambiente, siendo difíciles de licuar): no presentan actividad química alguna y quizás, por ello, no fueron previstos, y su hallazgo (Ramsey y otros, desde 1865) apareció como una gran sorpresa. El helio, por ejemplo, se descubre primeramente en el sol (*Helios* en griego), por medios espectroscópicos (la espectroscopia, como herramienta analítica, se desarrolló, desde su invención, por Kirchoff y Bunsen hacia 1865). La espectroscopia va a servir, en muchos casos, para identificar los elementos, pues las rayas emitidas son características de cada elemento: una técnica física, de la que una gran beneficiaria es la Química.

Pero es el científico-químico ruso Dimitri Mendeleev quien, hacia 1865, establece la periodicidad general de los elementos químicos, agrupándolos todos (había unos setenta bien identificados para entonces; hoy hablamos de más de 100...) en familias. Así caben la fami-

lia de los metales alcalinos, los alcalino-térreos, los halógenos, los gases nobles, los metales de transición, etc.

Es de resaltar la gran contribución de la Ciencia rusa, en el período pre-comunista (iniciado en 1917), al conjunto de la Ciencia mundial, ya en el siglo XIX: por ejemplo, aparte de los químicos, existen los matemáticos P. Chebychev (números primos) y N. Lobatchevski (geometría no euclidiana) y los físicos como P. Lebedev, I. Ostrogradski, etc.

Varios elementos químicos han aparecido en estado natural, sobre todo, ciertos metales, como decíamos: la industria del hierro (que pronto se aisló, como elemento, por reacciones

Tabla Periódica de los Elementos.

www.alquera.com

## Los elementos químicos

químicas) marca toda una etapa de la Historia de la Humanidad, por su uso en la construcción de utensilios, en particular para armamento, etc. Ciertas aleaciones existen también desde muy antiguo, como el bronce (con estaño y cobre), o las amalgamas con mercurio.

Los símbolos químicos, aun hoy día, reflejan cuándo y cómo se descubrió el elemento; así como el nombre Fe para el hierro es muy lógico, Na para el sodio (*Natrium* en su origen latino) y K para el potasio (*Kalium*) es más bien retorcido, pero se ha impuesto; hay un cierto "nacionalismo" en los nombres, y así se habla de galio ( $Z = 31$ ), del francio ( $Z = 87$ ), del germanio ( $Z = 32$ ), etc. El tungsteno (o wolframio, W,  $Z = 74$ ) se descubrió por dos españoles en América, en el año 1783.

El número de Avogadro (o de Loschmidt-Avogadro) se confirma y se mide hacia 1865, e indica la "escala atómica". En particular, el número de Avogadro  $L$  cuenta el número de átomos en una unidad del gas, en ciertas condiciones "normales" de presión y temperatura (y con un volumen de 22,4 litros), donde  $L$  vale, aproximadamente,  $L \approx 6.02 \times 10^{23}$ .

El peso de esa unidad es el Peso atómico (o el molecular), lo que indica la *escala atómica*: si hay medio cuatrillón de átomos por átomo-gramo, el tamaño de átomos, supuestos "pegados" unos a otros, debe ir con la raíz cúbica de  $L$ , y así sale el diámetro del átomo del orden del Angstrom ( $1 \text{ Angstrom} = 10^{-8} \text{ cm.} = 10^{-10} \text{ m.}$ ) si se suponen los átomos "contiguos"; la densidad del agua líquida (en condiciones normales,  $\approx 1$ ) indica ya ese tamaño. El cambio de escala es tan enorme ( $\approx$  cien millones) que los átomos no son directamente observados hasta, digamos, 1950, y nuestras intuiciones humanas están basadas en el continuo, no en el discreto. Algunas "paradojas" de la moderna Mecánica Cuántica se explican por esa dicotomía, entre nuestras intuiciones macroscópicas y el mundo atómico.

De esto también se puede deducir el "peso" de los átomos, que sería el Peso Atómico dividido por el número de Avogadro. Los elementos químicos se clasifican según su Peso Atómico, lo que resulta casi igual a la clasificación por periodicidades, con algunas curiosas excepciones, debidas a la isotopía (definida después). Es en la triada hierro, cobalto y níquel donde se presenta una de esas excepciones.



**"Ciertas aleaciones existen también desde muy antiguo, como el bronce".**

Toro metálico de la Edad de Bronce.

[commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org)

## EL SIGLO XX: LA MECÁNICA CUÁNTICA

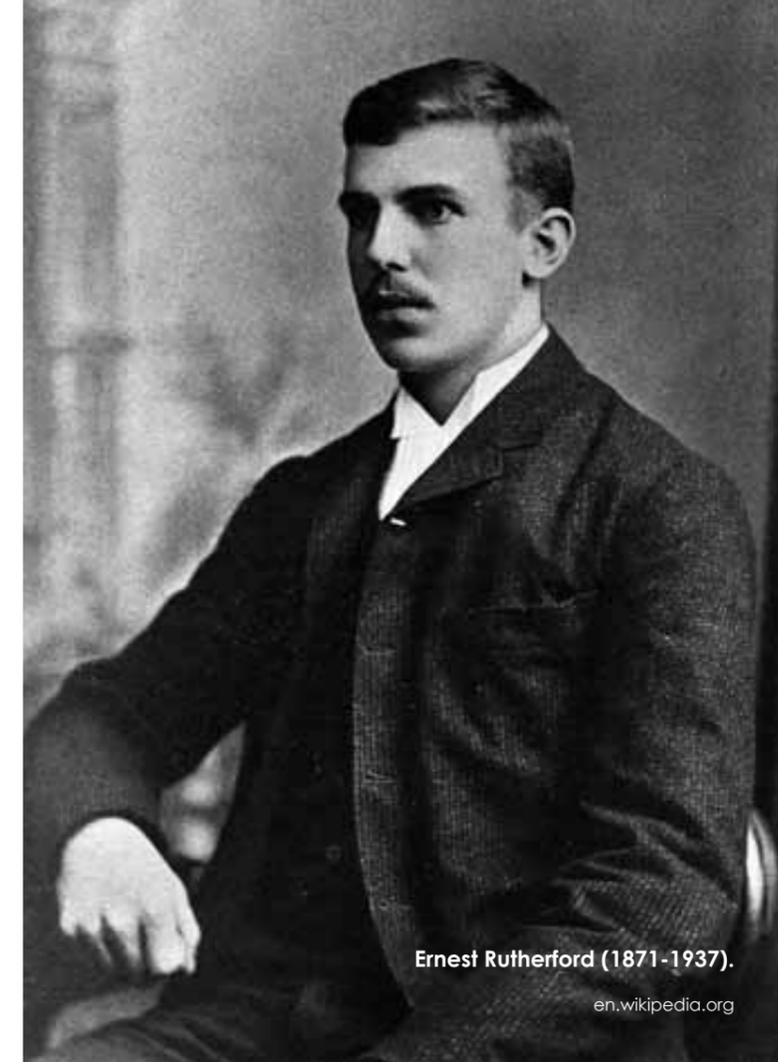
Con el descubrimiento de la radiactividad (Becquerel 1896) se abre el camino hacia la Física Atómica del s. XX. Si el siglo XIX es, científicamente, el siglo de las Matemáticas y de la Química, el siglo XX es el siglo de oro de la Física.

En particular, E. Rutherford encontró la partición del átomo en núcleo y electrones, y, en particular, la carga positiva de aquel. También identificó las partículas alfa, emitidas por las sustancias radiactivas, como el núcleo del helio. Se determinó también que había tres series radiactivas, que hoy asociamos, por sus cabezas de serie, a los tres isótopos  $^{238}_{92}\text{U}$ ,  $^{235}_{92}\text{U}$  y  $^{232}_{90}\text{Th}$ . Aquí el número superior, llamado número másico  $A$ , es  $A = N + Z$ , por tanto entero, donde  $N$  y  $Z$  son, respectivamente, el número de neutrones ( $N$ ) y de protones ( $Z$ ) del núcleo del átomo. El Peso Atómico de una especie o elemento es normalmente fraccionario, por el fenómeno de la isotopía, explicado después.

La justificación de la periodicidad de los elementos no se explicó hasta la aparición de la Mecánica Cuántica moderna. Inicialmente fue Max Planck (1900) (en el estudio de la radiación del cuerpo negro), quien introduce su constante  $\hbar$ , llamada el cuanto de acción de Planck ( $\hbar := h/2\pi \approx 10^{-27} \text{ cgs.}$ ) pero fue Niels Bohr (1885-1962) quien primero la aplicó al tratamiento de los átomos (en 1913), en los primeros modelos de estructura atómica. El átomo aparece primero (Rutherford) como compuesto por núcleo y electrones, y luego N. Bohr explicó la posible radiación emitida, por saltos de los electrones entre las órbitas posibles. N. Bohr, por otra parte,

siempre deseó aplicar las reglas cuánticas a las moléculas, en lo que no obtuvo demasiado éxito (el primer trabajo de Bohr sobre el átomo (en 1913) se titulaba "*On the Constitution of Atoms and Molecules*"; la parte tercera habla de la molécula de hidrógeno,  $\text{H}_2$ , y resulta muy poco aceptable hoy día).

La solución teórica completa del enlace químico vino con la Mecánica Cuántica moderna (Junio de 1925: W. Heisenberg, Mecánica de las Matrices. Enero 1926: Ecuación de Ondas de E. Schrödinger); pero indicaciones indirectas vinieron antes, en el dominio de lo que se llamó "Mecánica Cuántica antigua" (1913-1925): en particular, para la periodicidad química es esencial el *principio de exclusión* (W. Pauli, Enero de 1925) y los números cuánticos (principal "n" y angular "l": Sommerfeld y otros, desde 1915), ambas cosas expresadas primero postulacionalmente (su cuantificación) en el lenguaje de la Teoría Cuántica antigua.



Ernest Rutherford (1871-1937).

[en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)



www.strath.ac.uk

Ante todo, se vio que los átomos estaban compuestos (Rutherford), como decíamos, por un núcleo, con carga positiva, neutralizada por unos electrones corticales. El tamaño del átomo era el esperado, del orden del Angstrom (1 Angstrom =  $10^{-8}$  cm), mientras que el radio del núcleo era del orden de  $10^{-5}$  veces más pequeño. Que el núcleo atómico estaba compuesto por neutrones (N) y protones (Z) ( $\approx$  núcleos del hidrógeno más ligero) no se confirmó hasta 1932, con el descubrimiento del neutrón. Que protones, neutrones y electrones forman la constitución fundamental de toda la materia atómica, se mantuvo como un dogma científico de 1930 a 1970, aproximadamente, (hoy día protones y neutrones se suponen compuestos de *quarks*, concepto que no explicamos, pues no es objeto de este artículo). Que el átomo está prácticamente vacío fue una sorpresa total...

El enlace químico no se entendió, como decimos, hasta la Mecánica Cuántica moderna: en particular, en la molécula de hidrógeno  $H_2$ , que posee dos átomos neutros de hidrógeno, no se comprendió la fuerza que los une, que es

un efecto cuántico pero, en el fondo, electrostático, hasta 1927 (Heitler y London). Linus Pauling, químico americano, hizo un gran esfuerzo por entender la mayor parte de los compuestos químicos como efectos cuánticos, lo que se refleja muy bien en su libro, (ver referencia 4, quizás el libro más importante para tratar la Química cuántica). Un concepto capital, sobre todo para la Química Orgánica o del carbono, es el concepto de *Resonancia*, muy bien desarrollado en el libro de L. Pauling. Por ejemplo, en el benceno,  $C_6H_6$ , ya se da la resonancia, que es un modo de entender los enlaces dobles de los electrones.

Pero, para caracterizar los elementos químicos, se necesita más la Física atómica que la molecular; de hecho, hacen falta dos o tres conceptos de la teoría atómica para comprender los elementos químicos en su Tabla Periódica. Nos vamos a fijar en tres de esos conceptos: el número cuántico principal "n", el momento angular total "J", incluyendo el spin "s" y el principio de exclusión.  $J = l + s$ ; mientras que "l", llamado momento angular orbital, es siempre entero, el spin vale  $\frac{1}{2}$  para los electrones, protones y neu-

trones, por lo cual J es también semientero; todo va en unidades de  $\hbar = h/2\pi \approx 10^{-27}$  cgs. Agreguemos alguna masa atómica: la Masa de un átomo de hidrógeno es del orden de  $\approx 10^{-24}$  gramos, y la de un átomo arbitrario es proporcional a A veces ese número, donde  $A = N + Z$ , suma de los protones y neutrones de su núcleo, como dijimos.

El número cuántico principal n, es un número natural,  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  que no vamos a definir precisamente: aparece tanto en la Mecánica Cuántica antigua de Bohr-Sommerfeld (1913-1923) como en la Mecánica Cuántica moderna, y está muy claro en la solución de la ecuación de Schrödinger (1926).

La cuantización del momento angular también la damos por sabida, distinguiendo, como hemos dicho, entre momento angular orbital, l, que debe ser un entero en unidades de  $\hbar$  (incluyendo el posible valor 0) y el momento angular de spin, s que puede ser semientero (y lo es generalmente) en las mismas unidades. Si J es el momento angular total, escribimos  $J = (l + s) \hbar$ , donde  $\hbar$  es la constante de Planck reducida,  $\hbar = h/2\pi$ .

Tenemos, pues, las relaciones

$$n = l + 1, \quad J = l + s$$

entre el número cuántico principal n y el momento angular orbital l, que es un entero en términos de  $\hbar$ ; el momento angular intrínseco o de spin puede ser entero o semientero, como decíamos, siendo lo segundo lo más frecuente (y un problema todavía abierto: ¿por qué casi todas las "partículas elementales" tienen spin no nulo? Hay una sola excepción, de momento: El bosón de Higgs (descu-

## LOS FERMIONES Y EL PRINCIPIO DE EXCLUSIÓN

Las partículas elementales (en nuestro caso: electrones, protones y neutrones) son indistinguibles, o sea que en una teoría donde actúen N de ellas debe haber simetría para su intercambio. Pero, en Mecánica Cuántica, la simetría se traduce en una representación (en sentido técnico) del grupo respectivo, en nuestro caso del grupo simétrico SN con N símbolos (y de orden N!).

Como hemos dicho en el texto, las representaciones "elegidas" por la Naturaleza son solo dos ( para un N dado, hay tantas representaciones irreducibles como particiones del número N, donde, por ejemplo  $Part(1,2,3,4 \text{ y } 5) = (1,2,3,5 \text{ y } 7)$ , las llamadas completamente simétrica (o idéntica) y la "otra" unidimensional, que adquiere un signo "menos" para N impar. Se sigue de esto, fácilmente, el principio de exclusión de W. Pauli que dice que no puede haber dos fermiones en el mismo estado cuántico: como decimos en el texto, el principio de exclusión de Pauli es el verdadero principio diferenciador de la Naturaleza: en él está basado, por ejemplo, las propiedades químicas de los átomos.

En 1940 probó el mismo Pauli un corolario importante de su teorema: la estadística de la partículas depende de su spin: las partículas idénticas de spin entero se llaman bosones y se acogen a la representación idéntica del grupo de permutaciones, mientras que las partículas de spin semientero, que se llaman fermiones, se acogen a la representación donde vale el principio de exclusión. El hecho de que los electrones, con spin  $\frac{1}{2}$ , que es semientero, es la razón de porqué los electrones obedecen al principio de exclusión, que en esencia determina la química. Los fotones y la partícula de Higgs H (descubierta en 2012) son bosones, y no verifican el principio de exclusión. De hecho, los fotones se pueden presentar en un estado de "super-agregación" con propiedades también especiales (la llamada "condensación de Bose-Einstein").

Si preguntamos, por ejemplo, por qué el sodio es un metal "monovalente", recurrimos a su estructura electrónica: el Na, con  $Z = 11$ , que tiene como configuración fundamental  $(1s^2) (2s^2, 2p^6) (3s^1)$  y la antisimetría del "electrón de valencia hace que ese último electrón del sodio pueda "donarse" fácilmente, con lo que el sodio aparece como un elemento monovalente positivo.

El caso muy interesante es el del carbono, con configuración  $(Z = 6.- 1s^2; 2s^2-2p^2)$ : puede jugar con los cuatro electrones de la segunda capa, lo que da la tetravalencia característica del carbono, entre otras propiedades.

## Los elementos químicos

bierto en 2012); se cree que tiene spin cero, o sea que es una partícula escalar; su masa es enorme, del orden de 125 GeV, pero es neutro eléctricamente). Como comparación, la masa de un proton,  $m_p \approx 1$  GeV.

Se determinó también que los fermiones eran partículas de momento angular intrínseco (o spin) semientero,  $1/2$  casi siempre, mientras que los bosones estaban definidos por poseer spin entero (como los fotones, por ejemplo). El principio de exclusión debe ser considerado como el verdadero principio diferenciador de la naturaleza y dice que no puede haber dos fermiones idénticos en el mismo estado cuántico, véase el apartado anexo sobre "Los fermiones y el principio de exclusión". Es el responsable de las propiedades químicas de los elementos, y, por tanto, de su aspecto exterior.

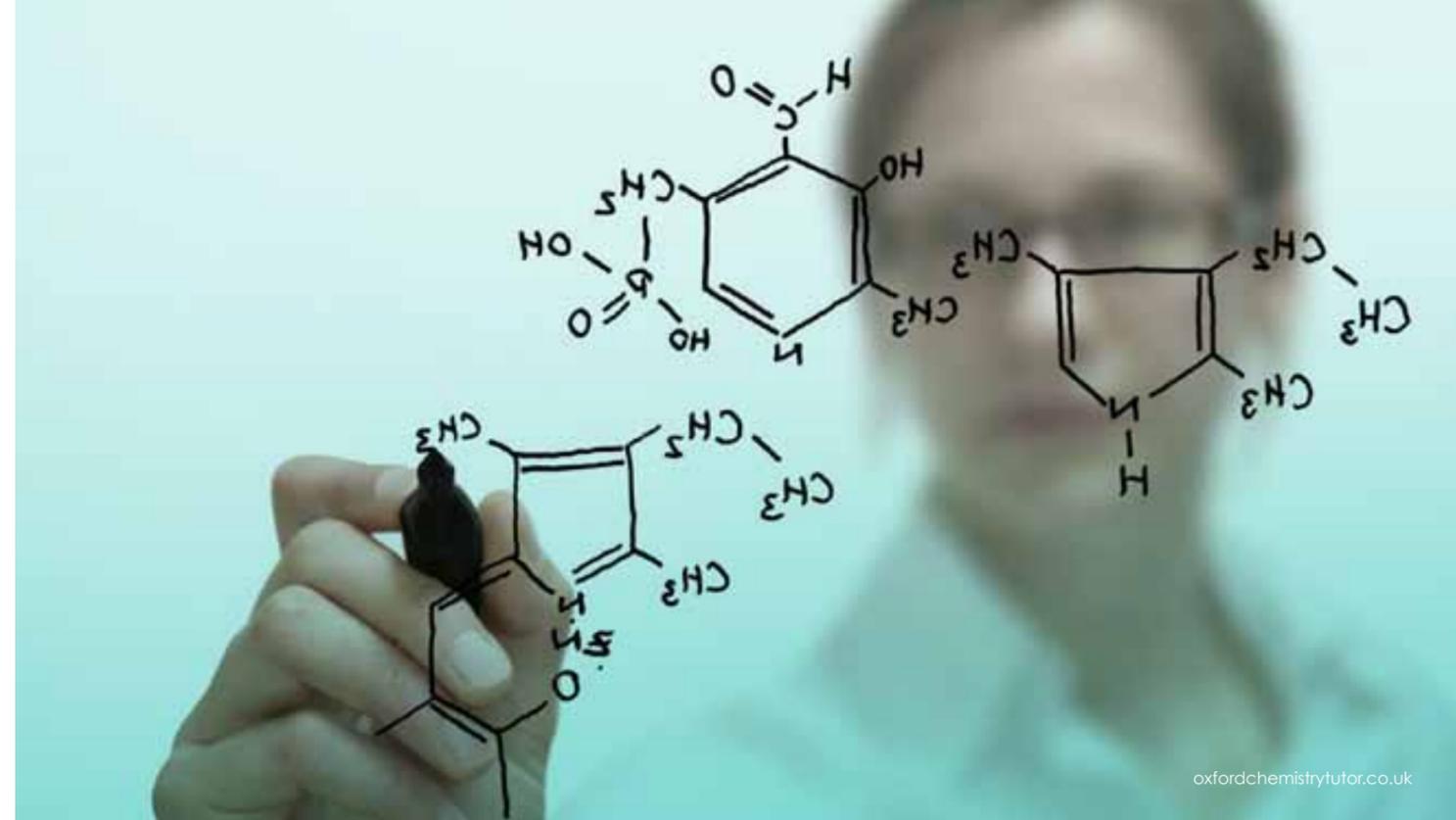
**“Que el núcleo atómico estaba compuesto por neutrones (N) y protones (Z) no se confirmó hasta 1932, con el descubrimiento del neutrón”.**

Pauli llegó a demostrar, posteriormente (1940), la conexión spin-estadística, que dice que para los fermiones rige el principio de exclusión, que señala que no puede haber dos fermiones idénticos en el mismo estado, como hemos dicho, mientras que para los bosones no existe tal restricción. La identidad de las partículas lleva, en Mecánica Cuántica, a que un conjunto de  $N$  partículas idénticas se transforme de cierta manera bajo el grupo de permutaciones  $S_N$  de  $N!$  elementos: pero la Naturaleza parece que elige solo dos representaciones irreducibles: la idéntica (o trivial,  $I$ ) para los bosones y la alternada para los fermiones (es complejo explicar esto en detalle, se sugiere ver el anexo para ampliar la información).

Sin justificar demasiado esas afirmaciones, lo que nos llevaría muy lejos y no estaría por tanto en el espíritu de este trabajo, agreguemos, sin embargo, un detalle al que ha contribuido el abajo firmante (LJB): en colaboración con el físico indio Georges Sudarshan, demostramos (2007) que el teorema Spin-Estadística no vale en dimensión arbitraria, sino solo en dimensión  $8 \bmod 4$ .



quimica0000.blogspot.com



oxfordchemistrytutor.co.uk

Veamos cómo se aplica el principio de exclusión a la clasificación de los elementos químicos (nosotros ponemos el límite en el elemento 118, aun no identificado (en Septiembre del 2015), pero con seguridad que será descubierto, más tarde o más temprano).

La Valencia química aparece como consecuencia de existir capas incompletas de electrones en los átomos. Por ejemplo:

A. Los gases nobles tienen la última capa (y quizás también las anteriores) "llena" (quiere decir, con ocho ( $= 2 (l=0) + 6 (l=1)$ ) electrones). Presentan una reactividad química muy escasa, como ya hemos señalado.

B. Los metales alcalinos se caracterizan por tener un solo electrón (no apareado, por tanto) en la última capa; así tenemos:

El Litio, ( $Z=3$ , Li); configuración electrónica  $1s^2; 2s^1$ .

El Sodio, ( $Z = 11$ , Na); configuración electrónica  $1s^2; 2s^2, 2p^6; 3s^1$ .

El potasio ( $Z = 19$ , K); configuración electrónica  $1s^2; 2s^2, 2p^6; 3s^2, 3p^6, 3d^{10}; 4s^1$ .

etc.

### OTRAS PROPIEDADES

Empecemos con el número cuántico principal,  $n$ , con valor 1. Se sigue que el momento angular orbital debe ser cero (pues  $l = n-1$ ), y solo hay dos posibilidades, según la proyección del spin:  $^1H (1s^1)$ , el elemento hidrógeno, y  $^2He (1s^2)$ , el helio (cuyo nombre proviene de que se descubrió primero, espectroscópicamente, en el Sol, como dijimos); luego vienen los elementos con  $n=2$ , que fija el momento angular orbital  $l$  en  $l=0$  ó  $1$ , y por tanto en total con ocho elementos (2 en la capa  $2s$  y 6 en la capa  $2p$ ), que escribimos, con los dos anteriores, en la Tabla al final.

Luego tenemos: para  $n = 3$ ,  $l = 0, 1$  ó  $2$ . Los dos primeros reproducen una serie parecida a la anterior (elementos desde el  $^{11}Na$  (sodio,) hasta el  $^{18}Ar$  (argón) y luego se llena la capa  $3d$ ; y así sucesivamente, hasta  $n = 5$ : (ver la Tabla).

En nuestras Tablas, hay 14 lantánidos (subcapa  $4f$ ,  $l = 3$ ) y 14 actínidos (subcapa  $5f$ ), pero ni el elemento lantano La ( $Z=57$ ) ni el actinio Ac ( $Z=89$ ) forman parte de ellos; en otras listas a veces aparecen incluidos el La y el Ac, (respectivamente en los Lantánidos y Actínidos) en cuyo caso las dos series tienen 15 elementos.

