

El modelo atómico de Bohr-Sommerfeld

The Bohr-Sommerfeld atomic model

Santiago Álvarez

Catedrático Emérito de Química Inorgánica.

Departament de Química Inorgànica i Orgànica, Secció de Química Inorgànica; Institut de Química Teòrica i Computacional UB; Universitat de Barcelona.

– En el nombre de Dios, ¿qué eres?

Así exhortada, la voz respondió:

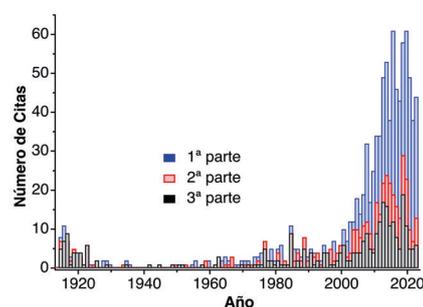
– Soy un átomo.

Tobias Smollett, *The History and Adventures of an Atom*, 1769.^[1]

El modelo atómico de Bohr,^[2] con sus electrones en órbitas circulares, y la versión mejorada de Sommerfeld,^[3-4] con órbitas elípticas y excéntricas, han dado lugar a una amplia variedad de representaciones que, aún hoy, más de un siglo después, son universalmente reconocibles como iconos del átomo, la química, la física o la energía nuclear. Hasta tal punto, que ha sido calificado como «una de las imágenes clave en la historia de la química».^[5] No sólo son símbolos universales, sino que el artículo original de Bohr^[2] y sus dos secuelas,^[6-7] conocidos como *la trilogía*, tienen una presencia destacable en la bibliografía científica actual, como nos muestra la evolución del número de citas a lo largo de los años (Figura 1a). Un largo recorrido, al principio del cual (1910) Bohr explicaba a su hermano y confidente Harald que los primeros cuatro meses de escritura de su tesis «los desperdició especulando sobre un asunto absurdo de unos electrones estúpidos».^[8]

La práctica ausencia de citas a *la trilogía* durante décadas (1930-1970) no se puede explicar sólo por el frenazo a la investigación que debió suponer la Segunda Guerra Mundial. Sorprendentemente, después de tantos años de aparente olvido esos artículos vuelven a ser citados a partir de la década de 1980, con un crecimiento exponencial del número de citas en lo que va de este siglo. Se podría pensar que el interés reciente en los artículos de Bohr fuese debido a una mayor actividad de los historiadores de la ciencia, hipótesis que podemos evaluar analizando la distribución por temas de los artículos que han citado la primera parte de la trilogía en los últimos cinco años (Figura 1b). En ese gráfico se puede ver que en realidad las publicaciones que prestan más atención a Bohr están en los campos de física (33% de las citas), química (14%) y matemáticas (13%), mientras que los estudios historiográficos tienen un peso mucho menor.

El modelo de órbitas electrónicas quedó superado al postularse la ecuación de Schrödinger en 1926,^[10] de manera que un electrón no se mueve alrededor del núcleo en órbitas fijas, sino de forma indeterminada dentro de un volumen cuya forma –para cada nivel de energía– viene dada por los orbitales atómicos. Nos encontramos, pues, con la paradoja de que un



a



b

Figura 1. (a) Evolución temporal del número de citas de cada una de las tres partes de la *trilogía* de Bohr. (b) Distribución por temas de las citas de los últimos 5 años. Gráficos elaborados a partir de datos obtenidos de la *Web of Science*.

modelo atómico obsoleto resulta omnipresente como imagen de la ciencia e inspira investigación científica actual. Posiblemente porque, a pesar de todo, nos ofrece una representación visual simple de los conceptos de niveles electrónicos y números cuánticos que se conservan en el modelo mecánico-cuántico.

Si miramos los primeros gráficos publicados de las órbitas de Bohr y Sommerfeld (Figuras 2a y 2b, respectivamente), se ve que son mucho más simples que sus representaciones en manuales de química y en otros medios que se analizarán más abajo. Aquí aparece una segunda paradoja, pues ninguno de los dos científicos incluyó tales dibujos en sus publicaciones originales, y las imágenes de la Figura 2 provienen de la conferencia que dictó Bohr^[9] a la recepción de su premio Nobel de Física en 1922. Las flechas son importantes para Bohr y Sommerfeld porque se relacionan con el espectro de emisión del átomo de hidrógeno y validan su modelo atómico pero, una vez establecido éste, las flechas no son necesarias y las representaciones prescinden de ellas. Por otro lado, los electrones no se dibujan, estando implícitos en las órbitas y en los números cuánticos, aunque la versión idealizada para consumo público prefiere darles

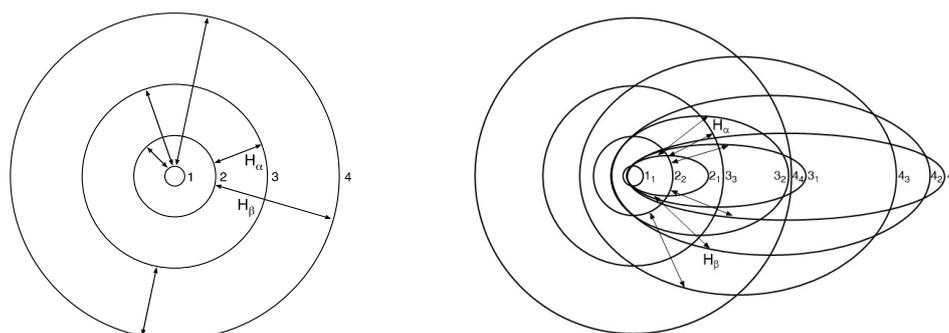


Figura 2. Modelos atómicos de Niels Bohr (a) y de Arnold Sommerfeld (b) tal como los presentó el primero en su discurso de recepción del premio Nobel de Física de 1922. Reproducido de Ref. [9]

corporeidad y los representa como pequeñas partículas en posiciones aleatorias de las órbitas. Los números cuánticos, uno en el caso de Bohr y dos en el de Sommerfeld, expresados de la forma $1_1, 2_1, 2_2,$ etc., son sofisticaciones también innecesarias en una imagen popular y esencial del átomo, que prescinde también de ellos. Obsérvese que, por ejemplo, la órbita etiquetada con los números cuánticos 2_2 (Figura 2b) sería reemplazada en la teoría actual por los tres orbitales atómicos $2p$.

portadas de libros de química o física donde aparece más frecuentemente ese icono, si bien existen algunos ejemplos como los que se ven en la Figura 3a.^[11-13] Tampoco es inesperado encontrarlo en libros de historia o historia de la ciencia^[14-18] (Figura 3b), o sobre energía atómica y armamento nuclear^[19-24] (Figura 3c). En cambio, llama la atención la ubicuidad del modelo atómico en libros infantiles y de divulgación,^[25-30] ensayos sobre diversos temas,^[31-34] libros de auto-ayuda^[35] y novelas.^[8, 34, 36-37]

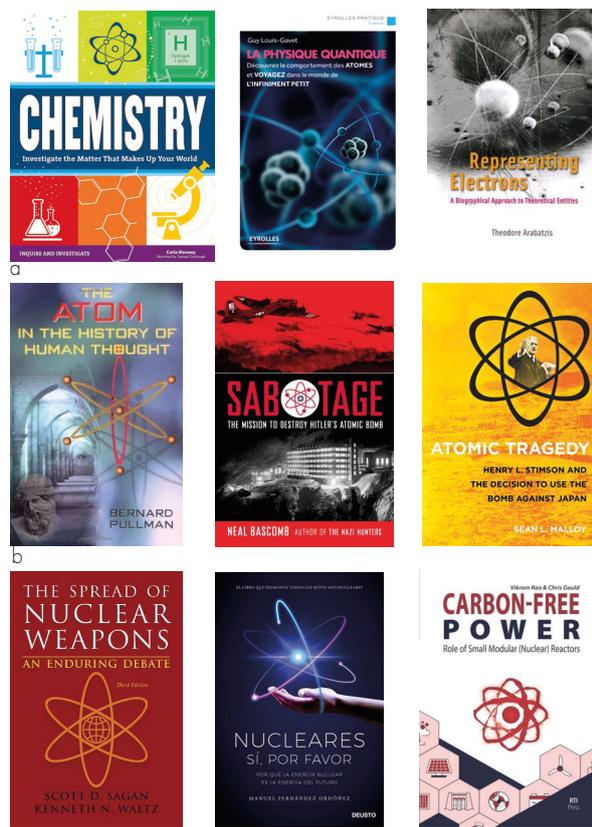


Figura 3. Portadas de algunos libros en que aparece el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld: (a) de química y física, (b) de historia, y (c) sobre energía nuclear.

Uno de los escaparates que mejor expone el poder icónico y comunicativo del modelo atómico es el de las portadas de libros. Aunque la lista de libros con portada atómica que se citan a continuación está muy lejos de ser exhaustiva, pretende ser representativa y nos permitirá hacernos una idea más completa de las numerosas variantes del modelo de Bohr-Sommerfeld que circulan actualmente por el mundo. Curiosamente no es en

También encontramos ejemplos de revistas de ciencia-ficción: *Atomic Robo* (Figura 4a) inserta el modelo atómico en el interior de la letra "O" del título en cada uno de sus números publicados desde 2007, mientras que la revista *Amazing Story* lo sitúa sobre la mano de un hombre en la portada del número de agosto de 1947 (Figura 4b) y el cómic *Captain Atom* lo muestra de forma destacada en muchas de sus portadas y en el pecho del superhéroe (Figura 4c).

Sin embargo, no es común encontrar imágenes del átomo en este tipo de revistas, cuyas portadas están llenas de héroes y heroínas, humanos y sobrehumanos, humanoides, robots, dinosaurios, naves espaciales, planetas y paisajes lunares.

El modelo atómico parece ser especialmente adecuado para logotipos de muy variada estirpe. Entre los más abundantes están los de empresas u organismos relacionados con la energía nuclear, de los cuales se puede ver una pequeñísima muestra en la Figura 5a: la Comissão Nacional de Energia



Figura 4. Portadas de revistas de ciencia ficción y cómics en que aparece el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld: (a) *Atomic Robo*, (b) *Amazing Stories* de agosto de 1947, y (c) *Captain Atom* de junio de 2017.



Figura 5. Muestra de logotipos que contienen el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld: (a) de organismos o empresas de energía nuclear, (b) de sociedades químicas nacionales o internacionales, y (c) de sociedades químicas de universidades.

Nuclear brasileña (CNEN), la empresa estatal China National Nuclear Corporation (CNNC) y la Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL). La lista se podría alargar con corporaciones de Argentina, Rusia, Japón, Rumanía, Estados Unidos, Uzbekistán, Canadá, Arabia Saudita o Pakistán. Le siguen los logotipos de sociedades científicas o sociedades químicas de estudiantes universitarios. Entre las primeras (Figura 5b) tenemos la Sociedad Química de Zimbabue, la European Chemical Society (EuChemS) y el American Chemical Council, Inc. (ACC), seguidas de una lista de sociedades de países como Lesoto, Sudán, Arabia Saudita y Filipinas.

Aparte de las empresas energéticas ya comentadas, no parece fácil encontrar logotipos de empresas de otros sectores que incluyan el modelo atómico. En Internet podemos encontrar centenares de tales logotipos, pero son sólo diseños ofrecidos por empresas vendedoras de imágenes como Alamy, Shutterstock, VectorStock, Dreamstime, iStock, etc. Sin embargo, cualquier químico reconocería fácilmente el logotipo de Bruker, fabricante de instrumentos científicos de altas prestaciones. Otros tres logotipos que he podido localizar pertenecen a las siguientes empresas: (a) Science Equip, empresa de material de laboratorio de Victoria, Australia; (b) Sachs Chemical, distribuidora de productos químicos basada en Puerto Rico, y (c) Scientific Saudi, una plataforma en línea que ofrece noticias científicas.

Quizá no sorprenda la presencia de nuestro icono atómico en multitud de sellos de correo,^[38-42] una pequeña muestra de los cuales se listan en la Tabla 1. Vale la pena destacar tres aspectos que esa lista nos revela. En primer lugar, la amplia variedad de países que han emitido sellos con esa imagen: pequeños y grandes, y de cualquiera de los cinco continentes. En segundo lugar, la variedad de motivos por los que se han emitido, que incluyen la energía atómica, el descubrimiento del electrón, u homenajes a Demócrito, Ernest Rutherford y Niels Bohr (Figura 6), así como a otros científicos: Albert Einstein, Marie Curie, Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger y Lise Meitner. Por último, las fechas de emisión muestran cómo esa imagen del átomo mantiene su vigencia década tras década.

Recientemente se ha publicado una simulación del proceso de fisión de un núcleo de ^{236}U en los instantes clave de ruptura del *cuello nuclear* (Figura 7a).^[43] De ese artículo ha hecho una reseña la revista de divulgación *Muy Interesante*,^[44] en

Tabla 1. Ejemplos de sellos de correos con el modelo atómico de Bohr-Sommerfeld, ordenados por año de emisión.

País	Año	Motivo(s)
Estados Unidos	1957	50 aniversario del estado de Oklahoma
Yugoslavia	1961	Congreso de Electrónica Nuclear
Grecia	1961	Demócrito
Mónaco	1962	Agencia Internacional de la energía atómica (IAEA)
URSS	1962	Paz
Turquía	1963	Centro de Investigación Nuclear
Dinamarca	1963	Niels Bohr
Groenlandia	1963	Niels Bohr
Congo	1964	10 aniversario de la Lovanium University
Ghana	1964	Albert Einstein
Austria	1968	Lise Meitner
Rumanía	1971	Ernest Rutherford
Francia	1975	Centenario del metro
Gran Bretaña	1978	Planta nuclear, átomo de uranio
Aitutaki, Islas Cook	1980	25 aniversario del fallecimiento de Einstein
Grecia	1983	Demócrito
Suecia	1983	Niels Bohr
República Checa	1987	Energía Atómica
España	1994	Miguel A. Catalán, átomo y espectro del Mn
Bosnia y Herzegovina	1997	Centenario del descubrimiento del electrón
Gabón	2000	Descubrimientos: primer reactor nuclear
Ecuador	2001	Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica
Nueva Zelanda	2008	Ernest Rutherford
Guinea-Bissau	2009	Ernest Rutherford
Macedonia	2011	Tabla periódica, reactor de laboratorio
Paraguay	2011	Marie Curie, Año Internacional de la Química (AIQ)
Costa de Marfil	2016	Ernest Rutherford



Figura 6. Sellos de correos dedicados a Demócrito (Grecia, 1961), Ernest Rutherford (Nueva Zelanda, 1999) y Niels Bohr (Suecia, 1982).

el que los dos átomos incipientes se representan mediante sus núcleos en el momento de separarse, rodeados por sus respectivos electrones en órbitas de Bohr-Sommerfeld (Figura 7b). La información visual se completa con la representación efectista de la abundante emisión de neutrones, rayos γ y rayos β que se produce en esa etapa del proceso de fisión.

Fijémonos ahora en algunos trazos comunes a la mayoría de las representaciones, así como en algunos detalles diferenciales. En primer lugar, la práctica totalidad de los átomos representados muestran órbitas electrónicas elípticas del modelo

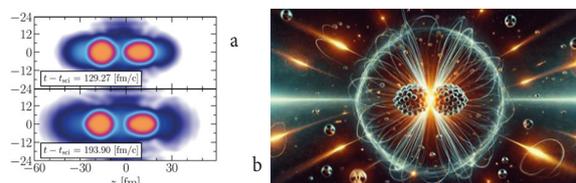


Figura 7. (a) Simulación de la distribución de densidad de neutrones (fm^{-3}) en un átomo de ^{236}U en dos instantes del proceso de fisión. Reproducido de Ref. [43], con permiso de I. Abdurrahman, M. Kalker, A. Bulgac, I. Stetcu. © 2024 de American Physical Society. (b) Representación mediante el modelo de Bohr-Sommerfeld usada en un artículo de divulgación de la revista *Muy Interesante*. Reproducido de Ref. [44]. Fuente: ChatGPT/Eugenio Fernández, reproducido con autorización.

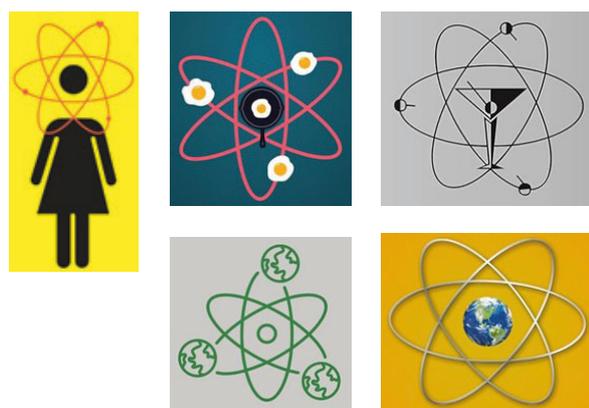


Figura 8. Detalle de algunos modelos atómicos en portadas de libros. De izq. a dcha. y de arriba a abajo: *Chemistry* [reproducido de Ref. [36]], *Chemistry for Breakfast* [reproducido de Ref. [27]], *Midcentury Cocktails* [reproducido de Ref. [32]], *El mundo como proyecto Manhattan* [reproducido de Ref. [18]], *Power to Save the World* [reproducido de Ref. [19]], *Sabotage* [reproducido de Ref. [16]].

de Sommerfeld, no las circulares de Bohr. Aquí hay que anotar que Bohr no había descartado que las órbitas pudieran ser elípticas, pero sin desarrollar la idea. En segundo lugar, observamos que en la gran mayoría de las representaciones las elipses son concéntricas, a diferencia de lo previsto en el modelo de Sommerfeld (ver Figura 1b). En muchos casos, se representan tan solo las elipses, que suelen ser suficientes, sin nada más, para sugerirnos el átomo. En otros casos los electrones se representan en las órbitas mediante pequeños círculos, que a menudo dejan una estela como los meteoritos (Figura 3c, centro). Por último, algunos hábiles diseñadores dan a los electrones una forma relacionada con el tema del libro, como un corazón (Figura 8a), unos huevos fritos (Figura 8b), unas aceitunas con palillo (Figura 8c), o unas bolas terráqueas (Figura 8d).

En cuanto al núcleo atómico, el diseño más estilizado prescinde de él, aunque más comúnmente se representa por una esfera (un círculo en las dos dimensiones del papel), ocasionalmente del mismo tamaño (Figura 3a) o menor (Figura 8d) que los electrones. Al igual que los electrones, el núcleo permite al dibujante incluir un objeto ajeno al átomo, como la cabeza de la protagonista (Figura 8a), una sartén friendo un huevo (Figura 8b), una copa de cóctel con una aceituna en su palillo (Figura 8c), una bola del mundo (Figuras 3c y 8e), una esvástica (Figura 8f), o el protagonista del libro de medio cuerpo (Figura 3b).

El lector curioso podrá encontrar nuestro icono en otros soportes con tan sólo darse un paseo por el ciberespacio, empezando por las portadas de revistas científicas o de divulgación científica como *Nature*, *Science*, *Scientific American*, *NewScientist*, *Popular Science*, *Chemical and Engineering News*, *Science et Vie*, o *Chemistry World*. Un caso que merece mención aparte es el del reportaje publicado en la revista *Life* del 16 de mayo de 1949, titulado "El átomo. Un manual para profanos: de qué está hecho el mundo", en extensas veinte páginas (publicidad incluida), y acompañado de excelentes fotografías de experimentos químicos hechas por Fritz Goro,

fotógrafo al que me he referido anteriormente,^[45] y de espectaculares ilustraciones sobre fondo negro de las órbitas (azules) y los núcleos (protones rojos, neutrones verdes) de los átomos de hidrógeno, helio, litio, berilio y uranio, este último a toda página en gran formato (26x36 cm). Encontrará también muchos otros artilugios que lucen ese icono en multitud de ciber tiendas: camisetas, corbatas, pines de solapa, toallas de manos, mascarillas, tazones, esculturas, carátulas de discos, monedas, billetes de banco, o un capítulo de *Los Simpson* titulado "El aburrido mundo de Niels Bohr".

Conclusión

El símbolo que representa el modelo orbital del átomo es un icono fácilmente reconocible, de carácter universal y cuyo uso se ha extendido por más de un siglo. Es, además, una imagen polisémica que puede simbolizar la química, la física, la ciencia en general, o la energía atómica. En este artículo se ha explorado a vista de pájaro la ubicuidad del modelo de Bohr-Sommerfeld, sin intención de ser exhaustivos, poniendo especial atención a las portadas de libros y revistas, logotipos comerciales e institucionales y sellos de correo.

Agradecimientos

El autor agradece al Prof. Daniel Rabinovich su contribución con sugerencias y material gráfico y bibliográfico a la sección dedicada a los sellos de correos.

Bibliografía

- [1] T. Smollett, *Historia y aventuras de un átomo*, El Paseo, Sevilla, **2024**.
- [2] N. Bohr, *Phil. Mag. Ser. 6* **1913**, 23, 1-24.
- [3] A. Sommerfeld, *Sitzungsberichte math-physik. K. B. Akad. Wissenschaften München* **1915**, 459-500.
- [4] A. Sommerfeld, *Eur. Phys. J. H* **2014**, 39, 157-177.
- [5] J. D. Barrow, *Cosmic Imagery*, The Bodley Head, Londres, **2008**.
- [6] N. Bohr, *Phil. Mag. Ser. 6* **1913**, 23, 476-502.
- [7] N. Bohr, *Phil. Mag. Ser. 6* **1913**, 26, 857-875.
- [8] F. Aaserud, J. L. Heilbron, *Love, Literature and the Quantum Atom*, Oxford University Press, Oxford, **2013**.
- [9] N. Bohr, in *Nobel Lectures, Physics 1922-1941*, Elsevier, Amsterdam, **1965**.
- [10] E. Schrödinger, *Phys. Rev.* **1926**, 28, 1049-1070.
- [11] C. Mooney, *Chemistry. Investigate the Matter That Makes Up Your World*, Nomad Press, Norwich, VT, **2016**.
- [12] G. Louis-Gavet, *La physique quantique*, Eyrolles, París, **2011**.
- [13] T. Arabatzis, *Representing Electrons. A Biographical Approach to Theoretical Entities*, University of Chicago Press, Chicago, **2006**.
- [14] P. Rousseau, *Historia del átomo*, Editorial Colenda, Madrid, **1958**.
- [15] B. Pullman, *The Atom in the History of Human Thought*, Oxford University Press, Oxford, **1998**.
- [16] N. Bascomb, *Sabotage. The Mission to Destroy Hitler's Atomic Bomb*, Scholastic Focus, New York, **2021**.
- [17] S. L. Malloy, *Atomic Tragedy. Henry L. Stimson and the Decision to Use the Bomb Against Japan*, Cornell University Press, Ithaca, NY, **2008**.
- [18] J.-M. Royer, *El mundo como proyecto Manhattan*, Pepitas de Calabaza y El Salmón, Logroño, **2022**.
- [19] G. Cravens, *Power to Save the World. The Truth About Nuclear Energy*, Knopf, New York, **2007**.
- [20] M. Fernández Ordóñez, *Nucleares sí, por favor*, Deusto, Barcelona, **2023**.
- [21] V. Rao, C. Gould, *Carbon-Free Power, Role of Small Modular (Nuclear) Reactors*, RTI Press, Research Triangle Park, NC, **2022**.
- [22] C. Tucker, W. Market, *How to Drive a Nuclear Reactor*, Springer, **2020**.

- [23] S. D. Sagan, K. N. Waltz, *The Spread of Nuclear Weapons, and Enduring Debate*, 3^o ed., W. W. Norton, Nueva York, **2012**.
- [24] J. C. Lee, *Nuclear Reactor Physics and Engineering*, Wiley, Nueva York, **2020**.
- [25] S. Writes, *Intro to Chemistry. Coloring Workbook*, CreateSpace Independent Publishing, **2016**.
- [26] M. Carter, *Entrevista al Sr. Átomo*, Círculo Rojo, Roquetas de Mar, **2019**.
- [27] M. T. Nguyen-Kim, *Chemistry for Breakfast. The Amazing Science of Everyday Life*, Greystone Books, Vancouver, **2022**.
- [28] P. Zarshenas, *De los átomos a las ondas. Un viaje a través de la teoría atómica. De la era de Demócrito a Schrödinger*, Eds. Nuestro Conocimiento, **2024**.
- [29] Big-Van, *Cómo explicar física cuántica con un gato zombi*, Alfaguara, Madrid, **2016**.
- [30] I. Asimov, *Atom. Journey Across the Subatomic Cosmos*, Penguin, Londres, **1992**.
- [31] R. F. Tyson, *Nuclear Verdicts. Defending Justice for All*, Law Dog Publishing, La Jolla, **2020**.
- [32] C. Tichi, *Midcentury Cocktails. History, Lore, and Recipes from America's Atomic Age*, New York University Press, Nueva York, **2022**.
- [33] S. Casey, *The Atomic Chef: And Other True Tales of Design, Technology, and Human Error*, Aegean Pub. Co., Santa Barbara, CA, **2006**.
- [34] C. H. McElroy, *Atomic Family*, Blair, Durham, NC, **2023**.
- [35] L. Conti, *Atomic Steps. From a Negative Mindset to a Positive Mindset through a 7 Day Process for Lifelong Benefits*, Norden Pacific Press, Estocolmo, **2024**.
- [36] W. Wang, *Chemistry*, Knopf, Nueva York, **2017**.
- [37] S. Niemeier, *Atomic Peril. A Nuclear Forensics Thriller*, Quantum Publishing, Londres, **2023**.
- [38] D. Rabinovich, *Rev. Quím.* **2007**, 21, 49-53.
- [39] M. A. Morgan, *Philatelia Chim. Phys.* **2006**, 28, 35-43.
- [40] D. Rabinovich, *Jaén Filatélico* **2011**, 19, 27-30.
- [41] D. Rabinovich, *Jaén Filatélico* **2012**, 20, 23-25.
- [42] Z. Rappoport, *Acc. Chem. Res.* **1992**, 25, 24-31.
- [43] I. Abdurrahman, M. Kafker, A. Bulgac, I. Stetcu, *Phys. Rev. Lett.* **2024**, 132, 242501.
- [44] E. M. Fernández-Aguilar, "Por fin sabemos qué sucede cuando un átomo se parte en dos: desvelan el momento exacto de la fisión nuclear": https://www.muyinteresante.com/ciencia/que-sucede-atomo-parte-en-dos.html?utm_term=Autofeed&utm_medium=Social&utm_source=Twitter#Echobox=1730743401.
- [45] S. Alvarez, *An. Quím.* **2018**, 114, 257-267.



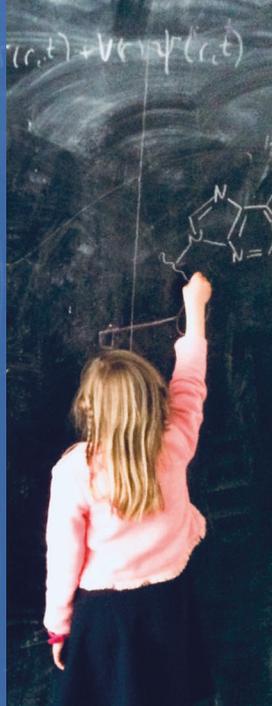
Santiago Álvarez

Catedrático Emérito de Química Inorgánica. Departament de Química Inorgànica i Orgànica, Secció de Química Inorgànica; Institut de Química Teòrica i Computacional UB

C-e: santiago.alvarez@qi.ub.edu
ORCID: 0000-0002-4618-4189

¿Quieres formar parte de una de las sociedades científicas más importantes de España?

Si tienes menos de 26 años hazte miembro por 15€





Real Sociedad Española de Química
www.rseq.org

