

Einstein y la Química

Einstein and Chemistry

Julio A. Alonso

Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid.

PALABRAS CLAVE:

Einstein
Energía
Masa
Reacciones químicas

RESUMEN:

El trabajo de Einstein se enmarca en el campo de la física. Su resultado más popular, la famosa ecuación $E = mc^2$, que da el equivalente energético de una masa m , tiene consecuencias importantísimas en la física nuclear, pero también en la química, pues ayuda a interpretar a un nivel fundamental el origen de la energía que se libera en las reacciones químicas. Esa energía de las reacciones químicas procede de un diminuto cambio de masa cuando los reactivos se convierten en los productos de la reacción. El cambio es solo del orden de una parte en 100 millones (10^{-8}), pero esto es la química.

KEYWORDS:

Einstein
Energy
Mass
Chemical reactions

ABSTRACT:

Einstein's work is framed in the field of physics. His most popular result, the famous equation $E = mc^2$, giving the energy equivalent of a mass m , has very important consequences in nuclear physics, but also in chemistry, because it helps to provide a fundamental interpretation to the origin of the energy released in chemical reactions. That energy appears in the chemical reactions as a result of a tiny mass change when the reactant species transform into the products of the reaction. The change is of the order of a part in 100 millions (10^{-8}) only, but it gives the whole of chemistry.

Introducción

Albert Einstein ha sido uno de los científicos más eminentes y más populares de la edad contemporánea. Se le admira por sus aportaciones cruciales a la Física. Varias de sus contribuciones más conocidas se publicaron en 1905, el "año milagroso" de Einstein. Una de ellas es el desarrollo de la Teoría de la Relatividad Especial,^[1] en la que, entre otras cosas, introdujo la equivalencia entre masa y energía,^[2] que está en el foco del presente artículo. De igual importancia es la explicación del efecto fotoeléctrico, que consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con luz (radiación electromagnética). La explicación de Einstein,^[3] que introduce el concepto de fotón (cuanto de luz), fue clave en el desarrollo de la Física Cuántica y por este trabajo fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1921. La tercera contribución es la explicación del movimiento browniano, el movimiento aleatorio de una partícula de polvo en el aire, o de un grano de polen en el agua. Einstein demostró que ese movimiento aleatorio se debe a los choques de la partícula con las moléculas del fluido (líquido o gas) que la rodean.^[4] La explicación sirvió para confirmar la existencia de átomos y moléculas, que hasta entonces era solo una hipótesis. ¡Y todas estas contribuciones prodigiosas las publicó Einstein como único autor en un solo

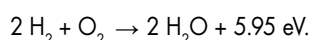
año, 1905! Posteriormente, Einstein siguió publicando mucha y buena ciencia y sus resultados tuvieron, en la mayor parte de los casos, un impacto inmediato, aunque en algún caso el impacto se retrasó. Solo recordaré dos ejemplos, uno en cada categoría. En 1916 presentó la Teoría de la Relatividad General,^[5] que es una teoría de la gravedad, en la que la interacción gravitatoria se interpreta como una deformación en la geometría del espacio-tiempo. Su repercusión fue inmediata, y ha sido fundamental en el desarrollo de la cosmología. En colaboración con Boris Podolsky y Nathan Rosen, publica en 1935 un artículo que se conoce como la paradoja EPR (por las iniciales de los autores).^[6] En el artículo, los autores presentaron y analizaron un experimento mental y concluían que la mecánica cuántica es una teoría incompleta. El artículo tuvo poco impacto y durante 30 años apenas fue citado en otros artículos (no hay que olvidar que la comunidad de investigadores era muy reducida, comparada con la actual). Pero la situación cambió después drásticamente, pues mediante trabajos teóricos y experimentales (que llevaron a la concesión de premios Nobel) se resolvió la paradoja y se confirmó que la mecánica cuántica no tenía ese problema. Además, Einstein y sus colaboradores habían puesto de manifiesto en su artículo la existencia del entrelazamiento cuántico, en el que dos partículas inicialmen-

te correlacionadas (entrelazadas), continúan correlacionadas aunque se separen a gran distancia una de la otra. Se esperan aplicaciones del entrelazamiento en ordenadores cuánticos y para encriptar información y conseguir comunicaciones más seguras. Debido a esto, el artículo EPR revivió y ya ha acumulado casi doce mil citas en la base de datos Web of Science.

Todo lo anterior es física. ¿Pero, contribuyó Einstein a la química? Al principio de su carrera investigadora, y adoptando el criterio actual de que las fronteras entre disciplinas son tenues, sí que se puede considerar que tiene algunas contribuciones relacionadas con la química: en concreto, el mencionado artículo sobre el movimiento browniano y los artículos sobre las dimensiones de las moléculas,^[4,7,8] muy ligados a este. De hecho, en el artículo sobre el movimiento browniano Einstein deduce una fórmula para calcular el número de Avogadro N_A (número de moléculas que hay en un mol de una sustancia) en términos del desplazamiento cuadrático medio de las moléculas del fluido. Después, Perrin midió el desplazamiento cuadrático medio en una dispersión coloidal y aplicó la fórmula de Einstein para obtener N_A .^[9] Pero hay un resultado en los trabajos de Einstein sobre relatividad especial, la equivalencia entre masa y energía, que tiene una enorme repercusión en química y sin embargo pasa desapercibido normalmente para los químicos. Esa equivalencia ayuda a interpretar correctamente la energía de las reacciones químicas y el objetivo de este artículo es poner este hecho de manifiesto.

La energía de las reacciones químicas

Consideremos como ejemplo la reacción entre dos moléculas de hidrógeno (H_2) y una de oxígeno (O_2) para dar dos moléculas de agua (H_2O):



En esta reacción se libera una energía de 5.95 eV. El electronvoltio (eV) es una unidad poco usada en química (donde lo normal es usar kcal/mol), pero tiene la ventaja de que las energías de las reacciones sencillas como la anterior están entre 1 y 10 eV. ¿Cuál es el origen de la energía liberada? Los libros de química nos proporcionan la respuesta: se rompen enlaces en las moléculas H_2 y en la molécula O_2 y se crean enlaces entre dos átomos H y un átomo O para formar las moléculas H_2O . Para romper enlaces químicos hay que aportar energía, mientras que la formación de enlaces libera energía. El balance neto en la reacción que nos ocupa es que se libera una energía de 5.95 eV. Esta explicación nos deja satisfechos, pero hay una explicación más profunda, basada en los resultados de Einstein. Para entenderla, vamos a ayudarnos de un experimento mental que se muestra en la Figura 1. Depositamos en un platillo de una balanza dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno y en el otro platillo dos moléculas de agua. ¿Se inclina la balanza hacia algún lado? Pues sí; se inclina hacia el lado de los reactivos. La interpretación es que en el proceso de la reacción se ha perdido algo de masa. ¿Cómo puede ser esto? ya que parece violar la ley de Lavoisier: la conservación de la masa en una reacción química.

Recordemos la famosa ecuación de Einstein que da la equivalencia entre la masa y la energía:^[2]

$$E = m c^2$$

que es un resultado que ha calado en la cultura popular. En esta ecuación, m es la masa de un cuerpo, c es la velocidad de la luz y E es la energía en reposo que se obtendría si fuésemos

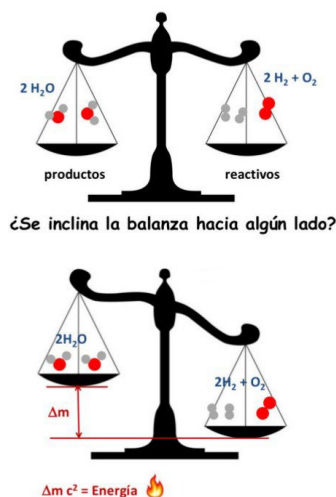


Figura 1. Si colocamos dos moléculas H_2 y una molécula O_2 en un plato de una balanza y dos moléculas H_2O en el otro, la balanza se inclinaría hacia el lado de los reactivos, pues hay una pequeña pérdida de masa que se convierte en la energía de la reacción.

capaces de convertir esa masa m en energía. Esa conversión de masa en energía no es nada fácil, pero existe evidencia de procesos en los que una parte de la masa se convierte en energía. Por ejemplo, en reacciones nucleares de fisión en los reactores nucleares o en las bombas nucleares. También ocurre en la aniquilación entre un electrón (e^-) y su antipartícula, el positrón (e^+), creando dos fotones (rayos γ).^[10] Este proceso es la base de las imágenes en los escáneres por tomografía de emisión de positrones (PET),^[11] usados en medicina. Los positrones se originan en la desintegración β del núcleo de átomos radiactivos inyectados en pequeñas dosis a los pacientes y esos positrones se aniquilan con los electrones de los átomos del tejido biológico cercano. Menos común, pero también posible, es la transformación de energía en materia, como la creación de un par electrón-positrón cuando un fotón de suficiente energía choca con el núcleo de un átomo.^[12] Pues bien, la energía que se libera en la reacción del hidrógeno con el oxígeno proviene de la diminuta pérdida de masa en la reacción. A la vista de la ecuación de Einstein puede notarse que, si en la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno para producir agua no hubiese un cambio de masa, entonces la energía liberada en la reacción habría aparecido misteriosamente de la nada.

La materia puede convertirse en energía y viceversa, pero la ecuación de Einstein no dice que materia y energía sean lo mismo. No lo son en absoluto. Sin embargo, a veces se cae en el error de pensar que son lo mismo, y se ha llegado al sinsentido de decir que un fotón de energía $E = h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia, tiene una masa $m = h\nu/c^2$.^[13] El fotón, que es radiación electromagnética, tiene masa cero.

Escala de energías en física nuclear y en química

¿Cuánta energía se obtendría al convertir un gramo de materia en energía? No hay más que multiplicar un gramo por el cuadrado de la velocidad de la luz y el resultado es 90 terajulios = 90×10^{12} julios = 5.6×10^{32} eV. Esta enorme energía es la misma que se liberaría en la explosión de veinte mil toneladas de TNT.

Para estimar la energía que se libera en una reacción nuclear, vamos a considerar la fisión del núcleo ${}_{92}^{238}U$. Este es un isótopo del uranio (número atómico = 92) que tiene 146 neutrones. Así, el número másico es $92 + 146 = 238$. Este es el

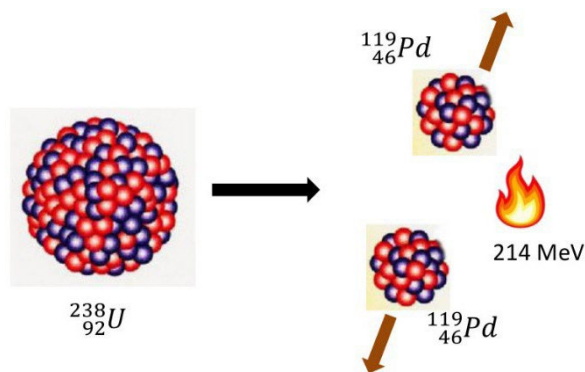
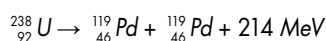


Figura 2. Fisión del núcleo $^{238}_{92}\text{U}$ en dos núcleos $^{119}_{46}\text{Pd}$. Se libera una energía de 214 MeV. Las esferas azules representan protones y las rojas neutrones. La fisión no es espontánea, sino que necesita superar una barrera de activación.

isótopo del uranio más abundante en la tierra. El núcleo puede romperse en dos mitades iguales: dos núcleos del isótopo $^{119}_{46}\text{Pd}$ del paladio,



como se muestra en la Figura 2. La reacción es posible, aunque muy poco probable, debido a que existe una barrera de activación alta (barrera de fisión), que hace que el tiempo de vida del $^{238}_{92}\text{U}$ con respecto a esta reacción sea enorme; y de hecho ese núcleo tiene formas de desintegración más favorables.^[14] Pero cuando la fisión simétrica ocurre, se libera una energía de 214 MeV (214 millones de eV). Teniendo en cuenta la ecuación de Einstein, esto significa que un 0.1 % (una parte en mil) de la masa del núcleo $^{238}_{92}\text{U}$ se ha convertido en energía. Este ejemplo sirve para dar una idea de la escala de energías propia de las reacciones nucleares, y por tanto de la magnitud de los cambios de masa asociados. El mismo ejemplo nos sirve para tener una idea de la magnitud de las barreras de activación de las reacciones nucleares, que en este caso puede estimarse en algo más de 30 MeV.^[14]

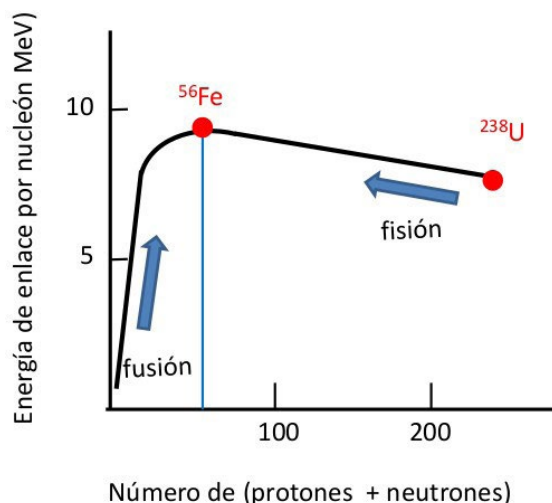


Figura 3. Energía de enlace por nucleón en función del número de nucleones (protones + neutrones) del núcleo. El máximo ocurre para $^{56}_{26}\text{Fe}$. Hay tendencia a la *fisión* de núcleos más pesados que $^{56}_{26}\text{Fe}$; y tendencia a la *fusión* de núcleos menos pesados, especialmente núcleos muy ligeros pues la variación de la energía de enlace es abrupta. En ambos casos se gana energía de enlace.

Para entender por qué la fisión de $^{238}_{92}\text{U}$ libera energía, fijémonos en la Figura 3. La energía de enlace de un núcleo es

$$E_{\text{enlace}} = (n_p m_p + n_n m_n) c^2 - m(\text{núcleo}) c^2$$

Es decir, es el equivalente en energía, $\Delta m c^2$, de la masa perdida en la formación del núcleo a partir n_p protones y n_n neutrones. La Figura 3 (muy esquemática; en realidad la curva de la energía de enlace por nucleón no es tan suave), muestra que la máxima energía de enlace por nucleón se alcanza para el núcleo $^{56}_{26}\text{Fe}$, un isótopo del hierro. Por tanto, para aumentar la estabilidad es favorable que un núcleo pesado se rompa en dos menos pesados, y también que dos núcleos muy ligeros se fusionen para dar otro no tan ligero. Por supuesto, estos procesos de fisión y fusión normalmente tienen barreras de activación.

En contraste, las energías de las reacciones químicas son muchísimo más pequeñas. En la reacción de combustión del hidrógeno se liberan 5.95 eV, lo que corresponde a un cambio de masa de una parte en cien millones ($10^{-6}\%$). Este cambio es minúsculo y muestra la gran diferencia de escala de energías entre la física nuclear y la química. Podemos expresar la pérdida de masa en las reacciones químicas usando un lenguaje común en la física: la masa de un átomo *desnudo* no es la misma que la de ese átomo *vestido* en una molécula. Este concepto se visualiza muy bien en la formación de la molécula H_2 a partir de dos átomos H. La diferencia de masa, multiplicada por c^2 , es precisamente la energía de enlace de la molécula, 4.48 eV. Otro ejemplo sencillo es la formación de un átomo de hidrógeno cuando un electrón (e) es capturado por un protón (p), cuya masa es casi dos mil veces mayor que la masa del electrón. La masa que se pierde en la formación del átomo de hidrógeno es del orden de una cienmillonésima de la masa original y la diferencia

$$\Delta m c^2 = (m_p + m_e) c^2 - m(\text{H}) c^2 = 13.6 \text{ eV}$$

es la energía de enlace (o energía de ionización), que aparece en cualquier libro de física cuántica,^[15] o de química física.^[16]

Para convencernos de lo pequeñas que son las energías de la química, en comparación con las de la física nuclear, podemos preguntarnos qué partículas podrían crearse si fuésemos capaces de transformar las energías típicas de las reacciones químicas, por ejemplo, los 5.95 eV que se liberan en la reacción del hidrógeno con el oxígeno para producir agua, en masa; experimento, por supuesto, irrealizable en la práctica. No se podrían crear electrones, cuya masa m_e es tal que $m_e c^2 = 0.511 \times 10^6 \text{ eV}$. Las únicas partículas con masas compatibles serían los elusivos neutrinos. Después de mucho trabajo experimental, la actual cota superior a la masa del neutrino es de 0.5 eV.^[17]

¿Y la Ley de Lavoisier?

La ley de Lavoisier propone que la masa total permanece constante durante una reacción química en un sistema aislado.^[18] Sin embargo, acabamos de ver que hay un diminuto cambio de masa en las reacciones químicas. ¿Hay inconsistencia entre estos dos puntos de vista? Definitivamente, no, pues

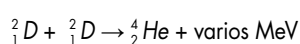
$$[2 m(\text{H}_2) + m(\text{O}_2)] c^2 = [2 m(\text{H}_2\text{O})] c^2 + 5.95 \text{ eV}$$

Es decir, la diminuta masa perdida se ha transformado en la energía liberada en la reacción. Una manera correcta de interpretar hoy día la ley de Lavoisier dentro de la química es declarar que el número de átomos de cada elemento químico

permanece constante en una reacción química (nótese que Dalton propuso la teoría atomística veinte años después del trabajo de Lavoisier, y que la confirmación de la existencia de los átomos, en la que estuvo implicado Einstein,^[4] se demoró otros cien años). Pero como materia y energía no son lo mismo, si queremos hablar únicamente en términos de la masa, podemos afirmar que la masa permanece constante en una reacción química con un error aproximado de una parte en cien millones. Pienso que Lavoisier no pondría objeciones a esta interpretación.

Consecuencias de la disparidad de energías y barreras de reacción entre la química y la física nuclear

Hemos visto que las energías de reacción y las barreras de activación en las reacciones de la física nuclear son del orden de los MeV. Por otra parte, en las reacciones químicas estas energías y barreras son del orden de los eV. Esto nos permite comentar un caso sonado y curioso que se dio hace ya treinta y seis años, el caso de la fusión fría.^[19] En 1989 Fleischmann y Pons y un grupo competidor,^[20,21] publicaron trabajos en los que anunciaban que habían conseguido la fusión de núcleos de deuterio (un isótopo del hidrógeno con un núcleo formado por un protón y un neutrón) en experimentos de electroquímica ordinaria. El hidrógeno se disuelve en cantidad abundante en el interior de paladio sólido y también de otros metales,^[22] formando hidruros metálicos. El hidrógeno disuelto se aloja en huecos intersticiales entre los átomos de la red cristalina del metal. De hecho, este es un método que se ha propuesto para almacenar hidrógeno.^[23] En los experimentos de los autores mencionados anteriormente se usó un procedimiento electroquímico para descomponer el agua y disolver el hidrógeno en electrodos de paladio sólido. La novedad era que en lugar de agua ordinaria usaban agua pesada (D₂O), cuyas moléculas están formadas por oxígeno y deuterio (D). Al medir la temperatura de la celda electroquímica durante el experimento *su análisis* indicaba que se producía mucho más calor del esperado, e interpretaron ese exceso de calor como evidencia de la fusión de núcleos de deuterio. En la reacción de fusión de dos núcleos de deuterio se produce un núcleo de helio (un núcleo ${}^4_2\text{He}$ está formado por dos protones y dos neutrones) y una gran cantidad de energía (varios MeV)



En primer lugar, la física nuclear nos enseña que esos núcleos ${}^4_2\text{He}$ que se forman están muy excitados y emiten un neutrón (transformándose en núcleos ${}^3_2\text{He}$), o bien un protón (transformándose en tritio ${}^3_1\text{H}$, un isótopo del hidrógeno con dos neutrones), o bien radiación electromagnética. También nos dice la física nuclear que esta reacción de fusión necesita condiciones tan extremas de presión y temperatura, que en la naturaleza solo se da en las estrellas, que son fábricas de helio, lo cual debería haber hecho reflexionar a los autores de esos trabajos. Después del anuncio de la fusión fría (el apodo proviene del hecho de que los experimentos electroquímicos se hacían a temperatura ambiente), en muchos centros de investigación se adaptaron rápidamente laboratorios para investigar la fusión fría. Al principio, incluso se anunciaban algunos resultados aparentemente positivos y se proponían teorías para explicarlos. De hecho, en una visita al International Center for Theoretical Physics (ICTP) de Trieste en 1989, asistí una tarde y en un auditorio abarrotado, a un debate muy agitado para discutir la fusión fría y pocas veces he oído decir tantas cosas sin sentido a algunos investigadores. Pero ningún grupo fue capaz de reproducir de manera convincente esos resultados, lo que

indica que los experimentos originales incluían errores de planteamiento, de ejecución, de interpretación, o mezcla de todos. En poco tiempo el interés decayó por la falta de consistencia y reproducibilidad de los resultados y hoy se recuerda esta historia como una penosa anécdota. Un argumento con fuerza en contra de la fusión fría es que experimentos de otros autores no encontraron helio ni neutrones.

Pero hay otro argumento sencillo, muy relacionado con el tema del presente artículo, en contra de la fusión fría. Aunque la reacción de dos núcleos de deuterio para dar un núcleo ${}^4_2\text{He}$ libera varios MeV de energía, la reacción tiene una barrera de activación. Los núcleos de deuterio tienen carga eléctrica positiva y por tanto se repelen. La barrera de activación es la energía necesaria para acercar un núcleo al otro a una distancia a la que actúen las fuerzas nucleares que promueven la fusión de los dos núcleos. El alcance de las fuerzas nucleares es cortísimo, del orden de la cienmilésima parte de un Angstrom (Å). A distancias de ese orden entre los dos núcleos, la repulsión electrostática es del orden de 0.1 MeV (10⁵ eV) y esta es la barrera (de Coulomb) que hay que superar para que ocurra la fusión. Según la mecánica cuántica, aunque no se alcance esa energía hay cierta probabilidad de atravesar esa barrera por efecto túnel, pero en cualquier caso los dos núcleos tendrían que estar a distancias entre la cienmilésima y la diezmilésima parte de un Angstrom. El argumento que se usaba para justificar la pretendida fusión fría era que en los huecos intersticiales (huecos entre átomos) dentro del paladio metálico, los átomos de deuterio acumulados en cada uno de esos huecos estaban tan cercanos entre sí que los núcleos se podían fusionar. Pero una cosa es estar cerca (las distancias entre átomos vecinos en las moléculas o en los materiales sólidos, incluso a presión, raramente son menores de un Å) y otra que los dos núcleos puedan llegar a estar a una distancia de 10⁻⁴ o 10⁻⁵ Å, necesaria para atravesar la barrera de repulsión electrostática. ¿Qué mecanismo podría producir la enorme energía para atravesar la barrera de fusión nuclear en un experimento de química ordinaria? No existe tal mecanismo. La única energía disponible podría ser la energía de reacción al disolverse el hidrógeno en el paladio sólido, pero como se vio en una Sección anterior, las reacciones químicas individuales producen energías de uno o varios eV, así que no hay ninguna posibilidad de acumular una energía de casi 10⁵ eV para superar la barrera de fusión. Es decir, con la química no se puede hacer física nuclear. El tener en cuenta este sencillo argumento podría haber evitado mucho trabajo inútil.

Conclusión

El resultado más conocido de Albert Einstein, la famosa ecuación $E = mc^2$ que da el equivalente energético de una masa m , tiene consecuencias muy importantes para entender las energías de formación de moléculas a partir de los átomos componentes y las energías de las reacciones químicas. Esas energías de reacción, o de formación de moléculas, corresponden a un cambio minúsculo de la masa en la reacción y esa masa perdida se transforma en energía. Ese cambio de masa, de una parte en cien millones (10⁻⁶%), es diminuto, pero da lugar a la química.

Agradecimientos

La investigación del Grupo de Física de Nanoestructuras de la Universidad de Valladolid está apoyada por el proyecto PID20221383400BI00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+ y por la Junta de Castilla y León (Apoyo a GIR, proyecto VA029G24). Agradezco los comentarios de J. F. Pascual Sánchez y Emilio Santos.

Bibliografía

- [1] A. Einstein, *Ann. Physik* **1905**, *17*, 891-921, <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>.
- [2] A. Einstein, *Ann. Physik* **1905**, *18*, 639-641, <https://doi.org/10.1002/andp.19053231314>.
- [3] A. Einstein, *Ann. Physik* **1905**, *17*, 132-148, <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>.
- [4] A. Einstein, *Ann. Physik* **1905**, *17*, 549-560, <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>.
- [5] A. Einstein, *Ann. Physik* **1916**, *49*, 769-822, <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>.
- [6] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **1935**, *47*, 770-780, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.
- [7] A. Einstein, *Ann. Physik* **1906**, *19*, 289-306, <https://doi.org/10.1002/andp.19063240204>.
- [8] A. Einstein, *Ann. Physik* **1911**, *34*, 591-592, <https://doi.org/10.1002/andp.19113390313>.
- [9] J. Perrin, *Ann. Chimie et Physique* **1909**, *18*, N8, 5114.
- [10] JADE Collaboration, W. Bartel, L. Becker, C. Bowdery, D. Cords, R. Eichler, R. Felst, D. Haidt, H. Krehbiel, B. Naroska, J. Olsson, P. Steffen, P. Warming, G. Dietrich, E. Elsen, G. Heinzlmann, H. Kado, K. Meier, A. Petersen, U. Schneekloth, G. Weber, S. Bethke, A. Dieckmann, J. Heintze, K. H. Hellenbrand, R. D. Heuer, S. Komamiya, J. von Krogh, P. Lennert, H. Matsumura, H. Rieseberg, A. Wagner, A. Bell, A. Finch, F. Foster, G. Hughes, T. Nozaki, H. Wriedt, J. Allison, A. H. Ball, G. Bamford, R. Barlow, I. P. Duerdoth, I. Glendinning, F. K. Loebinger, A. A. Macbeth, H. McCann, H. E. Mills, P. G. Murphy, P. Rowe, K. Stephens, D. Clarke, R. Marshall, G. F. Pearce, J. B. Whittaker, J. Kanzaki, T. Kawamoto, T. Kobayashi, M. Koshiya, M. Minowa, M. Nozaki, S. Odaka, S. Orito, A. Sato, H. Takeda, T. Takeshita, Y. Totsuka, Y. Watanabe, S. Yamada, C. Yanagisawa, *ZPhys-e.C:Part. Fields* **1983**, *19*, 197-203.
- [11] J. Borrajo-Sánchez, F. J. Cabrero-Fraile, *Arch. Soc. Esp. Oftalmol.* **2010**, *85*, 129-130, [https://doi.org/10.1016/S0365-6691\(10\)70035-6](https://doi.org/10.1016/S0365-6691(10)70035-6).
- [12] P. M. S. Blackett, G. P. S. Occhialini, *Proc. Royal Soc.* **1933**, *139*, 699-724, <https://doi.org/10.1098/rspa.1933.0048>.
- [13] R. S. Treptow, *J. Chem. Educ.* **2005**, *82*, 1636-1641, <https://doi.org/10.1021/ed082p1636>.
- [14] K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley and Sons, New York, **1988**.
- [15] M. Alonso, E. J. Finn, *Física, Vol III. Fundamentos Cuánticos y Estadísticos*. Addison Wesley, Wilmington, **1976**.
- [16] M. Díaz Peña, A. Roig Muntaner, *Química Física*, Alhambra, Madrid, **1989**.
- [17] KATRIN Collaboration, *Science* **2025**, *388*, 180-185.
- [18] R. D. Whitaker, *J. Chem. Educ.* **1975**, *52*, 658-659, <https://doi.org/10.1021/ed052p658>.
- [19] J. Huizenga, *Cold Fusion: The Scientific Fiasco of the Century*, University of Rochester Press, New York, **1993**.
- [20] M. Fleischmann, S. Pons, *J. Electroanal. Chem.* **1989**, *261*, 301-308, [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(89\)80006-3](https://doi.org/10.1016/0022-0728(89)80006-3).
- [21] S. E. Jones, E. P. Palmer, J. B. Czirr, D. L. Decker, G. L. Jensen, J. M. Thorne, S. F. Taylor, J. Rafelski, *Nature* **1989**, *388*, 737-740, <https://doi.org/10.1038/338737a0>.
- [22] F. D. Manchester, A. San-Martin, J. M. Pitre, *J. Phase Equil.* **1994**, *15*, 62-83, <https://doi.org/10.1007/BF02667685>.
- [23] N. Klopčič, I. Grimmer, F. Winkler, M. Sartory, A. Tratner, *J. Energy Storage* **2023**, *72*, 108-456, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108456>.



Julio Alfonso Alonso Martín

Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica,
Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid

E-mail: jaalonso@uva.es

ORCID: 0000-0002-8604-8608

Licenciado y Doctor en Física por la Universidad de Valladolid. Tras unos años como investigador en la Universidad de Pennsylvania (Philadelphia), Profesor en la Universidad de Valladolid desde 1980, Catedrático desde 1988 y Profesor Emérito desde 2019. Profesor invitado en las Universidades de East Anglia, Osnabrück, Queen's (Canadá) y en el Donostia International Physics Center. Medalla de la Real Sociedad Española de Física en 2005. Ha publicado dos libros (*Electrons in Metals and Alloys*, 1989; *Structure and Properties of Atomic Nanoclusters*, 2012), más de 20 capítulos de libros y más de 400 artículos de investigación, además de varios artículos de divulgación. Su investigación se ha centrado en la Física de la Materia Condensada, Física Molecular y Física y Química de Materiales.

ChemEurJ

EurJOC

Chemistry
Europe

