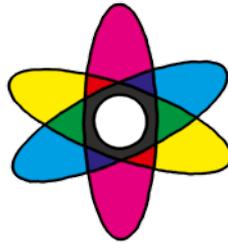


# El puzle de la teoría cuántica

¿Es posible zanjar científicamente el debate sobre la naturaleza del mundo cuántico?

*Adán Cabello*

*Viñetas de Zach WeinerSmith para Investigación y Ciencia*



**D**ecía John Wheeler, director de tesis de Richard Feynman y en parte responsable de que Steven Weinberg se trasladase en 1982 a la Universidad de Texas en Austin: «La teoría cuántica no me preocupa en absoluto. Es simplemente la manera en que funciona el mundo. Lo que me corroe [...] es entender [...] de dónde viene». Wheeler, que

falleció en 2008, dedicó buena parte de su vida a buscar la respuesta a esta pregunta. Yo la reformularía así: ¿cómo tiene que ser un universo para que la teoría cuántica sea la herramienta predictiva más eficaz?

Hace poco, Weinberg ha confesado su preocupación por lo que considera «el problema de la mecánica cuántica» y por el futuro de la teoría [véase «El problema de la mecánica cuántica»,

## EN SÍNTESIS

**La mecánica cuántica** choca con algunas de nuestras intuiciones más arraigadas acerca del mundo físico. A lo largo de la historia, esa situación ha generado un continuo debate acerca de su significado.

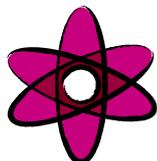
**Un enfoque tradicional** se ha basado en cuestionar el carácter intrínsecamente probabilístico de la teoría. Otros han defendido la necesidad de corregir sus ecuaciones fundamentales para incorporar el proceso de medición.

**Una tercera opción** consiste en aceptar la teoría cuántica tal y como es y preguntarse sobre su origen: ¿cómo debería ser un universo para que la teoría cuántica constituya la herramienta predictiva más eficaz?

**La respuesta** podría apuntar a un aspecto clave de la realidad física: el universo tal vez carezca de leyes que determinen las probabilidades de obtener un resultado u otro en un experimento.



por Steven Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2017]. Ha desgranado qué aspectos de la teoría le incomodan y ha sugerido cómo cambiarla. A continuación me gustaría explicar en qué aspectos estoy de acuerdo con él y en cuáles no. Y, sobre todo, me gustaría sugerir cómo creo que deberíamos actuar para resolver este «problema» de una vez por todas.



**ANTES DE PROSEGUIR, UN MATIZ SEMÁNTICO.** Considero fundamental distinguir entre teoría cuántica y mecánica cuántica, pues dicha distinción resultará útil para identificar dónde, y dónde no, radica el problema.

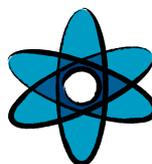
Como afirmaba Scott Aaronson en su libro *Quantum computing since Democritus* (Cambridge University Press, 2013), la teoría cuántica es una especie de «sistema operativo sobre el que [algunas] teorías físicas funcionan como *software* de aplicación». Per se, la teoría cuántica no es más que una teoría abstracta de probabilidades, la cual puede estudiarse —y debería enseñarse— desligada de su aplicación a problemas físicos. Esta teoría abstracta de probabilidades se basa en los siguientes axiomas:

- El *estado* de un sistema viene dado por una lista de probabilidades. Dichas probabilidades son las que un observador con capacidad para efectuar «medidas» sobre el sistema asigna a cada uno de los resultados posibles. Matemáticamente, ese estado se representa mediante un «rayo» (o dirección) en un espacio vectorial complejo. Todos los rayos corresponden a estados posibles. El «sistema» queda definido por el tipo de medidas que el observador puede hacer.
- Las *transformaciones reversibles* de dicho estado quedan representadas por cierta clase de objetos matemáticos, llamados operadores unitarios, los cuales actúan sobre el rayo que representa el estado. Todos los operadores unitarios corresponden a transformaciones reversibles posibles.
- Las *medidas* que un observador puede efectuar sobre el sistema quedan representadas por otra clase de operadores, llamados autoadjuntos, cuyas propiedades (sus «autovalores», en jerga técnica) determinan los posibles resultados de una medida. Todos los operadores autoadjuntos corresponden a medidas posibles.
- Para un estado inicial dado, la probabilidad de obtener un resultado específico se calcula mediante una regla propuesta por Max Born en 1926. El estado del sistema después de una medida ideal se obtiene aplicando una regla que el físico alemán Gerhart Lüders propuso en 1951.

Por otro lado, la mecánica cuántica constituye la aplicación de esta teoría abstracta de probabilidades a las moléculas, los átomos, los fotones y otros entes físicos.

Los ingredientes fundamentales en esta «capa extra de *software*» son tres: la ecuación de Schrödinger, la cual establece que el operador matemático asociado a la energía total es, además, el que determina cómo evoluciona el estado a lo largo del tiempo; las «reglas de cuantización» para convertir problemas de la física clásica en cuánticos, y las llamadas «reglas de superselección», las cuales impiden preparar determinados estados y realizar ciertas medidas (por ejemplo, una regla de superselección viene de la carga eléctrica: no es posible preparar un estado correspondiente a la superposición de dos estados con cargas eléctricas diferentes).

**Adán Cabello** es catedrático de física de la Universidad de Sevilla. Sus investigaciones se centran en los fundamentos de la física cuántica.



### UNA DE LAS CRÍTICAS DE WEINBERG

es que «no parece haber ningún modo de situar la frontera entre los regímenes en los que [...] la mecánica cuántica puede aplicarse o no». No estoy de acuerdo. Desde la perspectiva de la teoría cuántica, la frontera está claramente definida: la establece la capacidad que tenga un observador para efectuar medidas. Para otro observador, equipado con otros aparatos que permitan resolver más o menos detalles, el límite se encontrará en otro sitio. Pero, para un observador con una capacidad experimental concreta, la frontera siempre está perfectamente definida.

Hay otro aspecto en el que la distinción entre teoría y mecánica cuántica resulta útil. Para Weinberg, el problema radica en que «en mecánica cuántica, la manera en que evoluciona la función de onda a lo largo del tiempo queda gobernada por una ecuación, la ecuación de Schrödinger, la cual no implica probabilidades». Por tanto, «¿cómo aparecen las probabilidades en mecánica cuántica?».

En la teoría cuántica, la función de onda es el estado del sistema, el cual es una lista de probabilidades. Poco importa cómo evolucione en el tiempo: sigue siendo una lista de probabilidades. Ergo, en realidad, no hay ningún problema con la mecánica cuántica, sino una pregunta a la que hemos de responder: ¿por qué la herramienta predictiva más eficaz de la que disponemos para describir el mundo es una teoría de probabilidades? Hay tres respuestas posibles.

#### SERIE LA INTERPRETACIÓN DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

##### PARTE 1

**La charla.** Por Scott Aaronson y Zach Weinersmith (Julio de 2017)

**Mecánica cuántica: interpretación y divulgación.**  
Por Adán Sus (Julio de 2017)

##### PARTE 2

**El problema de la mecánica cuántica.**  
Por Steven Weinberg (Agosto de 2017)

##### PARTE 3

**El puzle de la teoría cuántica.** Por Adán Cabello (págs. 56-61)

Primera: No es cierto que la mecánica cuántica sea una teoría de probabilidades. Existe una forma de verla como una teoría determinista consistente.

Segunda: No es cierto que la mecánica cuántica sea una teoría completa. Hay determinados aspectos (en particular, el proceso de la medición) que es necesario corregir.

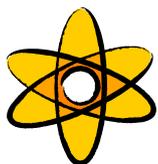
Tercera: El universo carece de leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas. Un observador asigna probabilidades (es decir, un estado) a partir de la información que posee; pero ello no quiere decir que las probabilidades (el estado) sean objetivas. Ello obliga a que, para hacer predicciones, el observador tenga que adoptar una teoría de probabilidades que no asuma que dichas probabilidades estén predeterminadas. Desde esta perspectiva, la teoría cuántica sería simplemente la forma más eficaz de hacer comprensible lo incomprensible.

Dependiendo de cuál sea la respuesta correcta, los pasos que habremos de dar y el futuro de la mecánica cuántica serán distintos.

Coincido con Weinberg en que es una mala señal que, después de tantos años —estas cuestiones ya se debatían en 1926!—, los físicos sigan sin estar de acuerdo sobre el significado de la teoría. Comparto el análisis de que existen esencialmente dos posturas muy distintas, que él llama —inadecuadamente, en mi opinión— «realista» e «instrumentalista», para abordar el asunto. Y convengo también en que, hoy en día, ninguna de estas dos posturas resulta verdaderamente satisfactoria. Pero eso no quiere decir que ambas sean igualmente insatisfactorias. La postura realista puede asociarse con quienes creen que la respuesta a la pregunta anterior es la primera o la segunda, mientras la instrumentalista correspondería a quienes se decantan por la tercera.

Resulta habitual leer que es imposible zanjar esta discusión por métodos científicos y que, para ello, hemos de recurrir a un «juicio metafísico». No creo que sea así. No se trata de discutir apasionadamente cuál de estas opciones cada uno cree correcta ni de argumentar con cuál de ellas nos sentimos más cómodos o menos incómodos. Como veremos, ninguna de las respuestas pasa de ser un proyecto inacabado lleno de cabos sueltos. Se trata de examinar, científicamente, el estado real de cada uno de esos proyectos, identificar los problemas que plantean y, por último, resolverlos o demostrar que son irresolubles.

En lo que sigue intentaré resumir qué problemas creo que deberían abordarse antes de seguir perpetuando un debate que ya dura demasiado, que afecta al futuro de la física y, en concreto, a problemas tan fundamentales como el de extender la teoría cuántica a otros sistemas físicos, en particular a la gravedad.



### COMENCEMOS CON LOS FÍSICOS A LOS QUE WEINBERG LLAMA «REALISTAS»

y a quienes yo prefiero denominar «propugnantes del realismo intrínseco». Son aquellos que defienden que las probabilidades de los resultados de las medidas están determinadas por propiedades intrínsecas al sistema observado. Los hay de dos tipos: quienes creen que la función de onda es, en sí misma, una propiedad intrínseca; y los que sostienen que la función de onda solo representa el conocimiento que posee un observador acerca de una realidad intrínseca subyacente. Weinberg solo se ocupa explícitamente de un subconjunto de los primeros: los defensores de la inter-

---

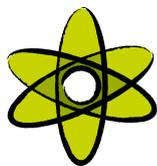
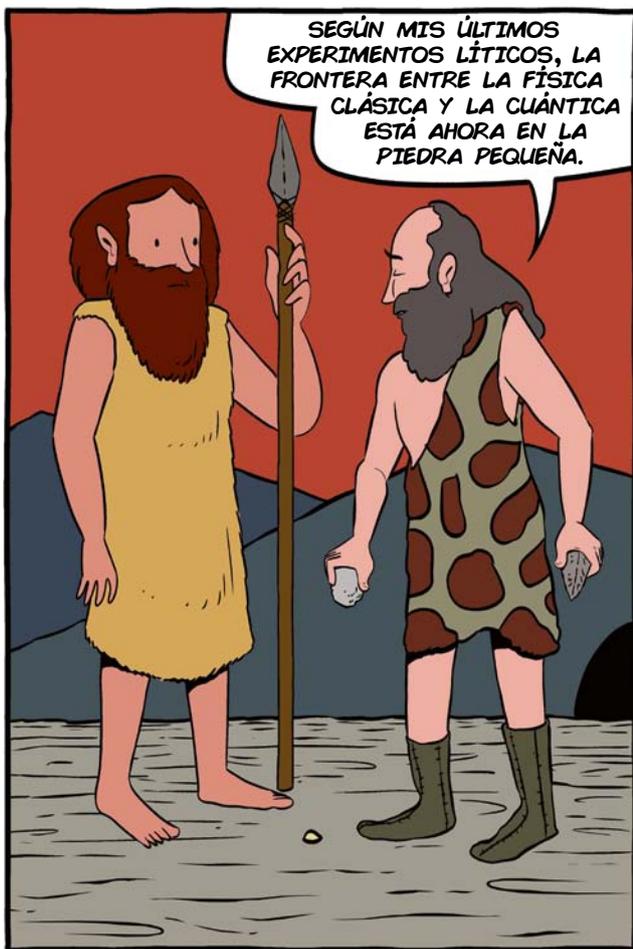
**¿Y si la posición no es sino una propiedad emergente? ¿Cuál si no es el precio que hay que pagar por ser un constituyente elemental del universo? ¿Cómo van a ser estos constituyentes «elementales» y, a la vez, tener olor, sabor, color, posición y velocidad? ¿Y si el determinismo es también emergente?**

---

pretación de los muchos mundos. Estos suscriben que existe una única función de onda del universo, la cual evoluciona de forma completamente determinista y de tal manera que, con cada medición, el universo se desdobra en tantas ramas desconectadas como resultados posibles hay.

La postura de los muchos mundos no constituye una solución, sino el comienzo de un programa de investigación que aún debe responder numerosas preguntas. ¿En qué sentido se desdoblan los universos? ¿Se desdoblan también las masas, las cargas eléctricas y el espaciotiempo? ¿Qué sistema de referencia define la función de onda universal? ¿Qué ocurre con la teoría de la relatividad? ¿Por qué no hay conexión entre los universos? ¿Y por qué en nuestro(s) universo(s) las probabilidades siguen la regla de Born? Los defensores de esta propuesta han de formular una teoría coherente que responda a todas estas preguntas. En ausencia de dicha teoría, la interpretación de los muchos mundos no es más que una solución *ad hoc* de dudosa consistencia y que poco nos dice de la naturaleza más allá de que, misteriosamente, permite la existencia de un número fantástico de universos. Tienen mucho trabajo por delante sus defensores.

No habla Weinberg de otras variantes realistas, como la mecánica bohmiana. Sin embargo, en todas ellas los problemas son similares y pueden resumirse como sigue: hasta ahora, nadie ha conseguido construir una teoría realista compatible con la relatividad especial de Einstein y que haga las mismas predicciones que la mecánica cuántica. Mucho peor: en 1964, John Bell demostró que todas las teorías realistas locales incluyen necesariamente predicciones que difieren de las de la mecánica cuántica. Predicciones que, según han demostrado los experimentos, no se cumplen en nuestro universo [véase «Un test de Bell sin escapatorias», por Carlos Abellán, Waldimar Amaya y Morgan W. Mitchell; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2016].



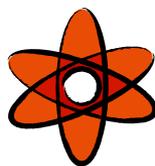
### PASEMOS AHORA A QUIENES CONSIDERAN QUE LA OPCIÓN CORRECTA ES LA SEGUNDA,

según la cual la mecánica cuántica no sería una teoría completa —Weinberg entre ellos, aunque sin mucho entusiasmo, dicho sea de paso—. Esta postura se basa en la creencia de que los problemas con que se encuentran los defensores del realismo intrínseco podrán resolverse «corrigiendo» la mecánica cuántica: por ejemplo, añadiendo nuevos términos a la ecuación de Schrödinger.

La idea no es nueva. Su versión más conocida la hallamos en un modelo enunciado en 1986 por Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, de la Universidad de Trieste, el cual incluía un mecanismo físico de colapso espontáneo de la función de onda. En este espíritu, el propio Weinberg consideró en 1989 una clase de modificaciones no lineales de la mecánica cuántica.

Un problema de este enfoque reside en que hay muchas maneras de abordarlo, y ninguna de las que se han propuesto hasta ahora y que predicen diferencias con respecto a la mecánica cuántica ha pasado el filtro de los experimentos. Existen, además, problemas asociados a la consistencia lógica de las teorías resultantes.

Así pues, de nuevo nos hallamos más ante una línea de investigación abierta que ante una solución. También queda mucho trabajo por hacer en este frente, con la ventaja de que una parte de esa labor consiste en diseñar experimentos que validen o refuten tales propuestas.



### VAYAMOS POR ÚLTIMO CON QUIENES WEINBERG LLAMA «INSTRUMENTALISTAS»

y a quienes yo considero más adecuado denominar, por motivos que espero queden claros más adelante, «propugnantes del realismo participativo».

No estoy de acuerdo con Weinberg en que «según la postura instrumentalista, tendríamos que aceptar, como leyes fundamentales de la naturaleza, las reglas [...] sobre cómo usar la función de onda para calcular las probabilidades». En absoluto: lo que hemos de hacer es, como decía Wheeler, intentar comprender de dónde viene la teoría cuántica. Entender cómo tiene que ser un universo para que la teoría cuántica constituya la herramienta predictiva más eficaz.

En particular, antes de adoptar la postura instrumentalista, uno debería resolver el siguiente problema. Supongamos que la opción correcta es la tercera; es decir, que el universo carece de leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas. Enfrentémonos al reto de construir una teoría predictiva en esa situación, a priori, tan adversa. ¿Es cierto que, bajo tales condiciones, la teoría cuántica proporciona la mejor herramienta predictiva?

Si fuésemos capaces de demostrar que la respuesta es afirmativa, habríamos aprendido mucho sobre el origen de la teoría cuántica. Y habríamos aprendido mucho sobre el universo. Lo que estoy proponiendo es una «derivación» o «reconstrucción» de la teoría cuántica, parecida a las que se han sugerido en los últimos años [véase «Teorías supracuánticas», por Miguel Navascués; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2016], pero asumiendo un modelo muy concreto de universo y un propósito muy concreto para la teoría.

Creo que se trata de un proyecto necesario y factible. Ello también explica por qué no comulgo con la etiqueta de «instrumentalista». El instrumentalismo es una posición filosófica que sostiene que las teorías científicas no han de intentar representar la realidad, sino que deben ser instrumentos para manejarse en el mundo. Esto puede parecer científicamente poco ambicioso si damos por sentado que la realidad se encuentra constituida por propiedades intrínsecas. Pero ¿qué sucede si la realidad no contiene leyes que dicten las probabilidades de los resultados de ciertas medidas? ¿Hace eso que la realidad sea «irreal»? ¿No parece mucho más sensato hacer la observación de que la realidad ofrece también este aspecto y buscar la mejor herramienta para desenvolverse? ¿Implica esto «renunciar a una meta fundamental de la ciencia», como afirma Weinberg? ¿No es más bien comenzar a entender un nuevo y fascinante aspecto de la realidad?

Desde esta perspectiva, decir que una de las alternativas es instrumentalista es contar la historia al revés. No hay ningún problema con la mecánica cuántica: la efectividad de la teoría es síntoma de un aspecto muy importante de la realidad. ¿Y en qué sentido la realidad es entonces «participativa»? En que en un universo así hay lugar para el libre albedrío: hay lugar para la decisión de efectuar una u otra medida, la cual puede afectar a la historia posterior del universo.

En cierto momento, Weinberg compara la aleatoriedad de la teoría cuántica con la impredecibilidad que, «en la práctica», exhibe «una cascada de gotas de lluvia». No creo que nos estemos enfrentando a un problema práctico de ignorancia, sino a algo que ocurre en la realidad. Los resultados de los experimentos cuánticos son tan absolutamente aleatorios que no existe teoría capaz de predecirlos. La teoría cuántica es un

síntoma de que da igual cómo describamos el universo: nunca hallaremos en él «leyes» en el sentido usual de la física —idel siglo XIX!— que determinen las probabilidades de los resultados de esas medidas.

Encuentro que existe una flagrante contradicción entre la afirmación de Weinberg —y que yo comparto— de que «es un error exigir de manera demasiado estricta que las nuevas teorías físicas se ajusten a nuestros prejuicios filosóficos» y su veredicto posterior de que la postura instrumentalista «renuncia a una meta fundamental de la ciencia: describir qué ocurre realmente ahí fuera». ¿Y si algunas de las cosas que realmente ocurren «ahí fuera» no están gobernadas por leyes como las que permiten predecir la posición de una canica conocidas su posición y velocidad iniciales? ¿Y si la posición, al igual que la temperatura, no es sino una propiedad emergente? ¿Cuál si no es el precio que hay que pagar por ser un constituyente elemental del universo? ¿Cómo van a ser estos constituyentes «elementales» y, a la vez, tener olor, sabor, color, posición y velocidad? ¿Y si el determinismo es también emergente?

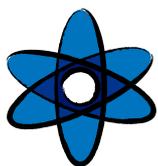
---

**Lo que estoy proponiendo es una «derivación» o «reconstrucción» de la teoría cuántica, parecida a las que se han sugerido en los últimos años, pero asumiendo un modelo muy concreto de universo y un propósito muy concreto para la teoría**

---

Comparto la opinión de Wheeler de que no hay que cambiar nada de la teoría cuántica. Y ello por el mismo motivo por el que no hay que cambiar nada de la teoría clásica de la probabilidad: no hay nada incorrecto en ellas. Simplemente, hay situaciones en las que una es la más adecuada y situaciones en las que lo es la otra.

No obstante todo lo anterior, es igualmente cierto que también los proponentes del realismo participativo tienen mucho trabajo por delante.



#### SOLO SE ME OCURREN DOS MANERAS

de alcanzar ese idílico consenso científico que nos permita avanzar: o bien formulando una teoría coherente que vaya más allá de la mecánica cuántica y comprobando que sus predicciones se cumplen en los experimentos; o bien demostrando que tal teoría no puede existir y que, en un universo en el que no existen leyes que determinen las probabilidades de los resultados de ciertas medidas, la herramienta predictiva más eficaz es la teoría cuántica.

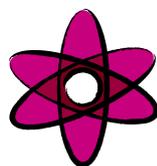
SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Fronteras de la física cuántica*, uno de los últimos números de nuestra colección TEMAS, en el que 17 expertos exponen con gran rigor algunos de los retos físicos y epistemológicos que aún afronta una de las teorías más profundas y fascinantes de todos los tiempos.



[www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/86](http://www.investigacionyciencia.es/revistas/temas/numero/86)

Un punto psicológico y sociológico que se me escapa es por qué a tantos científicos del siglo XXI les cuesta renunciar al determinismo. Ya en el siglo XIII, incluso un pensador tan apegado a la idea de un dios rector del universo como Tomás de Aquino apuntaba que un universo no sería «perfecto» sin aleatoriedad.



**EN 1964, FEYNMAN IMPARTIÓ** una célebre serie de conferencias en Cornell. En una de ellas, poco después de pronunciar una de las frases que con el tiempo acabarían siendo más citadas («creo que puedo decir con toda tranquilidad que nadie entiende la mecánica cuántica»), añadió: «No insistan en preguntarse [...] “¿cómo es posible?”, porque se meterán en un callejón del que nadie ha conseguido salir todavía. Nadie sabe cómo es posible».

Este consejo siempre me ha parecido una barbaridad. Al contrario: no hay que dejar nunca de preguntarse cómo es posible. Sobre todo porque, como diría Wheeler, «detrás seguramente yace una idea tan sencilla, tan bella y tan convincente que, cuando la comprendamos, dentro de una década, un siglo o un milenio, nos diremos: ¿cómo podía no ser así? ¿Cómo hemos sido tan estúpidos durante tanto tiempo?». ■

#### PARA SABER MÁS

**How come the quantum?** John A. Wheeler en «New techniques and ideas in quantum measurement theory», *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 480, págs. 304-316, diciembre de 1986.

**Perfiles cuánticos: Un análisis de la física cuántica.** Jeremy Bernstein. McGraw-Hill, 1991.

**On participatory realism.** Christopher Fuchs en *Information and interaction: Eddington, Wheeler and the limits of knowledge*, dirigido por Ian T. Durham and Dean Rickles. Springer, 2017. Disponible en [arxiv.org/abs/1601.04360](https://arxiv.org/abs/1601.04360)

**The universe would not be perfect without randomness: A quantum physicist's reading of Aquinas.** Valerio Scarani en *Quantum [un]speakables II: Half a century of Bell's theorem*, dirigido por Reinhold Bertlmann y Anton Zeilinger. Springer, 2017. Disponible en [arxiv.org/abs/1501.00769](https://arxiv.org/abs/1501.00769)

**Interpretations of quantum theory: A map of madness.** Adán Cabello en *What is quantum information?*, dirigido por Olimpia Lombardi, Sebastian Fortin, Federico Holik y Cristian López. Cambridge University Press, 2017. Disponible en [arxiv.org/abs/1509.04711](https://arxiv.org/abs/1509.04711)

#### EN NUESTRO ARCHIVO

**John A. Wheeler: ¿qué es la realidad?** Entrevista y esbozo biográfico; *lyC*, julio de 1991.

**Cien años de misterios cuánticos.** Max Tegmark y John A. Wheeler en *lyC*, abril de 2001.

**Bayesianismo cuántico.** Hans Christian von Baeyer en *lyC*, agosto de 2013.

**Teorías supracuánticas.** Miguel Navascués en *lyC*, septiembre de 2016.