

TEMAS 63

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Investigación y Ciencias.es

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Del modelo estándar a la teoría de cuerdas

GRAVEDAD CUÁNTICA

Propiedades cuánticas del espaciotiempo

COSMOLOGÍA

Los primeros instantes tras la gran explosión

UNIFICACIÓN

¿Qué podemos esperar de una teoría final?

6,50 EUROS

Universo cuántico

1er TRIMESTRE 2011



Universo cuántico

3 Presentación

INTRODUCCIÓN

4 La escurridiza teoría del todo

Stephen Hawking y Leonard Mlodinow

PARTÍCULAS Y CUERDAS

10 La física y los diagramas de Feynman

David Kaiser

20 Revolución en la física de partículas

Chris Quigg

28 Unificación y dualidad en teoría de cuerdas

Luis E. Ibáñez

ESPACIOTIEMPO CUÁNTICO

36 Agujeros negros cuánticos

Bernard J. Carr y Steven B. Giddings

44 Geometría no conmutativa y espaciotiempo cuántico

José L. Fernández Barbón

54 El universo cuántico autoorganizado

Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll

IMPLICACIONES COSMOLÓGICAS

62 El origen del universo

Michael S. Turner

70 Buscando vida en el multiverso

Alejandro Jenkins y Gilad Perez

78 ¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?

Dieter Lüst

FUTURO

84 La teoría de cuerdas y el LHC

Luis E. Ibáñez

92 Perspectivas de unificación

Entrevista con Steven Weinberg

El lenguaje de la naturaleza

La mecánica cuántica nació hace aproximadamente un siglo. Gracias a ella, disponemos de la descripción del mundo microscópico más completa y predictiva de la historia. El modelo estándar de la física de partículas describe la dinámica de todas las partículas elementales conocidas a partir de tres interacciones fundamentales. Sin embargo, los físicos suelen achacarle dos carencias básicas. En primer lugar, no explica por qué la naturaleza parece haberse encaprichado por ese conjunto de partículas e interacciones. Por otra parte, el modelo estándar no da cuenta de la cuarta interacción fundamental: la gravitación.

La formulación moderna de la gravedad nos la proporciona la teoría de la relatividad general, según la cual la masa y la energía modifican las propiedades geométricas del espaciotiempo circundante. Además de todos los efectos gravitatorios habituales, la teoría describe de manera satisfactoria la evolución del universo a gran escala. No obstante, su problema radica en las profundas inconsistencias matemáticas que aparecen al intentar formular una versión de la teoría compatible con la mecánica cuántica.

Los físicos cuentan con muy buenas razones para pensar que también la gravedad debería quedar descrita por un formalismo cuántico. Generaciones de mentes brillantes llevan decenios persiguiendo ese objetivo. En el camino, han aparecido cuestiones de una riqueza y profundidad sorprendentes. Algunas son relativas a la estructura microscópica del espaciotiempo; otras, al origen, evolución y estructura del universo como un todo.

El presente monográfico intenta ofrecer al lector una muestra del recorrido que acabamos de esbozar. La primera parte comienza con una introducción a la teoría cuántica de campos perturbativa. Narrados en clave histórica, los conceptos que expone el artículo de David Kaiser constituyen el lenguaje natural de la física de partículas moderna. Chris Quigg se sirve de una perspectiva experimental para introducir el modelo estándar (con énfasis en la ruptura de simetría electrodébil y la necesidad del bosón de Higgs) y una de sus extensiones más estudiadas (la supersimetría).

Luis E. Ibáñez presenta una introducción a la teoría de cuerdas, la extensión de la física de partículas y la candidata a una teoría cuántica de la gravedad que más atención ha recibido en las últimas décadas. El artículo apareció en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA cuando la teoría vivía lo que ha dado en llamarse su «segunda revolución»: la debida al descubrimiento de las relaciones de dualidad (equivalencia) entre las diferentes teorías de cuerdas. Es este un concepto central a la estructura formal de la teoría que, además, motiva las consideraciones filosóficas que Stephen Hawking y Leonard Mlodinow exponen en el breve ensayo que reproducimos aquí.

En lo que se refiere a algunos aspectos cuánticos de la gravitación, el artículo de Bernard J. Carr y Steven B. Giddings llama la atención sobre la importancia que revisten las propiedades cuánticas de los agujeros negros. Aunque se suele pensar en ellos como en gigantescos objetos astrofísicos ajenos a las leyes de la mecánica cuántica, el resultado semiclásico de Stephen Hawking de 1974 sobre sus procesos de emisión los convirtió en una «piedra de Rosetta» de la gravitación cuántica. Su estudio ha propiciado algunos de los avances más profundos en el campo, como el principio holográfico.

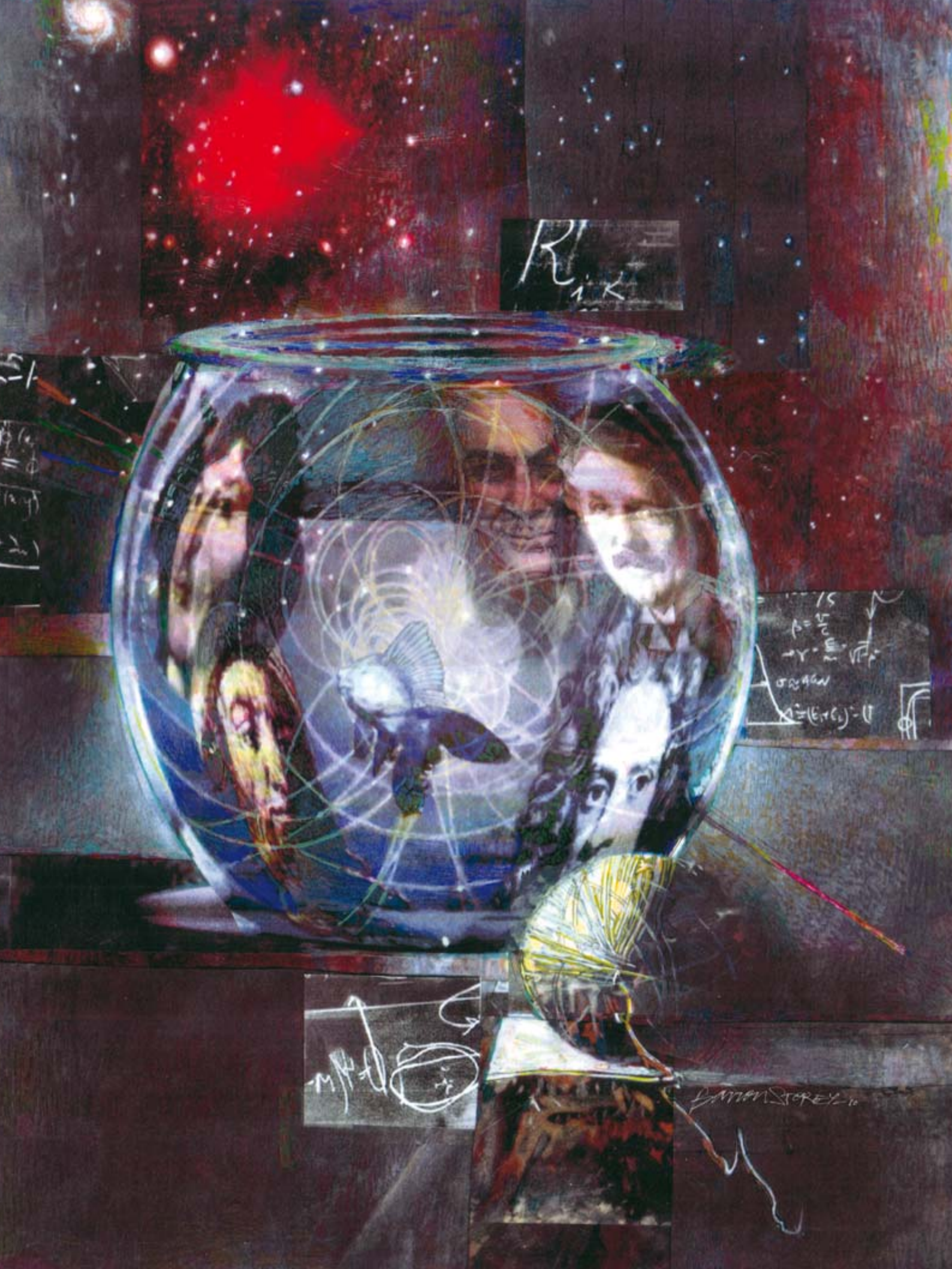
En cuanto a otras implicaciones cuánticas sobre la estructura microscópica del espaciotiempo, hemos seleccionado aquí

un ejemplo proveniente de la teoría de cuerdas (la geometría no conmutativa) y otro ajeno a ella (la naturaleza fractal del espaciotiempo, según la propuesta de las triangulaciones dinámicas causales).

El alcance de estas investigaciones no se limita al mundo de lo microscópico. Tiene también implicaciones cosmológicas. La física de partículas y la gravedad cuántica hubieron de dejar su impronta en los primeros instantes tras la gran explosión, con consecuencias para la evolución y el futuro del universo. Pero algunos modelos van más allá y postulan la existencia de otros universos. Motivados por las cuestiones que plantea el principio antrópico, Alejandro Jenkins y Gilad Pérez exploran la variedad de leyes físicas en otros universos. Por último, Dieter Lüst nos explica por qué la teoría de cuerdas parece requerir un número exorbitante de universos; en una exposición no exenta de cierta autocrítica, desarrolla las evidentes cuestiones filosóficas que suscita la idea.

¿Veremos en el futuro alguna consecuencia experimental de tales especulaciones teóricas? Las perspectivas experimentales que ofrecerá el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN y las reflexiones al respecto de Steven Weinberg, uno de los padres del modelo estándar, cierran este monográfico.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} &= \frac{1}{4\pi^2} f_{\mu\nu}^a f^{\mu\nu a} + 2 \zeta_i (g^{\mu\nu} D_\mu + w_i) \zeta_i \\
 f_{\mu\nu}^a &= 2 \partial_{[\mu} A_{\nu]}^a + i f_{bc}^a A_\mu^b A_\nu^c \\
 D_\mu &= \partial_\mu + i t_a A_\mu^a \\
 \mathcal{L}_{\text{gr}} &= \frac{1}{2} R_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \partial_\mu g_{\nu\rho} \partial_\nu g_{\rho\mu}
 \end{aligned}$$



$$R_{ik}$$

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2}}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$
$$\sigma_{ij} = \rho_{ij}$$
$$X_i = (E, \mathbf{r}_i) = U$$



ANTHONY STOREY 10



INTRODUCCIÓN

La (escurridiza) teoría del todo

Durante años, los físicos han buscado la teoría final que habría de unificar toda la física. Sin embargo, puede que tengan que acostumbrarse a convivir con varias

Stephen Hawking y Leonard Mlodinow

EN SÍNTESIS

El trabajo de Stephen Hawking sobre los agujeros negros y el origen del universo puede calificarse como uno de los pasos más concretos encaminados a conciliar la gravedad y la física cuántica en una teoría del todo.

Hoy día, la teoría de cuerdas constituye el principal candidato unificador. Sin embargo, esta admite cinco formulaciones, cada una de las cuales solo es aplicable en un conjunto restringido de situaciones.

Esas cinco teorías de cuerdas se hallan conectadas matemáticamente mediante relaciones de dualidad. Dicha red, denominada de manera enigmática teoría M, bien podría ser la teoría final.

En su obra *El gran diseño*, los autores argumentan que la búsqueda de una teoría final quizá no produzca un conjunto único de ecuaciones. Toda teoría, afirman, lleva asociado su propio modelo de realidad. Este breve ensayo está basado en la obra.

HACE UNOS AÑOS, EL AYUNTAMIENTO DE MONZA, EN ITALIA, PROHIBIÓ a los habitantes de la localidad alojar peces en peceras curvas. Los artífices de la medida argumentaban sobre la crueldad de tales recipientes, ya que la forma de sus paredes proporcionaba al pez una visión distorsionada de la realidad. Aparte de la importancia de la medida para los pobres peces, la historia nos plantea una pregunta filosófica: ¿cómo sabemos que la realidad que percibimos es cierta? El pez cuenta con una visión de la realidad diferente de la nuestra, pero ¿podemos asegurar que es menos real? Por lo que sabemos, también nosotros podríamos habernos pasado la vida entera mirando a través de una lente que lo distorsionara todo.

En física la cuestión no es académica. De hecho, físicos y cosmólogos nos hallamos en una situación similar a la del pez. Durante décadas hemos luchado por hallar una teoría del todo: un conjunto completo y coherente de leyes fundamentales de la naturaleza que expliquen cada aspecto de la realidad. Sin embargo, puede que el resultado de dicha búsqueda no sea una teoría única, sino un conjunto de teorías interconectadas, cada una de las cuales describe su propia versión de la realidad, como si viera el universo a través de su pecera particular.

Puede que semejante idea resulte difícil de aceptar para muchos, incluidos algunos científicos en activo. La mayoría de la gente cree que existe algo así como una realidad objetiva y que nuestros sentidos y la ciencia nos aportan información directa acerca del mundo. La ciencia tradicional se basa en la creencia de que existe un mundo exterior con propiedades bien definidas e independientes del observador. En filosofía, tal creencia se denomina realismo.

Sin embargo, aquellos que recuerden a Timothy Leary y su defensa de la cultura psicodélica en los años sesenta saben de otra posibilidad: el concepto de realidad puede depender de la mente del observador. Los diferentes matices en la interpretación de este punto de vista han dado lugar a doctrinas como el antirrealismo, el instrumentalismo o el idealismo. De acuerdo con las mismas, el mundo que conocemos no es sino un constructo de la mente. La estructura interpretativa de nuestro cerebro emplea los datos sensoriales como materia prima y, a partir de ellos, da forma al mundo que percibimos. Puede que esta idea resulte difícil de aceptar, pero no es complicada de entender. A fin de cuentas, no hay forma de excluir al observador (nosotros) de su percepción del mundo.

La manera en que la física ha evolucionado hasta nuestros días ha hecho del realismo una postura cada vez más difícil de defender. En física clásica (la física de Newton, que de manera tan precisa describe nuestra experiencia cotidiana), la interpretación de términos como objeto o posición se halla de acuerdo, en gran medida, con la comprensión «realista» que emana de nuestro sentido común. Pero, como aparatos de medida, los humanos dejamos bastante que desear. Hoy sabemos que los objetos comunes y la luz que empleamos para verlos se hallan compuestos por ciertas partículas (como electrones y fotones) que no percibimos de manera directa. Y las leyes que gobiernan el comportamiento de las mismas no son las de la física clásica, sino las de la mecánica cuántica.

La realidad que describe la teoría cuántica supone una ruptura radical con respecto a la de la física clásica. En mecánica

cuántica las partículas no poseen posiciones ni velocidades definidas. Solo adquieren tales atributos cuando un observador los mide. En algunos casos, los objetos individuales ni siquiera tienen una existencia independiente, sino que existen solo como parte de un conjunto mayor. La física cuántica también acarrea importantes implicaciones para nuestro concepto del pasado. En física clásica, el pasado existe como una serie definida de eventos. Pero, en física cuántica, el pasado (al igual que el futuro) es indefinido y existe solo como un espectro de posibilidades. Incluso el universo como un todo no tiene un único pasado o historia. La física cuántica nos presenta una realidad muy diferente de la de la física clásica, por más que esta última concuerde con nuestra intuición y nos permita levantar edificios o puentes.

Tales ejemplos sugieren una interesante conclusión sobre la forma en que debemos interpretar la ciencia moderna: en nuestra opinión, el concepto de realidad nunca es independiente de la teoría usada para explicarla. En consecuencia, adoptamos un punto de vista que denominamos *realismo dependiente del modelo*: la idea de que una teoría física o una imagen del mundo consiste en un modelo (por lo general, de naturaleza matemática) y un conjunto de reglas que conectan los elementos del modelo con las observaciones. De acuerdo con esta doctrina, carece de sentido preguntarse si un modelo es real. Lo único que procede cuestionarse es si este se halla o no en acuerdo con las observaciones. Si dos modelos concuerdan con el experimento, ninguno de ellos puede considerarse más real que el otro. Uno siempre será libre de elegir el que le resulte más conveniente para describir la situación considerada.

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

La idea de las realidades alternativas constituye un tema recurrente en la cultura popular. En el filme de ciencia ficción *Matrix*, los humanos viven, sin saberlo, en una realidad virtual generada por ordenadores inteligentes a fin de mantenerlos pacíficos e ignorantes del hecho de que, mientras tanto, las máquinas succionan su energía bioeléctrica —sea lo que sea esto—. ¿Cómo sabemos que no somos personajes generados por ordenador que viven en un mundo como el de *Matrix*? Si viviéramos en un mundo virtual, los sucesos no tendrían por qué seguir ninguna lógica ni por qué obedecer ley alguna. Los extraterrestres al mando de esa realidad quizá encontrarán interesante o divertido observar nuestra reacción si, de pronto, todo el mundo decidiera que el chocolate es repulsivo o que declarar la guerra carece de sentido. Algo así nunca ha sucedido.

Pero, si los extraterrestres creasen leyes físicas coherentes, no habría forma de discernir otra realidad detrás de la simulada. Resulta tentador llamar «mundo real» a aquel en el que viven los extraterrestres y «mundo falso» al generado por ordenador. Pero si (como nosotros) los seres en el mundo simulado no pudieran observar su universo desde fuera, tampoco tendrían ninguna razón para dudar de su representación de la realidad.

Los peces se encuentran en una situación similar. Su visión no es la misma que la nuestra, pero siempre podrían formular leyes científicas que rigiesen el movimiento de los objetos exteriores. Puesto que la luz se curva al pasar del aire al agua, un objeto que, visto desde fuera, se moviese con velocidad constante y en línea recta sería visto por el pez como si siguiese una trayectoria curva. Pero el pez podría formular leyes científicas desde su sistema de referencia distorsionado. Las mismas siempre serían ciertas y le permitirían predecir el movimiento de los objetos fuera de la pecera. Sus leyes serían más complicadas que las nuestras, pero la simplicidad no es más que una cuestión de gusto. Si el pez formulara su teoría, tendríamos que admitir su punto de vista como una descripción válida de la realidad.

Un conocido ejemplo lo constituyen el modelo geocéntrico de Ptolomeo y el modelo heliocéntrico de Copérnico. Aunque suele decirse que Copérnico invalidó el modelo de Ptolomeo, semejante conclusión es falsa. Al igual que en el ejemplo del pez, uno puede usar cualquiera de las dos descripciones como modelo del universo. Con independencia de nuestras suposiciones acerca de qué cuerpo, la Tierra o el Sol, se halla en reposo, ambas teorías explican las observaciones celestes. A pesar de su importancia en los debates filosóficos sobre la naturaleza del universo, la única ventaja del sistema copernicano reside en que las ecuaciones se tornan mucho más sencillas si elegimos como sistema de referencia aquel en el que el Sol se encuentra en reposo.

El realismo dependiente del modelo no solo se aplica a los modelos científicos, sino también a los modelos (conscientes o inconscientes) que todos empleamos para interpretar el mundo cotidiano. Nuestro cerebro procesa un tosco caudal de datos procedentes del nervio óptico. Combina la información que le

proporcionan ambos ojos, mejora la resolución y completa los espacios en blanco, como el que se produce en el punto ciego. Además, genera la impresión de un espacio tridimensional a partir de los datos en dos dimensiones que envía la retina. Cuando vemos una silla, solo empleamos la luz reflejada por el objeto para construir una imagen mental (o modelo) de la silla. La eficacia de nuestro cerebro a la hora de construir modelos es tal que, aunque nos hallemos provistos de gafas que invierten la imagen, el cerebro la modificará y, al poco, la silla volverá a aparecer en su posición habitual (con algo de suerte, antes de que intentemos sentarnos).

DESTELLOS DE UNA TEORÍA PROFUNDA

En la búsqueda en pos de leyes definitivas de la física, ningún candidato ha generado mayor esperanza —ni más controver-



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Daniel Cremades: *La escurridiza teoría del todo, Perspectivas de unificación*; Ramón Pascual: *La física y los diagramas de Feynman, Agujeros negros cuánticos, El universo cuántico autoorganizado*; Luis Bou: *Revolución en la física de partículas*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *El origen del universo*; Ernesto Lozano Tellechea: *Buscando vida en el multiverso*; Raquel Santamarta: *¿Es la teoría de cuerdas una ciencia?*

PORTADA: Keith Peters

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins,
John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
PRESIDENT Steven Inchoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

Copyright © 2011 Scientific American Inc.,
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917.

Copyright © 2011 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

sia— que la teoría de cuerdas. Esta se propuso en la década de los setenta como un intento de unificar todas las fuerzas de la naturaleza en un esquema coherente que, en particular, lograría compatibilizar la fuerza de la gravedad con las leyes de la física cuántica. Sin embargo, a principios de los noventa se descubrió que la teoría adolecía de un serio inconveniente: no había una única teoría de cuerdas, sino cinco.

El asunto dejaba en bastante mala posición a quienes propugnaban que la teoría de cuerdas constituía la única teoría del todo. Sin embargo, a mediados de los noventa se descubrió que esas cinco teorías (a las que se sumó otra más, la teoría de supergravedad en once dimensiones) describían, en realidad, los mismos fenómenos. Ello hizo que muchos albergasen la esperanza de que, algún día, todas esas versiones llegarían a unirse en una sola teoría. Todas ellas se encuentran relacionadas por dualidades: una especie de diccionarios matemáticos que traducen conceptos de una teoría a otra. Por desgracia, cada teoría solo describe adecuadamente los fenómenos bajo determinadas condiciones (por ejemplo, a bajas energías), pero ninguna logra describir por sí sola cada aspecto del universo.

Hoy día, los físicos se hallan convencidos de que las cinco teorías de cuerdas solo representan aproximaciones diferentes a una teoría más fundamental, a la que se ha dado en llamar *teoría M*. (Nadie parece saber a qué alude la «M»; quizás a «maestro», «milagro», «misterio», o a las tres a la vez.) Si bien es cierto que aún seguimos tratando de descifrar sus características, se diría que la esperanza de hallar una única teoría de la naturaleza se ha vuelto insostenible. Parece que, para explicar el universo, hemos de emplear una teoría u otra en función de la situación que deseemos describir. En este sentido, la teoría M no es una teoría en el sentido habitual, sino un conjunto de teorías. Ocurre con ella algo parecido a lo que sucede con los mapas: para representar de manera fidedigna la superficie de la Tierra sobre un plano, hemos de usar una colección de mapas, cada uno de los cuales cubre una región limitada. Los mapas se solapan y, en las zonas donde lo hacen, muestran el mismo paisaje. De manera similar, los miembros de la familia de la teoría M quizá parezcan muy diferentes, pero todos ellos pueden entenderse como versiones de una misma teoría subyacente. Y, en las zonas donde se solapan, todas ellas predicen los mismos fenómenos, si bien ninguna funciona bien en todas las situaciones.

Siempre que desarrollamos un modelo del mundo que tiene éxito en algún aspecto tendemos a atribuirle la cualidad de realidad o de verdad absoluta. Pero la teoría M, como el ejemplo del pez, muestra que una misma situación física puede modelizarse de varias maneras, cada una de las cuales emplea diferentes conceptos y elementos fundamentales. Es posible que para describir el universo hayamos de emplear teorías diferentes en situaciones distintas, y puede que cada teoría implique su propia versión de la realidad. Pero, de acuerdo con el realismo dependiente del modelo, tal diversidad es aceptable y ninguna de las versiones puede arrogarse la cualidad de ser más real que las restantes. Esto no se corresponde con lo que, a lo largo de la historia, los físicos han esperado de una teoría de la naturaleza. Tampoco casa bien con nuestra idea habitual de realidad. Pero quizá sea la manera en que el universo hace las cosas.

PARA SABER MÁS

La *teoría M*. Michael J. Duff en *Investigación y Ciencia*, abril de 1998.
El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *Investigación y Ciencia*, enero de 2006.
El gran diseño. Stephen Hawking y Leonard Mlodinow. Editorial Crítica, 2010.