

# TEMAS 43

INVESTIGACION  
**CIENCIA**

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

# Fronteras de la física



1º trimestre 2006

6,50 EURO





# Sumario

## MUCHOS MUNDOS

---

**4 El paisaje de la teoría de cuerdas**  
*Raphael Bousso y Joseph Polchinski*

**14 Universos paralelos**  
*Max Tegmark*

**27 Salir de la oscuridad**  
*Georgi Dvali*

## PRINCIPIO HOLOGRAFICO E INFORMACION

---

**36 Los agujeros negros  
y la paradoja de la información**  
*Leonard Susskind*

**42 La información en el universo holográfico**  
*Jacob D. Bekenstein*

**50 El espacio, ¿una ilusión?**  
*Juan Maldacena*

## ESPACIOTIEMPOS CUANTICOS Y GRANULARES

---

**58 Geometría no conmutativa  
y espaciotiempo cuántico**  
*José L. Fernández Barbón*

**68 Átomos del espacio y del tiempo**  
*Lee Smolin*

## SOBRE LA MASA

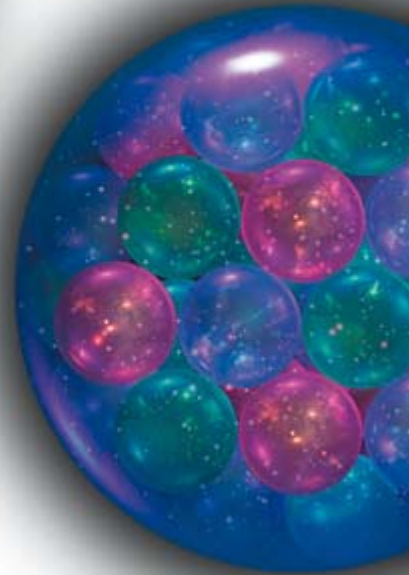
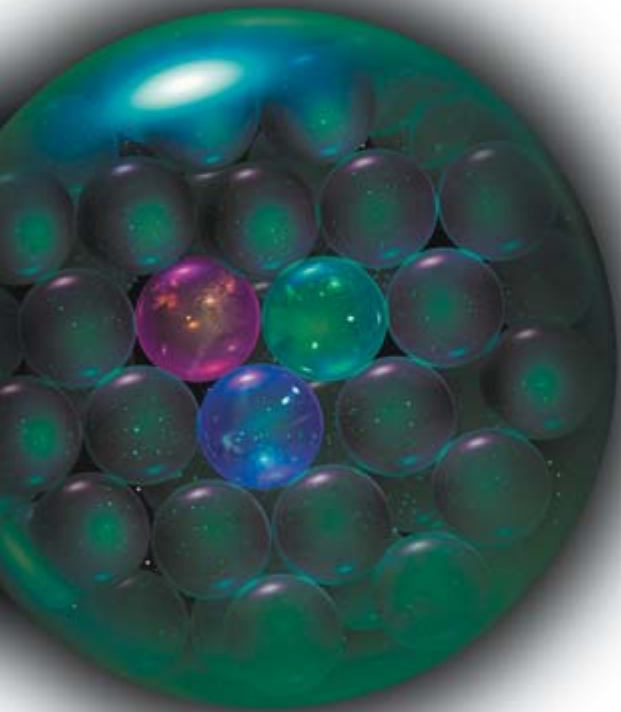
---

**78 Los misterios de la masa**  
*Gordon Kane*

**86 La resolución del problema de los neutrinos solares**  
*Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein y David L. Wark*

**95 La masa de los neutrinos**  
*Pasquale di Bari*

# MUCHOS MUNDOS



# El paisaje de la teoría de cuerdas

*La teoría de cuerdas predice que el universo ocupa al azar un “valle” de entre una colección casi infinita de hondonadas en un inmenso paisaje de posibilidades*

Raphael Bousso y Joseph Polchinski

Según la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, la gravedad equivale a la geometría del espacio y el tiempo, combinados en el espaciotiempo. Cualquier cuerpo dotado de masa deja una huella en la conformación de éste, según una ecuación formulada por Einstein en 1915. La masa de la Tierra, por ejemplo, hace que el tiempo transcurra un poco más deprisa para una manzana en lo alto de un árbol que para un físico que trabaje a su sombra. Cuando la manzana cae, en realidad responde a esa alteración del tiempo. La curvatura del espaciotiempo mantiene a la Tierra en órbita alrededor del Sol y aleja cada vez más a las galaxias remotas. Esta bella y sorprendente idea ha sido confirmada por numerosos experimentos de gran precisión.

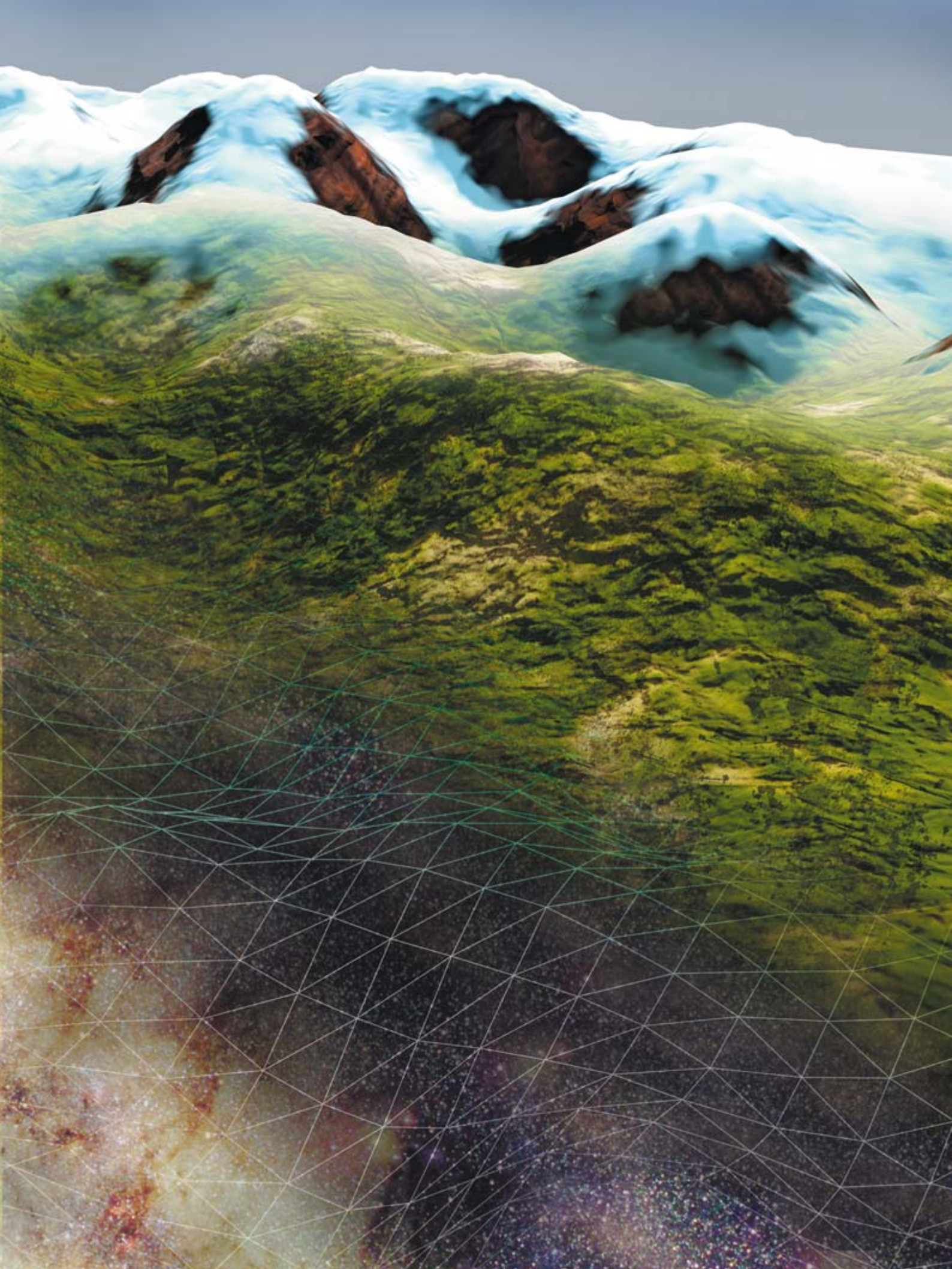
Visto lo acertado que fue reemplazar la fuerza gravitatoria con la dinámica del espacio y del tiempo, ¿por qué no buscar una explicación geométrica para las demás fuerzas de la naturaleza, e incluso para el repertorio de partículas elementales? En esa búsqueda se empeñó Einstein gran parte de su vida. Le atrajeron en particular los trabajos del alemán Theodor Kaluza y del sueco Oskar Klein; mientras la gravedad refleja la forma de las cuatro dimensiones espaciotemporales que nos resultan familiares, el electromagnetismo, sostenían, resulta de la geometría de una quinta dimensión adicional demasiado sutil para que se vea directamente (al menos hasta ahora). La pesquisa de Einstein en pro de una teoría unificada con frecuencia se tilda de fracaso. Más bien, fue un intento prematuro: había que comprender primero las fuerzas nucleares y el papel crucial de la teoría cuántica de campos en la formulación de la física, conocimientos que no se alcanzaron hasta el decenio de 1970.

La búsqueda de una teoría unificada es una de las más destacadas actividades de la física teórica actual, y justo como había previsto Einstein, a los conceptos geométricos les toca un papel clave. La concepción de Kaluza-Klein ha sido desenterrada y ampliada, y se la ha incorporado a la teoría de cuerdas, un marco prometedor para la unificación de la mecánica cuántica, la relatividad general y la física de partículas. Tanto en la conjetura de Kaluza-Klein como en la teoría de cuerdas, las leyes de la física que nos son conocidas están sujetas a la forma y la talla de dimensiones microscópicas adicionales. ¿Qué determina su forma? Recientes avances teóricos y experimentales sugieren una respuesta sorprendente, objeto de controversia, que altera en gran medida nuestra imagen del universo.

LA TEORÍA DE CUERDAS predice un paisaje teórico poblado por innumerables universos posibles. El paisaje tiene quizá  $10^{500}$  valles; cada uno corresponde a un conjunto de leyes de la física válidas en vastas burbujas del espacio. Nuestro universo visible estaría situado en una región pequeña de una de tales burbujas.

DON FOLEY







## La teoría de Kaluza-Klein y las cuerdas

Kaluza y Klein propusieron su idea de una quinta dimensión a principios del siglo XX, cuando los científicos conocían dos fuerzas: el electromagnetismo y la gravedad. Ambas decaen proporcionalmente al cuadrado de la distancia de su fuente; resultaba tentador imaginarse que estaban relacionadas. Kaluza y Klein comprendieron que la teoría geométrica de la gravedad de Einstein podría aportar esa conexión si existiera una dimensión espacial adicional, si el espaciotiempo tuviera cinco dimensiones.

La idea no es tan extravagante como parece. Si la dimensión espacial adicional está enroscada en un círculo suficientemente pequeño, habrá escapado a nuestros mejores microscopios, esto es, a los más potentes aceleradores de partículas (véase el recuadro “Dimensiones adicionales”). Además, ya sabemos —por la relatividad general— que el espacio es flexible. Las tres dimensiones que vemos se están expandiendo y fueron en otra época mucho más pequeñas, de modo que no resulta tan aventurado imaginar que existe otra dimensión que sigue siendo pequeña actualmente.

Aunque no podamos detectarla directamente, una dimensión adicional pequeña podría tener efectos indirectos que sí cabría observar. La relatividad general describiría entonces la geometría de un espaciotiempo de cinco dimensiones. Se pueden distinguir en esta geometría tres elementos: la forma de las cuatro dimensiones grandes del espaciotiempo, el ángulo entre la dimensión pequeña y las otras, y la circunferencia de la dimensión pequeña. El espaciotiempo grande se comporta según la relatividad general de cuatro dimensiones. En cada uno de sus puntos, el ángulo y la circunferencia poseen determinado valor, como dos campos definidos en el

espaciotiempo que tomen ciertos valores en cada punto. Sorprendentemente, el campo del ángulo reproduce un campo electromagnético que vive en el mundo de cuatro dimensiones. Dicho de otra manera, las ecuaciones que gobiernan su comportamiento son idénticas a las del electromagnetismo. La circunferencia determina las intensidades relativas de las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias. Así pues, de una teoría de sólo la gravedad en cinco dimensiones, se obtiene una teoría tanto de la gravedad como del electromagnetismo en cuatro.

La posibilidad de las dimensiones adicionales ha acabado adquiriendo también relevancia en la unificación de la relatividad general y la mecánica cuántica. En la teoría de cuerdas, uno de los enfoques preferidos para esa unificación, las partículas son en realidad objetos unidimensionales, pequeñas hebras o anillos en vibración. El tamaño típico de una cuerda es del orden de la longitud de Planck, esto es,  $10^{-33}$  centímetros. Por consiguiente, una cuerda parecerá un punto a no ser que se amplíe hasta esas escalas.

Para que las ecuaciones de la teoría sean matemáticamente coherentes, la cuerda tiene que vibrar en 10 dimensiones espaciotemporales; existirán, pues, seis dimensiones adicionales, demasiado pequeñas para que se las detecte. Además de las cuerdas, puede haber inmersas en el espaciotiempo unas láminas de varias dimensiones conocidas como “branas” (palabra derivada de “membranas”). Según la idea original de Kaluza-Klein, las funciones de onda cuánticas de las partículas ordinarias llenarían la dimensión adicional: las partículas mismas se extenderían por la dimensión adicional. La teoría de cuerdas, por el contrario, puede quedar confinada en una brana. La teoría de cuerdas también involucra flujos, fuerzas que pueden ser representadas por líneas de campo, de manera similar

a la representación de las fuerzas en el magnetismo clásico (no cuántico).

En conjunto, el cuadro que dibuja la teoría de cuerdas parece más complicado que la teoría de Kaluza-Klein, pero la estructura matemática subyacente es en realidad más unificada y completa. Retiene la noción principal de la teoría de Kaluza-Klein: las leyes físicas que vemos dependen de la geometría de dimensiones adicionales ocultas.

### ¿Demasiadas soluciones?

La cuestión es: ¿qué determina la geometría? La relatividad general proporciona una respuesta: el espaciotiempo debe satisfacer las ecuaciones de Einstein; en palabras de John Wheeler, de la Universidad de Princeton, la materia le dice al espaciotiempo cómo curvarse, y el espaciotiempo le indica a la materia cómo moverse. Pero la solución de las ecuaciones no es única, de modo que están permitidas muchas geometrías diferentes. El caso de la geometría de cinco dimensiones de Kaluza-Klein constituye un ejemplo simple de esta falta de unicidad. La circunferencia de la dimensión pequeña puede tomar cualquier tamaño: en ausencia de materia, cuatro dimensiones grandes planas, más un círculo de cualquier tamaño, son una solución de las ecuaciones de Einstein. (También se dan otras soluciones múltiples similares cuando está presente la materia.)

En la teoría de cuerdas se tienen varias dimensiones adicionales, lo cual resulta en muchos más parámetros ajustables. Una dimensión adicional sólo se puede enroscar en un círculo. Cuando existen más, el manojo de dimensiones adicionales puede tomar muchas formas diferentes (técnicamente, “topologías”), tales como una esfera, una rosquilla, dos rosquillas unidas y así sucesivamente. Cada rosquilla (que forma como un “asa”) tiene una longitud y una circunferencia, lo que resulta en un amplísimo repertorio de geometrías posibles para las dimensiones pequeñas. Dejando de lado las asas, otros parámetros corresponden a las posiciones de las branas y las diferentes cantidades de flujo enrollado en torno a cada rizo (véase el recuadro “El estado del vacío”).

Pero las soluciones de esta vasta colección no son equivalentes: cada configuración tiene una energía potencial, determinada por los flujos,

## RESUMEN

- Según la teoría de cuerdas, las leyes de la física que observamos dependen de la manera en que las dimensiones adicionales del espacio se curven como una diminuta sortija.
- El mapa de las posibles configuraciones de las dimensiones adicionales dibuja un “paisaje” donde cada valle corresponde a un conjunto de leyes estable.
- El universo visible entero se halla en una región del espacio asociada a un valle del paisaje donde las correspondientes leyes de la física permiten la evolución de la vida.