

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEUROCIENCIA
¿Cómo afecta
el sueño
a las sinapsis?

ENTOMOLOGÍA
Uso forense
de insectos
necrófagos

HISTORIA
El rompecabezas
infrarrojo
de Herschel

INFORME ESPECIAL

Matemáticas del planeta *Tierra*

Una ciencia global
para un mundo
complejo
y cambiante



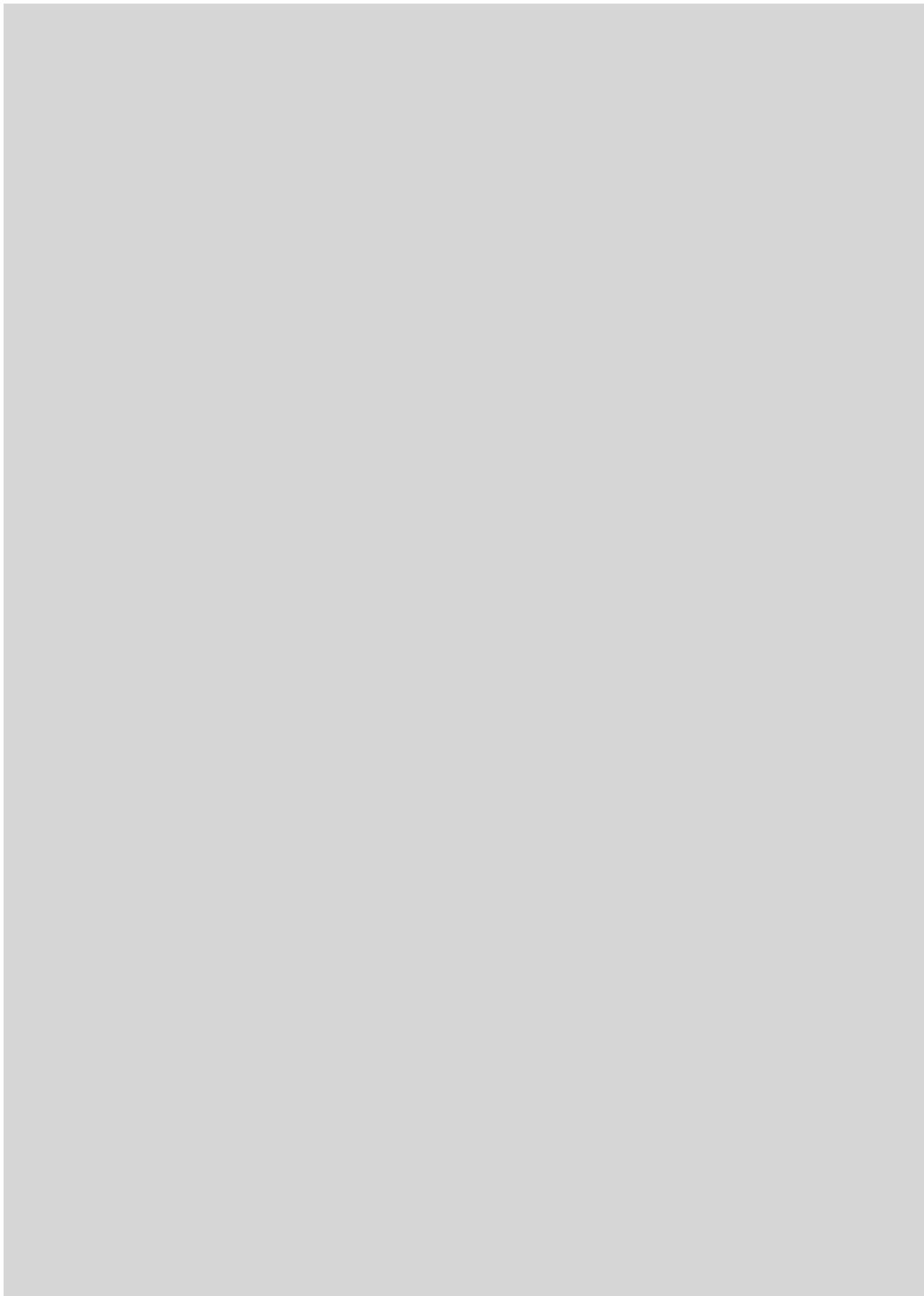
$$X' = -\sigma X + \sigma Y,$$

$$Y' = -XZ + rX - Y,$$

$$Z' = XY$$



6,50 EUROS



ARTÍCULOS

NEUROCIENCIA

18 **Los beneficios del sueño**

Cuando dormimos se debilitan las conexiones entre nuestras neuronas. Al parecer, ello reduce el consumo de energía y, paradójicamente, ayuda a la memoria. *Por Giulio Tononi y Chiara Cirelli*

FILOSOFÍA DE LA FÍSICA

24 **¿Qué es real?**

Los físicos hablan de un mundo compuesto de partículas y campos de fuerza. Sin embargo, ¿qué representan dichos conceptos? En su lugar, el universo podría consistir en colecciones de propiedades, como la forma y el color. *Por Meinard Kuhlmann*

BIOINGENIERÍA

32 **Un delfín con prótesis**

Winter, una cría de delfín, perdió la cola al enredarse en una nasa. Pero los científicos le hicieron una nueva. *Por Emily Anthes*

ANTROPOLOGÍA

36 **¿Se halla la cultura en los genes?**

La sociobiología afirma que la violencia y el altruismo se hallan controlados por genes. La idea ha suscitado, y todavía lo hace hoy, fuertes críticas. *Por Régis Meyran*

HISTORIA DE LA FÍSICA

60 **Herschel y el rompecabezas de la radiación infrarroja**

La elucubración mental de un astrónomo consiguió relacionar luz y calor por primera vez. *Por Jack R. White*

INFORME ESPECIAL LAS MATEMÁTICAS DEL PLANETA TIERRA

47 **Las matemáticas, una ciencia global**

Por Manuel de León

50 **La Tierra, un sistema de fluidos**

Por Ana M. Mancho

52 **Modelos de balance energético y clima global**

Por Lourdes Tello

54 **Las matemáticas de la biodiversidad**

Por Jordi Bascompte

56 **Modelos de propagación de enfermedades**

Por Joan Saldaña

58 **Redes sociales y cooperación**

Por Anxo Sánchez

ENTOMOLOGÍA

70 **Insectos necrófagos**

Los artrópodos que colonizan un cadáver resultan de gran ayuda para los forenses. El análisis de su desarrollo arroja luz sobre la fecha de la muerte. *Por Emmanuel Gaudry*

METEOROLOGÍA

76 **Las próximas megainundaciones**

Enormes corrientes de vapor en la atmósfera, conocidas como ríos atmosféricos, han desencadenado inundaciones extremas cada 200 años. El cambio climático podría incrementar su frecuencia. *Por Michael D. Dettinger y B. Lynn Ingram*

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

3 Cartas de los lectores

4 Apuntes

Analgésico espinoso. Los robots ya saben escuchar. Cristales de sílice y carbonato de bario. El último aliento de una estrella. Proteínas de telaraña. Misterio mediterráneo.

7 Agenda

8 Panorama

Ruptura de simetría bajo inversión temporal.

Por José Bernabéu y Fernando Martínez-Vidal

Betalainas: colorantes naturales bioactivos.

Por José A. Fernández López y Pedro J. Giménez

Los anfibios y la contaminación química. *Por Andrés*

Egea Serrano, Rick A. Relyea y Miguel Tejedo

Origen fetal de las enfermedades.

Por Josep C. Jiménez-Chillarón

El impacto del mestizaje en México. *Por Gabriela*

Martínez Cortes y Héctor Rangel Villalobos

41 Historia de la ciencia

Wallace, el evolucionista radical.

Por Andrew Berry

44 De cerca

Agregaciones masivas. *Por Carlos Domínguez Carrió,*

Jordi Grinyó y Josep-Maria Gili

46 Foro científico

Volved a la vida, por favor. *Por George Church*

84 Curiosidades de la física

Historias del calendario. *Por Norbert Treitz*

88 Juegos matemáticos

Demostraciones visuales. *Por Bartolo Luque*

91 Libros

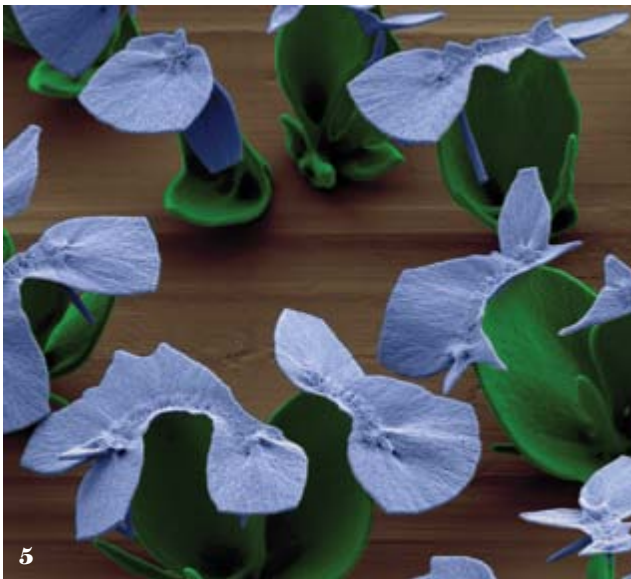
Ciencia. *Por Luis Alonso*

Matemáticas y electrones. *Por Xavier Roqué*

Naturaleza del universo. *Por Luis Alonso*

96 Hace...

50, 100 y 150 años.



EN PORTADA

Docenas de sociedades científicas han declarado el 2013 Año de las Matemáticas del Planeta Tierra. La iniciativa pretende destacar el papel clave de esta ciencia a la hora de modelizar un mundo cambiante y cada vez más complejo. En la actualidad, las matemáticas se aplican a diversas disciplinas globales, desde la geofísica y la climatología hasta la ecología, la epidemiología o nuestro comportamiento social. Imagen de iStockphoto/RomanOkony e Investigación y Ciencia.





Mayo y junio 2013

EVOLUCIÓN ESTELAR

En «Origen y evolución de los cúmulos estelares» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2013], Steven W. Stahler propone que la expansión de ciertos grupos estables de estrellas, los cúmulos abiertos, se debería a las estrellas binarias (parejas de estrellas que orbitan en torno a un centro común). Uno de los diagramas del artículo ilustra la manera en que una estrella de gran masa se acerca a uno de esos pares, forma una nueva pareja estable con el mayor de los dos astros y acaba expulsando el más ligero. Consideremos, sin embargo, el mismo estado final pero con las velocidades invertidas: la estrella más ligera irrumpiría y acabaría expulsando la mayor de todas!

KEN KNOWLTON
Sarasota, Florida

Según Stahler, cuando un sistema binario de un cúmulo abierto expulsa una tercera estrella, esta última interactúa con los otros miembros del cúmulo e intercambia con ellos energía, lo que de manera efectiva «calienta» el cúmulo y hace que este se expanda. Pero, en ese proceso, ¿no perdería energía la pareja expulsora? Ello menguaría las órbitas de sus astros y tal vez contribuyese a mantener compacto el cúmulo.

K. CYRUS ROBINSON

En palabras de Stahler, las estrellas se materializan «por coalescencia en el inte-

rior de inmensas nubes compuestas fundamentalmente por moléculas de hidrógeno, junto con otros elementos y una pequeña proporción de polvo». Conocemos bien el proceso por el que fueron creados los elementos, pero ¿en qué consiste la naturaleza de ese polvo? ¿Cómo se originó?

HAROLD W. SIMONS
Weiser, Idaho

RESPONDE STAHLER: *Con referencia a la pregunta de Knowlton, los sistemas de estrellas en interacción evolucionan de acuerdo con pautas bien definidas. Dicho comportamiento demuestra que la entropía total del sistema aumenta a medida que este evoluciona según dichos patrones. Es cierto que, al menos en principio, siempre resultaría posible invertir las velocidades de todas las estrellas y hacer que el sistema regresase a un estado de baja entropía. Sin embargo, la probabilidad de que algo así suceda se torna infinitamente pequeña a medida que aumenta el número de estrellas en el cúmulo.*

Robinson se halla en lo cierto al afirmar que, tras expulsar a la estrella más ligera, el par que permanece pierde energía y sus componentes describen órbitas menores. No obstante, semejante variación resulta minúscula en comparación con el aumento que experimentan las dimensiones totales del cúmulo.

En cuanto al polvo interestelar, este se compone de partículas de tamaño submicrométrico, formadas por silicatos y recubiertas por una capa de hielo. Dichas partículas se condensan a partir de los lentos vientos estelares que emanan de las gigantes rojas. Durante los procesos de formación estelar, esos humildes granos de polvo llegan a formar planetas rocosos, por lo que a ellos debemos también el origen de la Tierra.

LA MASA DEL NEUTRINO

En «Mensajeros fantasmales de nueva física» [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2013], Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod describen el estado de la investigación actual en torno al neutrino.

Una de las dificultades para entender las propiedades de dicha partícula reside en su masa. Como expone el artículo, durante el proceso de desintegración beta, un núcleo atómico emite un electrón y un

antineutrino (o dos de ellos, en el caso de dos desintegraciones simultáneas).

En vista de la dificultad que reviste medir la masa de las partículas que participan en dicho fenómeno, me gustaría saber con qué precisión pueden medirse hoy en día las masas del neutrón, el protón y el electrón. Si tales mediciones gozasen de la precisión suficiente, la masa del antineutrino quedaría determinada por una ecuación sencilla.

En caso de no alcanzar la precisión suficiente, ¿no podrían mejorarse las mediciones de la masa de esas partículas mediante técnicas más avanzadas?

CARL GRUEL
Kilmarnock, Virginia

RESPONDE PÄS: *En efecto, a fin de determinar la masa del neutrino se estudian los procesos de desintegración beta. No obstante, la relatividad especial establece la equivalencia entre masa y energía, por lo que el cálculo de la masa del antineutrino emitido no se reduce a una simple diferencia entre la masa del neutrón y la suma de las masas del protón y el electrón; en dicha ecuación intervienen, además, la energía cinética del antineutrino y la del electrón. La manera de proceder consiste en examinar la máxima energía posible del electrón y comprobar si este puede hacerse cargo de la cantidad de energía necesaria para cuadrar la balanza. En caso contrario, la diferencia corresponde a la masa del neutrino.*

El problema, pues, se reduce esencialmente a medir la energía del electrón. El instrumento adecuado para tal fin es un espectrómetro. En estos momentos se encuentra en construcción en la ciudad alemana de Karlsruhe el experimento KATRIN, que incluye un enorme espectrómetro de 24 metros de longitud.

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.º, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



MEDICINA

Analgésico espinal

Aunque la medicina ha avanzado lo suficiente como para tratar cefaleas, distensiones musculares y la agonía de empastarse una muela, el dolor inflamatorio (como el resultante de la artrosis, el cáncer de huesos o las lesiones de espalda) constituye un objetivo mucho más esquivo. Los remedios actuales, incluidos la morfina y otros opiáceos, afectan de forma masiva a todos los nervios del cuerpo, provocando peligrosos efectos secundarios. Tratamientos locales, como las inyecciones de esteroides, pierden efecto con el tiempo. Un nuevo estudio trabaja con la toxina extraída de un raro cactus marroquí, que podría proporcionar un alivio local y permanente del dolor con solo una inyección.

El compuesto, denominado resiniferatoxina (RTX), funciona destruyendo específicamente las neuronas responsables del dolor inflamatorio. Estas neuronas se extienden desde la periferia del cuerpo (incluidos la piel y los órganos internos) hasta la médula espinal, transportando las señales dolorosas a lo largo de sus axones hacia el cerebro. Inyectada directamente en el fluido espinal, la RTX reconoce y mata únicamente las neuronas que producen la proteína TRPV1, la cual transmite la sensación de calor nocivo e inflamación.

No perjudica al tejido normal ni a otros nervios nociceptores, como los que producen la sensación de pinchazos o pellizcos.

La RTX se ha utilizado en ensayos con perros que sufrían dolor debilitante y los resultados son prometedores. A diferencia de los roedores, los perros experimentan el dolor de una forma similar a las personas. «Y tienen personalidad», afirma Andrew Mannes, de los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU. (NIH). «Podemos obtener información sobre su psique que no es posible conseguir en el caso de las ratas.»

Los NIH están ensayando RTX en personas con cáncer avanzado. Aunque Mannes y sus colaboradores no pueden predecir cuándo tendrán datos, el estudio ha despertado el interés de los expertos en dolor. Según David Maine, del Centro Médico Mercy de Baltimore, hay otras formas de eliminar las fibras nociceptoras, como el uso del alcohol para destruir los nervios, pero en ocasiones el dolor vuelve y se intensifica. «Cuando se puede determinar con precisión dónde actuará un medicamento y evitar otras consecuencias, se ha encontrado una buena herramienta», afirma Maine.

—Arlene Weintraub

Los robots ya saben escuchar

Los robots ya pueden entender y reaccionar ante la voz gracias a programas de reconocimiento de voz, como el Siri de iPhone. Sin embargo las máquinas «inteligentes» tienen dificultades a la hora de interpretar otros sonidos. «En cierto sentido el problema es más sencillo, pero se ha trabajado poco con los ruidos ambientales», afirma Joseph Romano, experto en robótica de Rethink Robotics, en Boston. «Esos ruidos no forman parte de la información con la que se ha programado a los robots.»

Ahora, Romano quiere que las máquinas hagan algo más que escuchar nuestras conversaciones. Junto con sus colaboradores de la Universidad de Pensilvania ha creado una herramienta informática denominada ROAR (sistema operativo robótico de reconocimiento de audio de código abierto) que permite que los aparatos respondan a una gama de sonidos mucho más amplia. Como se describe en un número reciente de la revista *Autonomous Robots*, el requisito fundamental de la herramienta es un simple micrófono.

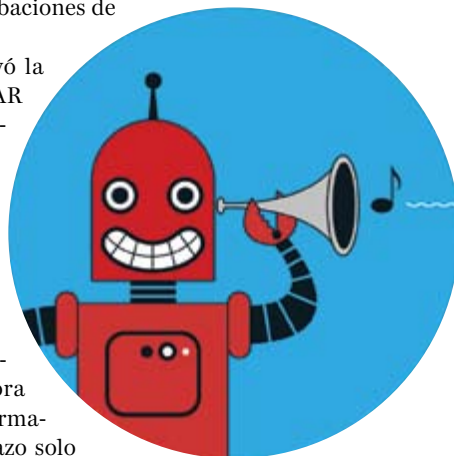
Para comenzar el entrenamiento, el micrófono del robot capta primero el sonido ambiente, permitiendo a ROAR eliminar el ruido estático. Después, el operador enseña a ROAR a reconocer los sonidos clave realizando repetidamente una acción concreta, como cerrar una puerta o activar la alarma de un teléfono móvil, y etiquetando las características sonoras únicas de la misma mientras el aparato escucha. Finalmente, el programa crea un modelo general del sonido de cada acción a partir

de esa serie de grabaciones de entrenamiento.

El grupo ensayó la herramienta ROAR en un brazo robótico, lo que mejoró su capacidad para llevar a cabo ciertas tareas. En una de las pruebas, el robot intentaba agarrar y activar de forma autónoma una taladradora eléctrica. Sin información sonora, el brazo solo lo consiguió en nueve de cada veinte intentos, pero su tasa de éxito se duplicó al utilizar ROAR. Si después de un intento la máquina no oía el zumbido del motor eléctrico, reajustaba su agarre y lo intentaba de nuevo.

El paso siguiente consiste en asegurar que el sistema funcione en entornos ruidosos. La integración de la información sonora en el ciclo de información de un robot junto con estímulos visuales y táctiles podría permitir que un día haya enfermeras mecánicas que respondan rápidamente a las peticiones de ayuda o que los robots de las fábricas reaccionen cuando algo se rompe. Aunque la tecnología aún se encuentra en pañales, Romano piensa que tiene un enorme potencial.

—Gregory Mone



¿QUÉ ES ESTO?

No se trata de flores azules creciendo en la tierra, sino de cristales de sílice y carbonato de bario sobre un portaobjetos de vidrio. Wim L. Noorduin, estudiante postdoctoral en la Universidad Harvard, consigue que la formación de los cristales produzca diseños que recuerdan a hojas, tallos y pétalos, para fotografiarlos mediante un microscopio electrónico de barrido. Después, colorea las imágenes en blanco y negro.

Las variaciones en las formas provienen de pequeños cambios en la temperatura, la acidez o el contenido en dióxido de carbono de una disolución química. Esta técnica de automontaje, publicada en mayo en la revista *Science*, podría llegar a sustituir en un futuro a las litografías utilizadas para la fabricación de microchips, una técnica costosa en tiempo y en dinero. Los métodos de Noorduin también podrían aumentar la eficiencia de los catalizadores químicos por medio de superficies con arrugas y pliegues que aceleran las reacciones en cadena.

—Luciana Gravotta



El último aliento de una estrella

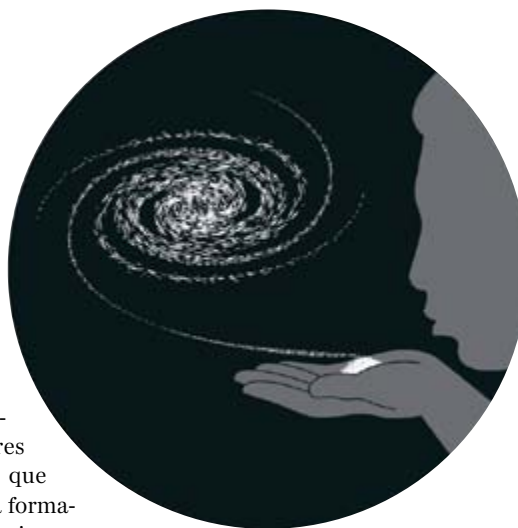
Dos meteoritos hallados en la Antártida parecen contener granos de sílice (el material del que se componen el cuarzo y la arena) procedente de una supernova que habría estallado antes de que se formase el sistema solar. Algunos investigadores creen que hubo de ser una explosión estelar de esa clase la que, hace miles de millones de años, desencadenó la génesis del sistema solar a partir de una nube de gas y polvo. Pero, al margen de que los meteoritos de la Antártida aporten o no información sobre semejante cataclismo, sí parecen contener el subproducto de una explosión de supernova nunca antes hallado en la Tierra.

El sílice encontrado en los meteoritos se distingue por su exótica mezcla de isótopos, «inexplicable por ninguno de los procesos conocidos que actúan en el sistema solar», según un estudio publicado el pasado mes de mayo en *Astrophysical Journal Letters*. Solo las reacciones nucleares que alimentan el interior de las estrellas podrían dar cuenta de semejante composición. En general, se cree que algunos de los materiales presolares que acabaron formando parte del sistema so-

lar podrían haberse originado en supernovas cercanas; otros, en cambio, habrían llegado a merced de los vientos estelares de estrellas viejas.

En el nuevo estudio, Pierre Haenecour, de la Universidad de Washington en San Luis, y sus coautores analizaron dos meteoritos hallados en la Antártida en 2003. Los investigadores concluyeron que el sílice (SiO_2) que contenían debía ser anterior a la formación del sistema solar debido a su riqueza en oxígeno 18, un isótopo pesado de dicho elemento. Esa composición sugiere que se habrían formado en una supernova de tipo II, una explosión iniciada por el colapso del núcleo de una estrella de gran masa. En el pasado, otros científicos habían encontrado sílice presolar en otros meteoritos, pero con una composición isotópica que indicaba que provenían de estrellas de la rama asintótica gigante, cierta clase de estrellas envejecidas.

Analizar esa clase de compuestos constituye mucho más que un ejercicio de historia interestelar. La formación



del Sol y los planetas a partir de una nube de gas y polvo pudo haberse desencadenado gracias a la onda expansiva de una supernova cercana o debido a las emisiones, más suaves, de una estrella de la rama asintótica gigante. Por tanto, el estudio de tales residuos primigenios no solo ayudará a profundizar en los violentos procesos interiores de las estrellas moribundas, sino que tal vez permita entender el evento que dio origen al Sol, la Tierra y los demás planetas.

—John Matson

PATENTES

Proteínas de telaraña: La seda ampulácea mayor constituye el tipo más resistente entre las que producen las arañas. En relación con su peso, resulta más fuerte que el Kevlar, que se utiliza en los chalecos antibalas. Sin embargo, los investigadores han hallado dificultades para integrar tal sustancia en materiales con uso práctico. La patente número 8.278.416 describe dos proteínas modificadas de telaraña y la manera de hacer que se autoensamblen. El material resultante carece de toxicidad; además, es biodegradable, fuerte y elástico, como la seda natural, afirma My Hedhammar, de la Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia y directora de I+D en Spiber Technologies, en Uppsala. Hedhammar y sus colaboradores sintetizaron las proteínas acortando la secuencia de genes identificada en las arañas e insertándola en la bacteria *Escherichia coli*. Consiguieron así que produjera grandes cantidades de las proteínas.

Las fibras obtenidas presentan una elevada resistencia y pueden ser hiladas, tejidas, retorcidas o incluso utilizadas para hacer en ganchillo un material similar a la seda. Las aplicaciones futuras podrían incluir vendas para heridas y andamiajes tisulares para la medicina regenerativa.

—Marissa Fessenden



Hilo de araña

Misterio mediterráneo

Los médicos y los especialistas en nutrición asocian desde hace tiempo la dieta mediterránea con beneficios para la salud, incluido un menor riesgo de sufrir la enfermedad de Alzheimer. Un estudio publicado en fecha reciente, realizado a lo largo de catorce años con 1880 personas de edad avanzada residentes en la ciudad de Nueva York, mostró que la incidencia del alzhéimer en los que habían seguido estrictamente una dieta mediterránea era entre un 32 y un 40 por ciento más reducida que en los que no habían seguido esta dieta.

El aceite de oliva virgen extra parece ser uno de los factores principales que explican esta reducción del riesgo de padecer alzhéimer. La gente que sigue una dieta mediterránea consume hasta 50 mililitros (en torno a la quinta parte de una taza) del fragante líquido verde cada día. Anteriormente, se pensaba que este beneficio provenía de la alta concentración de ácidos grasos monoinsaturados del aceite de oliva virgen extra. Pero en el año 2005, un grupo de científicos descubrió que el oleocantal, el compuesto natural del aceite causante de una sensación de quemazón picante en la parte posterior de la garganta, parecía tener un efecto reductor de la inflamación llamativamente similar al del ibuprofeno. Desde entonces, los investigadores han dirigido su atención a los posibles beneficios de esta sustancia en particular.

Algunos estudios han mostrado que el oleocantal interfiere con la característica formación de los ovillos neurofibrilares y placas de amiloide beta, que desempeñan una función clave en la devastación neurológica provocada por la enfermedad de Alzheimer. Una investigación publicada en el número digital de febrero de *ACS Chemical Neuroscience* ofrece nueva información sobre cómo actúa el compuesto. Los autores del estudio trataron cultivos de células encefálicas de ratón con diferentes concentraciones de oleocantal a lo largo de tres días. También administraron el compuesto diariamente a ratones vivos durante dos semanas, un experimento que nunca antes se había realizado. En ambos ensayos la administración de oleocantal produjo un aumento de los niveles de dos proteínas con el papel fundamental de transportar amiloide beta al exterior del cerebro así como de las enzimas que degradan el amiloide beta.



Los investigadores también introdujeron amiloide beta en el cerebro de ratones vivos. En comparación con los grupos de control, los múridos que recibieron oleocantal mostraron una mayor eficacia en la extracción y degradación del amiloide beta. «Estamos intentando comprender mejor el mecanismo del oleocantal y quizás encontrar compuestos que puedan funcionar del mismo modo para desarrollar medicamentos», afirma Amal K. Kaddoumi, de la Universidad de Luisiana, coautora en el estudio. Los resultados, señala, probablemente serán más aplicables a la prevención de la enfermedad de Alzheimer que a su tratamiento. También piensa que hay otros factores, además de un alto consumo de aceite de oliva, que explican el llamado «milagro mediterráneo», como el ejercicio y la gran cantidad de verdura fresca que se consume en esa región.

El oleocantal forma parte del grupo de sustancias con las que trabajan los científicos para extraer amiloide beta del cerebro. Otros compuestos destacados son un antiguo medicamento contra el cáncer de piel que, en un estudio del año pasado, ayudó a aliviar los síntomas del alzhéimer en ratones y anticuerpos que se unen directamente a la proteína amiloide beta y la eliminan. «Este estudio comienza a arrojar luz sobre cuáles son los componentes activos en los productos nutricéuticos», afirma Kenneth S. Kosik, profesor de la cátedra Harriman de neurociencias de la Universidad de California, en Santa Bárbara.

Kosik señala, sin embargo, que hasta que se realicen estudios clínicos en humanos conviene interpretar con cautela estos resultados. El grupo de Kaddoumi está tratando de obtener financiación que permita realizar estos ensayos.

—Rachel Nuwer

AGENDA

CONFERENCIAS

21 de octubre

Investigación, innovación y competitividad: el caso del CSIC

Emilio Lora Tamayo, presidente del CSIC
Ciclo «Desafíos del siglo XXI»
Residencia de Investigadores del CSIC
Barcelona
www.residencia-investigadors.es

28 de octubre

Lecciones de seguridad aprendidas tras el accidente del reactor nuclear de Fukushima

Yotaro Hatamura, Universidad de Tokio y Comisión de investigación sobre el accidente en las centrales nucleares de Fukushima
Fundación Ramón Areces, Madrid
www.fundacionareces.es

EXPOSICIONES

Exposición virtual

Matemáticas para el planeta Tierra

imaginary.org/exhibition/mathematics-of-planet-earth



OTROS

Del 7 al 10 de octubre - Congreso

Vacuna del SIDA 2013

Centro Internacional de Convenciones
Barcelona
www.vaccineenterprise.org/conference/2013

7 de octubre - Jornada

La teoría matemática de la comunicación

Sergio Verdú, Universidad de Princeton
Coloquio anual de la Real Sociedad Matemática Española
Facultad de Matemáticas
Universidad de Barcelona
www.rsme.es/content/view/1345/1

Del 27 al 30 de octubre - Simposio

Heterogeneidad y plasticidad tumoral

10º aniversario del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas
Auditorio de la Fundación Mutua Madrileña, Madrid
www.cnio.es

Ruptura de simetría bajo inversión temporal

¿Por qué algunos procesos cuánticos no se desarrollan al mismo ritmo que su versión opuesta?

Hace unos meses, el laboratorio del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) y el Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC) anunciaron la observación directa de la ruptura de simetría bajo inversión temporal en las leyes físicas. El hallazgo se basó en una técnica de análisis que propusimos el año pasado junto con Pablo Villanueva Pérez, también del IFIC, y en una serie de conceptos avanzados en 1999 por Mari Carmen Bañuls, ahora en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching, y uno de nosotros (Bernabéu). El estudio experimental, en el que también participamos, recibió la atención de la comunidad de física de partículas y de medios científicos internacionales. En este artículo explicaremos los detalles del experimento y la trascendencia del resultado.

La asimetría temporal observada es una de las más misteriosas y difíciles de detectar por medios directos. No guarda ninguna relación con la flecha del tiempo macroscópica, tan familiar en la vida cotidiana, sino que afecta a las leyes cuánticas que rigen el mundo microscópico. Además, se halla estrechamente ligada a una de las propiedades más enigmáticas de la naturaleza: la diferencia entre materia y antimateria.

El resultado fue obtenido a partir de un análisis de los datos acumulados entre 1999 y 2008 por el experimento BaBar, del SLAC. Este fue diseñado para estudiar la ruptura de la simetría CP , una sutil diferencia entre el comportamiento de algunas partículas y el de sus antipartículas. En el acelerador de Stanford se hacían colisionar electrones y positrones a energías muy elevadas con el objetivo de producir en grandes cantidades ciertas partículas conocidas como mesones B . Durante sus casi nueve años de servicio, el experimento BaBar registró unos quinientos millones de pares de mesones B .

Nuestro análisis se basó en la capacidad única de dicho experimento para producir pares entrelazados de mesones B . Decimos que dos partículas se hallan entrelazadas cuando sus propiedades cuánticas no son independientes entre sí. De esta manera, al medir el estado de una de ellas puede inferirse el de su compañera. Dicho método

nos permitió comparar ciertas transiciones entre pares de estados de mesones B con sus transiciones inversas. Al hacerlo, pudimos comprobar, con una gran significación estadística (14 desviaciones estándar), que ambos procesos no eran simétricos. Los resultados aparecieron publicados en noviembre de 2012 en la revista *Physical Review Letters*.

El teorema CPT

Hasta los años cincuenta del siglo xx , se pensaba que las leyes físicas tenían que permanecer invariantes bajo tres transformaciones fundamentales: inversión de paridad (P), conjugación de carga (C) e inversión temporal (T). Imaginemos un proceso en el que varias partículas interactúan y producen otras nuevas. Aplicar una transformación P a dicho proceso consiste en intercambiar las posiciones de todas las partículas por las de su reflexión especular (es decir, «izquierda» por «derecha»). Una transformación de tipo C sustituiría cada partícula por su correspondiente antipartícula. Por último, T supone «rebobinar» en el tiempo y considerar el proceso opuesto; ello implica invertir el sentido de las velocidades e intercambiar partículas iniciales y finales.

La comprensión de estas —y otras— simetrías, así como su ruptura, representa una pieza clave en la construcción del modelo estándar de la física de partículas. Hoy sabemos que las interacciones fuerte, electromagnética y gravitatoria resultan invariantes bajo esas tres transformaciones. Decimos por ello que son *simétricas* con respecto a C , P y T . En 1957, sin embargo, se descubrió que en algunos procesos asociados a las desintegraciones radiactivas (mediadas por la interacción débil) la simetría P estaba completamente rota. Es decir, mientras que algunos procesos tenían lugar, los asociados a su reflexión especular no se observaban.

En 1964, los físicos Val L. Fitch y James W. Cronin lideraron un experimento que mostraba que ciertas partículas inestables, los kaones, sufrían una minúscula pero inequívoca ruptura de la simetría combinada CP . Poco después se entendió que dicha asimetría resultaba necesaria para explicar el enorme desequilibrio entre

las cantidades de materia y antimateria presentes en nuestro universo actual. Muchos años después, en 2001, se descubrió en BaBar y en un experimento similar en Japón, Belle, que la simetría CP tampoco se respetaba en la desintegración de otra clase de partículas: los mesones B .

Sin embargo, existe un teorema fundamental que afirma que la aplicación conjunta de C , P y T sí debe constituir una simetría exacta de la naturaleza. Dicho teorema es considerado una piedra angular de la física de partículas, ya que se basa en tres principios muy generales y bien establecidos: la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica y la idea de que todas las interacciones se propagan por medio de campos.

El teorema CPT tiene varias consecuencias de primer orden. Entre ellas, que la masa y la vida media de una partícula deben ser exactamente iguales a las de su antipartícula. Además, la ruptura de la simetría CP requiere que la simetría T también esté rota, a fin de que sus efectos se compensen mutuamente. En ello radica la importancia de verificar de modo independiente la asimetría por inversión temporal: si un experimento mostrase una desviación con respecto a las predicciones del teorema CPT , las consecuencias serían revolucionarias.

La simetría T y la flecha del tiempo

La ruptura de la simetría T no debe confundirse con la irreversibilidad en la evolución de los sistemas físicos complejos. La habitual «flecha del tiempo» macroscópica se observaría igualmente aunque las leyes microscópicas respetasen la simetría T . Esa flecha temporal se debe al segundo principio de la termodinámica, el cual dicta que la entropía (una medida del desorden en un sistema físico) siempre aumenta con el tiempo.

Imaginemos un jarrón que cae al suelo y se rompe. Por más que todas las interacciones atómicas y moleculares sean invariantes bajo inversión temporal, jamás esperaríamos ver el proceso inverso, en el que los pedazos reconstruyen el jarrón original. La explicación a esta aparente paradoja la encontramos en la escasa probabilidad de obtener las condiciones iniciales

necesarias para que, al lanzar los pedazos, estos sigan las trayectorias opuestas y se unan de nuevo tras sufrir las mismas interacciones en orden inverso. Por tanto, dicha irreversibilidad se halla asociada a la existencia de un gran número de grados de libertad, no a una ruptura de la simetría T en las interacciones microscópicas.

Las desintegraciones de kaones o de mesones B no respetan la simetría CP . Por tanto, en dichos procesos esperaríamos ver también una ruptura de la simetría T . Pero, al igual que ocurre con el estallido de un jarrón, las desintegraciones de dichas partículas constituyen procesos irreversibles, lo que implica grandes dificultades para observar directamente la ruptura de simetría T . Además, mientras que el proceso de desintegración está mediado por la interacción débil, su inverso (la «reconstrucción» de un kaón o un mesón B a partir de sus restos) estaría dominado por las interacciones fuerte y electromagnética. Estas, que respetan la simetría T , son mucho más intensas que la primera, lo cual enmascara por completo el proceso que deseamos analizar.

En 1998, el experimento CPLEAR, del CERN, llevó a cabo un análisis con kaones neutros. Estas partículas, denotadas K^0 , poseen la propiedad de que pueden

transmutarse espontáneamente en su propia antipartícula, \bar{K}^0 . Los físicos de CPLEAR midieron una diferencia entre la probabilidad de transición del proceso $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ y la de su inverso, $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$, con una significación estadística cercana a cuatro desviaciones estándar. Con todo, la diferencia observada no permite distinguir por sí misma la ruptura de la simetría T independientemente de la ruptura de la simetría CP . Era preciso, pues, estudiar alguna alternativa.

Mesones B entrelazados

En el experimento BaBar, la energía de los electrones y los positrones se ajusta para que, al chocar, produzcan un mesón Y (úpilon). Dicho mesón es un estado inestable formado por un quark b y un antiquark \bar{b} . Una vez creado, se desintegra inmediatamente en un par de mesones B neutros. Al igual que los kaones, los mesones B neutros también «oscilan»: al propagarse, pueden mutar de identidad y convertirse en su propia antipartícula.

Consideremos el caso en que la partícula Y se desintegra en un par formado por un mesón B^0 (compuesto por un antiquark \bar{b} y un quark d) y su antipartícula, denotada \bar{B}^0 . Una vez producidos, cada uno de ellos comenzará a oscilar.

Sin embargo, dado que ambas partículas proceden de la desintegración del mismo mesón Y , sus propiedades se encuentran entrelazadas. Ello implica que, mientras ninguna de ellas se desintegre, las correlaciones cuánticas entre una y otra se mantendrán, por lo que sus oscilaciones serán «complementarias».

Supongamos que uno de los mesones B se desintegra en el instante t_1 . Los detectores del experimento registrarán sus productos de desintegración, gracias a lo cual se «filtra» un estado de dicho mesón en t_1 de entre todos los posibles. A su vez, esa información nos permite «etiquetar» el estado del otro miembro del par: debido al entrelazamiento, si en t_1 la partícula que se ha desintegrado ha filtrado un estado B^0 , el de su compañera solo puede ser identificado como su complementario, \bar{B}^0 . Después, esta partícula continuará oscilando y se desintegrará en un instante posterior, t_2 . Una vez más, al detectar sus productos de desintegración podremos filtrar el correspondiente estado en t_2 .

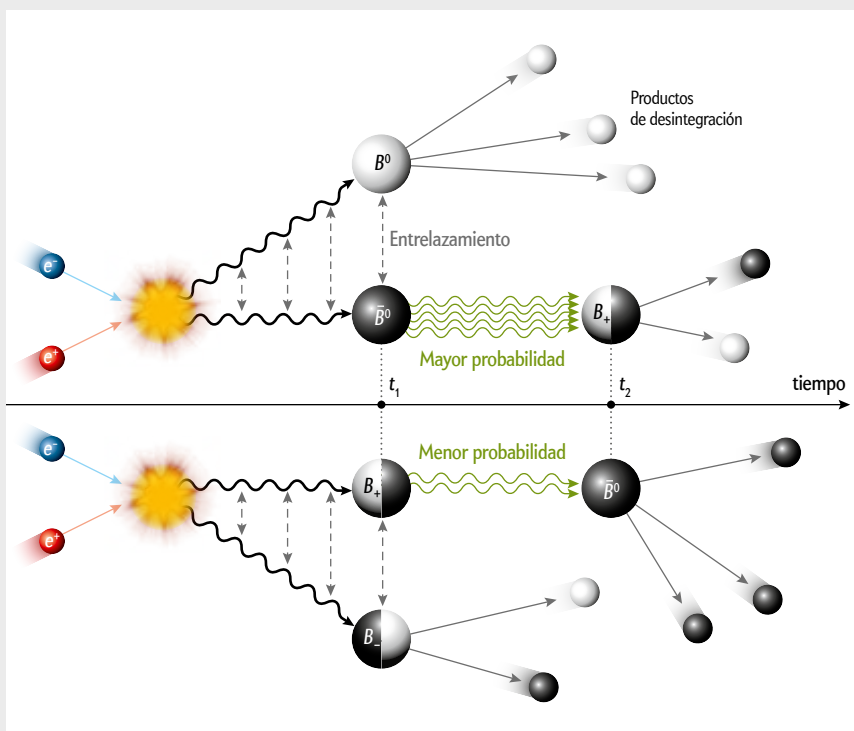
En general, una partícula cuántica queda descrita por una superposición de estados. En los procesos que estamos considerando, los estados que podemos filtrar o etiquetar no son solo los estados

INVERSIÓN TEMPORAL EN OSCILACIONES DE MESONES B

Los mesones B neutros son partículas que «oscilan»; al propagarse, su identidad fluctúa entre varios estados: B^0 (blanco), \bar{B}^0 (su antipartícula, negro) y dos superposiciones, B_+ (blanco-negro) y B_- (negro-blanco).

En el experimento BaBar, en Stanford, se hacían colisionar electrones (e^-) y positrones (e^+) para producir pares entrelazados de mesones B . Cuando un mesón B se desintegra, sus restos permiten «filtrar» en ese momento un estado de entre todos los posibles. Debido al entrelazamiento, esa información sirve también para «etiquetar» el estado de su compañero. Este segundo mesón continuará oscilando y se desintegrará en un instante posterior.

El «etiquetado» del segundo mesón en t_1 y su desintegración posterior en t_2 permite saber qué oscilación ha tenido lugar (en este ejemplo, $\bar{B}^0 \rightarrow B_+$). Al analizar otras colisiones, puede estudiarse la oscilación inversa ($B_+ \rightarrow \bar{B}^0$) y comparar las probabilidades de una y otra. La diferencia entre ambas indica una ruptura de la simetría por inversión temporal.



B^0 y \bar{B}^0 , sino también dos de sus combinaciones lineales, llamadas B_+ y B_- . Estas superposiciones se componen de los mismos quarks, pero se diferencian de los estados B^0 y \bar{B}^0 en sus productos de desintegración.

Los cuatro estados mencionados nos permiten estudiar ocho posibles transiciones: $\bar{B}^0 \rightarrow B_+$, $B_+ \rightarrow B^0$, $\bar{B}^0 \rightarrow B_-$, $B_- \rightarrow B^0$ y sus inversas. La asimetría bajo inversión temporal se observó al medir, para intervalos de tiempo fijos Δt ($\Delta t = t_2 - t_1$), la probabilidad de cada transición y compararla con la probabilidad de la transición inversa. Ambas resultaron ser distintas. La magnitud de dicha asimetría depende, además, del tiempo de transición consi-

derado (Δt), dado que esta se genera durante la evolución temporal entre las dos desintegraciones.

El fenómeno del entrelazamiento, uno de los más asombrosos de la mecánica cuántica, fue presentado durante largo tiempo como una paradoja (conocida como paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen) para rebatir que la mecánica cuántica fuese una teoría «completa». Sin embargo, esa no separabilidad entre las «partes» de un sistema cuántico ha sido demostrada experimentalmente, y en los últimos años su uso se ha generalizado en varios campos, como el de la información cuántica. En nuestro experimento, el entrelazamiento nos ha permitido explotar

las propiedades de los mesones B para demostrar que sus oscilaciones no son invariantes bajo inversión temporal.

Por último, los datos muestran que la ruptura de la simetría T compensa a la perfección la de la simetría CP observada en el mismo conjunto de procesos. Ello supone una confirmación más del teorema CPT : la materia que evoluciona en un sentido temporal se comporta igual que la reflexión especular de la antimateria que evoluciona en sentido opuesto.

—José Bernabéu
y Fernando Martínez Vidal
Instituto de Física Corpuscular
Valencia

QUÍMICA

Betalainas: colorantes naturales bioactivos

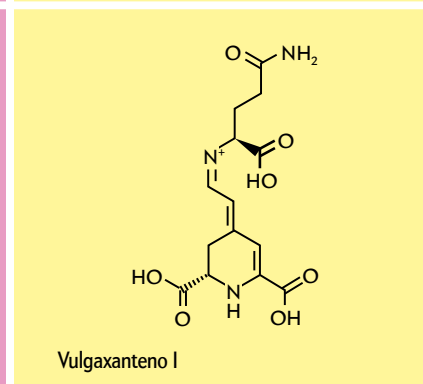
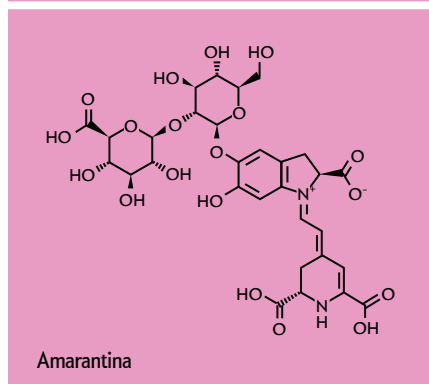
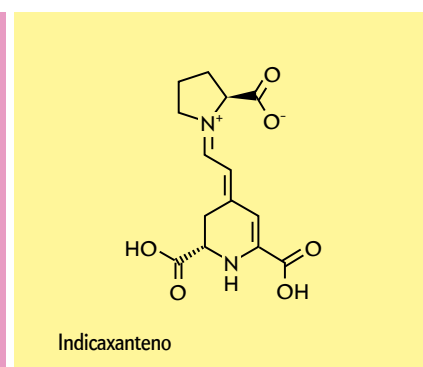
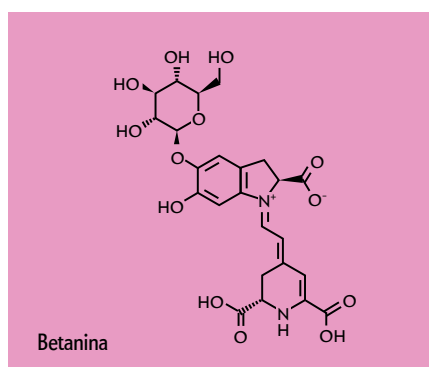
Debido a su carácter hidrosoluble, estabilidad y actividad antioxidante, estos pigmentos naturales están despertando el interés de la industria alimentaria

Los colorantes alimentarios vienen empleándose desde hace más de 4000 años. En la actualidad, se hallan presentes en la mayor parte de los alimentos industrializados, ya que incrementan su atractivo a ojos del consumidor. Un color estable y llamativo constituye un atributo de alto valor añadido en el competitivo mercado de las industrias elaboradoras de alimentos.

La mayoría de los colorantes alimentarios son de origen sintético. Dadas las altas dosis que llegan a ingerirse, sobre todo en edades infantiles, en los últimos años se ha fijado la atención en sus efectos sobre la salud. La Agencia de Seguridad Alimentaria de la Unión Europea recomienda minimizar el empleo de colorantes y aditivos en general, limitándolos a los casos en que exista una necesidad vinculada con la conservación, el sabor o la utilidad de los alimentos. Una investigación dirigida por Jim Stevenson, de la Universidad de Southampton, examinó los umbrales de seguridad del consumo diario de seis colorantes alimentarios sintéticos: amarillo de quinoleína (E104), amarillo anaranjado (E110), tartrazina (E102), azorrubina/carmoisina (E122), rojo allura AC (E129) y rojo ponceau 4R

(E124). Los resultados, publicados en 2007 en la revista *The Lancet*, advertían sobre posibles trastornos de atención en niños debidos a la ingesta de estas sustancias. Algunas legislaciones europeas ya obligan a incluir en las etiquetas de los productos eventuales efectos adversos causados por el consumo de las mismas.

Además de las recomendaciones de las autoridades sanitarias, la industria alimentaria tiene en cuenta también el comportamiento de los consumidores, que cada vez más muestran preferencia por los productos naturales. Por todo ello (motivos de seguridad alimentaria y de estrategia comercial), en los últimos años



MOLÉCULAS de cuatro de las betalainas más comunes, dos betacianinas (*púrpura*) y dos betaxantinas (*amarillo*).